

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

GERAÇÃO DE CORRENTES DE TURBIDEZ DE ALTA DENSIDADE:
CONDICIONANTES HIDRÁULICOS E DEPOSICIONAIS.

RAFAEL MANICA

Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Benjamin C. Kneller	University of Aberdeen - UK
Prof. Dr. Jaco H. Baas	Bangor University - UK
Prof. Dr. Luis A. M. Endres	IPH/UFRGS
Geol. Dr. Adriano R. Viana	CENPES/Petrobras S.A
Geol. Dr. Marco A. S. Moraes	CENPES/Petrobras S.A

Porto Alegre, 17 de Abril de 2009.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

GERAÇÃO DE CORRENTES DE TURBIDEZ DE ALTA DENSIDADE:
CONDICIONANTES HIDRÁULICOS E DEPOSICIONAIS.

RAFAEL MANICA

Orientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges

Colaborador: Rogério Dornelles Maestri

Porto Alegre, 17 de Abril de 2009.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação da Professora Ana Luiza de Oliveira Borges.

Durante o período de desenvolvimento deste trabalho várias pessoas contribuíram, de forma direta ou indireta, para que o mesmo se concretizasse seja pelo auxílio teórico, técnico ou didático oferecido, seja pelo estímulo moral e pessoal oferecido da mesma forma. Dentre essas pessoas gostaria de agradecer as seguintes:

A minha família, Pai, Mãe, Irmã, Cunhado e Sobrinhos que apesar de não entender muito o que eu estava fazendo, sempre me deram o apoio necessário para alcançar esse objetivo. Aposto que eles ficarão orgulhosos disso.

A minha namorada Fer que pacientemente esteve do meu lado nessa jornada, me apoiando e entendendo a rotina levemente estressante de um doutoramento.

Aos meus amigos por tudo.

A minha orientadora, professora Ana Luiza de Oliveira Borges, que novamente aceitou essa missão de orientar um aluno que tem enormes dificuldades em escrever corretamente em português. Agradeço pela atenção dispensada e pelo incentivo a realização do doutorado sanduíche no exterior.

Ao professor Rogério Dornelles Maestri pelas oportunidades dadas ao longo desses anos e pelas 468 minuciosas sugestões, comentários e críticas realizadas no trabalho.

A Ana e o Maestri, que sempre confiaram no meu trabalho, pelas oportunidades dadas, convivência, conselhos e experiências repassadas, auxiliando-me tanto profissionalmente quanto pessoalmente.

Ao NECOD, na figura de seu coordenador Prof. Maestri, que é o laboratório onde exerci toda a minha carreira profissional, sempre permitindo realizar pesquisa científica de primeira linha, e que me financiou, via projetos de pesquisa, nos últimos anos da tese. Minhas tentativas sempre foram, e sempre serão em retribuir toda essa assistência que tive (estou tendo).

Aos colegas e engenheiros do NECOD, que durante essa jornada foram muitos, destacando Richard Ducker, Eduardo Puhl, Daniel Brito, Rodrigo Sartor, Raul, Alexandre Mahler, Prof. Brito, Amauri Barcelos, Pedro Ferreira e Carolina Boffo. Aos hidrotécnicos do NECOD: Eder, Julio, Cristian e Valter. Aos funcionários do NECOD: Eva, Marco “Tyson”, Sérgio, Jorge “Robot” e os outros pela ajuda nas tarefas solicitadas. A todo o NECOD, no qual convivo (i) boa parte do meu tempo . Valeu!

Aos geólogos Leonardo Torres da Silva, Marcelo Ávila e Celso Guirro pelo aprendizado na área de geologia e pelas discussões, esclarecimentos e ideias relacionadas à geologia que contribuíram para o desenvolvimento do estudo.

Ao Lokomotiv Futebol Clube, no qual retomei a vontade de jogar futebol e que serviu de válvula de escape durante a estressante jornada de escrever uma tese.

I would like to thanks all people from the Earth Sciences Department of the University of Leeds, specially Dr. Jaco Baas who open the doors to me. My sincerely thanks to Jeff Peakall, Gareth Keevil, Jim Best, and Bill McCaffrey for everything!

I would like to thanks Jaco – great goalkeeper – for everything while I was there. I'm very grateful for that opportunity and I will never forget my time over there.

A special thanks to my friend Henry Pantin, which a have a lot of chats in the coffee room. Thanks Henry!.

I would like to thanks LEEDS friends, from the Earth Sciences Department and Seddy group. I have to say they are too many to list, but I would like and special thanks for Phil, Woulter, Hein, Chris, Jamie, Marco, Ian, Francesco, Mathieu, Carlos, Luciana, Rachel, Murray and others.

Ao CNPq, que financiou a minha bolsa de estudos de doutorado, incluído o estágio no exterior (doutorado sanduíche), o qual se constituiu em experiência muito gratificante para mim. Essas folhas são o resultado, do meu empenho em não querer desperdiçar o investimento realizado.

A Petrobrás S/A, na figura dos seus funcionários Dr. Adriano Viana, Dr. Marco Moraes, Dr. Antônio Del Rey, Dr. Paulo Paraizo e muitos outros, que sempre apoiaram o NECOD.

Ao IPH e a UFRGS que, há mais de 12 anos, são o meu segundo lar.

RESUMO

As correntes de turbidez de alta densidade e seus depósitos resultantes, ainda hoje, não são um fenômeno totalmente explicado/classificado, tanto no meio científico, como na indústria, em especial, a do petróleo. Visando buscar o entendimento hidrodinâmico e deposicional desses fluxos gravitacionais de sedimentos naturais, este trabalho realizou um estudo experimental (modelagem física) deste fenômeno em laboratório. Através da modelagem física foi possível realizar 25 simulações experimentais com diferentes tipos de materiais sedimentares, no caso, esferas de vidro ($\rho_m \sim 2600\text{kg/m}^3$), simulando as frações areia fina e silte, e o caulim ($\rho_m \sim 2600\text{kg/m}^3$), representando as frações de argila nesses escoamentos. As faixas de concentrações volumétricas utilizadas nos experimentos foram de 2,5%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35%. Para esses intervalos de concentrações foram utilizadas três diferentes proporções de argila na mistura, no caso fluxos não coesivos (0% de argila), fluxos mistos (com 50% de argila) e fluxos coesivos (100% de argila). Ainda, para a concentração volumétrica de 20%, foram realizados quatro ensaios adicionais com 10%, 25%, 75% e 90% de argila na mistura, englobando a transição de um fluxo não coesivo para coesivo.

Os experimentos utilizaram um canal de acrílico (4,5 x 0,2 x 0,5 m) e a simulação se deu através da metodologia de pulso de material, a qual utilizou 120 litros de mistura de água e sedimento, que era lançada, instantaneamente, no interior do tanque, através da abertura de uma comporta. Para o registro dos ensaios foram utilizadas duas câmeras digitais, além de um medidor de velocidade ultrassônico (UVP) com dez transdutores, distribuídos ao longo de 15 cm e instalado a 340 cm da fonte. Ao seu lado, foram colocadas quatro sondas de medição da concentração da mistura (UHCM), as quais amostravam uma faixa de 10 cm do interior do fluxo. Para todas as misturas utilizadas, foi realizada a sua caracterização reológica, com o uso de um reômetro. Para a avaliação do depósito, foram coletadas amostras indeformáveis do depósito, em três locais distintos que foram, posteriormente, processadas em um microscópio eletrônico de varredura - MEV.

A partir dos dados da caracterização reológica das misturas utilizadas nos experimentos, foi possível estabelecer o modelo da relação tensão/deformação, bem como as equações constitutivas de determinação da viscosidade dinâmica (e/ou aparente) da mistura em relação a concentração volumétrica, gradiente de deformação e presença de argila.

Com os dados do registro de vídeo foi possível caracterizar, via um método desenvolvido com uso de uma lousa interativa, a série temporal de três espessuras geométricas da corrente. Aliado aos dados de velocidade e de concentração obtidos nos

equipamentos de medição, foi possível avaliar as propriedades hidrodinâmicas das correntes, tais como as séries temporais de velocidade, concentração e geometria, os seus perfis verticais médios, a adimensionalização dos perfis de velocidade e concentração, relações adimensionais entre esses parâmetros, bem como as definições da tensão de cisalhamento junto ao fundo, da espessura da subcamada viscosa e da vazão mássica de sedimentos.

Os depósitos foram avaliados em duas escalas distintas: em macro-escala, com a avaliação da espessura e granulometria do depósito ao longo da distância, balanço de massa de sedimentos e determinação da taxa de deposição (com o auxílio das imagens do vídeo); e em micro-escala, através do uso de imagens microscópicas obtidas a partir de amostras indeformáveis do depósito resultante, onde foi possível obter a distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical (gradação), a porcentagem de cada tipo de sedimento e laminações dos grãos.

A partir dos resultados apresentados na caracterização reológica das misturas, nas propriedades hidrodinâmicas, geométricas e deposicionais, foi realizado uma síntese agrupando estas propriedades, considerando, ao todo, 22 parâmetros de classificação. Um diagrama de três entradas (concentração volumétrica, presença de argila e o comportamento reológico da mistura) foi construído e, como resultado, foi possível definir seis regiões de reologia/fluxo/depósito que apresentam uma condição de causa (fluxo) com consequência (depósito) características. As seis regiões podem ser resumidas no que segue: Região I – Fluxo Newtoniano de baixa concentração, turbulento e subcrítico, mantidos pela componente ascendente da turbulência, com deposição de partículas individuais que geraram depósitos gradados normalmente com ou sem presença destacada de camada selante de argila no topo. Região II – Fluxo Newtoniano de média concentração, turbulento e supercrítico com a formação de uma camada turbulenta ondulada (deformável) e mais concentrada e com presença de argila junto ao fundo, mantido pela turbulência e com influência da decantação impedida que geraram depósitos parcialmente segregados (maciços) junto à base e gradados normalmente junto ao topo, com ou sem presença destacada de camada selante de argila. Região III – Fluxo Newtoniano de mais alta concentração, turbulento, supercrítico com nítida estratificação (bipartição) de uma camada turbulenta fortemente ondulada (deformável) e mais concentrada junto ao fundo, mantido pela turbulência e com influência da decantação impedida, com uma deposição de grãos mais abrupta (próximo ao congelamento friccional), gerando depósitos menos segregados (maciços) junto à base e com uma gradação normal junto ao topo, com ou sem presença destacada de camada selante de argila. Região IV – Fluxo não Newtoniano de média concentração, baixa turbulência, supercrítico, com formação de uma camada lamosa mais concentrada junto ao fundo com menores ondulações, com

influência das forças viscosas e coesivas, com formação de um “plug” de sedimentos (congelamento coesivo) que formou depósitos do topo à base por congelamento coesivo com uma camada de grãos não coesivos levemente gradados junto ao fundo, com uma camada lamosa com grãos não coesivos dispersos não gradados na matriz e com a presença de uma camada selante. Região V- Fluxo não Newtoniano de alta concentração, com uma turbulência nos instantes iniciais, subcrítico, com formação de uma camada lamosa mais concentrada junto ao fundo com ondulações, influência das forças viscosas, empuxo e coesivas (matriz coesiva), com formação de um “plug” homogêneo de sedimentos (congelamento coesivo) que formou depósitos do topo à base por congelamento coesivo, depósito não gradado com predominância de uma matriz lamosa com grãos dispersos, com ou sem a presença de um depósito gradado no topo resultado do fluxo remanescente do corpo e cauda. Região VI – Fluxo não Newtoniano de alta concentração, dominado pelas forças viscosas, subcrítico, com formação de uma camada lamosa mais concentrada junto ao fundo com poucas ondulações, fortemente resistente ao escoamento (*yield strength*) devido ao empuxo e as forças coesivas (matriz coesiva), com formação de um “plug” homogêneo de sedimentos (congelamento coesivo) que formou depósitos do topo à base por congelamento coesivo, depósito não gradado com predominância de uma matriz lamosa com grãos dispersos, com ou sem a presença de um depósito gradado no topo resultado do fluxo remanescente do corpo e cauda.

Por fim, as características de fluxo e depósito obtidas nesses seis modelos foram comparadas com as classificações encontradas na literatura sobre fluxos gravitacionais de sedimentos, mais especificamente, com correntes de turbidez de alta densidade. Foi proposta então, uma classificação inédita para esses fluxos, baseada na concentração volumétrica, presença de argila e comportamento reológico das misturas, além de considerar a evolução e transformação destes fluxos ao longo do espaço.

Pela nova classificação proposta, os fluxos extremos seriam aqueles que são amplamente aceitos: correntes de turbidez de baixa densidade (região I) e os fluxos de detritos (regiões V e VI). Os fluxos das regiões II, III foram classificados com as correntes de turbidez de alta densidade inercial, devido à predominância das forças inerciais no escoamento e a região IV foi classificada como correntes de turbidez de alta densidade viscosa, devido à influência do aumento da presença de argila no escoamento, o que causou significativas mudanças no fluxo e depósito.

ABSTRACT

Our ability to interpret the deposits of sediment gravity flows in the marine realm has been greatly restricted by our lack of understanding of their flow processes. This limitation is reflected in the numerous classification schemes and the difficulty in using terms such as low and high-density turbidity currents.

Here we report a novel experimentally-derived classification scheme that for the first time identifies flow types and quantifies their transition points.

A series of 25 experiments with non-cohesive, mixed and cohesive high-density turbidity currents were performed in order to study the depositional-process based hydrodynamic and rheological properties of these flows.

Three types of turbidity current were studied at eight different volumetric concentrations between 2.5% and 35%. The flows carried a mixture of non-cohesive (silt-sized glass beads) and cohesive sediment (kaolin) at different clay-silt ratios.

Detailed time-series of flow structure, suspended sediment concentration and flow velocity were collected using Digital Video Cameras, Ultra-High Concentration Meters and Ultrasonic Doppler Velocity Probes. The rheological properties of the mixtures were also evaluated.

The hydrodynamic properties of the flows were determined using changing flow geometry, and high-frequency time-series, depth-average values and vertical profiles of velocity and sediment concentration. Moreover, the deposits were studied using Scanning Electron Microscopy.

Six types of flows were distinguished based on a comparison of hydrodynamic, depositional and rheological properties. A 3D phase diagram was created, showing the boundaries between these flow types in terms of rheological behaviour, bulk volumetric concentration and clay concentration. The main characteristics of the flow types are:

Type I: Low density flow; Newtonian; grains supported by upward component of turbulence; no hindered settling; segregation of grains and normally graded beds.

Type II: Newtonian; grains supported by turbulence; turbulent flow with gently undulating high-concentration near-bed layer; partial hindered settling and partial size segregation forming partially graded beds.

Type III: Newtonian; fully turbulent flow with strongly undulating high-concentration near-bed layer; hindered settling resulting in rapid deposition and generation of partially graded beds.

Type IV: non-Newtonian; viscous flow; formation of “plug” and shear flow (mud layer close the bottom); viscous forces cause freezing of the flow and forming graded beds of muddy sand.

Types V and VI: non-Newtonian; viscous flow with thick mud layer; grain support by matrix strength; weakly undulating internal mud layer; cohesive freezing forms an ungraded muddy sand with coarse-tail grading on top.

A new process-related classification of sediment gravity flows is proposed. Type I resembles classic low-density turbidity current behavior, and types V and VI are close to the debris flow behavior. Types II and III are classified as inertial high-density turbidity currents, due to flow turbulence and model IV represents a viscous high-density turbidity current, due to the high concentrations of clay and its cohesive influence on flow and deposit.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VIII
SUMÁRIO	X
LISTA DE TABELAS	XVI
LISTA DE FIGURAS	XVIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XXXII
1 APRESENTAÇÃO	1
2 INTRODUÇÃO	4
3 OBJETIVOS	7
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
4.1 SISTEMA DEPOSICIONAL MARINHO PROFUNDO E SEUS PROCESSOS DEPOSICIONAIS - GENERALIDADES	9
4.2 DEFINIÇÃO DE CORRENTES DE TURBIDEZ DE ALTA DENSIDADE	12
4.2.1 Classificação das correntes de turbidez.....	12
4.2.2 Inconsistência das classificações.....	26
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS CORRENTES DE TURBIDEZ	31
4.3.1 Introdução	31
4.3.2 Dissecando uma corrente de turbidez	31
4.3.2.1 Cabeça, corpo e cauda.....	31
4.3.2.2 Perfil de velocidade e perfil de concentração	35
4.3.2.3 Camada limite e o conceito de subcamada viscosa	37
4.3.2.4 Tensão de cisalhamento.....	39
4.3.2.5 Comportamento reológico da mistura	41
4.3.2.6 Influência da coesão das partículas em misturas	43
4.3.3 Dinâmica de uma corrente de turbidez.....	45
4.3.3.1 Zona fonte	45
4.3.3.2 Escoamento (zona de transferência)	47
4.3.3.3 Zona de deposição	57
4.4 MODELAGEM FÍSICA DE CORRENTES DE TURBIDEZ	65
4.4.1 Introdução	65
4.4.2 Trabalhos experimentais pioneiros	66
4.4.3 Efeitos de escala.....	67
4.4.4 Operacionalização de modelos físicos	70
4.4.4.1 Tipos de modelos.....	70
4.4.4.2 Metodologias de ensaios.....	72
4.4.4.3 Instrumentação utilizada.....	74
5 APARATO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS	77
5.1 LABORATÓRIO AMBIENTAL “SORBY” DE DINÂMICA DOS FLUIDOS ...	77
5.2 SIMULADOR FÍSICO	78
5.2.1 Tanque bidimensional fixo.....	78
5.2.2 Canal bidimensional de acrílico	79
5.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	80
5.3.1 Medidores de alta concentração ultrassônicos - UHCM.....	80

5.3.2	Medidor de velocidade ultrassônico - UVP	82
5.3.3	Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV	84
5.3.4	Filmadoras digitais	86
5.3.5	Analizador de partículas a laser	87
5.3.6	Reômetro Bohlin	88
5.3.7	Lousa interativa	90
5.3.8	Agitador vertical eletro-mecânico	91
5.3.9	Outros equipamentos	91
6	MATERIAIS E MÉTODOS	92
6.1	PLANO DE ENSAIOS	92
6.2	ENSAIOS REALIZADOS	93
6.3	MATERIAL UTILIZADO	95
6.3.1	Esferas de vidro	95
6.3.2	Caulim	96
6.4	METODOLOGIA	97
6.4.1	Simulações experimentais	97
6.5	TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS	100
6.5.1	Dados gerados no medidor de perfil de velocidades ultrassônico - UVP	100
6.5.2	Dados gerados no medidor de alta concentração ultrassônico - UHCM	103
6.5.3	Determinação dos parâmetros geométricos	104
6.5.4	Determinação da espessura do depósito	107
6.5.5	Balanço de massa	108
6.5.6	Análise granulométrica	108
6.5.7	Coleta de amostras indeformáveis	108
6.5.8	Processamento das imagens do MEV	110
6.5.9	Porcentagem do tipo de grão presente no depósito	114
6.5.10	Metodologia para a caracterização reológica das misturas	115
7	CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DAS MISTURAS	118
7.1	AJUSTE DO MODELO REOLÓGICO	118
7.2	REOLOGIA DAS MISTURAS NÃO-COESIVAS	121
7.2.1	Relação entre o coeficiente de viscosidade dinâmico e a concentração volumétrica	122
7.3	REOLOGIA DAS MISTURAS MISTAS	123
7.3.1	Relação entre a tensão crítica e concentração volumétrica inicial	125
7.3.2	Determinação da viscosidade aparente das misturas	125
7.3.3	Relação entre o coeficiente de viscosidade dinâmico e a concentração volumétrica	127
7.4	REOLOGIA DAS MISTURAS COESIVAS	131
7.4.1	Relação entre a tensão crítica e concentração volumétrica inicial	133
7.4.2	Relação entre o coeficiente de viscosidade dinâmico e a concentração volumétrica	133
7.4.3	Comparação com outros métodos de medição	136
7.5	REOLOGIA DAS MISTURAS DO GRUPO TRANSIÇÃO.	138
7.5.1	Relação entre a tensão crítica e concentração volumétrica inicial	139
7.5.2	Relação entre a viscosidade dinâmica e a porcentagem de argila	140
7.6	RELAÇÃO ENTRE VISCOSIDADE, A PORCENTAGEM DE ARGILA E CONCENTRAÇÃO INICIAL – INTERPOLAÇÃO DAS CURVAS	143
7.6.1	Interpolação da zona 1.	144
7.6.2	Interpolação da zona 2.	146
7.6.3	Interpolação da zona 3.	146
7.7	SÍNTESE GERAL	148
8	ANÁLISE TEMPORAL DA GEOMETRIA, DA VELOCIDADE E DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA	150
8.1	DESCRIÇÃO GERAL DOS FLUXOS SIMULADOS	150

8.2	DEFINIÇÃO DO TEMPO DE PASSAGEM DA CABEÇA, CORPO E DA CAUDA DA CORRENTE.....	153
8.3	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS CORRENTES – VARIAÇÃO TEMPORAL.....	157
8.4	CARACTERÍSTICAS CINEMÁTICAS DAS CORRENTES – VARIAÇÃO TEMPORAL.....	160
8.4.1	Série temporal do grupo não coesivo.....	161
8.4.2	Série temporal do grupo misto.....	162
8.4.3	Série temporal do grupo coesivo.....	163
8.4.4	Série temporal do grupo transição.....	164
8.5	CARACTERÍSTICAS CINEMÁTICAS DAS CORRENTES – PERFIL VERTICAL MÉDIO DE VELOCIDADES.....	166
8.5.1	Perfil vertical médio de velocidades do grupo não coesivo.....	167
8.5.2	Perfil vertical médio de velocidades do grupo misto.....	169
8.5.3	Perfil vertical médio de velocidades do grupo coesivo.....	170
8.5.4	Perfil vertical médio de velocidades do grupo transição.....	172
8.6	CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS CORRENTES – ANÁLISE TEMPORAL.....	174
8.6.1	Série temporal do grupo não coesivo.....	174
8.6.2	Série temporal do grupo misto.....	175
8.6.3	Série temporal do grupo coesivo.....	176
8.6.4	Série temporal do grupo transição.....	176
8.7	CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS CORRENTES - PERFIL VERTICAL MÉDIO.....	178
8.7.1	Perfil vertical médio de concentração do grupo não coesivo.....	178
8.7.2	Perfil vertical médio de concentração do grupo misto.....	180
8.7.3	Perfil vertical médio de concentração do grupo coesivo.....	182
8.7.4	Perfil vertical médio de concentração do grupo transição.....	183
9	CONDICIONANTES HIDRÁULICOS.....	186
9.1	DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DA VELOCIDADE, ALTURA E CONCENTRAÇÃO.....	186
9.1.1	Velocidade.....	187
9.1.1.1	Relação entre a velocidade média e a concentração volumétrica.....	187
9.1.1.2	Valores máximos de velocidade.....	189
9.1.1.3	Relações adimensionais entre as velocidades média e máxima.....	191
9.1.2	Características geométricas.....	195
9.1.2.1	Valores médios da geometria da corrente.....	195
9.1.2.2	Valores médios das características geométricas em função da concentração.....	197
9.1.2.3	Relações adimensionais entre a zona da cabeça e do corpo.....	198
9.1.3	Concentração média.....	200
9.1.3.1	Valores de concentração média em função da concentração inicial.....	200
9.1.3.2	Valores máximos de concentração.....	203
9.1.3.3	Relações adimensionais para as concentrações medidas na cabeça e no corpo.....	204
9.1.3.4	Parâmetros adimensionais da concentração volumétrica.....	205
9.2	DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO ESCOAMENTO TURBULENTO.....	207
9.3	ADIMENSIONALIZAÇÃO DOS PERFIS VERTICAIS DE VELOCIDADE....	210
9.3.1	Ensaio de mais baixa concentração.....	210
9.3.2	Ensaio de mais alta concentração.....	216
9.4	CONCENTRAÇÃO ADIMENSIONALIZADA PELA CONCENTRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	221
9.5	DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO JUNTO AO FUNDO.....	226
9.5.1	Método apresentado em Michon et al (1955).....	226
9.5.2	Método de Clauser.....	228

9.5.3	Comparação dos métodos	230
9.6	PERFIL DE FLUXO DE SEDIMENTOS E CAPACIDADE DE TRANSPORTE DO FLUXO	231
9.6.1	Grupo não coesivo	232
9.6.2	Grupo misto	233
9.6.3	Grupo coesivo	234
9.6.4	Grupo transição	234
10	CONDICIONANTES DEPOSICIONAIS	236
10.1	DESCRIÇÃO QUALITATIVA DOS DEPÓSITOS BASEADO NOS VÍDEOS.	236
10.2	ANÁLISE MACROSCÓPICA DOS DEPÓSITOS	239
10.2.1	Formação do depósito ao longo do tempo – Taxa de deposição	239
10.2.1.1	Grupo não coesivo	239
10.2.1.2	Grupo misto	241
10.2.1.3	Grupo coesivo	242
10.2.1.4	Grupo transição	243
10.2.2	Variação longitudinal do depósito – Espessura do depósito final após 24 horas	244
10.2.3	Balço de massa de sedimentos - Capacidade de transferência de sedimentos	248
10.2.4	Tamanho de grão do material depositado	250
10.3	ANÁLISE MICROSCÓPICA DO DEPÓSITO.	253
10.3.1	Apresentação das imagens microscópicas	253
10.3.2	Descrição microscópica do grupo não coesivo	255
10.3.2.1	Descrição visual das imagens microscópicas	255
10.3.2.2	Porcentagem do tipo de sedimento presente nos depósitos	256
10.3.2.3	Gradação dos depósitos	257
10.3.2.4	Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical	259
10.3.2.5	Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical - Laminações	260
10.3.3	Descrição microscópica do grupo misto	269
10.3.3.1	Descrição visual das imagens microscópicas	269
10.3.3.2	Porcentagem do tipo de sedimento presente nos depósitos	270
10.3.3.3	Gradação dos depósitos	273
10.3.3.4	Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical	275
10.3.3.5	Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical - Laminações	276
10.3.4	Descrição microscópica do grupo transição	283
10.3.4.1	Descrição visual das imagens microscópicas	283
10.3.4.2	Porcentagem do tipo de sedimento presente nos depósitos	283
10.3.4.3	Gradação dos grãos	286
10.3.4.4	Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical	287
10.3.4.5	Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical - Laminações	287
10.4	SÍNTESE DO DEPÓSITO FINAL	294
11	ACOPLAMENTO DOS PROCESSOS HIDRODINÂMICOS COM O DEPÓSITO: MODELOS GERADOS COM BASE NA REOLOGIA, CONCENTRAÇÃO E PRESENÇA DE ARGILA	295
11.1	DIAGRAMA SÍNTESE DOS RESULTADOS	295
11.2	DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A DELIMITAÇÃO DAS SEIS REGIÕES.	297
11.2.1	Comportamento reológico das misturas	297
11.2.2	Relação entre a espessura da cabeça e do corpo	298
11.2.3	Regime do escoamento – Valores globais médios	298
11.2.4	Perfil de velocidade, concentração e fluxo de sedimentos	300
11.2.5	Análise temporal – Mecanismo de suporte dos grãos	300
11.2.6	Intensidade da turbulência	301
11.2.7	Depósitos	301
11.2.8	Mecanismos de deposição	301
11.2.9	Outros Parâmetros	301
11.3	DETALHAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DE CADA REGIÃO	302
11.3.1	REGIÃO I	302

11.3.1.1	Comportamento reológico das misturas	302
11.3.1.2	Relação entre a espessura da cabeça e a do corpo	302
11.3.1.3	Regime de fluxo	302
11.3.1.4	Perfis verticais médios de velocidade concentração e fluxo de sedimentos	302
11.3.1.5	Análise temporal velocidade e concentração	303
11.3.1.6	Mecanismo de suporte dos grãos	304
11.3.1.7	Intensidade da turbulência	305
11.3.1.8	Presença da camada interna do escoamento (bipartição)	306
11.3.1.9	Velocidade e concentração média	306
11.3.1.10	Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical	307
11.3.1.11	Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade)	308
11.3.1.12	Espessura relativa do depósito	309
11.3.1.13	Quantidade de material depositado - balanço de massa	309
11.3.1.14	Mecanismos de deposição	309
11.3.1.15	Taxa de deposição	310
11.3.2	REGIÃO II	311
11.3.2.1	Comportamento reológico das misturas	311
11.3.2.2	Relação entre a espessura da cabeça e do corpo	311
11.3.2.3	Regime de fluxo	311
11.3.2.4	Perfis verticais médios de velocidade concentração e fluxo de sedimentos	311
11.3.2.5	Análise temporal velocidade e concentração Presença de argila	312
11.3.2.6	Mecanismo de suporte	314
11.3.2.7	Intensidade da turbulência	315
11.3.2.8	Presença da camada interna do escoamento (bipartição)	316
11.3.2.9	Velocidade e concentração média	317
11.3.2.10	Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical	317
11.3.2.11	Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade)	318
11.3.2.12	Espessura relativa do depósito	318
11.3.2.13	Quantidade de material depositado - balanço de massa	319
11.3.2.14	Mecanismos de deposição	319
11.3.2.15	Taxa de deposição	320
11.3.3	REGIÃO III	321
11.3.3.1	Comportamento reológico das misturas	321
11.3.3.2	Relação entre a espessura da cabeça e do corpo	321
11.3.3.3	Regime de fluxo	321
11.3.3.4	Perfis verticais médios de velocidade concentração e fluxo de sedimentos	322
11.3.3.5	Análise temporal da velocidade e da concentração	322
11.3.3.6	Mecanismo de suporte	324
11.3.3.7	Intensidade da turbulência	325
11.3.3.8	Presença da camada interna do escoamento (bipartição)	325
11.3.3.9	Velocidade e concentração média	326
11.3.3.10	Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical	326
11.3.3.11	Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade)	327
11.3.3.12	Espessura relativa do depósito	328
11.3.3.13	Quantidade de material depositado - balanço de massa	328
11.3.3.14	Mecanismos de deposição	328
11.3.3.15	Taxa de deposição	329
11.3.4	REGIÃO IV	330
11.3.4.1	Comportamento reológico das misturas	330
11.3.4.2	Relação entre a espessura da cabeça e a do corpo	330
11.3.4.3	Regime de fluxo	330
11.3.4.4	Perfis verticais médios de velocidade concentração e fluxo de sedimentos	330
11.3.4.5	Análise temporal da velocidade e da concentração	331
11.3.4.6	Mecanismo de suporte	333
11.3.4.7	Intensidade da turbulência	333
11.3.4.8	Presença da camada interna do escoamento (bipartição)	334
11.3.4.9	Velocidade e concentração média	335
11.3.4.10	Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical	335
11.3.4.11	Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade)	336
11.3.4.12	Espessura relativa do depósito	337
11.3.4.13	Quantidade de material depositado - balanço de massa	337
11.3.4.14	Mecanismos de deposição	337
11.3.4.15	Taxa de deposição	338

11.3.5 REGIÃO V	339
11.3.5.1 Comportamento reológico das misturas	339
11.3.5.2 Relação entre a espessura da cabeça e do corpo	339
11.3.5.3 Regime de fluxo	339
11.3.5.4 Perfis vertical de velocidade, de concentração e de fluxo de sedimentos.....	339
11.3.5.5 Análise temporal velocidade e concentração	340
11.3.5.6 Mecanismo de suporte.....	341
11.3.5.7 Intensidade da turbulência	342
11.3.5.8 Presença da camada interna do escoamento (bipartição).....	342
11.3.5.9 Velocidade e concentração média	343
11.3.5.10 Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical	343
11.3.5.11 Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade).....	344
11.3.5.12 Espessura relativa do depósito.....	345
11.3.5.13 Quantidade de material depositado - balanço de massa	345
11.3.5.14 Mecanismos de deposição	345
11.3.5.15 Taxa de deposição	346
11.3.6 REGIÃO VI.....	347
11.3.6.1 Comportamento reológico das misturas	347
11.3.6.2 Relação entre a espessura da cabeça e do corpo	347
11.3.6.3 Regime de fluxo	347
11.3.6.4 Perfis vertical de velocidade, de concentração e de fluxo de sedimentos.....	347
11.3.6.5 Análise temporal da velocidade e da concentração	348
11.3.6.6 Mecanismo de suporte.....	349
11.3.6.7 Intensidade da turbulência	350
11.3.6.8 Presença da camada interna do escoamento (bipartição).....	351
11.3.6.9 Velocidade e concentração média	351
11.3.6.10 Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical.....	351
11.3.6.11 Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade).....	352
11.3.6.12 Espessura relativa do depósito.....	353
11.3.6.13 Quantidade de material depositado - balanço de massa	353
11.3.6.14 Mecanismos de deposição	353
11.3.6.15 Taxa de deposição	354
11.4 INFERÊNCIAS (OBSERVAÇÕES) DOS RESULTADOS NA EVOLUÇÃO ESPACIAL DO FLUXO.....	354
11.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS, HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS	359
<i>12 DISCUSSÃO SOBRE A CLASSIFICAÇÃO DE CORRENTES DE TURBIDEZ DE ALTA DENSIDADE.....</i>	<i>364</i>
12.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA.....	364
12.2 CLASSIFICAÇÃO DE CORRENTES DE TURBIDEZ DE ALTA DENSIDADE	368
12.3 SÍNTESE FINAL	378
<i>13 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</i>	<i>379</i>
<i>14 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	<i>383</i>
<i>15 ANEXOS.....</i>	<i>391</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Classificação de fluxos proposta por Lowe (1979).	17
Tabela 4.2 Classificação de fluxos gravitacionais proposta por Gani (2004).	26
Tabela 4.3 Resumo das características adotadas para a classificação de correntes de turbidez.	27
Tabela 4.4 Tabela de termos usados para caracterizar as correntes de turbidez de alta densidade na literatura, incluindo os termos dados a bipartição (Fonte: modificado de Shanmugam, 2006).	30
Tabela 4.5 Classificação dos fluidos com relação ao comportamento reológico.	42
Tabela 4.6 Modelos de leis para os diferentes comportamentos reológicos	43
Tabela 4.7 Diferenças nos mecanismos de deposição de alta e baixa densidade (Modificado de Middleton, 1967).	59
Tabela 4.8 Estágios de deposição dos fluxos de alta densidade (Adaptado de Lowe, 1982).....	60
Tabela 4.9 Alguns estudos experimentais com correntes de densidade.	73
Tabela 5.1 Características técnicas do medidor de concentração (UHCM).	82
Tabela 5.2 Características do medidor de perfil de velocidade ultrassônico.	84
Tabela 5.3 Características dos transdutores de medição de velocidade.	84
Tabela 5.4 Características técnicas da filmadora digital SONY DCR-VX 2000.	87
Tabela 5.5 Características gerais do analisador de partículas a laser	88
Tabela 6.1 Plano de ensaios inicial a ser realizado na Universidade de Leeds.	93
Tabela 6.2 Plano de ensaios executado na Universidade de Leeds.	94
Tabela 6.3 Características técnicas do material não coesivo (esferas de vidro).	95
Tabela 6.4 Características técnicas do Caulim	97
Tabela 6.5 Parâmetros de entrada do medidor de velocidade – UVP	101
Tabela 6.6 Imagens selecionadas para a determinação dos parâmetros geométricos	105
Tabela 6.7 Amostras coletadas e o número de grão encontrados (esferas de vidro).	113
Tabela 7.1 Modelos reológicos testados no aplicativo	119
Tabela 7.2 Parâmetros estatísticos do ajuste dos modelos de Newton e de Herschel-Bulkley.	120
Tabela 7.3 Viscosidade relativa para o grupo não coesivo em função da concentração volumétrica da mistura	121
Tabela 7.4 Valores dos parâmetros ajustados para o grupo misto.	124
Tabela 7.5 Parâmetros ajustados para o grupo misto	127
Tabela 7.6 Valores dos parâmetros ajustados para o grupo coesivo.	132

Tabela 7.7 Parâmetros ajustados para o grupo coesivo	132
Tabela 7.8 Ajuste dos parâmetros do modelo reológico para o grupo transição.....	138
Tabela 7.9 Parâmetros ajustados para o grupo transição.....	139
Tabela 8.1 Definição dos tempos de passagem da cabeça, do corpo e da cauda.	155
Tabela 9.1 Velocidade, altura e concentração médias obtidas pelas equações 9.4 a 9.6.....	187
Tabela 9.2 Relações adimensionais entre a velocidade do corpo e as velocidades médias, máximas e da cabeça.	193
Tabela 9.3 Relações adimensionais da concentração para os quatro grupos de ensaios.....	206
Tabela 9.4 Parâmetros ajustados para os perfis de velocidade.....	212
Tabela 9.5 Equações adimensionalizadas para o perfil de velocidades dos grupos não coesivo, misto e transição.....	216
Tabela 9.6 Alturas ao longo do perfil vertical de velocidades de cada zona identificada para as correntes de mais alta concentração	218
Tabela 9.7 Parâmetros ajustados na equação 9.26	219
Tabela 9.8 Parâmetros ajustados na equação exponencial 9.27.	222
Tabela 9.9 Valores da tensão de cisalhamento junto ao fundo – Método de Michon.....	227
Tabela 9.10 Valores da tensão de cisalhamento junto ao fundo e velocidade de cisalhamento – Método de Clauser.....	229
Tabela 10.1 Valores de porcentagem do tipo de sedimento para o grupo não coesivo.....	256
Tabela 10.2 Valores de porcentagem do tipo de sedimento para o grupo misto.....	272
Tabela 10.3 Valores de porcentagem do tipo de sedimento para o grupo transição.	285
Tabela 11.1 Agrupamento de igual comportamento quanto aos parâmetros avaliados, definidos segundo faixas de concentração (ensaios NC, M e C) e/ou presença de argila (ensaios T)	296
Tabela 11.2 Resumo dos 22 parâmetros avaliados para as seis regiões determinadas	361
Tabela 12.1 Classificação de correntes de baixa e alta densidade baseada no comportamento reológico.....	366
Tabela 12.2 Classificação de correntes de baixa e alta densidade baseada pelo mecanismo de suporte dos grãos	366
Tabela 12.3 Comparação das classificações existentes na literatura com a classificação proposta para os fluxos gravitacionais de sedimentos.....	372

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 Topografia de um ambiente marinho (acima). Corte transversal A-A de um ambiente marinho (abaixo).....	9
Figura 4.2 Processos sedimentares subaquáticos em ambientes marinho (Fonte: modificado de Stow, 1994).....	12
Figura 4.3 Perfil esquemático de um fluxo bipartido (Fonte: modificado de Sanders, 1965).....	14
Figura 4.4 a) Classificação de fluxos gravitacionais de sedimentos proposta por Middleton e Hampton, 1973. b) Evolução do fluxo no tempo e espaço.	16
Figura 4.5 Fluxo bipartido simulado por Postma et al. (1988).....	18
Figura 4.6 Modelo de classificação proposto por Kneller e Branney (1995).....	20
Figura 4.7 Tipo de fluxo gravitacional proposto por Shanmugam, (1996).....	21
Figura 4.8 Síntese de classificação apresentada por Shanmugam (2000).	22
Figura 4.9 Classificação de fluxos gravitacionais proposta por Mulder e Alexander (2001).	23
Figura 4.10 Esquema de classificação de fluxos gravitacionais propostos por Mulder e Alexander (2001).	24
Figura 4.11 Classificação dos fluxos gravitacionais proposta por Dasgupta (2002).....	25
Figura 4.12 a) Imagem de uma corrente de densidade simulada em laboratório. b) Detalhe da região da cabeça da corrente. c) Desenho esquemático de uma corrente de turbidez e seu esquema de funcionamento.	32
Figura 4.13 a) Desenho esquemático do movimento de fluidos dentro da cabeça da corrente (Fonte: modificado de Kneller et al, 1999). b) Visualização interna do corpo de uma corrente de turbidez (Fonte: Brito et al, 2002).....	34
Figura 4.14 Quatro tipos de perfis de concentração e velocidade para correntes de turbidez (Fonte: Kneller e Buckee, 2000).	35
Figura 4.15 Perfis de velocidade e de concentração para correntes de turbidez de alta densidade (Fonte: Postma et al. 1988).....	36
Figura 4.16 Perfil de velocidade normalizado mostrando as regiões de escoamento de um fluxo de água limpa (fonte: Maestri et al, 2006).	38
Figura 4.17 Diferenças entre os perfis de tensão de cisalhamento e de velocidade para escoamentos em canais abertos e para correntes de densidade (fonte: modificado de Michon et al, 1955).....	41

Figura 4.18 a) Classificação dos fluidos com relação ao comportamento reológico (independentes do tempo); b) Classificação dos fluidos com relação ao comportamento reológico (dependentes do tempo).....	42
Figura 4.19 Dois tipos de inicialização da corrente: a) Por pulso e; b) Por fluxo contínuo de material (Fonte: modificado de Mutti et al, 1999).....	46
Figura 4.20 Esquema das transformações de fluxos (Fonte: Fischer, 1983, cortesia Del Rey, 2006.).....	54
Figura 4.21 Visualização de ondas internas nas correntes de turbidez: a) imagem obtida por ultrassom e; b) Desenho esquemático. (Fonte: Del Rey et al., 2006)	55
Figura 4.22. Diferença entre a dinâmica interna da corrente de turbidez (a) e dos fluxos de detritos (b).....	57
Figura 4.23 Desenho esquemático da sequência de Bouma (1962). (Modificado de Bouma, 1962; cortesia de Del Rey, 2006).....	59
Figura 4.24 Modelos de deposição de Lowe (1982): a) corrente de alta densidade cascalhosa e; b) corrente de alta densidade arenosa.....	61
Figura 4.25 Processos de inicialização, transporte e mecanismo deposicional dos fluxos gravitacionais (Fonte: modificado de Stow, 1994).....	62
Figura 4.26 Modelo deposicional baseado na eficiência do fluxo (Fonte: Mutti et al.1999).....	63
Figura 4.27 Modelo deposicional proposto por Gani (2004).	64
Figura 4.28 Esquema apresentando a relação dos tipos de modelo, considerando o ganho de qualidade da resposta versos o tamanho do modelo e/ou escala de tempo (Fonte: Peakall et all., 1996).....	68
Figura 5.1 Instalações da Universidade de Leeds. a-e) Canais para a simulação física do SEFDL. f) laboratório de sedimentometria.	78
Figura 5.2 Tanque bidimensional fixo de fundo ajustável do SEFDL: a) Vista lateral; b-c) Detalhe do compartimento para instrumentos; d) Detalhe do fundo falso e; e) Vista frontal com o tubo de alimentação de água.....	79
Figura 5.3 Desenho esquemático do canal de acrílico removível instalado dentro do tanque bidimensional.	80
Figura 5.4 Medidor de alta concentração ultrassônico: a) Console; b) Dimensões da sonda e; c) Exemplo de aplicação.	81
Figura 5.5 a) Medidor de perfil de velocidade ultrassônico e; b) Detalhe do transdutor ultrassônico (direita).	82

Figura 5.6 a) Esquema de funcionamento do medidor de velocidade (esquerda) e; b) Detalhe do feixe de ultrassom emitido (direita).	83
Figura 5.7 Microscópio eletrônico de varredura – MEV: a) Vista geral; b) Vista da célula; c) Console de processamento e; d) Console de saída das imagens.	85
Figura 5.8 a) Sistema de funcionamento do MEV. e; b) Detecção dos diferentes tipos de sinais.	86
Figura 5.9 Filmadora digital SONY DCR-VX 2000.	86
Figura 5.10 Analisador de partículas a laser - Malvern Mastersizer 2000: a) Vista geral. b) Detalhe do sistema de colocação dos grãos e; c) Detalhes da célula de medida.	87
Figura 5.11 Esquema de funcionamento do analisador de partículas a laser.	88
Figura 5.12 a) Reômetro Bohlin C-VOR e; b) Detalhe da mesa e do spindle.	89
Figura 5.13 Esquema do funcionamento do Reômetro: a) Controle de tensão e; b) Controle da taxa de deformação.	89
Figura 5.14 Detalhe dos “spindles” utilizados na caracterização reológica: a) “Spindles” tipo cone e; b) “Spindles” tipo prato paralelo.	90
Figura 5.15 Lousa interativa Smart Board.	91
Figura 5.16 a) Agitador elétrico-mecânico e; b) Detalhe da hélice na sua extremidade.	91
Figura 6.1 a) Ampliação do material no MEV (130x); b) Frequência da distribuição granulométrica da amostra bruta; c) Histograma de frequência do tamanho de grão correspondente ao grão areia e; d) Valores dos percentís da distribuição.	96
Figura 6.2 a) Ampliação do material no MEV (130x); b) Frequência da distribuição granulométrica da amostra bruta; c) Histograma de frequência do tamanho correspondente ao grão de areia e; d) Valores dos percentís da distribuição.	97
Figura 6.3 Suporte com os dez transdutores instalados no canal com o detalhe da disposição e alturas do fundo.	100
Figura 6.4 Variação temporal da velocidade: a) Saída do medidor de velocidade para os 128 canais do feixe de ultrassom de um transdutor; b) Análise da região que melhor representava a medição e a posição dos canais a serem utilizados; c) Série temporal dos cinco canais escolhidos para avaliar a velocidade.	102
Figura 6.5 Disposição das sondas de concentração: a) Local de medição; b) Vista frontal; c) Vista lateral e; d) Detalhe do suporte de fixação junto ao tanque.	103
Figura 6.6 Sequência apresentando a determinação dos parâmetros geométricos.	106
Figura 6.7 Determinação da espessura do depósito através da imagem.	107
Figura 6.8 Sequência da coleta das amostras indeformáveis.	109

Figura 6.9 Etapas do método do processamento das imagens.....	111
Figura 6.10 Etapas do método do processamento da imagem para determinação da granulometria.....	115
Figura 6.11 Imagens do aplicativo do reômetro Bohlin C-VOR: a) Parâmetros de entrada b) Parâmetros para o teste da viscosidade e; c) Tela de resultado do teste.	117
Figura 7.1 Resultado do teste reológico apresentando a relação tensão (eixo ordenadas) e deformação (eixo abscissa).....	118
Figura 7.2 Exemplo de resultado do teste reológico e ajuste de modelo proposto (reômetro Bohlin C-VOR).....	120
Figura 7.3 Relação entre tensão de cisalhamento e a deformação (gradiente de velocidade) para o grupo não coesivo	121
Figura 7.4 Relação entre a concentração volumétrica e a viscosidade relativa para o grupo não coesivo	122
Figura 7.5 Relação entre tensão de cisalhamento e a deformação (gradiente de velocidade) para o grupo misto: a) Concentração volumétrica de 2,5 a 15% e; b) Concentração volumétrica de 20 a 35%.....	124
Figura 7.6 Relação entre a tensão de cisalhamento crítica e a concentração volumétrica para as misturas do grupo misto	125
Figura 7.7 Relação entre a deformação (gradiente de velocidade) e a viscosidade aparente adimensionalizada pela viscosidade da água para as misturas do grupo misto: a) Concentração volumétrica de 2,5 a 15%; b) Concentração volumétrica de 20 a 35%.....	126
Figura 7.8 Relação entre a concentração volumétrica (menor que 15%) e a viscosidade relativa para as misturas do grupo misto.	127
Figura 7.9 Ajuste de dados dos parâmetros $\kappa_{(misto)}$ e $\beta_{(misto)}$ do modelo de Herschel-Bulkley para as misturas do grupo misto em função da concentração volumétrica.	128
Figura 7.10 Relação da viscosidade aparente relativa com a concentração volumétrica para diferentes gradientes de velocidade (grupo misto).	130
Figura 7.11 Relação entre tensão de cisalhamento e a deformação (gradiente de velocidade) para o grupo coesivo: a) Concentração volumétrica de 2,5 e 5% e; b) Concentração volumétrica de 10 a 25%.....	131
Figura 7.12 Relação entre a deformação (gradiente de velocidade) e a viscosidade aparente adimensionalizada pela viscosidade da água para as misturas do	

grupo coesivo. a) concentração volumétrica de 2,5 e 5%. b) concentração volumétrica de 10 a 25%	132
Figura 7.13 Relação entre a tensão de cisalhamento crítica e a concentração volumétrica para as misturas do coesivo	133
Figura 7.14 Relação entre a concentração volumétrica (menor que 10%) e a viscosidade relativa para o grupo coesivo.....	134
Figura 7.15 Ajuste de dados dos parâmetros κ_{coesivo} e β_{coesivo} do modelo de Herschel-Bulkley para as misturas do grupo coesivo em função da concentração volumétrica.	135
Figura 7.16 Relação da viscosidade aparente relativa com a concentração volumétrica para diferentes gradientes de velocidade (grupo coesivo).....	136
Figura 7.17 Comparação dos resultados de caracterização reológica com as medidas de Kellman, 2007: a) Tensão crítica inicial versus concentração volumétrica e; b) Viscosidade aparente relativa a 30 1/s versus concentração volumétrica.	137
Figura 7.18 Relação entre tensão de cisalhamento e a deformação (gradiente de velocidade) para o grupo transição: a) Presença de argila de 0 a 50% e; b) Presença de argila de 0 a 50%.	138
Figura 7.19 Relação entre a deformação (gradiente de velocidade) e a viscosidade aparente adimensionalizada pela viscosidade da água para as misturas do grupo transição.	139
Figura 7.20 Relação entre a tensão de cisalhamento crítica e a presença de argila (caulim) para as misturas do grupo transição.....	140
Figura 7.21 Relação entre a presença de argila e a viscosidade relativa para o grupo transição.....	141
Figura 7.22 Ajuste de dados dos parâmetros $\kappa_{\text{transição}}$ e $\beta_{\text{transição}}$ do modelo de Herschel-Bulkley para as misturas do grupo transição em função da presença de argila.....	142
Figura 7.23 Relação da viscosidade aparente relativa com a presença de argila para diferentes gradientes de velocidade (grupo transição).	143
Figura 7.24 Relação entre a viscosidade aparente adimensionalizada e a concentração volumétrica para os quatro grupos de ensaios realizados.....	144
Figura 7.25 a) Equações que descrevem o comportamento reológico das misturas utilizadas e; b) Definição das zonas de interpolação dessas equações.....	145
Figura 7.26 Resumo das equações utilizadas para determinar a viscosidade dinâmica	149

Figura 8.1 Mosaico de evolução dos fluxos do grupo não coesivo, misto e coesivo: a) Concentração volumétrica de 2,5 % e; b) Concentração volumétrica de 35% e 25% (grupo coesivo).....	151
Figura 8.2 Critério para a definição do tempo da cabeça: a) Chegada da corrente no ponto de medida e; b) Estabilização das linhas, com o desenho do deslocamento vertical da corrente junto a cabeça (ilustradas pelas linhas pretas).....	154
Figura 8.3 Relação do tempo de passagem com a concentração volumétrica para três grupos simulados: a) Cabeça e; b) Corpo.....	155
Figura 8.4 Série temporal das características geométricas de todos os experimentos.	158
Figura 8.5 Séries temporais da velocidade para o grupo não coesivo.....	161
Figura 8.6 Séries temporais da velocidade para o grupo misto.....	162
Figura 8.7 Séries temporais da velocidade para o grupo coesivo.....	164
Figura 8.8 Séries temporais da velocidade para o grupo transição.....	165
Figura 8.9 Perfis de velocidade verticais médios do grupo não coesivo: a) Cabeça; b) Corpo e c) Cauda.....	167
Figura 8.10 Perfis de velocidade verticais médios do grupo misto: a) Cabeça; b) Corpo e; c) Cauda.....	170
Figura 8.11 Perfis de velocidade verticais médios do grupo coesivo: a) Cabeça; b) Corpo e; c) Cauda.....	171
Figura 8.12 Perfis de velocidade verticais médios do grupo transição: a) Cabeça; b) Corpo e c) Cauda.....	173
Figura 8.13 Série temporal da concentração para o grupo não coesivo.....	175
Figura 8.14 Série temporal da concentração para o grupo misto.....	175
Figura 8.15 Série temporal da concentração para o grupo coesivo.....	176
Figura 8.16 Série temporal da concentração para o grupo transição.....	177
Figura 8.17 Perfis de concentração verticais médios do grupo não coesivo: a) Cabeça. b) Corpo e; c) Cauda.....	179
Figura 8.18 Perfis de concentração verticais médios do grupo misto: a) Cabeça; b) Corpo e; c) Cauda.....	181
Figura 8.19 Perfis de concentração verticais médios do grupo coesivo: a) Cabeça; b) Corpo e c) Cauda.....	182
Figura 8.20 Perfis de concentração verticais médios do grupo transição: a) Cabeça; b) Corpo e; c) Cauda.....	184
Figura 9.1 Relação entre a velocidade média das correntes e a concentração volumétrica: a) Corpo. e; b) Cauda.....	188

Figura 9.2 Relação da velocidade média do corpo das correntes do grupo transição e a presença de argila.	189
Figura 9.3 Valores de velocidade máxima em relação a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Cabeça; b) Corpo; c) Ajuste da equação para a zona da cabeça; d) Resultados do grupo transição.....	190
Figura 9.4 Relações entre parâmetros adimensionais com a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Velocidade do corpo pela velocidade da cabeça; b) Velocidade do corpo pela velocidade média da corrente; c) Velocidade do corpo pela velocidade máxima da corrente e; d) Resultados do grupo transição.....	192
Figura 9.5 Comparação entre as alturas calculadas nas equações 9.1 a 9.3 e as espessuras médias medidas. a) grupo não coesivo b) grupo misto c) grupo coesivo e d) grupo transição	196
Figura 9.6 Relação dos valores médios das características geométricas com a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e; d) Grupo transição.....	197
Figura 9.7 Relação entre o parâmetro adimensional da espessura da cabeça pela altura do corpo com: a) Concentração volumétrica (grupos NC, M e C) e; b) Presença de argila (grupo transição).....	199
Figura 9.8 Relação da concentração média obtida nas equações 9.1 a 9.3 e a concentração volumétrica inicial: a) Cabeça; b) Corpo e c) Cauda.....	201
Figura 9.9 Relação da concentração média obtida nas equações 9.1 a 9.3 e a concentração volumétrica inicial e/ou presença de argila: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.....	202
Figura 9.10 Relação dos valores máximos da concentração volumétrica com a concentração volumétrica inicial e/ou presença de argila: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.....	204
Figura 9.11 Relação entre o parâmetro adimensional da concentração média da cabeça pela concentração média do corpo com a: a) Concentração volumétrica (grupos NC, M e C) e b) Presença de argila (grupo transição)	205
Figura 9.12 Perfil de velocidades normalizado: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.....	208
Figura 9.13 Detalhe da zona de perfil logarítmico no perfil de velocidades normalizado: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição....	210
Figura 9.14 Esquema do perfil vertical de velocidade de uma corrente de turbidez.....	211

Figura 9.15 Comparação entre o perfil de velocidade medido e ajustado para os quatro grupos de ensaios.....	213
Figura 9.16 Relação dos parâmetros ajustados com a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Parâmetro m_1 ; b) Parâmetros m_2 e α_e ; c) Parâmetro m_1 , m_2 e α_t (transição).....	214
Figura 9.17 Esquema das zonas do perfil vertical de velocidade das correntes com maior presença de argila	217
Figura 9.18 Comparação entre o perfil de velocidade medido e ajustado para ensaios de mais alta concentração (grupos misto, coesivo e transição).....	220
Figura 9.19 Perfis de concentração vertical adimensionalizados: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.	223
Figura 9.20 Perfis de concentração ajustados analiticamente: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.	225
Figura 9.21 Relação entre a tensão de cisalhamento (a e c) e pela velocidade de cisalhamento (b e d) e a concentração volumétrica e/ou presença de argila calculado pelo método apresentado em Michon et al, 1955.....	227
Figura 9.22 Relação entre a tensão de cisalhamento (a e c) e a velocidade de cisalhamento (b e d), calculadas pelo método de Clauser (1954), com a concentração volumétrica e/ou presença de argila	229
Figura 9.23 Comparação dos valores da tensão de cisalhamento calculados pelos métodos de Michon e de Clauser: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.	231
Figura 9.24 Perfis de fluxo de sedimentos verticais médios do grupo não coesivo: a) Valores absolutos e b) Valores adimensionalizados pelo valor máximo.	233
Figura 9.25 Perfis de fluxo de sedimentos verticais médios do grupo misto: a) Valores absolutos e b) Valores adimensionalizados pelo valor máximo.....	233
Figura 9.26 Perfis de fluxo de sedimentos verticais médios do grupo coesivo: a) Valores absolutos e b) Valores adimensionalizados pelo valor máximo.....	234
Figura 9.27 Perfis de fluxo de sedimentos verticais médios do grupo transição: a) Valores absolutos e b) Valores adimensionalizados pelo valor máximo.....	234
Figura 10.1 Mosaico de imagens da simulação em diferentes instantes do ensaio, destacando as camadas mais concentradas junto ao fundo.....	237
Figura 10.2 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) para os ensaios do grupo não coesivo: a) Concentração volumétrica de 2,5 até 15%; e b) Concentração volumétrica de 20 até 35%.....	240

Figura 10.3 a) Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) para os ensaios do grupo misto (concentração volumétrica de 2,5 até 10%) e; b) Série temporal da altura da camada interna da corrente e a relação com a espessura final do depósito após 24h.....	241
Figura 10.4 Série temporal da altura da camada interna da corrente e a relação com a espessura final do depósito após 24h para o grupo coesivo.....	242
Figura 10.5 a) Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) para os ensaios do grupo transição (presença de argila até 25%) e; b) Série temporal da altura da camada interna da corrente e a relação com a espessura final do depósito após 24h.....	243
Figura 10.6 Resultado da espessura dos depósitos após 24h ao longo da distância para os quatro grupos simulados: a) Não coesivo; b) Misto; c) Coesivo e; d) Transição...	245
Figura 10.7 Relação dos valores médios de espessura do depósito após 24h e a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Valores medidos; b) Valores com o ajuste de tendência linear e; c) Valores do grupo transição.....	247
Figura 10.8 Relação da quantidade relativa de depósito e a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Valores do grupo não coesivo, misto e coesivo e b) Valores do grupo transição.....	249
Figura 10.9 Variação do diâmetro do grão depositado com a distância à comporta: a) Não coesivo; a) Misto, c) Coesivo; d) Transição; e) Variação do diâmetro do grão depositado com a concentração volumétrica (grupos NC, M e C) e; f) Variação do diâmetro do grão depositado com a presença de argila (grupo transição).....	252
Figura 10.10 Imagem das amostras processadas no MEV em três posições ao longo do canal. a) Grupo não coesivo; B) Grupo misto e; C) Grupo transição.....	254
Figura 10.11 Imagem das amostras processadas no MEV em três posições ao longo do canal para os ensaios do grupo não coesivo.....	255
Figura 10.12 Relação entre a porcentagem de esfera de vidro presente no depósito e a concentração volumétrica para os ensaios do grupo não coesivo.....	257
Figura 10.13 Porcentagem de esfera de vidro presente no depósito ao longo da altura (gradação) para os ensaios amostrados do grupo não coesivo.....	258
Figura 10.14 Valor do diâmetro médio dos grãos ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo não coesivo.....	260

Figura 10.15 Valor do diâmetro médio dos grãos (intervalado a cada 25 pixels na vertical) ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo não coesivo.....	261
Figura 10.16 Imagens processadas no MEV com o resumo dos parâmetros avaliados ao longo do item 10.3.2: a) $C_{vol} = 5\%$; b) $C_{vol} = 10\%$; c) $C_{vol} = 15\%$; d) $C_{vol} = 20\%$; e) $C_{vol} = 25\%$; f) $C_{vol} = 30\%$; g) $C_{vol} = 35\%$	268
Figura 10.17 Imagem das amostras processadas no MEV em três posições ao longo do canal para os ensaios do grupo misto.	269
Figura 10.18 Porcentagem do tipo de sedimentos ao longo da vertical para os ensaios do grupo misto.	271
Figura 10.19 Relação entre a porcentagem de tipo de sedimento presente no depósito e a concentração volumétrica para os ensaios do grupo misto. a) a 80 cm da fonte. b) a 180 cm da fonte. c) a 280 cm da fonte e d) só esfera de vidro e argila nas três posições.....	273
Figura 10.20 Porcentagem de esfera de vidro presente no depósito amostrados no MEV ao longo da altura (gradação) para os ensaios do grupo misto.....	274
Figura 10.21 Valor do diâmetro médio dos grãos ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo misto.	275
Figura 10.22 Valor do diâmetro médio dos grãos (intervalado a cada 25 pixels na vertical) ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo misto.....	276
Figura 10.23 Imagens processadas no MEV do grupo misto com o resumo dos parâmetros avaliados ao longo do item 10.3.3: a) $C_{vol} = 2,5\%$; b) $C_{vol} = 15\%$; c) $C_{vol} = 20\%$; d) $C_{vol} = 25\%$; e) $C_{vol} = 30\%$ e; f) $C_{vol} = 35\%$;	282
Figura 10.24 Imagem das amostras processadas no MEV em três posições ao longo do canal para os ensaios do grupo transição.....	283
Figura 10.25 Porcentagem do tipo de sedimentos ao longo da vertical para os ensaios do grupo transição.	284
Figura 10.26 Relação entre a porcentagem de tipo de sedimento presente no depósito e a concentração volumétrica para os ensaios do grupo transição: a) 80 cm da fonte; b) 180 cm da fonte; c) 280 cm da fonte e; d) Só esfera de vidro e argila nas três posições.	285
Figura 10.27 Porcentagem de esfera de vidro presente no depósito amostrados no MEV ao longo da altura (gradação) para os ensaios do grupo transição.	286

Figura 10.28 Valor do diâmetro médio dos grãos ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo transição.....	287
Figura 10.29 Valor do diâmetro médio dos grãos (intervalado a cada 25 pixels na vertical) ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo transição.	288
Figura 10.30 Imagens processadas no MEV para o grupo transição com o resumo dos parâmetros avaliados ao longo do item 10.3.3: a) 100B:0K; b) 90B:10K; c) 75B:25K; d) 50B:50K e; e) 25B:75K.....	293
Figura 11.1 Relação da concentração volumétrica e da presença de argila utilizados na definição das seis regiões de fluxo-depósito.	297
Figura 11.2 Relação do número de Reynolds médio com o número de Froude densimétrico médio indicando os ensaios correspondentes a cada região.	299
Figura 11.3 Perfil vertical médio de velocidade, concentração e fluxo de sedimentos para as seis regiões determinadas.	300
Figura 11.4 Série temporal da velocidade e concentração para as seis regiões determinadas.	300
Figura 11.5 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região I.	303
Figura 11.6 Séries temporais características da região I. a) Velocidade da corrente. b) Concentração volumétrica.....	304
Figura 11.7 a) Série temporal do número de Reynolds (gráfico truncado acima de 40000) e b) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região I.	305
Figura 11.8 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região I, em duas escalas de cores distintas.....	306
Figura 11.9 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada junto ao fundo dos ensaios da região I.....	307
Figura 11.10 a) Modelo de gradação do depósito para a região I; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . e; c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.	307
Figura 11.11 Distribuição granulométrica característica do depósito da região I.	309
Figura 11.12 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região I.....	310
Figura 11.13 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região II.....	311

Figura 11.14 Séries temporais características da região II: a) Velocidade da corrente e; b) Concentração volumétrica.....	313
Figura 11.15 a) Série temporal do número de Reynolds e; b) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região II.....	315
Figura 11.16 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região II, em duas escalas de cores distintas	315
Figura 11.17 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada dos ensaios da região II.....	316
Figura 11.18 a) Modelo de gradação do depósito para a região II e; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.	317
Figura 11.19 Distribuição granulométrica característica do depósito da região II.....	318
Figura 11.20 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região II.	320
Figura 11.21 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região III.....	322
Figura 11.22 Séries temporais características da região III. a) Velocidade da corrente. b) Concentração volumétrica.....	323
Figura 11.23 a) Série temporal do número de Reynolds. B) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região III.	325
Figura 11.24 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região III, em duas escalas de cores distintas	325
Figura 11.25 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada junto ao fundo dos ensaios da região III.	326
Figura 11.26 a) Modelo de gradação do depósito para a região III; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . e; c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.	327
Figura 11.27 Distribuição granulométrica característica do depósito da região III.	327
Figura 11.28 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região III.....	329
Figura 11.29 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região IV.	330

Figura 11.30 Séries temporais características da região IV: a) Velocidade da corrente e; b) Concentração volumétrica.....	332
Figura 11.31 a) Série temporal do número de Reynolds e; b) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região IV.	333
Figura 11.32 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região IV, em duas escalas de cores distintas.....	334
Figura 11.33 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada junto ao fundo dos ensaios da região IV.	334
Figura 11.34 a) Modelo de gradação do depósito para a região IV; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . e; c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.	336
Figura 11.35 Distribuição granulométrica característica do depósito da região IV	336
Figura 11.36 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região IV	338
Figura 11.37 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região V.....	339
Figura 11.38 Séries temporais características da região V. a) Velocidade da corrente. b) Concentração volumétrica.....	340
Figura 11.39 a) Série temporal do número de Reynolds e; b) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região V.....	341
Figura 11.40 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região V, em duas escalas de cores distintas.	342
Figura 11.41 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada junto ao fundo dos ensaios da região V.....	343
Figura 11.42 a) Modelo de gradação do depósito para a região V; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . e; c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.	344
Figura 11.43 Distribuição granulométrica característica do depósito da região V	345
Figura 11.44 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região V.	346
Figura 11.45 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região VI.	348

Figura 11.46 Séries temporais características da região VI: a) Velocidade da corrente. e; b) Concentração volumétrica.....	349
Figura 11.47 a) Série temporal do número de Reynolds. b) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região VI.....	350
Figura 11.48 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região VI, em duas escalas de cores distintas.....	350
Figura 11.49 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada junto ao fundo dos ensaios da região VI.....	351
Figura 11.50 a) Modelo de gradação do depósito para a região VI; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . e; c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.....	352
Figura 11.51 Distribuição granulométrica característica do depósito da região VI.....	352
Figura 11.52 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região VI.....	354
Figura 11.53 Valores médios da quantidade relativa de material depositado (QDR) e da relação entre a espessura do depósito após 24h e a espessura do fluxo para as seis regiões determinadas.....	355
Figura 11.54 Modelo idealizado de evolução espacial para a transição dos fluxos entre a região I e a região II (menor concentração e com menor presença de argila).....	356
Figura 11.55 Modelo idealizado de evolução espacial para a transição dos fluxos da região II e da região III.....	357
Figura 11.56 Modelo idealizado de evolução espacial para os fluxos da região IV.....	358
Figura 11.57 Modelo idealizado de evolução espacial para os fluxos da região V e VI.....	358
Figura 12.1 Classificação de correntes de baixa e alta densidade baseada na concentração volumétrica as misturas.....	364
Figura 12.2 Dois caminhos possíveis de transição entre os fluxos gravitacionais de sedimentos. Fluxos com pouca presença de argila (seta A). Fluxos com muita presença de argila (seta B).....	370
Figura 12.3 Classificação proposta por este trabalho para as correntes de turbidez de alta densidade.....	374
Figura 12.4 a) Diagrama de Amy et al (2006) modificado para incluir as regiões determinadas nesse trabalho e; b) Esquema mostrando as regiões determinadas nesse trabalho.....	377

LISTA DE SÍMBOLOS

A e B	parâmetros a serem determinados
Arg	porcentagem de argila (caulim) presente na mistura (%)
C ou C_{coesivo}	relativo ao grupo de ensaios coesivo
Ca	% material coesivo (caulim);
Cab	relativo a zona da cabeça da corrente
\bar{C}_{vol}	concentração volumétrica média na vertical (%)
C ou C_{vol}	concentração volumétrica média na altura z (%)
C(z)	concentração volumétrica no ponto z (%)
C_r ou C_{ref}	concentração de referência (%)
C_f	coeficiente de atrito - Método de Clauser
C_{gel}	concentração de gel (<i>gelling</i>) (%)
C_{inicial}	concentração inicial da mistura (%)
$C_{\text{média}}$	concentração média da corrente (%)
$C_{\text{máxima}}$	concentração máxima da corrente (%)
Conc	relativo a concentração volumétrica
c_i e c_{i+1}	concentração volumétrica média na altura i distante ao fundo (m/s)
$D_{\text{médio}}$	diâmetro médio dos grãos depositados no canal (micra)
D_i	percentil de i% da distribuição granulométrica acumulada (micra)
EV	% material não coesivo (esferas de vidro);
e_w	coeficiente de carregamento de água
E_s	coeficiente adimensional de erosão
$FC_{\text{zona i}}$	fator de correção
Fr_d	número de Froude densimétrico
FS ou Flux	fluxo de sedimentos por unidade de largura (m^3/s^3)
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
g'	aceleração da gravidade reduzida (m/s^2)
h ou \bar{h}	altura média da corrente (cm) ;
hc	altura da corrente (cm)
h_i	altura do ponto de inflexão da velocidade (m)
ht	altura da camada de mistura (cm);
h_m	altura do ponto de máxima velocidade (cm)
h_t	altura total da corrente de densidade (cm)

h_p	espessura da camada de “plug” (cm)
h_s	espessura da camada cisalhante (cm)
h_{plug}	altura do ponto de “plug” de sedimentos (cm)
$h_{\text{camada lamosa}}$	altura da camada lamosa do grupo misto (cm)
k	coeficiente de consistência (Pa.s ⁿ)
K	energia cinética da turbulência (m ² /s ²)
m_1, m_2, m_3	parâmetros de ajuste da lei exponencial
M ou (misto)	relativo ao grupo de ensaios misto
NC ou (não coesivo)	relativo ao grupo de ensaios Não coesivo
n	coeficiente da lei de potência
QRD	quantidade relativa de depósito
R^2	coeficiente de determinação
R	$(\rho_m - \rho_w) / \rho_w$
R_H	raio hidráulico (m) = área/perímetro
Re	número de Reynolds
r_0	coeficiente adimensional da concentração na base
S	declividade
ST	porcentagem de sedimento total no depósito
t	tempo de passagem da corrente (s)
T ou (transição)	relativo ao grupo de ensaios transição
\bar{U} e U	velocidade média da corrente (m/s)
u	velocidade média na altura z (m/s)
u^*	velocidade de cisalhamento (m/s)
u'	flutuações da velocidade em torno do valor médio
U_{plug} ou U_p	velocidade vertical média da região de “plug” (m/s)
U_m	velocidade máxima da corrente (m/s)
u_{rms}	intensidade da turbulência na direção do escoamento (m/s)
u_{inst} ou U_{inst}	velocidade instantânea na direção do escoamento (m/s)
u_i e u_{i+1}	velocidade média na altura i distante ao fundo (m/s)
u_{inf}	velocidade o ponto de inflexão do perfil vertical (m/s)
V	% de vazios na amostra
Vel_{Maxcab}	velocidade máxima da cabeça da corrente de densidade (m/s)
Vel	relativo a velocidade da corrente
v_s	velocidade de queda dos sedimentos em suspensão (m/s)
z	distância a parede (cm)

z_i e z_{i+1} =	altura i distante ao fundo (m)
Z	espessura do nível d'água (cm)
α, α_t	parâmetros de ajuste aplicada a região externa do perfil de velocidades
β	parâmetros de ajuste de lei
ξ	espessura da subcamada viscosa
ϵ_0	viscosidade média na vertical
ϕ	viscosidade relativa aparente no ponto ϕ (equação 7.11)
φ	viscosidade relativa aparente no ponto φ (equação 7.5)
γ	(du/dz) é o gradiente de velocidade ou taxa de deformação (s^{-1})
κ	parâmetro de ajuste de lei, com dimensão (s)
ρ_w	massa específica da água (kg/m^3)
ρ_f	massa específica do fluido (mistura) (kg/m^3)
ρ_m	massa específica do material (kg/m^3)
$\Delta\rho$	variação da massa específica (kg/m^3)
τ	tensão de cisalhamento (Pa)
τ_b	tensão de cisalhamento junto ao fundo (Pa)
τ_i	tensão de cisalhamento crítica (Pa)
τ_{lam}	componente laminar da tensão de cisalhamento (Pa)
τ_{turb}	componente turbulenta da tensão de cisalhamento (Pa)
θ	ângulo em relação ao fundo ($^\circ$)
μ	coeficiente de viscosidade dinâmico (Pa.s)
μ_0	coeficiente de viscosidade dinâmica da água limpa (Pa.s)
μ_{ap}	viscosidade aparente (Pa.s)
ν	coeficiente de viscosidade cinemático (m^2/s)
ν_{turb}	coeficiente de viscosidade aparente da turbulência $\overline{u' \cdot v'}$

1 APRESENTAÇÃO

Esta tese faz parte da continuação dos estudos por mim iniciados em 1999, junto ao Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade – IPH/UFRGS, tendo começado em março de 2003, após a elaboração do plano de tese que visava estudar, através da modelagem física, as correntes de turbidez de alta densidade, uma vez que esse tema ainda não fora, ao longo dos últimos anos, totalmente abordado e discutido na literatura.

A fim de cumprir os objetivos propostos nesta tese, foi elaborado, no plano de qualificação, uma proposta inicial de experimentos a ser realizado nas instalações do NECOD, utilizando o canal de largura variável (CLV), o qual foi projetado e confeccionado especialmente para atender às demandas deste trabalho.

Nos ensaios iniciais seriam simuladas três etapas distintas de experimentos, começando com:

a) etapa de adaptação e desenvolvimento de metodologia de ensaios, uma vez que, a instalação era completamente nova;

b) etapa de ensaios para avaliar parâmetros isolados que governam o fluxo de alta densidade, no caso, a concentração volumétrica da mistura e as populações de grãos; e, por último;

c) etapa de ensaios para simular pacotes deposicionais de fluxos de alta densidade. Ainda, neste plano inicial utilizar-se-iam os equipamentos existentes no NECOD, desenvolvendo também, a metodologia do uso do scanner por ultrassom Doppler.

O plano de qualificação também previa a realização de um estágio no exterior (doutorado sanduíche) em instituição de ensino no exterior. Das universidades contatadas, a Universidade de Leeds (Reino Unido), através do pesquisador Dr. Jaco Baas, apresentou a proposta mais condizente com o plano de qualificação. Tal proposta pode ser dividida em duas, sendo a primeira relacionada ao estudo da dinâmica interna das correntes de gravidade particuladas e seus depósitos gerados (*The internal dynamics and deposits of particulate gravity currents*); e a segunda na modelação da turbulência em fluxos sedimentológicos argilosos (*Turbulence modulation in clay-rich sedimentological flows*), que visava estabelecer uma correlação entre as correntes de turbidez coesivas turbulentas e as propriedades dinâmicas da suspensão com seus depósitos resultantes através da modelagem física.

Assim, o tema de pesquisa proposto na Universidade de Leeds estava muito ligada aos objetivos iniciais da tese, pois seria possível relacionar as propriedades do fluxo com os depósitos gerados, mais especificamente nas correntes de turbidez coesivas.

Com a confirmação da realização do doutorado sanduíche na Universidade de Leeds foi definido um plano de estudos no exterior que incluía a realização de simulações experimentais. O plano de atividades no exterior foi, então, intitulado de “Correlação entre as correntes de turbidez coesivas turbulentas e as propriedades dinâmicas da suspensão com seus depósitos resultantes em modelagem física”, tendo sido definido um plano de ensaios, bem como os equipamentos que seriam utilizados. Durante a realização do doutorado sanduíche, o qual teve duração de 12 meses, o plano de ensaios inicial foi ampliado, englobando também as correntes de turbidez não coesivas e de baixa densidade, além da realização da caracterização reológica das misturas.

Ao final desse estágio no exterior, a quantidade e qualidade de dados adquiridos nos experimentos foi considerável, permitindo a realização completa dessa tese. Após o retorno ao Brasil, as análises e as interpretações dos dados foram realizadas, resultando no texto que será aqui apresentado, composto por 13 capítulos, assim estruturados:

Capítulos 1, 2 e 3: referem-se à apresentação, introdução ao tema e aos objetivos da tese.

Capítulo 4: apresenta a revisão bibliográfica dos temas estudados, passando pela definição das correntes de turbidez de alta densidade, da dinâmica do escoamento e de uma revisão de modelagem física dos fluxos gravitacionais de sedimentos.

Capítulo 5: apresenta a descrição do laboratório, dos tanques e dos equipamentos utilizados,

Capítulo 6: descreve o plano de ensaios proposto e realizado, as metodologias de ensaio e as metodologias de análise e tratamento dos dados gerados.

Capítulo 7: apresenta os resultados da caracterização reológica das misturas utilizadas nos experimentos, com o tratamento dos resultados e a definição do seu comportamento.

Capítulo 8: apresenta os resultados do fluxo simulados, a partir do tratamento das séries temporais da geometria, da velocidade e da concentração, bem como a descrição qualitativa dos ensaios baseados na análise dos vídeos. Também, apresenta os perfis verticais médios das sondas de velocidade e das sondas de concentração.

Capítulo 9: apresenta o estudo dos condicionantes hidráulicos das correntes de turbidez, com a análise de diversos parâmetros relacionados às características hidrodinâmicas do fluxo (velocidade, geometria e concentração) e com a definição dos valores médios ao longo da vertical, por exemplo. Também apresenta uma adimensionalização dos perfis de velocidade e dos perfis de concentração simplificada, bem como a definição da tensão de cisalhamento e da vazão mássica das correntes de densidade.

Capítulo 10: aborda os aspectos deposicionais dos resultados, caracterizando os depósitos gerados tanto ao longo do espaço, quanto ao longo de sua altura. Os depósitos foram

avaliados em macro escala (características espaciais) e em micro escala, através do uso de imagens microscópicas obtidas a partir de amostras indeformáveis do depósito resultante.

Capítulo 11: apresenta um resumo dos resultados obtidos, com a definição de seis diferentes regiões de fluxo, em função da concentração volumétrica, da presença de argila e do comportamento reológico da mistura, as quais são resultado da observação e quantificação de 22 propriedades distintas, considerando os aspectos geométricos, dinâmicos e deposicionais das correntes de turbidez.

Capítulo 12: apresenta uma discussão sobre a classificação de correntes de turbidez de alta densidade, com a proposição de uma nova classificação baseada nos resultados sumarizados no capítulo 11.

Capítulo 13: destaca as conclusões e recomendações desse trabalho, sintetizando as discussões realizadas ao longo do trabalho e apresentadas na forma de uma pequena síntese ao final de cada item apresentado.

No fim deste texto estão apresentados os anexos, constando de descrição detalhada das metodologias utilizadas, das técnicas de calibração e de processamento dos dados, bem como de tabelas apresentando os dados brutos,.

2 INTRODUÇÃO

A ocorrência de diferentes processos de transporte de sedimentos em águas oceânicas proporcionou, ao longo do tempo geológico, a formação de diferentes tipos de depósitos sedimentares. Dentro eles, destacam-se os depósitos sedimentares turbidíticos (turbiditos), que seriam aqueles formados por um tipo específico de fluxo gravitacional de sedimentos, no caso as correntes de turbidez, formadas pelo deslocamento de uma mistura de água e sedimento, devido ao empuxo provocado pela diferença de densidade entre os meios.

Apesar do grande avanço na abordagem teórico/analítica dos fenômenos envolvidos no processo de formação, desenvolvimento e deposição deste tipo de fluxo e de outros fluxos de densidade, ainda hoje, eles não são bem classificados e fundamentados devido, principalmente, à complexidade do fenômeno - expressa pela interação entre o escoamento e a morfologia de fundo, pelo tipo de material transportado, pelas variáveis envolvidas - e, ainda, pela dificuldade extrema de monitoramento destes eventos na natureza, uma vez que são de grande magnitude e imprevisíveis.

Os turbiditos e os seus depósitos associados começaram a despertar o interesse da ciência e da indústria do petróleo, tanto pelo aspecto científico: sua origem, formação, evolução, caracterização e parametrização, quanto pelo aspecto econômico, uma vez que, devido às suas características sedimentológicas, eles se podem se constituir em reservatórios de hidrocarbonetos. Estima-se que 35% a 40% das reservas mundiais de hidrocarbonetos estejam armazenadas nesses depósitos. No Brasil, as principais reservas confirmadas de hidrocarbonetos são oriundas destes sistemas deposicionais, como por exemplo, as Bacias de Campos, Espírito Santo e Santos, representando, mais de 90% das reservas brasileiras (D'Ávila et al., 2003).

Um dos tipos de depósitos turbidíticos é originário daquilo que se convencionou chamar como depósitos de fluxos de turbidez de alta densidade (espessos depósitos maciços de areia bem selecionada ocupando grandes áreas), porém, a origem dos mesmos e as características do escoamento responsável por sua formação não são bem claras. Definições simples, como as concentrações de sedimentos das correntes, a composição e a distribuição granulométrica das partículas sólidas que compõem a mistura, bem como os mecanismos de suporte de grãos, são difíceis de se obter na natureza, evidenciando a complexidade deste fenômeno. Com o passar dos anos, inúmeros termos, conceitos, características e modelos (mais de 30) foram sendo introduzidos e aplicados na interpretação destes tipos de escoamentos e depósitos, o que acabou gerando inconsistências e indefinições sobre o processo real que ocorreu na natureza.

A compreensão do processo de formação de uma corrente de alta densidade, relacionando suas propriedades hidrodinâmicas com as características deposicionais, permitirá a percepção espacial da evolução das mesmas no meio marinho, diminuindo as incertezas na prospecção das reservas de hidrocarbonetos. Atualmente, a identificação do registro da passagem destas correntes é realizada nos depósitos turbidíticos principalmente através de métodos de prospecção, testemunhos (1D), seções (2D) e levantamentos geofísicos (2D e 3D). Os primeiros são de alto custo e os outros apresentam grandes incertezas, principalmente em águas profundas. Além disso, essa identificação apresenta um registro do que restou da corrente, a partir de várias passagens sucessivas das mesmas, sem que se saiba claramente quais os processos de erosão, deposição e retrabalhamento que ocorreram durante sua formação.

Independente do método de investigação a ser utilizado (testemunhos, sísmicas etc), a extrapolação desse resultado para regiões mais distantes do dado inicial apresenta alguma dificuldade, devido, principalmente, às heterogeneidades existentes nos depósitos naturais. Deve-se buscar então, o melhor entendimento da dinâmica do processo responsável pela formação dos depósitos turbidíticos.

Uma das maneiras de se fazer isso é através da simulação destes fenômenos, em laboratório, com o uso da modelagem física. A partir da construção de um modelo físico (representação de uma situação existente) e com o auxílio dos critérios de semelhança e da análise dimensional, é possível simular diversos cenários de escoamentos, controlando as condições de contorno e, principalmente, quantificando os depósitos gerados por eles. Assim, diagnosticada uma feição característica de um depósito, causada por uma corrente ou por uma sucessão das mesmas, pretende-se, através do conhecimento da sua dinâmica, inferir a sua continuidade para outras regiões.

A nível nacional, poucos estudos têm sido realizados aplicando a simulação física. A partir de 1999, o Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, iniciou uma linha de pesquisa voltada para esse tema e, seus primeiros estudos (Fabian, 2002; Manica, 2002; Ávila, 2003; Del Rey, 2006; Ducker, 2007; e Guirro, 2008) verificaram que a simulação física de correntes de baixa densidade em modelos reduzidos tem gerado resultados promissores, na medida que o fluxo simulado foi estudado detalhadamente e que os depósitos gerados foram qualitativa e quantitativamente representativos de sistemas turbidíticos, tanto em macro como em micro escala. Verificou-se, também, que esse tipo de simulação produz distribuições granulométricas verticais que respeitam parâmetros naturais complexos, explicando, de certa maneira, as configurações naturais existentes.

Assim, esse trabalho está engajado nesta linha de pesquisa, propondo o estudo experimental de correntes de turbidez de alta densidade formadas com diferentes tipos de materiais, caracterizando-as quanto aos seus padrões hidrodinâmicos e deposicionais. Objetiva-se colaborar para o estudo deste fenômeno, tanto em modelos reduzidos quanto em modelos numéricos, de forma a fornecer subsídios para a indústria do petróleo nas atividades de identificação, localização e prospecção de hidrocarbonetos.

3 OBJETIVOS

Conforme foi apresentado na introdução, o estudo das correntes de turbidez de alta densidade, ainda hoje, requer um aprofundamento no estudo da relação causa (fluxo) e efeito (depósito) e, ainda não existe uma classificação única para esse tipo de escoamento. Com base nessas duas afirmações, a hipótese deste trabalho é: *“É possível gerar e classificar as correntes de turbidez de alta densidade com base na relação entre as propriedades do fluxo (concentração presença de argila e reologia) e as propriedades do depósito?”*.

Assim, esse trabalho buscará responder essa hipótese, tendo como objetivo geral gerar, através da modelagem física, diferentes tipos de correntes de turbidez de alta densidade. Pretende-se assim, verificar quais são os condicionantes hidráulicos e deposicionais que interferem na formação, no transporte e na deposição dessas correntes, caracterizando-as, detalhadamente, com relação aos seus padrões hidrodinâmicos e deposicionais. Desta forma, pretende-se contribuir para um melhor entendimento sobre a classificação e fundamentação destes processos de transporte e de deposição, diferenciando-os das correntes de turbidez de baixa densidade e dos fluxos de detritos.

Para atingir o objetivo geral é preciso que algumas etapas sejam introduzidas, cujos objetivos específicos são:

- *Desenvolver e implantar uma metodologia de ensaios para a simulação de correntes de alta densidade.*

Esse primeiro tópico se caracteriza pela determinação e desenvolvimento da metodologia de ensaios de correntes de alta densidade para os três tipos de mistura propostos, englobando os processos de modelagem, detalhes operacionais, materiais, equipamentos e/ou instrumentos, técnicas de amostragem e análise dos resultados a serem utilizados entre outras.

- *Avaliar as propriedades reológicas das misturas a serem ensaiadas*

Essa segunda etapa visa caracterizar os sedimentos não coesivos e coesivos utilizados na simulação física, bem como estabelecer as propriedades reológicas das diferentes misturas que compõem as correntes de densidade simuladas.

- *Relacionar os processos hidrodinâmicos com os processos deposicionais.*

Esta etapa visa correlacionar os processos hidrodinâmicos com os deposicionais, buscando estabelecer a relação de causa-efeito dos depósitos gerados com seu respectivo fluxo gerador e, também, correlacionar com os depósitos naturais similares. Ainda, buscar-se-á diferenciar as correntes de alta densidade dos fluxos ditos de baixa densidade, estabelecendo os limites de mudança de comportamento da corrente, bem como do depósito formado.

- Caracterizar as correntes de turbidez de alta densidade.

Esta etapa visa caracterizar os fluxos gravitacionais ditos de alta densidade, verificando-se, diretamente, os condicionantes geométricos, hidráulicos e deposicionais que são usados como parâmetro de classificação destas correntes, no caso, a avaliação da concentração volumétrica, da composição da mistura (quantidade de argila presente) e de seu comportamento reológico.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 SISTEMA DEPOSICIONAL MARINHO PROFUNDO E SEUS PROCESSOS DEPOSICIONAIS - GENERALIDADES

O sistema deposicional marinho profundo se caracteriza pela acumulação de sedimentos nos seguintes ambientes marinhos, situados além da plataforma continental: o talude e sopé continental e a planície abissal (figura 4.1).

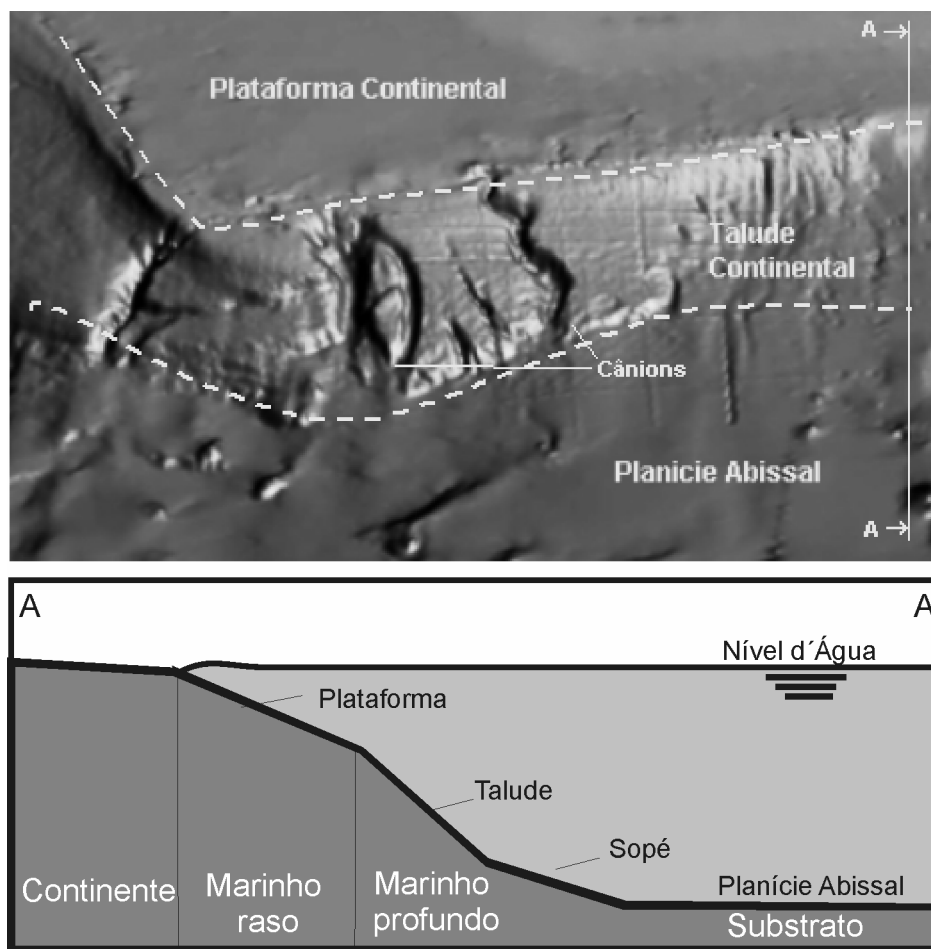


Figura 4.1 Topografia de um ambiente marinho (acima). Corte transversal A-A de um ambiente marinho (abaixo).

As plataformas continentais (declividade de $\sim 0,1^\circ$) correspondem a segmentos submersos das margens continentais, que mergulham suavemente desde o nível de base de ação de ondas até a chamada borda da plataforma, onde ocorre um incremento na declividade marcando o início do talude continental. Esta zona é chamada de ambiente marinho raso. Os taludes (declividade de $\sim 4^\circ$) e sopés (declividade de $\sim 0,05^\circ$) continentais são as zonas de transição entre a plataforma e a planície abissal. Nestes locais, formam-se zonas preferenciais de passagem de sedimentos entre a plataforma e a planície abissal que são chamados de cânions submarinos. À base do talude/sopé é o limite para o início da planície abissal

(assoalho oceânico), a qual é uma zona caracterizada por possuir uma declividade quase nula ($\sim 0,01^\circ$) que se estende oceano afora (Reading, 1996 e Boggs Jr, 2006; entre outros).

A origem dos sedimentos, os processos de transporte e as características deposicionais nestes dois sistemas são distintos e o entendimento de como os sedimentos que estavam na plataforma eram transportados nas águas profundas intrigava os pesquisadores até meados da década de 30. A partir desta época e na década de 40, diversas hipóteses começaram a ser levantadas no intuito de buscar compreender qual a gênese e como se desenvolviam os processos de sedimentação no ambiente marinho profundo, além da análise e interpretação das várias estruturas sedimentares preservadas no seu registro geológico, principalmente aquelas estruturas gradacionais e maciças (de grandes espessuras) - Daly (1936), Stetson e Smith (1938) apud Kuenen (1951), Bramlette e Bradly (1940) e Kuenen (1947) apud Kuenen e Migliorini (1950).

Nesta época, também, começaram as primeiras investigações experimentais (Kuenen, 1937 e outros) para comprovar as hipóteses levantadas por esses pesquisadores, bem como a observação destas correntes na natureza.

Na década de 50, o clássico trabalho de Kuenen e Migliorini (1950) integrou dados de campo e laboratório e sugeriu que as camadas com gradação normal, depositadas no ambiente marinho profundo, eram resultados da deposição de correntes de turbidez de alta densidade. Essa correlação de causa-efeito, integrando simulações experimentais com dados de campo, revolucionou os estudos da sedimentologia, agregando um componente a mais no estudo, no caso o processo, onde os pesquisadores puderam relacionar um determinado tipo de mecanismo de transporte com o depósito gerado.

Isso gerou uma grande evolução nos estudos dos sistemas deposicionais marinhos profundos, reafirmando algumas hipóteses levantadas pelos pesquisadores nos anos anteriores, além de servir de suporte para a existência de correntes de turbidez na natureza. Porém, naquela época, ainda haviam algumas incertezas sobre a sua ocorrência. Kuenen e Migliorini (1950) questionaram a ocorrência de correntes de turbidez na natureza, pois elas não eram de fácil observação.

Após isso, o estudo dos processos sedimentares foi intensificado e complementado, não só dos depósitos formados por correntes de turbidez, chamados de turbiditos (termo cunhado posteriormente por Kuenen, 1957 apud Middleton, 1970), mas de todas as rochas sedimentares em ambiente marinho profundo. Com base na aquisição e interpretação dos dados geológicos, tanto no ambiente natural quanto em laboratório, buscou-se classificar os processos segundo o processo genético que lhes deu origem. De uma maneira abrangente, pode-se dividir os principais processos sedimentares em três grupos (figura 4.2):

- sedimentação pelágica: caracterizada por envolver a deposição, grão a grão, através da coluna de água, de materiais de granulação fina, principalmente de origem biogênica. A acumulação destes materiais forma os chamados depósitos pelágicos de mar profundo (Stow, 1994)

- associados a correntes de contorno (normais de fundo): caracterizado por ser de natureza termohalina, resultado do resfriamento e mergulho das águas superficiais, fenômeno este que ocorre nas altas latitudes, próximo às regiões polares (Hollister e Heezen, 1972 apud Stow, 1994).

- ressedimentação (fluxos gravitacionais de sedimentos e de massa): caracterizado por serem fluxos governados pela gravidade, num espectro contínuo em termos de concentração e de estado de desagregação interna do material envolvido, passando desde fluxos de massa, como escorregamentos (*slumps*) e deslizamentos (*slides*), a fluxos de sedimentos, como correntes de turbidez (*turbidity currents*), fluxos de grãos (*grains flows*), fluxos liquefeitos (*liquefied flows*) e fluxos de detritos (*debris flows*) entre outros (Middleton e Hampton, 1973).

Esse último tipo será melhor discutido abaixo:

- os escorregamentos (*slumps*) e deslizamentos (*slides*) são caracterizados pela movimentação de uma grande quantidade de sedimentos instantaneamente, cuja diferença se dá pela deformação da organização interna dos sedimentos: alta para escorregamentos e baixa para deslizamentos (Middleton e Hampton, 1973).

- os fluxos de grãos (*grain flows*) ocorrem quando os sedimentos são mantidos em suspensão devido ao choque entre eles (pressão dispersiva). Estes fluxos se desenvolvem, principalmente com grãos não coesivos, sem a presença da matriz argilosa. Sem essa matriz, o atrito intergranular torna-se muito elevado, sendo que esses fluxos só se desenvolvem em declives acentuados, após ser excedido o seu ângulo de resistência inicial.

- os fluxos liquefeitos (*liquefied flows*) são dispersões muito concentradas de grãos e fluidos que são disparadas por um fator externo (p. ex. abalo sísmico), onde os grãos são mantidos em suspensão pela elevada poro-pressão do fluido e seu movimento ascendente. Diferenciam-se dos fluxos fluizados (*fluidized flows*), por apresentar suporte parcial causado pelo escape de fluidos dos poros.

- correntes de turbidez (*turbidity currents*) são um fluxo de água e sedimento que se desenvolve no ambiente marinho até chegar na bacia abissal, gerando um depósito, denominado turbidito, com diversas estruturas deposicionais que variam de acordo com as características da corrente, a distância da área fonte e a morfologia da bacia, entre outros fatores.

- fluxos lamosos (*slurry flows*) são fluxos que contêm areia e são ricos em lama, onde o suporte dos grãos é dado tanto pela turbulência quanto pela coesão. Apresentam uma viscosidade (aparente) intermediária entre as correntes de turbidez de alta densidade e os fluxos de detritos. Estes fluxos têm sua ocorrência associada a cânions e canais onde as correntes de turbidez muito erosivas incorporam fragmentos argilosos do substrato (Lowe e Guy, 2000).

- fluxos de detritos (*debris flows*) são misturas reologicamente plásticas, ricas em argilas, saturadas em água, que depositam sedimentos em massa quando a tensão cisalhante é menor que a tensão de cisalhamento crítica (*yield stress*) da matriz coesiva (*matriz strength*). Os depósitos ocorrem por congelamento coesivo, sendo mal selecionados, geralmente maciços, com matriz lamosa ou areno-lamosa sustentando clastos.

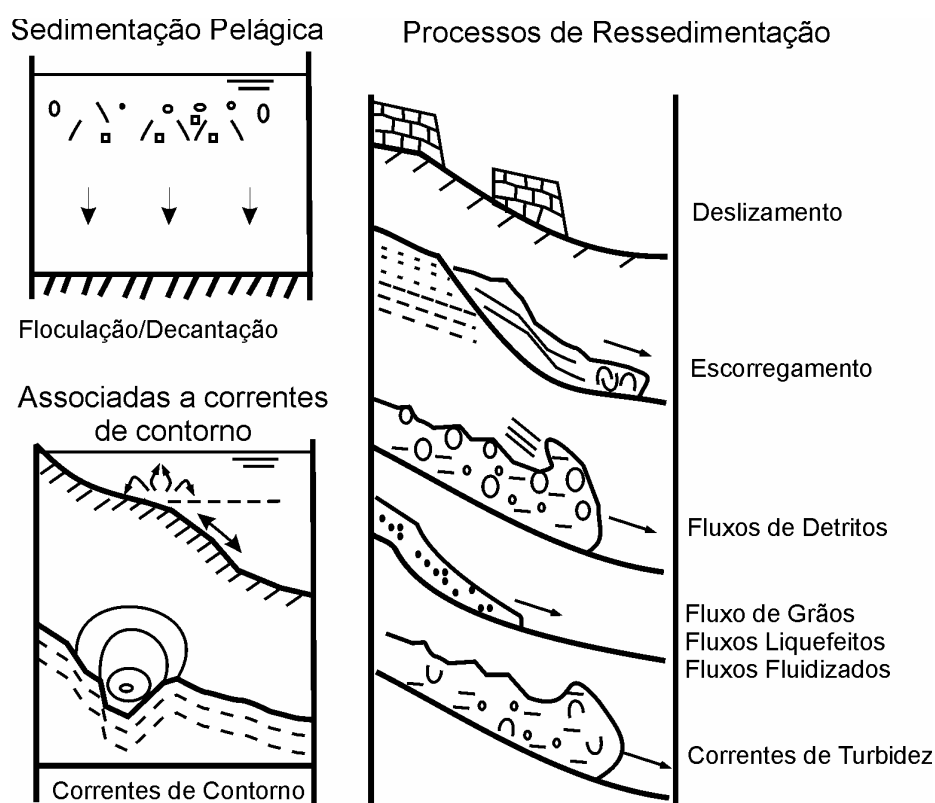


Figura 4.2 Processos sedimentares subaquáticos em ambientes marinho
(Fonte: modificado de Stow, 1994).

4.2 DEFINIÇÃO DE CORRENTES DE TURBIDEZ DE ALTA DENSIDADE

4.2.1 Classificação das correntes de turbidez

Uma corrente de densidade pode ser definida como o movimento relativo que ocorre entre camadas de fluido que possuem uma diferença de massa específica. Esse movimento, governado principalmente pelas forças de empuxo, pode ocorrer junto às superfícies superior e inferior do fluido ambiente, bem como no seu interior. A diferença de massa específica pode

ser causada pela presença de fluidos com diferentes temperaturas, com diferentes concentrações de sólidos dissolvidos e/ou de partículas em suspensão ou com fluidos distintos.

Na natureza, inúmeros são os exemplos de correntes de densidade, por exemplo, plumas de rios, tempestades de poeira, avalanches entre outros (ver Simpson, 1997), porém os que interessam no estudo da sedimentação em ambiente marinho profundo são, principalmente, aquelas pela qual a diferença de densidade é causada pela presença de partículas sólidas em suspensão.

Pode-se chamar este tipo específico de fluxo, de uma maneira mais abrangente, de corrente de densidade não conservativa, pois ocorre troca deste material com a superfície inferior através do processo de deposição e erosão, modificando gradualmente a densidade da corrente ao longo do percurso, devido ao fato da condição de continuidade (conservação de massa) não ser respeitada. Em contrapartida, quando não há variação na quantidade de material dissolvido (por exemplo, sal), as correntes de densidade são chamadas de conservativas.

As correntes de densidade não conservativas começaram a despertar o interesse do meio científico no final do século XIX, quando foram relatados os primeiros eventos envolvendo tais correntes no Lago Gênova, na Suíça (Forel, 1885). Até a década de 30 do século seguinte, poucos trabalhos são encontrados na literatura (Shanmugam, 2000), indicando uma diminuição no interesse do tema. A partir desta década, os pesquisadores começaram a relacionar a ocorrência de correntes de densidade não conservativas às características encontradas nos depósitos geológicos dos sistemas deposicionais marinho profundo. Em 1938, Johnson (1938), apud Middleton (1970), cunhou o termo corrente de turbidez (*turbidity current*) para estas correntes de densidade não conservativas, definindo-a como “uma corrente de densidade devido à turbidez resultante do material mantido em suspensão”.

Conforme foi exposto, o trabalho de Kuenen e Migliorini (1950) apresentou uma nova abordagem para a classificação das correntes de densidade não conservativas. Acrescentou-se à definição de Johnson (1938) o conceito implícito de massa específica ou, ainda, de concentração da corrente. Os autores classificaram as correntes em baixa ou alta densidade, segundo sua capacidade em suspender ou não suas areias (Sanders, 1965), sendo as correntes de alta densidade aquelas com massa específica suficiente para permitir o transporte de uma grande carga de areia em suspensão. A distinção entre os dois tipos de corrente depende, também, da velocidade e do grau de turbulência, da salinidade da água, da natureza do pelito e

do tamanho do grão de areia. Nos experimentos, foi utilizada uma densidade de mistura na faixa de 1,5 a 2,0 que foi considerada de alta densidade.

Após a classificação de Kuenen e Migliorini (1950), Dott (1963) propôs a classificação dos fluxos com base na reologia dos fluidos. Nesta classificação, há dois tipos de fluxos de sedimentos subaquáticos: os Newtonianos (correntes de turbidez) e os plásticos (fluxos de massa, fluxo de detritos, fluxo de grãos entre outros).

Sanders (1965) apresentou uma nova interpretação para as correntes de turbidez simuladas por Kuenen (1950 e 1951), acrescentando na sua proposta a influência do mecanismo de suporte de sedimento. Pela sua interpretação, uma corrente de turbidez é um fluxo bipartido (figura 4.3) composto por duas partes: uma superior, com carga em suspensão (*suspended-load*), onde se desenvolvem as correntes de turbidez, definidas, neste caso, como correntes de densidade causadas pelos sedimentos numa suspensão turbulenta e uma parte inferior, com carga de fundo (*bed-load*), que inclui escorregamentos (*slumps*), deslizamentos (*slides*), camada de fluxo de grãos (*flowing-grain layers*) e suspensões viscosas (*moving viscous suspension*). Em outras palavras, ele propôs uma estratificação do fluxo em uma região turbulenta, situada acima, e numa região não turbulenta de camadas de alta concentração, abaixo.

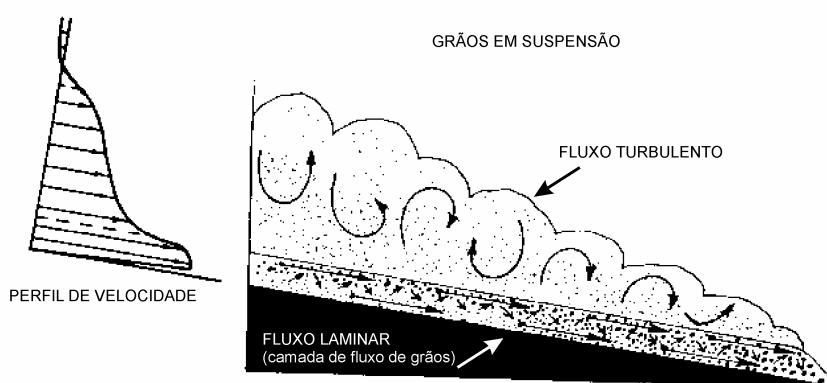


Figura 4.3 Perfil esquemático de um fluxo bipartido (Fonte: modificado de Sanders, 1965).

Kuenen propôs o termo “turbiditos” (*turbidites*) para designar todos os depósitos gerados por correntes de turbidez, porém, no seu trabalho, Sanders (1965) considerou que os turbiditos são formados apenas pela deposição da carga de sedimentos em suspensão turbulenta, excluindo desta nomenclatura os depósitos gerados na parte basal do fluxo .

Após este momento, criaram-se duas linhas de pensamento sobre a definição de correntes de densidade: uma linha, defendida por Kuenen, que advogava a definição de correntes de turbidez sem qualquer referência ao mecanismo hidrodinâmico da corrente (Sanders, 1965 p. 218) isto é, seguindo a definição de Johnson e; outra linha, defendida por Sanders, que restringia a utilização do termo corrente de turbidez somente às correntes que

mantinham o sedimento em suspensão através da turbulência. Shanmugam (2002) apontou esta discussão como a raiz da controvérsia dos turbiditos, a qual gira em torno dos desacordos entre as propriedades dinâmicas das correntes de turbidez e seus depósitos.

Middleton (1967 e 1970) apresentou estudos experimentais de correntes de densidade por ele chamadas de baixa ou alta concentração. Apesar de ser uma nomenclatura nova, está implícito o conceito de massa específica/concentração, seguindo a linha de Kuenen. Através de seus experimentos, o autor conseguiu destacar os efeitos da presença de uma concentração mais elevada, distinguindo padrões diferenciados para baixa/alta concentração. Ele destacou que, apesar da potencial importância da concentração no tipo de depósito, muito pouca atenção tinha sido dada a este fator, até aquele momento (Middleton, 1970).

Posteriormente, num trabalho em conjunto, Middleton e Hampton (1973) apresentaram uma nova classificação para as correntes de densidade, baseando-se no mecanismo de suporte dos grãos, reforçando a proposta inicial de Sanders. Eles introduziram o termo fluxo gravitacional de sedimentos (*Sediment Gravity Flows*), o qual é definido como o transporte de sedimentos em que o movimento paralelo ao fundo é provido pela gravidade. Nessa classificação há, teoricamente, quatro categorias de fluxos (Figura 4.4a):

- Corrente de turbidez: onde os grãos são mantidos em suspensão pela turbulência do fluido;
- Fluxo de grãos: onde os grãos são mantidos em suspensão pelas forças de interação entre eles, também pela colisão entre grãos (regime inercial) ou pela ação das forças viscosas produzidas sobre o grão (regime viscoso);
- Fluxos de sedimentos fluidizados: os grãos são mantidos em suspensão pelo movimento ascendente do fluido intragranular e;
- Fluxo de detritos: os grãos são mantidos em suspensão pela matriz coesiva.

A priori, nesta classificação não há uma distinção entre correntes de turbidez de baixa ou alta densidade, porém, os autores apresentam uma relação entre a concentração de sedimentos, o mecanismo de suporte e sua evolução no tempo/espaço (figura 4.4b). Para eles, os fluxos gravitacionais de sedimentos são de dois tipos: os altamente concentrados, onde o sedimento é suportado por diferentes mecanismos, incluindo, também a turbulência e os fluxos relativamente pouco concentrados, onde o sedimento é suportado apenas pela turbulência (correntes de turbidez).

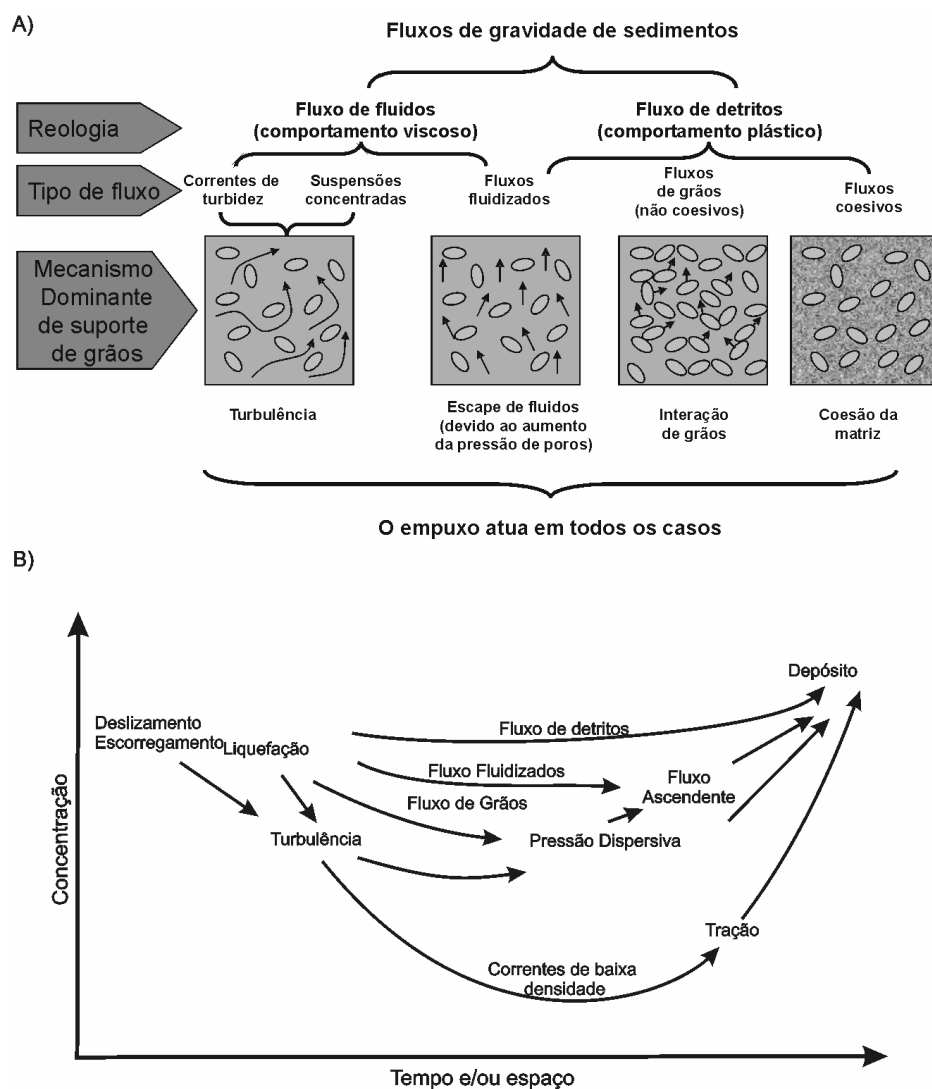


Figura 4.4 a) Classificação de fluxos gravitacionais de sedimentos proposta por Middleton e Hampton, 1973. b) Evolução do fluxo no tempo e espaço.

Como consequência, é provável que haverá uma transição entre os vários tipos de fluxos gravitacionais de sedimentos altamente concentrados devido à probabilidade de que dois ou mais mecanismos de suporte de sedimentos operem simultaneamente (p. ex. pressão dispersiva e fluidização ou matriz coesiva e pressão dispersiva). Os valores da massa específica de fluxos altamente concentrados podem estar na faixa de 1500 kg/m^3 a 2400 kg/m^3 , enquanto que para baixa concentração pode se esperar na faixa de 1030 kg/m^3 a 1200 kg/m^3 (Middleton e Hampton, 1973).

A partir desse momento, se desfez a ideia generalista de Johnson/Kuenen de tratar os diversos tipos de depósitos existentes na natureza como resultado de uma corrente de turbidez. Com a introdução do conceito de mecanismo de suporte dos grãos para a classificação das correntes, criaram-se quatro tipos de fluxos que apresentam depósitos com características específicas. Por esta classificação, as correntes de turbidez ficaram restringidas às correntes de baixa densidade, as quais mantêm a carga de sedimentos em suspensão pela

turbulência. A diferença, neste caso, é que não se exclui, totalmente, a turbulência para os fluxos mais concentrados.

Lowe (1979) apresenta uma classificação das correntes de densidade não conservativas baseada tanto na reologia dos fluidos, quanto no mecanismo de suporte dos grãos (tabela 4.1). Pela reologia dos fluidos, os fluxos são divididos em dois grupos: os plásticos e os fluidos. Estes dois grupos reológicos foram, então, divididos em cinco categorias de fluxos, baseados no seu mecanismo de suporte dos grãos. São eles: correntes de turbidez, onde as partículas são suportadas pela turbulência do fluxo; fluxos fluidizados, onde as partículas são totalmente suportadas pelo movimento ascendente, entre os grãos, dos fluidos intersticiais; fluxos liquefeitos, onde as partículas são mantidas em suspensão pelo fluxo de fluido entre os poros; fluxo de grãos, onde as partículas são suportadas pela “pressão dispersiva” derivada da colisão entre as partículas; fluxos de detritos coesos, onde os grãos são suportados pela matriz coesiva. Destes cinco grupos, apenas as correntes de turbidez (baixa e alta densidade) apresentam turbulência, sendo os outros quatro considerados laminares pelos autores.

Seguindo as ideias de Middleton e Hampton (1973), Lowe (1979) também acredita na transição entre diferentes tipos de fluxo ao longo de sua evolução no tempo e no espaço.

Num trabalho complementar, Lowe (1982) enfatizou, principalmente, as correntes de turbidez de alta densidade e agregou, à sua classificação anterior, os conceitos de mecanismos atuantes no momento da deposição, bem como o tamanho dos sedimentos em suspensão, o qual ele chamou de população de grãos.

Tabela 4.1 Classificação de fluxos proposta por Lowe (1979).

Tipo de Fluxo	Comportamento Reológico	Mecanismo de suporte	Característica do fluxo
Corrente de turbidez de baixa densidade	Newtoniano	Turbulência	Turbulento
Corrente de turbidez de alta densidade			
Fluxo Fluidizado	Plástico	Suporte total pelo escape de fluidos	Laminar
Fluxo Liquefeito		Suporte parcial pelo escape de fluidos	
Fluxo de grãos		Pressão dispersiva	
Fluxo de detritos		Coesão da matriz	

Segundo o autor, existem quatro mecanismos de deposição. São eles: 1) sedimentação por tração; 2) sedimentação por suspensão; 3) congelamento friccional e; 4) congelamento coesivo. Com relação ao tamanho dos sedimentos, ele identificou três populações distintas, em função do tamanho médio dos grãos: população I – argila a areia média; população II – areia grossa a seixos pequenos e população III - sedimentos muito grossos (seixos grandes a clastos).

Com base nas populações de grãos, Lowe definiu as correntes de turbidez de baixa densidade como sendo aquela constituída predominante por grãos da população I. Já as correntes de turbidez de alta densidade englobam as populações I, II e III.

À partir deste momento, abriu-se o leque de classificações de correntes de densidade, mais especificamente, de correntes de turbidez de alta densidade. Além da massa específica, das propriedades reológicas da mistura, do mecanismo de suporte e da concentração, acrescentou-se o tamanho de grãos. As hipóteses adotadas por Lowe (1982) foram bem aceitas na comunidade científica, porém, Shanmugam (1996) faz a crítica, dizendo que as considerações teóricas não são práticas de se transpor aos dados de campo.

Postma et al. (1988), através de simulações experimentais de correntes de turbidez de alta densidade (definição baseada na concentração e tamanho de grão), produziram, sob condições experimentais peculiares, um fluxo estratificado com uma camada basal, formada pela carga de fundo e pela rápida deposição de partículas junto à base, resultando numa zona altamente concentrada de cascalhos-areia, por ele chamada de camada de fluxo inercial/laminar (*laminar inertia flow layer*) e outra camada acima, com baixa concentração e comportamento turbulento (corrente de turbidez). Essa camada superior, por ter maior velocidade, seria a responsável por condicionar o movimento da camada inferior (figura 4.5).

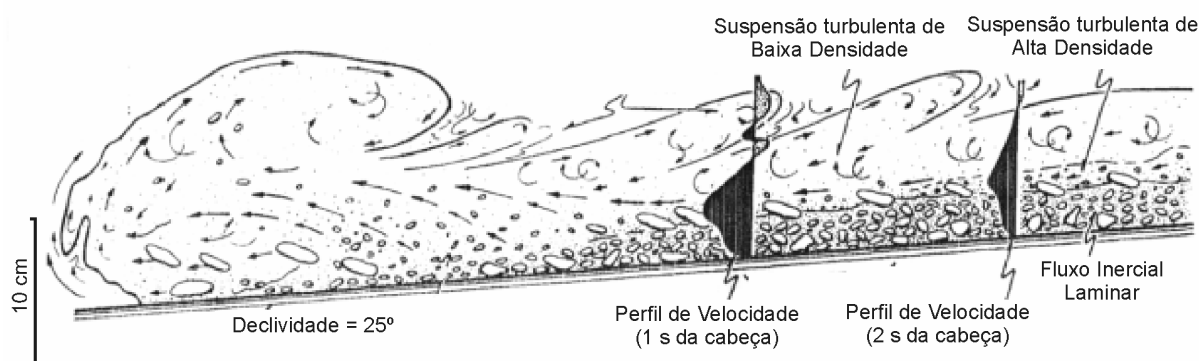


Figura 4.5 Fluxo bipartido simulado por Postma et al. (1988).

Quanto às propriedades reológicas, os autores indicaram que o fluxo inferior apresentou um comportamento não-Newtoniano e o fluxo superior um comportamento Newtoniano. Já os mecanismos de suporte de sedimentos presentes nesta camada de fluxo laminar são provavelmente outros que não a turbulência, tais como a pressão dispersiva (devido à colisão de grãos), a decantação impedida (*hindered settling*) - devido ao contato quase estático grão a grão com o carpete de tração altamente concentrado e com uma alta viscosidade aparente - e o empuxo (*buoyant lift*) - causado pela mistura intersticial de água e finos (Postma et al., 1988).

Com esta classificação, baseada na força motriz, Postma et al. (1988) conseguiram representar e registrar em laboratório o fluxo bipartido idealizado por Sanders (1965), e incorporaram este comportamento na classificação das correntes de turbidez de alta densidade. Desta forma, criou-se mais uma classificação para tais fluxos, sem fechar o leque aberto anteriormente pelos outros pesquisadores.

Kneller e Branney (1995) propuseram uma nova abordagem de classificação das correntes de turbidez visando explicar a formação de espessos depósitos de areia maciços, desprovidos, inclusive, de gradação normal, em sequências de águas profundas. Diferentemente da definição convencional de correntes de turbidez baseada na reologia e na turbulência, que levam em consideração a concentração de sedimentos, a velocidade, as espessuras e a viscosidade, eles apresentaram um modelo descrevendo o fluxo em correntes de densidade através de variações temporais (permanência) e espaciais (uniformidade) da aceleração, formando treze tipos de fluxos diferenciados (figura 4.6).

O regime permanente se caracteriza quando as propriedades médias das partículas fluidas contidas em um volume de controle permanecerem constantes, quando observada ao longo de um determinado tempo, enquanto que no regime não-permanente há a variação dessas propriedades. Segundo os autores, o fluxo desacelerado (*waning flow*) se refere a um regime não permanente e descreve uma mudança temporal na velocidade em um ponto, pela qual, sucessivas partículas de fluido têm velocidades menores. O fluxo acelerado (*waxing flow*) se refere a um regime não-permanente e descreve uma mudança temporal na velocidade em um ponto pelas quais sucessivas partículas de fluido têm velocidades maiores. O regime de fluxo quase-permanente (*quasi-steady*) é aquele que apresenta pequenas variações de velocidade nesse sistema de referência.

Já o regime uniforme se caracteriza por apresentar uma aceleração nula ao longo do espaço, enquanto que o regime não-uniforme se caracteriza pela existência de variações espaciais da velocidade. O escoamento que se torna mais rápido à jusante é denominado pelo autor de acumulativo e que se torna mais lento é denominado como depletivo.

Com essa proposta, baseada na velocidade, permanência do escoamento e aceleração/desaceleração, os autores apresentaram uma nova possibilidade de visão do problema, introduzindo conceitos hidrodinâmicos para a explicação de alguns processos na natureza. Cabe salientar, que seu critério de definição para correntes de turbidez de alta densidade é baseado na concentração, seguindo a proposta de Kuenen e Migliorini (1950). Além disso, não foi considerada, no modelo, a bipartição do fluxo. Para Shanmugam (2000), essa definição de Kneller e Branney (1995) não tem uma proposta científica real, entretanto

serve como consolo psicológico na interpretação da presença de todas as areias em águas profundas como turbiditos, mesmo que eles mostrem ou não gradação normal.

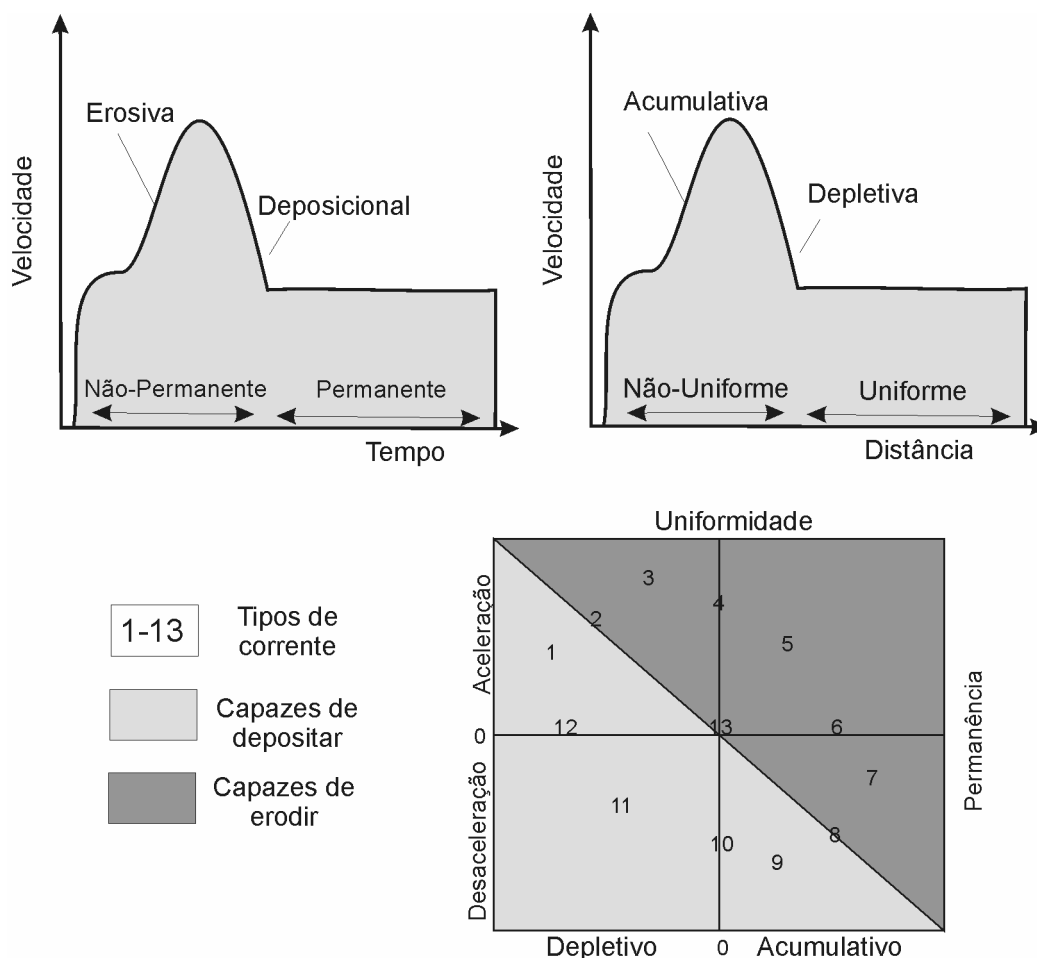


Figura 4.6 Modelo de classificação proposto por Kneller e Branney (1995)

Shanmugam (1996) apresentou uma revisão crítica, específica ao conceito de correntes de turbidez de alta densidade, e introduziu o conceito de fluxos de detritos arenosos (*sandy debris flows*) como uma forma de equacionar a vasta discrepância entre o que é dito na literatura (i.e correntes de turbidez) e o que esse autor considera ser o significado real (i.e. fluxo laminar possivelmente plástico).

Fluxos de detritos arenosos (figura 4.7) representariam um espectro contínuo de processos entre os fluxos de detritos coesivos e não coesivos. Reologicamente, eles são plásticos e seu mecanismo de suporte de grãos inclui a matriz coesiva, a pressão dispersiva e o empuxo (*buoyant lift*). Eles podem ocorrer com ou sem a nuvem turbulenta no seu topo. São caracterizados por um fluxo laminar com uma faixa de concentração de grãos de moderada a alta e com pouca a moderada presença de argila. Não há um exato valor para a concentração de grãos e a matriz coesiva, variando o tamanho de grãos e sua composição. Eles são comuns em areias finas, embora o termo fluxo de detritos (*debris flows*) implique na presença de detritos com grandes dimensões. Clastos podem ser raros ou ausentes. O termo fluxo de

massa arenosa (*sandy mass flow*) também pode ser utilizado, pois fluxo de massa refere-se a um contínuo fluxo gravitacional de sedimentos em que o comportamento do fluxo é plástico e não fluido (Shanmugam, 1996).

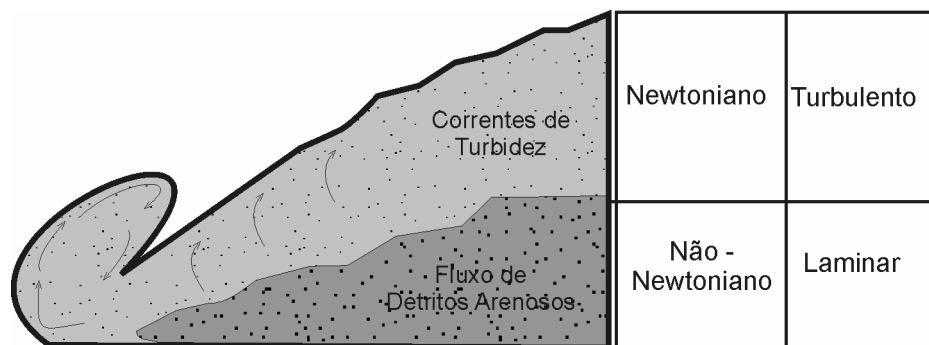


Figura 4.7 Tipo de fluxo gravitacional proposto por Shanmugam, (1996)

A classificação de Shanmugam visou englobar todos os conceitos descritos anteriormente para as correntes de turbidez de alta densidade, apresentando uma classificação mais genérica com amplas faixas de possibilidade de ocorrência.

Mutti et al. (1999) comentaram que fluxos granulares subaquosos tornam-se, depois de um certo tempo, correntes bipartidas, com uma camada basal densa onde a turbulência é suprimida pela alta taxa de concentração e uma camada turbulenta com sedimentos em suspensão. Sedimentos gradados grossos estão restritos ao fluxo basal, sendo sustentados por uma interação complexa entre a alta carga de sedimento, o empuxo (*buoyant lift*), o escape de fluidos, gerado pelo excesso de poro-pressão, e à pressão dispersiva. Os grãos finos tendem a ser transportados em suspensão, principalmente, na parte superior e mais diluída do fluxo. Esta bipartição no interior do fluxo também está ligada a diferentes populações de tamanho de grãos e a deposição ocorre em ondas de sedimentação com repetidos ciclos desacelerantes de tração e suspensão (D'Ávila et al., 2003).

Segundo Mutti et al. (1999), a bipartição, expressa em diferentes termos, foi originalmente sugerida por Sanders (1965), admitida implicitamente por Middleton e Hampton (1973) e, mais recentemente, reenfaticada por Ravenne e Beghin (1983) e Norem et al. (1990), apud Mutti et al. (1999), com base em trabalhos experimentais e numéricos, respectivamente. Baseados na experiência de campo, eles afirmaram que estes fluxos bipartidos representam o tipo mais comum de transporte de sedimento e deposição de correntes de turbidez.

Shanmugam (2000) apresentou uma síntese de propostas de classificação difundidas até aquele momento por diversos autores, considerando a concentração, a reologia, o mecanismo de suporte dos sedimentos e o modo de transporte de grãos. A figura 4.8 apresenta esta síntese.

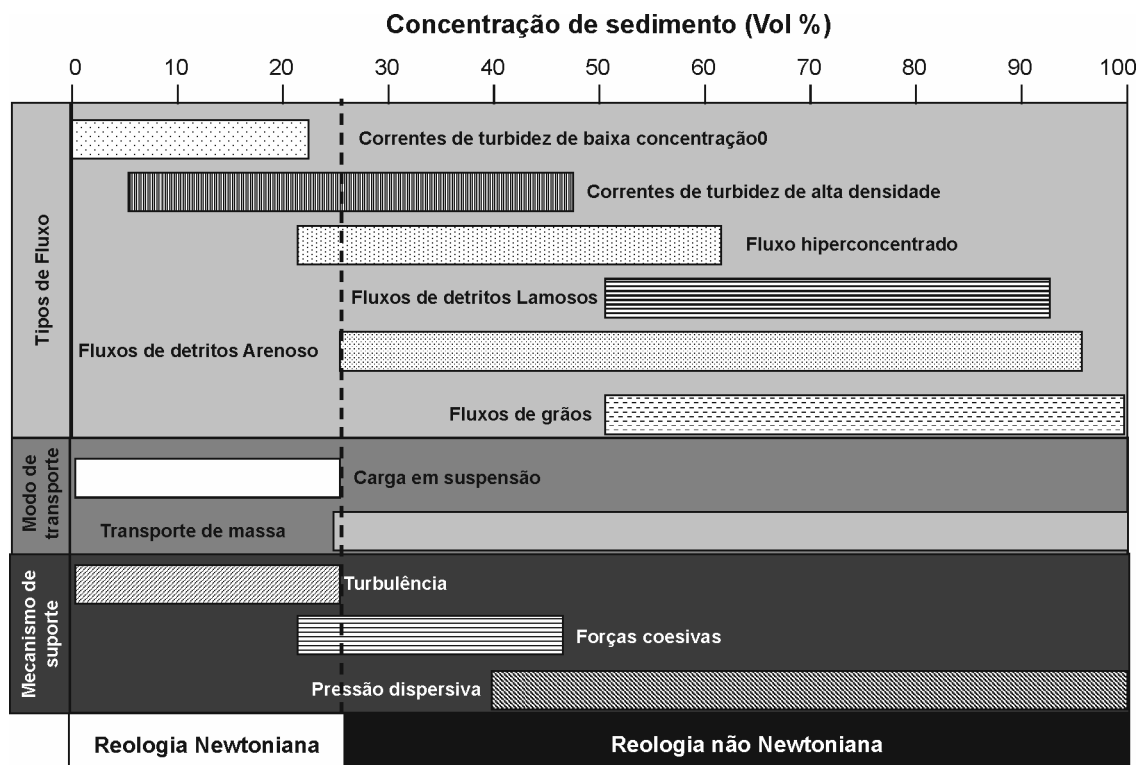


Figura 4.8 Síntese de classificação apresentada por Shanmugam (2000).

Já Kneller e Buckee (2000) assumiram uma visão mais conservadora e adotam a definição tradicional para correntes de turbidez. Eles são da opinião que o termo corrente de turbidez deve ser sempre adotado para descrever o fenômeno na escala real, pois sua natureza exata não é clara e o mecanismo de suporte de sedimento, no ambiente natural, é de difícil determinação.

Assim, eles definem a corrente de turbidez como sendo uma corrente de suspensão onde o fluxo é induzido pela ação da gravidade agindo sobre a mistura (fluido e sedimento), ou seja, pela diferença de densidade entre a mistura e o fluido ambiente. Dentro desta definição, aceita-se que a suspensão possa ocorrer por ação de outro mecanismo de suporte dos grãos, além da turbulência. A única diferença para a definição clássica de Johnson (1938) apud Middleton (1970) é semântica, devido a utilização do termo corrente de suspensão ao invés de corrente de turbidez.

Kneller e Buckee (2000) buscaram no passado uma solução mais abrangente para a classificação de correntes de turbidez. Ao utilizarem a definição clássica de Johnson (1938), não só admitiram que esse assunto ainda merece mais estudo, procurando-se provas e evidências, como evitaram a criação de novas confusões em termos de classificação (apesar de utilizarem o termo suspensão ao invés de turbidez). Tokuhashi (2003) também corroborou com essa ideia mais generalista, propondo que o termo corrente de turbidez seja considerado, como no passado, na sua definição original, ou seja, como fluxos de densidade não conservativos atuais que ocorrem na natureza.

Mulder e Alexander (2001), revisando as inconsistências das classificações e as terminologias empregadas, propuseram uma nova classificação para os fluxos subaquosos, baseada na coesividade das partículas (reologia), na duração do fluxo, na concentração de sedimentos e no mecanismo de suporte dos grãos (figura 4.9). Com esta classificação, os autores pretenderam formalizar a terminologia, estabelecer as bases para a definição de fluxo de detritos e de fluxos de lama, bem como, definir os critérios para distinguir fluxos hiperconcentrados, concentrados e correntes de turbidez.

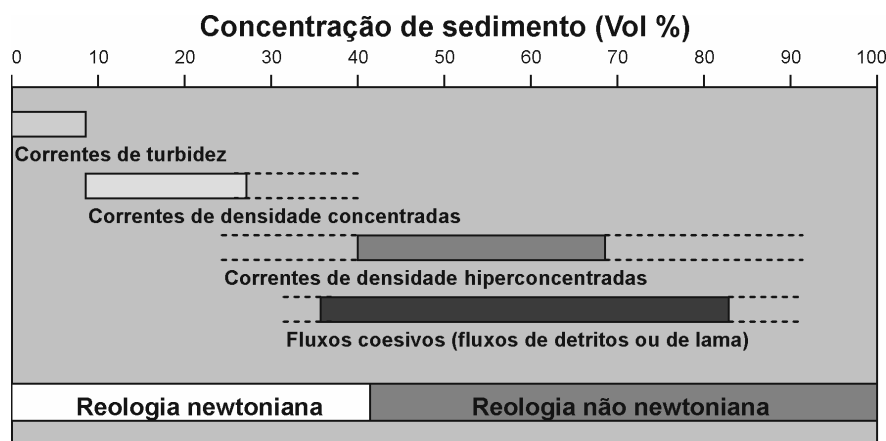


Figura 4.9 Classificação de fluxos gravitacionais proposta por Mulder e Alexander (2001).

O primeiro critério de classificação de Mulder e Alexander (2001) baseia-se na reologia dos fluidos, onde os fluxos são divididos em coesivos (fluxos de detritos e fluxo de lama) e fluxos não coesivos (hiperconcentrados, concentrados e correntes de turbidez).

Dentro do grupo dos fluxos coesivos, os fluxos de detritos e os fluxos de lama são diferenciados pelo tamanho do sedimento presente. Os fluxos de lama são subclassificados, com base na porcentagem de cada material encontrado no escoamento, em fluxo rico em argilas e fluxo de lama siltosa. Já os fluxos não coesivos são separados em função da concentração e do mecanismo de suporte em três grupos: os hiperconcentrados, os concentrados e as correntes de turbidez, sendo essa última subdividida em fluxo de onda solitária, onda solitária tipo corrente de turbidez e corrente de turbidez quase-permanente pela duração do fluxo (Mulder e Alexander, 2001). A figura 4.10 apresenta estes tipos de fluxos.

Dasgupta (2002) fez uma revisão sobre o problema conceitual dos fluxos gravitacionais de sedimentos definidos por Middleton e Hampton (1973). Para ele, os fluxos são bastante distintos para serem classificados apenas pelos mecanismos de suporte de grãos, conforme proposta original, como também são limitadas as tentativas de classificar estes fluxos com base nas propriedades reológicas. Ele propôs uma classificação onde todos os fluxos subaquosos são considerados de alta densidade, simplificando um pouco os usos impróprios de diferentes terminologias que causam problemas na definição (figura 4.11).

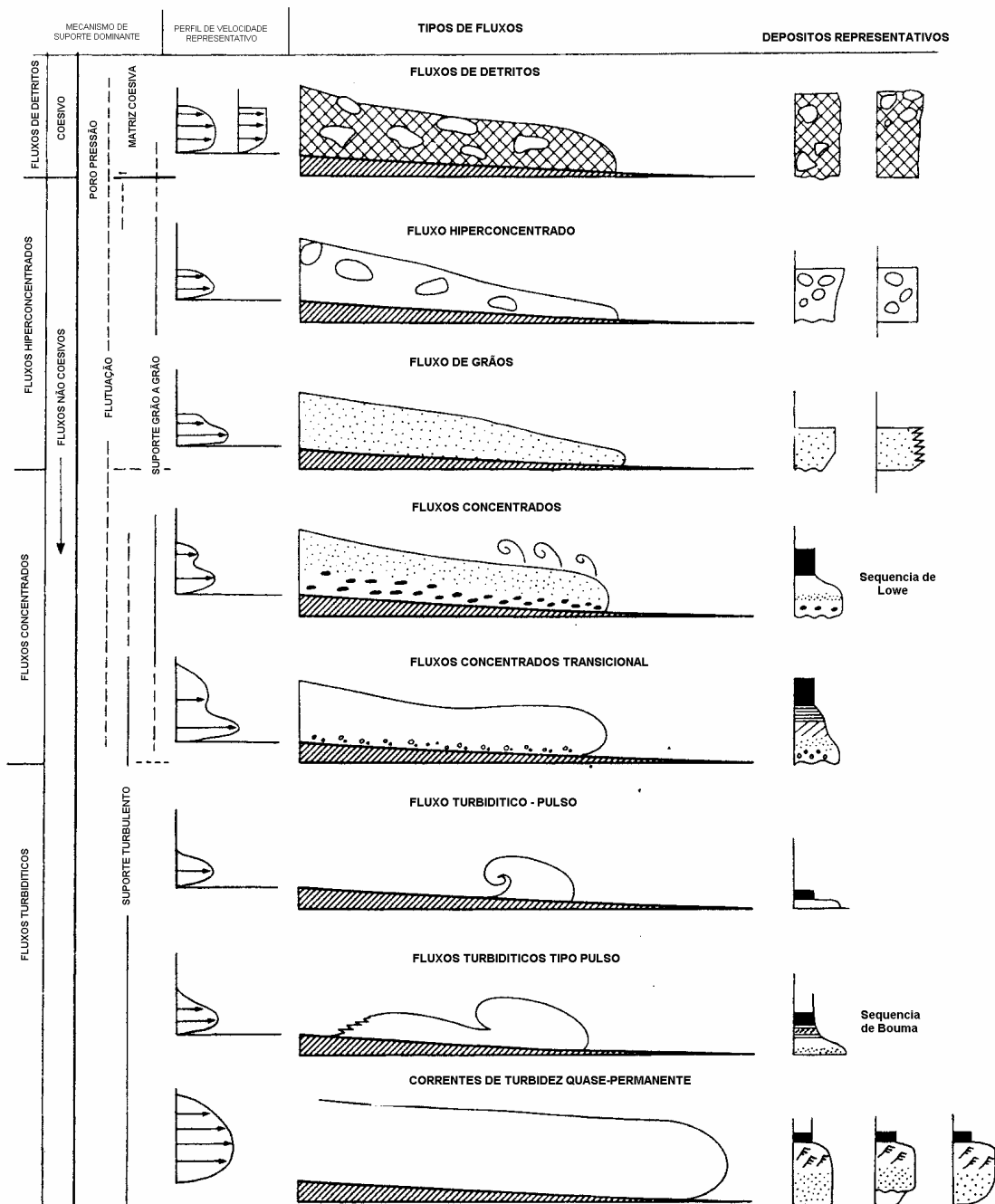


Figura 4.10 Esquema de classificação de fluxos gravitacionais propostos por Mulder e Alexander (2001).

A classificação de Dasgupta (2002) também considera o regime de escoamento (turbulento, de transição e laminar) e a reologia do fluido (newtoniano, pseudoplástico e plástico), a razão grão/água (concentração), bem como as proporções e a composição de sedimentos (presença de argila). Assim, considerando apenas os fluxos subaquosos, apresentam cinco tipos de fluxo, todos eles sendo considerados como fluxos de alta densidade:

- Correntes de turbidez – fluxo turbulento com reologia newtoniana;
- Fluxo hiperconcentrado – fluxo transicional com reologia semiplástica;

- Fluxos de detritos não coesivos (fluxos friccionais) – fluxo laminar com reologia plástica e baixa presença de argila;
- Fluxos de detritos coesivos (fluxos coesivos) – fluxo laminar com reologia plástica e alta presença de argila;
- Fluxo de grãos – uma categoria à parte, com uma maior proporção de grãos/água.

A classificação de Dasgupta (2002) também considera que cada um destes tipos de fluxos podem ser identificados como um segmento distinto do espectro contínuo de fluxos de alta densidade. Mesmo dentro de um fluxo simples, diferentes partes podem mostrar características distintas de fluxo, desenvolvidas através do processo de transformação de fluxo.

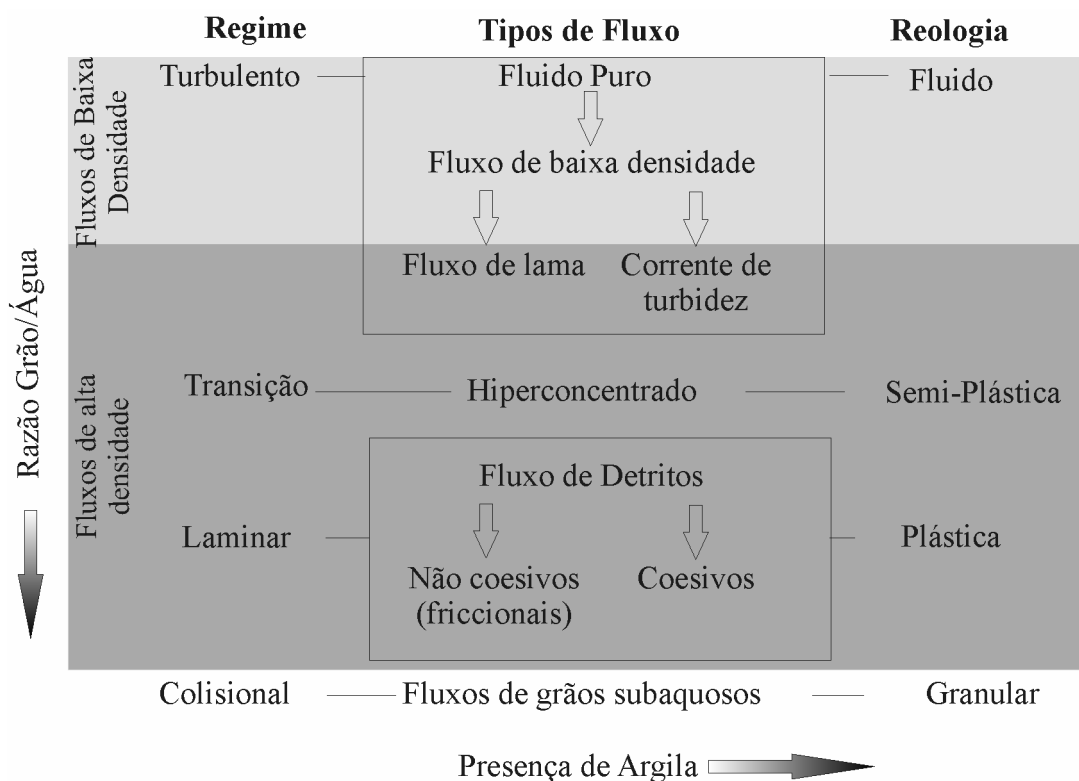


Figura 4.11 Classificação dos fluxos gravitacionais proposta por Dasgupta (2002).

A classificação de Dasgupta (2002) complementou a proposta de Middleton e Hampton (1973) considerando, além do mecanismo de suporte e das propriedades reológicas, a concentração e a presença de finos. Enfatiza também, que os fluxos podem se transformar ao longo do tempo e do espaço e exclui da classificação os fluxos fluidizados, por serem difíceis de acontecer na natureza. Com a exclusão do termo baixa densidade para as correntes de densidade, pode-se criar uma solução ou confundir ainda mais as definições existentes no meio científico.

Gani (2004) apresenta uma revisão crítica do problema conceitual da classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos, para uma ampla faixa de concentrações volumétrica, porém voltada aos fluxos mais concentrados. Pela sua proposta, ele cria uma classificação conceitual baseada na reologia dos fluidos, com a presença de três tipos de fluxos e depósitos: os fluxos Newtonianos e os depósitos turbiditos (*turbidite*); os fluxos não Newtonianos e os depósitos debritos (*debrites*) e; os fluxos e depósitos intermediários entre esses dois extremos - densitos - (*densite*). Ainda, todos esse três tipos fariam parte dos depósitos de fluxos gravitacionais de sedimentos (*gravites*). A tabela 4.2 apresenta a divisão destes fluxos.

Tabela 4.2 Classificação de fluxos gravitacionais proposta por Gani (2004).

% de água	Reologia	Tipo de fluxo		Depósito	Mecanismo de suporte
Alta	Newtoniano	Corrente de turbidez	Baixa concentração (<1%) e argilosa Baixa concentração (0,2 – 3%) e grãos médios gradada (Mulder et al, 2003) Baixa concentração (0,2 – 3%) e grãos finos gradada (Stow e Shanmugam, 1980) Clássico grãos médios (Bouma, 1962)	Turbiditos	Turbulência do fluido
Médio	Variado (newtoniano e/ou não newtoniano)	Fluxo denso (parte laminar, parte turbulento)	Correntes de turbidez de alta densidade (Lowe, 1982) Fluxo de detritos arenosos (Shanmugam, 1996) Fluxo lamosos (Lowe e Guy, 2000) Fluxo de densidade concentrado (Mulder e Alexander, 2001) Fluxos liquefeitos e fluidizados	Densitos	Gravitos Pressão dispersiva dos grão, Matriz coesiva, Turbulência do fluido e Escape de fluidos Pressão dispersiva dos grão e Matriz coesiva Matriz coesiva Matriz coesiva
Baixa	Não newtoniano (dilatante)	Fluxo de detritos	Fluxo de detritos não coesivos (fluxo de grãos)	Debritos	
	Plástico de Bingham		Fluxo de detritos coesivos		
	Plástico de Bingham	Escorregamentos e deslizamentos			

Gani (2004) adotou uma linha mais política na sua classificação buscando simplificar ao máximo os termos e as complicações criadas até então na classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos. Para tal, ele escolheu a reologia das misturas presentes no escoamento como o divisor de águas entre os fluxos, pois esse parâmetro não varia muito de um tipo de fluxo para o outro, o que diminuiria a ambiguidade da definição. Dentro destes três grupos estão incluídos todos os tipos de fluxo gravitacionais de sedimentos (com suas diferente nomenclaturas e classificações). A simplificação neste caso foi válida, entretanto a comunidade acadêmica ainda não aceitou completamente essa classificação.

4.2.2 Inconsistência das classificações

Após essa breve narrativa histórica sobre a evolução do conceito de classificação de correntes de turbidez, enfocando mais especificamente as correntes de turbidez de alta densidade, percebe-se que ainda não existe uma teoria unificadora que explique todo o processo de uma corrente de turbidez de alta densidade. A tabela 4.3 sintetiza cada classificação apresentada, apontando qual propriedade foi adotada pelo pesquisador para

definir sua classificação, além de considerar a forma de realização do estudo: experimental e/ou análise de afloramentos a campo.

Tabela 4.3 Resumo das características adotadas para a classificação de correntes de turbidez.

Autores	Ano	Laboratório (L) ou Campo (C)	Densidade	Concentração	Reologia	Mec. Suporte	Tamanho de graos	Propriedades Hidrodinâmicas	Duração do fluxo	Regime	Presença de argila
Kuenen e Migliorini	1950	L	■								
Dott	1963	-			■						
Sanders	1965	C				■					
Middleton	1967	L		■							
Middleton e Hampton	1976	L e C	■			■					
Lowe	1979	C			■	■					
Lowe	1982	C					■				
Postma et al.	1988	L		■		■					
Kneller e Branney	1995	C		■				■			
Shanmugam	1996	C		■		■					
Mutti et al.	1999	C				■		■			
Kneller e Buckee	2000	C	■								
Mulder e Alexander	2001	L e C		■		■			■		
Dasgupta	2002	C		■						■	
Gani	2004	L			■			■			

Ao se avaliar as inconsistências das classificações das correntes de turbidez de alta densidade deve-se considerar o ponto de vista adotado por cada pesquisador ao fazer sua proposta de análise, uma vez que esse tema é tratado por diferentes ramos da ciência, como a engenharia e geologia, entre outros.

Desta forma, duas abordagens iniciais foram tomadas para a classificação do fluxo, uma olhando o processo do fluxo - fluido/sedimento - e a outra explicando o processo a partir da natureza - registro geológico - (Normark e Piper, 1991).

Na classificação priorizando o processo de fluxo, leva-se em consideração todas as características do fluxo, suas propriedades, seu comportamento e o depósito que ele gera. Já sob a ótica da natureza, somente encontramos evidências de um fluxo que ocorreu nas eras remotas, restando apenas o registro para ser desvendado. Isso é perigoso, uma vez que, as diversas feições sedimentares que são encontradas nestes ambientes podem ser originadas por um mesmo processo, por processos distintos ou ainda, pelos dois ao mesmo tempo. Por exemplo, Middleton e Hampton (1973) argumentam que as correntes de turbidez não são um fenômeno simples e podem mostrar uma gama considerável de comportamentos, produzindo portanto uma considerável faixa de estruturas sedimentares, texturas e fácies. Os fluxos gravitacionais produzem, também, um espectro muito amplo de fácies sedimentares geneticamente interligadas, que variam desde um simples acúmulo de sedimentos associados a deslizamentos de massa, sem a mínima organização interna, até depósitos sedimentares formados por correntes de turbidez, com altíssimo grau de organização interna. Middleton (1970) mostrou-se cético ao afirmar que a esperança de que uma dada estrutura

sedimentar ou mesmo um conjunto de estruturas ser característica única de um processo ou ambiente particular, é ingênua. Mecanismos de deposição similares podem produzir estruturas sedimentares parecidas e isso dificulta a identificação dos depósitos exclusivos de corrente de densidade. Sedimentos depositados por correntes de suspensão mostram uma variedade de feições, as quais variam, entre outros fatores, com a magnitude e a velocidade das correntes de turbidez, o tipo de material e a distância da área fonte, a morfologia da bacia.

Shanmugam (1996) destacou que definir os fluxos baseados no seu mecanismo de transporte é um desafio a ser solucionado, pois as características sedimentares somente podem ser usadas para inferir o processo que prevaleceu durante o estágio final de deposição, uma vez que elas não são conhecidas (registradas) durante o processo de transporte. Isso vale para qualquer depósito sedimentar e, até o momento, não há um critério estabelecido para reconhecer o mecanismo de transporte através do registro deposicional.

As modelagens física e numérica podem auxiliar na compreensão dos fenômenos físicos envolvidos no processo, bem como no depósito resultante, apesar de suas singularidades e simplificações. Middleton (1967) comentou que, até aquele momento havia um mundo de especulações e de hipóteses levantadas para explicar as características observadas nos turbiditos naturais (p. ex. Sanders, 1965) e algumas destas hipóteses envolviam modos de movimento de fluidos-grãos que podem ou não ser possíveis em teoria, mas que nunca tinham sido observados diretamente na natureza ou em laboratório. Ele continua recomendando que, antes de recorrer a tais hipóteses, seria necessário explorar amplamente o fenômeno a ser observado no laboratório, o que não pudera ser realizado até então, por dois motivos: 1) haviam poucos experimentos de correntes de turbidez com sedimentos grossos; 2) com os aparatos e as técnicas de modelagem empregadas até aquele momento, era difícil verificar o mecanismo de deposição das correntes.

Já na análise a partir de observações de campo, atribuem-se modelos teóricos que buscam explicar o que está ali registrado, a partir de algumas hipóteses de fluxos.

Tanto um método quanto o outro apresentam suas vantagens e desvantagens, porém o resultado disto, é que, ao longo dos 50 anos de controvérsia (Shanmugam, 2002), o assunto ainda é complexo e não compreendido totalmente. Kneller e Buckee (2000) comentaram que “a teoria existente parece inadequada para explicar o comportamento de algumas concentrações de sedimentos muito densas e os argumentos baseados apenas nas interpretações geológicas dos depósitos podem ser inadequados para discutir elementos próprios do processo”. Shanmugam (2002) afirmou que a nossa incapacidade de observar diretamente uma corrente de turbidez no ambiente marinho profundo moderno e correlacioná-

las com o registro das rochas é a causa principal da nossa ignorância sobre correntes de turbidez.

Shanmugam (2006) revisa novamente as inconsistências das classificações de correntes de densidade, encontrando 34 nomenclaturas diferentes para esse fenômeno. A tabela 4.4 apresenta esse resumo.

Por fim, Mutti et al (2009) apresenta uma revisão geral e historicamente detalhada sobre as correntes de turbidez e seus depósitos turbidíticos, mostrando as origens e discutindo os termos utilizados no estudo dessa ciência. Nesse caso, não só as correntes de turbidez de alta densidade foram incluídas, mas sim, uma série de termos sedimentológicos.

Tabela 4.4 Tabela de termos usados para caracterizar as correntes de turbidez de alta densidade na literatura, incluindo os termos dados a bipartição (Fonte: modificado de Shanmugam, 2006).

Referências * trabalhos experimentais	Camada superior - (Upper layer)	Camada inferior - (Lower layer)
	Baixa densidade	Alta densidade
*Bagnold(1954, 1956)	Região viscosa - (<i>Viscous region</i>) - 14	Região Inercial (<i>Inertia region</i>)- 23
Dzulynski and Sanders (1962)	Correntes de Turbidez - (<i>Turbidity current</i>) - 17	Carpete de Tração - (<i>Traction carpet</i>) - 6
Sanders (1965)	Correntes de Turbidez - (<i>Turbidity current</i>) - 17	<i>Termos Sinônimos</i> Camada de fluxo de grãos - (<i>Flowing-grain layer</i>) (p. 192) - 7 Fluxo de Inércia - (<i>Inertia flow</i>) - 1 Camada de fluxo de grãos fluidizado - (<i>Fluidized flowing-grain layer</i>) - 8 Camada de fluxo de inércia - (<i>Inertia flow layer</i>) - 2 Fluxo de avalanches - (<i>avalanching flow</i>) -12
Friedman and Sanders (1978),	Correntes de Turbidez - (<i>Turbidity current</i>) - 17	Fluxo de partículas não coesivas liquefeitas - (<i>Liquefied cohesionless-particle flow</i>) - 10
Sanders (1981), Friedman, Sanders (1978) e Kopaska-Markel (1992, p. 335)	Carga em suspensão - (<i>Suspended load</i>) - 25	Carga de arraste (<i>Bed load</i>) - 21 <i>Termos Sinônimos</i> Fluxo Inercial - (<i>Inertial flow</i>) - 3 Fluxo de grãos - (<i>Grain flow</i>) - 16 Fluxo de massa - (<i>Mass flow</i>) -15 Estágio de leito reológico - (<i>Rheologic bed stage</i>) - 22 Fluxo de partículas não coesivas fluidizadas - (<i>Fluidized cohesionless-particle flow</i>) - 9 Fluxo de partículas grossas não coesivas liquefeitas - (<i>Liquefied cohesionless- coarse particle flow</i>) - 11
Sanders and Friedman (1997)	Correntes de Turbidez - (<i>Turbidity current</i>) - 17	Deslizamento - (<i>Slide</i>) -13
*Kuenen (1951)	Correntes de Turbidez - (<i>Turbidity current</i>) - 17	Corrente de fluxoturbidito - (<i>Fluxoturbidity current</i>) - 19
Dzulynski et al. (1959)	Correntes de Turbidez - (<i>Turbidity current</i>) - 17	Slurry flow - 27
Carter (1975)	Fluxo de grãos - (<i>Grain flow</i>) - 16	
*Postma et al. (1988)	Suspensão turbulenta - (<i>Turbulent suspension</i>) - 26	Fluxo de inércia laminar - (<i>Laminar inertia-flow</i>) - 4
Norem et al. (1990, their Fig. 2)	Fluxo de suspensão - (<i>Suspension flow</i>) - 24	Fluxo denso - (<i>Dense flow (i.e., debris flow)</i>) - 34
Shanmugam (1996a)	Correntes de Turbidez - (<i>Turbidity current</i>) - 17	Fluxo de detrito arenoso - (<i>Sandy debris flow</i>) - 18
*Marr et al. (2001)	Correntes de Turbidez - (<i>Turbidity current</i>) - 17	Fluxo de detrito arenoso - (<i>Sandy debris flow</i>) - 18
*Vrolijk and Southard (1997)	Fluxo turbulento - (<i>Turbulent flow</i>) - 20	Fluxo cisalhante laminar - (<i>Laminar sheared layer</i>) - 5
*Kuenen (1950, 1951)	Correntes de Turbidez de alta densidade - (<i>High-density turbidity current</i>) - 33	
*Mieddleton (1967)	Correntes de Turbidez de alta concentração - (<i>High-concentration turbidity current</i>) -28	
Lowe (1982)	Correntes de Turbidez de alta densidade - (<i>High-density turbidity current</i>) - 33	
*Postma et al. (1988)	Correntes de Turbidez de alta densidade - (<i>High-density turbidity current</i>) - 33	
Norem et al. (1990)	Fluxo deslizante - (<i>Flowslide</i>) -29	
Mutti et al. (1999)	Correntes de Turbidez de alta densidade - (<i>High-density turbidity current</i>) - 33	
Lowe and Guy (2000)	Slurry flow - 27	
Mulder and Alexander (2001)	Fluxo de densidade concentrada - (<i>Concentrated density flow</i>) -30	
McCaffey et al. (2001)	Correntes gravitacionais particulada - (<i>Particulate gravity currents</i>) - 32	
*Ploliakov (2002)	Fluxo granular - (<i>Granular flow</i>) - 31	
Gani (2004)	Fluxo denso - (<i>Dense flow</i>) - 34	

* trabalhos experimentais

*** Numeração modificada de Shanmugam (2006)

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS CORRENTES DE TURBIDEZ

4.3.1 Introdução

Após o trabalho pioneiro de Kuenen e Migliorini (1950), que estabeleceu um marco no estudo dos turbiditos, indicando que camadas depositadas no ambiente marinho profundo seriam produto da deposição das correntes de turbidez, a atenção foi voltada para o fluxo hidrodinâmico responsável por esse processo de transporte de sedimentos para essa região. Numa visão geral, ou seja, analisando desde a fonte até a deposição, ainda hoje, nota-se que há dúvidas quanto a sua inicialização (formação), transporte e deposição. Um motivo para que isso ocorra é que esses eventos são raros, inacessíveis (grandes magnitudes) e de difícil monitoramento *in loco*. Conseqüentemente, a sua dinâmica é menos compreendida do que a dinâmica de canais à superfície livre (Baas et al., 2004). O conhecimento desse processo está baseado nas inferências indiretas de depósitos e da análise da morfologia marinha, aliadas a observações de lagos, fiordes e rios, além da aplicação da modelagem numérica e física (Normark e Piper, 1991).

Observando, porém, o interior da corrente, Kneller e Buckee (2000) comentaram que as dificuldades no entendimento da dinâmica dos sedimentos em suspensão na corrente são altamente complexas devido à turbulência, tornando o fenômeno não-uniforme (variação no espaço), não-permanentes (variação no tempo), não-linear e com as condições de contorno livres (diferença de densidade entre o fluido ambiente e corrente que varia, não se conservando ao longo do fluxo). Quando tratamos de correntes com grandes cargas em suspensão, no caso as correntes de turbidez ditas de alta densidade, essa complexidade aumenta ainda mais. A variação da densidade com o tempo e o espaço, as propriedades mecânicas das suspensões envolvidas (tixotropia, viscosidade e forças gravitacionais), o mecanismo de suporte e a influência do cisalhamento na camada superior são exemplos disto (Kuenen, 1950).

4.3.2 Dissecando uma corrente de turbidez

4.3.2.1 Cabeça, corpo e cauda.

Uma corrente de turbidez pode ser definida como um escoamento de um fluido mais denso (água e sedimento em suspensão) imerso num fluido menos denso (fluido ambiente), onde a principal força que atua sobre o escoamento é a diferença de pressão entre os fluidos.

O escoamento de uma corrente de turbidez se caracteriza por apresentar uma geometria dividida em três partes distintas: a cabeça, o corpo e, algumas vezes, a cauda. Nas figuras 4.12a, 4.12b e 4.12c podem-se visualizar melhor estas partes.

A primeira parte é formada por uma cabeça ou frente em forma aproximada de uma semi-elipse. Na maioria dos casos, a altura da cabeça é quase sempre maior que a do corpo e da cauda, devido à resistência imposta pelo fluido ambiente ao avanço da corrente. Isso ocorre, pois, à medida que a cabeça vai avançando, ela se desloca e acelera o fluido no seu entorno (ambiente). Esse fluido ambiente, por sua vez, causa uma resistência à corrente que é maior do que a resistência junto ao fundo e junto à interface. Logo, a cabeça da corrente, deve ser maior para compensar esta força, enquanto que a parte atrás da cabeça possui somente a resistência de fundo e interface agindo contra o escoamento (Middleton, 1993).

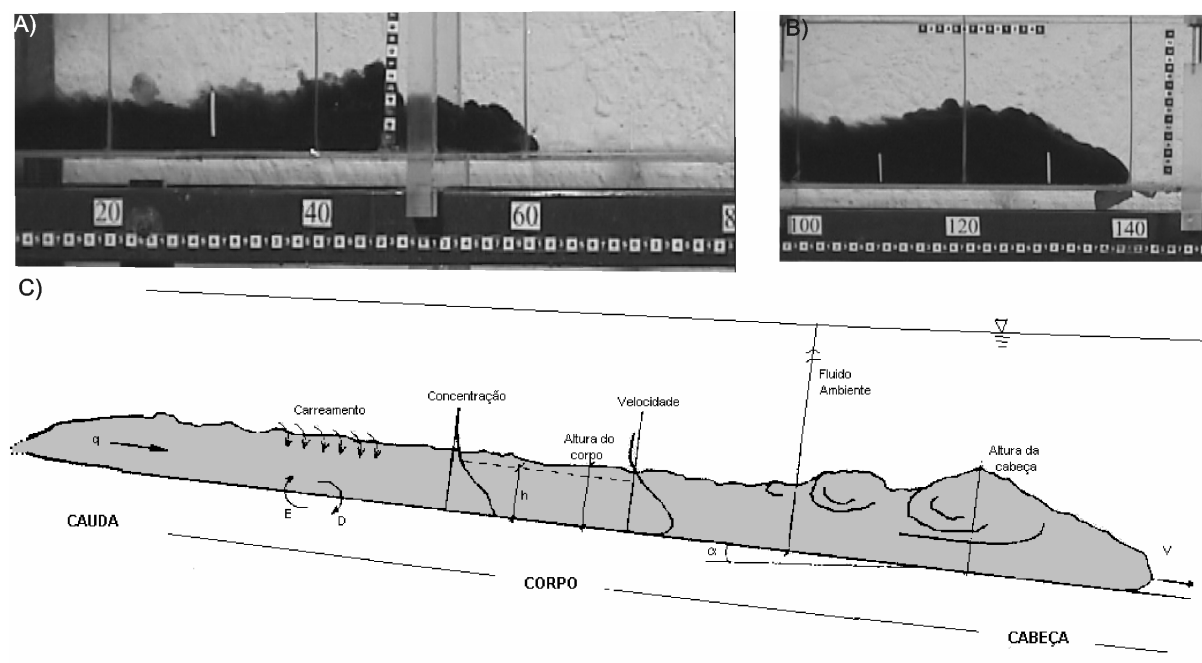


Figura 4.12 a) Imagem de uma corrente de densidade simulada em laboratório. b) Detalhe da região da cabeça da corrente. c) Desenho esquemático de uma corrente de turbidez e seu esquema de funcionamento.

Middleton (1966b) investigou o movimento do fluido e de partículas dentro e na frente da cabeça mostrando que as linhas de fluxo divergem dentro da cabeça, deslocando o fluido ambiente.

Esta região possui um papel importante na dinâmica do escoamento, pois é uma zona com forte tridimensionalidade e de intensa mistura condicionando a definição do comportamento geral da corrente (Simpson, 1997). Middleton (1993) destacou que o balanço de massa e de quantidade de movimento da cabeça difere significativamente daquele do corpo e da cauda.

Middleton (1966b), investigando a influência da declividade sobre a forma da cabeça, a velocidade e a forma da corrente, encontrou que, para ângulos menores que $2,3^\circ$, a velocidade da cabeça independe da declividade. Outros experimentos sugeriram que a velocidade da cabeça adimensionalizada ($Vel_{cab}/Vel_{média}$) é dependente da declividade (5° - 90°) devido ao incremento da força gravitacional contra o incremento da resistência na interface da camada superior, aumentando as taxas de carreamento de água ambiente (Britter e Linden, 1980). Consequentemente, a altura da cabeça aumenta com a declividade, assim como a velocidade do corpo, uma vez que o material move-se mais rapidamente para a cabeça. Fabian (2002) comprovou em seus experimentos, em ensaios com diferentes declividades ($-0,5^\circ$ a 4°), essa correlação direta. Em estudos realizados com declividade nula, a tendência de diferença entre alturas da cabeça e do corpo é menor (Dücker et al., 2007 e Manica et al., 2005), percebendo-se, em certas ocasiões, uma altura de corpo maior.

Manica (2002) avaliou o comportamento da altura da cabeça com relação à velocidade e à distância à fonte, verificando que nas regiões em que a velocidade é maior (próximo à fonte), a altura da cabeça é menor. À medida que a cabeça vai aumentando, a velocidade vai diminuindo e a resistência do fluido ambiente aumenta. No final, quando a maioria do material já se depositou, a velocidade decai bastante e a altura da cabeça diminui. Com estes resultados pode-se destacar uma correlação inversa com a velocidade do fluxo, indicando que as maiores alturas da cabeça estão nas correntes que apresentam as menores velocidades.

O ponto mais avançado da corrente é chamado, algumas vezes, de nariz da corrente. Sua posição é um pouco acima da superfície inferior, resultado da condição de não deslizamento do fundo e da resistência na interface superior (Britter e Simpson, 1978).

Na cabeça, dois tipos de instabilidades são responsáveis pela mistura do fluido ambiente com o fluido da corrente (figuras 4.13a). O primeiro tipo de instabilidades é um complexo padrão de lobos e rachas que são causados pelas instabilidades gravitacionais de segunda ordem do fluido menos denso na interface inferior da corrente (Simpson, 1997 e Kneller et al, 1999). Essas estruturas são formadas através de instabilidades convectivas produzidas pelo fluido menos denso (ambiente), quando a corrente passa por cima de uma pequena camada desse fluido. Esse líquido é carregado para cima e misturado pelos movimentos que ocorrem dentro da cabeça formando essas instabilidades. Simpson (1972), visualizando as estruturas de lobos e rachas, demonstrou que elas se prolongam por uma distância significativa atrás da cabeça.

Simpson e Britter (1979), utilizando traçadores para visualizar o fluido ambiente sendo carregado para dentro da cabeça através da superfície inferior, notaram que um fluxo pouco

espesso move-se sobre a cabeça, sendo responsável por apenas 1% da mistura, com o restante sendo causada na interface superior da corrente.

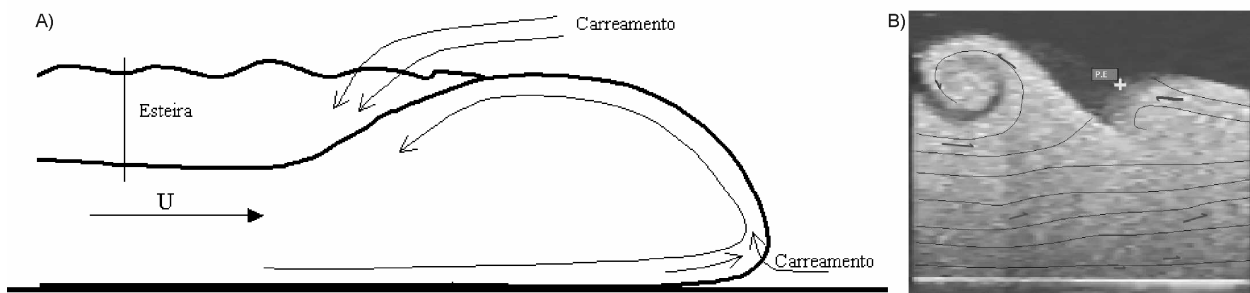


Figura 4.13 a) Desenho esquemático do movimento de fluidos dentro da cabeça da corrente (Fonte: modificado de Kneller et al, 1999). b) Visualização interna do corpo de uma corrente de turbidez (Fonte: Brito et al, 2002).

Já o segundo tipo de instabilidade ocorre na transição entre a cabeça e o corpo da corrente (figura 4.13b), caracterizando-se por ser composta por uma série de vórtices, presentes atrás da cabeça, os quais são formados pelo cisalhamento viscoso na interface superior da corrente com o fluido ambiente, criando uma zona para a mistura turbulenta, de grande escala (Middleton, 1993). Britter e Simpson (1978), utilizando um sistema de visualização de fluxo, onde figuras em câmera lenta eram extraídas e utilizadas para traçar a forma dos vórtices na camada superior, mostraram que a razão da amplitude com o comprimento de onda é a mesma encontrada para os vórtices de Kelvin-Helmholtz. Fabian (2002), utilizando também um sistema de aquisição e tratamento de imagens, verificou a influência do desprendimento de vórtices, atrás da cabeça, sobre a dinâmica da corrente, na tentativa de explicar sua variação de velocidades de avanço ao longo do canal.

O corpo da corrente é caracterizado por deslocar-se com uma velocidade maior do que a velocidade da cabeça da corrente, podendo chegar a 30% ou 40% (Kneller e Buckee, 2000 e Baas et al., 2004). Uma das causas disso é a formação de vórtices atrás da cabeça da corrente, que provocam uma diluição maior nesta região. Então, para manter a taxa constante de avanço, a corrente tem que compensar esta região diluída, o que é feito através do aumento de velocidade do corpo (Middleton, 1993). Elisson e Turner (1959) descreveram o corpo como uma região de velocidade estável que possui uma camada fina e densa de fluido próximo à base da corrente.

Simpson e Britter (1979) dividiram o corpo em duas regiões distintas: uma junto ao fundo, onde a densidade é maior, e outra acima desta, onde ocorre o processo de mistura com o fluido ambiente. Esse processo de mistura, além de acontecer atrás da cabeça da corrente, se desenvolve, por todo o seu corpo à medida que a corrente avança, através do carreamento de fluido ambiente. Postma et al (1988) comentaram que a interface entre estas duas camadas

(bipartição) apresenta uma descontinuidade dentro do fluxo do corpo, refletindo num gradiente de concentração e de viscosidade aparente abrupta nesta zona.

Quanto à erosão e deposição, Middleton (1993) sugeriu que a cabeça da corrente é o principal local de erosão de material e o corpo da corrente é o principal local de deposição.

Devido à velocidade do corpo ser superior à da cabeça, esta última recebe um impulso por parte do corpo. Para dissipar esta energia, a cabeça tende a aumentar sua geometria ou utiliza esse excesso de energia para carrear material para o seu interior. Assim, esta zona se caracteriza por ser predominantemente de erosão. Já, no corpo principal do fluxo, o sedimento é carregado em suspensão mantendo a espessura de fluxo quase uniforme.

A terceira parte de uma corrente de turbidez, nada mais é do que o estágio final do corpo da corrente, chamada cauda. Nesta região, a velocidade é baixíssima e se caracteriza por ser uma zona que se afina e se torna mais diluída, depositando os sedimentos finos assim que o fluxo vai desacelerando

4.3.2.2 Perfil de velocidade e perfil de concentração

O perfil de velocidades de uma corrente de turbidez apresenta um formato com valores nulos nas interfaces e com crescimento de valores em direção ao meio da camada, até atingir um valor máximo. A altura onde ocorre essa velocidade máxima é controlada pela razão das forças de arraste nas interfaces superior e inferior ocorrendo, em muitos experimentos, em 0,2 a 0,3 vezes a altura da corrente. Kneller et al. (1999) e McCaffrey et al. (2003) mediram o perfil de velocidades ao longo do tempo de evolução da corrente, encontrando esse tipo de perfil. Já Postma et al. (1988), em seus experimentos com correntes de alta densidade bipartidas e elevadas declividades (25°), apresentaram um perfil um pouco modificado, com um valor máximo ocorrendo numa camada acima daquela chamada pelos autores como fluxo de inércia laminar (*laminar inertia flow layer*).

Com relação ao perfil de concentração, Kneller e Buckee (2000) apresentaram quatro tipos característicos (figura 4.14).

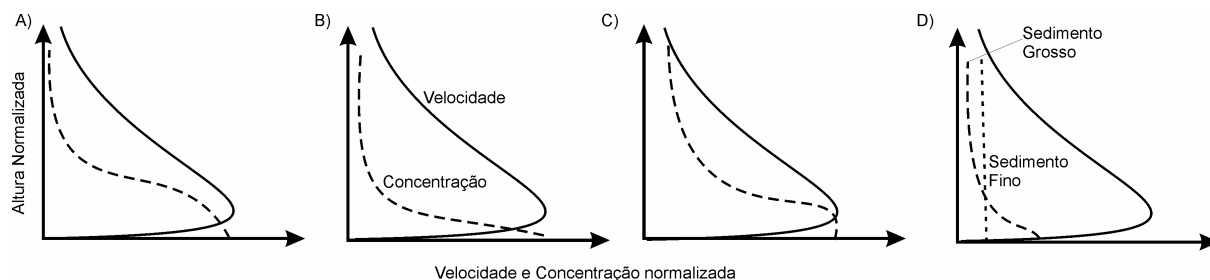


Figura 4.14 Quatro tipos de perfis de concentração e velocidade para correntes de turbidez (Fonte: Kneller e Buckee, 2000).

No primeiro caso (figura 4.14a), um modelo bidimensional típico, o fluxo é dividido em uma região inferior, uma zona mais densa de espessura constante e uma região superior, a qual é mais diluída por causa do carreamento de água ambiente. No segundo (figura 4.14b), o perfil é típico de correntes de densidade não conservativas com baixa concentração, as quais são fortemente estratificadas, com o gradiente de densidade maior perto da base da corrente e decrescendo rapidamente perto dos níveis de velocidade máxima. Na figura 4.14c, a distribuição da densidade apresenta um perfil de concentração inclinado sendo frequentemente observado em correntes erosivas ou em correntes com a alta taxa de carreamento na camada superior. O último perfil (figura 4.14d), foi baseado em experimentos em que a distribuição granulométrica foi medida, mostrando que o material fino é mais uniformemente distribuído na vertical do que o material mais grosso, o qual tende a se tornar concentrado na camada de baixo do fluxo.

Nos experimentos de Postma et al. (1988), o perfil de concentração apresentado (figura 4.15) mostra duas zonas distintas: uma mais concentrada abaixo (carpete de tração não turbulento) e uma camada superior turbulenta.

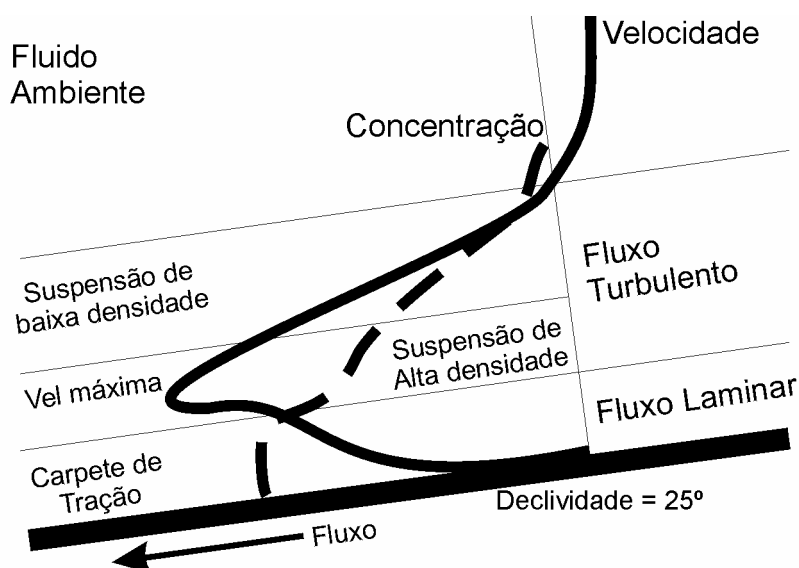


Figura 4.15 Perfis de velocidade e de concentração para correntes de turbidez de alta densidade (Fonte: Postma et al. 1988)

A partir da definição dos perfis de velocidade e de concentração é possível determinar os valores médios na vertical, utilizando a metodologia aplicada em Ellison e Turner (1959) e detalhada em Altinakar (1988), a qual é derivada do balanço de massa e da quantidade de movimento no fluxo (equações 4.1, 4.2 e 4.3). Com essas três equações, é possível determinar a velocidade média, a altura média e a concentração média do escoamento. Cabe salientar que as condições de contorno devem ser consideradas na integração (Teorema de Leibnitz).

$$\bar{U} = \frac{1}{h} \cdot \int_0^{\infty} u \cdot dz \quad (4.1)$$

$$\bar{U}^2 = \frac{1}{h} \cdot \int_0^{\infty} u^2 \cdot dz \quad (4.2)$$

$$\bar{U} \cdot \bar{C}_{vol} = \frac{1}{h} \cdot \int_0^{\infty} u \cdot c_{vol} \cdot dz \quad (4.3)$$

Onde:

\bar{U} = velocidade média (m/s)

u = velocidade média na altura z (m/s)

\bar{h} = altura média do escoamento (cm)

\bar{C}_{vol} = concentração volumétrica média (%)

C_{vol} = concentração volumétrica média na altura z (%)

4.3.2.3 Camada limite e o conceito de subcamada viscosa

O perfil de velocidades de uma corrente de turbidez apresenta basicamente um formato com os valores próximos a zero nas interfaces e com o crescimento de valores em direção ao meio da camada (da corrente) até atingir um valor máximo. Desta forma, pode-se dividir este perfil em duas regiões: uma chamada “região inferior ou camada da parede” (“*inner region*” ou “*wall layer*”), onde a velocidade vai do zero até essa velocidade máxima e a região superior ou de livre mistura (“*outer region*” ou “*free-mixing layer*”) que vai deste máximo até o zero de velocidade quando a corrente atinge a sua altura máxima

Dentro da região da parede, em escoamentos turbulentos, podem ser encontradas ainda três regiões internas ao longo da vertical, nas quais o comportamento do fluido é diferenciado.

Na região junto ao contorno sólido de um escoamento (próximo a parede), há uma zona onde as forças de viscosidade são preponderantes sobre as forças de inércia, sendo essa região chamada de subcamada viscosa. Esta região se caracteriza por apresentar uma forte intensidade da turbulência localizada (“*spots*” de turbulência). Para determinar a espessura da subcamada viscosa é necessário adimensionalizar a distância à parede em função das tensões que ocorrem junto à mesma e verificar as zonas onde há o mesmo comportamento (Liggett, 1994). Assim, a velocidade do escoamento é adimensionalizada pela velocidade de cisalhamento (equação 4.4) e a distância é adimensionalizada pela distância à parede, viscosidade cinemática e velocidade de cisalhamento (equação 4.5). A figura 4.16 apresenta um exemplo de perfil de velocidades normalizado, para o caso de escoamento em um difusor retangular (Maestri et al, 2006).

$$U^+ = \frac{u}{u^*} \quad (4.4)$$

$$Y^+ = \frac{z \cdot u^*}{\nu} \quad (4.5)$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_f}} \quad (4.6)$$

Onde:

u = velocidade média na altura z (m/s)

u^* = velocidade de cisalhamento (m/s)

z = distância à parede (m)

ν = viscosidade cinemática (m²/s)

ρ_f = massa específica do fluido (kg/m³)

τ_0 = tensão de cisalhamento junto ao fundo (Pa)

Os valores U^+ e Y^+ são plotados e, para a região onde $Y^+ < \sim 10$, o fluxo estaria na subcamada viscosa do escoamento, ou seja, numa zona onde as forças de viscosidade são preponderantes sobre as forças de inércia e, como consequência disso, a velocidade apresenta uma relação linear com a tensão junto à parede.

Após uma zona de transição (valores de Y^+ , podendo variar de 10 a 30), a segunda região no interior do fluxo é a chamada de perfil logarítmico de velocidades ou zona inercial, onde os efeitos viscosos não são mais preponderantes. Nesta zona, os valores de Y^+ variam de 30 a aproximadamente 1000. Esta zona tem sido estudada ao longo dos anos em Mecânica dos Fluidos e Hidráulica e é facilmente encontrada a literatura sobre o tema. Acima desta zona, encontra-se a região externa, onde as tensões turbulentas são encontradas.

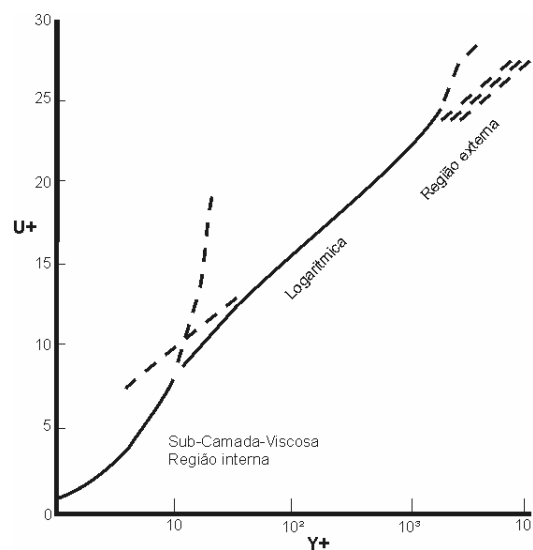


Figura 4.16 Perfil de velocidade normalizado mostrando as regiões de escoamento de um fluxo de água limpa (fonte: Maestri et al, 2006).

4.3.2.4 Tensão de cisalhamento

A determinação do perfil de velocidade para uma corrente de turbidez é significativamente diferente de escoamentos em canais (p.ex. rios). Nesses, os efeitos cisalhantes entre a água e o ar podem ser desprezados, enquanto que na corrente de turbidez, tanto na interface inferior, quanto na superior esse efeito não pode ser descartado.

Em canais abertos, o cálculo da tensão de cisalhamento na vertical é determinado a partir de um balanço de forças sobre um volume de controle (escoamentos bidimensional e uniforme), respeitando algumas hipóteses. Nesse caso, a variação da tensão de cisalhamento é linear com a espessura do fluido e pode ser expressa pela equação:

$$\tau = \rho_f \cdot g \cdot (Z - z) \cdot \text{sen} \theta = \rho_f \cdot g \cdot Z \cdot \text{sen} \theta \cdot \left(1 - \frac{z}{Z}\right) \quad (4.7)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa)

Z = espessura do nível d'água (m)

z = distância do fundo (m)

ρ_f = massa específica do fluido (kg/m³)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

θ = ângulo em relação ao fundo (°)

Junto ao fundo ($y = 0$), a expressão se reduz a: $\tau_b = \rho_f \cdot g \cdot Z \cdot \text{sen} \theta$ e, no caso tridimensional, a tensão de cisalhamento junto ao fundo é representada por:

$$\tau_b = \rho_f \cdot g \cdot R_H \cdot \text{sen} \theta \quad (4.8)$$

Onde:

τ_b = tensão de cisalhamento junto ao fundo (Pa)

R_H = raio hidráulico (m) = área/perímetro

ρ_f = massa específica do fluido (kg/m³)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

θ = ângulo em relação ao fundo (°)

Em Mecânica de Fluidos, admite-se que, no caso de um escoamento turbulento, uniforme e bidimensional, a tensão tangencial (τ), num ponto à distância y do fundo, desdobra-se em duas componentes: a componente laminar, dominante na região próxima à parede, denominada subcamada viscosa; e a componente turbulenta, resultante das flutuações da velocidade nas regiões longe da parede. A equação abaixo representa essa formulação:

$$\tau = \tau_{\text{lam}} + \tau_{\text{turb}} \quad (4.9)$$

Onde:

$$\tau_{\text{lam}} = \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{para } z < \xi \quad (4.10)$$

$$\tau_{\text{turb}} = (\rho_f \cdot \nu_{\text{turb}}) \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{para } z < \xi \quad (4.11)$$

τ_{lam} = Componente laminar da tensão de cisalhamento (Pa)

τ_{turb} = Componente turbulenta da tensão de cisalhamento (Pa)

μ = coeficiente de viscosidade dinâmica (N.s/m)

(du/dz) = gradiente de velocidade ou taxa de deformação (1/s)

ρ_f = massa específica do fluido (kg/m³)

ν_{turb} = coeficiente de viscosidade aparente turbulento = $\overline{u' \cdot v'}$

ξ = espessura da subcamada viscosa (m)

Essa formulação foi adaptada para o caso das correntes de turbidez. Michon et al (1955) desenvolveram uma metodologia de cálculo da tensão de cisalhamento ao longo da vertical para as correntes de densidade em um canal de seção retangular e com declividade constante. Através do perfil de velocidades e de concentração da corrente e da divisão interna entre uma região junto ao fundo e de outra junto a região de mistura da corrente, os autores chegaram a seguinte equação:

Para $0 \leq z \leq h_m$

$$\tau = S \cdot g \int_{h_m}^z \Delta \rho \cdot dz \quad (4.13)$$

Para $h_m \leq z \leq h_t$

$$\tau = S \cdot g \int_{h_m}^z \Delta \rho \cdot dz + \rho_f \frac{\varphi'}{\varphi} \left(\int_{h_m}^z u^2 dz - u \cdot \int_{h_m}^z u dz \right) \quad (4.14)$$

$$\frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{\int_{h_m}^{h_t} \Delta \rho \cdot dz}{\int_{h_m}^{h_t} u^2 \cdot dz} \quad (4.15)$$

Onde :

τ = tensão de cisalhamento (Pa)

u = velocidade média na altura z (m/s)

h_m = altura onde a velocidade é máxima (m)

h_t = altura total da corrente (m)

ρ_f = massa específica do fluido (kg/m^3)

$\Delta\rho$ = variação da massa específica (kg/m^3)

S = declividade

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

A figura 4.17 ilustra a diferença entre a tensão de cisalhamento e a velocidade do fluxo para os escoamentos em canais e para as correntes de turbidez.

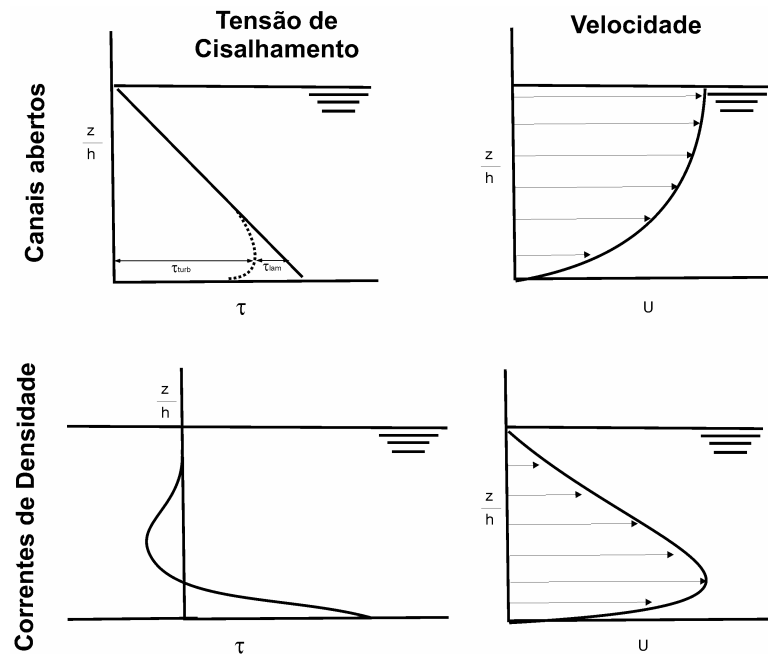


Figura 4.17 Diferenças entre os perfis de tensão de cisalhamento e de velocidade para escoamentos em canais abertos e para correntes de densidade (fonte: modificado de Michon et al, 1955).

4.3.2.5 Comportamento reológico da mistura

A reologia é a ciência que estuda a relação tensão-deformação dos corpos físicos, ou seja, a maneira como ocorrem as mudanças na forma e no fluxo desses materiais ao longo do tempo. No estudo das correntes de densidade, essa relação é de fundamental importância, pois através dela pode-se determinar o comportamento reológico e a viscosidade das misturas de água e sedimentos que compõe a corrente. A determinação da viscosidade da mistura foi primeiramente discutida por Dott (1963), utilizando os modelos reológicos para diferenciar diferentes tipos de fluxos.

Pela reologia, podemos classificar os fluidos (tabela 4.5) de acordo com a relação entre a tensão sobre ele aplicada e a deformação causada.(figura 4.18a) e com o tempo (figura 4.18b).

Tabela 4.5 Classificação dos fluidos com relação ao comportamento reológico.

Tipo de Fluido	Dependentes do tempo	Resistência inicial	Tensão vs. Deformação com relação ao:	
			Gradiente de velocidade	Tempo
Newtoniano			Linear	
Dilatante		Não	Aumenta	
Pseudo-Plástico	Não		Diminui	-
Plásticos	Bingham	Sim	Aumenta linearmente	
	Não Bingham		Aumenta não linearmente	
Tixotrópico	Sim	Não	-	Diminui
Tixotrópico negativo (reopético)				Aumenta

O modelo de tensão-deformação mais simples é o que apresenta uma relação linear entre a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação. Nesse caso, os fluidos são chamados de Newtonianos, (devido à definição da Lei de Newton da Viscosidade - ver tabela 4.6, a seguir), sendo que a viscosidade do fluido ou da mistura (coeficiente de viscosidade dinâmica) é constante.

Qualquer desvio da linearidade entre a tensão-deformação caracteriza fluidos chamados de não Newtonianos, os quais podem ser subdivididos em: plásticos, se apresentarem no seu comportamento, a existência de uma tensão inicial crítica (*yield stress*), abaixo da qual, não há a ocorrência de deformação do material; dilatantes e pseudoplásticos, se apresentarem uma deformação que segue uma lei tipo potência. Nesse caso, novas equações definem esses tipos de fluxos. A tabela 6 apresenta algumas das equações mais difundidas na literatura.

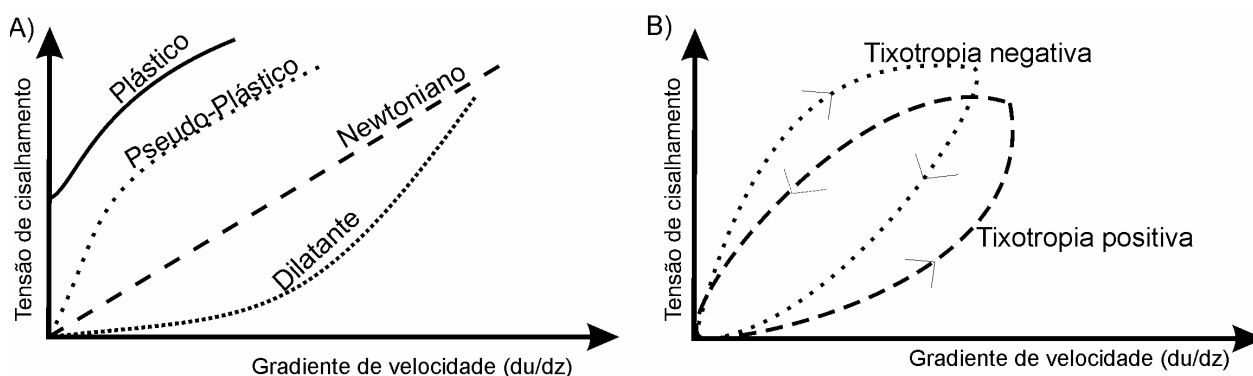


Figura 4.18 a) Classificação dos fluidos com relação ao comportamento reológico (independentes do tempo); b) Classificação dos fluidos com relação ao comportamento reológico (dependentes do tempo)

Tabela 4.6 Modelos de leis para os diferentes comportamentos reológicos

Modelo	Equação	Tipo de Fluido
Bingham	$\tau = \tau_i + k \cdot \gamma$	Plástico de Bingham
Herschel - Bulkley	$\tau = \tau_i + k \cdot \gamma^n$	Plástico
Newton	$\tau = \mu \cdot \gamma$	Newtoniano
Lei de Ostwald (potência)	$\tau = k \cdot \gamma^n$ onde $n < 1$	Pseudo-Plástico
Lei de Ostwald (potência)	$\tau = k \cdot \gamma^n$ onde $n > 1$	Dilatante

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa)

τ_i = tensão de cisalhamento crítica (Pa)

μ = coeficiente de viscosidade dinâmica (Pa.s)

$\gamma = (du/dz)$ é o gradiente de velocidade ou taxa de deformação (1/s)

k = coeficiente de consistência (Pa.sⁿ)

n = coeficiente da lei de potência

Na natureza, as mudanças no comportamento reológico dos fluidos que compõem as correntes de turbidez entre newtoniano e plástico ocorrem, frequentemente, pelo aumento da concentração de partículas sólidas, pelo tamanho e pela composição dos grãos em suspensão. Na realidade, a incorporação ou a perda de sólidos em suspensão nas correntes de turbidez é uma constante durante o seu deslocamento, desde a sua iniciação até a sua extinção. Este fato, determina mudanças constantes nos mecanismos de transporte e deposição que estão presentes nos registros geológicos das sequências marinhas profundas.

Ainda no caso das correntes de turbidez, como há a presença de uma mistura com água e material sólido, ocorrem diferentes interações entre o fluido e as partículas que devem ser consideradas na sua caracterização reológica. Coussot (1997) enumera cinco diferentes interações: o movimento browniano, com o choque elástico entre as partículas; o efeito do empacotamento, relacionado ao arranjo dos grãos; os efeitos hidrodinâmicos causados pela presença do material sólido; os efeitos de inércia, relacionados à turbulência interna da mistura e os efeitos coloidais, gerando forças eletroquímicas que não devem ser negligenciadas.

4.3.2.6 Influência da coesão das partículas em misturas

Partículas de argila pertencem à classe dos colóides, cujo diâmetro varia entre 1micron a 10 micra. Quando essas partículas coloidais são suspensas em líquidos, a mistura obtida é,

freqüentemente, referida como uma dispersão. Uma característica importante das dispersões é a alta razão da área/volume da matriz sólida, além das diferentes características mecânicas, elétricas e ópticas específicas, como, por exemplo, interação de Van der Waals, repulsão entre grãos e interação de dupla camada (ver Coussot, 1997).

Uma das principais características das partículas de argila é a coesão, causada devido à combinação de duas forças, a força de Van der Waals e as ligações iônicas que se formam através do processo de troca de cátions entre os minerais da argila.

A coesão entre partículas resulta em alta viscosidade cinética e em uma matriz coesiva, que é um dos principais mecanismos de suporte dos grãos. Também, essa matriz coesiva resiste à penetração de água dentro do fluxo mantendo a concentração do fluxo do corpo (Mulder e Alexander, 2001).

Os fluxos com presença de material coesivo podem ser diferenciados de todos os outros porque, dependendo da concentração volumétrica, eles apresentam material coesivo suficiente (argila – lama) para gerar uma característica reológica de fluido plástico/pseudoplástico. Como contêm partículas coloidais, espera-se que apresente uma tensão de cisalhamento crítica (*yield stress*).

Quando a distância média entre os agregados é da mesma ordem que a sua dimensão média, eles juntam-se para formar um volume de preenchimento (*volume-filling network*), em um processo conhecido como "gelatinização". A concentração crítica em que ocorre "gelatinização", é conhecida como "ponto de gel" ou "concentração de gelatinização" e está associada a uma significativa mudança no comportamento da sedimentação. A concentração de gel é função do tipo de sedimento e da química da água, mas, normalmente, ocorre em concentrações de argila entre 80 e 180 g/l, equivalente a uma fração do volume sólido de 0,03 e 0,07 (Whitehouse et al., 2000 e Winterwerp, 2002).

Depois que uma argila atinge o ponto de gel, quando a componente vertical da tensão estática é maior do que a força coesiva (tensão crítica) da mistura, a carga em suspensão atua, praticamente, como um "sólido" sob o seu próprio peso,. Assim, a força motriz para essa solidificação é a força gravitacional agindo sobre o corpo de partículas acumuladas e não a força gravitacional agindo em uma única partícula (Amy et al, 2006).

Acredita-se que as argilas sejam importantes em correntes de turbidez, pois elas ajudam a transportar areias a longas distâncias em todos os ambientes deposicionais, uma vez que aumentam a capacidade de transporte dos fluxos. Por outro lado, uma quantidade excessiva desse material pode ocasionar um cenário diferenciado, uma vez que flocos de sedimento coesivo podem se formar, gerando uma camada lamosa fluida junto ao fundo (sistema bifásico) que pode resultar na diminuição da capacidade de transporte do

fluxo (Winterwerp, 2001). Os flocos formados também apresentam velocidades de sedimentação maiores, devido ao seu maior diâmetro.

4.3.3 Dinâmica de uma corrente de turbidez

Na natureza, o desenvolvimento de uma corrente de turbidez assemelha-se a um sistema fluvial, originando-se - zona fonte -, fluindo - zona de transferência - e desacelerando, eventualmente, no ponto em que toda a sua carga de sedimento irá se depositar - zona deposicional - (Mutti et al., 1999). Uma tentativa simplificada de entender o mecanismo de movimento das correntes de turbidez é considerando as características da corrente relacionadas a cada uma das zonas.

4.3.3.1 Zona fonte

A dinâmica das correntes de turbidez de alta densidade está associada à zona fonte através dos processos de sua inicialização (formação da corrente). Basicamente, são encontrados na literatura dois tipos de escoamentos característicos das correntes de turbidez baseados nestes processos:

a) *Remobilização instantânea de material – pulso – (Surge-like flows).*

Esse tipo de escoamento se caracteriza por ser formado a partir de uma quantidade finita de material, sem uma alimentação contínua (Ravenne e Beghin, 1983), a qual é remobilizada através dos vários tipos de processos que acontecem no ambiente marinho. Normalmente, são formadas por colapsos gravitacionais de sedimentos, como deslizamentos, escorregamentos, rompimento de taludes, entre outros, no talude continental.

Esse tipo de escoamento está associado a um fluxo catastrófico (figura 4.19a), tipicamente não-permanente, onde, em um dado local, a velocidade aumenta abruptamente na chegada da cabeça da corrente (*waxing flow*) e, logo após, decresce durante a passagem do corpo e cauda (*waning flow*). Porém, o comportamento deste decrescimento é oscilatório, variando em torno de um valor médio até chegar ao ponto onde a deposição acontece. Estes fluxos podem transportar grandes partículas devido à grande capacidade de transporte e sua alta velocidade.

Em experimentos de laboratório de fluxos por pulso (*lock-exchange*), Huppert e Simpson (1980) identificaram três estágios de desenvolvimento ao liberar o fluido: um primeiro estágio, onde ocorre a entrada inicial do fluido, sendo a corrente retardada pelo contra-fluxo formado pelo fluido presente no canal. Esta fase também é chamada de ajustamento ou transição da corrente (estágio I). Em seguida, ocorre um estágio puramente inercial, onde as forças de empuxo são balanceadas pelas forças de inércia (estágio II). O

estágio III ocorre também durante o desenvolvimento da corrente ao longo do canal quando as forças de empuxo são equilibradas pelas forças viscosas. O estágio inercial pode estar ausente, caso os efeitos viscosos tornem-se importantes, antes que o estágio de entrada inicial seja completado.

b) Remobilização não-instantânea de material (fluxo contínuo).

O segundo tipo de escoamento se forma a partir de uma alimentação contínua de material durante um determinado tempo (figura 4.19b), como por exemplo, o aporte fluvial que entra no ambiente marinho, formando os fluxos hiperpicnais ou uma remobilização não instantânea de material.

Esses fluxos, normalmente, estão associados à cheias fluviais (quando a concentração das partículas suspensas é tal que a densidade da água fluvial é maior do que a da água da bacia) e podem ser mantidos por períodos longos (horas a meses) com uma velocidade média local quase constante. Devido a isso, eles podem ser chamados de correntes quase-permanentes (*quasy-steady currents*) - (Alexander e Mulder, 2002).

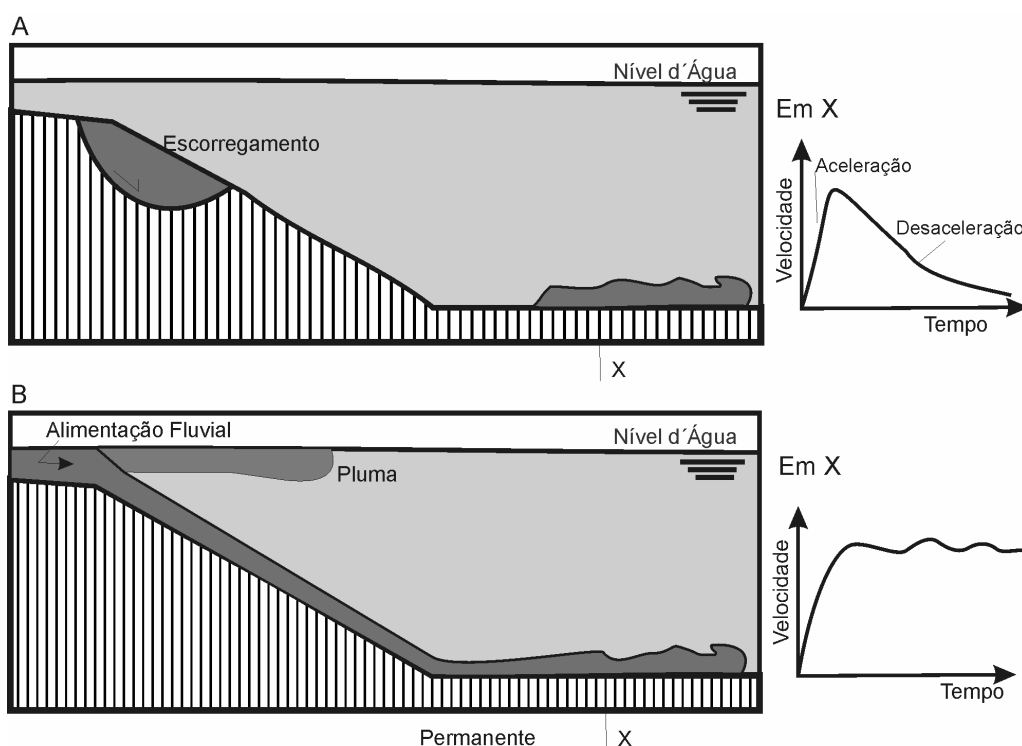


Figura 4.19 Dois tipos de inicialização da corrente: a) Por pulso e; b) Por fluxo contínuo de material (Fonte: modificado de Mutti et al, 1999).

Baas et al. (2004) comentaram que, escoamentos formados a partir da alimentação contínua, se caracterizam pelo fluxo constante de partículas fluindo do corpo até a cabeça, através de um movimento lento. Parte do excesso do fluido alcança a parte superior da cabeça e é lançado para trás. Durante este movimento, a turbulência é gerada pela mistura com o

fluido ambiente e vai se dissipando gradualmente, com o incremento da distância atrás da cabeça. No corpo das correntes quase-permanentes, a camada superior do fluxo é relativamente suavizada e a mistura com o fluido ambiente é mais fraca que na região da cabeça, gerando uma forte estratificação de densidade.

O comportamento destes fluxos e seus depósitos podem ser mais variáveis do que o comportamento dos fluxos por pulsos, uma vez que estas correntes podem ser mais longas e mais estáveis do que correntes por pulso e, conseqüentemente, seus depósitos são, provavelmente, significativamente diferentes. Apesar de serem mais concentradas e mais lentas do que os fluxos instantâneos, elas podem causar mais erosão, transporte e deposição devido a sua duração (Baas et al. 2004).

4.3.3.2 Escoamento (zona de transferência)

Nesta zona de transferência, o enfoque será dado nos processos dinâmicos que ocorrem no escoamento. Após a inicialização do processo, forma-se uma mistura em suspensão com uma determinada densidade/concentração que flui para a região mais a jusante do sistema deposicional. Ao longo do seu caminho, independente do tipo de fluxo, diversos processos ocorrem no seu interior caracterizando o fenômeno propriamente dito.

a) Equações do movimento

A dinâmica das correntes de turbidez é bastante complexa devido aos processos de erosão e deposição que ocorrem durante o escoamento. Devido a isso, a representação desse fenômeno tridimensional através de equações analíticas não é simples, o que leva à simplificação das mesmas. Para uma única dimensão (1D), Parker et al (1986) apresentam um modelo de quatro equações simplificadas, procurando representar o processo físico de desenvolvimento das correntes de turbidez. As quatro equações são: a equação da continuidade da fase líquida (equação 4.16), a equação da continuidade da fase sólida (equação 4.17), a equação da variação da quantidade de movimento (equação 4.18) e uma equação de balanço final da energia turbulenta cinética (equação 4.19):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U h}{\partial x} = e_w U \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial U Ch}{\partial x} = v_s (E_s - r_0 C) \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial U h}{\partial t} + \frac{\partial U^2 h}{\partial x} = R g Ch S - \frac{1}{2} R g \frac{\partial Ch^2}{\partial x} - u_*^2 \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial Kh}{\partial t} + \frac{\partial U Kh}{\partial x} = u_*^2 \frac{1}{2} U^3 e_w - \varepsilon_0 h - R g v_s Ch - \frac{1}{2} R g Ch U e_w - \frac{1}{2} R g h v_s (E_s - r_0 C) \quad (4.19)$$

Estas equações fornecem, além da espessura (h) e da velocidade média em função da profundidade (U), a concentração média de sedimento em função da profundidade (C), a cada tempo ou posição ao longo do fluxo (Pratson et al, 2000).

Cabe salientar que essas equações foram determinadas a partir de simplificações e hipóteses que estão melhor discutidas em Parker et al (1986). Entretanto, o entendimento dessas equações auxilia o estudo experimental de correntes de turbidez, uma vez que, evidencia os parâmetros que devem ser relacionados e/ou observados.

b) Efeitos da alta concentração

Nas correntes de turbidez de alta densidade, a presença de uma grande concentração de sedimentos formando a mistura é uma componente a mais para o entendimento da dinâmica do fluxo. Wan e Wang (1994) discutem que a alta concentração de sedimentos nos fluxos causa diversos efeitos no comportamento do fluxo (mecanismo de transporte) e na deposição, sendo que esses efeitos atuam simultaneamente. Resumidamente, as mudanças causadas são: na densidade do fluido, com o aumento da energia potencial e da quantidade de movimento dos escoamentos; e na viscosidade da mistura, que é alterada com a presença de mais sedimentos, apresentando um comportamento reológico não Newtoniano. Também, a velocidade de queda das partículas é influenciada, já que há sua diminuição com o aumento da concentração devido a: queda das partículas, que induz a um movimento ascendente de água; ao empuxo da partícula, o qual diminui em função da maior densidade do fluido; e pela interferência entre as partículas (efeito de população - *hindered settling*).

Já a capacidade de transporte do escoamento tende a aumentar com a alta concentração de sedimentos, entretanto, essas mudanças dependem também do tipo de sedimento presente no escoamento. Winterwerp (2001) discute que, quando a capacidade de transporte de sedimento de um fluxo turbulento com sedimentos não coesivos é excedida, um novo equilíbrio com baixa carga de sedimento é formado rapidamente, uma vez que, os grãos que vão se depositando junto ao fundo formam um depósito consolidado, porém, com uma possível produção de turbulência. Nesse caso, os grãos remanescentes na suspensão podem ser mantidos em suspensão.

Já para sedimentos coesivos, o aumento da concentração acarreta em um cenário diferente, uma vez que flocos de sedimento coesivo vão se depositando, formando uma camada lamosa fluida junto ao fundo, a qual contém uma grande quantidade de água no seu interior. Assim, um sistema bifásico (duas camadas) de fluido se desenvolve, sendo que a camada de baixo é a mais densa. Apesar de turbulência ser produzida nessa camada devido ao cisalhamento junto ao fundo, ocorre um significativo aumento das forças viscosas,

diminuindo a capacidade do escoamento transportar sedimentos para jusante. Além disso, ainda não se consegue quantificar os mecanismos que atuam nas correntes de alta densidade e essa análise depende da composição granulométrica e do comportamento reológico das misturas.

Foi apontado por Bagnold (1954), que a presença da alta concentração de sedimentos com tamanho de fração areia, tende a amortecer a turbulência nos fluxos experimentais e estas observações têm sido aplicadas às correntes de turbidez. O aumento de concentração também aumentaria a viscosidade aparente da mistura, sendo, em alguns casos, suficiente para eliminar a turbulência.

Middleton (1993) destacou que parece provável que a turbulência é sempre um fator importante nas correntes de turbidez naturais, apesar da existência de subcamada viscosa bem próxima ao fundo, na qual as forças viscosas são preponderantes, amortecendo os pequenos turbilhões formados nesta zona. Já os grandes turbilhões, formados pela turbulência, são efetivos na suspensão de grandes partículas, indicando que eles também são importantes nas dispersões altamente concentradas.

Middleton (1970) estudou experimentalmente os efeitos da alta concentração de sedimentos, concluindo que:

- 1) O aumento da densidade resulta no aumento da velocidade e na redução da diferença entre a dispersão granulométrica e seus maiores clastos (que podem ser transportados). Estes clastos podem gerar marcas de sola (*sole marks*) se a concentração na base for alta.

- 2) O aumento da viscosidade efetiva pode resultar na supressão das pequenas escalas de turbulência e na formação da subcamada laminar (posteriormente, denominada subcamada viscosa) na base da corrente.

- 3) O aumento das interações partícula a partícula resulta em decréscimo na efetividade do processo de seleção. A alta concentração pode ser reconhecida pelos sedimentos pobremente selecionados, especialmente os finos.

- 4) O aumento da taxa de deposição inicial, bem como a própria taxa de deposição, tem consequências importantes sobre os tipos de estruturas formadas no depósito.

Nos últimos anos, diversos autores vêm discutindo o efeito de aumento da concentração nas correntes de turbidez de alta densidade e todos os parâmetros envolvidos nesse fenômeno, sendo muitas vezes o estudo relacionado aos fluxos de detritos ou a outros fluxos que apresentam uma nomenclatura diferenciada, conforme exposto no item 4.2.2. Mulder e Alexander (2001) apresentam uma revisão detalhada sobre esses diferentes aspectos relacionados ao efeito da concentração.

c) *Mecanismo de suporte dos grãos*

As classificações baseadas no mecanismo de suporte de grãos começaram a ser melhor desenvolvidas a partir dos trabalhos de Bagnold (1954), de Middleton e Hampton (1973), seguidos por Lowe (1982), Postma et al. (1988), Shanmugam (1996) e Mulder e Alexander (2001). Basicamente, os seguintes mecanismos de suporte dos grãos são destacados por esses autores:

- Turbulência: está associada à velocidade do escoamento, que varia em qualquer ponto e direção continuamente em torno de um valor médio. Assim, a velocidade instantânea do escoamento se caracteriza pela presença de um valor médio (\bar{U}) mais a correspondente flutuação das velocidades (u') nas três direções do escoamento (p. ex. $u_{\text{inst}} = \bar{U} + u'$). Neste caso, atribui-se à componente vertical da turbulência (abordagem estocástica), o mecanismo de suporte de grãos, não levando em conta a presença de estruturas coerentes da turbulência (abordagem determinística).

- Decantação impedida (*hindered settling*): impedimento à deposição devido à própria elevação da concentração de grãos que inibe o movimento da água e aproxima os grãos que tentam depositar-se, obrigando a água intersticial a ser expulsa dos espaços intersticiais entre as partículas, o que dificulta a movimentação e retarda a decantação dos grãos.

- Empuxo (*buoyant lift*): fornecido por uma possível matriz composta de sedimentos mais finos e água.

- Pressão dispersiva (*dispersive pressure*): onde os grãos são mantidos em suspensão pelas forças de interação entre eles, pela colisão entre grãos (regime inercial) ou pela ação das forças viscosas produzidas sobre o grão (regime viscoso). Essa pressão dispersiva é proporcional à tensão de cisalhamento transmitida entre os grãos e isso contrapõe à tendência dos grãos de cair.

- Movimento ascendente do fluido intragranular: em dispersões muito concentradas de grãos e fluido, o fluido tende a ser expulsos para cima ao mesmo tempo em que uma “chuva” de grãos maiores e mais densos tende a decantar, estabelecendo uma competição entre os grãos que caem e o fluido que tenta ascender, o que eleva a poro-pressão até o ponto em que o fluido rompe a resistência que os grãos oferecem ao escape de fluidos intersticiais e escapa pelos espaços intergranulares. Enquanto houver suficiente aceleração do fluxo e pressão nos poros elevada, os grãos serão mantidos suspensos pelo fluido intersticial que busca escapar.

- Matriz coesiva (*matrix strength*): uma mistura de material silto argiloso e fluido intersticial suporta o peso dos clastos e forma também um filme que lubrifica as

irregularidades na superfície dos grãos, reduzindo o cisalhamento e permitindo que os fluxos de detritos fluam por grandes distâncias, mesmo em declives muito suaves. A presença da argila é importante, pois fornece coesão à matriz que sustenta os clastos maiores.

Esses fenômenos descritos acima são dependentes, entre outros fatores, da concentração de grãos, da reologia do fluido, da composição e do tipo de sedimento, o que altera a propriedade das misturas e, conseqüentemente, modifica o comportamento do fluxo. Por esta razão, os autores nomearam como correntes de turbidez, somente aqueles fluxos onde o mecanismo de suporte dos grãos é a turbulência e chamaram estes fluxos de baixa densidade. Os fluxos altamente concentrados (alta densidade), por possuir uma maior concentração de grãos, apresentariam diversos mecanismos de suporte ao mesmo tempo, como, por exemplo, a pressão dispersiva e a fluidização, ou a matriz coesiva e a pressão dispersiva, além da turbulência que estaria presente (Middleton e Hampton, 1973 e Lowe, 1979). Lowe (1982) também dividiu os fluxos em baixa densidade e alta densidade com base na população de grãos e no mecanismo de suporte. No caso da alta densidade ele ainda fez uma outra subdivisão em função da presença de fração arenosa e de fração cascalhosa, onde para cada tipo estaria atuando mecanismos de suporte de grãos diferentes, sendo a turbulência, o empuxo (*buoyant lift*) e a decantação impedida (*hindered settling*) para a fração arenosa, enquanto que para a fração cascalhosa atuaria também, a pressão dispersiva.

Esses três trabalhos nos mostram ainda que pode haver uma evolução completa de um fluxo, iniciando como um fluxo coesivo, passando a fluxo de grãos, correntes de turbidez de alta densidade, fluxos liquefeitos e por fim uma corrente de turbidez de baixa densidade. Nestas transformações fica implícita a mudança nos mecanismos de suporte dos grãos.

Em fluxos de densidade estratificados, chamados bipartidos, os processos que operam durante a deposição na sua base são muito diferentes daqueles que operam na zona acima. Postma et al. (1988), nos seus experimentos, especularam que na região mais concentrada ocorrem os processos de pressão dispersiva, de empuxo (*buoyant lift*) e da decantação impedida (*hindered settling*) e que a alta concentração e densidade do fluxo tendem a amortecer a turbulência. Já na região acima, a turbulência é o principal mecanismo de suporte. Shanmugam (1996), na sua classificação de fluxos de detritos arenosos, a qual representaria os fluxos de turbidez de alta densidade, apresentou como principais mecanismos de suporte a pressão dispersiva, a matriz coesiva, o empuxo (*buoyant lift*) e a decantação impedida (*hindered settling*). A formação de uma camada basal com alta concentração de sedimento pode aumentar a decantação impedida (*hindered settling*) e congelar clastos de pelitos e grânulos de quartzo ao longo do depósito.

Kneller e Buckee (2000) argumentaram que o papel da turbulência nas correntes de suspensão, tanto no transporte quanto na deposição, vem sendo debatido pelas comunidades acadêmicas, principalmente, no caso de correntes de alta densidade e seus depósitos. Um ponto de vista é que as correntes de alta densidade são compostas por fluidos de comportamento Não-Newtoniano e não são suportadas pela turbulência, mas sim pela matriz coesiva ou pelas interações intragranulares. Neste caso, a deposição se dá por congelamento coesivo (*cohesive freezing*). O outro ponto de vista, é que o regime de transporte, mesmo para altas densidades é dominado pela turbulência e a deposição ocorre grão a grão. A incerteza envolvendo estes processos é grande, pelo fato deles terem sido aplicados para a interpretação do mesmo depósito. Pode haver na natureza, ainda, uma ligação contínua entre os dois processos.

Já Mulder e Alexander (2001) consideraram que a principal distinção entre os fluxos se dá pelo predomínio ou não das forças coesivas e friccionais entre as partículas. Nos fluxos coesivos, há a resistência da tensão da matriz coesiva que resiste à percolação de água no fluxo mantendo a concentração do corpo do fluxo. Já nos friccionais, há uma interação entre as partículas, aumentando o espaço intergranular que é preenchido por água. Neste caso, a característica do fluxo depende diretamente da concentração de grãos, a qual pode variar muito durante o seu deslocamento, devido à entrada de água ou à decantação de sólidos.

Os fluxos friccionais, por sua vez, são classificados como correntes de turbidez quando a concentração é inferior a 9%, que é o critério adotado por Bagnold (1962) para definir suspensões turbulentas. Neste caso, a turbulência é o principal mecanismo de suporte das partículas.

Nas correntes de densidade concentradas há uma mudança no mecanismo de sustentação dos grãos que não permite mais a livre segregação granulométrica que ocorre nas correntes de turbidez, embora esta ainda possa ocorrer devido a pressão dispersiva. A segregação granulométrica deixa de ocorrer nos fluxos hiperconcentrados (matriz coesiva) e a reologia do fluido passa a ser não-newtoniana.

Pelas classificações adotadas pelos pesquisadores, nota-se que existem dois extremos consensuais quando se avalia o mecanismo de suporte dos grãos: um limite inferior, caracterizado por possuir baixa densidade e onde a turbulência é o principal mecanismo de suporte; e um limite superior, onde a matriz coesiva é o principal responsável. Os fluxos correspondentes a estes dois extremos são as correntes de turbidez e o fluxo de detritos. Entre eles, estaria ocorrendo as correntes de turbidez de alta densidade. Novamente, não há um consenso sobre todos os mecanismos de suporte de grãos que ocorrem, porém a ideia de que todos esses possam ocorrer ao longo do tempo e espaço é bastante plausível.

Embora, conceitualmente importantes, os fluxos de grãos, liquefeitos e fluidizados, não são, aparentemente, efetivos em carregar quantidades significativas de sedimentos por longas distâncias. Estes processos representam condições transientes nos fluxos gravitacionais, ocorrendo durante as fases de iniciação e, particularmente, nos estágios finais de transporte das correntes de turbidez, imediatamente antes e/ou durante a deposição dessas dispersões sedimentares altamente concentradas.

d) Transformações de fluxo

Dentre os processos que ocorrem no interior da corrente, as transformações de fluxo, ou mudança de regime, são os mais importantes e menos compreendidos no processo sedimentológico (Shanmugam, 2000).

Fischer (1983) idealizou quatro tipos de transformações de fluxos que podem ocorrer durante o desenvolvimento da corrente (Figura 4.20). São elas:

- Transformações no corpo: quando o fluxo muda de laminar para turbulento dentro do corpo sem adição ou perda de fluido;

- Transformações gravitacionais: ocorre a partir de uma turbulência inicial, onde o fluxo de partículas carregadas é gravitacionalmente segregado, desenvolvendo uma região altamente concentrada e com movimento essencialmente laminar, enquanto que o fluxo diluído acima desta região se mantém turbulento;

- Transformação de superfície: ocorre quando o ar ambiente ou água misturam-se na camada superior pelo arraste provocado pelo escoamento do fluido ambiente ou quando o líquido ambiente entra pela superfície frontal inferior da corrente formando o seu nariz;

- Transformação por elutriação: desenvolvida pelo movimento ascendente do fluido intersticial que carrega partículas finas que saem da região mais densa, junto ao fundo, para produzir uma fase mais diluída e turbulenta acima desta camada.

Fischer (1983) reconhece ainda que a maneira como as partículas são suportadas dentro do fluxo, no seu estágio final do movimento, determina a textura e as estruturas dos depósitos.

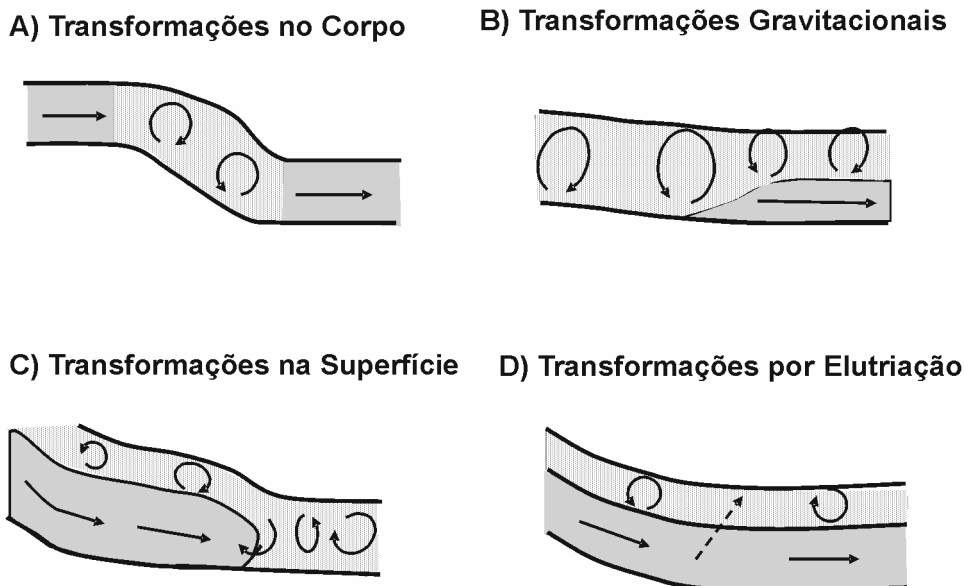


Figura 4.20 Esquema das transformações de fluxos (Fonte: Fischer, 1983, cortesia Del Rey, 2006.)

A transformação de um tipo de fluxo em outro, durante o seu desenvolvimento, vem sendo discutida pelos pesquisadores nos últimos tempos. Muitas hipóteses têm sido levantadas para buscar o entendimento dos processos de transformação de um fluxo de mais alta concentração em fluxos menos concentrado (Hampton, 1972; Middleton e Hampton 1973; Mutti et al., 1999; e Lowe e Guy, 2000), ao longo do tempo e espaço, o que representaria que diferentes tipos de fluxos e de processos poderiam acontecer num único evento.

Middleton e Hampton (1973) discutiram isso comentando que a transformação de um fluxo de detritos para uma corrente de turbidez necessitaria de uma mistura adequada de água para gerar a turbulência necessária para a sua formação e que essa turbulência seria gerada no fluxo pela “fricção” nas interfaces superiores e inferiores ou pelo fenômeno de separação de fluxo. Neste caso, existiriam três maneiras para o fluxo de água se misturar: 1) mistura turbulenta ao longo da interface superior; 2) mistura do fluxo ao longo da interface inferior; 3) mistura provocada pela formação dos vórtices atrás da cabeça. Os autores concluíram que é provável que ocorra transições entre os vários tipos de fluxos gravitacionais de sedimentos altamente concentrados (ver figura 4.4).

Shanmugam (1996) argumenta que, embora os fluxos possam se desenvolver e se transformar durante o transporte, as características preservadas no depósito natural são somente as do estágio final de deposição do fluxo, o que dificulta a compreensão deste fenômeno durante a sua ocorrência. Dasgupta (2002) apresentou uma revisão detalhada do assunto.

e) Ondas Internas

Kneller e Branney (1995) levantaram uma questão sobre o comportamento hidrodinâmico da corrente, que apresentaria flutuações temporais na concentração da corrente atreladas à condição de não-permanência do escoamento. As hipóteses para explicar estas flutuações temporais na concentração da corrente são: a existência de fluxos pulsantes com ondas internas no escoamento; a presença da turbulência; e a existência de heterogeneidades na distribuição granulométrica enquanto a corrente se desloca.

Já Del Rey et al. (2006), através da análise de imagens geradas por um ultrassom de uso médico, levantaram a hipótese de que o fluxo apresentaria um caráter bipartido e que, na interface que divide estas duas porções do fluxo, ocorrem ondulações que indicam estar relacionados ao desprendimento de vórtices na porção superior da corrente (figuras 4.21a e 4.21b). Essas ondulações parecem atuar na gênese das flutuações da velocidade de deslocamento da corrente.

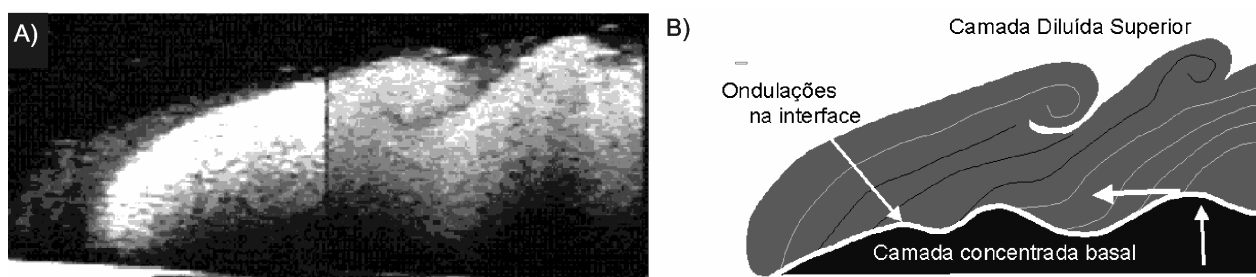


Figura 4.21 Visualização de ondas internas nas correntes de turbidez: a) imagem obtida por ultrassom e; b) Desenho esquemático. (Fonte: Del Rey et al., 2006)

f) Autosuspensão

Middleton (1993) destacou três aspectos que são importantes na dinâmica das correntes de turbidez e seus padrões de depósitos: (a) o critério da autosuspensão; (b) a troca de sedimento com o fundo e (c) a mistura na interface superior da corrente.

O critério da autosuspensão de Bagnold (1962) pode ser explicado pelo seguinte ciclo:

- 1) A corrente recebe uma entrada de energia gravitacional suficiente para manter a turbulência e para sustentar as partículas em suspensão gerada pelo fluido;
- 2) Essa suspensão gera uma diferença de densidade entre o fluido ambiente e a corrente;
- 3) Essa diferença de densidade mantém a carga em suspensão na corrente e;
- 4) A carga em suspensão faz a corrente fluir gerando turbulência.

Middleton (1966a) argumentou que em uma corrente de turbidez permanente, que não é deposicional nem erosiva, deve existir um balanço entre as forças que favorecem a

sedimentação da suspensão (reduzindo a densidade e a carga da corrente) e a componente vertical da força da gravidade agindo na suspensão, a qual é responsável pelo movimento da corrente e, portanto, pela geração da turbulência que mantém o sedimento em suspensão. Assim, seria necessário haver uma adição de energia para iniciar a corrente através da criação da suspensão.

g) Trocas de sedimentos com o substrato

Outro processo que está ligado ao processo de autosuspensão é a troca de sedimentos com a superfície inferior, no caso o substrato marinho. Isso pode acontecer pelo processo de erosão na corrente de turbidez, onde o material da superfície inferior é erodido e carregado para dentro da corrente. Este carregamento de material causa o aumento da capacidade de transporte da corrente, provocando o seu movimento a distâncias maiores. A situação inversa também é possível, devido ao processo de deposição de material da corrente na superfície inferior. Neste caso, a diferença de massa específica entre a corrente e o fluido ambiente é reduzida e a tendência do fluxo é desacelerar e parar.

h) Trocas na interface

O outro aspecto abordado por Middleton (1993) está relacionado aos processos de mistura que ocorrem ao longo da superfície da corrente. Devido à turbulência do escoamento, tanto os processos de mistura que acontecem na cabeça da corrente (instabilidades de Kelvin-Helmholtz e formação de lobos e rachas e superfície inferior) quanto os do corpo (carreamento) são causados pelo processo de difusão turbulenta.

A viscosidade do fluido não tem grande influência no escoamento no caso de escoamentos turbulentos. Contudo, à medida que as velocidades são menores, as forças viscosas tornam-se importantes para a dinâmica do escoamento e para o processo de mistura, passando a difusão molecular a ser importante no processo de mistura entre os materiais.

i) Diferenças entre fluxo de detritos e correntes de turbidez.

No estudo de correntes de densidade, entre os diversos fluxos existentes que já foram caracterizados e classificados (vide item 4.2.1), dois deles se destacam por apresentarem características extremas entre essa ampla gama de escoamentos. Pratson et al (2000) apresentam um estudo comparando estes dois tipos de fluxos. Nesse estudo, eles argumentam que a diferença de comportamento entre eles se dá com relação à presença de argila e da concentração. Os fluxos de detritos são densos e possuem uma quantidade de argilas suficiente para suportar os materiais de granulometria mais grossa durante a sua

movimentação (Middleton e Hampton, 1973). As correntes de turbidez são diluídas, transportam, tanto a argila como os materiais mais grossos, em uma solução de água e sedimento em que são mantidos em suspensão pela turbulência do fluxo. A figura 4.22 apresenta a diferença da dinâmica interna de correntes de turbidez (figura 4.22a) e dos fluxos de detritos (figura 4.22b), caracterizando nesse último, duas regiões de escoamento (fluxo cisalhante e fluxo tipo “plug”).

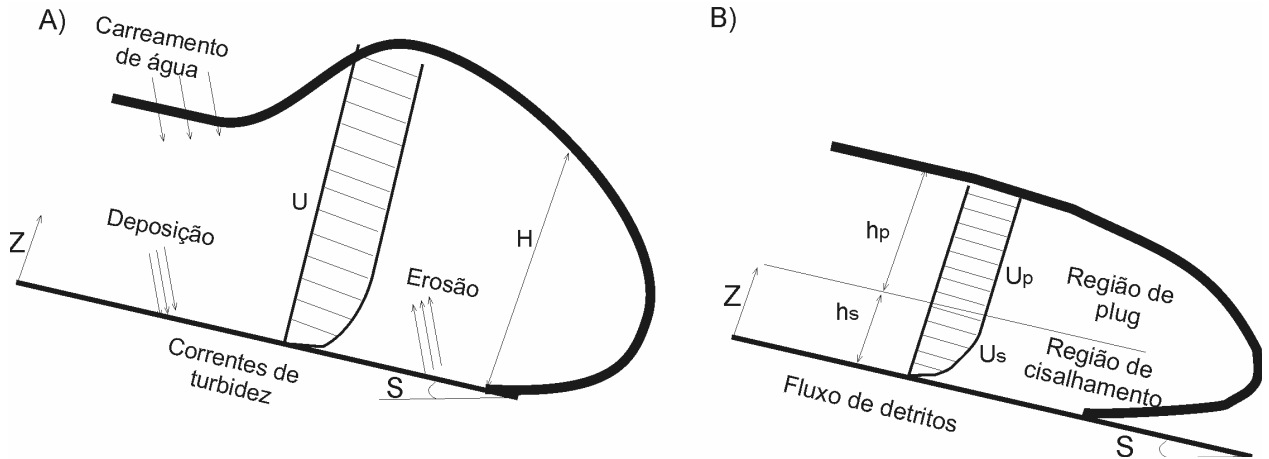


Figura 4.22. Diferença entre a dinâmica interna da corrente de turbidez (a) e dos fluxos de detritos (b).

Com relação às equações hidrodinâmicas, Lin e Leblond apud Pratson et al, (2000) expressam o comportamento físico básico de um fluxo de detritos sub-aquoso a partir de três equações: a equação da continuidade para fluxo de detritos (equação 4.20) e expressa a conservação de sedimento e água no fluxo, a equação de variação da quantidade de movimento para a região cisalhante (abaixo) – equação 4.21 – e a equação de variação da quantidade de movimento para a região de “plug” (acima) – equação 4.22.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[U_p h_p + \frac{3}{2} U_p h_s \right] = 0 \quad (4.20)$$

$$\frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial t} (U_p h_s) - U_p \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{8}{15} \frac{\partial}{\partial x} (U_p^2 h_s) - \frac{3}{2} U_p \frac{\partial}{\partial x} (U_p h_s) = h_s g \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_m} \right) S - h_s g \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_m} \right) \frac{\partial h}{\partial x} - 2 \frac{\mu_m}{\rho_m} \frac{U_p}{h_s} \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_p h_p) + \frac{\partial}{\partial x} (U_p^2 h_p) + U_p \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{3}{2} U_p \frac{\partial}{\partial x} (U_p h_s) = h_p g \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_m} \right) S - h_p g \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_m} \right) \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_i}{\rho_m} \quad (4.22)$$

Estas equações unidimensionais fornecem a espessura (h) e a velocidade média (U) em função da profundidade a cada tempo e a cada ponto ao longo do fluxo.

4.3.3.3 Zona de deposição

As correntes de turbidez, por apresentarem uma condição de escoamento não conservativo, isto é, onde a densidade do fluxo e a concentração de sedimento decrescem com o tempo e espaço, apresentam durante todo o seu desenvolvimento processos de erosão e,

principalmente, de deposição de sedimentos, os quais ocorrem sujeitos a diferentes mecanismos.

Para Lowe (1982), existem quatro mecanismos de deposição, são eles:

- 1) sedimentação por tração, onde os sedimentos respondem grão-a-grão e são depositados como carga de leito (*bed-load*);
- 2) sedimentação por suspensão onde os grãos respondem individualmente e se acumulam diretamente à carga de suspensão (*suspended load*);
- 3) congelamento friccional (*frictional freezing*) onde os grãos interagem através do contato friccional (*frictional*);
- 4) congelamento coesivo (*cohesive freezing*), onde os grãos interagem com as forças coesivas da matriz de sedimentos.

Os dois primeiros tipos ocorreriam a partir de correntes de turbidez e dos fluxos fluidizados, onde as partículas sedimentares tendem a se agrupar individualmente. Nos dois últimos, fluxos de grãos e de detritos, a deposição ocorre quando a tensão cisalhante é inferior ao “congelamento friccional” (*frictional freezing*) dos grãos ou à interação coesiva entre as partículas. Deste modo, o fluxo estaciona, depositando-se coletivamente, com a formação de um depósito em massa.

Em outras palavras, o mecanismo de deposição de correntes de turbidez baseia-se na tendência das partículas sedimentares acumularem individualmente, sejam provenientes da carga de fundo (de tração) ou, diretamente, da carga em suspensão, desenvolvendo-se com uma gradação no seu tamanho da base para o topo nos depósitos.

Shanmugam (1997) destacou que este tipo de deposição é característico de fluidos turbulentos, no qual as partículas grossas e finas tendem a cair separadamente durante a deposição, em função de suas velocidades de queda, gerando uma gradação normal no depósito.

Kuenen e Migliorini (1950) propuseram uma série de hipóteses para a formação dos depósitos com camadas gradadas. Segundo eles, quando sedimentos com grãos de tamanho variado são introduzidos de forma espasmódica em um corpo d'água não muito raso, tenderá, com o passar do tempo, arranjar-se formando leitos gradados sobre o fundo. As partículas grossas assentam-se mais rapidamente que as partículas finas, acumulando-se primeiro. Ocorre o contínuo decréscimo no assentamento das classes granulométricas até que as partículas mais finas depositam-se nas porções de topo. Como outras causas para a formação das camadas gradadas, considera-se o decréscimo gradual na capacidade de transporte da corrente de densidade. Bouma (1962) apresentou o modelo deposicional resultante de

observações ao longo da distância e da gradação vertical de sedimentos no interior do depósito. O seu modelo ficou conhecido como a clássica “Sequência de Bouma” (figura 4.23).

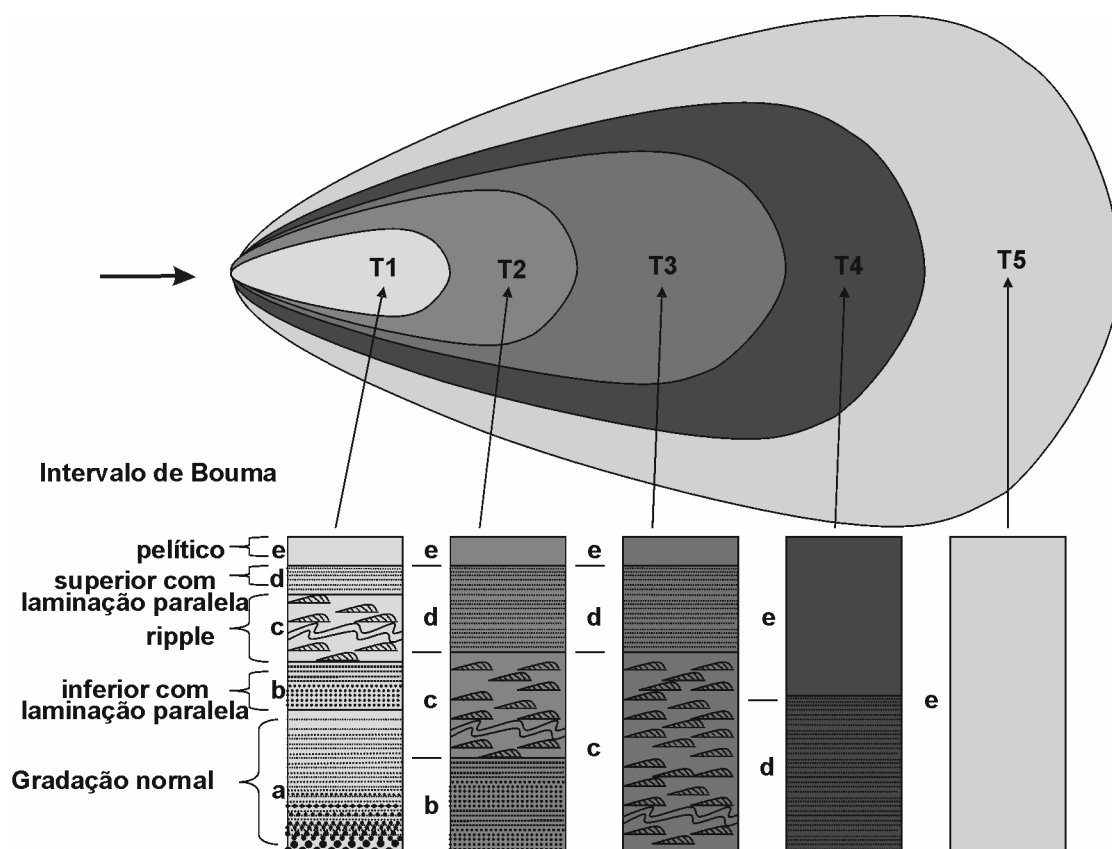


Figura 4.23 Desenho esquemático da sequência de Bouma (1962). (Modificado de Bouma, 1962; cortesia de Del Rey, 2006).

Middleton (1967) estudando, experimentalmente, correntes de alta e baixa concentração, destacou as seguintes diferenças entre os mecanismos de deposição de sedimentos, expostos na tabela 4.7.

Tabela 4.7 Diferenças nos mecanismos de deposição de alta e baixa densidade (Modificado de Middleton, 1967).

Estágio	Baixa densidade	Alta densidade
1	Deposição de pouco sedimento imediatamente atrás da cabeça, seguido de um curto movimento de tração	Deposição de sedimentos imediatamente atrás da cabeça, seguido pela extensiva massa cisalhante do depósito. O topo do depósito não é bem definido;
2	Baixa deposição de sedimentos em suspensão seguida de um maior movimento de tração	Formação de um depósito expandido (depósito rápido). Ondas de Helmholtz formam-se na interface superior do depósito e produzem um movimento circular cisalhante profundo dentro do depósito
3	Rápida deposição de sedimento em suspensão quando a velocidade declina rapidamente, seguida da passagem da principal onda da corrente	Desaparecimento das ondas e formação da superfície planar, acompanhado pela consolidação do fundo
4	Deposição muito baixa de sedimento vinda da zona de mistura carregada pela corrente e muito baixa deposição de sedimentos finos presentes na cauda da corrente.	Deposição muito baixa de sedimento vindo da zona de mistura carregada pela corrente, e muito baixa deposição de sedimentos finos presentes na cauda da corrente.

Middleton complementa com a seguinte explicação: o comportamento dos fluxos de alta concentração e a formação do depósito característico é função do comportamento

pseudoplástico da suspensão de partículas a altas concentrações e é causada pelas interações das partículas (pressão dispersiva) dentro da suspensão.

Lowe (1982) destacou que a deposição de sedimentos de fluxos de turbidez de alta densidade arenosas, caracterizada como um bulbo de carga de suspensão consistindo de população I e II (argila, silte e areias médias, com pouco ou quase sem grossos e pedregulho), ocorre através de três estágios. Já as correntes de turbidez de alta densidade cascalhosas, os grãos maiores seriam transportados junto à base dentro de um tapete de tração muito concentrado, além de estarem presentes em suspensão na zona turbulenta do fluxo. A tabela 4.8 e a figura 4.24 apresentam um resumo da teoria apresentada por esse autor.

Tabela 4.8 Estágios de deposição dos fluxos de alta densidade (Adaptado de Lowe, 1982)

Estágios	População de grãos		
	I - arenosa	II – arenosa	III - cascalhosa
I Tração	Após uma instabilidade suave no fluxo, a corrente deposita uma parte da carga de suspensão, produzindo formas de fundo como as presentes nas correntes de turbidez de baixa densidade. - Essa instabilidade do fluxo pode, freqüentemente, impedir a evolução de dunas grandes e organizadas e o sedimento depositado sob estas condições irá apresentar estruturas de tração, principalmente a laminação oblíqua		Cascalhos muito grossos presentes são provavelmente transportados junto à base dentro de um tapete de tração super concentrado, Presentes em suspensão na zona turbulenta do fluxo.
II Tapete de Tração	- Aumento da instabilidade do fluxo, a carga em suspensão torna-se progressivamente concentrada em direção ao fundo e o transporte por arraste torna-se dominado pela colisão de grãos, guiando a formação de uma camada basal que é mantida pela pressão dispersiva e alimentada pela queda de sedimentos da camada superior. - Se a turbulência é suprimida nesta camada, como parece ser provável, cria-se o “tapete de tração” como definido por Sanders (1965).		- A deposição ocorre através de ondas de sedimentação com o material mais grosso depositando primeiro, seguido pelas areias (população II) e silte/argila (população I). deposição de pedregulhos ocorre devido a velocidade do fluxo diminuir abaixo do necessário para manter a pressão dispersiva no tapete de tração, sedimentação direta dos cascalhos suspensos. Por outro lado, as populações I e II seriam suportadas pela turbulência do fluido e pela decantação impedida (hindered settling) e não pela pressão dispersiva.
III Suspensão	- Quando há altas taxas de carga de sedimentação, não há tempo suficiente para o desenvolvimento de uma camada de arraste ou um tapete de tração e a deposição se dá pela sedimentação direta. O depósito formado pela sedimentação direta dessas partículas está entre os pacotes naturais mais difíceis e imprevisíveis de serem avaliados.		

Lowe (1982) comentou também que a deposição da carga em suspensão das correntes de alta densidade deixa uma corrente residual, contendo uma suspensão turbulenta de população de grãos finos que não se depositaram com os sedimentos mais grossos. Esta corrente residual varia desde correntes de baixa densidade até altas concentrações de sedimento finos em suspensão e podem se mover, formando uma corrente de turbidez discreta, similar àquelas desenvolvidas nos fluxos coesivos.

Kneller e Branney (1995) comentaram que, até aquele momento, os modelos posicionais de correntes de alta densidade eram baseados em correntes com regime fortemente não-permanente, ou seja, correntes de turbidez de alta densidade do tipo pulso (*surge-type*), sendo as sucessões turbidíticas, usualmente atribuída à deposição instantânea de areia. Em contrapartida, Kneller e Branney (1995) apresentam um modelo diferenciado considerando as correntes quase-permanentes (*quasi-steady state*), mais especificamente de regime permanente e depletivo, nas quais os grãos são, no mínimo, parcialmente sustentados por outros mecanismos que não só a turbulência.

A formação de arenitos maciços por tais correntes resulta da ausência de mecanismos de tração junto ao leito. Como a existência de tais mecanismos é vinculada à formação de uma interface abrupta entre a corrente e o substrato, deve-se considerar a não ocorrência de grandes discontinuidades de velocidade, de concentração ou de propriedades reológicas junto à base da corrente.

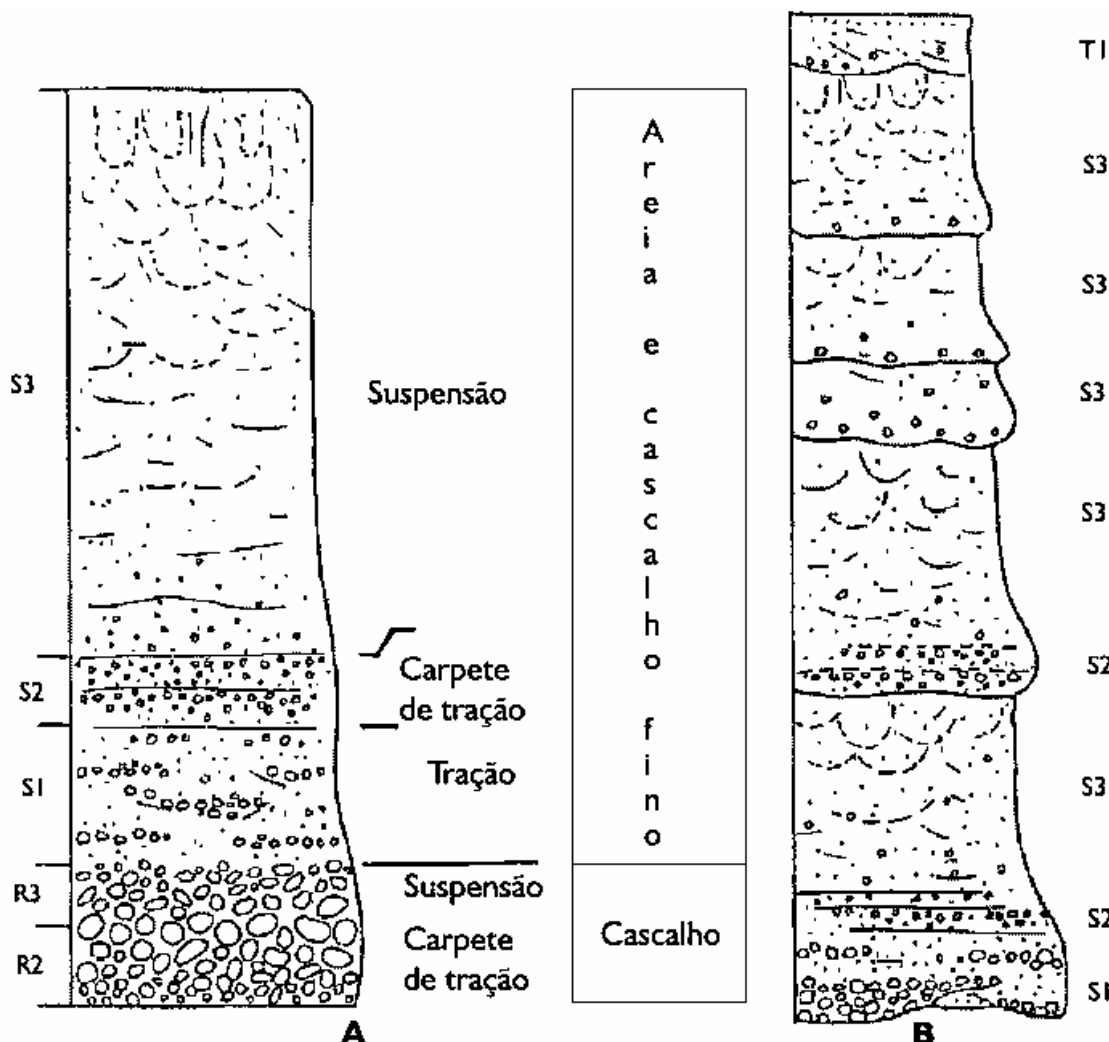


Figura 4.24 Modelos de deposição de Lowe (1982): a) corrente de alta densidade cascalhosa e; b) corrente de alta densidade arenosa.

Apesar disso, observa-se, na estrutura da corrente, a existência de gradientes de velocidades (decrecente em direção à base) e de concentrações (crescente em direção à base). Observa-se também, por tratar-se de um fluxo depletivo, a ocorrência de um movimento dos grãos em direção à parte inferior da corrente. Assim, essa porção acaba por causar um processo de deposição contínuo, dando origem a estruturas maciças, as quais resultam da ausência de mecanismos trativos no fluxo. A manutenção desse processo é garantida pelo fato da ocorrência simultânea de uma realimentação constante da parte inferior da corrente através da inserção de material proveniente das camadas superiores. Dessa forma, a espessura do

depósito continuará a crescer, enquanto o corpo da corrente continuar a passar, ou seja, a deposição se dará de uma maneira incremental, dando origem a arenitos espessos e desprovidos de formas de leito.

Numa análise do processo numa escala mais abrangente, Stow (1994) apresentou um esquema do fenômeno (figura 4.25), desde os processos de inicialização até o mecanismo deposicional envolvido com suas características distintas.

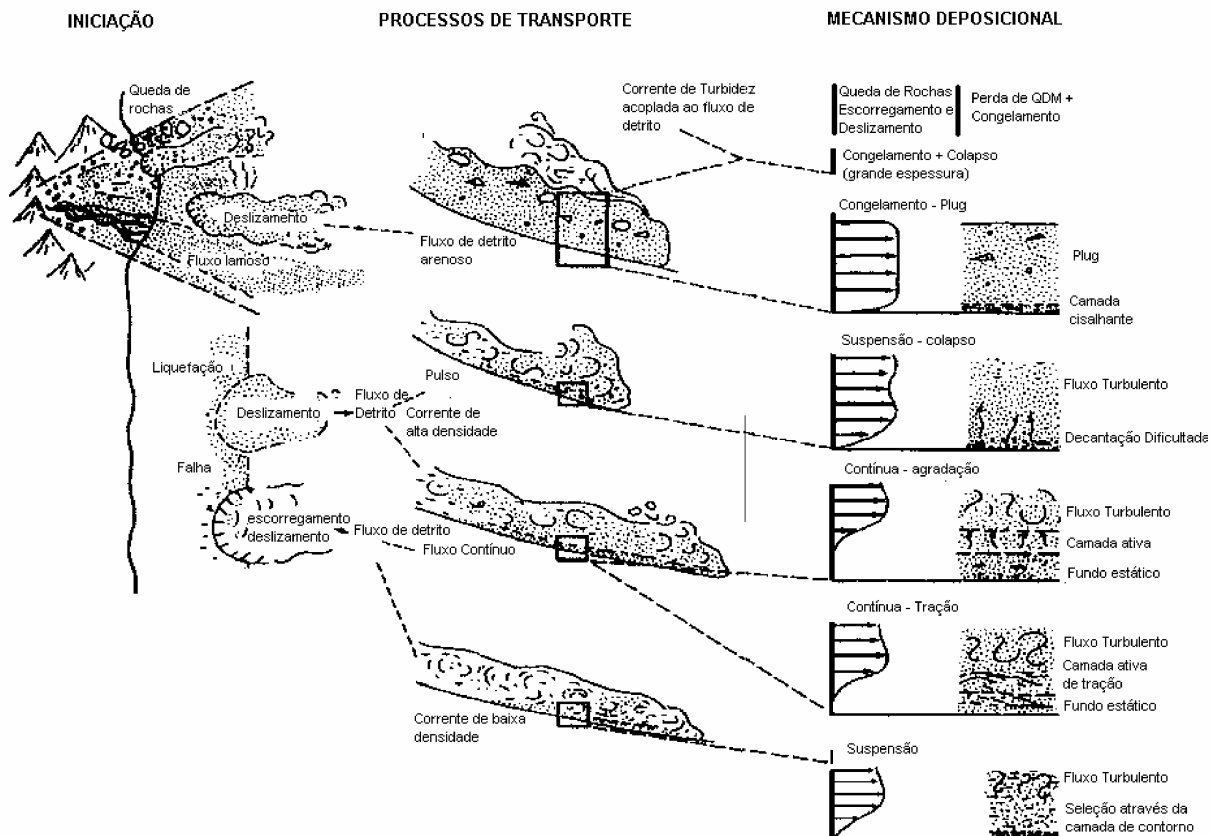


Figura 4.25 Processos de inicialização, transporte e mecanismo deposicional dos fluxos gravitacionais (Fonte: modificado de Stow, 1994).

Mutti et al. (1999) apresentaram um modelo deposicional de fluxo bipartido (alta e baixa densidade) baseado na eficiência do escoamento. Segundo os autores, o conceito de eficiência, ou seja, habilidade do fluxo em carregar o sedimento ao longo do caminho, foi expandido e incorporado ao conceito de habilidade do fluxo em segregar suas populações de grãos (ondas de sedimentação) ao longo do caminho, formando depósitos distintos (figura 4.26).

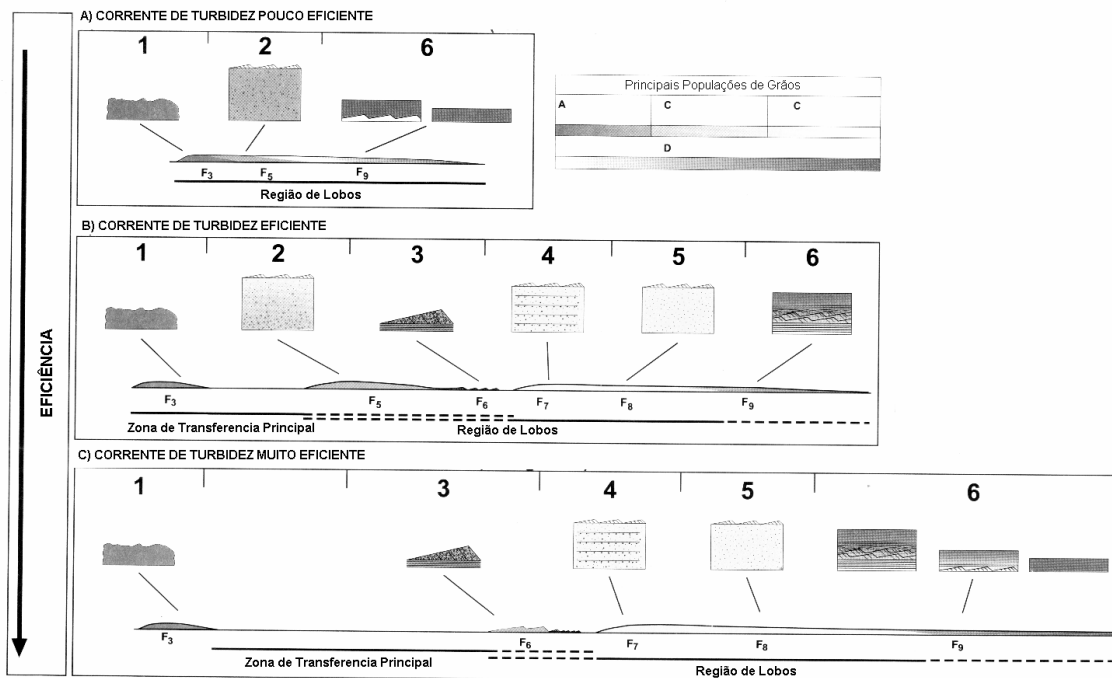


Figura 4.26 Modelo deposicional baseado na eficiência do fluxo (Fonte: Mutti et al., 1999).

Na última década, foram criados modelos deposicionais que englobam os processos intermediários entre as correntes de turbidez e os fluxos de detritos.

Lowe e Guy (2000) chamaram esses depósitos intermediários de fluxos lamosos (*slurry flows*, referido no cap 4.1) que seriam gerados por um fluxo transicional de areia e ricos em argila, onde o suporte dos grãos é dado tanto pela turbulência quanto pela coesão. O depósito gerado conteria então arenitos maciços com camadas de areia no interior de uma matriz lamosa e a estrutura sedimentar do depósito poderia ser caracterizada por apresentar sete divisões, denominadas pela letra M1 até M7: (M1) corrente estruturada e divisões maciças; (M2) unidades bandadas; (M3) arenito levemente (tenuamente) laminado; (M4) divisões com estruturas em prato; (M5) unidades plano-laminadas e microbandadas de granulação fina; (M6) camadas mistas laminadas e microbandeadas; (M7) escape de fluidos na vertical.

Haughton et al (2003) apresentaram o conceito de “*linked debrite*” ou fluxo híbrido (*co-genetic*) que são pilhas de depósitos oriundos de um fluxo gravitacional híbrido de areia e lama. Esses depósitos estão intimamente ligados com a camada de areia na sua base, uma vez que ele alcança longas distâncias devido à incorporação de água e sedimentos do fundo arenoso (carpete de baixa fricção de areia liquefeitas). Essa ligação é um componente importante de muitos depósitos turbidíticos ricos em areia e ricos em areia-lama. Talling et al (2004) discutem a formação deste tipo de depósito apresentando diversas hipóteses para a origem e desenvolvimento dos mesmos.

Gani (2004) apresenta um modelo deposicional mais simplificado para esses fluxos transitórios, o qual se baseia na reologia dos fluidos. A figura 4.27 ilustra esse modelo com as três subdivisões de depósito: debrito (*debrites*), caracterizado por depósitos maciços com presença de areia, argila e clastos no seu interior; os depósitos turbidíticos (*turbidite*), caracterizados pelos depósitos gradados normalmente, seguindo o modelo de Bouma; e os densitos (*densite*), que seriam uma transição entre esses dois tipos de material, com a influência de argila na matriz do depósito. Todos esses três tipos de depósitos fariam parte dos depósitos de fluxos gravitacionais de sedimentos (*gravites*).

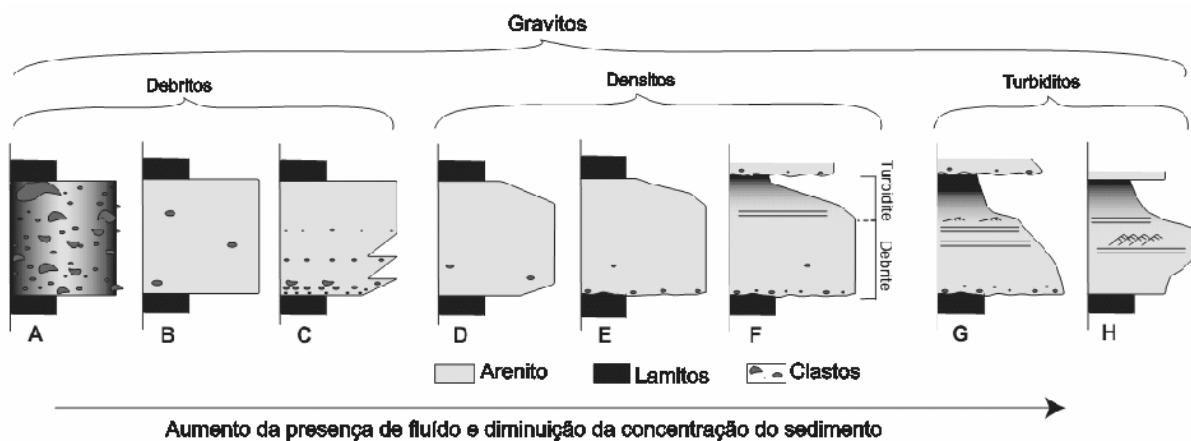


Figura 4.27 Modelo deposicional proposto por Gani (2004).

4.4 MODELAGEM FÍSICA DE CORRENTES DE TURBIDEZ

4.4.1 Introdução

A utilização das técnicas de modelagem tem como objetivo, independente da ciência que a utiliza, de analisar os meios de prever o comportamento dos sistemas físicos. Em outras palavras, de criar uma visão sobre um determinado assunto. Esses modelos são as expressões de nossas teorias, sendo os princípios físicos, químicos e biológicos, os fatores de diferenciação entre eles.

Dentro de todas as técnicas de modelagem possíveis, a modelagem física, que significa estudar experimentalmente os processos em escala reduzida ou natural, permite que as observações efetuadas em um outro sistema - o modelo - se desenvolvam de modo semelhante ao sistema cujo comportamento se quer prever - o protótipo - tentando explicar, desta maneira, os fenômenos que ocorrem na natureza (Motta, 1972).

Como principal motivação na utilização desta técnica, Middleton (1970) destacou que a vantagem da investigação experimental é que o processo pode ser diretamente observado e que as condições do experimento podem ser controladas diretamente pelo investigador e permitem repetições. Assim, um simples fator pode ser estudado, enquanto que os outros podem ser mantidos constantes. As desvantagens do método experimental são a preocupação com os problemas decorrentes da redução de escalas física e temporal e a dificuldade de reproduzir no laboratório todos os fatores complexos que ocorrem no protótipo.

Uma vez que o modelo reduzido é calibrado, torna-se um meio para examinar os efeitos dos processos que não podem ser reduzidos em escala; para simular outros cenários possíveis, bem como para verificar os efeitos das distorções. Porém, a chave para a interpretação do modelo reside em realizar a análise dos experimentos à luz da teoria física que condiciona o fenômeno modelado.

Paola (2000) considerou que, no estudo de processos sedimentares, a modelagem física pode ser considerada especialmente valiosa, pois estes processos usualmente envolvem condições de contorno que não podem ser reconstituídos precisamente, pois há uma extrema dificuldade em monitorar esses processos na natureza e, conseqüentemente, obter dados reais.

Numa revisão sobre fluxos gravitacionais de sedimentos, Middleton (1993) constatou que, apesar do grande número de estudos sobre o comportamento hidrodinâmico dos fluxos gravitacionais, bem como de estudos teóricos de deposição de sedimentos, há relativamente poucos estudos experimentais da deposição dos sedimentos em correntes de turbidez. Esse

número cai substancialmente se considerarmos os trabalhos experimentais que visaram o estudo de correntes de turbidez de alta densidade.

4.4.2 Trabalhos experimentais pioneiros

Os primeiros estudos sobre modelagem física de correntes de turbidez ocorreram por volta da década de 30 e apresentavam uma abordagem mais especulativa e qualitativa sobre o processo analisado.

O experimento pioneiro de Kuenen (1937) visava verificar a hipótese de que as correntes de turbidez poderiam formar cânions submarinos. Já no início da década de 50, o autor buscou caracterizar as correntes de turbidez de alta densidade de um modo mais qualitativo. Em seu primeiro trabalho sobre correntes de alta densidade, Kuenen (1950) testou uma série de correntes com massa específica acima de 2000 kg/m^3 , buscando verificar a causa de formação dos fluxos (se por um rompimento de talude lamoso ou devido a grandes volumes em suspensão), estudar as características da corrente, como velocidade, densidade e, principalmente, a competência do escoamento, além de tentar extrapolar esses resultados para uso na análise dos cânions submarinos.

Concomitante a esse trabalho, Kuenen e Migliorini (1950) uniram a experiência de laboratório e de campo, apresentando o clássico trabalho que expôs a ideia de que as camadas arenosas com gradação normal eram formadas pela ação de correntes de turbidez. Em duas séries de ensaios, em dois canais distintos: um de pequeno porte ($2,0 \times 0,5 \times 0,5 \text{ m}$) e outro de grande porte ($31,0 \times 0,6 \times 0,6 \text{ m}$), foram geradas correntes sucessivas com o controle dos seguintes parâmetros: tipo e granulometria do material, densidade da corrente, velocidade de avanço, espessura e granulometria dos depósitos. Nestes ensaios, eles obtiveram a formação de depósitos gradados, tanto na vertical quanto na horizontal, e a formação de estruturas sedimentares, além de verificarem o poder erosivo destes fluxos.

No ano seguinte, Kuenen (1951) buscou caracterizar as correntes de alta densidade para aplicar ao estudo de cânions submarinos. Foram três tipos de aparatos experimentais, os dois já descritos anteriormente e mais um tanque para simulação de um cânion submarino simplificado ($5,0 \times 3,0 \times 0,5 \text{ m}$), visando avaliar a chegada de uma corrente numa zona não-confinada, no caso a bacia. Ele investigou as propriedades hidrodinâmicas do fluxo, a velocidade de queda de grãos de areia, suspensões de argilas e argila/areia, as propriedades reológicas da suspensão, além da influência da salinidade nos experimentos. Ele buscava distinguir, também, os depósitos formados pelas correntes de turbidez dos outros processos de sedimentação.

Middleton (1966b, 1966c e 1967) apresentou uma série de artigos onde buscou compreender a dinâmica do escoamento das correntes de turbidez. No primeiro trabalho, ele enfocou a cabeça da corrente; no segundo, a uniformidade do fluxo e, no terceiro, a deposição de sedimentos. Nesses três trabalhos, destaca-se o enfoque mais quantitativo, como o controle sobre os parâmetros adotados, no caso: concentração inicial dos sedimentos, tamanho dos grãos, dimensões do depósito gerado e grau de seleção dos sedimentos ao longo do depósito.

Após esses trabalhos pioneiros, houve uma grande lacuna no estudo experimental de correntes de alta densidade. Os trabalhos da década de 70 se centralizaram no estudo hidrodinâmico de correntes conservativas e apenas alguns trabalhos esparsos foram publicados. Nas últimas décadas houve uma retomada nos estudos em modelos físicos, especialmente pela melhoria dos equipamentos/instrumentos utilizados. Ravenne e Beghin (1983), Postma et al. (1988), Mohrig et al (1999), Marr et al, (2001), Mohrig e Marr (2003) e Baas et al. (2004) são alguns autores que trabalharam com o tema.

4.4.3 Efeitos de escala

Uma das maneiras da modelagem física reproduzir em laboratório os fenômenos que acontecem na natureza é garantindo que o comportamento do processo, com relação a sua geometria, cinemática e dinâmica, apresente alguma relação de escala com o fenômeno natural. Em outras palavras, que o fluxo se comporte de maneira semelhante (teoria da semelhança). Motta (1972) destacou dois objetivos desta teoria: a) estabelecer as relações de transferência entre modelos e protótipos; b) estabelecer o tipo de relação entre as diversas grandezas intervenientes em qualquer fenômeno físico, a fim de pesquisar sistematicamente quais os dados mais significativos no processo.

Para isso, a relação de escalas adotadas na simulação é fundamental para a correta representação do fenômeno natural.

A condição ideal da simulação física é representar o fenômeno a ser estudado em seu tamanho natural, o que corresponde a uma escala de 1:1. Para alguns fenômenos físicos isso é possível, mas quando se trata de correntes de turbidez isso se torna inviável, pois é grande a magnitude do processo na natureza (p.ex. distância percorrida por esses fluxos são de dezenas de quilômetros), o que implicaria em modelos de dimensões enormes.

Sendo assim, as simulações físicas de correntes de turbidez realizadas em laboratórios são sempre modelos em escalas reduzidas, com a utilização da teoria referida acima (usualmente modelos baseados no número de Froude densimétrico). Essa redução de escalas implica também em algumas simplificações e na utilização de distorções que devem ser criteriosamente avaliadas quanto ao resultado gerado. Ainda, um último tipo de modelo que

pode ser utilizado é o modelo análogo, onde o processo é estudado através de um fenômeno diferente, porém que representa analogamente aquilo que se deseja estudar. Peakall et al (1996) apresenta uma relação destes tipos de modelo, considerando o ganho de qualidade da resposta do modelo versus o tamanho do modelo e/ou escala de tempo (figura 4.28).

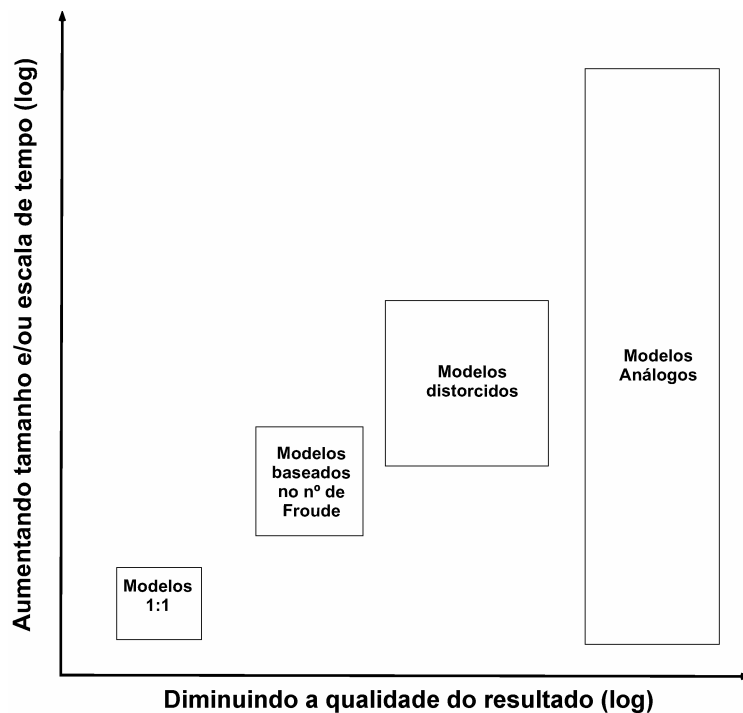


Figura 4.28 Esquema apresentando a relação dos tipos de modelo, considerando o ganho de qualidade da resposta versus o tamanho do modelo e/ou escala de tempo (Fonte: Peakall et al., 1996)

Kneller e Buckee (2000) destacaram que a vantagem de utilizar modelos físicos é contrabalançada pela dificuldade apresentada nas simplificações apresentadas nos experimentos.

Middleton (1967) afirmou que a quantificação dos processos envolvendo erosão, transporte e deposição de sedimentos, nos modelos físicos, sempre apresenta uma série de dificuldades relacionadas ao entendimento e à quantificação da interação entre os sistemas: fluido e transporte de sedimento, dificultando uma completa semelhança entre os processos reais e simulados.

Considerando os aspectos dinâmicos da corrente, muitos estudos utilizaram sal para criar a diferença de densidade e estudar a sua cinemática e geometria, neles destacando-se Middleton (1966b), Simpson (1972), Simpson e Britter (1979), mas, nesses casos, os processos de erosão e deposição são completamente negligenciáveis (Kneller e Buckee, 2000). Já outros autores (Middleton 1966; Laval et al., 1988; Glasdtone et al., 1998; e Dücker et al., 2007) utilizam o sal para representar a porção fina do material (argila e silte) na

dinâmica de correntes de turbidez. Kneller e Buckee (2000) comentam que essas simulações com sal são dinamicamente similares às correntes de turbidez de grãos finos, enquanto que para correntes de turbidez de grãos grossos, a variação vertical da densidade é completamente diferente.

Middleton (1967) comentou que para estudar os processos de deposição em laboratório é necessário utilizar sedimentos relativamente grossos, pois o comportamento das partículas finas (argilas) é fortemente influenciado pelo seu pequeno tamanho em relação à espessura da camada limite laminar; pelas suas propriedades de coesão, por apresentarem forças eletrostáticas entre os grãos e que, quando depositadas, ficam sujeitos a forças de capilaridade. Nesse sentido, Kuenen (1951) sugeriu que as simulações deveriam ser realizadas num tanque com água salgada para simular uma condição igual à natureza, pois o comportamento da fração argila em certas suspensões, como a viscosidade e tixotropia, pode ser alterado significativamente pela adição de sal marinho, ocasionando uma diferença na deposição. Em águas limpas, a deposição de argila seria lenta e em água salgada a deposição seria rápida.

Outra possibilidade de simulação é utilizar sedimentos com uma massa específica menor do que a do protótipo, o que corresponde, em escala, à utilização de grãos maiores na simulação no modelo. Isso ameniza o problema da utilização de partículas muito finas, porém aumenta a concentração do sedimento na mistura. Esta troca entre concentração e tamanho do grão afeta o comportamento das partículas, que não representam o fiel comportamento da corrente (Middleton, 1966a). Para um estudo de fluxos altamente concentrados, essa possibilidade de simulação é recomendável (Middleton, 1966a; Middleton, 1967; Kneller e Buckee, 2000).

Há alguns autores, porém, (Alexander e Morris, 1994, Alexander e Mulder, 2002 e outros) que empregam nos modelos sedimentos mais densos que o do protótipo (no caso quartzo), como “*silicon carbide*” (carburundum), e compensam o aumento da densidade da partícula, utilizando uma faixa de valores de diâmetros correspondentes às frações finas, entre silte e areia muito fina. Com isto, estes modelos fornecem apenas informações qualitativas.

Middleton (1967) comentou que muitas das estruturas associadas com os turbiditos podem ser reproduzidas em experimentos de corrente de turbidez, sendo que deverá haver estudos mais cuidadosos a esse respeito.

Alexander e Mulder (2002) comentaram também que os resultados de laboratório têm muitas implicações para a interpretação dos depósitos naturais, mas devido aos problemas de escala, outros experimentos adicionais em configurações experimentais maiores são necessários.

Os experimentos que são realizados sem alguma preocupação de escala, apresentam um resultado meramente qualitativo ou relativo a certas condições de contorno empregadas, ficando difícil a extrapolação destes resultados para explicar o comportamento da natureza. Por outro lado, a utilização de modelos com escalas distorcidas pode ser a única maneira de reproduzir um parâmetro isolado do processo, porém a extrapolação para o fenômeno natural deverá ser realizada com cuidado (Kneller e Buckee, 2000).

4.4.4 Operacionalização de modelos físicos

A realização de simulações de correntes de alta densidade visa a reprodução dos seus processos de inicialização, transporte e deposição, sendo o aparato físico e as técnicas (metodologias) de modelagem empregadas, os meios para que isso se realize. Quanto menos simplificações forem adotadas, mais confiável será a reprodução dos processos no laboratório.

4.4.4.1 Tipos de modelos

Independente das características específicas de cada estudo realizado pelos diversos pesquisadores em correntes de turbidez, verifica-se que os tipos de modelos utilizados nos diversos centros de pesquisas estão incluídos em quatro grupos:

a) Modelos tipo canal

Generalizando, os modelos tipo canal se caracterizam por possuir uma dimensão maior que as demais (forma alongada), mas em termos de capacidade volumétrica são, geralmente, pequenos. Sua principal vantagem é que os canais que conduzem as correntes são construídos em materiais transparentes permitindo uma melhor visualização do fenômeno e são mais fáceis de operacionalizar. Sua principal desvantagem, é que são os modelos físicos mais simplificados e que possuem as piores condições de escala, muitas vezes não possuindo qualquer semelhança.

Apesar dos primeiros trabalhos realizados nestes modelos enfocarem a deposição de sedimentos (Kuenen, 1937; Kuenen e Migliorini, 1950; Kuenen, 1951), eles foram mais utilizados, até a década de 70, para a caracterização geométrica e dinâmica das correntes de turbidez, mais especificamente da sua cabeça (Middleton 1966b e 1966c; Simpson, 1972; Simpson e Britter, 1979 e outros).

A partir da década de 80, com o avanço da tecnologia, esses modelos foram utilizados para complementar os estudos anteriores, incluindo também o estudo detalhado e preciso dos depósitos, como: a estrutura interna (Postma et al., 1988; Ávila et al., 2002 e

Ávila et al., 2003); a orientação - fábrica/textura dos grãos - (Sakai et al., 2003) e o corpo da corrente (McCaffrey et al., 2003 e outros), além de outros tipos diferentes tipos de resultados.

b) Modelos tipo canal e/ou bacia

Os modelos tipo canal e/ou bacia se caracterizam por possuírem, na maioria dos casos, grande capacidade volumétrica. Sua principal característica é a representação tridimensional do fenômeno sem simplificações e sua principal desvantagem é sua difícil operacionalização e visualização dos resultados. Normalmente, são encontrados dois tipos de configuração para estes modelos:

- grande cuba, representando somente a bacia abissal e possuindo uma fonte pontual de sedimentos que simplifica a região canalizada a jusante do sistema. Esses modelos são utilizados para verificar o comportamento da corrente nestes ambientes, com o seu principal enfoque na formação dos lobos de deposição. Na literatura são encontrados poucos trabalhos destacando-se os de Kuenen (1951), Luthi (1981), Ouchi et al. (1985), Parsons et al. (2002) e Guirro (2008);

- talude/cânion, representando um canal ligado à bacia abissal. Esses tipos de modelos são mais recentes e agregam dois ambientes do sistema deposicional, uma zona de transferência de sedimentos (região canalizada) e uma zona de deposição (zona não canalizada), visando reduzir as simplificações, aumentando a área de abrangência da visualização do processo. Alexander e Morris (1994), Manica (2002), Del Rey et al. (2006), Maestri et al (2007) e Baas et al. (2004) apresentam trabalhos que utilizaram esse tipo de configuração.

c) Modelos tridimensionais de grande porte com efeitos de subsidência.

Paola (2000) destacou que uma das dificuldades da experimentação em estratigrafia é que não tinha sido incorporado, aos modelos, o efeito de variação espacial da subsidência. A partir do final da década de 90, uma nova concepção de modelos foi utilizada para a inclusão dessa variação nos experimentos físicos. Desta forma, foram concebidos modelos de grande porte (grande capacidade volumétrica) com um fundo falso ajustável ao longo do ensaio, normalmente compostos por diversas células (blocos) ajustáveis individualmente no sentido vertical que moldam a topografia desejada.

Atualmente, existem três modelos deste tipo: o “*Jurassic Tank*”, localizado no laboratório de Saint Anthony Falls (Universidade do Minnesota) – USA, possuindo dimensões de 13,0 x 6,5 x 1,3 m; o “*Euro Tank*” localizado na Universidade de Utrecht – Holanda com dimensões de: 13,0 x 6,5 x 1,3 m e o “Simulador de fluxos de alta densidade”

localizado no Neced com 13,0 x 20,0 x 3,0 m. Sua principal vantagem é a possibilidade de simular os efeitos da subsidência, da variação do nível do mar (eustasia), de simular diversos eventos sucessivos, além de reproduzir eventos numa grande escala de tempo.

d) Modelos em escala reduzida

Os modelos de escala reduzida, são aqueles onde se utilizam os conceitos da teoria da semelhança e se reproduz, em escala, em laboratório, um ambiente natural.

Na literatura não são encontrados trabalhos detalhando esse tipo de modelo. Baas et al (2006) e Manica et al (2006) são exemplos de modelos reduzidos em escala. Uma razão forte para isso é o valor econômico agregado a este tipo de pesquisa, uma vez que o produto final destes modelos é o entendimento da formação das reservas de hidrocarbonetos. Assim, os níveis de confidencialidade destas pesquisas impedem sua publicação.

4.4.4.2 Metodologias de ensaios

Uma das principais dificuldades encontradas pelos pesquisadores na simulação é ajustar a metodologia para que os ensaios se comportem da maneira desejada. Sendo assim, a metodologia empregada na simulação de correntes de turbidez pode ser dividida em relação aos seguintes aspectos:

a) Quanto ao tipo de inicialização

Normalmente, podemos simplificar o mecanismo de iniciação das correntes de densidade não conservativas (correntes de turbidez), de duas maneiras: pela remobilização de um volume limitado de material que tem sua duração quase instantânea (onda solitária), ou ainda, por uma grande quantidade de material distribuído ao longo do tempo, caracterizado por uma alimentação contínua de material.

Nos modelos físicos estes dois mecanismos são frequentemente reproduzidos em experimentos utilizando duas técnicas:

- volume inicial fixo (pulso), onde o canal é normalmente dividido em duas seções por uma comporta delgada. De um lado da comporta fica o fluido denso e do outro o fluido ambiente. Tão logo a comporta é retirada, o fluido denso começa a formar a corrente e uma contra corrente do fluido ambiente flui na direção oposta (Simpson, 1997).

- fluxo contínuo de material, onde o fluido mais denso é normalmente preparado num tanque auxiliar e é injetado, pontualmente, no canal, garantindo um suprimento constante de material durante a execução do ensaio.

Huppert e Simpson (1980), Laval et al. (1988), Alexander e Morris (1994), Middleton e Neal (1989) e Fabian (2002) são exemplos de autores que adotaram o mecanismo de

iniciação através de volume inicial fixo. A vantagem desse método é sua relativa simplicidade, permitindo a possibilidade de grande flexibilidade nos experimentos ilustrando uma grande faixa de correntes de densidade.

Britter e Linden (1980), Luthi (1981), Bursik e Woods (2000), Ávila et al. (2002), Manica et al. (2005) Del Rey et al. (2006) e Ducker et al. (2007) são exemplos de trabalhos que utilizaram a técnica de fluxo contínuo. Este mecanismo tem a vantagem da não ocorrência do contra fluxo causado pela entrada do fluido mais denso no fluido ambiente.

b) Quanto à conservação de massa

As correntes de turbidez foram simuladas até então, através de dois tipos: as conservativas - formadas principalmente por uma mistura de água e sal - e não conservativas - formadas por uma mistura de água e sedimento (ver item 4.3). Obviamente, que as correntes conservativas são utilizadas para simular e verificar condições geométricas e, principalmente, dinâmicas das correntes de turbidez, imaginando-se que o comportamento é similar ao das correntes naturais. Já com as correntes não-conservativas, os processos de deposição podem ser visualizados e interpretados. A tabela 4.9 apresenta alguns trabalhos com estes tipos de correntes.

Tabela 4.9 Alguns estudos experimentais com correntes de densidade.

Conservativas		Não Conservativa		Ambas	
<i>Autor(es)</i>	<i>Ano</i>	<i>Autor(es)</i>	<i>Ano</i>	<i>Autor(es)</i>	<i>Ano</i>
Ellison e Turner	1959	Kuenen e Migliorini	1950	Middleton	1966
Simpson	1972	Kuenen	1950		
Britter e Simpson	1978	Middleton	1967	Laval	1988
Simpson e Britter	1979	Luthi	1981		
Huppert e Simpson	1980	Postma et al.	1988	Garcia e Parker	1993
Bonnecaze et al.	1993	Garcia	1994		
Glasdstone et al	1998	Alexander e Mulder	2002	Ducker	2007
Fabian	2002	Avila et al.	2003		

A corrente conservativa apresenta uma certa vantagem ou facilidade de operacionalização do ensaio, uma vez que, após preparar a mistura que é utilizada para formar a corrente, forma-se uma mistura diluída entre água e sal, que se preserva até o momento de ensaio, facilitando a colocação deste material nos compartimentos adequados a simulação. O único cuidado deve ser relacionado à quantidade de material, no caso sal, que é utilizada para se atingir a densidade de ensaio desejada. Como não há material depositado, não é necessária a coleta de material, o que facilita também os processos de limpeza e de reutilização do modelo num único dia.

Já para as correntes não conservativas, existem algumas etapas preliminares de preparação de material sedimentar a ser empregado na simulação que deve ser realizada, como, por exemplo, a determinação da densidade do material sedimentar; da faixa granulométrica; pesagem da quantidade do material e verificação da presença de impurezas agregadas a estes materiais.

Para evitar que o material se deposite no recipiente/reservatório, antes mesmo do início do ensaio, é necessário utilizar um sistema de agitação. O tempo total de ensaio também é muito maior, pois o material precisa depositar/decantar totalmente para que a água do canal seja drenada, o que pode levar de horas a dias, dependendo do modelo utilizado.

c) Quanto à sucessão de eventos

Uma outra característica da metodologia empregada nos ensaios diz respeito à quantidade de eventos realizados numa única simulação. Com relação a isso, há três possibilidades de simulação (ver Ávila et al, 2003): *eventos simples*: quando apenas um evento é preparado, simulado e analisado o seu depósito; *eventos sucessivos*: quando são simulados dois ou mais eventos sucessivamente em um mesmo ensaio, sem que o material da corrente anterior tenha se depositado totalmente, reproduzindo assim, dois eventos em uma etapa de tempo muito próximo; *eventos consecutivos*: quando são simulados dois ou mais eventos num mesmo ensaio, após todo o material da corrente anterior tenha se depositado totalmente, reproduzindo assim, dois eventos com grande intervalo de tempo entre eles.

Na literatura, encontram-se esses tipos de simulação, desde os trabalhos pioneiros de Kuenen (1937, 1950, 1951), sendo que o primeiro tipo de simulação (evento simples) foi mais utilizado até a década de 90, a partir daí, mais atenção foi dada à formação de estratos (pacotes) sedimentares, fazendo com que os dois outros tipos de simulação se tornassem mais usuais.

4.4.4.3 Instrumentação utilizada

Um dos fatores mais importantes da modelagem física é a instrumentação dos modelos, ou seja, a utilização de determinados equipamentos/instrumentos que permitam a obtenção dos dados para a futura avaliação e interpretação. Quanto melhor for esta instrumentação melhor será o resultado extraído do modelo.

Tradicionalmente, no mínimo, os instrumentos/equipamentos utilizados pela maioria dos pesquisadores são: uma câmera fotográfica; uma câmera de vídeo e análise granulométrica por peneiramento do material depositado, o quais permitem gerar dados para as avaliações geométrica, dinâmica e deposicional da corrente.

Porém, ao longo dos anos, o avanço tecnológico tem permitido que cada vez mais se extraiam diferentes tipos de informações, em um mesmo ensaio, bem como tem permitido que se estudem fatores que anteriormente não eram estudados.

As medidas de velocidade do corpo da corrente eram realizadas utilizando métodos intrusivos, como o uso de micromolinetes, que perturbam a corrente descaracterizando-a. Para evitar isso, Kneller et al. (1999), Best et al. (2001) e McCaffrey et al. (2003) apresentaram a utilização de equipamentos não intrusivos, como Anemômetro Doppler a Laser, em combinação com *Index Refractive (IR) - acoustic doppler velocimetry (ADV)* e *Ultrasonic Doppler Velocimetry Profiler (UDVP)* para medir as características da corrente ao longo do tempo, como a velocidade, bem como a flutuação da turbulência, ambas na cabeça e no corpo da corrente.

Brito et al. (2002), utilizando um ecógrafo de uso médico (scanner de ultrassom), também utilizou um método não invasivo para aprimorar a visualização interna do escoamento e buscar o entendimento da estrutura interna da corrente, conseguindo avaliar a formação e desprendimento de vórtices atrás da cabeça e as linhas de correntes do fluxo. Este equipamento também se mostrou eficiente na avaliação da formação e evolução das formas de leito e espessura dos depósitos. Del Rey et al. (2006), utilizando o mesmo ecógrafo médico, conseguiu avaliar a formação de ondas internas na corrente.

Com relação às medidas de concentração da corrente, ainda há limitações nas técnicas empregadas. Kuenen (1951) utilizando técnicas de sifonagem do material comentou que apenas conseguiu obter dados qualitativos. Brito et al. (2002) também apresentou esse problema. Já Baas et al. (2004) em seus experimentos comentaram que só foi possível sifonar o material em correntes com concentração abaixo de 15% em volume.

Felix et al (2005) utilizaram um medidor de alta concentração por ultrassom (*Ultra high-concentration meter - UHCM*), o qual determina a concentração instantânea que passa entre dois transdutores inseridos no experimento, mas que exige uma calibração prévia com relação ao material a ser empregado.

Outra técnica que foi se desenvolvendo com o passar do tempo é o levantamento batimétrico dos depósitos, onde é possível caracterizá-lo com as medidas de sua espessura, sua forma, seu tamanho e orientação dos elementos morfológicos. Manica (2002) utilizou uma mesa de coordenadas automatizadas e um distanciômetro a laser (resolução 0,1 mm) para medir, somente, a espessura dos depósitos formados. Estudos recentes, em andamento no Neced, já utilizam esse equipamento para a avaliação completa do depósito. Baas et al. (2004) utilizaram um sistema de varredura XYZ automatizado a laser e acústico com resolução de 0,4 mm para caracterizar seus depósitos.

Por fim, a determinação da granulometria do material coletado também evoluiu, com a utilização de aparelhos de medidas a laser, que realiza a análise através de um processo óptico, ao invés do uso do peneiramento tradicional. McCaffrey et al. (2003) e Baas et al. (2004) utilizaram um equipamento deste tipo para a análise dos resultados. Já Rodrigues et al. (2004) apresentaram um estudo comparativo entre os dois métodos, o tradicional e o óptico. Como resultado, ele verificou que o tempo total de amostragem e a discretização do resultado (100 intervalos ao invés de 8 ou 9 intervalos) são as principais vantagens da utilização de equipamentos de medida de granulometria de sedimentos a laser.

5 APARATO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

Nesta seção serão descritos os aparatos experimentais e os equipamentos utilizados para o desenvolvimento do estudo.

5.1 LABORATÓRIO AMBIENTAL “SORBY” DE DINÂMICA DOS FLUIDOS.

O laboratório ambiental “Sorby” de dinâmica dos fluidos (*Sorby Environmental Fluid Dynamics Laboratory* - SEFDL) está localizado na Escola da Terra e do Meio Ambiente (*School of Earth and Environment*) na Universidade de Leeds – Reino Unido. O nome do laboratório homenageia o Geólogo Henry Clifton Sorby (1826 – 1908) que nasceu na região de Yorkshire – Reino Unido – e é considerado um dos pioneiros do estudo sedimentológico.

O laboratório foi fundado em 1988 tendo como objetivos estudar, através da modelagem física, o efeito de causa-consequência dos processos sedimentológicos que ocorrem no ambiente natural, avaliando tanto a hidrodinâmica do fluxo, quanto os processos de deposição e os registros sedimentológicos gerados. Ainda, o laboratório tem como objetivo desenvolver novas técnicas e abordagens para o estudo da dinâmica dos fluidos e de transporte e deposição de sedimentos, destacando-se as técnicas de medição de velocidade por ultrassom, de concentração de sedimento em suspensão e de depósito de fundo, além de um sistema de medida a laser não-invasivo da velocidade e movimentos da partícula dentro do fluxo.

Para a simulação física, o laboratório possui diversos tanques e canais que estão localizados em três ambientes: o laboratório principal, no prédio da Escola da Terra (figuras 5.1a-d), que abriga oito tanques de simulação distintos em várias escalas de tamanho; um pequeno laboratório de sedimentometria e vídeo (figura 5.1f), nesse mesmo prédio, onde ficam instalados os equipamentos para a caracterização dos sedimentos, a caracterização reológica de misturas e o tratamento e edição dos vídeos gerados nos ensaios; e ainda, uma instalação adicional, no Departamento de Geografia, que abriga um modelo de maior porte (figura 5.1e).

Ao longo de seus 18 anos de existência, muitos estudos têm sido desenvolvidos enfocando principalmente os fluxos gravitacionais de sedimentos, o que levou o laboratório a ser, atualmente, um dos mais bem equipados e conceituados no mundo nesta área.

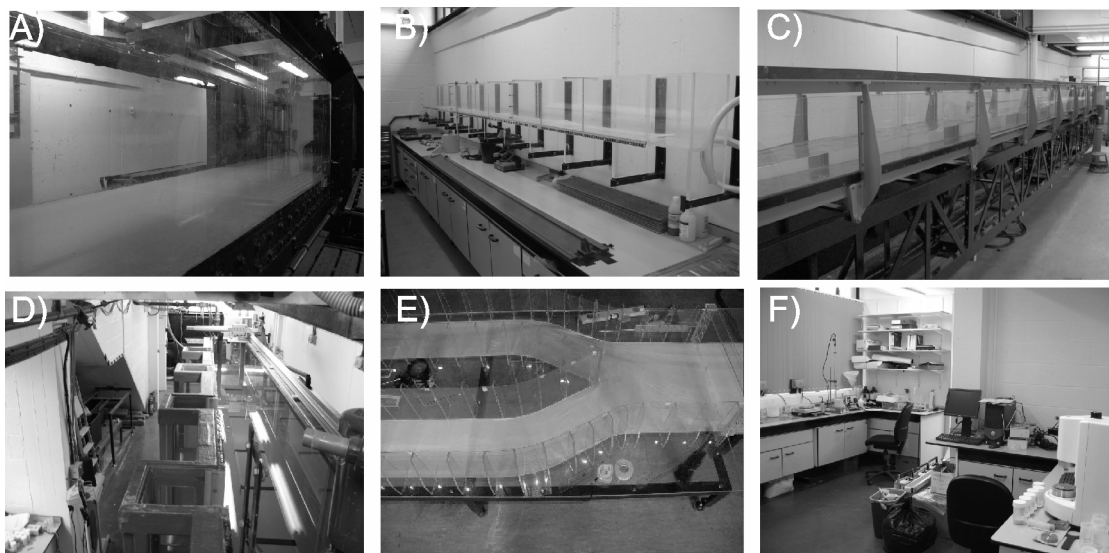


Figura 5.1 Instalações da Universidade de Leeds. a-e) Canais para a simulação física do SEFDL. f) laboratório de sedimentometria.

5.2 SIMULADOR FÍSICO

As simulações experimentais deste estudo foram realizadas numa instalação física composta por um canal de acrílico inserido num tanque fixo de fibra de vidro de dimensão maior.

5.2.1 Tanque bidimensional fixo

O tanque bidimensional fixo de fundo ajustável é composto por uma estrutura de fibra com janelas de vidro ao longo das laterais e nas extremidades do canal. O tanque possui o formato retangular com as seguintes dimensões: 6,00 m de comprimento, 0,50 m de largura e 1,50 m de altura (figura 5.2). No interior deste tanque foi instalado, a 0,50 m do fundo, uma estrutura metálica pivotada com 5,00 m de comprimento, constituindo-se em um fundo falso para o ajuste da declividade do fundo do canal. Acima desse fundo falso havia a zona de visualização de ensaios e, abaixo, uma zona morta que servia para a dispersão do fluxo de sedimentos. Externamente, uma estrutura horizontal da fibra de vidro demarcava esse limite, deixando o tanque com uma altura efetiva de simulação de 1,00 m.

Em uma das laterais do tanque existem três compartimentos auxiliares, com 0,20 m de comprimento e 0,20 m de largura, ao longo de toda a altura do canal (1,50 m), os quais eram utilizados para a instalação de equipamentos, transdutores e sondas (figuras 5.2a-d). Na outra lateral do tanque, quatro janelas de visualizações maiores (1,40 m de comprimento e 1,00 m de altura) permitiam o acompanhamento dos ensaios.



Figura 5.2 Tanque bidimensional fixo de fundo ajustável do SEFDL: a) Vista lateral; b-c) Detalhe do compartimento para instrumentos; d) Detalhe do fundo falso e; e) Vista frontal com o tubo de alimentação de água.

Na parte final do tanque, há uma zona de dispersão com 1,00 m de comprimento, onde estava instalado o dreno de esgotamento do tanque, composta por uma tubulação de PVC (63 mm) conectada no fundo do canal, bem como, a alimentação de água limpa, feita através de uma tubulação de cobre (50 mm), que entrava pela parte superior do canal (junto ao teto) e descia até, praticamente, o fundo do canal (figura 5.2e). Junto ao tubo de alimentação foi instalado um sensor de segurança, que acionava um alarme quando o nível de água ultrapassasse 1,40 m, avisando quando o tanque estava atingindo o seu limite máximo. Esse tanque ainda possuía dois reservatórios auxiliares de mistura de sedimentos com capacidade de 2000 litros cada.

5.2.2 Canal bidimensional de acrílico

Os experimentos eram realizados num canal bidimensional de acrílico, instalado sobre o fundo falso do tanque bidimensional fixo (figura 5.3). Este canal era composto por três seções: a primeira seção era composta por uma cuba retangular com dimensões de 0,57 m de comprimento, 0,47 m de largura e 0,69 m de altura (capacidade total de 165 litros), que constituía o compartimento de mistura do material, o qual estava instalado à montante do tanque, sendo separado da primeira seção por uma comporta removível (0,21 m de largura por 0,70 m de altura), cujo acionamento liberava a formação do fluxo. A segunda e a terceira seções do canal possuíam, respectivamente, 2,00 m e 2,50 m de comprimento, por 0,20 m de largura e 0,50 m de altura, totalizando 4,50 m de extensão. Esse comprimento total coincidia com o fim do fundo falso do tanque fixo, ou seja, ao sair do canal interno, o material do

ensaio fluía para a zona de dispersão e para a zona morta abaixo do fundo falso. Essa divisão em partes era necessária para facilitar o transporte, instalação e remoção deste canal de dentro do tanque bidimensional fixo.

Os instrumentos, usados na aquisição dos dados, eram fixados em suportes específicos na parte superior do canal bidimensional fixo.

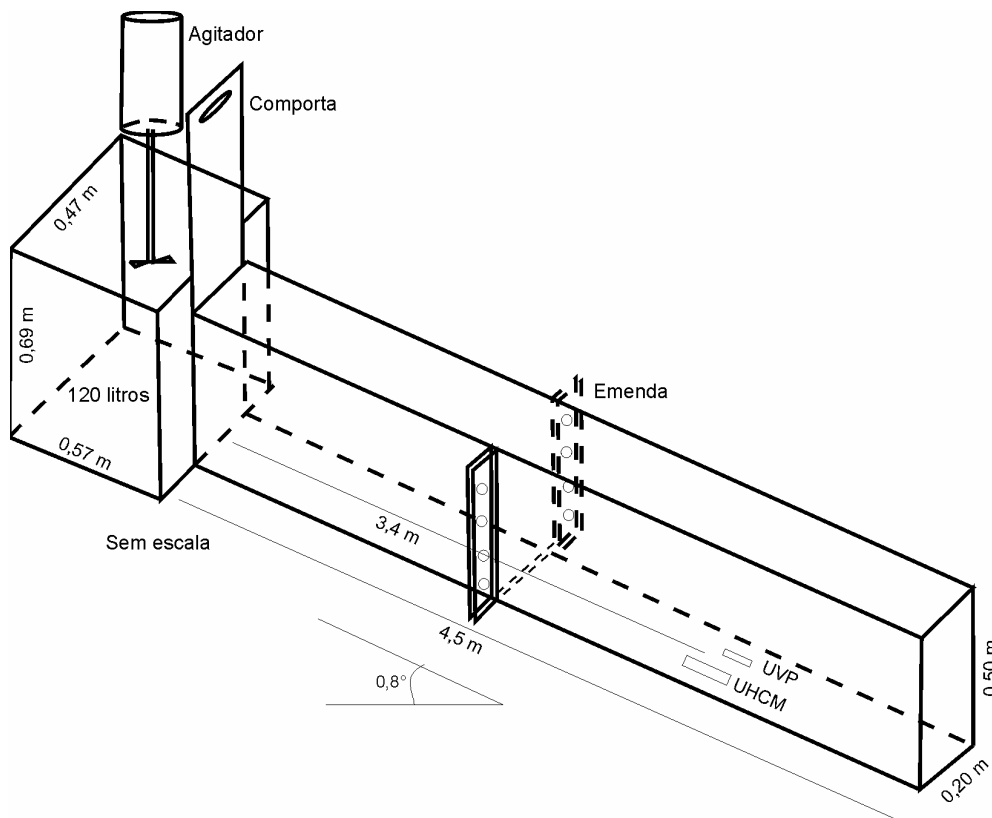


Figura 5.3 Desenho esquemático do canal de acrílico removível instalado dentro do tanque bidimensional.

5.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a aquisição dos dados nos experimentos e para a caracterização do depósito foram utilizados diversos equipamentos que serão apresentados a seguir.

5.3.1 Medidores de alta concentração ultrassônicos - UHCM.

Para a medição da concentração das misturas empregados nos ensaios foram utilizados quatro medidores de alta concentração ultrassônicos (*Ultrasonic High-Concentration Meter - UHCM*), desenvolvidos pela Delft Hydraulics - Holanda - que medem de forma indireta a concentração de uma mistura em até 40% em volume. O equipamento é composto por um console de alimentação, aquisição, processamento e saída de dados e uma sonda de medição conectada por fio, a esse console e posicionada dentro do fluxo a ser medido. As figuras 5.4a, 5.4b e 5.4 c apresentam o equipamento e a sonda de medição.

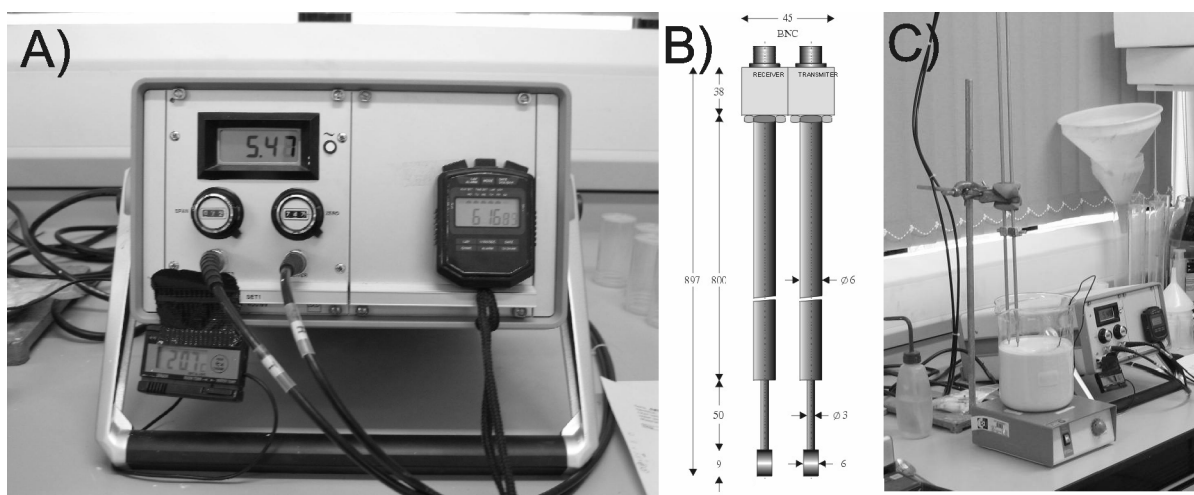


Figura 5.4 Medidor de alta concentração ultrassônico: a) Console; b) Dimensões da sonda e; c) Exemplo de aplicação.

O princípio de funcionamento do medidor de concentração se baseia na atenuação da energia do ultrassom pelas partículas suspensas entre um par de transdutores acústicos (transmissor e receptor), a qual é proporcional à concentração de material sólido que passa entre eles. Quando o transdutor transmissor emite uma energia acústica (ultrassom) na região do volume de controle do equipamento, as partículas presentes no fluido atenuam estas ondas sonoras e o transdutor receptor capta essa atenuação, gerando um sinal elétrico proporcional em volts. Este sinal passa, então, por um processamento interno de forma a ser convertido em variação da voltagem de saída do aparelho em faixa de 0 a 10 volts, que é equivalente à atenuação da energia acústica na faixa de 0 a 40 decibéis.

Para que os valores medidos sejam convertidos em valores de concentração, é necessário realizar uma calibração prévia do equipamento, com o mesmo material utilizado nos experimentos e com valores de concentrações conhecidos, permitindo assim, que seja ajustada uma lei de calibração entre esta concentração e a voltagem de saída do aparelho.

O equipamento ainda possui um software específico de gerenciamento, o Delft-Measure v. 1.02®, que facilitava a interface com o usuário, tanto na configuração dos parâmetros utilizados nos ensaios, como na saída gráfica em tempo real dos resultados.

Nos experimentos, os quatros medidores de concentração foram instalados em série, ou seja, sincronizados de maneira a evitar a interferência de um aparelho sobre o outro no momento da medição. A tabela 5.1 apresenta algumas características técnicas do equipamento.

Tabela 5.1 Características técnicas do medidor de concentração (UHCM).

Característica	Descrição
Fabricante	WL Delft Hydraulics - Holanda
Dimensões do console	0,39 x 0,30 x 0,17 m (C x L x A).
Frequência da sonda	5 MHz
Dimensão do Transdutor	0,096 m
Comp. do Caminho	0,11 m
Comprimento da Sonda	0,90 m
Faixa dinâmica	40 dB
Precisão	0.5 dB
Controle	Zero 0-6 dB - Span 4-40 dB
Saída analógica	Voltagem: 0 - 10 V
Resposta	10 Hz (display 1 Hz)

5.3.2 Medidor de velocidade ultrassônico - UVP

A medição de velocidades nos experimentos foi realizada utilizando um medidor de perfil de velocidades ultrassônico (*Ultrasonic Doppler Velocity Profiler - UVP*) de 2 Mhz, desenvolvido pela Met-Flow S.A – Suíça (figura 5.5a e figura 5.5b). Este equipamento é composto por um console onde são conectados os transdutores que realizam a medição do perfil de velocidades instantâneo no líquido pelo princípio do efeito Doppler.

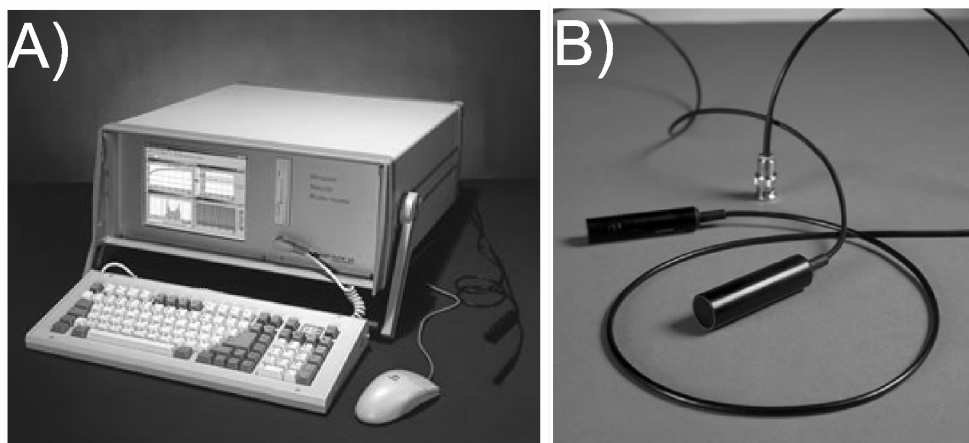


Figura 5.5 a) Medidor de perfil de velocidade ultrassônico e; b) Detalhe do transdutor ultrassônico (direita).

De uma maneira geral, o princípio de funcionamento do equipamento é uma extensão da técnica utilizada em sonar Doppler, onde um transdutor emite pulsos curtos de ultrassom ao longo do eixo de medida no fluxo e, quando esse pulso atinge as partículas presentes no líquido, parte da energia do ultrassom é dispersa e volta como eco (segundo o efeito Doppler). O transdutor, então, passa a ser o receptor deste eco Doppler, medindo o atraso da onda emitida anteriormente. Desta forma, pela modulação do eco e da análise de frequência, o

sistema pode determinar a mudança do efeito Doppler como função do tempo, constituindo o perfil de velocidade no espaço e no tempo (saída do aparelho).

As figuras 5.6a e 5.6b apresentam uma representação do esquema de medição do equipamento, com um detalhe do feixe de ultrassom emitido pelo transdutor (totalizando 128 canais), na direção do eixo de medida do fluxo, com os respectivos parâmetros a serem ajustados em função das características do fluido e do sedimento em estudo.

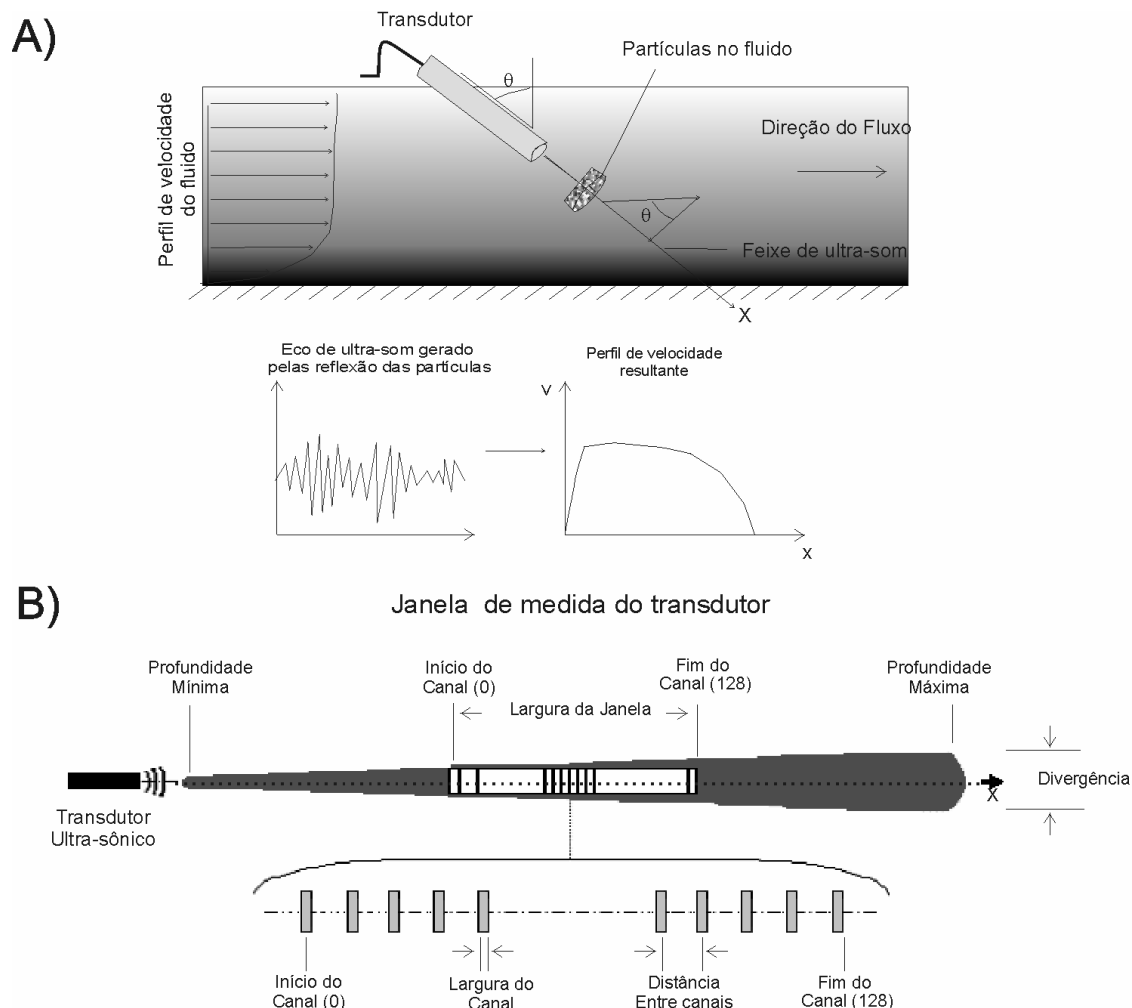


Figura 5.6 a) Esquema de funcionamento do medidor de velocidade (esquerda) e; b) Detalhe do feixe de ultrassom emitido (direita).

O equipamento é dotado de sistema computacional próprio, apresentando um aplicativo de gerenciamento específico “UVP Monitor – versão 3,0” que realiza a interface com o usuário. O aparelho permitia utilizar até 20 transdutores, os quais operavam em seqüência de leituras individuais (ciclos sincronizados) e eram controlados diretamente por esse aplicativo. A tabela 5.2 apresenta algumas características técnicas do medidor de perfil de velocidade ultrassônico.

Tabela 5.2 Características do medidor de perfil de velocidade ultrassônico.

Característica	Descrição
Fabricante	Met Flow S.A – Suíça
Frequência emitida	2 Mhz
Resolução espacial	1,48 mm
Número de canais	128
Distância do canal	Variável, a partir de 0,37 mm
Profundidade de medida	1000 mm
Resolução da velocidade	1/256 da velocidade máxima
Taxa de repetição	8 a 240
Tempo de aquisição	Mínimo de 4 ms por perfil
Dimensões	0,55 x 0,25 x 0,47 m (C x L x A).
Peso	18 kilos

Nos experimentos realizados foram utilizados dois jogos de cinco transdutores padrão, porém, com duas frequências de trabalho, de 2 Mhz e de 4 Mhz, respectivamente. A tabela 5.3 apresenta as características destes transdutores.

Tabela 5.3 Características dos transdutores de medição de velocidade.

Tipo	TN2_10_13	TN4_5_8
Frequência central (Mhz)	2	4
Diâmetro ativo (mm)	10	5
Diâmetro total (mm)	13	8
Comprimento (mm)	60	60
Distância do foco mínimo (mm)	33,7	16,9
Ângulo de divergência	2,2	2,2

5.3.3 Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV

A avaliação das características internas do depósito gerado nos experimentos foi realizada através da utilização de um microscópio eletrônico de varredura (*Scanner Electron Microscopy* - SEM), marca Obducat CamScan™ Séries 4 SEM de 20 kV, do Centro de Microscopia e Espectroscopia de Leeds (*Leeds Electron Microscopy and Spectroscopy Centre* - LEMAS). Este equipamento é utilizado para produzir imagens com alta resolução e ampliação (até 300.000 vezes). Entretanto, as imagens geradas por este tipo de microscópio apresentam um caráter virtual, pois o que é visualizado no monitor do equipamento é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, ao contrário da radiação de luz dos microscópios comuns. As figuras 5.7 a, 5.7b, 5.7c e 5.7d apresentam o equipamento utilizado.



Figura 5.7 Microscópio eletrônico de varredura – MEV: a) Vista geral; b) Vista da célula; c) Console de processamento e; d) Console de saída das imagens.

Basicamente, o princípio de funcionamento do microscópio eletrônico de varredura é emitir um feixe de elétrons, a partir de um filamento capilar de tungstênio (fonte) e mediante a aplicação de uma diferença de potencial entre 0,5 kV a 30 kV (20 kV no equipamento usado). Esse feixe de elétrons gerados passa, então, por lentes condensadoras que reduzem seu diâmetro e direcionam o fluxo até a lente objetiva, que tem o papel de focalizar o feixe sobre a amostra a ser analisada. Logo acima dessa lente objetiva, existem dois estágios de bobinas eletromagnéticas que são responsáveis pela varredura do feixe sobre toda a superfície da amostra (figura 5.8a).

Quando este feixe atinge a amostra, diferentes sinais são gerados e a detecção destes sinais específicos produz a imagem ou a composição do elemento analisado. O feixe interage com a região de incidência da amostra até uma profundidade que pode variar de $\sim 1 \mu\text{m}$ a $\sim 6 \mu\text{m}$, dependendo de sua natureza. Esta região é conhecida por volume de interação, o qual gera os sinais que são detectados e utilizados para a formação da imagem e para micro-análise.

Basicamente, três sinais são detectados: os elétrons secundários, os elétrons retroespalhados e os raios X (figura 5.8b). Elétrons secundários são emitidos pelos átomos que ocupam o topo da superfície e produzem uma imagem pronta para sua interpretação. Os elétrons retroespalhados são o primeiro feixe de elétrons refletidos dos átomos presentes nos sólidos. O contraste da imagem produzido é determinado pelo número atômico do elemento nas amostras. A imagem irá mostrar, portanto, a distribuição das diferentes fases químicas da amostra. Já os raios X são formados pela interação do primeiro feixe de elétrons com os

átomos mais profundos da amostra, que são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida, a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios X.

Ao final, a formação da imagem virtual gerada pelo microscópio consiste em passar para o computador a localização XY do ponto na amostra, com sua intensidade correspondente, determinada pelos detectores dos elétrons secundários e retroespalhados. Assim, o monitor do equipamento apresenta essa varredura, simultaneamente, como resultado final.

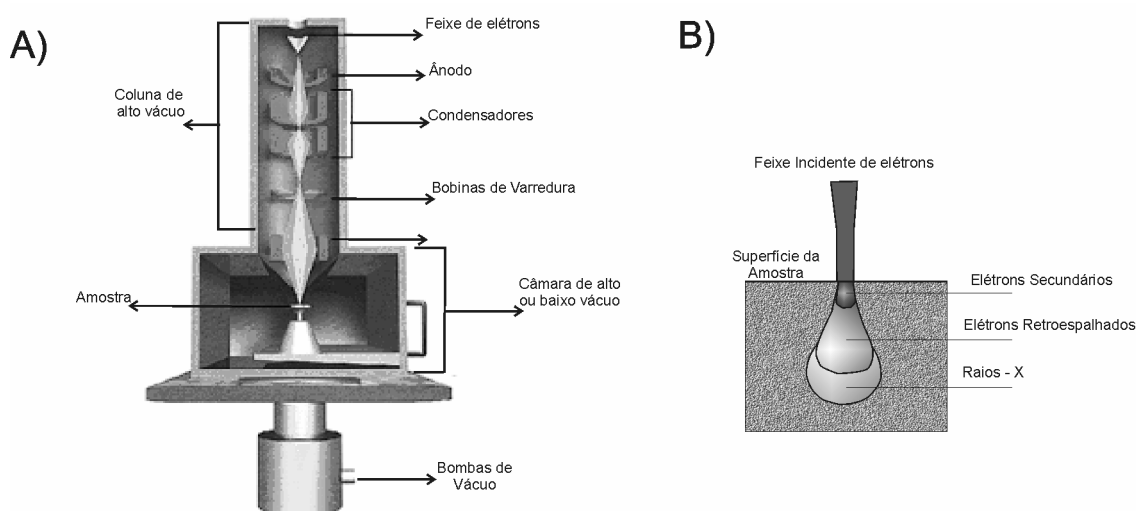


Figura 5.8 a) Sistema de funcionamento do MEV. e; b) Detecção dos diferentes tipos de sinais.

5.3.4 Filmadoras digitais

Para o registro dos vídeos dos ensaios foram utilizadas duas câmeras de vídeo idênticas da marca Sony DCR-VX 2000 (figura 5.9), que possuem três chips CCD (*Charged Coupled Device*), os quais são dispositivos eletrônicos, sensíveis à luz que convertem a energia luminosa em cargas elétricas.



Figura 5.9 Filmadora digital SONY DCR-VX 2000.

Esse sistema varre progressivamente os pixels da imagem, um para cada cor primária, capturando-a com uma melhor qualidade. A tabela 5.4 apresenta algumas características técnicas da câmera.

Tabela 5.4 Características técnicas da filmadora digital SONY DCR-VX 2000.

Característica	Descrição
Marca:	SONY DCR-VX 2000
Abertura da lente:	F: 1.6-2.4
Zoom óptico:	12x
Zoom digital:	48x Precision
Distância focal :	6.0-72.0 mm
Diâmetro do filtro:	58 mm
Focagem:	Automática ou manual
Iluminação mínima:	4 Lux
Exposição:	Manual Dial (24 steps)

5.3.5 Analisador de partículas a laser

A análise granulométrica dos depósitos gerados nos experimentos foi realizada utilizando um analisador de partículas a laser, da marca Malvern Mastersizer 2000 que se caracteriza por medir a distribuição granulométrica dos sedimentos baseado na técnica de difração a laser (figuras 5.10a, 5.10b e 5.10c).



Figura 5.10 Analisador de partículas a laser - Malvern Mastersizer 2000: a) Vista geral. b) Detalhe do sistema de colocação dos grãos e; c) Detalhes da célula de medida.

O princípio de funcionamento do equipamento consiste basicamente na circulação de uma mistura de água e sedimento num circuito fechado, passando por um prisma que recebe a projeção de feixes de raio laser. Quando as partículas passam através de um feixe de laser, elas irão dispersar a luz num ângulo que é diretamente relacionado ao seu tamanho (difração). A intensidade da dispersão também é dependente do tamanho da partícula, tendo uma aproximação com relação a sua área da seção transversal. Uma série de detectores é, então, acionada para captar essa dispersão (luz padrão produzida sobre os mais variados ângulos). Assim, a distribuição granulométrica das partículas é calculada pela comparação de uma amostra padrão de dispersão com um modelo óptico apropriado. Tradicionalmente, dois

modelos diferentes são utilizados: a aproximação de Fraunhofer que se baseia na difração da luz ao redor da partícula e a teoria de Mie que utiliza tanto a difração, quanto a difusão de luz ao redor da partícula (figura 5.11).

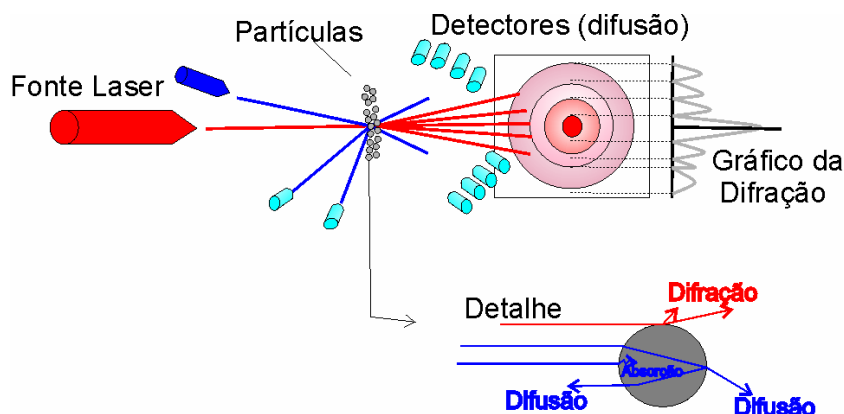


Figura 5.11 Esquema de funcionamento do analisador de partículas a laser.

Este equipamento apresenta a faixa de medição das partículas de 0,02 μm a 2000 μm , com erros de até 1% e com repetibilidade acima de 99%. O aplicativo que opera o equipamento permite a criação de rotinas padrão, que facilitam a utilização tanto do equipamento quanto do gerenciamento dos resultados obtidos. A tabela 5.5 apresenta as características do modelo utilizado.

Tabela 5.5 Características gerais do analisador de partículas a laser

Característica	Descrição
Fabricante	Malvern Instruments Ltd – Reino Unido
Faixa de tamanho de grão	0,02 a 2000 micra
Sistemas de detecção	Fonte de luz permanente (luz azul) Luz vermelha: Varredura frontal, lateral e traseira. Luz azul: grandes ângulo e varredura traseira
Dimensões:	1,293 m x 0,25 m x ,375 m (C x L x A).
Peso	31 kg.

5.3.6 Reômetro Bohlin

A caracterização reológica das misturas foi realizada utilizando um reômetro Bohlin C-VOR digital com controle de temperatura (figuras 5.12a e 5.12b). Basicamente, o reômetro é composto por um motor com uma haste (*spindle*) que é inserida dentro de um compartimento com a mistura a ser ensaiada, sendo medidos, o torque e a velocidade angular, os quais são, posteriormente, convertidos em tensão e deformação da mistura.

O equipamento pode operar através de dois princípios: o primeiro, com o controle da tensão (figura 5.13a), onde o reômetro aplica um torque constante no motor de arraste do copo e, simultaneamente, um sensor de posição angular detecta o movimento do mandril do sistema

de medida que é conectado a haste. O aplicativo, automaticamente, converte o valor aplicado do torque em tensão de cisalhamento. A leitura da posição do sensor é convertida em deformação relativa e pelo monitoramento da mudança desta deformação como função do tempo, pode-se obter o valor da tensão de cisalhamento.

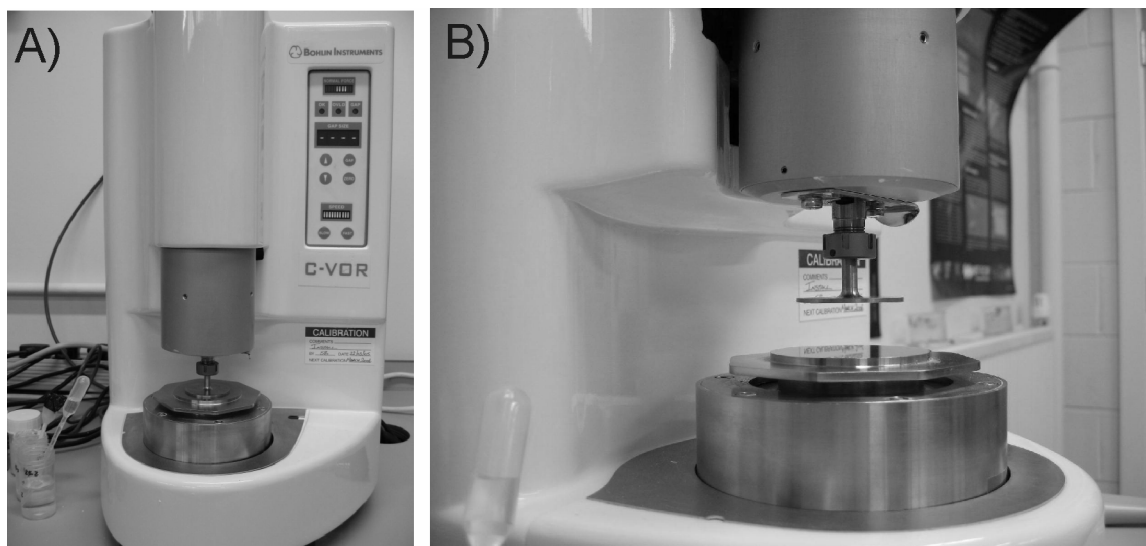


Figura 5.12 a) Reômetro Bohlin C-VOR e; b) Detalhe da mesa e do spindle.

O segundo princípio de funcionamento do reômetro é o controle do gradiente de deformação (figura 5.13b), no qual é aplicada uma velocidade constante no motor e o torque é medido através de um sistema de detecção. Para medir o torque, uma barra de torção é suspensa na câmara de ar do equipamento (para gerar menos atrito) e, quando a barra do motor é ligada, a resistência que a amostra impõe ao movimento (viscosidade) faz girar a barra de torção. Pela medida resultante da torção e com o valor da rigidez desta barra, o torque é medido.

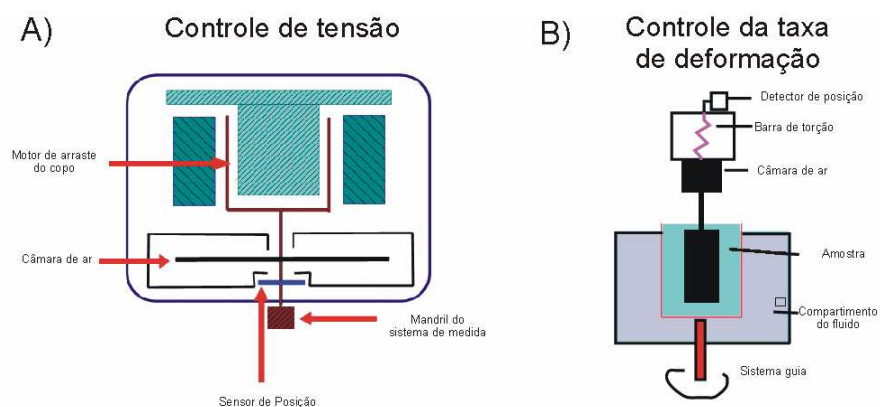


Figura 5.13 Esquema do funcionamento do Reômetro: a) Controle de tensão e; b) Controle da taxa de deformação.

O Reômetro Bohlin C-VOR possui um aplicativo “Bohlin® Rotational Rheometer” que permite realizar até seis tipos de caracterizações reológicas, sendo a de maior interesse, neste estudo, a caracterização da viscosidade da mistura. O equipamento possui um sistema de

controle de temperatura da amostra, que garante o valor constante deste parâmetro ao longo de toda a execução do ensaio. Diversos tipos de “spindles” podem ser utilizados neste tipo de reômetro, sendo que neste trabalho foram utilizados dois deles, o tipo cone e prato (figura 5.14a) e o tipo prato paralelo (figura 5.14b).

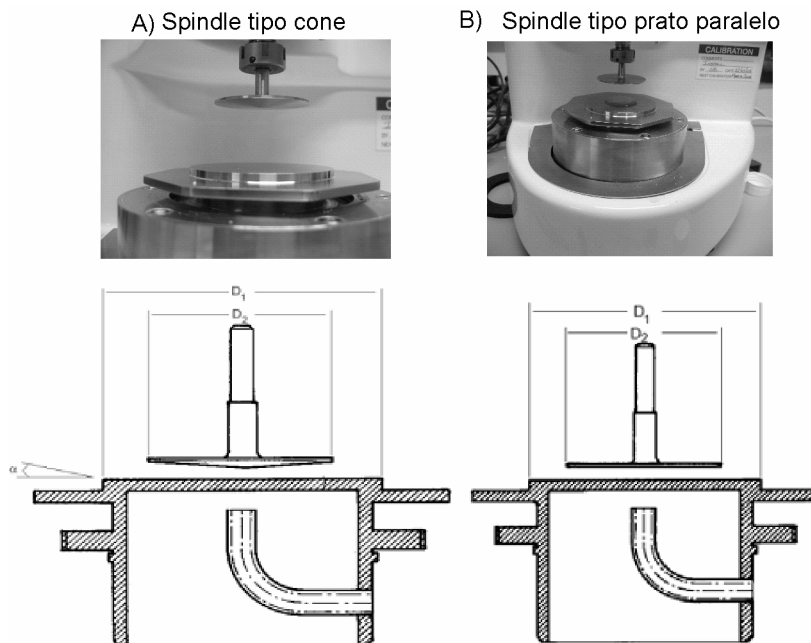


Figura 5.14 Detalhe dos “spindles” utilizados na caracterização reológica: a) “Spindles” tipo cone e; b) “Spindles” tipo prato paralelo.

5.3.7 Lousa interativa

A caracterização geométrica das correntes foi realizada com o auxílio de uma lousa interativa “Smart Board 680”. Estes quadros são normalmente utilizados em salas de aula, pois permitem a interação, através do toque na tela branca, sobre o que é projetado na tela com o computador. Esse toque normalmente é realizado com as canetas interativas coloridas, nas quais são realizadas anotações, desenhos, marcação de posição, delineamento de contornos e outras tarefas. À medida que as tarefas vão sendo realizadas, as anotações vão aparecendo na tela do computador (figura 5.15). Através do aplicativo “Smart notebook” é possível salvar estas anotações. Ao todo, quatro canetas com cores pré-definidas e um apagador são disponibilizados, entretanto estas cores podem ser alteradas no aplicativo, aumentando o leque de possibilidades de utilização de cores. A dimensão do quadro branco interativo é de 1,96 m de comprimento por 1,10 m de altura.

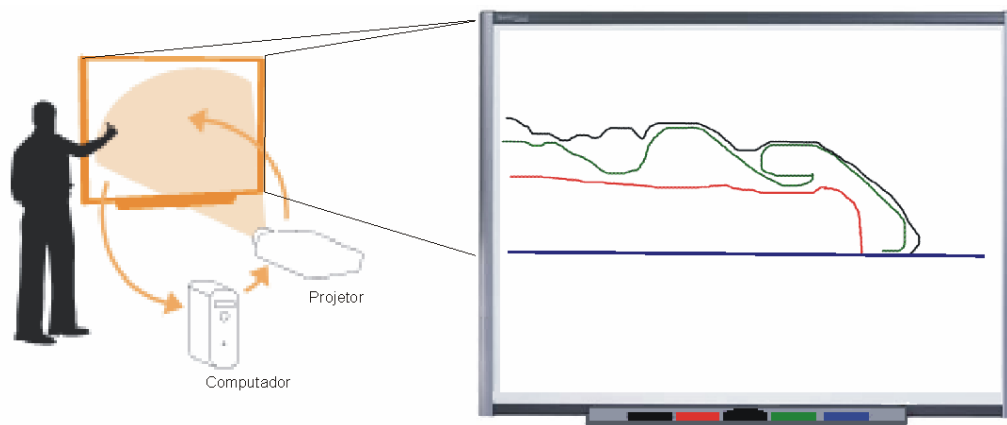


Figura 5.15 Lousa interativa Smart Board.

5.3.8 Agitador vertical eletro-mecânico

No interior do compartimento de mistura foi instalado um agitador eletro-mecânico vertical marca Baldor S.A. Este agitador era composto por um motor de 1 HP acoplado a uma longa haste (1 m) com uma hélice na sua extremidade de 0,10 m de diâmetro. A velocidade de rotação atingia 1775 r.p.m. As figuras 5.16a e 5.16b apresentam o agitador instalado no compartimento de mistura.

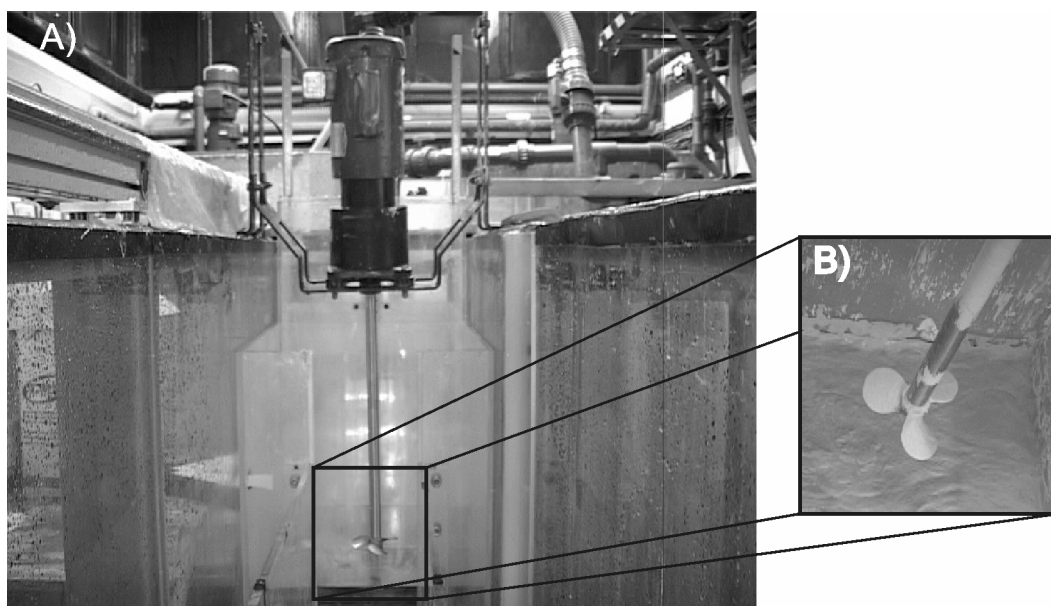


Figura 5.16 a) Agitador eletro-mecânico e; b) Detalhe da hélice na sua extremidade.

5.3.9 Outros equipamentos

Nos experimentos foram utilizados outros equipamentos que não serão detalhados, como por exemplo, termômetros, estufa de secagem, balança de precisão (0,001 g), balança para pesagem do material sedimentar (capacidade máxima de 15 kg com 0,5 g de precisão) e agitadores magnéticos, entre outros.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 PLANO DE ENSAIOS

Durante a realização do estágio na Universidade de Leeds foi definido um plano de ensaios para o cumprimento dos objetivos propostos na tese. Desta forma, ficou estabelecido a realização de diversas séries de experimentos distintos que permitiriam correlacionar os diferentes tipos de correntes de turbidez geradas a partir das diferentes misturas ensaiadas e com diferentes concentrações volumétricas. Neste caso, quatro grupos de ensaios seriam estabelecidos para cada concentração avaliada: as correntes não-coesivas (sedimento não coesivo), as correntes mistas (com diferentes proporções de sedimentos coesivos e não coesivos) e as correntes de transição (com diferentes proporções de sedimentos coesivos e não coesivos para uma mesma concentração).

Quanto aos equipamentos, ficou decidido também que, para quantificar cada parâmetro a ser estudado (concentração, turbulência, velocidade e perfil granulométrico), seriam utilizados os equipamentos e instrumentos específicos existentes no laboratório da Universidade de Leeds, entre eles dez sondas de velocidade, quadro sondas para medir a concentração e ainda, os registros por vídeos câmeras. Ademais, buscar-se-ia desenvolver uma técnica inédita de amostragens de amostras indeformáveis dos depósitos para serem analisadas em microscópio eletrônico de varredura.

Foi definido também o tempo disponível para a utilização do laboratório em Leeds, limitando a um mês a realização de ensaios preliminares e depois, outros dois meses e meio para a realização dos ensaios oficiais. Os ensaios preliminares se justificavam para testar a montagem da instalação física, bem como, para adaptar a metodologia de simulação, uma vez que, nesse laboratório, apenas uma pessoa responsabilizava-se por todo o processo experimental, incluindo a montagem, preparação, operação e limpeza final.

Após esta definição, a tabela 6.1 apresenta este novo plano de ensaio elaborado a partir dessas novas condições do andamento da tese.

Com a definição do plano de ensaios a ser realizado e da alocação do tempo disponível no laboratório de simulações, foi iniciada a preparação logística para a realização das simulações. Esta etapa incluía a calibração do medidor de concentração - UHCM (Anexo A), a preparação dos suportes para equipamentos, além da montagem e desmontagem do canal a ser utilizado.

Nos meses subsequentes, devido à disponibilidade de um equipamento para medição da viscosidade, o plano inicial de estudo foi ampliado para considerar, também, a influência

da reologia da mistura no comportamento da corrente de densidade, praticamente completando a análise dos parâmetros usados como agentes classificadores das correntes de densidade. Essa nova análise, se deu em três meses no laboratório de sedimentometria do SEFDL e será discutida em capítulo a parte.

Tabela 6.1 Plano de ensaios inicial a ser realizado na Universidade de Leeds.

Número de Experimentos	Grupo	Material	Concentração Volumétrica (%)	Relação Sed. não-coesivo/ sed. Coesivo
1				
2	Preliminares	Mistos	20	50:50
3				
4				
5				
6	Não Coesivo	Balotini (esferas de vidro)	2,5	100:0
7			5	
8			10	
9			15	
10			20	
11			25	
12			30	
13	Misto	Esferas de vidro e caulim	35	50:50
14			2,5	
15			5	
16			10	
17			15	
18			20	
19			25	
20			30	
21	Coesivos	Caulim (argila)	35	0:100
22			2,5	
23			5	
24			10	
25			15	
26			20	
27	Transição	Esferas de vidro e caulim	25	90:10
28			20	75:25
			20	25:75
			20	10:90

6.2 ENSAIOS REALIZADOS

Dos experimentos inicialmente previstos, foram executados os ensaios descritos na tabela 6.2.

Do plano original de ensaios para os testes preliminares apenas dois puderam ser realizados, porém, sem a utilização dos equipamentos de velocidade e concentração. Entretanto, estes ensaios serviram para obter uma ordem de grandeza dos valores dos parâmetros a serem medidos, como a velocidade de avanço e quantidade de material depositado, bem como para ajustar a metodologia de simulação que foi proposta. Também,

alguns outros parâmetros foram medidos, como a velocidade da cabeça e a altura da corrente, para definir a configuração do medidor de velocidade e a altura de colocação das sondas de velocidade e concentração.

Já o plano de ensaios foi praticamente cumprido, sendo que apenas dois ensaios não puderam ser realizados, no caso, o ensaio com sedimento coesivo nas concentrações de 30% e 35%. Quando da realização do ensaio desta mistura em 25%, foi constatado que a quantidade de material dentro do compartimento de mistura estava atingindo o seu máximo, ou seja, criando uma mistura muito coesa e de difícil agitação. Desta forma, não foram testadas concentrações maiores que esse valor para evitar o desperdício de material e de tempo de ensaio.

Nesta série ainda houve a repetição de um ensaio (misto com 20%), pois na primeira tentativa não se obteve sucesso na coleta de amostras indeformáveis. Ainda, um ensaio foi anulado por um problema na liberação da comporta que após ser levantada parcialmente, escorregou para baixo novamente, impedindo a passagem do resto de material presente no compartimento da mistura.

Tabela 6.2 Plano de ensaios executado na Universidade de Leeds.

Número de Experimentos	Grupo	Material	Concentração Volumétrica (%)	Relação sed. não-coesivo/ sed. Coesivo	Temp °C	Nome	Data (2007)			
1	Preliminares	Mistos	20	50:50	18,3	PREL_1	19/jun			
2					18,9	PREL_2	29/jun			
3	Não Coesivo	Balotini (esferas de vidro)	2,5	100:0	19,5	NC_02	13/set			
4			5		19,1	NC_05	12/set			
5			10		19,5	NC_10	10/set			
6			15		19,1	NC_15	9/set			
7			20		18,9	NC_20	8/set			
8			25		18,7	NC_25	2/out			
9			30		18,2	NC_30	8/out			
10			35		17,7	NC_35	10/out			
11	Misto	Esferas de vidro e caulim	2,5	50:50	19,3	M_02	1/set			
12			5		18,9	M_05	16/ago			
13			10		19,5	M_10	14/ago			
14			15		19,5	M_15	6/set			
15			20		20,1	M_20	10/ago			
16			25		19,6	M_25	27/set			
17			30		19	M_30	28/set			
18			35		18,5	M_35	12/out			
19	Coesivos	Caulim (argila)	2,5	0:100	19,6	C_02	28/ago			
20			5		18,9	C_05	22/ago			
21			10		18,9	C_10	24/ago			
22			15		19,5	C_15	26/ago			
23			20		19,1	C_20	20/ago			
24			25		19,5	C_25	1/out			
25			Transição		Esferas de vidro e caulim	20	100:0	18,9	100B:0K	8/set
26							90:10	19,3	90B:10K	20/set
27	75:25	19,5		75B:25K			22/set			
28	50:50	20,1		50B:50K			10/ago			
29	25:75	21,1		25B:75K			24/set			
30	10:90	18,9		10B:90K			18/ago			
31	0:100	19,1	0B:100K	20/ago						

*Volume da Mistura = 120 litros

Para identificar o experimento e o grupo que ele pertence, foi criada a seguinte nomenclatura (penúltima coluna da tabela 6.2). A letra indica o grupo ao qual o experimento pertence, ou seja, “NC” representa o grupo não coesivo, “M”, o grupo misto e “C” o grupo coesivo e o número representa a concentração da mistura. Neste caso, a concentração volumétrica de 2,5% foi simplificada para o número 2 apenas. No grupo transição, a nomenclatura segue a proporção (número) do material presente, sendo a esfera de vidro (*ballotini*) representado pela letra “B” e o caulim pela letra “K” (*kaolin*). Quando comparados neste grupo, os ensaios NC_20, M_20 e C_20 serão renomeados para 100B:0K, 50B:50K, 0B:100K, respectivamente.

6.3 MATERIAL UTILIZADO

Tendo em vista a importância da escolha do material para compor as misturas que formarão as correntes de turbidez, nesta seção serão descritos os dois tipos de material utilizados nos experimentos.

6.3.1 Esferas de vidro

O material não coesivo utilizado nas simulações foi esferas de vidro tipo vaquashene®, usualmente chamadas de Balotini, que são produzidas pela empresa Wheelabrator Group Ltd.– Reino Unido. Esse material é utilizado na indústria como um abrasivo, em atividades de jateamento e polimento, e como agregado em tintas para sinalização de pavimentos. O material vem acondicionado em sacos de 25 kg, sendo especificada a faixa granulométrica desejada, no caso $< 0,044$ micra. Nos ensaios foram utilizados, aproximadamente, 900 kg deste tipo de material. A figura 6.1a. ilustra uma imagem das esferas de vidro (*ballotini*) obtida em scanner por varredura, com uma ampliação de 130 vezes e a tabela 6.3 apresenta algumas características técnicas deste material.

Tabela 6.3 Características técnicas do material não coesivo (esferas de vidro).

Descrição	Características
Fabricante	Wheelabrator Group Ltd.- Reino Unido
Tipo	Vaquashene
Cor	Transparente
Massa específica	2400 – 2600 kg/m ³
Forma	Esféricas (70 a 80%)
Análise Química	
SiO ₂	72.50 %
CaO	9.75 %
MgO	3.30 %
Na ₂ O	13.7 %
K ₂ O	0.11 %
Al ₂ O ₃	0.40 %
Fe ₂ O ₃	0.25 %
Presença de Ferro	<0.10

As figuras 6.1b, 6.1c e 6.1d apresentam o histograma de frequência da distribuição granulométrica da amostra bruta das esferas de vidro utilizadas, o histograma de frequência do tamanho de grão de areia correspondente (da argila a areia muito fina) e os valores dos percentís da distribuição.

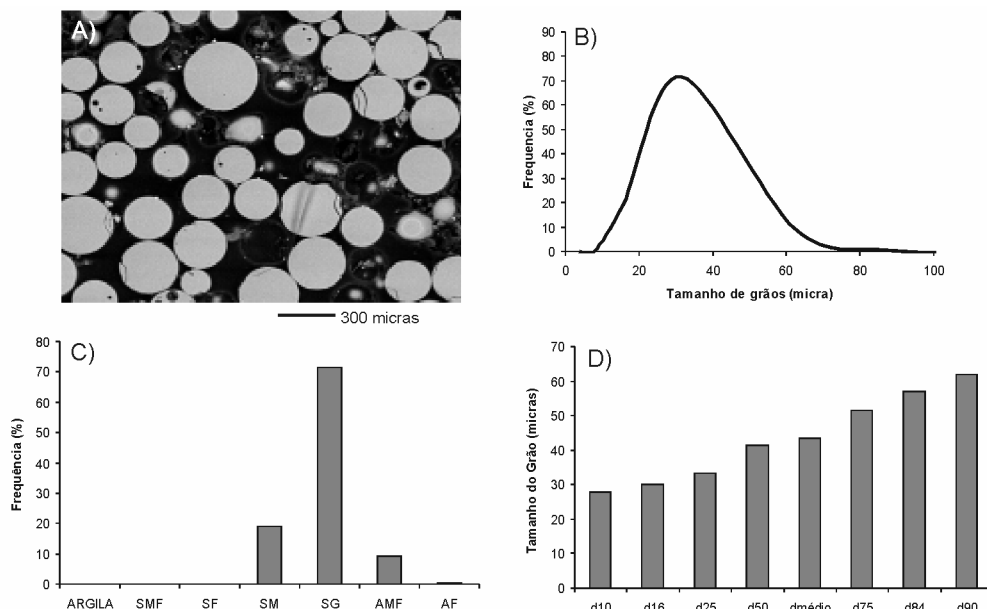


Figura 6.1 a) Ampliação do material no MEV (130x); b) Frequência da distribuição granulométrica da amostra bruta; c) Histograma de frequência do tamanho de grão correspondente ao grão areia e; d) Valores dos percentís da distribuição.

Pela figura 6.1c, observa-se que as esferas de vidro são realmente de seção circular (seção transversal - corte da esfera) e que possuem uma faixa de tamanho de grão correspondente desse o silte médio até areia muito fina, sendo que a maior parcela se enquadra no tamanho correspondente ao silte grosso. O diâmetro médio da amostra bruta foi de 42 micra, aproximadamente.

6.3.2 Caulim

O sedimento coesivo utilizado nos experimentos foi o mineral Caulim (silicato cristalino hidratado de alumínio), também conhecido com “argila chinesa” (*china clay*). Esse mineral é encontrado em algumas regiões do mundo, sendo utilizado nos experimentos e oriundo de uma jazida em Cornwall – Reino Unido, sob exploração da empresa Imerys Minerals Ltd. O caulim é um pó muito fino, plano e inerte, normalmente utilizado na indústria de cerâmica e do artesanato. A figura 6.2a ilustra a imagem ampliada (200 x) deste material. O material era acondicionado em sacos de 25 kg e foram utilizados, no total, aproximadamente 671 kg deste material.

Tabela 6.4 Características técnicas do Caulim

Descrição	Características
Fabricante	Imerys Minerals ltd – Reino Unido
Forma	Partícula plana com alongação 20:1
Cor	Branca
Massa específica	2600 kg/m ³
Mineralogia	Caulinita com menor presença de mica, quartzo e feldspato.

As figuras 6.2b, 6.2c e 6.2d apresentam ao histograma de frequência da distribuição granulométrica da amostra bruta do caulim utilizado, o histograma de frequência do tamanho de grão de areia correspondente (da argila a areia muito fina) e os valores dos percentís da distribuição.

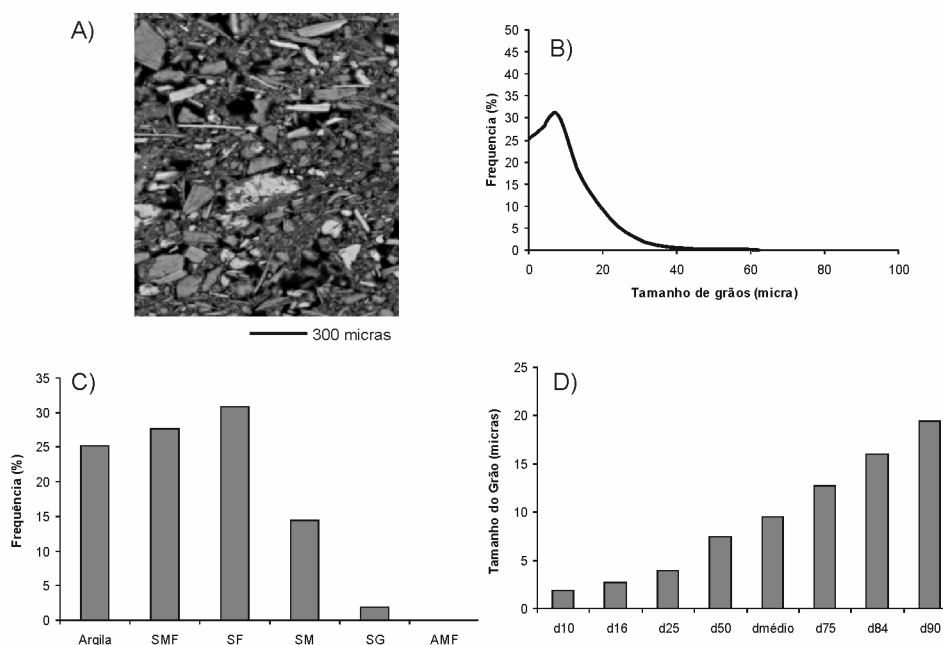


Figura 6.2 a) Ampliação do material no MEV (130x); b) Frequência da distribuição granulométrica da amostra bruta; c) Histograma de frequência do tamanho correspondente ao grão de areia e; d) Valores dos percentís da distribuição.

A imagem microscópica do caulim mostra uma forma bem planar para os grãos, com uma faixa de tamanho de grão correspondente desde a argila até o silte grosso, sendo mais significativa a faixa da argila ao silte fino. O diâmetro médio da amostra foi de 9 micra.

6.4 METODOLOGIA

6.4.1 Simulações experimentais

O procedimento para a realização dos experimentos consistia, em uma primeira etapa, em preparar a instalação física e os equipamentos a serem utilizados. Desta forma, antes do

primeiro ensaio, a declividade do canal foi ajustada em $0,8^\circ$. Também, foram instalados o suporte com dez transdutores de ultrassom que mediam a velocidade do fluxo, sendo fixados a 3,40 m do início do canal com o uso de silicone junto à base. Ao seu lado, foram instaladas as quatro sondas de medição de concentração, porém com o suporte fixado junto à borda superior do canal externo. Externamente, o medidor de perfil de velocidade ultrassônico era posicionado em uma mesa auxiliar a 1 m da lateral do tanque e os quatro equipamentos para medir a concentração foram colocados junto à parede lateral do tanque.

Também foram fixadas, na lateral externa do tanque fixo, escalas centimétricas de papel, ao longo de toda a extensão do canal, bem como foram realizadas marcas verticais de 20 em 20 cm, na parede lateral do canal removível. Estas marcações auxiliavam a filmagem e a análise dos resultados.

Em todos os experimentos, a formação da corrente foi realizada através da técnica de pulso, a qual se caracteriza por colocar uma quantidade de mistura de material num compartimento conectado ao modelo através de uma comporta e, quando esta é liberada, o fluxo mais denso flui para o interior do tanque formando a corrente de densidade. A instalação física era preparada para a realização do ensaio como segue.

Primeiramente, antes do ensaio, a comporta do compartimento de mistura era colocada na sua posição, dividindo o compartimento de mistura do canal. Para evitar a percolação de água pelas arestas entre as duas seções, vaselina sólida era adicionada nas bordas da comporta garantindo, assim, o isolamento de ambos os lados.

Antes do enchimento do canal, três folhas de transparência para retroprojetores (10 x 15 cm) eram fixadas com fita adesiva dupla face junto ao fundo do canal, nas distâncias de 80 cm, 180 cm e 280 cm da comporta. Nos locais onde foram colocadas as transparências, eram feitas as coletas das amostras indeformáveis do depósito (detalhes no item 6.5.7).

Em seguida, através da tubulação de alimentação, o canal era completado com água até a marca pré-estabelecida de 1,10 m de altura. Durante o seu enchimento, a quantidade de sedimentos a ser utilizada, que já estava pesada e preparada para o ensaio, era colocado manualmente dentro do compartimento de mistura e após isso esse compartimento era completado com água, através de uma mangueira auxiliar, até a altura pré-determinada de 40 cm (volume de 120 litros). A velocidade do enchimento era controlada para ser a mesma do enchimento do tanque, equalizando a pressão nos dois compartimentos e evitando a percolação de água entre eles (caso a vedação com vaselina falhasse).

Um sensor de temperatura era colocado dentro do tanque para registrar a temperatura do fluido ambiente e duas câmeras de vídeo eram instaladas em tripés no corredor lateral ao

tanque a 60 cm, aproximadamente, de distância da janela do canal externo. Uma câmera era colocada a 180 cm da comporta e a outra a 290 cm da comporta. Para melhorar as condições de imagem de vídeo, foram instalados painéis pretos na lateral oposta às câmeras. Assim, como não havia iluminação específica para os ensaios, esses painéis serviram para dar o contraste necessário, uma vez que as correntes de densidade geradas eram compostas por sedimentos brancos.

Na etapa seguinte da simulação, o agitador eletro-mecânico vertical foi instalado em um suporte posicionado na borda superior do canal externo e no centro do compartimento de mistura, a uma distância de 10 cm do fundo, sendo acionado para homogeneizar a mistura. Uma tampa removível de material leve (isopor) era colocada sobre este compartimento para evitar que os pingos provocados pela forte agitação se espalhassem pelo laboratório, bem como caíssem dentro do próprio tanque de água limpa. Enquanto isso, tanto os equipamentos de medição, quanto as câmeras de vídeos eram configuradas e ficavam em modo de espera (*stand-by*).

Tão logo a mistura estava homogeneizada, o ensaio era realizado. Para tal, todos os equipamentos eram acionados e o agitador eletro-mecânico era desligado. No momento seguinte, a comporta era liberada, gerando a corrente de densidade. Observou-se ainda, que a corrente sofreu a influência de uma contra corrente gerada na superfície superior devido aos limites do modelo físico serem curtos. Essa contra corrente, se forma através de dois mecanismos. O primeiro, descrito por Huppert e Simpson (1980), indica que, quando a comporta é liberada, o fluido ambiente ocupa o espaço deixado pela mistura, refletindo no fundo do canal à montante e se propagando depois, na direção do fluxo. O segundo, como no canal não havia um esgotamento do excesso de água na região superior, é a reflexão provocada pelo avanço da corrente que comprimia o fluido ambiente junto o fundo do canal (*jusante*).

Quando a corrente atingia a zona de dispersão do tanque, o registro de drenagem do tanque era ligeiramente aberto para evitar a reflexão da corrente. Após a passagem de todo o fluxo, os equipamentos eram desligados e o dreno de saída de água era fechado, permitindo a decantação dos grãos em suspensão. Após algumas horas (em média seis horas), o registro era novamente ligeiramente aberto para drenar totalmente a água do canal.

Após a saída de toda a água, o depósito gerado era filmado ao longo de toda a sua extensão e as coletas das amostras pontuais eram efetuadas. Todo o material depositado sobre o canal era coletado em intervalos de 40 cm, bem como eram coletadas, no compartimento de mistura, três amostras de material, para a verificação do balanço de massa do depósito. O canal então era lavado, limpo e preparado para o ensaio subsequente.

6.5 TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

O tratamento dos dados gerados nos experimentos e a sua análise foram realizadas através dos seguintes métodos.

6.5.1 Dados gerados no medidor de perfil de velocidades ultrassônico - UVP

O levantamento das velocidades das correntes de turbidez nos ensaios era realizado através de dez transdutores de velocidades instalados em dez alturas diferentes ao longo da vertical. Esses transdutores eram posicionados em um suporte específico que foi fixado a 3,40 m do início da comporta. A figura 6.3 apresenta a posição e as alturas em que foram instaladas cada sonda, facilitando a determinação do perfil de velocidade das correntes ao longo do tempo.

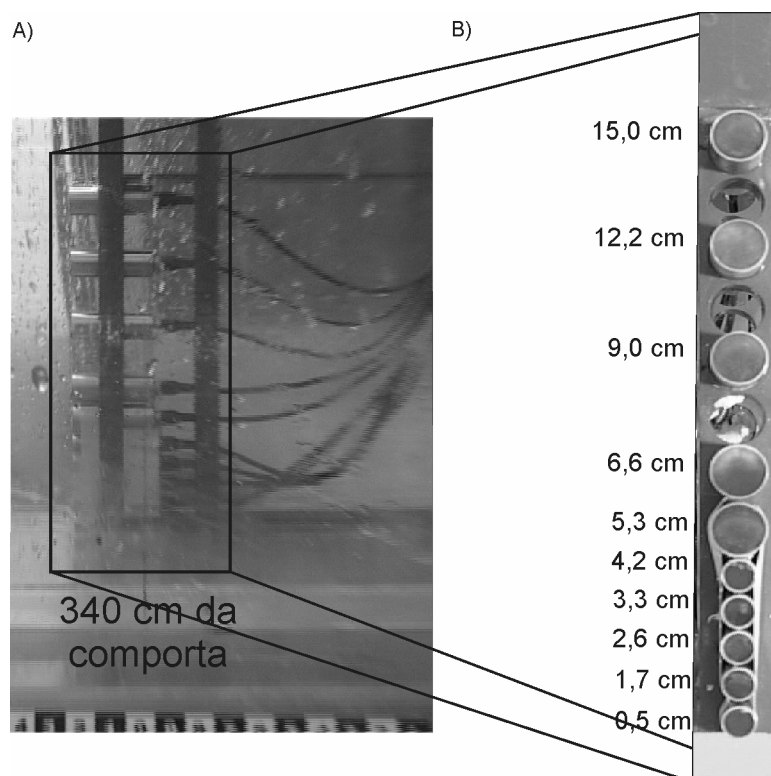


Figura 6.3 Suporte com os dez transdutores instalados no canal com o detalhe da disposição e alturas do fundo.

Para a aquisição dos dados da velocidade de propagação das correntes foram utilizadas as configurações no medidor de perfil de velocidade ultrassônico e nos transdutores apresentadas na tabela 6.5.

Tabela 6.5 Parâmetros de entrada do medidor de velocidade – UVP

Descrição	Característica
Número de Canais	128
Distância entre canais	0,83 mm
Início da janela de medição	5 mm
Fim da janela de medição	110,42 mm
Largura da banda de velocidade	2400 mm/s
Mínima velocidade no eixo	114,05 mm/s
Máxima velocidade no eixo	1191 mm/s
Resolução da velocidade no eixo	9,378 mm/s
Período de amostragem	50 ms + 15 ms entre os transdutores
Velocidade do som	1480 m/s

Os dados provenientes dos transdutores de velocidade eram analisados utilizando o aplicativo do equipamento (UVP monitor 3.0). Para cada transdutor, foram calculadas as velocidades em 128 canais ao longo do eixo do transdutor, que totalizaram 11,4 cm à frente do mesmo (0,83 cm por canal). Como o equipamento estava instalado a 340 cm da comporta (canal zero), ele iniciava a medida da velocidade do fluxo a montante daquela região, ou seja, a exatamente a 338,6 cm da comporta (canal 128). O programa de tratamento apresenta como dado de saída um gráfico de contorno, no qual era plotada a série temporal no eixo X e os 128 canais (11,4 cm) no eixo y, mostrando, através de uma escala de cores, os diferentes valores de velocidade (figura 6.4a).

A partir do gráfico de contornos, eram avaliados quais canais deveriam ser considerados para determinar a velocidade do escoamento e quais canais deveriam ser descartados. Assim, nos primeiros canais (0 a 20), nota-se que há muita interferência nos dados e até, por recomendação do fabricante, não era para serem considerados. Já os últimos canais (110 – 120) também sofrem o mesmo problema, uma vez que a onda emitida não consegue penetrar na mistura, gerando resultados com muitos erros. As zonas intermediárias (máximo azul) são as preferenciais para a correta avaliação dos resultados. Como para cada um dos canais era gerada uma série temporal da velocidade, resultando em aproximadamente 100 canais (excesso de informação), optou-se por trabalhar com cinco canais apenas, distribuídos ao longo deste comprimento útil. (figura 6.4b). Desta forma, a quantidade de informação era diminuída sem perder, porém, a qualidade do dado medido. Como exemplo, a figura 6.4c apresenta a série temporal dos cinco canais selecionados: os canais 20, 40, 60, 80 e 100.

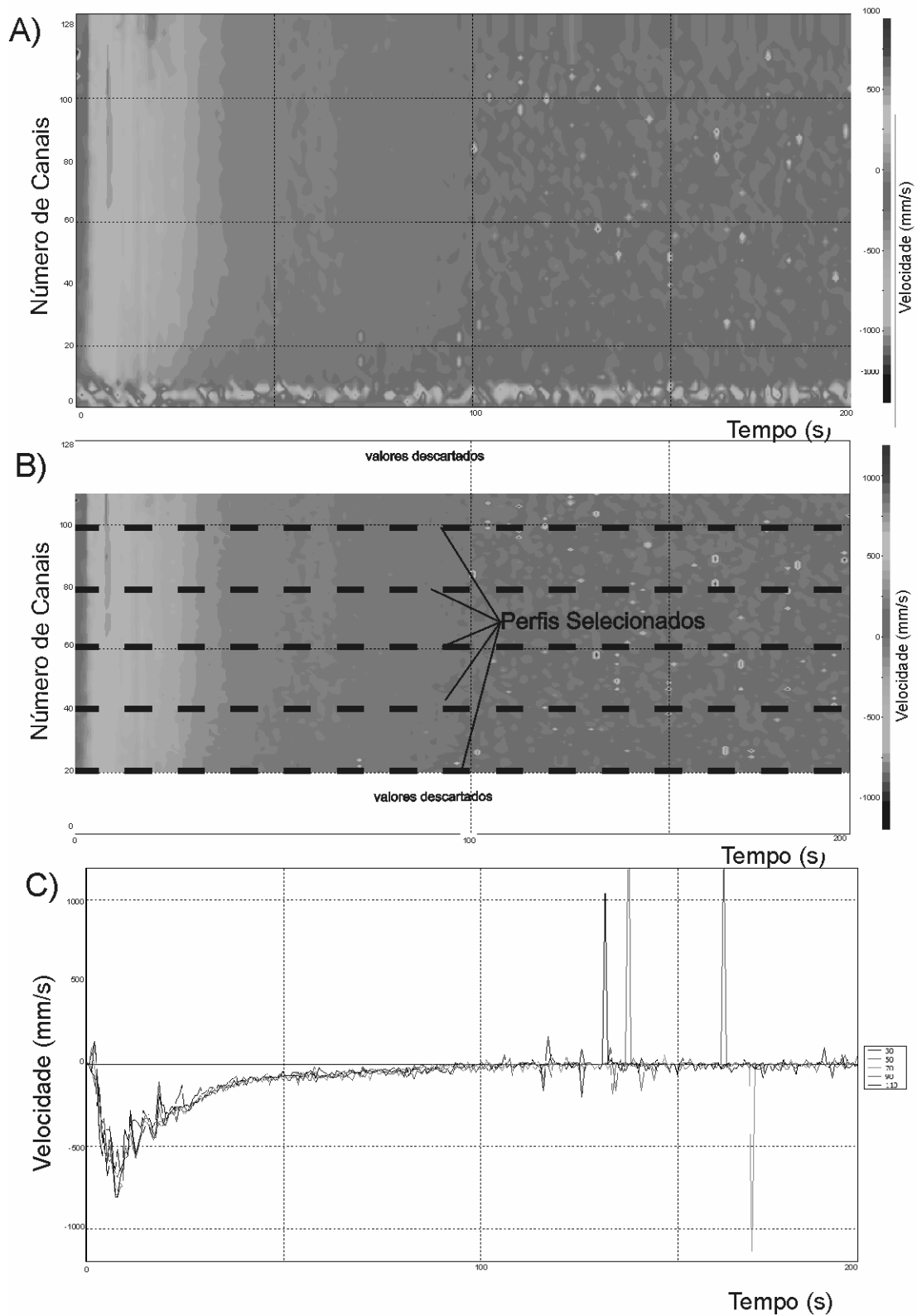


Figura 6.4 Variação temporal da velocidade: a) Saída do medidor de velocidade para os 128 canais do feixe de ultrassom de um transdutor; b) Análise da região que melhor representava a medição e a posição dos canais a serem utilizados; c) Série temporal dos cinco canais escolhidos para avaliar a velocidade.

O Aplicativo UVP Monitor 3.0 também permite calcular os parâmetros estatísticos de cada canal, além de outros parâmetros que não foram considerados para este trabalho. Como

dados de saída, o programa exportava os parâmetros medidos em formato “.txt”, diretamente para planilha de cálculo. Neste arquivo eram colocados os dados dos 128 canais para os 10 transdutores usados, além do tempo transcorrido entre cada análise, no caso 50 ms de leitura e um atraso (*delay*) de 15 ms entre cada transdutor, totalizando 0,653 ms a cada medida. Com a base de dados no formato de planilha eletrônica, os parâmetros eram selecionados e análises posteriores eram realizadas.

6.5.2 Dados gerados no medidor de alta concentração ultrassônico - UHCM

Para a realização da medição dos perfis de concentração ao longo do tempo foram utilizados quatro equipamentos de medição de alta concentração ultrassônico com uma sonda cada. As sondas foram instaladas num suporte especialmente desenvolvido em alumínio e colocadas, sequencialmente, em quatro alturas diferentes. Devido à impossibilidade física de se colocar as sondas na mesma altura, foi necessário deslocá-las em alguns centímetros cada uma, ficando a disposição final como segue na figura 6.5. Ao todo, as sondas perfaziam 9,20 cm de altura, a partir do fundo do canal. O suporte das sondas era então instalado em outro suporte auxiliar, na borda superior do canal externo e fixado com alicates de pressão.

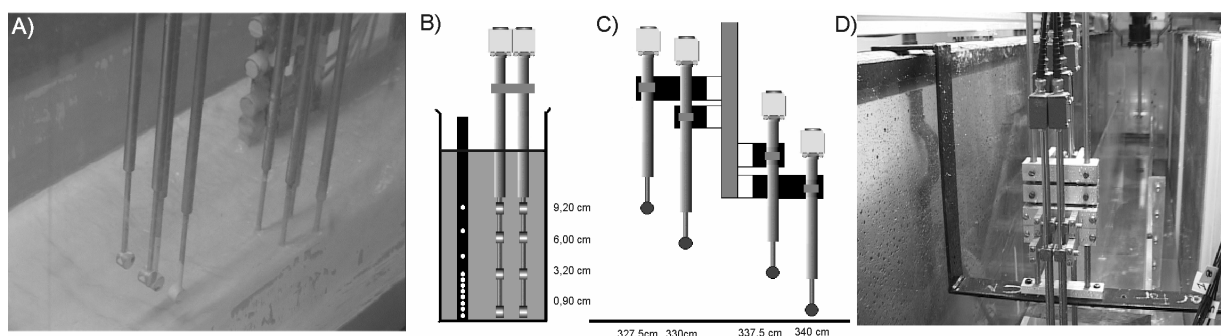


Figura 6.5 Disposição das sondas de concentração: a) Local de medição; b) Vista frontal; c) Vista lateral e; d) Detalhe do suporte de fixação junto ao tanque.

Para a aquisição e tratamento dos dados das sondas foi utilizado o aplicativo UHCM Delft-Measure®, o qual gerenciava a configuração de saída dos resultados para as quatro sondas, simultaneamente. A frequência e o tempo de aquisição de cada sonda foram definidos em 20 Hz e 420 segundos, respectivamente. Antes de o ensaio começar era necessário ajustar o valor zero do equipamento, ou seja, medir o valor da concentração do fluido ambiente e considerá-lo como o zero da escala de comparação. Isso era realizado com o auxílio do aplicativo, o qual registrava o valor da água no tanque antes do ensaio e calculava uma média desses valores para cada sonda. Se não houvesse variância significativa durante essa medição do zero, o ensaio poderia ser iniciado.

Com o início dos ensaios, a saída gráfica do aplicativo apresentava, em tempo real, o comportamento dos valores de voltagem (variável análoga) medidos ao longo do tempo, ou seja, os valores da variação de concentração para cada sonda.

Para a análise dos dados, o programa exportava um arquivo de saída, contendo as características da configuração, e um outro, com os valores do tempo e da concentração para cada sonda instalada. Para trabalhar melhor com os dados e transformá-los em formato de planilha eletrônica, foi desenvolvido um aplicativo em Visual Basic 5.0® chamado “UHCM Data®” (apresentado no Anexo B), que realizava o seguinte procedimento: com o arquivo de saída dos dados brutos (voltagem), desconsiderava as informações irrelevantes do arquivo e adquiria somente os dados da série temporal da concentração para as quatro sondas. Os outros dados de entrada deste aplicativo eram o tipo de mistura utilizada, a temperatura do ensaio, o número e a posição das sondas que eram utilizadas ao mesmo tempo. Desta forma, os dados brutos eram convertidos para concentração (a partir de equações definidas na calibração - Anexo A) e um novo arquivo de saída em formato “.txt” era gerado, contendo o tempo transcorrido e os valores de concentração para cada sonda. Com este arquivo de saída, os dados estavam prontos para serem analisados.

6.5.3 Determinação dos parâmetros geométricos

A geometria das correntes de turbidez normalmente é avaliada através da espessura da cabeça da corrente e da espessura do corpo, as quais são extraídas da análise dos vídeos gerados ou, ainda, de registro fotográfico realizado durante o ensaio. Neste trabalho, esse parâmetro foi avaliado com base na análise de vídeo, uma vez que, em todos os experimentos, a posição de filmagem foi a mesma.

Para tanto, todos os vídeos foram transformados em imagens quadro a quadro, através do aplicativo Virtual DUB®. Considerando que a taxa de aquisição foi de 25 quadros por segundo e que os ensaios duraram, aproximadamente, 80 segundos, havia mais de 2000 imagens por ensaio.

Como o processamento de todas estas fotos (totalizando mais de 50000 imagens) era inviável, foi escolhido um intervalo de aquisição que representasse o desenvolvimento da corrente, porém avaliando uma quantidade menor de imagens. Desta maneira, as imagens foram selecionadas a cada 10 quadros (0,4 s), nos primeiros cinco segundos do fluxo, e, posteriormente, a cada 25 quadros (1 s) até o final. Esta escolha da frequência de aquisição visava detalhar melhor os processos que ocorrem na região da cabeça no início e, posteriormente, o comportamento do corpo e da cauda. Com essa simplificação foram selecionadas, manualmente, cerca de 80 imagens por ensaio, que representavam

aproximadamente 70 segundos de fluxo. Para efeito de comparação, foi considerado como marco zero das imagens, o momento em que a parte mais avançada da cabeça atingia a posição de 300 cm da fonte. A partir deste ponto, aplicavam-se as frequências de aquisição de imagens de 2,5 Hz e 1,0 Hz. Foram geradas, ao todo, 2060 imagens, cujas características estão apresentadas na tabela 6.6.

Tabela 6.6 Imagens selecionadas para a determinação dos parâmetros geométricos

Nome do ensaio	Imagens avaliadas	Imagens consideradas na seqüência	Imagem do início da camada interna
M_02	82	80	16
M_05	82	80	15
M_10	83	80	23
M_15	85	80	23
M_20	87	80	18
M_25	87	80	12
M_30	75	75	4
M_35	84	80	2
NC_02	84	80	0
NC_05	84	80	5
NC_10	84	80	9
NC_15	84	80	6
NC_20	85	80	4
NC_25	69	69	7
NC_30	84	80	8
NC_35	85	80	4
C_02	79	79	19
C_05	81	80	11
C_10	83	80	5
C_15	85	80	3
C_20	85	80	3
C_25	79	79	2
B100:K0	85	80	4
B90:K10	84	80	18
B75:K25	78	78	18
B50:K50	85	80	18
B25:K75	85	80	5
B10:K90	85	80	3

Através da observação dos vídeos gravados, foram avaliadas três características das correntes de densidade geradas nos ensaios: a forma da corrente (incluindo a espessura da cabeça, corpo e cauda da corrente), a espessura da camada de mistura acima da geometria do corpo e, ainda, uma camada interna, mais concentrada, que se desenvolvia junto ao fundo.

A fim de que essa avaliação fosse realizada da forma mais rápida, foi desenvolvida uma técnica de delimitação destas camadas com o uso de uma lousa interativa. Através do uso de um computador e de um projetor, as figuras previamente selecionadas eram colocadas em série no programa Smart Notebook® da empresa fabricante da lousa interativa que projetava, na lousa, as imagens. Com o uso de quatro canetas de diferentes cores, os três limites

geométricos eram demarcados e salvos no computador. A cor preta era utilizada para demarcar a camada de mistura, a cor verde delimitava a forma da corrente, ou seja, não considerando essa camada de mistura e a cor vermelha destacava a interface da camada interna do fluxo. O fundo do canal era demarcado com uma cor característica (azul) para cada ensaio. Esse fundo servia de base para o cálculo da espessura, sendo determinado para cada ensaio, uma vez que havia pequenas diferenças de posicionamento da câmera de um ensaio para outro. Nos ensaios, a espessura e a forma da corrente eram identificadas facilmente, entretanto, a camada interna, por vezes, não era totalmente visível, uma vez que o fluido ambiente ficava levemente turvo devido à presença de finos em ensaios anteriores.

A sequência de imagens de cada ensaio, com as linhas demarcadas na lousa interativa, eram exportadas e convertidas para escala de cinza e para o formato “.raw” (matriz de pixels), estando prontas para a etapa seguinte do método. A figura 6.6 apresenta o método de coleta através da projeção em lousa interativa.

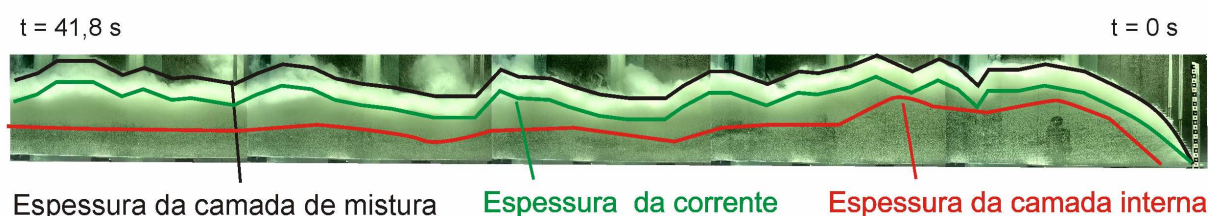


Figura 6.6 Sequência apresentando a determinação dos parâmetros geométricos

O processamento das 2060 imagens geradas foi realizado através do aplicativo “Quadrant®” (apresentado no Anexo C) desenvolvido em Visual Basic 5.0®. Esse aplicativo abria a imagem e varria a sua matriz de pixels detectando as coordenadas (XY) dos pixels que possuíam os valores respectivos às quatro cores utilizadas no delineamento das características geométricas. O programa calculava, também, a distância relativa entre a coordenada do pixel do parâmetro encontrado e a respectiva coordenada do fundo do canal (na mesma vertical).

Após isso, essa distância em pixels era convertida para centímetros, através de uma calibração prévia e, então, as espessuras de cada parâmetro (cada cor diferente) eram determinadas ao longo do tempo. Como a câmera foi enquadrada a 290 cm, mas seu campo de visada atingia desde 260 cm até 320 cm, obtinha-se a espessura dos parâmetros para cada coluna da matriz de pixels, ou seja, a cada 0,08 cm de comprimento. Como para cada imagem analisada, o tempo de ensaio estava associado, era possível determinar a série temporal das espessuras medidas. Os dados calculados eram exportados para o formato de planilha eletrônica, estando prontos para análise.

6.5.4 Determinação da espessura do depósito.

Para a análise da espessura do depósito foram utilizadas as imagens geradas nos vídeos realizados após as simulações. Com uma filmadora digital posicionada ortogonalmente à lateral, o depósito era filmado ao longo de toda a sua extensão e esse vídeo era repassado ao computador através de uma conexão digital, sendo capturado através do aplicativo Windows Movie Maker® e convertido para o formato digital, a uma taxa de 25 quadros por segundo. A partir daí era utilizado o aplicativo Virtual DUB® que disponibiliza um recurso para extrair todas as imagens do vídeo quadro-a-quadro, colocando-as em sequência. Assim, após a utilização deste recurso foram selecionados quadros em intervalos de 20 cm em 20 cm, relativos à distância do canal, totalizando doze imagens por depósitos. Ainda, era extraída uma imagem do compartimento de mistura do material onde parte do sedimento ficava retido.

Após as imagens serem discretizadas de 20 em 20 cm, foi utilizado outro aplicativo - Image Tool® - que possui uma ferramenta de medição (régua), a qual exige uma calibração prévia, permitindo a realização de qualquer medida de comprimento conhecida na mesma imagem, no caso, eram usadas como referência, escalas de papel centimétricas previamente fixadas ao longo de toda a extensão do canal. Esse processo de calibração e medição da espessura do depósito era, então, realizado nas doze imagens selecionadas (figura 6.7).

Cabe ressaltar que o vídeo do depósito gerado era realizado, aproximadamente, doze horas após a drenagem do tanque, ou seja, o depósito ainda estava úmido. Desta forma, a espessura medida neste caso, era relativa, pois, além do material, o depósito continha uma quantidade de água (sobretudo nos materiais mais finos). Entretanto, a comparação entre os ensaios pode ser realizada, uma vez que a metodologia empregada foi a mesma em todos os experimentos.

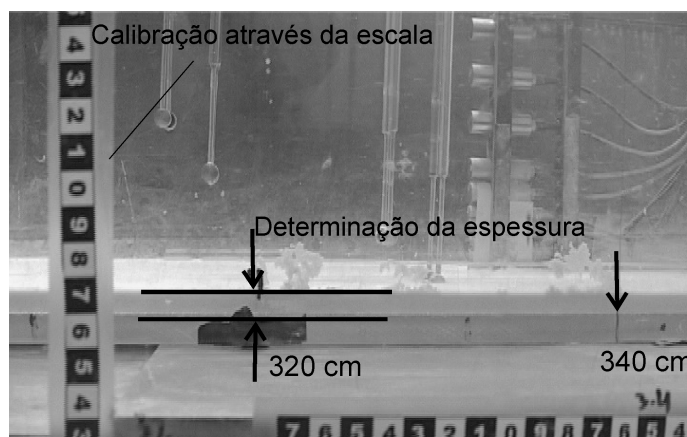


Figura 6.7 Determinação da espessura do depósito através da imagem

6.5.5 Balanço de massa

Com o intuito de verificar a quantidade de material que ficou depositado no tanque em cada ensaio, e, assim, estimar a capacidade de transporte de cada grupo de misturas ensaiadas foi coletada, em onze intervalos distintos, a totalidade do material depositado nos ensaios, ou seja, a cada 40 cm (excetuando o último intervalo que possuía 50 cm). No compartimento de mistura, ao invés de recolher todo o material ali retido, foi decidido coletar três amostras em diferentes pontos para estimar o seu grau de umidade. Posteriormente, tendo como base esse valor de umidade, era possível calcular a quantidade de material presente no compartimento.

Como o material depositado estava úmido e, por vezes fluido, a coleta do material começou de jusante para montante. Para que não houvesse problemas nos limites de cada intervalo, eram colocadas placas divisórias, as quais impediam a deformação da massa depositada. O material recolhido era, então, acondicionado em sacos plásticos e pesado, sendo posteriormente colocados na estufa para a secagem. Uma vez secas, as amostras eram novamente pesadas. Com a diferença entre o peso úmido e o peso seco, eram calculados o grau de umidade do depósito e a quantidade de material total depositada no tanque. Por fim, era realizado o balanço de massa do depósito.

6.5.6 Análise granulométrica

Na avaliação da análise granulométrica do depósito foram utilizadas as mesmas amostras previamente coletadas para a avaliação do balanço de massa de sedimento no ensaio, espaçadas em onze intervalos de 40 e 40 cm. Assim, uma pequena fração do material já seco, era amostrada, pesada e submetida ao analisador de partículas a laser.

Cabe salientar que o aplicativo do equipamento permitia ao usuário definir diversos parâmetros a serem calculados durante a realização da análise granulométrica. Desta forma, foram selecionados os parâmetros estatísticos da média, assimetria, curtose, além do diâmetro correspondente ao D_{10} , D_{16} , D_{25} , D_{50} , D_{75} , D_{84} e D_{90} , que eram calculados automaticamente e exportados em formato de planilha eletrônica.

6.5.7 Coleta de amostras indeformáveis

Para tentar avaliar a estrutura interna do depósito foi testada a aplicação de uma metodologia para extrair amostras indeformáveis do depósito, reproduzindo uma espécie de testemunho de sondagem, as quais seriam avaliadas, posteriormente, num microscópio eletrônico de varredura.

A coleta das amostras indeformáveis do depósito exigiu o desenvolvimento de metodologia baseada na sequência de ações apresentadas na figura 6.8 e descritas a seguir.

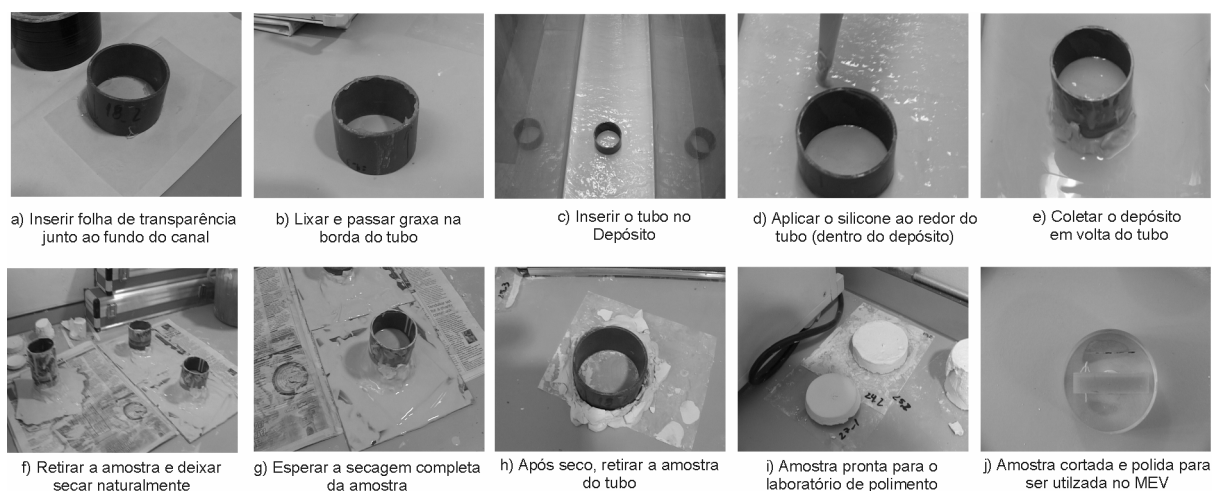


Figura 6.8 Sequência da coleta das amostras indeformáveis

Antes do ensaio, era colocado sobre o fundo do canal um pedaço de folha de papel de transparência (10 x 15 cm), o qual era fixado com fita dupla face em três posições pré-determinadas do canal (figura 6.8a). Essa folha foi escolhida por dois motivos: por ser muito fina e não prejudicar o desenvolvimento do fluxo e também por ser resistente à água e de fácil manuseio. Além disso, um tubo cilíndrico de PVC de 50 mm era cortado em três pedaços e uma de suas bordas era lixada e desbastada. O comprimento de cada um destes tubos dependia da espessura do depósito gerado no ensaio, sendo normalmente de 5 a 8 cm. Na borda lixada, era aplicada uma camada de graxa de alta viscosidade que auxiliava a fixação do tubo na transparência (figura 6.8b). Após os ensaios, esses tubos de PVC com graxa eram inseridos dentro do depósito ainda úmido, nos três locais pré-determinados e acima das transparências (figura 6.8c). Esperava-se que o material que ficou contido dentro do tubo não fluísse ou escapasse do interior, mantendo-se preservado. Para auxiliar nesta contenção, era aplicada, na parte externa do tubo, uma camada espessa de silicone líquido (figura 6.8d). Cabe salientar que, neste caso, o depósito gerado ainda estava depositado no canal, então havia uma certa dificuldade para fazer com que o silicone aderisse à superfície molhada do tubo e da transparência. Assim, o silicone no tubo era pressionado manualmente, criando uma espécie de molde entre eles.

Uma vez verificado que o depósito no interior do tubo de PVC não iria fluir para fora dele, realizava-se a coleta do material externo ao tubo (coleta para balanço de massa descrito anteriormente – item 6.5.5), deixando apenas os tubos cilíndricos de PVC sobre o canal (figura 6.8e). Decorridas uma a duas horas, era inserida uma placa fina, porém rígida, sob a transparência, descolando-a juntamente com o depósito amostrado na qual eram retirados do canal e colocados para secar ao ar livre (figura 6.8f).

Após a secagem completa, um testemunho do depósito se formava, com uma certa rigidez (nos fluxos com a presença de argilas) e então eram encaminhados para o laboratório

de Polimento da Universidade de Leeds (*polishing lab*), onde as amostras eram cortadas, impregnadas com resina epóxi (*Epo-Tek 301*), novamente cortadas e moldadas na forma do exemplar a ser usado no Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV e, por fim, polidas (figura 6.8g, figura 6.8h e figura 6.8i). Sobre essa camada polida, era aplicada uma fina camada de ouro, ficando as amostras prontas para serem processadas no MEV (figura 6.8j). Este processo era realizado por técnico da Universidade de Leeds especializado em técnicas de petrografia e mineralogia.

6.5.8 Processamento das imagens do MEV

As amostras coletadas e preparadas no laboratório de polimento da Universidade de Leeds provenientes dos ensaios não coesivos, mistos e transição eram processadas no microscópio eletrônico de varredura com uma ampliação de 60x. A amostra era varrida ao longo da vertical, da superfície superior até o fundo do depósito. Como a espessura do depósito era maior que a abrangência do microscópio de varredura, era preciso capturar as imagens de maneira que houvesse alguma sobreposição entre elas, para, posteriormente, agrupá-las. Deste modo, uma sequência de imagens era criada do topo do depósito até sua base (figura 6.9a).

Para agrupar as fotos, foi utilizado o aplicativo Photo Stich® que identifica automaticamente as zonas sobrepostas, juntando as imagens e criando um mosaico único com toda a superfície vertical do depósito. Esse era o primeiro passo para a interpretação das imagens geradas no MEV. Em seguida, a imagem era redimensionada com a delimitação apenas da zona efetiva do depósito (sem as faixas pretas superiores e inferiores) e eram determinadas as dimensões desta imagem única, com a definição da largura da imagem (também chamada colunas totais) e, principalmente, do comprimento vertical da amostra em pixels (também chamada de linhas totais).

Como o interesse principal na avaliação das imagens detalhadas do interior do depósito era verificar as graduações e os processos envolvidos ao longo da vertical, decidiu-se trabalhar com três fatias verticais da amostra, ao invés de toda a sua extensão lateral. Isso se deu também para otimizar o tempo de processamento de imagens e diminuir a quantidade de informação da amostra.

Assim, eram recortadas três fatias da imagem total, sendo uma no lado esquerdo, outra no centro e outra no lado direito da imagem, as quais seriam utilizadas para substituir e representar a imagem completa. A figura 6.9a apresenta essa simplificação adotada. Cada fatia possuía uma largura fixa (160 colunas pixels) sendo que a altura variava para cada imagem. A exceção ficou para o depósito gerado pelo ensaio M_2 que foi avaliado ao longo

de toda a sua extensão vertical, uma vez que suas dimensões eram pequenas e o tempo de análise muito inferior aos demais. Com este fatiamento uniformizado, o número inicial de imagens foi multiplicado por três.

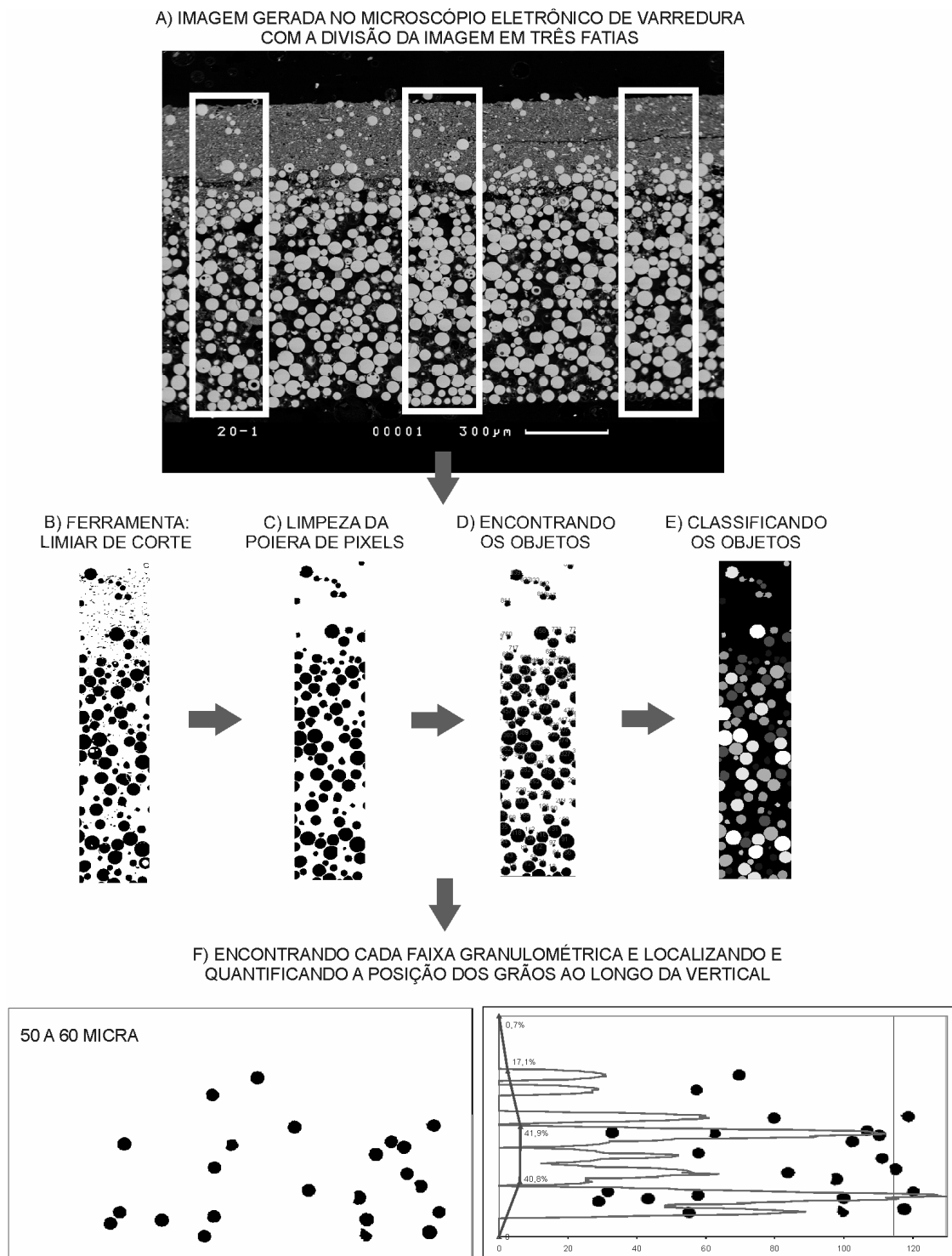


Figura 6.9 Etapas do método do processamento das imagens.

A partir desta preparação da imagem, sua análise foi iniciada utilizando o aplicativo Image Tool®. Neste aplicativo, as três fatias verticais coloridas eram repassadas para escalas de cinza (valores dos pixels variando entre 0 a 255) e era utilizada uma ferramenta no aplicativo que define um limiar de corte no histograma de frequência da escala de cinza, ou

seja, desconsiderando todos os pixels da imagem com os valores acima ou abaixo deste limiar (figura 6.9b).

Assim, essa ferramenta (*threshold*) varria o histograma de frequência da imagem (nos 256 valores possíveis) mostrando, em tempo real na própria imagem, como ficaria o resultado do corte aplicado. Como os dois materiais granulares utilizados possuíam formas muito distintas (circular para as esferas de vidro e plana para o Caulim), foi definido um limiar de corte que excluía um ou outro material, conforme o interesse do estudo. Esse limiar, então, era determinado para cada imagem e uma imagem binária (branca e preta) era gerada, com os pixels pretos representando as esferas de vidro (e uma “poeira de pixel de caulim”) e os pixels brancos representando os espaços onde antes havia caulim e/ou os espaços vazios do depósito. Entretanto, essa ferramenta não excluía totalmente todos os pixels indesejados (poeira de pixels do caulim), sendo necessário, posteriormente, fazer uma limpeza na imagem (figura 6.9c).

Devido à ampliação das imagens processadas no MEV ter sido de apenas 60x, muitas vezes, quando duas esferas de vidro estavam lado a lado, criava-se uma linha de pixels na ligação, que na realidade não existiria se fosse utilizada uma ampliação maior (p. ex. 400x). Essa linha virtual também deveria ser excluída, deixando as duas esferas com pixels em branco (vazios) no contato, caracterizando, assim, a presença dos objetos mais precisamente.

Então, a fim de corrigir e de limpar a “poeira” de pixels, foi utilizado o aplicativo Paint Brush®, excluindo, manualmente, com a ferramenta de apagar, a poeira de pixels que não correspondia às esferas de vidro. Com a ferramenta de linha, o contato entre as esferas era redesenhado também.

Com a imagem binária limpa, ou seja, só com a presença de esferas de vidro, foi novamente utilizado o aplicativo Image tool®, o qual realizava a calibração da imagem. A partir de um valor de comprimento conhecido, os valores de pixels eram transformados em milímetros (micra). Em seguida, com o uso de outra ferramenta do programa Image Tool® que identifica objetos (*objects analysis - find objects*) com limites fechados, eram encontrados, automaticamente, os círculos (esferas) de balotini (figura 6.9d). A cada objeto encontrado, era associado um número em sequência que o identificava. Desta forma, era definida a quantidade de sedimentos, que correspondia aos grãos de esferas de vidro presentes naquela fatia analisada. Com a opção de análise dos objetos (*objects analysis - Analyse*) do Image Tool®, todos os objetos encontrados eram classificados, automaticamente, com relação à área ocupada, perímetro, eixo de máximo comprimento e de menor comprimento, alongação e esfericidade.

Por fim, a última etapa da análise de objetos era realizada, com a opção da classificação (*objects analysis – classification*) que, a partir de um parâmetro previamente escolhido, no caso o eixo de maior comprimento, permitia definir faixas de valores para agrupá-los. Desta forma, dezesseis faixas granulométricas foram escolhidas (sendo a mesma em todos os ensaios) e os objetos encontrados eram classificados (tabela 6.7).

Tabela 6.7 Amostras coletadas e o número de grão encontrados (esferas de vidro)

Ensaio	Posição no canal	Colunas	Linhas	Numero de objetos na fatias		
				Esquerda	Centro	Direita
NC_05	280 cm	160	1050		531	
	180 cm	160	1080		577	
	080 cm	160	1130		654	
NC_10	280 cm	160	2360	1499	1535	1537
	180 cm	160	1650	868	877	862
	080 cm	160	1940	1228	1254	1255
NC_15	280 cm	160	2530		1041	
	180 cm	160	2580		1017	
	080 cm	-	-	-	-	-
NC_20	280 cm	160	2860	1824	1964	2013
	180 cm	160	2730	1706	1741	1745
	080 cm	160	2950	1833	1826	1820
NC_25	280 cm	160	3490	1405	1395	1444
	180 cm	160	2780	1215	1137	1133
	080 cm	160	3650	1326	1357	1429
NC_30	280 cm	160	4330	2122	2079	2141
	180 cm	-	-	-	-	-
	080 cm	160	3500	1618	1598	1588
NC_35	280 cm	160	3430	1899	1849	1833
	180 cm	160	3300	1635	1590	1622
	080 cm	160	2840	1469	1454	1469
M_2	280 cm	1022	558		705	
	180 cm	1022	558		714	
	080 cm	1022	558		881	
M_15	280 cm	160	1190		365	
	180 cm	160	1890		502	
	080 cm	160	1390	539	531	512
M_20	280 cm	160	3250	564	637	567
	180 cm	160	2520	581	579	542
	080 cm	-	-	-	-	-
M_25	280 cm	160	8150	2500	2425	2416
	180 cm	160	6440	2160	1989	2101
	080 cm	160	6200	1987	2173	2016
M_30	280 cm	160	6128	1572	1587	1637
	180 cm	160	7160	2047	2106	2043
	080 cm	-	-	-	-	-
M_35	280 cm	160	13376	3395	3413	3382
	180 cm	160	15310	3682	3710	3739
	080 cm	160	15210	3463	3463	3509
100B:0K	280 cm	160	2860	1824	1964	2013
	180 cm	160	2730	1706	1741	1745
	080 cm	160	2950	1833	1826	1820
90B:10K	280 cm	160	1680	865	840	835
	180 cm	160	1590	854	821	826
	080 cm	160	1930	943	946	991
75B:25K	280 cm	160	2020	810	766	805
	180 cm	160	1900	686	717	718
	080 cm	-	-	-	-	-
50B:50K	280 cm	160	3250	564	637	567
	180 cm	160	2520	581	579	542
	080 cm	-	-	-	-	-
25B:75K	280 cm	160	3380	527	528	642
	180 cm	160	5100	990	986	941
	080 cm	160	4160	768	797	851

O aplicativo então, gerava uma nova imagem na qual os objetos classificados apareciam em dezesseis diferentes cores (figura 6.9e). A nova imagem colorida, contendo a

classificação dos objetos era convertida para a escala de cinza e salva em formato de imagem de matriz de pixels (.raw). A partir daí, foi desenvolvido um aplicativo em Visual Basic 5.0, chamado “SEM IMAGES” (cujas características estão descritas no Anexo D), o qual processava as imagens das fatias, varrendo-as ao longo da vertical (linhas), identificando as cores (em gradação de cinza) e agrupando-as em seis intervalos granulométricos de 10 micra cada (figura 6.9f – a esquerda).

Para cada um destes seis intervalos, o aplicativo somava a quantidade de pixels que cada linha da matriz continha, gerando um gráfico de distribuição dos pixels ao longo do perfil vertical. Era possível dividir a imagem em áreas ao longo da vertical do depósito e determinar a porcentagem de sedimento presente em cada uma dessas áreas para cada faixa granulométrica (figura 6.9f – a direita) e, conseqüentemente, avaliar a gradação granulométrica interna do depósito. Os dados eram exportados em ordem para a planilha eletrônica e avaliados posteriormente.

6.5.9 Porcentagem do tipo de grão presente no depósito

Para determinar a porcentagem de cada material sedimentar nas amostras, foram utilizadas as mesmas imagens geradas no microscópio eletrônico de varredura. Com estas imagens, foi utilizado o aplicativo Image Tool® e a ferramenta limiar de corte (*threshold*), descrita na seção anterior, em duas etapas (figura 6.10a).

Primeiramente, uma imagem binária (branca e preta) era criada, com a utilização da ferramenta do limiar, porém, desta vez, os pixels pretos apresentavam os espaços vazios do depósito, enquanto que os pixels brancos representavam a quantidade de esferas de vidro e caulim presentes na imagem (figura 6.10b e 6.10c). A partir daí, foi desenvolvido um outro aplicativo em Visual Basic®, chamado “SEM_Images_Relation” (Anexo E) que varria esta imagem, contando e somando, a cada linha, a quantidade de espaços vazios (pixels pretos) e a quantidade de espaços com material presente (pixels brancos), apresentando no arquivo de saída, tanto os dados quantitativos (% de presença), quanto a distribuição ao longo da vertical (figura 6.10d).

Num segundo momento, foi utilizada a imagem gerada apenas com as esferas de vidro e aplicado o “SEM_Images_Relation”. Assim, com a utilização destas duas etapas, a quantidade de vazios e de esferas de vidro eram diretamente quantificadas e, pela subtração delas da imagem total, se obtinha indiretamente a quantidade de caulim.

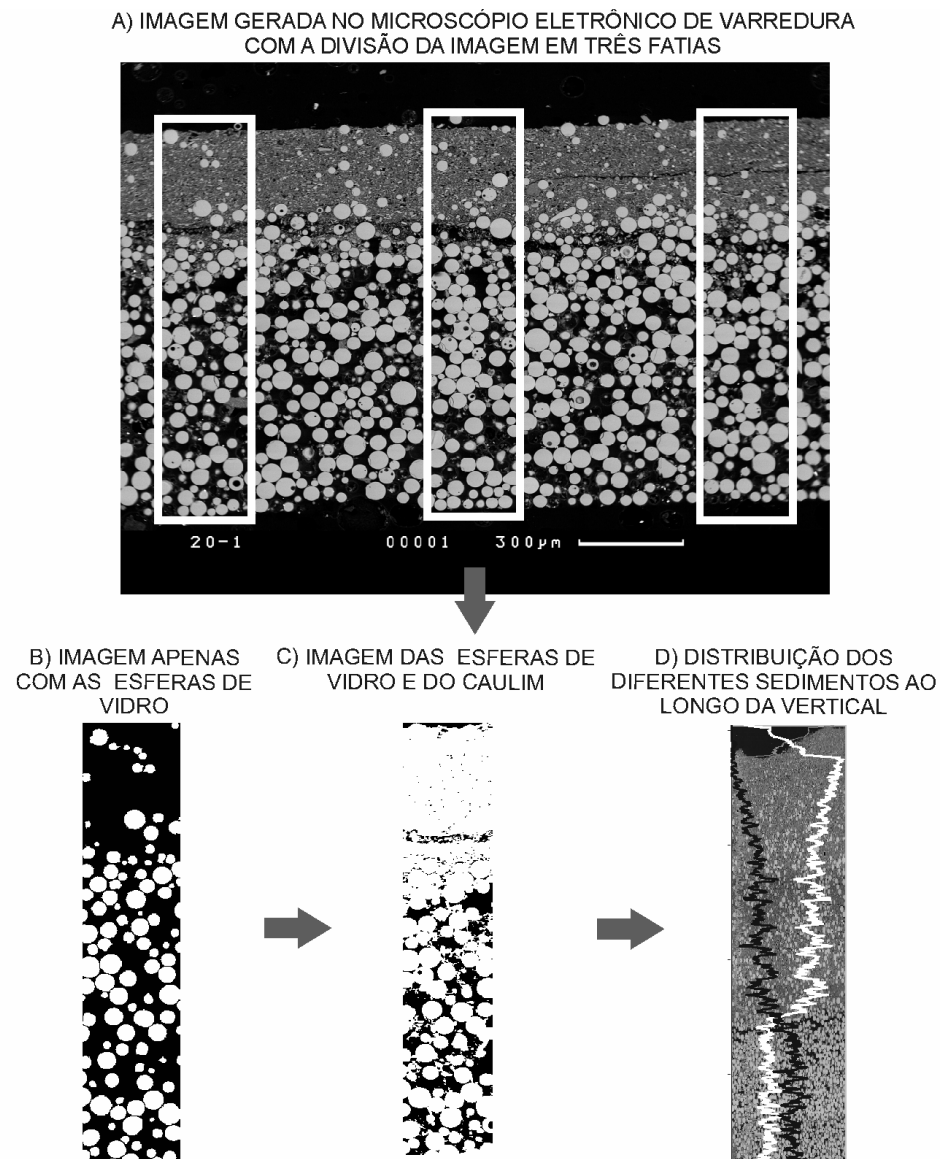


Figura 6.10 Etapas do método do processamento da imagem para determinação da granulometria.

6.5.10 Metodologia para a caracterização reológica das misturas

A caracterização reológica das misturas foi realizada utilizando o reômetro Bohlin, descrito no capítulo 5.3.6, com dois tipos de *spindles*: cone e prato (*cone and plate*), para as medições das misturas coesivas e mistas; e prato paralelo (*plate*), para as misturas não coesivas e de transição. A escolha do *spindle* foi realizada após os testes preliminares terem sido desenvolvidos, sendo que a primeira tentativa de utilizar o mesmo *spindle* para todos os grupos, no caso o cone e prato, não foi satisfatória, pois o material não coesivo “obstruiu” o espaço abaixo do cone ($C_{vol} > 25\%$). O *spindle* do tipo “prato paralelo” (*plate*) foi testado, no qual a altura entre o *spindle* e a mesa do equipamento poderia ser determinada pelo usuário. A distância entre o prato e a mesa foi determinada em 0,8 mm, uma vez que testes com

distâncias de 1,5 mm provocavam a segregação do material neste espaço e valores abaixo de 0,6 mm causaram o entupimento do mesmo.

Para o grupo misto e coesivo foram utilizados o *spindle* do tipo cone e prato. Apesar de ser utilizado material não coesivo no grupo misto, não houve o entupimento para as altas concentrações, devido à menor quantidade de material presente na mistura. Para esse *spindle*, a distância entre o prato e a mesa foi fixada pelo fabricante em 0,15 mm. Tendo em vista que os resultados do grupo misto e coesivo foram diferentes do grupo não coesivo, a avaliação da viscosidade da mistura para o grupo de transição foi realizada novamente com o *spindle* do tipo prato.

Para a realização dos testes, as misturas eram preparadas em potes separados, seguindo as mesmas concentrações e as mesmas proporções de argila e de areia das misturas a serem ensaiadas, totalizando 29 misturas diferentes.

A metodologia de operação do reômetro consistia em colocar o spindle selecionado no equipamento, ligá-lo e ajustar a temperatura do ensaio. Esta temperatura foi escolhida, a partir de uma média dos 29 ensaios realizados, sendo o valor na ordem dos 19°C. Após, era selecionado, no próprio aplicativo do equipamento, o tipo de ensaio a ser realizado, ou seja, variando a tensão de cisalhamento ou variando somente a tensão. A maneira de impor esta variação também era escolhida, entre crescente, decrescente ou crescente e decrescente (tixotropia), além do ajuste de tempo total de ensaio e da frequência de aquisição dos dados. A figura 7.11 apresenta os parâmetros de entrada do aplicativo.

Para ajustar esses parâmetros, foram realizados testes preliminares com os diferentes tipos de mistura, a fim de se determinar a faixa de variação das tensões e deformações a serem aplicadas, ou seja, para verificar o limite dos valores para que a suspensão não atingisse o estado turbulento (espalhamento da amostra – *wall slip*), bem como ajustar o tempo de ensaio e o tipo de ensaio. As misturas eram, então, colocadas gota a gota na mesa do equipamento até a medida especificada sem transbordar o *spindle*. Em seguida, a medição se realizava com o controle do aplicativo e o resultado era apresentado diretamente na tela do computador, no caso, a relação da tensão e deformação aplicada. Ao todo, foram realizados de cinco a seis repetições para cada tipo de mistura, sendo dois para cada método (crescente, decrescente e tixotropia). Após as medições, o equipamento era limpo e estava pronto para uma nova utilização. Ao todo, o procedimento era rápido, levando em média 20 minutos para cada medida.

Antes de cada série com as diferentes misturas, o mesmo método era aplicado para a água pura, a fim de aferir e comparar os resultados com os valores tabelados na literatura. Esses valores de referência (água limpa) foram um pouco acima dos valores indicados na

literatura, entretanto, como as leituras e os resultados foram relativos a este valor, a correção pode ser realizada. Essa diferença se deu pelo tipo de *spindle* utilizado, cujo uso não era recomendado com água, porém, como esta era a única opção, optou-se por trabalhar com os dados relativos. Os resultados serão apresentados no capítulo 7.

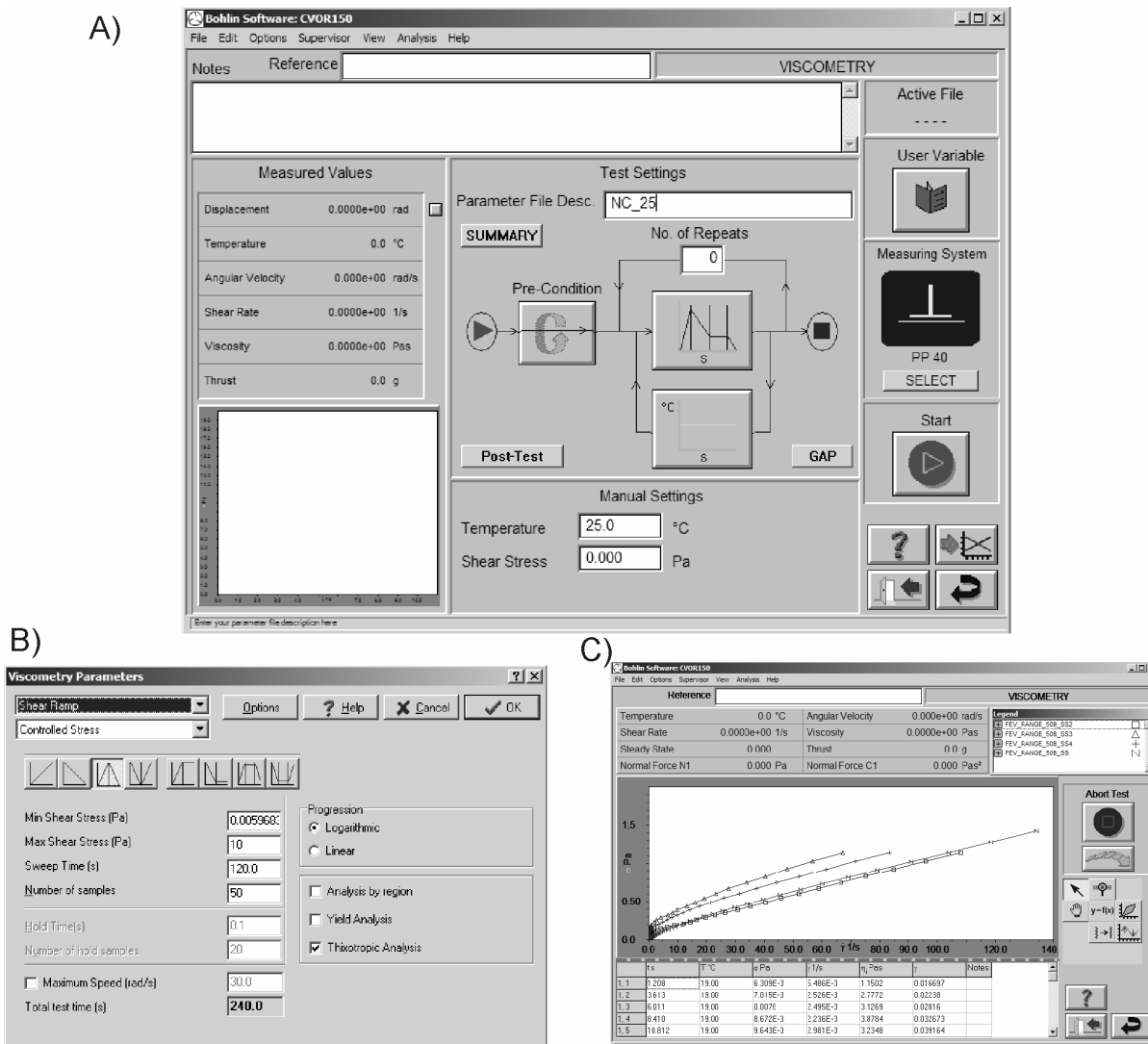


Figura 6.11 Imagens do aplicativo do reômetro Bohlin C-VOR: a) Parâmetros de entrada b) Parâmetros para o teste da viscosidade e; c) Tela de resultado do teste.

7 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DAS MISTURAS

Aplicando a metodologia descrita no capítulo 6.5.10, os dados da caracterização reológica das misturas foram interpretados e serão apresentados no que segue.

7.1 AJUSTE DO MODELO REOLÓGICO

Nos experimentos para a caracterização reológica, apesar de serem realizadas cinco ou seis repetições para cada mistura, os resultados apresentaram uma variabilidade na relação tensão-deformação. Nguyen e Boger (1992) fizeram uma revisão dos métodos de caracterização reológica de misturas em suspensão destacando que muitas variáveis e dificuldades experimentais estão envolvidas neste processo, o que implica em diferenças nos resultados. A partir disso, foram realizadas outras repetições nos ensaios de cada mistura, sendo escolhidos os resultados mais coerentes entre si. Como o aplicativo do reômetro apresentava todas as repetições dos ensaios em uma mesma janela (gráfico tensão x deformação), o descarte dos resultados incorretos era realizado diretamente na tela do computador. Feito isso, as curvas que guardavam uma mesma tendência na tensão-deformação (mais próximos) eram avaliadas. A figura 7.1 ilustra os resultados típicos de uma caracterização reológica com o descarte dos resultados incoerentes.

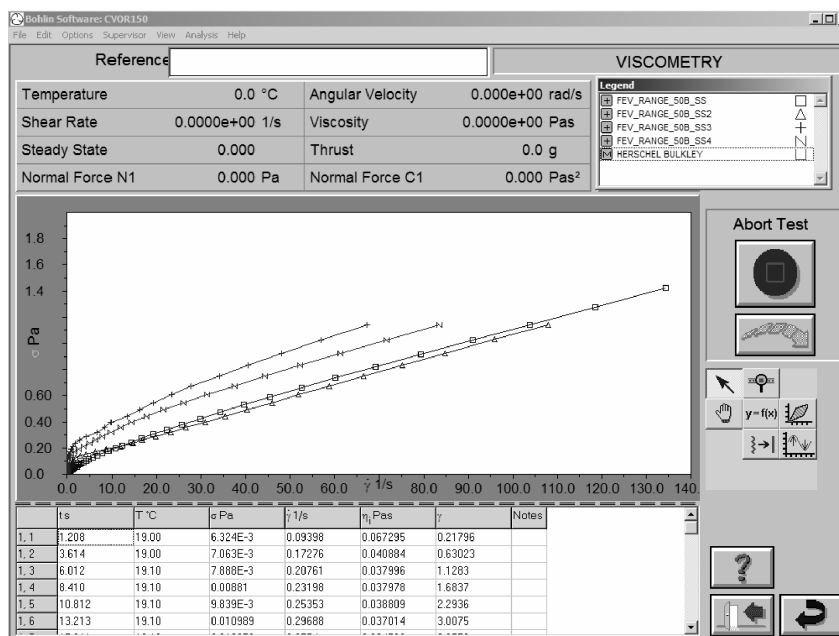
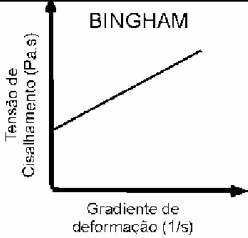
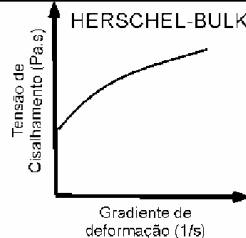
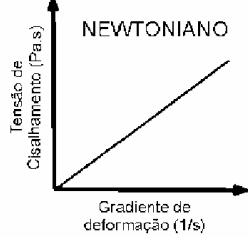
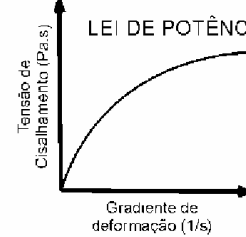


Figura 7.1 Resultado do teste reológico apresentando a relação tensão (eixo ordenadas) e deformação (eixo abscissa).

Após selecionar esses dados mais coerentes entre si, o aplicativo do equipamento disponibilizava uma opção para ajustar um modelo reológico clássico da literatura aos dados gerados, o que foi realizado para todos os ensaios. Primeiramente, a forma da curva de

resultado era comparada visualmente com os modelos da literatura e, aqueles que apresentavam alguma semelhança, eram selecionados. Ao todo, quatro tipos de modelos foram escolhidos para serem ajustados aos dados (tabela 7.1).

Tabela 7.1 Modelos reológicos testados no aplicativo

Lei	Equação	Representação Gráfica	
Bingham	$\tau = \tau_i + k \cdot \gamma$ (7.1)		
Herschel - Bulkley	$\tau = \tau_i + k \cdot \gamma^n$ (7.2)		
Newton	$\tau = \mu \cdot \gamma$ (7.3)		
Lei de Potência	$\tau = k \cdot \gamma^n$ (7.4)		

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa)

τ_i = tensão de cisalhamento crítica (Pa)

μ = coeficiente de viscosidade dinâmica (Pa.s)

γ = gradiente de velocidade (s^{-1})

k = coeficiente de consistência ($Pa \cdot s^n$)

n = coeficiente da lei de potência

As curvas eram agrupadas em uma única série de dados e o modelo escolhido era aplicado. O próprio aplicativo exibia o resultado estatístico, com o coeficiente de determinação e os parâmetros ajustados. A tabela 7.2 e a figura 7.2 apresentam os resultados ajustados para cada simulação. Com a determinação dos parâmetros de ajuste dos modelos apresentados na tabela 7.1, foi possível estabelecer leis constitutivas para as misturas empregadas nos ensaios, as quais serão discutidas, a seguir, para cada um dos grupos separadamente.

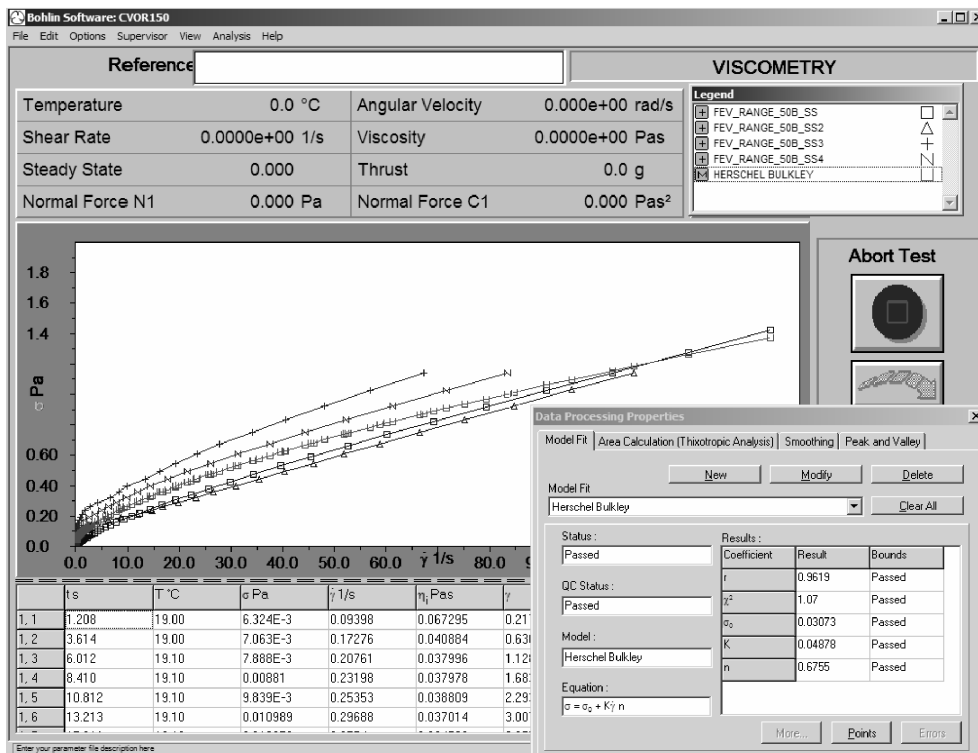


Figura 7.2 Exemplo de resultado do teste reológico e ajuste de modelo proposto (reômetro Bohlin C-VOR).

Tabela 7.2 Parâmetros estatísticos do ajuste dos modelos de Newton e de Herschel-Bulkley.

C _{vol}	Não-Coesivo (Newtoniano)				Misto			
	τ _y	k	n	R ²	τ _y	k	n	R ²
35	-	0,0093	1	99,82	0,297	5,8200	0,239	97,46
30	-	0,0086	1	99,83	0,145	0,7434	0,440	99,10
25	-	0,0078	1	99,31	0,058	0,3715	0,460	98,68
20	-	0,0073	1	99,21	0,012	0,0626	0,728	98,84
15	-	0,0067	1	97,75	0,009	0,0185	0,948	99,45
10	-	0,0060	1	98,43	0,006	0,0106	1,019	99,45
5	-	0,0058	1	99,92	0,008	0,0069	1,041	99,70
2,5	-	0,0054	1	99,93	0,004	0,0059	1,039	99,90
Água	-	0,0051	1	99,77	0,000	0,0036	1	99,95

C _{vol}	Coesivo				Arg	Transição			
	τ _y	k	n	R ²		τ _y	k	n	R ²
25	1,100	10,1200	0,310	*	100	0,590	2,3650	0,325	*
20	0,298	2,1890	0,420	*	90	0,170	1,3030	0,374	*
15	0,019	0,2730	0,515	97,25	75	0,042	0,2568	0,558	*
10	0,014	0,0780	0,602	95,69	50	0,017	0,0259	0,808	99,21
5	0,003	0,0060	0,930	99,60	25	-	0,0073	1	99,97
2,5	0,003	0,0030	1,010	99,82	10	-	0,0070	1	99,99
Água	0,000	0,0030	1,000	99,73	0	-	0,0069	1	99,97
					Água	-	0,0051	1	99,77

* obtenção dos parâmetros manualmente a partir do ajuste prévio do aplicativo do reômetro.

7.2 REOLOGIA DAS MISTURAS NÃO-COESIVAS.

Considerando os dados das misturas não-coesivas, o modelo reológico que melhor se ajustou aos resultados dos experimentos, independente da concentração da mistura ensaiada, foi o modelo de Newton (equação 7.3), ou seja, a lei de Newton da viscosidade, segundo a qual a tensão cisalhante é linearmente proporcional à deformação (gradiente de velocidade) e o coeficiente de proporcionalidade (coeficiente angular) desta relação é o coeficiente de viscosidade dinâmica da mistura (viscosidade dinâmica). Assim, a figura 7.3 apresenta as relações encontradas para todas as concentrações avaliadas, bem como a tabela 7.3 mostra os parâmetros ajustados pela regressão linear.

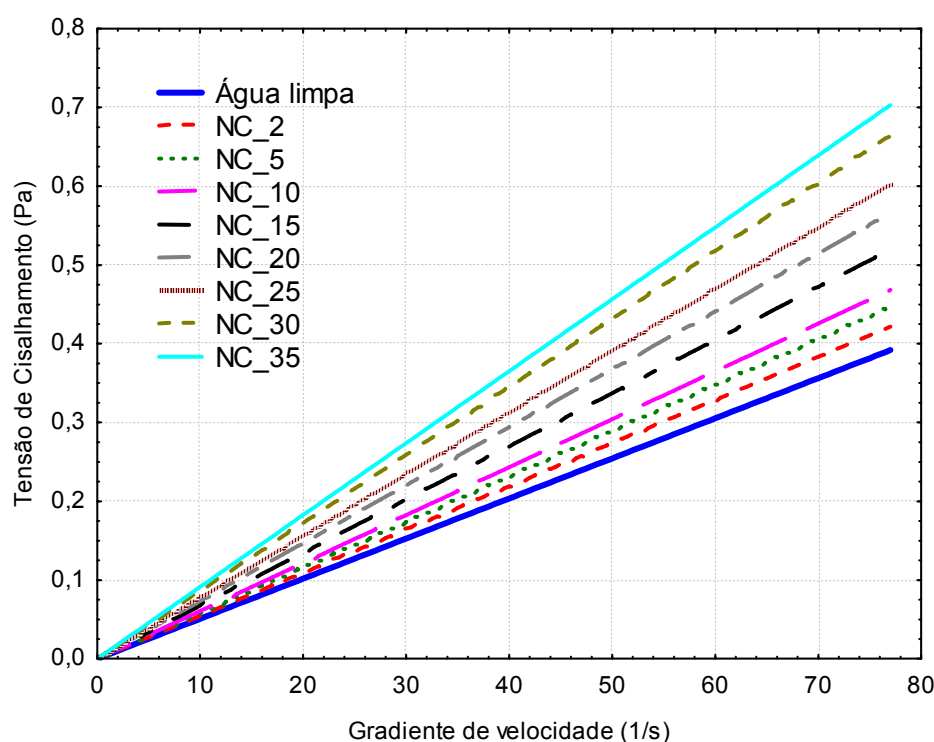


Figura 7.3 Relação entre tensão de cisalhamento e a deformação (gradiente de velocidade) para o grupo não coesivo

Tabela 7.3 Viscosidade relativa para o grupo não coesivo em função da concentração volumétrica da mistura

Concentração Volumétrica (%)	Coefficiente de viscosidade dinâmica – μ (Pa.s)	Viscosidade Relativa μ/μ_0
35	0,0093	1,79
30	0,0086	1,70
25	0,0078	1,54
20	0,0073	1,44
15	0,0067	1,33
10	0,0060	1,19
5	0,0058	1,14
2,5	0,0054	1,08
Água - μ_0	0,0051	1,00

O coeficiente de viscosidade dinâmico era determinado após a correção das medidas absolutas do equipamento, conforme já citado, e adimensionalizado pelo coeficiente de viscosidade da água, resultando em uma viscosidade relativa da mistura.

7.2.1 Relação entre o coeficiente de viscosidade dinâmico e a concentração volumétrica

Com determinação dos valores da viscosidade dinâmica relativa para diferentes concentrações, foi possível estabelecer uma relação entre essas variáveis. Assim, a partir dos valores da tabela 7.3, foi realizada uma outra regressão nos dados, de modo a obter uma lei correlacionando as variáveis envolvidas. A figura 7.4 apresenta os dados plotados, bem como o ajuste proposto, no caso, uma regressão linear simples entre as variáveis.

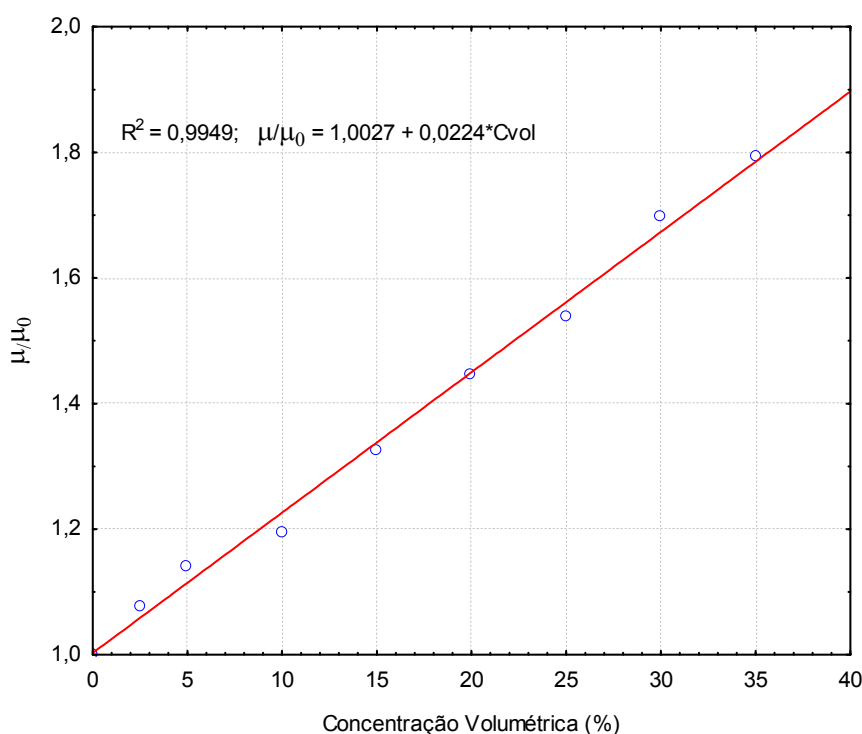


Figura 7.4 Relação entre a concentração volumétrica e a viscosidade relativa para o grupo não coesivo

Os resultados exibidos na figura 7.4 indicam que há uma relação linear com um coeficiente de determinação (R^2) de 99,49% entre a viscosidade dinâmica relativa e a concentração expressa na equação 7.5.

$$\frac{\mu_{\text{Não Coesivo}}}{\mu_0} = 1 + 0,0224 \cdot C_{vol} \quad (7.5)$$

Onde:

$\mu_{\text{Não Coesivo}}$ = coeficiente de viscosidade dinâmica da mistura (Pa.s)

μ_0 = coeficiente de viscosidade dinâmica da água (Pa.s)

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%)

Com esta equação determinada, foi possível estabelecer a relação entre viscosidade dinâmica da mistura não-coesiva, a partir de qualquer valor de concentração volumétrica medida. Como essa caracterização reológica foi estabelecida para misturas com até 35%, a extrapolação para concentrações maiores deve ser realizadas com cuidado.

Breve discussão

A caracterização reológica das misturas do grupo não coesivo indicou um comportamento Newtoniano, ou seja, uma relação direta entre a tensão e a deformação. A partir dessa classificação, foi possível estabelecer uma relação linear entre os valores da viscosidade dinâmica com a concentração volumétrica (equação 7.5), o que permite avaliar corretamente o efeito da viscosidade sobre os parâmetros hidrodinâmicos deste tipo de fluxo. Nesse caso, os valores dos coeficientes numéricos de ajuste foram semelhantes aos encontrados na literatura para misturas com grãos não coesivos (p.ex: Einstein, 1906; Coussot, 1997; entre outros).

A caracterização reológica foi realizada até a concentração volumétrica de 35% apenas. A extrapolação para valores maiores que este deve ser realizada com cuidado, uma vez que pode haver uma mudança nesse comportamento. A utilização da equação 7.5, se justifica pelo alto valor do coeficiente de determinação, evidenciando uma boa correlação entre os dados. Coussot (1997) e Wan e Wang (1994) apresentam uma revisão sobre o assunto e uma série de formulas para concentrações maiores que 35%.

7.3 REOLOGIA DAS MISTURAS MISTAS

O mesmo procedimento descrito acima foi repetido para o grupo misto, sendo que modelo reológico que apresentou os melhores resultados foi o modelo de Herschel – Bulkley (equação 7.2) que se caracteriza por apresentar uma tensão de cisalhamento crítica que é somada a lei de potência, o qual é aplicado para fluidos com comportamento plástico. A figura 7.5 apresenta os resultados dos ensaios reológicos e a tabela 7.4, os parâmetros ajustados.

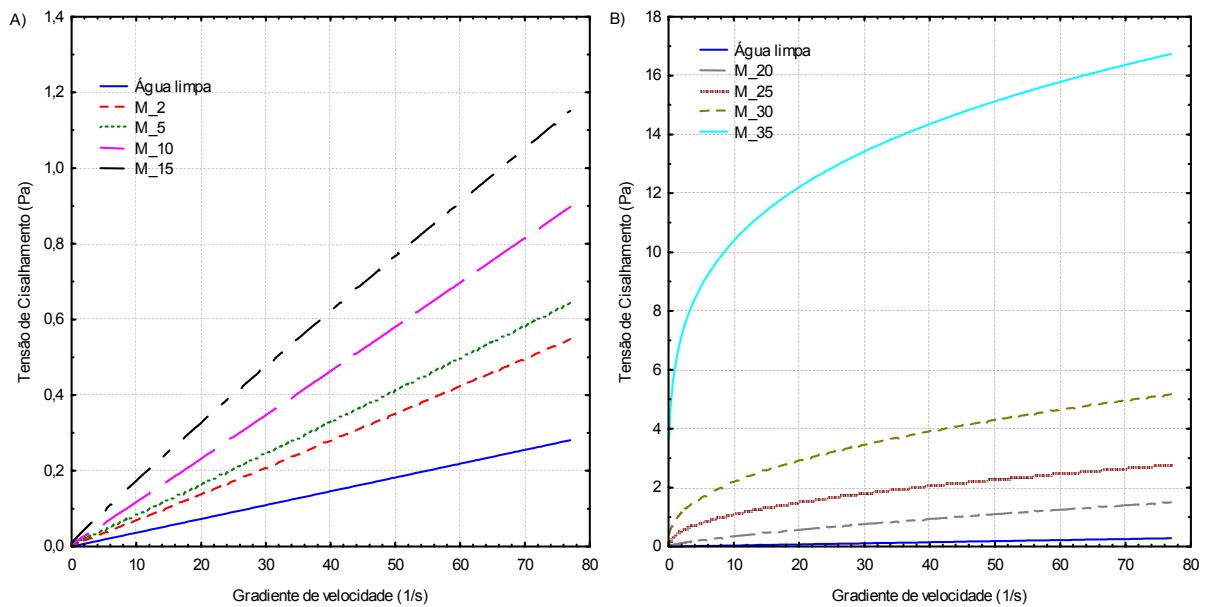


Figura 7.5 Relação entre tensão de cisalhamento e a deformação (gradiente de velocidade) para o grupo misto: a) Concentração volumétrica de 2,5 a 15% e; b) Concentração volumétrica de 20 a 35%

Pela análise da figura 7.5, nota-se que, para as correntes simuladas com até 15% da concentração volumétrica (M_15), os parâmetros ajustados ficam muito próximos dos valores que representariam um modelo linear, no caso, com a tensão crítica muito próxima de zero e com coeficiente da lei de potência aproximadamente um. Assim, para concentrações abaixo de 15% ainda é possível um bom ajuste ao modelo Newtoniano, de mais simples manipulação, reservando-se o modelo de Herschel-Bulkley, mais complexo, para concentrações superiores.

Tabela 7.4 Valores dos parâmetros ajustados para o grupo misto.

Concentração Volumétrica (%)	$\tau_{y(\text{misto})}$	$k_{(\text{misto})}$	$n_{(\text{misto})}$	Tipo de modelo
35	0,297	5,820	0,239	Herschel - Bulkley
30	0,145	0,743	0,440	
25	0,058	0,372	0,460	
20	0,012	0,063	0,729	
15	-	0,0173	1	Newtoniano
10	-	0,0114	1	
5	-	0,0084	1	
2,5	-	0,0071	1	
Água – μ_0	-	0,0036	1	

7.3.1 Relação entre a tensão crítica e concentração volumétrica inicial

Para as misturas cuja viscosidade foi ajustada pelo modelo de Herschel-Bulkley ($C_{vol} > 15\%$), foi possível correlacionar os valores da tensão de cisalhamento crítica com a concentração volumétrica inicial, cujos ajustes são exibidos na figura 7.6.

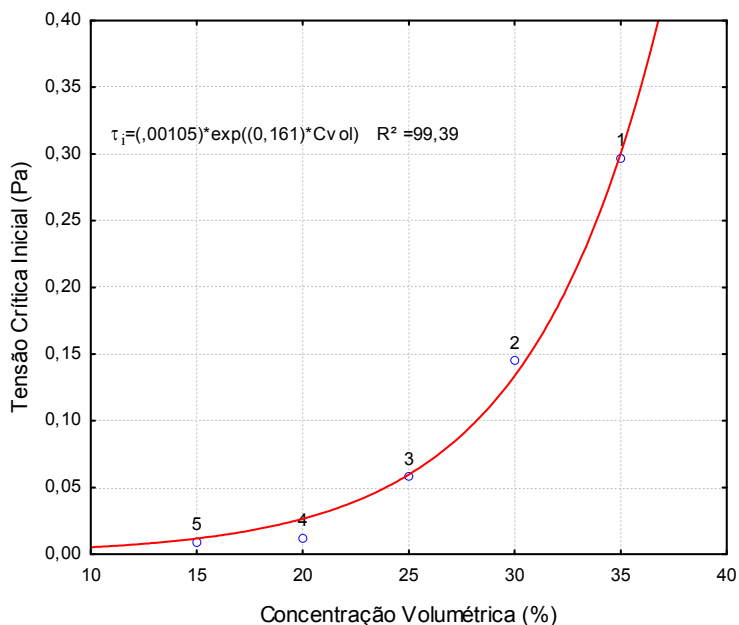


Figura 7.6 Relação entre a tensão de cisalhamento crítica e a concentração volumétrica para as misturas do grupo misto

Como pode ser observado na figura 7.6, os valores apresentaram uma tendência de aumento à medida que a concentração aumenta, entretanto, esse comportamento não foi linear. Assim, o melhor ajuste para os dados foi a regressão exponencial, com um coeficiente de determinação (R^2) de 99,39%, relacionando $\tau_{i(misto)} = f(C_{vol})$, cujo ajuste empírico é apresentado na equação 7.6.

$$\tau_{i(misto)} = 0,00105 \cdot e^{(0,161 \cdot C_{vol})} \quad (7.6)$$

Onde:

$\tau_{i(misto)}$ = tensão de cisalhamento crítica (Pa)

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%)

7.3.2 Determinação da viscosidade aparente das misturas.

No grupo misto, a determinação do coeficiente de viscosidade dinâmica da mistura foi realizada seguindo dois procedimentos: o primeiro para as misturas com concentração volumétrica abaixo de 15% e o segundo, para concentração volumétrica maior que 20%. No primeiro caso, misturas cujo ajuste se deu através do modelo Newtoniano ($C_{vol} < 15\%$), o

valor da viscosidade absoluta foi estabelecido diretamente da curva tensão-deformação, seguindo os mesmos passos adotados para o grupo não coesivo.

Já para as concentrações mais altas, a variação da tensão de cisalhamento com o gradiente de deformação foi não-linear, caracterizando o fluido como não-Newtoniano, mais especificamente, como um fluido plástico. Desta forma, a determinação da viscosidade (coeficiente angular da curva) não é mais direta, implicando que, para cada valor de gradiente de deformação aplicado, haverá um valor do coeficiente de viscosidade dinâmica. Quando isso ocorre, a viscosidade passa a ser chamada de viscosidade aparente do fluido e não mais viscosidade absoluta (dinâmica) do fluido.

A viscosidade aparente foi determinada, então, para cada valor de deformação (gradiente de velocidade), através de uma série de curvas que relacionavam estas duas variáveis. Além disso, o valor da viscosidade aparente foi adimensionalizado pelo valor da água pura. A figura 7.7 demonstra esses resultados.

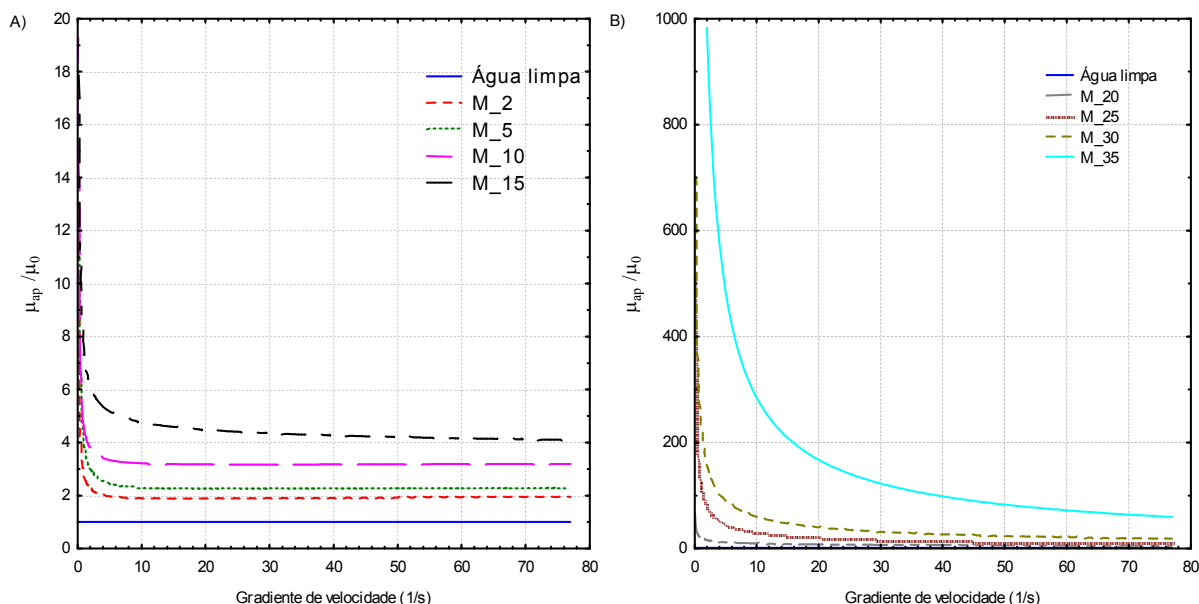


Figura 7.7 Relação entre a deformação (gradiente de velocidade) e a viscosidade aparente adimensionalizada pela viscosidade da água para as misturas do grupo misto: a) Concentração volumétrica de 2,5 a 15%; b) Concentração volumétrica de 20 a 35%

Com as curvas plotadas, foi ajustada uma tendência que representa o comportamento da viscosidade aparente com a variação do gradiente de deformação, no caso, um rearranjo da equação 7.2 (modelo de Herschel-Bulkley), pois considera apenas a parcela do ajuste de potência (equação 7.7).

$$\frac{\mu_{ap(misto)}}{\mu_0} = \kappa_{(misto)} \cdot \gamma^{\beta(misto)} \quad (7.7)$$

Onde:

$\mu_{ap(misto)}$ = coeficiente de viscosidade aparente (Pa.s)

μ_0 = coeficiente de viscosidade dinâmica da água (Pa.s)

$\kappa_{(misto)}$ = coeficiente de ajuste da lei com dimensão de tempo (s)

γ = gradiente de velocidade (s^{-1})

$\beta_{(misto)}$ = coeficiente da lei de potência

A tabela 7.5 exibe os parâmetros determinados no ajuste. Nota-se também, um exemplo de aplicação das leis ajustadas para o caso de uma deformação de $25 s^{-1}$.

Tabela 7.5 Parâmetros ajustados para o grupo misto

Concentração Volumétrica (%)	$\kappa_{(misto)}$	$\beta_{(misto)}$	Viscosidade Relativa μ/μ_0	Viscosidade aparente relativa para $25 s^{-1}$.	Tipo de modelo
35	1676,3	-0,77		203,41	Herschel - Bulkley
30	243,56	-0,60	-	46,47	
25	117,81	-0,57		24,20	
20	20,79	-0,32		8,38	
15	0,0173	1	4,73		Newtoniano
10	0,0114	1	3,11		
5	0,0084	1	2,29	-	
2,5	0,0071	1	1,94		
água	0,0036	1	1,00		

7.3.3 Relação entre o coeficiente de viscosidade dinâmico e a concentração volumétrica

A figura 7.8 mostra os resultados da relação entre o coeficiente de viscosidade dinâmica relativo para as misturas com comportamento Newtoniano ($C_{vol} < 15\%$) com a concentração volumétrica inicial das misturas. Neste caso, essa determinação era realizada diretamente, conforme já apresentado no item 7.2.1.

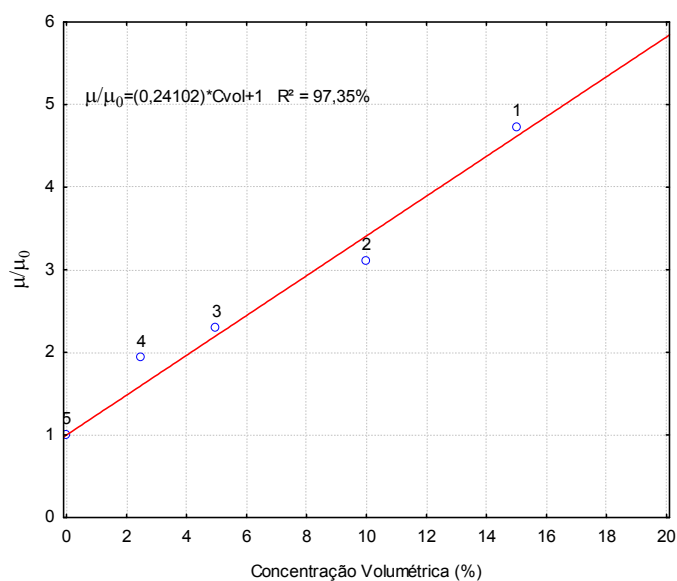


Figura 7.8 Relação entre a concentração volumétrica (menor que 15%) e a viscosidade relativa para as misturas do grupo misto.

Os resultados apresentados na figura 7.8 indicam que há uma relação linear entre os parâmetros analisados, com um coeficiente de determinação (R^2) de 97,35%. A equação ajustada está representada abaixo.

$$\frac{\mu_{(\text{misto})}}{\mu_0} = 1 + 0,241 \cdot C_{\text{vol}} \quad (7.8)$$

Onde:

$\mu_{(\text{misto})}$ = coeficiente de viscosidade dinâmica da mistura (Pa.s)

μ_0 = coeficiente de viscosidade dinâmica da água (Pa.s)

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%)

Para as correntes com concentração maiores que 20%, como foi descrito anteriormente, a tabela 7.5 estabelece uma relação entre a viscosidade aparente e o gradiente de deformação para cada uma das concentrações medidas. Neste caso, como todas as funções ajustadas foram a lei de potência foi verificado que os coeficientes desta lei poderiam ser função da concentração volumétrica também, ou seja, $\kappa_{(\text{misto})} = f(C_{\text{vol}})$ e $\beta_{(\text{misto})} = f(C_{\text{vol}})$. Sendo assim, esses parâmetros foram plotados em relação a concentração volumétrica e foi aplicada uma lei de ajuste para identificar alguma tendência. A figura 7.9 apresenta esses resultados.

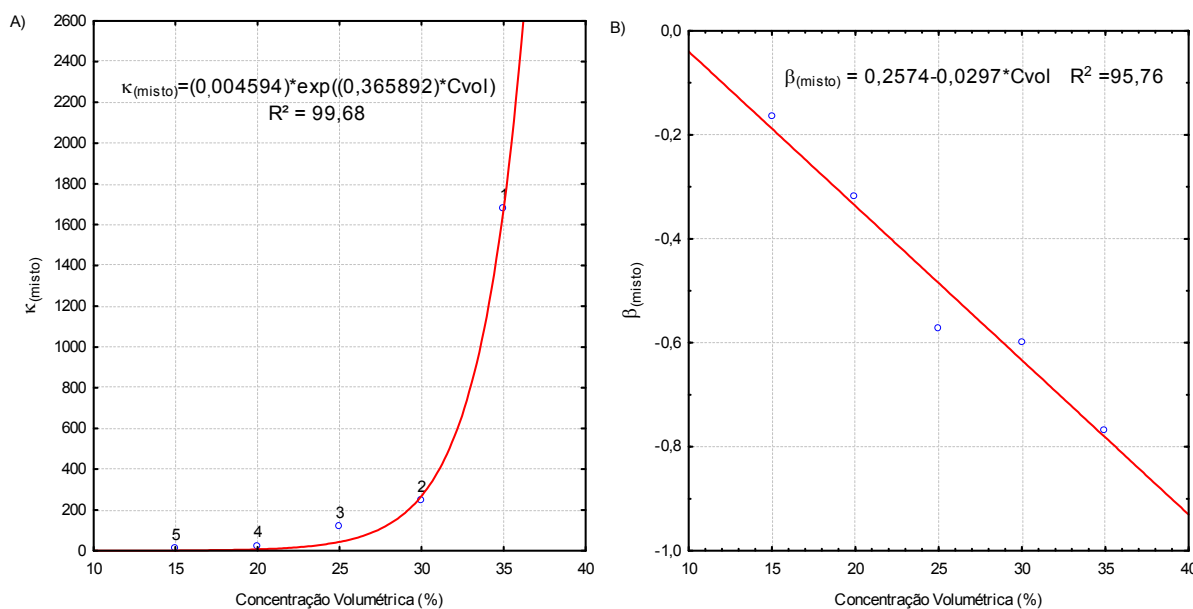


Figura 7.9 Ajuste de dados dos parâmetros $\kappa_{(\text{misto})}$ e $\beta_{(\text{misto})}$ do modelo de Herschel- Bulkley para as misturas do grupo misto em função da concentração volumétrica.

A partir da análise da figura 7.9, foi determinada uma relação, seguindo uma tendência exponencial para o parâmetro $\kappa_{(\text{misto})}$, enquanto que o parâmetro $\beta_{(\text{misto})}$, variou linearmente com a concentração volumétrica. As equações abaixo representam as relações obtidas. Os

coeficientes de determinação foram, respectivamente, 99,68% e 95,76% para os ajustes propostos.

$$\kappa_{(\text{misto})} = 0,00459 \cdot e^{(0,3658 \cdot C_{\text{vol}})} \quad (7.9)$$

e

$$\beta_{(\text{misto})} = 0,2574 - 0,0297 \cdot C_{\text{vol}} \quad (7.10)$$

Onde:

$\kappa_{(\text{misto})}$ = coeficiente de ajuste da lei (s)

$\beta_{(\text{misto})}$ = coeficiente da lei de potência

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%).

Com a obtenção das equações 7.9 e 7.10 foi possível estabelecer uma equação que relacionava a viscosidade aparente relativa com a concentração volumétrica e o gradiente de velocidade para fluxos do grupo misto (substituindo os valores na equação 7.7). Assim, a equação 7.12 apresenta o resultado final do ajuste realizado para as misturas desse grupo de ensaios.

$$\frac{\mu_{\text{ap(misto)}}}{\mu_0} = \kappa_{(\text{misto})} \cdot \gamma^{\beta_{(\text{misto})}} \quad (7.7)$$

Substituindo os termos das equações 7.9 e 7.10.

$$\frac{\mu_{\text{ap(misto)}}}{\mu_0} = 0,0046 \cdot e^{(0,366 \cdot C_{\text{vol}})} \cdot \gamma^{(0,257-0,0297 \cdot C_{\text{vol}})} \quad (7.11)$$

Onde:

$\mu_{\text{ap(misto)}}$ = coeficiente de viscosidade aparente (Pa.s)

μ_0 = coeficiente de viscosidade dinâmica da água (Pa.s)

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%)

γ = gradiente de velocidade (s^{-1})

A figura 7.10 exibe os resultados da aplicação da equação 7.11, pela qual, partindo da concentração da mistura e do gradiente de velocidade, pode-se avaliar, em qualquer ponto do escoamento, o valor do coeficiente de viscosidade aparente para as misturas utilizadas nesse ensaio.

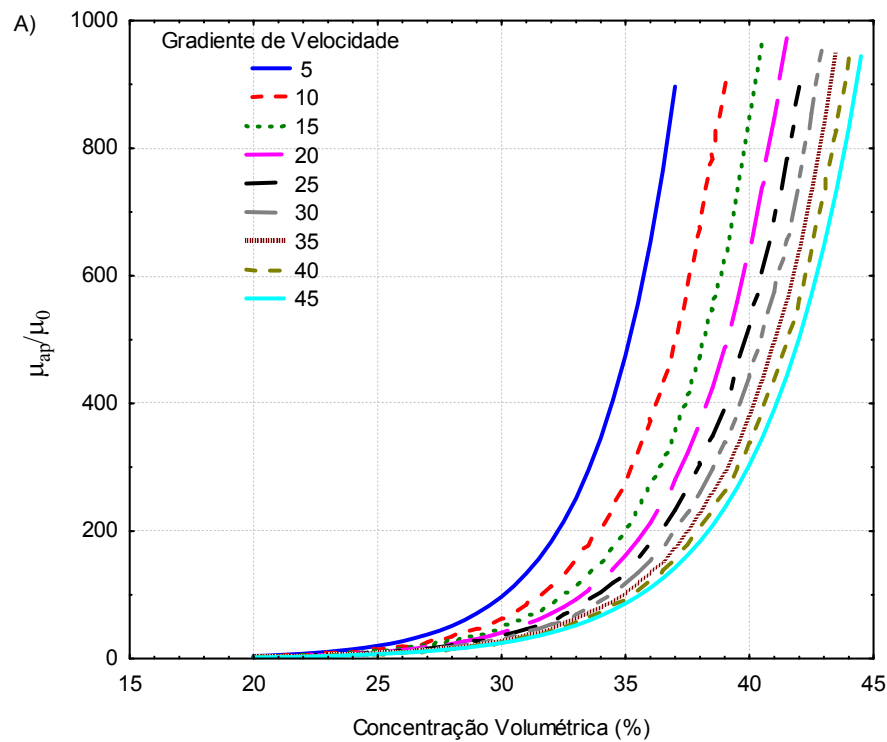


Figura 7.10 Relação da viscosidade aparente relativa com a concentração volumétrica para diferentes gradientes de velocidade (grupo misto).

Breve discussão

Na caracterização reológica, o grupo misto apresentou, para as misturas ensaiadas, um comportamento não Newtoniano, com o melhor modelo de ajuste sendo de Herschel-Bulkley. Esse tipo de modelo reológico é aplicado para as misturas com comportamento plástico, ou seja, aquelas que começam a se deformar após superar a tensão de cisalhamento crítica.

Para as mais baixas concentrações, esse modelo pode ser substituído pelo modelo Newtoniano, que simplifica a análise, pois pode-se determinar diretamente a relação entre a viscosidade dinâmica e a concentração.

Já para as correntes de mais alta densidade ($C_{vol} > 20\%$), essa definição não é mais direta, uma vez que, para cada valor de deformação, existe um valor de viscosidade, no caso chamada de viscosidade aparente. Para essas misturas, os parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley foram correlacionados tanto com a concentração volumétrica, quanto com o gradiente de deformação. A equação 7.11 apresenta a relação final para essas misturas mais concentradas do grupo misto (acima de 20%).

Cabe salientar que a transição entre o modelo Newtoniano e o modelo de Herschel-Bulkley não é pontual e definida por um limite definido de concentração, mas sim, representa uma mudança gradativa entre valores de concentração situados entre 15% e 20%.

A relação entre a tensão crítica e a concentração inicial seguiu um comportamento exponencial, indicando que, para as maiores concentrações volumétricas, esse comportamento será maximizado, com uma tendência maior de obtenção de um comportamento plástico para a amostra.

As implicações da mudança de comportamento reológico identificado para esse grupo, serão discutidas no capítulo 11.

7.4 REOLOGIA DAS MISTURAS COESIVAS

Os resultados do grupo coesivo foram muito similares aos resultados obtidos para o grupo misto, em termos de comportamento das misturas (figura 7.11).

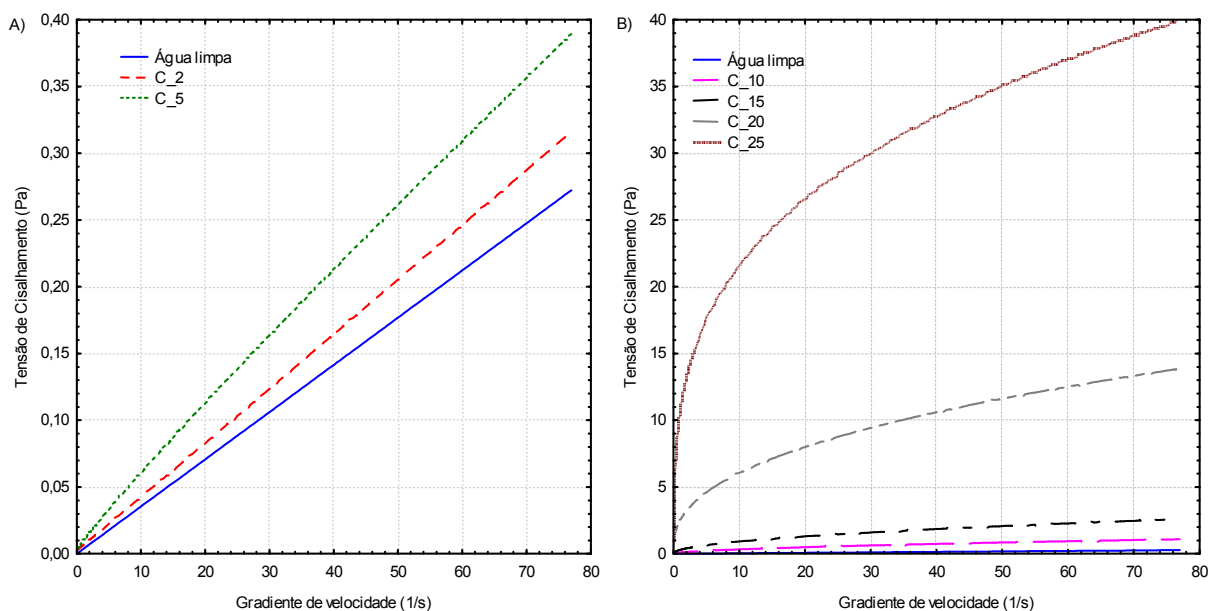


Figura 7.11 Relação entre tensão de cisalhamento e a deformação (gradiente de velocidade) para o grupo coesivo: a) Concentração volumétrica de 2,5 e 5% e; b) Concentração volumétrica de 10 a 25%

Novamente, o modelo de Herschel-Bulkley foi o que se melhor ajustou aos experimentos, entretanto, para as correntes de menor concentração, no caso ($C_{vol} < 5\%$), foi utilizada a simplificação para o modelo Newtoniano. Aplicando-se a mesma metodologia de análise descrita no item anterior (item 7.3), a tabela 7.6 e a figura 7.12 apresentam, respectivamente, o comportamento reológico do grupo coesivo, bem como o ajuste realizado.

Tabela 7.6 Valores dos parâmetros ajustados para o grupo coesivo.

Concentração Volumétrica (%)	$\tau_{y(\text{coesivo})}$	$k_{(\text{coesivo})}$	$n_{(\text{coesivo})}$	Tipo de modelo
25	1,100	10,123	0,310	Herschel – Bulkley
20	0,298	2,189	0,420	
15	0,019	0,273	0,516	
10	0,014	0,078	0,602	
5	-	0,0067	1	Newtoniano
2,5	-	0,0039	1	
Água – μ_0	-	0,0035	1	

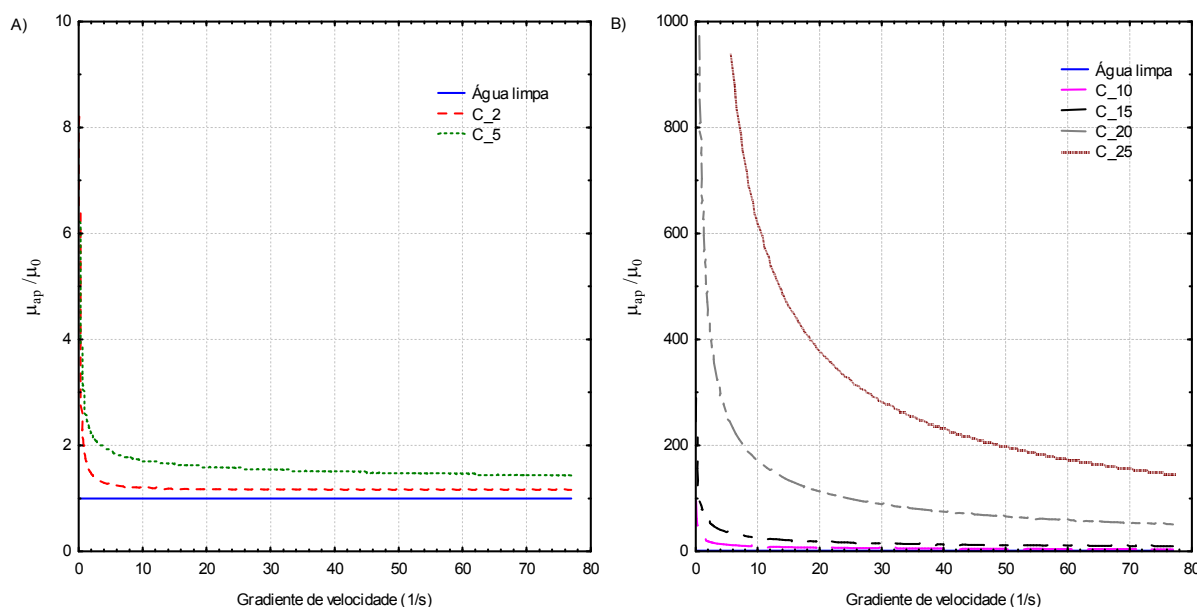


Figura 7.12 Relação entre a deformação (gradiente de velocidade) e a viscosidade aparente adimensionalizada pela viscosidade da água para as misturas do grupo coesivo.

a) concentração volumétrica de 2,5 e 5%. b) concentração volumétrica de 10 a 25%

Pela análise da figura 7.12, nota-se que, para o grupo C_25%, a relação tensão-deformação situou-se muito acima dos demais, indicando a forte influência da presença da argila no comportamento reológico da mistura. Novamente, foi determinada a relação que representava o comportamento da viscosidade aparente com a variação do gradiente de deformação. A tabela 7.7 exibe as equações ajustadas para esse grupo.

Tabela 7.7 Parâmetros ajustados para o grupo coesivo

Concentração Volumétrica (%)	$\kappa_{(\text{coesivo})}$	$\beta_{(\text{coesivo})}$	Viscosidade Relativa μ/μ_0	Viscosidade aparente relativa para 25 (s^{-1})	Modelo
25	3171,4	-0,71		318,51	Herschel – Bulkley
20	703,36	-0,61		97,89	
15	82,77	-0,50	-	16,30	
10	26,29	-0,44		6,28	
5	-	1	1,55		Newtoniano
2,5	-	1	1,19	-	
água	-	1	1,00		

7.4.1 Relação entre a tensão crítica e concentração volumétrica inicial

Com os valores dos parâmetros ajustados para o grupo coesivo (tabela 7.6), foi possível correlacionar os valores da tensão de cisalhamento crítica com a concentração inicial. Neste grupo, os resultados ajustados foram maiores que no grupo misto, entretanto, a tendência dos dados indicou, novamente, uma função exponencial de aumento. A figura 7.13 ilustra os valores para as concentrações maiores que 10%, bem como a curva de ajuste aplicada nos dados.

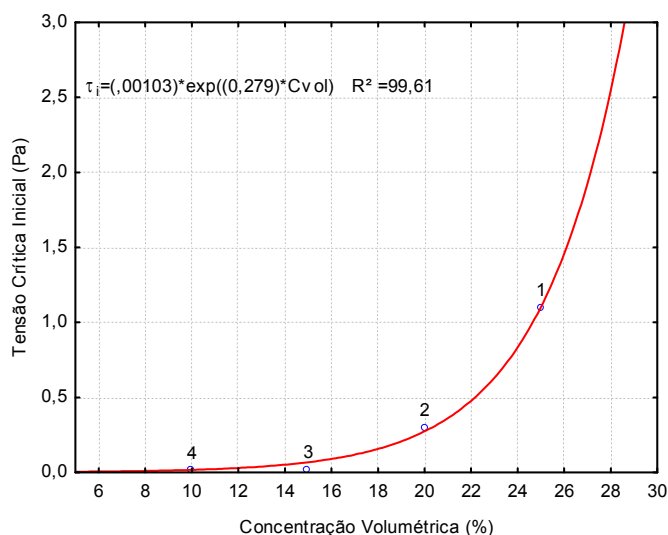


Figura 7.13 Relação entre a tensão de cisalhamento crítica e a concentração volumétrica para as misturas do coesivo

A equação 7.12 representa o ajuste exponencial realizado com os dados da figura 7.13. O coeficiente de determinação foi de 99,61%.

$$\tau_{i(\text{coesivo})} = 0,00103 \cdot e^{(0,279 \cdot C_{vol})} \quad (7.12)$$

Onde:

$\tau_{i(\text{coesivo})}$ = tensão de cisalhamento crítica (Pa)

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%)

7.4.2 Relação entre o coeficiente de viscosidade dinâmico e a concentração volumétrica

Seguindo o mesmo método adotado para o grupo misto, a concentração do grupo coesivo foi dividida em faixas de concentração. Para os valores abaixo de 10%, foi verificado que o comportamento linear exprime, de forma conveniente, a relação entre a tensão e deformação. A figura 7.14 representa graficamente essa relação.

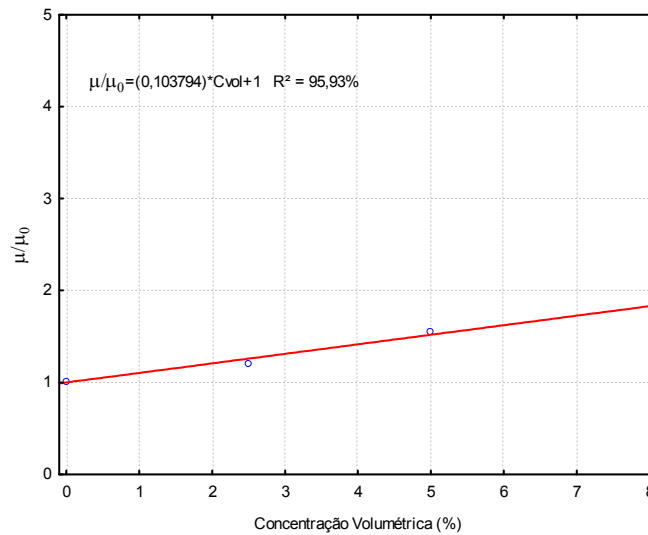


Figura 7.14 Relação entre a concentração volumétrica (menor que 10%) e a viscosidade relativa para o grupo coesivo.

Apesar da pouca quantidade de pontos, os resultados descritos pela figura 7.14 indicam que há uma relação linear, com um coeficiente de determinação (R^2) de 95,93%. Desta forma, a equação 7.13 pode ser ajustada para expressar a relação entre as variáveis quando $C_{vol} < 10\%$:

$$\frac{\mu_{(coesivo)}}{\mu_0} = 1 + 0,1038 \cdot C_{vol} \quad (7.13)$$

Onde:

$\mu_{(coesivo)}$ = coeficiente de viscosidade dinâmica (Pa.s)

μ_0 = coeficiente de viscosidade dinâmica da água (Pa.s)

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%)

Para as misturas coesivas com concentração maiores que 10%, como já descrito anteriormente, a tabela 7.7 estabelece uma relação entre a viscosidade aparente e o gradiente de deformação para cada uma das concentrações medidas. Neste caso, como todas as funções ajustadas foram do tipo potência, foi verificado que os coeficientes desta lei, também poderiam ser função da concentração volumétrica, ou seja, $\kappa_{(coesivo)} = f(C_{vol})$ e $\beta_{(coesivo)} = f(C_{vol})$. Sendo assim, esses parâmetros foram plotados em função da concentração volumétrica e foi aplicada uma lei de ajuste para identificar alguma tendência. A figura 7.15 apresenta os resultados encontrados.

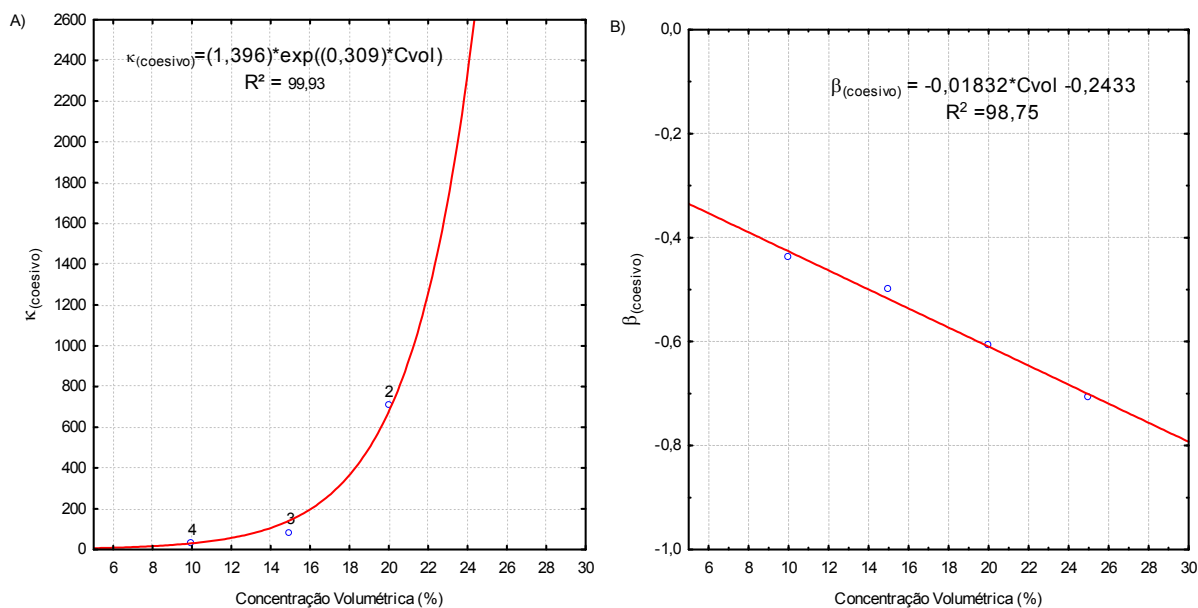


Figura 7.15 Ajuste de dados dos parâmetros κ_{coesivo} e β_{coesivo} do modelo de Herschel- Bulkley para as misturas do grupo coesivo em função da concentração volumétrica.

Com o ajuste desses parâmetros em função da concentração, verificou-se que o parâmetro $\kappa_{\text{(coesivo)}}$ varia exponencialmente com a concentração volumétrica, enquanto que o parâmetro $n_{\text{(coesivo)}}$ varia linearmente. Sendo $\kappa_{\text{(coesivo)}} = f(C_{\text{vol}})$ e $\beta_{\text{(coesivo)}} = f(C_{\text{vol}})$, as equações abaixo representam as relações determinadas, com um coeficiente de determinação de 99,93% e 98,75%, respectivamente.

$$\kappa_{\text{(coesivo)}} = 1,3962 \cdot e^{(0,30916 \cdot C_{\text{vol}})} \quad (7.14)$$

e

$$\beta_{\text{(coesivo)}} = -0,2433 - 0,01832 \cdot C_{\text{vol}} \quad (7.15)$$

Onde:

$\kappa_{\text{(coesivo)}}$ = coeficiente de ajuste de lei (s)

$\beta_{\text{(coesivo)}}$ = coeficiente da lei de potência

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%)

Com a obtenção das equações 7.14 e 7.15, foi possível estabelecer uma equação relacionando a viscosidade aparente relativa com a concentração volumétrica e o gradiente de velocidade, para fluxos gerados com materiais, cujas constantes foram ajustadas pelo modelo de Herschel-Bulkley. A equação 7.7 foi reescrita e os parâmetros de ajuste foram substituídos pelas relações determinadas nas equações 7.14 e 7.15.

$$\frac{\mu_{\text{ap (coesivo)}}}{\mu_0} = 1,396 \cdot e^{(0,31 \cdot C_{\text{vol}})} \cdot \gamma^{(-0,243 - 0,0183 \cdot C_{\text{vol}})} \quad (7.16)$$

Onde:

$\mu_{ap(\text{coesivo})}$ = coeficiente de viscosidade aparente (Pa.s)

μ_0 = coeficiente de viscosidade dinâmica da água (Pa.s)

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%)

γ = gradiente de velocidade (1/s)

A figura 7.16 exibe os resultados da aplicação da equação 7.16, pelo qual, partindo da concentração da mistura e do gradiente de velocidade, pode-se avaliar, em qualquer ponto do escoamento, o valor de sua viscosidade aparente.

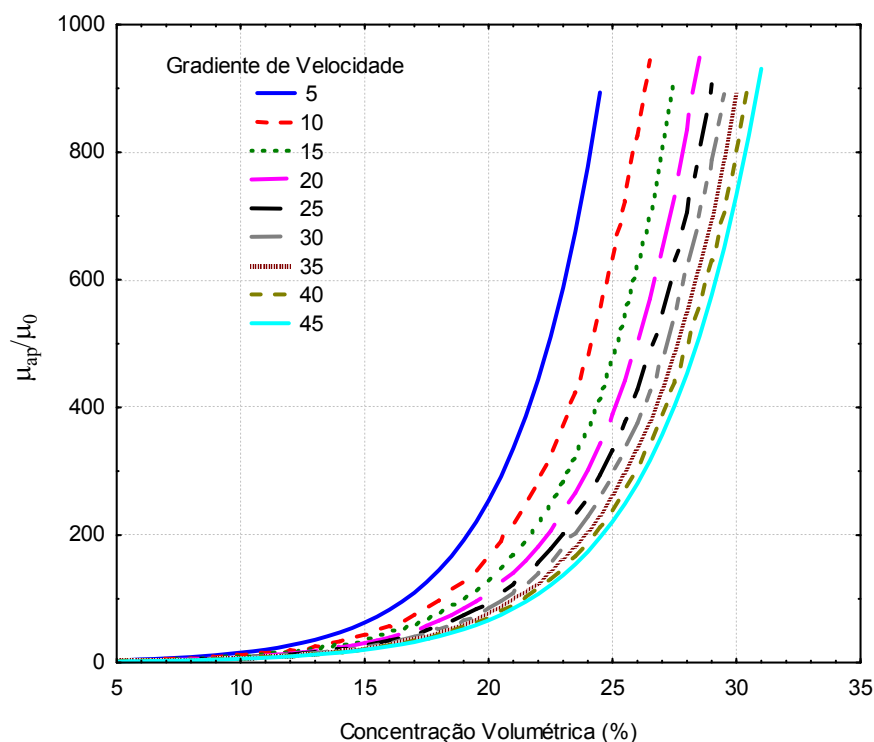


Figura 7.16 Relação da viscosidade aparente relativa com a concentração volumétrica para diferentes gradientes de velocidade (grupo coesivo).

7.4.3 Comparação com outros métodos de medição

Kellman (2007, comunicação pessoal) analisou a mesma argila utilizada (*china clay*) no mesmo reômetro Bohlin C-VOR, porém, com a utilização de um spindle “tipo Vane”. Através da comparação dos dados foi possível verificar que o método utilizado estava coerente com os valores encontrados por tal pesquisador.

Os valores para a tensão crítica ficaram um pouco diferentes, entretanto, a variação da viscosidade relativa com a concentração foi muito similar, indicando a boa correlação dos dados. A figura 7.17 ilustra a comparação entre os resultados.

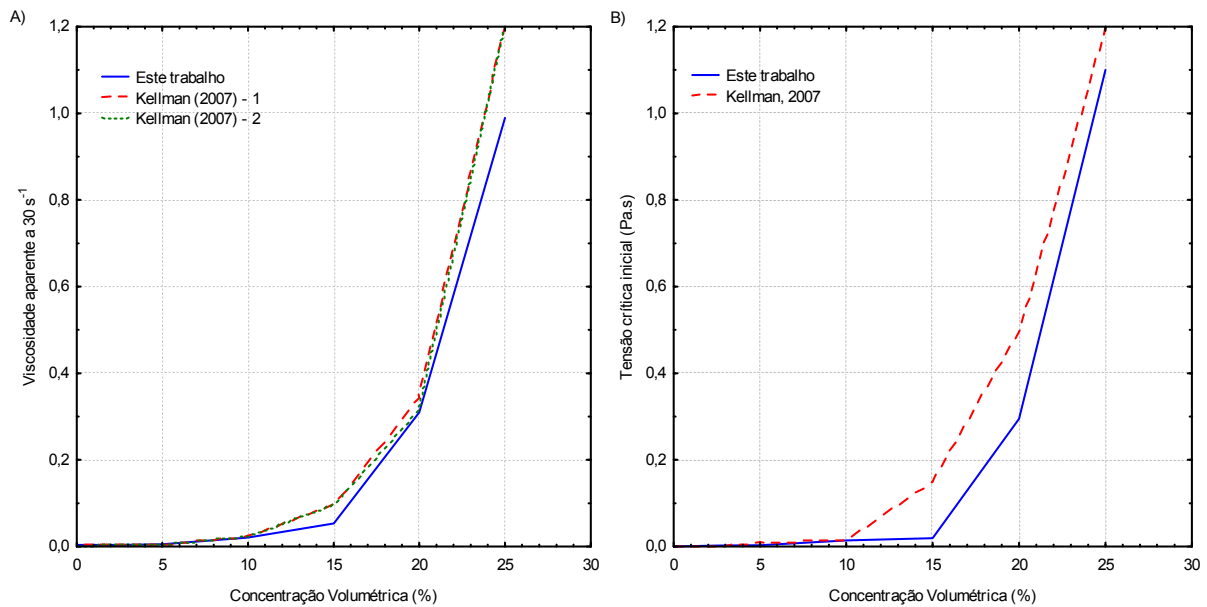


Figura 7.17 Comparação dos resultados de caracterização reológica com as medidas de Kellman, 2007: a) Tensão crítica inicial versus concentração volumétrica e; b) Viscosidade aparente relativa a 30 1/s versus concentração volumétrica.

Breve discussão

A caracterização reológica do grupo coesivo seguiu a mesma metodologia do grupo misto, visto que foram determinados dois tipos de comportamento com relação à concentração volumétrica das misturas. O diferencial, porém, foram os valores limites entre esses dois grupos. No caso do grupo coesivo, apenas as duas primeiras misturas iniciais (C_2 e C_5) apresentaram o comportamento Newtoniano, sem a presença de uma tensão crítica inicial. Para as demais misturas, o modelo plástico de Herschel-Bulkley foi o melhor ajustado.

A semelhança entre esses dois grupos de ensaios (coesivo e misto) comprova que a parcela coesiva da mistura (material coesivo) predomina nas mais altas concentrações sobre a parcela não-coesiva do grupo misto, uma vez que os mesmos tipos de ajuste foram realizados, com as mesmas tendências (forma das curvas geradas).

As tendências ajustadas novamente apresentaram um alto valor para o coeficiente de determinação (R^2), indicando que há coerência dos valores. Ainda, a comparação dos resultados com uma segunda fonte, (Kellman, 2007, comunicação pessoal) comprovam que, independente do tipo de spindle utilizado, houve uma similaridade muito forte entre os valores, com coeficientes de correlação da ordem de 97% entre os dados. As implicações desse comportamento diferenciado serão discutidas no capítulo 11.

7.5 REOLOGIA DAS MISTURAS DO GRUPO TRANSIÇÃO.

A caracterização reológica do grupo transição será realizada seguindo duas etapas. Num primeiro momento serão definidas as relações entre a viscosidade e a quantidade de argila presente na mistura (C_{vol} constante em 20%) e, em um segundo momento, os valores encontrados serão interpolados para a caracterização reológica dos diferentes valores de concentração e/ou presença de argila. Assim, aplicando o mesmo método utilizado anteriormente, foi verificado que as misturas do grupo transição apresentaram dois comportamentos reológicos distintos: um comportamento Newtoniano para as misturas com até 50% de argila e um comportamento plástico, seguindo o modelo de Herschel-Bulkley, para as misturas com quantidade de argila maiores que 50%. A tabela 7.8 e figura 7.18 apresentam os valores dos parâmetros e as respectivas curvas de tensão-deformação ajustadas.

Tabela 7.8 Ajuste dos parâmetros do modelo reológico para o grupo transição.

% de Argila	$\tau_y(\text{transição})$	$k(\text{transição})$	$n(\text{transição})$	Tipo de modelo
100	0,400	2,685	0,326	Herschel – Bulkley
90	0,170	1,303	0,375	
75	0,042	0,257	0,559	
50	0,017	0,026	0,809	
25	-	0,0073	1	Newtoniano
10	-	0,0070	1	
0	-	0,0069	1	
Água	-	0,0051	1	

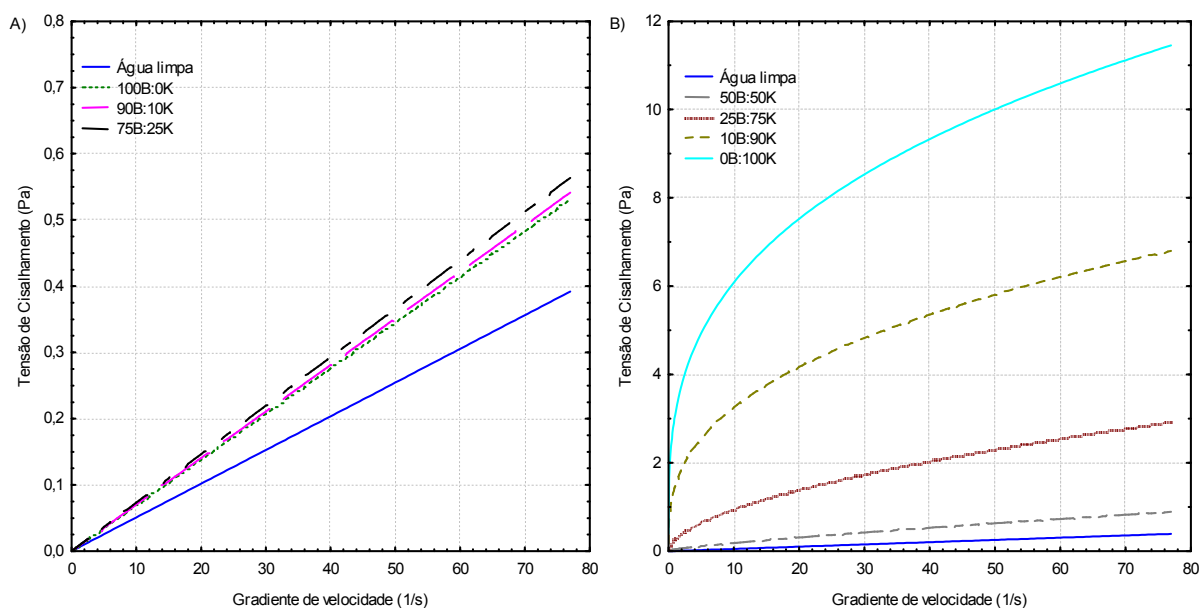


Figura 7.18 Relação entre tensão de cisalhamento e a deformação (gradiente de velocidade) para o grupo transição: a) Presença de argila de 0 a 50% e; b) Presença de argila de 0 a 50%.

A figura 7.18 demonstra uma nítida transição nos comportamentos reológicos, pois, à medida que a presença de argila vai sendo incrementada, o fluxo passa do comportamento Newtoniano para o comportamento plástico. Para essas misturas, novamente, foi determinada a relação que representa o comportamento da viscosidade aparente com a variação do gradiente de deformação. Os resultados encontrados estão expostos na tabela 7.9 e na figura 7.19.

Tabela 7.9 Parâmetros ajustados para o grupo transição

% de Argila	$\kappa_{(\text{transição})}$	$\beta_{(\text{transição})}$	Viscosidade Relativa - μ/μ_0	Viscosidade aparente relativa para 25 1/s	Tipo de modelo
100	605,60	-0,699		63,36	Herschel – Bulkley
90	269,78	-0,636		35,53	
75	58,91	-0,478	-	12,52	
50	8,40	-0,326		2,89	
25	0,00730	1	1,43		Newtoniano
10	0,00700	1	1,38		
0	0,00690	1	1,36	-	
Água	0,00510	1	1,00		

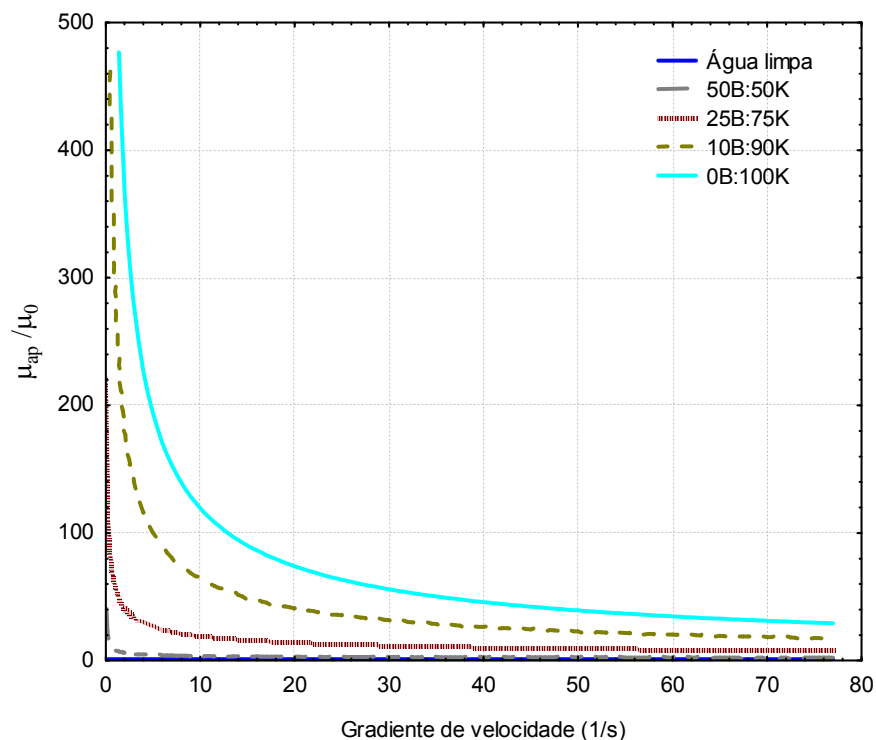


Figura 7.19 Relação entre a deformação (gradiente de velocidade) e a viscosidade aparente adimensionalizada pela viscosidade da água para as misturas do grupo transição.

7.5.1 Relação entre a tensão crítica e concentração volumétrica inicial

Tendo por base os valores da tabela 7.9, foi possível correlacionar os valores da tensão crítica com a porcentagem de argila, ajustando-se uma função exponencial e mostrando que,

quanto maior a quantidade de argila, maior será o valor da tensão crítica. A figura 7.20 apresenta os valores para a porcentagem de argila variando de 50% até 100%, bem como a lei de ajuste aplicada aos dados.

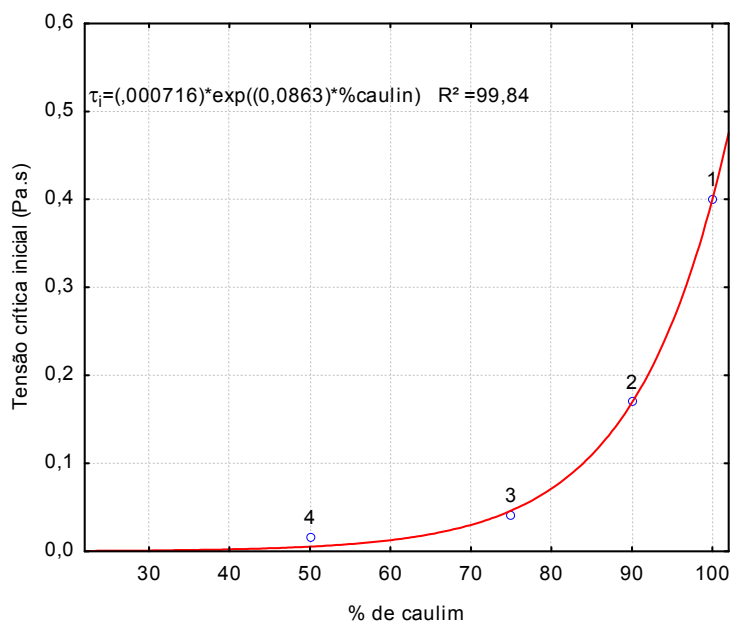


Figura 7.20 Relação entre a tensão de cisalhamento crítica e a presença de argila (caulim) para as misturas do grupo transição.

A equação 7.17 representa a relação entre a tensão de cisalhamento crítica e a porcentagem de argila na mistura ($\tau_{i(\text{transição})} = f(\text{Arg})$), cujo ajuste apresentou um coeficiente de determinação de 99,84%.

$$\tau_{i(\text{transição})} = 0,000716 \cdot e^{(0,0863 \cdot \text{Arg})} \quad (7.17)$$

Onde:

$\tau_{i(\text{transição})}$ = tensão de cisalhamento crítica (Pa)

Arg = porcentagem de argila (caulim) presente na mistura (%)

7.5.2 Relação entre a viscosidade dinâmica e a porcentagem de argila

Seguindo o método adotado para o grupo misto, a concentração do grupo transição pode ser dividida em duas faixas de comportamento: para valores de argila abaixo de 50%, foi verificado que o comportamento linear (Newtoniano) exprime a relação tensão-deformação. A figura 7.21 representa graficamente essa relação.

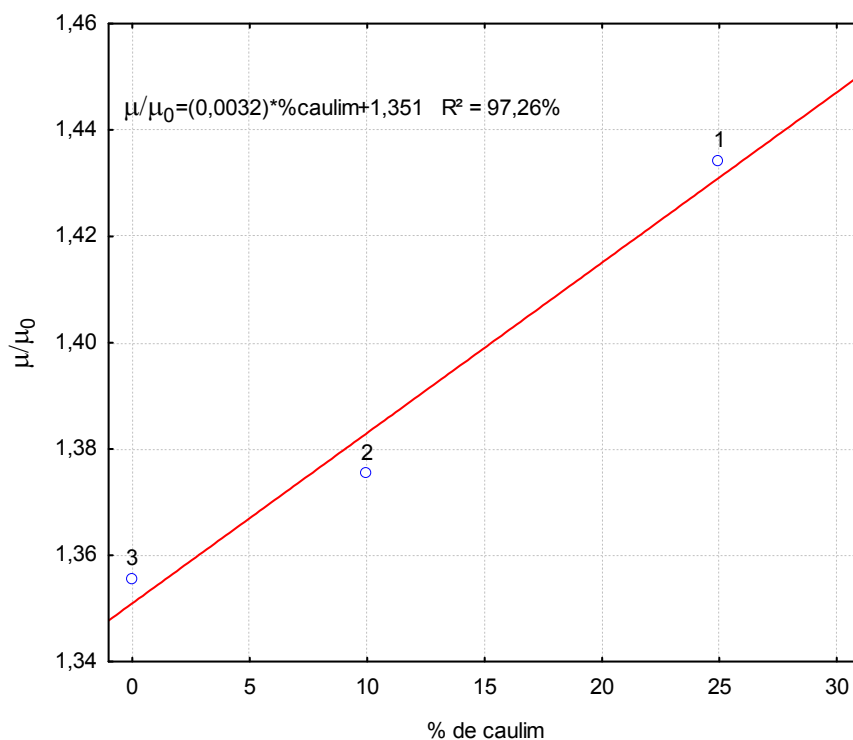


Figura 7.21 Relação entre a presença de argila e a viscosidade relativa para o grupo transição.

Novamente, apesar a pouca quantidade de dados, foi possível estabelecer uma relação linear entre as variáveis, conduzindo a um coeficiente de determinação (R^2) de 97,26%, expressa na equação 7.19.

$$\frac{\mu_{(\text{transição})}}{\mu_0} = 1,35 + 0,0032 \cdot \text{Arg} \quad (7.19)$$

Onde:

$\mu_{(\text{transição})}$ = coeficiente de viscosidade aparente (Pa.s)

Arg = porcentagem de argila (caulim) presente na mistura (%)

Para as misturas com mais de 50% de argila, os parâmetros κ e β foram relacionados com a presença de material coesivo (figura 7.22). A partir do ajuste desses parâmetros com a concentração, foi verificado que o parâmetro $k_{(\text{transição})}$ varia exponencialmente com a concentração, enquanto que o valor $n_{(\text{transição})}$ apresenta uma relação linear. Sendo $\kappa_{(\text{transição})} = f(\text{Arg})$ e $\beta_{(\text{transição})} = f(\text{Arg})$, as regressões ajustadas com coeficiente de determinação de 99,86% e 98,5%, respectivamente, são:

$$\kappa_{(\text{transição})} = 0,124 \cdot e^{(0,0849 \cdot \text{Arg})} \quad (7.20)$$

e

$$\beta_{(\text{transição})} = -0,00765 \cdot \text{Arg} + 0,067 \quad (7.21)$$

Onde:

$\kappa_{(\text{transição})}$ = coeficiente de ajuste da lei (s)

$\beta_{(\text{transição})}$ = coeficiente da lei de potência

Arg = porcentagem de argila (caulim) presente na mistura (%)

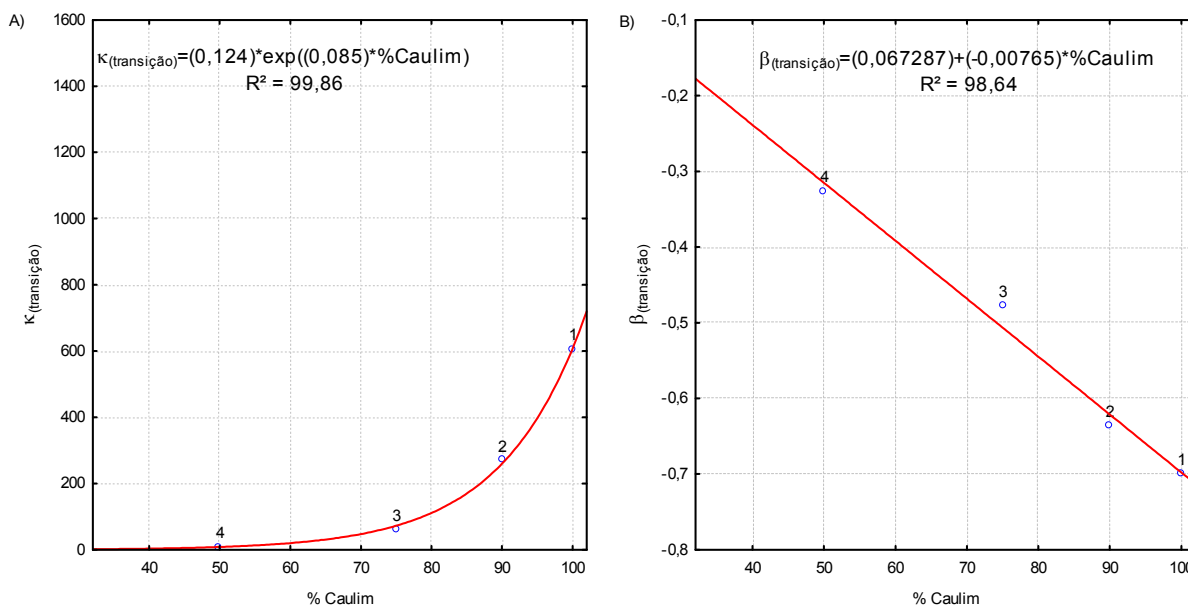


Figura 7.22 Ajuste de dados dos parâmetros $\kappa_{\text{transição}}$ e $\beta_{\text{transição}}$ do modelo de Herschel-Bulkley para as misturas do grupo transição em função da presença de argila

Com base nas equações 7.20 e 7.21 foi possível estabelecer uma equação que relaciona a viscosidade aparente relativa com a porcentagem de argila e o gradiente de velocidade para misturas do grupo transição, que foram ajustados pelo modelo de Herschel-Bulkley. Os parâmetros da equação 7.11 foram substituídos pelas relações 7.20 e 7.21, formando a equação 7.22. Nesse caso, essas equações só valem para a concentração volumétrica de 20%.

$$\frac{\mu_{\text{ap}(\text{transição})}}{\mu_0} = 0,124 \cdot e^{(0,0849 \cdot \text{Arg})} \cdot \gamma^{(0,0673 - 0,0076 \cdot \text{Arg})} \quad (7.22)$$

Onde:

$\mu_{\text{ap}(\text{transição})}$ = coeficiente de viscosidade aparente (Pa.s)

μ_0 = coeficiente de viscosidade dinâmica da água (Pa.s)

Arg = porcentagem de argila presente na mistura (%)

γ = gradiente de velocidade (1/s)

A figura 7.23 exibe os resultados da aplicação da equação 7.22, o que caracteriza um gráfico de duas entradas para a obtenção dos valores desejados.

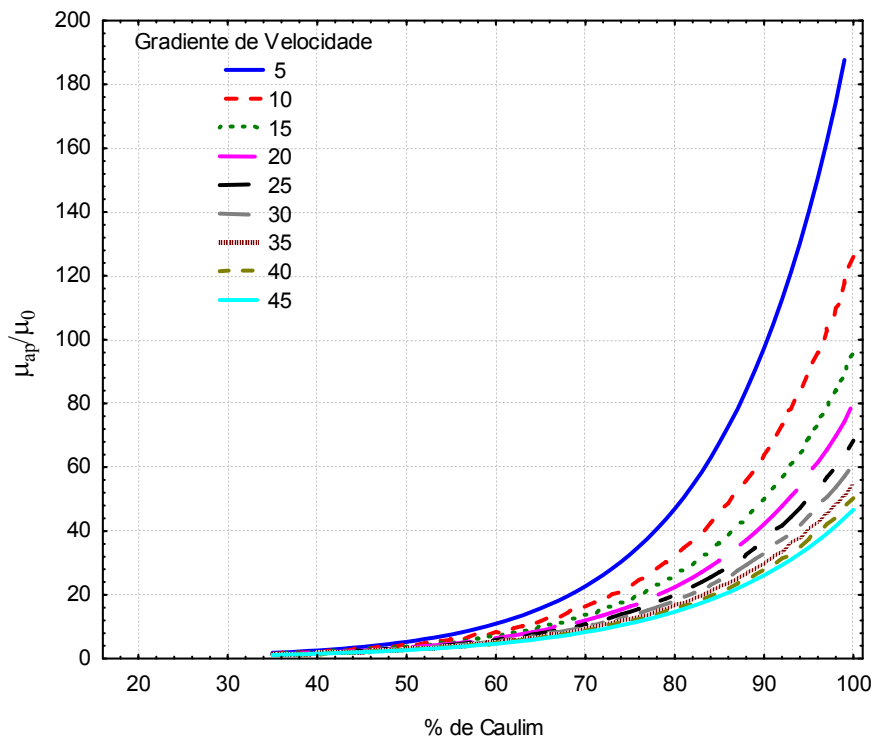


Figura 7.23 Relação da viscosidade aparente relativa com a presença de argila para diferentes gradientes de velocidade (grupo transição).

7.6 RELAÇÃO ENTRE VISCOSIDADE, A PORCENTAGEM DE ARGILA E CONCENTRAÇÃO INICIAL – INTERPOLAÇÃO DAS CURVAS

As equações 7.19 e 7.22 exprimem a relação da viscosidade relativa aparente com a porcentagem de argila presente na mistura, porém esta equação não está relacionada à concentração da mistura, o que as tornam pouco úteis, uma vez que foi definida apenas para o valor de 20%. Como foi visto anteriormente, o aumento da viscosidade com a presença de argila não é linear, o que não permite a interpolação direta dos valores para as outras concentrações simuladas.

Desta forma, neste capítulo será desenvolvido uma metodologia para tentar interpolar os valores para toda a faixa de concentração simulada. Para tal, foi realizada uma interpolação dos dados obtidos para os três grupos anteriormente vistos, seguindo os critérios baseados no comportamento do grupo transição ($C_{vol} = 20\%$). A figura 7.24 apresenta o comportamento da relação entre a viscosidade aparente adimensionalizada pela viscosidade da água e a concentração volumétrica para os quatro grupos de ensaios. As curvas são uma representação pictórica dos resultados obtidos. A figura 7.24, também apresenta as curvas em que se deseja interpolar os resultados (linhas pontilhadas), estendendo-os para que todo o espectro, tanto de concentração volumétrica, quanto da presença de argila.

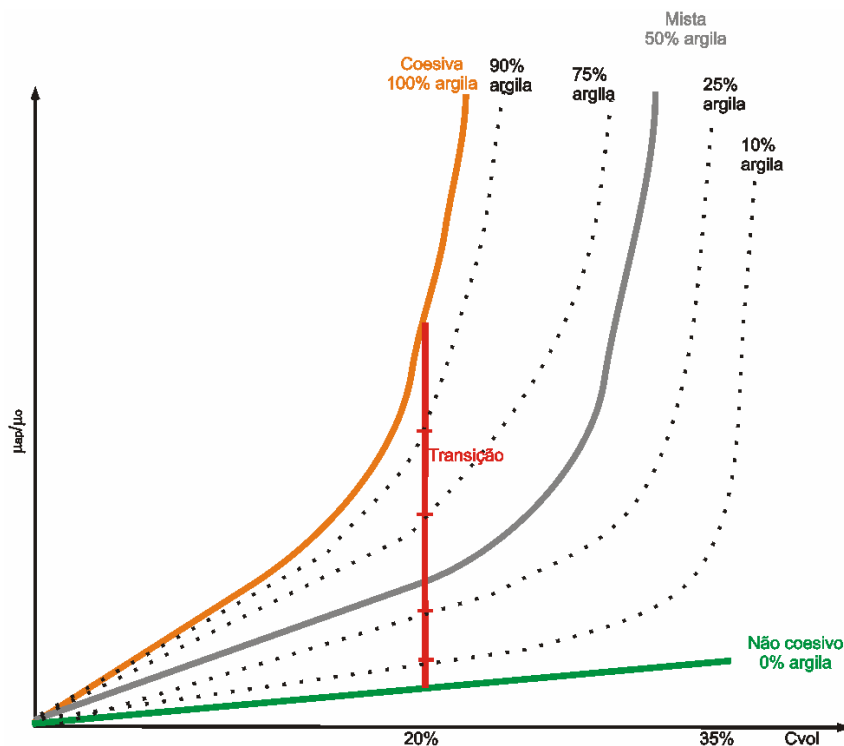


Figura 7.24 Relação entre a viscosidade aparente adimensionalizada e a concentração volumétrica para os quatro grupos de ensaios realizados.

A partir das condições utilizadas para obter as equações constitutivas do comportamento reológico de cada mistura, foi possível dividir os resultados em três zonas de análises distintas, nas quais, para cada uma delas, foi empregado um método para a interpolação. A figura 7.25a apresenta as equações utilizadas e a figura 7.25b, as zona de interpolação determinadas.

7.6.1 Interpolação da zona 1.

Para estabelecer a relação entre a concentração volumétrica e a porcentagem de argila com a viscosidade aparente nesta zona, a qual engloba desde as misturas não-coesivas até as misturas mistas com 20% de concentração inicial (zona 1 - azul da figura 7.25b), foi adotado um método que acrescenta, na equação 7.5, um fator de correção, para considerar a quantidade de argila presente na mistura. O anexo F apresenta, detalhadamente a metodologia de cálculo utilizada para a obtenção desse fator de correção. O fator de correção para os valores da zona 1 é:

$$FC_{\text{zona 1}} = 0,0044 \cdot \text{Arg} \cdot C_{\text{vol}} \quad (7.23)$$

Onde:

$FC_{\text{zona 1}}$ = fator de correção - diferença de valores da viscosidade relativa aparente dos valores do grupo intermediários em relação ao grupo não coesivo.

Arg = porcentagem de argila presente na mistura (%)

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%)

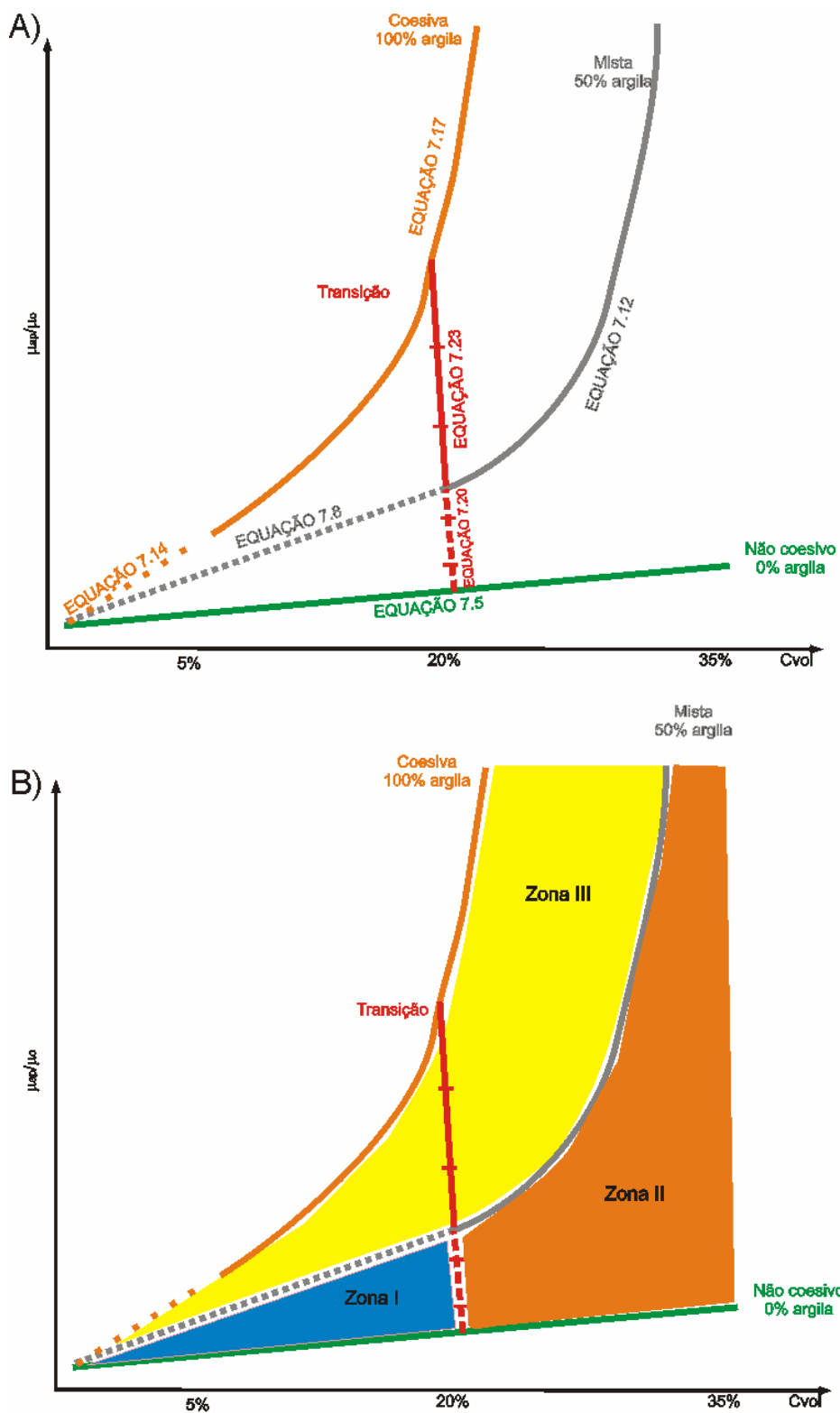


Figura 7.25 a) Equações que descrevem o comportamento reológico das misturas utilizadas e; b) Definição das zonas de interpolação dessas equações.

Definida a equação 7.23, a interpolação da primeira zona foi realizada e o cálculo da viscosidade relativa aparente, para as correntes com concentração de 0 até 20% e com uma presença de argila de 0 a 50%, pode ser realizada, utilizando a equação do grupo não coativo (equação 7.5) e somando o fator de correção (FC_1). Sendo assim, a equação final é a seguinte:

$$\frac{\mu_{\text{zona 1}}}{\mu_0} = 1 + 0,0224 \cdot C_{\text{vol}} + FC_1 \quad \text{ou} \quad \frac{\mu_{\text{zona 1}}}{\mu_0} = 1 + C_{\text{vol}} (0,0224 + 0,0044 \cdot \text{Arg}) \quad (7.24)$$

Onde:

$\mu_{\text{zona 1}}$ = coeficiente de viscosidade dinâmica zona 1 (Pa.s)

μ_0 = coeficiente de viscosidade dinâmica da água (Pa.s)

Arg = porcentagem de argila (caulim) presente na mistura (%)

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%)

7.6.2 Interpolação da zona 2.

A interpolação da zona 2, que engloba as concentrações volumétricas maiores que 20% e a variação da presença de argila do grupo não coesivo (100B:0K) até o grupo misto (50B:50K), é mais complicada pois apresenta uma zona de não linearidade, no caso, os valores do grupo misto.

A obtenção dos valores intermediários do grupo transição foi feita através da interpolação linear direta dos valores da curva do grupo não coesivo e do grupo misto (acima de 20%). A equação interpoladora está descrita abaixo. Os detalhes da obtenção deste modelo estão apresentados no anexo F.

$$\frac{\mu_{\text{zona 2}}}{\mu_0} = \frac{\text{Arg} \cdot (\phi - \varphi)}{50} + \varphi \quad (7.25)$$

Onde:

ϕ = Viscosidade relativa aparente no ponto ϕ (equação 7.11 – grupo misto)

φ = Viscosidade relativa aparente no ponto φ (equação 7.5 – grupo não coesivo)

$\mu_{\text{zona 2}}$ = coeficiente de viscosidade dinâmica da zona 2 (Pa.s)

μ_0 = coeficiente de viscosidade dinâmica da água (Pa.s)

Arg = porcentagem de argila presente na mistura (%)

Nessa equação interpoladora é necessário calcular, *a priori*, os valores da viscosidade relativa aparente para o grupo misto, considerando, nesse caso, a concentração volumétrica e o gradiente de deformação (equação 7.11), e, ainda, os valores da viscosidade dinâmica do grupo não coesivo (equação 7.5).

7.6.3 Interpolação da zona 3.

A terceira zona de interpolação foi realizada com os dados que apresentaram comportamento não-linear, ou seja, do grupo misto (50B:50K) até o grupo coesivo (0B:100K), passando pelos grupos intermediários (25B:75K e 10B:90K). Nesta zona, a

interpolação direta não pode ser realizada, sendo, novamente determinado um fator de correção, o qual dependia do gradiente de velocidade e da porcentagem de argila presente na mistura. O anexo F apresenta o procedimento detalhado de obtenção desse fator de correção, que foi definido, como segue:

$$FC_{\text{zona 3}} = 0,0016 \cdot e^{(0,0871 \cdot \text{Arg})} \cdot \gamma^{0,0059(100 - \text{Arg})} \quad (7.26)$$

Onde:

$FC_{\text{zona 3}}$ = fator de correção entre os grupos intermediários e o grupo coesivo.

Arg = porcentagem de argila presente na mistura (%)

γ = gradiente de velocidade (1/s)

Por fim, para se obter as equações da viscosidade relativa aparente para as correntes com concentração volumétrica de 0% até 25% e para correntes com mais de 50% de argila na sua composição, é necessário utilizar os valores da curva do grupo coesivo (equação 7.16) e multiplicar pelo fator de correção $FC_{\text{zona 3}}$ (equação 7.26). Assim, a equação geral fica:

$$\frac{\mu_{\text{ap zona 3}}}{\mu_0} = \left(1,39 \cdot e^{(0,309 \cdot C_{\text{vol}})} \cdot \gamma^{(-0,243 - 0,0183 \cdot C_{\text{vol}})} \right) \cdot FC_{\text{zona 3}} \quad (7.27)$$

ou

$$\frac{\mu_{\text{ap zona 3}}}{\mu_0} = \left(1,39 \cdot e^{(0,309 \cdot C_{\text{vol}})} \cdot \gamma^{(-0,243 - 0,0183 \cdot C_{\text{vol}})} \right) \cdot \left(0,0016 \cdot e^{(0,0871 \cdot \text{Arg})} \cdot \gamma^{0,0059(100 - \text{Arg})} \right) \quad (7.28)$$

Onde:

$\mu_{\text{ap zona 3}}$ = coeficiente de viscosidade aparente (Pa.s)

μ_0 = coeficiente de viscosidade dinâmica da água (Pa.s)

Arg = porcentagem de argila presente na mistura (%)

C_{vol} = concentração volumétrica da mistura (%)

γ = gradiente de velocidade (1/s)

Breve discussão

Os resultados da caracterização reológica do grupo transição apresentam dois aspectos que devem ser considerados. Em um primeiro momento, foi realizada uma análise para verificar como se dava a transição entre os grupos não coesivos até o grupo coesivo, neste caso, para uma concentração única, em torno dos 20%. Novamente, o que pode ser verificado foi a influência do material coesivo na mistura, alterando completamente o seu comportamento reológico. A transição entre os fluxos puramente não coesivos para os fluxos coesivos acarreta na transformação de um fluxo Newtoniano para um fluido plástico, sendo

que a mudança de comportamento para misturas com presença de argila se dá por volta dos 40 a 60%.

O entendimento dessa transição de valores foi muito importante, uma vez que as relações por si só não teriam muito uso para o cálculo da viscosidade dinâmica e da viscosidade aparente, uma vez que elas foram definidas para uma concentração apenas. Após isso, a extrapolação dessa tendência para toda a faixa de concentrações volumétricas e/ou presença de argila avaliadas pode ser realizada, com as interpolações das zonas. Nesse caso, fatores de correção foram adicionados às equações anteriormente definidas, com o intuito de estabelecer os valores que faltavam. A metodologia de interpolação foi basicamente linear, o que pode implicar em pequenos erros, em termos absolutos. Dentro desse aspecto, a metodologia de interpolações por zonas buscou estar o mais próximo possível da realidade medida, tomando como base os valores do grupo não coesivo, misto e coesivo. Obviamente, que algumas simplificações foram adotadas, porém o resultado numérico final ficou bastante coerente.

Ainda, a caracterização reológica do grupo transição foi realizada, independentemente dos outros grupos de misturas (não coesivo, misto e coesivo). Desta forma, algumas diferenças nos resultados são encontradas quando comparados entre si. A seguir serão apresentadas as equações que buscarão minimizar essas diferenças.

7.7 SÍNTESE GERAL

A partir da quantidade de argila presente na mistura, da concentração volumétrica e do gradiente de deformação foi possível determinar equações que representassem tanto o comportamento reológico das misturas, quanto o cálculo da viscosidade das mesmas. Sendo assim, a figura 7.26 resume as equações obtidas na caracterização reológica das misturas.

A linha cinza (limiar do comportamento reológico) divide a transição entre o comportamento Newtoniano das misturas e o comportamento plástico, sendo que os diferentes tons de cinza representam as zonas de interpolação, com as devidas equações utilizadas. Obviamente, não existe um valor único de concentração que represente a mudança de comportamento, sendo essa representada por uma faixa de valores.

A presença da argila na mistura mostra claramente ser um dos principais fatores para a modificação do comportamento da mistura, dotando-as com características plásticas, onde tanto a tensão crítica inicial deve ser considerada, quanto o gradiente de velocidade (deformação) do fenômeno. O modelo mais simplificado (Newtoniano) pode ser aplicado,

com mínimo erro, para uma grande faixa de valores, sendo os resultados mais diretos e de mais fácil interpretação.

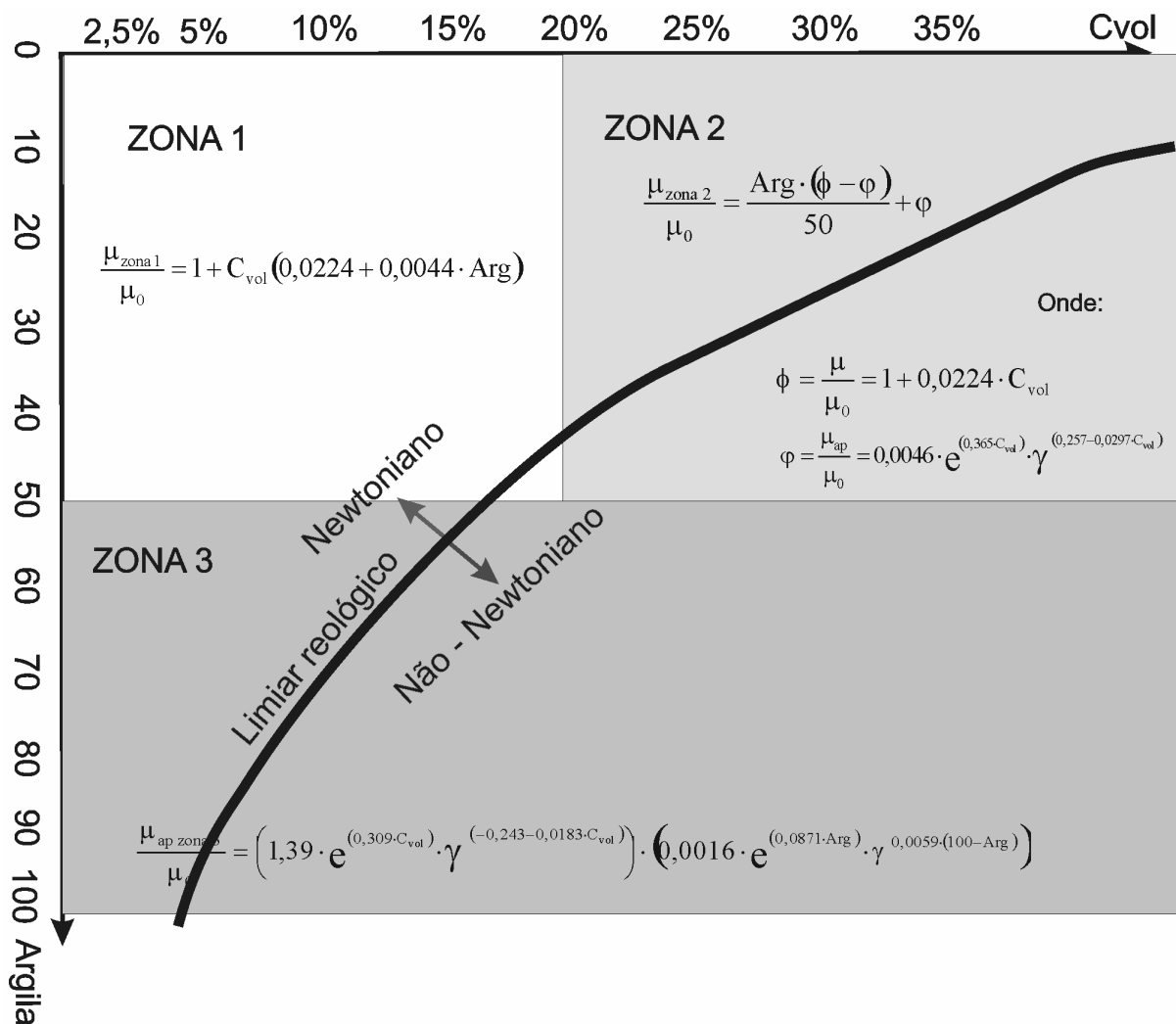


Figura 7.26 Resumo das equações utilizadas para determinar a viscosidade dinâmica

8 ANÁLISE TEMPORAL DA GEOMETRIA, DA VELOCIDADE E DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes às caracterizações hidrodinâmicas e geométricas das correntes de turbidez simuladas. Em um primeiro momento, esses resultados serão descritos qualitativamente e, posteriormente, serão apresentados os dados oriundos das medições realizadas.

A fim de evitar algum problema de interpretação com relação às classificações já existentes, no texto não serão utilizados os termos “correntes de baixa densidade” ou “correntes de alta densidade”, mas sim, “correntes com mais baixa densidade” ou “correntes com mais alta densidade”. Neste caso, a nomenclatura se refere à presença inicial de material sólido nas correntes, sendo uma constatação direta do experimento e não uma classificação baseada na concentração inicial da mistura.

8.1 DESCRIÇÃO GERAL DOS FLUXOS SIMULADOS

Neste capítulo será apresentada a descrição geral dos experimentos realizados com base na observação visual dos ensaios e nos vídeos registrados pelas duas vídeo-câmeras digitais, posicionadas respectivamente a 180 cm e a 280 cm do compartimento de mistura. Essa análise servirá de base para uma primeira aproximação do desenvolvimento e da caracterização do comportamento hidrodinâmico e geométrico destes fluxos. A análise dos processos deposicionais, associados às correntes, será realizada no capítulo 10.

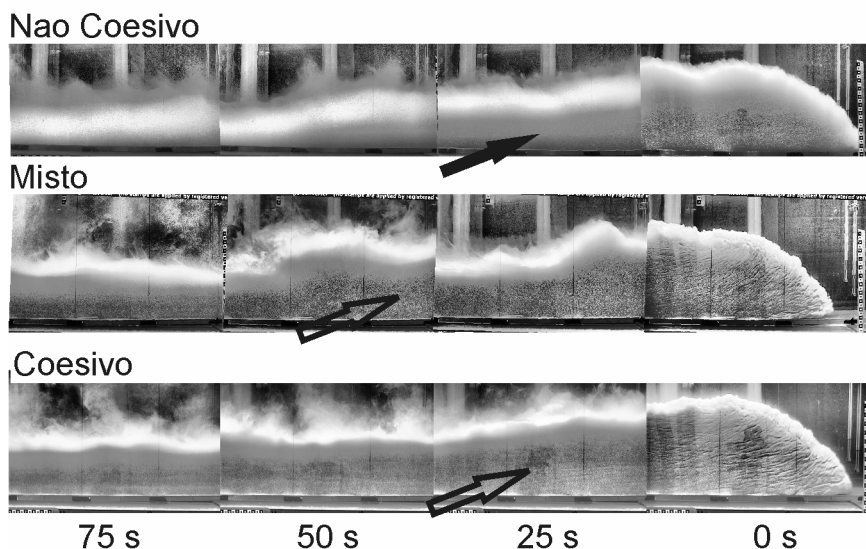
A figura 8.1 apresenta um mosaico composto por cinco fotos, obtidas em diferentes instantes do ensaio, representando dois experimentos de cada grupo simulado, neste caso, uma corrente com mais baixa concentração (figura 8.1a) e uma com mais alta concentração (figura 8.1b).

Pela análise dos quatro grupos de experimentos, foram identificados dois comportamentos distintos para as correntes no que tange os aspectos geométricos, hidrodinâmicos.

O primeiro comportamento descrito foi verificado para as correntes simuladas com mais baixa concentração inicial, ou seja, até 15% para o grupo não coesivo e misto e até 10% para o grupo coesivo. Para essas concentrações, as correntes simuladas apresentaram um padrão muito similar àquelas descritas na literatura (Middleton, 1993; Simpson, 1997; Kneller e Buckee, 2000 entre outros), apresentando uma anatomia de corrente caracterizada por possuir uma cabeça destacada com maiores dimensões, ligada ao corpo através de uma zona de ligação (pescoço) e, por fim, a cauda. Nesse comportamento, a cabeça apresentou um

tamanho distintamente maior que o corpo, devido ao balanço entre as forças de empuxo da corrente com as forças inerciais. Logo atrás da cabeça, foi detectada a presença de instabilidades do tipo de Kelvin-Helmholtz na interface superior da corrente, que criava uma zona mais alongada entre a cabeça e o corpo. Os vórtices gerados pelas instabilidades de Kelvin-Helmholtz desenvolveram-se praticamente ao longo de metade da dimensão da corrente, sendo um agente de carreamento de água para o interior do fluxo.

A) Concentração Volumétrica = 2,5%



B) Concentração Volumétrica = 35% e 25%(coesivo)

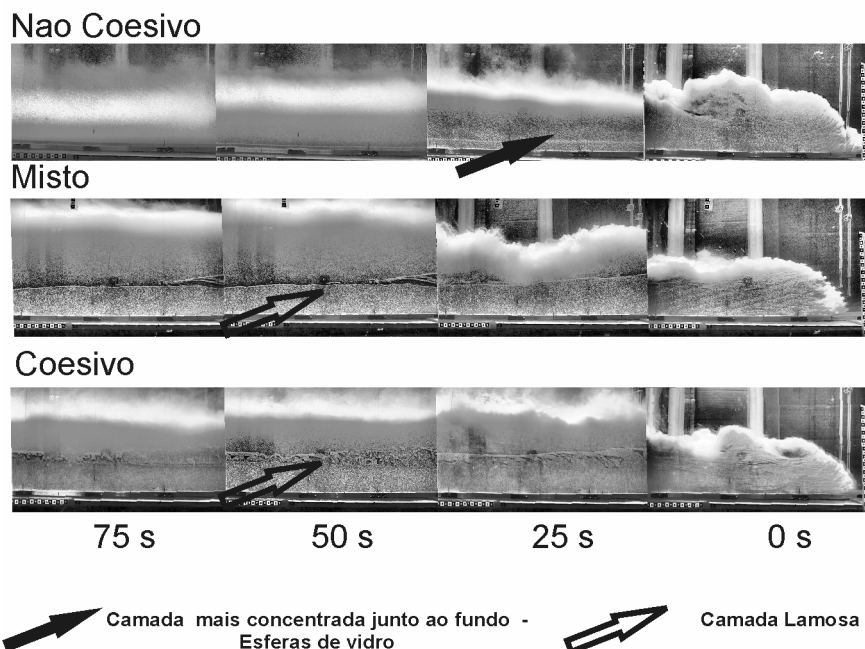


Figura 8.1 Mosaico de evolução dos fluxos do grupo não coesivo, misto e coesivo: a) Concentração volumétrica de 2,5 % e; b) Concentração volumétrica de 35% e 25% (grupo coesivo).

O segundo comportamento identificado nas correntes simuladas diz respeito às correntes de mais alta densidade, isto é, aquelas com concentrações volumétricas maiores que 20%, para os grupos não coesivo e misto, e maiores que 15%, para o grupo coesivo. Nestas correntes, a cabeça possuía aproximadamente o mesmo tamanho do corpo sem a presença clara dos vórtices que caracterizam as instabilidades de Kelvin-Helmholtz. Os vórtices na interface superior eram mais visíveis e intensos com maior frequência de desprendimento, uma vez que a diferença de velocidades nestas correntes eram maiores (escoamento mais cisalhante). Em alguns casos, foi notado o acoplamento de vórtices na superfície superior (p.ex. M_35) e que essas instabilidades causaram mudanças no comportamento dinâmico da corrente.

Já para os fluxos com presença de argila, ocorre a formação de uma camada estratificada junto ao fundo (camada lamosa), devido à rápida deposição de sedimento, o qual se desloca com velocidade muito baixa. Essa camada servia como um fundo móvel para o desenvolvimento de uma corrente mais diluída, com comportamento, na sua parte superior, similar ao comportamento das correntes de mais baixa densidade.

No grupo transição, como todas as correntes possuíam a mesma concentração inicial, basicamente o que pode ser identificado ao longo dos experimentos foi o preenchimento das lacunas dos resultados dos grupos não coesivo até misto (presença de argila menor que 50% em volume) e do grupo misto até coesivo (presença de argila maior que 50% em volume).

Nessas condições, foi verificado que nos grupos sem a predominância de argila, ocorre a formação de uma camada estratificada junto ao fundo, com movimentos oscilatórios que visualmente não podem ser atribuídos aos vórtices na superfície e que, após isso, ocorre a deposição abrupta dos grãos. Quando predomina a presença de argila, essa estratificação vai sendo mais visível, com a criação de uma camada lamosa junto ao fundo que se deposita praticamente instantaneamente e que vai incrementando sua espessura à medida que a presença de argila na mistura aumenta.

Breve discussão

A análise qualitativa dos resultados, baseada nas observações visuais e nos registros de vídeos dos ensaios, mostrou que, em todos os experimentos, a corrente formada pela remobilização instantânea de material (ensaio por pulso) se desenvolveu plenamente ao longo do tanque de simulação e depositando parte de sua carga da suspensão.

Ainda, dois comportamentos de fluxo puderam ser destacados em macro escala, com relação à dinâmica interna do escoamento e sua geometria. Para as correntes de mais baixa concentração, houve uma reprodução do comportamento mais discutido na literatura

(Middleton, 1967; Simpson, 1972; Kneller e Buckee, 2000, entre outros), uma vez que a corrente apresentou uma geometria bem definida (cabeça, corpo e cauda), processos hidrodinâmicos anteriormente discutidos na literatura (p. ex. instabilidades de Kelvin-Helmholtz atrás da cabeça) e uma deposição de deposição de grãos por gravidade ao longo do seu desenvolvimento.

Já à medida que a concentração foi sendo incrementada na mistura que compunha a corrente, um outro comportamento de fluxo diferenciado foi identificado. O aparecimento de uma camada lamosa basal estratificada junto ao fundo foi evidenciado nos experimentos, alterando as características geométricas e, principalmente, as características dinâmicas e deposicionais dos fluxos. Além do aumento da concentração da mistura, o incremento da presença de argila na mistura provocou o mesmo efeito, criando, nesse caso, uma divisão entre os fluxos ditos não coesivos e coesivos. Esse tipo de escoamento, poucas vezes discutido na literatura experimental (Kuenen e Migliorini, 1950; Middleton, 1966; Postma, 1988; e Mohrig e Marr, 2003), especialmente para simulações com baixos valores de declividade nos experimentos ($0,8^\circ$), foi um primeiro indício da complexidade do fenômeno e das alterações provocadas pela variação de suas propriedades iniciais. Esses dois comportamentos, qualitativamente detectados acima, serão retornados, ao longo do texto, de uma forma quantitativa, na busca de identificação dos padrões característicos de cada comportamento.

8.2 DEFINIÇÃO DO TEMPO DE PASSAGEM DA CABEÇA, CORPO E DA CAUDA DA CORRENTE.

As correntes de turbidez são normalmente divididas em três regiões, conforme já descrito no item 4.3.2.1, nas quais os diferentes processos dinâmicos e deposicionais ocorrem. A primeira região é a cabeça da corrente, caracterizada pela presença de diferentes processos dinâmicos no seu interior, incluindo a clara visualização de instabilidades secundárias (ver Simpson, 1972). A segunda região é o corpo, a qual é responsável pela componente gravitacional do fluxo, sendo a região mais importante de estudo e, por fim, a terceira região, a cauda, onde predominam os processos deposicionais e de desaceleração do fluxo.

Nos experimentos realizados, estas três regiões foram identificadas através da análise direta dos vídeos, bem como através das séries temporais de velocidade e de concentração. Como os equipamentos foram posicionados em um ponto fixo (340 cm da comporta), a avaliação das três regiões foi realizada ao longo do tempo (abordagem Euleriana) e não ao longo do espaço (abordagem Lagrangeana). Foram definidos, então, critérios para determinar o tempo de passagem de cada região pelos equipamentos, ou seja, estabelecer ao longo do

tempo total do ensaio, qual intervalo de tempo que representariam a cabeça da corrente, o seu corpo e por fim, a cauda. Baseado nisso, os seguintes critérios foram utilizados (figura 8.2):

- A região da cabeça foi definida, visualmente, como sendo o fluxo formado à frente da corrente (nariz da corrente) até que suas linhas de fluxo não apresentassem fortes movimentos na direção vertical. Isso era realizado através da verificação de marcas que o fluxo deixava nas paredes do canal (figura 8.2.a), quando o fluxo atingia uma certa estabilidade na horizontal, ou seja, não apresentando as fortes componentes de velocidade verticais típicas da cabeça da corrente. Em alguns casos, essa estabilidade coincidia com a presença do primeiro vórtice atrás da cabeça (criando uma espécie de pescoço da corrente);

- O corpo da corrente foi definido como a região imediatamente atrás da cabeça até o momento em que o aporte de sedimento mais considerável (vindo do compartimento de mistura) fosse suspenso. Neste caso, isso era avaliado diretamente nos vídeos, bem como nas séries temporais de velocidade e concentração (figura 8.2b);

- Já a cauda era definida como a região imediatamente atrás do corpo até a parada completa da corrente. Nos experimentos, esse parâmetro não era avaliado corretamente, pois esse parâmetro foi avaliado fixando o tempo final da análise do ensaio e não o tempo final da corrente propriamente dita, que se estendeu além do tempo de filmagem.

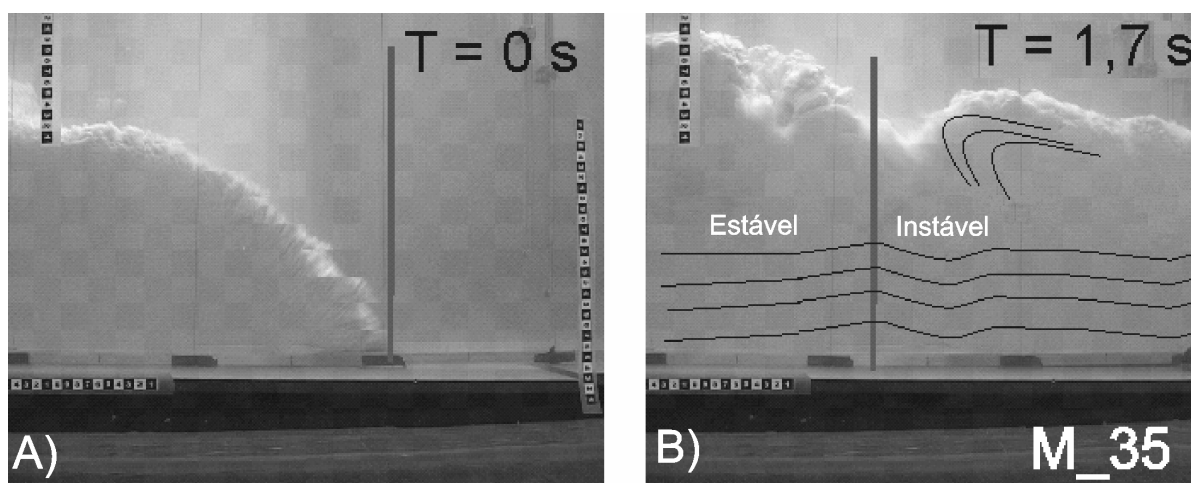


Figura 8.2 Critério para a definição do tempo da cabeça: a) Chegada da corrente no ponto de medida e; b) Estabilização das linhas, com o desenho do deslocamento vertical da corrente junto a cabeça (ilustradas pelas linhas pretas).

A tabela 8.1 apresenta os valores do tempo determinados para cada grupo de ensaio simulado a 340 cm de distância do canal, ou seja, junto à colocação das sondas dos equipamentos e da câmera posicionada a 280 cm da comporta.

A figura 8.3 exibe a relação entre o tempo de passagem, definido para cada uma das três regiões em função da concentração inicial para cada série de ensaios realizada.

Tabela 8.1 Definição dos tempos de passagem da cabeça, do corpo e da cauda.

	Tempo da Cabeça (s)	Tempo do Corpo (s)
NC_02	5,40	50
NC_05	4,40	45
NC_10	3,00	40
NC_15	2,40	38
NC_20	2,20	35
NC_25	2,20	33
NC_30	2,10	30
NC_35	2,00	28
M_02	5,00	50
M_05	3,88	48
M_10	2,44	43
M_15	2,20	38
M_20	2,00	33
M_25	1,92	30
M_30	1,88	28
M_35	1,70	25
C_02	5,80	55
C_05	5,04	47
C_10	3,60	40
C_15	2,80	35
C_20	2,08	30
C_25	1,60	27
B100:K0	2,20	33
B90:K10	2,04	33
B75:K25	2,32	33
B50:K50	2,00	33
B25:K75	2,12	33
B10:K90	2,12	33
B0:K100	2,08	33

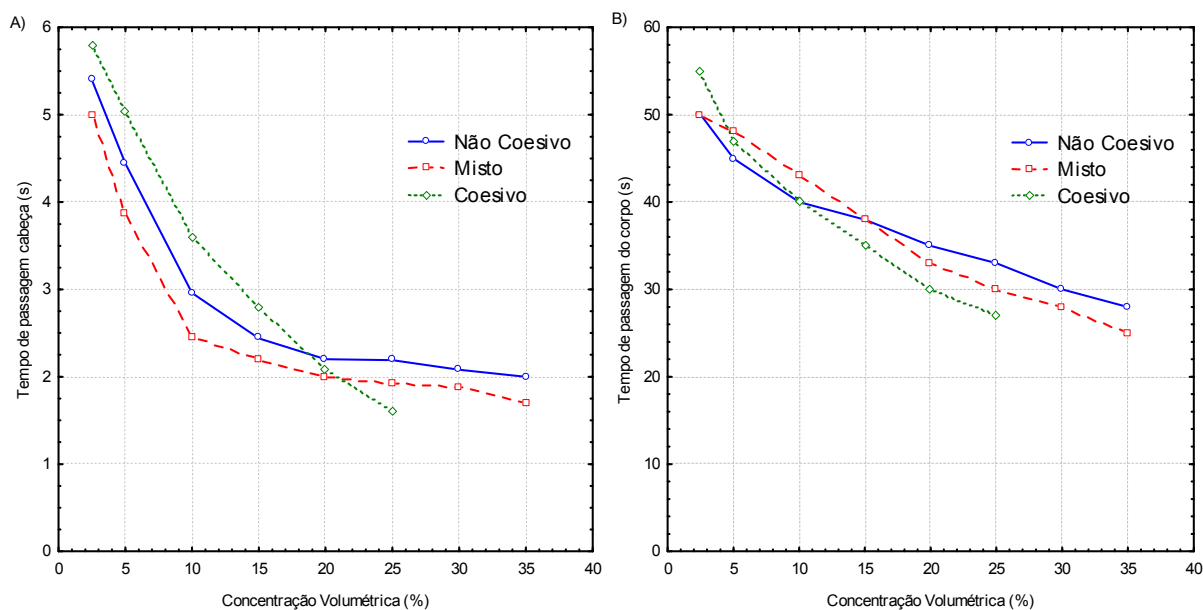


Figura 8.3 Relação do tempo de passagem com a concentração volumétrica para três grupos simulados: a) Cabeça e; b) Corpo.

Pela análise da figura 8.3a, foi verificado que a variação do tempo da cabeça da corrente com a concentração segue um decaimento, à medida que a concentração vai sendo incrementada. Para os grupos não coesivo e misto, a curva apresentou uma tendência seguindo uma lei tipo potência, ou seja, um decréscimo nos valores mais abrupto para as concentrações volumétricas mais baixas (de 2,5% a 10%), e, após isso, de 10% a 35% com um decréscimo praticamente linear, indicando que a partir deste valor, o acréscimo da concentração pouco influenciou no resultado do tempo de passagem da cabeça. Já para o grupo coesivo, foi verificado um decréscimo contínuo da cabeça com o incremento da concentração volumétrica inicial, até chegar ao ensaio C_25 que apresentou o menor valor de tempo para os três grupos.

Quanto ao corpo (figura 8.3b), o decréscimo no tempo para os três grupos foi mais gradual com o incremento da concentração volumétrica, seguindo uma tendência praticamente linear independente da composição da mistura.

Para o grupo transição, os valores da região da cabeça e do corpo não variaram significativamente com a presença de diferentes proporções de argila, ficando então definido o tempo da cabeça em 2,0 segundos e o do corpo em 33,0 segundos (pontos na figura 8.3).

Breve discussão

A definição do tempo de passagem da cabeça, do corpo e da cauda é muito importante, uma vez que definirá os intervalos de tempo que representam essas regiões na análise das séries temporais de geometrias, velocidade e de concentração, bem como de todas as outras análises definidas em termos de valores médios que serão realizadas nos itens subsequentes.

O critério de definição do tempo de passagem da cabeça e do corpo buscou ser o mais realista possível com as condições hidrodinâmicas do escoamento. A análise das marcas junto à parede do canal e das séries temporais de velocidade e concentração permitiram uma boa aproximação para a definição deste critério. Critérios utilizados na literatura como, por exemplo, da cabeça ser o ponto mais alto, na frente, ou pela presença dos vórtices atrás da cabeça (clássica definição de Middleton, 1966a), ou ainda, fixando um tempo para determinar a cabeça do fluxo (como, por exemplo, em McCaffrey et al, 2003 e/ou Choux et al, 2005), não foram considerados pertinentes, uma vez que nenhum deles contempla a totalidade dos elementos que afetam a formação da cabeça.

O incremento da concentração inicial indica que o fluxo acelera, diminuindo o tempo de passagem da cabeça e do corpo. No corpo, essa diminuição é praticamente linear e

gradual, para os três grupos avaliados, enquanto que na cabeça, as correntes de mais baixa densidade são mais lentas e variam mais com o incremento da concentração.

O tempo da cabeça, para o grupo transição, foi praticamente o mesmo, indicando neste caso que a concentração inicial, no caso constante, preponderou mais sobre o fluxo do que propriamente a presença maior ou menor de argila.

O tempo da cauda ficou restrito ao tempo de registro do vídeo e não ao tempo total de sua passagem. Desta maneira, sua análise será mais restrita ao longo do texto.

8.3 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS CORRENTES – VARIAÇÃO TEMPORAL

Aplicando a metodologia descrita no item 6.5.3 foi possível determinar as características geométricas das correntes de densidade simuladas ao longo do tempo (série temporal de 72 segundos) nas três espessuras características do fluxo (figura 8.4), sendo elas:

- espessura da camada de mistura, que considera a altura do limite superior da corrente, incluindo a camada de mistura no seu topo;
- espessura da corrente que foi definida como a espessura da corrente sem considerar a camada de mistura no topo;
- espessura da camada interna estratificada, que considera a espessura interna da interface provocada pela presença de uma zona mais concentrada junto ao fundo.

Pela figura 8.4, o comportamento geométrico das correntes de turbidez simuladas foi bastante variável ao longo do tempo. Em um primeiro momento, foi evidenciado que a espessura da corrente ao longo do tempo (linha cheia) apresentou um valor decrescente para as correntes não-coesivas, indicando que a carga de grãos em suspensão presentes na mistura foi se depositando rapidamente e, conseqüentemente, diminuindo sua quantidade na corrente e formando uma zona menos densa e mais diluída (camada de mistura). Já nos fluxos mistos e coesivos, a presença de argila na corrente fez com que a espessura da corrente se mantivesse mais constante ao longo do tempo, com algumas flutuações causadas pelas instabilidades presentes na interface superior.

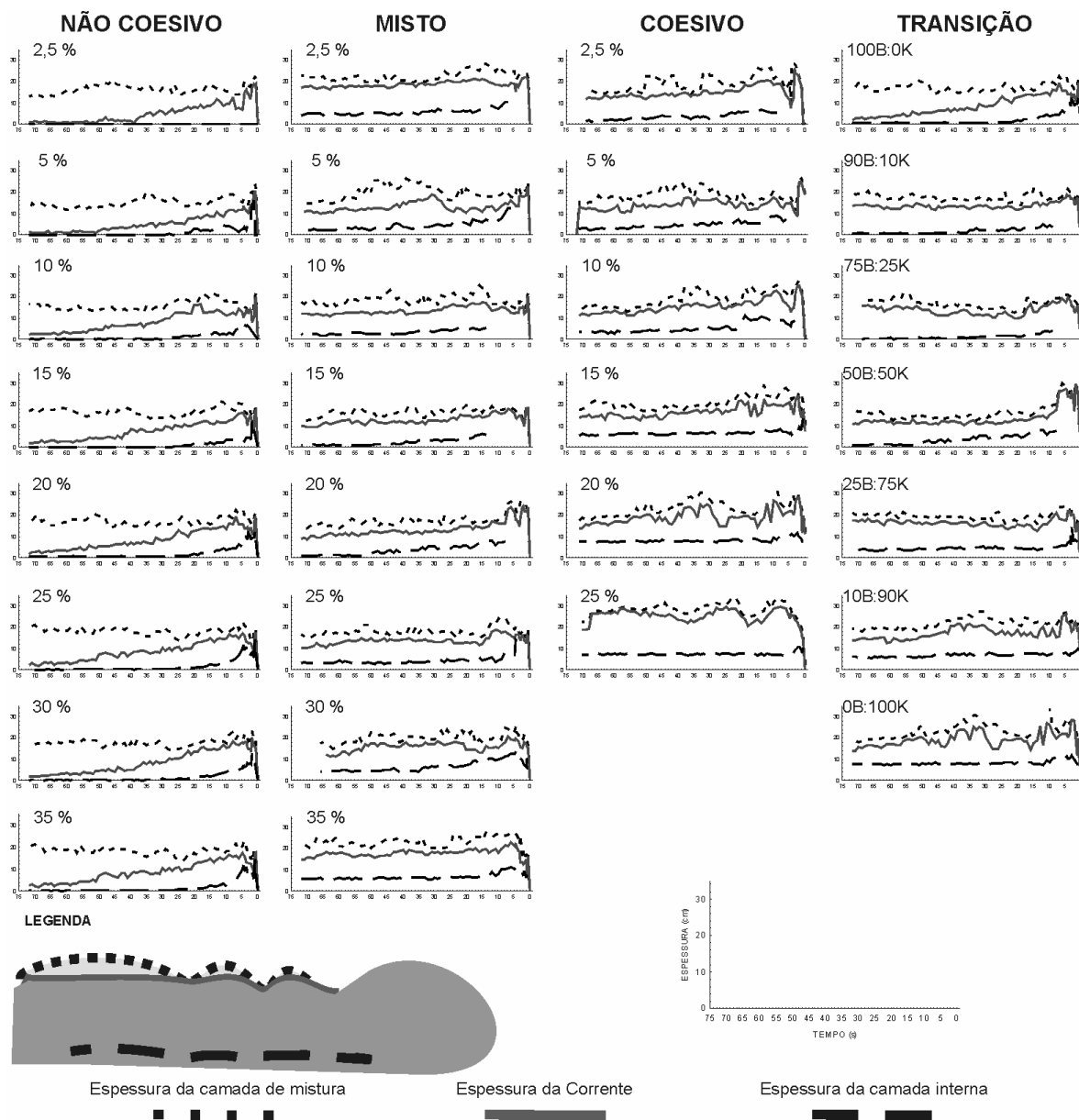


Figura 8.4 Série temporal das características geométricas de todos os experimentos.

Com relação à espessura da camada de mistura (linha pontilhada), foi verificado a presença de fortes instabilidades, caracterizadas por vórtices devido à interface cisalhante entre os dois fluidos (corrente e fluido ambiente). A variabilidade dos valores ao longo do tempo evidencia que não só os maiores vórtices verificados atrás da cabeça que estão presentes na corrente, mas também, oscilações em menor escala ao longo desta interface podem ser identificadas.

Independente da concentração volumétrica utilizada e da composição da mistura, foi verificada a presença de uma camada mais concentrada junto ao fundo (espessura da camada interna estratificada - linha tracejada), cujo processo de formação foi distinto em função da concentração. Para as correntes com mais baixa densidade, esse processo era mais gradual e natural, ou seja, era resultado da desaceleração do fluxo e da deposição dos grãos por gravidade no interior da corrente. Já nos fluxos de mais alta densidade, esse processo era mais

rápido e intenso, sendo que, nas correntes não-coesivas, essa camada mais concentrada se formava logo após a passagem da frente da corrente, enquanto que nos fluxos mistos e coesivos, uma camada de fluido lamosa se desenvolvia junto ao fundo, criando um fluxo lento e espesso nessa região.

Outro fator considerado na medição da geometria da corrente foi a influência das oscilações na interface superior da corrente no seu interior, mais precisamente até a camada interna estratificada. Pelos gráficos da figura 8.4, podemos destacar que, para as concentrações maiores, essa influência ocorre apenas nos momentos iniciais. Já para os fluxos de menor concentração, esse comportamento acontece ao longo de todo o desenvolvimento da corrente, como pode ser notado nas perturbações superiores que influenciaram na geometria da camada interna.

Pela série temporal do grupo transição, foi verificado que os ensaios intermediários (90B:10K, 75B:25K, 25B:75K e 10B:90K) apresentaram um comportamento esperado, ou seja, uma tendência de evolução gradual (transição) entre os comportamentos do grupo não coesivo até misto e do grupo misto até o coesivo. A presença de 10% de argila na corrente (90B:10K) alterou o comportamento da corrente, apresentando os valores maiores para a espessura da corrente. Além disso, foi verificado que a presença de argila acima de 50% fez com que a camada interna (linha tracejada) aumente proporcionalmente à medida que quantidade de argila colocada aumentava (camada lamosa espessa junto ao fundo).

Breve discussão

A definição da espessura da corrente não é simples de ser realizada na prática, visto que é necessário analisar detalhadamente não só as imagens, mas também os perfis de velocidade e de concentração junto à interface superior, para verificar onde ocorre a mudança de comportamento (velocidade e concentração próximos a zero). Assim, o método utilizado para identificar as características geométricas das correntes seguiu um padrão definido na avaliação visual das imagens e permitiu a primeira avaliação deste parâmetro ao longo do tempo, ou seja, com a série temporal dos dados. Através deste tipo de análise, as regiões do fluxo puderam ser identificadas, como a cabeça, o corpo e a cauda da corrente, bem como os processos que ocorrem nestas regiões. Os resultados mostraram a presença de instabilidades na interface cisalhante superior, as quais estão associadas às instabilidades de Kelvin-Helmholtz atrás da cabeça, sendo algumas delas evidenciadas ao longo de toda a vertical da corrente, ou seja, influenciando as camadas internas do fluxo.

Os resultados também apresentam diferentes comportamentos entre os grupos ensaiados, não seguindo uma igualdade com relação à concentração da mistura. Nem sempre

as correntes mais concentradas apresentaram as maiores geometrias. Nas correntes não-coesivas, verifica-se um patamar máximo de altura a partir de concentrações maiores que 20%, enquanto que no grupo misto, houve um mínimo na concentração de 15%. Já no grupo coesivo, a proporcionalidade da concentração volumétrica inicial com a altura é verificada. O mesmo vale quando a quantidade de argila foi aumentada.

Esses dois últimos resultados estão relacionados ao crescimento da camada lamosa para as maiores concentrações, que implica em um fundo móvel para a corrente, acima do fundo fixo, ocasionando o aumento na espessura total da corrente.

Indiretamente, verificou-se que os processos dinâmicos e deposicionais das correntes podem ser avaliados com a determinação das características geométricas para os quatro grupos, especificamente pela análise da camada superior de mistura ao longo do tempo. Para as correntes não-coesivas, foi verificada a segregação mais rápida dos grãos ao longo do tempo, o que ocasionou um aumento significativo no aumento dessa camada de mistura, enquanto que nas correntes com presença de argila, as correntes se mantiveram mais uniformes ao longo do tempo, com pequenos aumentos variando em torno de um valor médio.

O mesmo ocorre na identificação da camada interna estratificada, a qual pode ser detectada ao longo de todo o tempo para todos os ensaios (excetuando o NC_2). A variabilidade mostrada nesse parâmetro para os ensaios extremos (i.e. baixa e alta densidade e não coesivo até coesivo) indicou que importantes processos internos devem ser considerados na análise hidrodinâmica e deposicional de tais fluxos, principalmente visando o entendimento de quais fatores e de como acontece a transição entre esses tipos de comportamento.

8.4 CARACTERÍSTICAS CINEMÁTICAS DAS CORRENTES – VARIAÇÃO TEMPORAL

Os resultados brutos de velocidade foram previamente processados seguindo a metodologia discutida no capítulo 6.5.1 e detalhada no Anexo G, gerando as séries temporais de velocidade medida para as dez posições da sonda ao longo da espessura. Ao todo, 250 gráficos foram gerados e agrupados segundo os quatro grupos de experimentos, sendo que cada um deles representa uma série temporal de 80 segundos (valor escolhido tendo como base a análise das imagens de vídeo, bem como os próprios dados de velocidade que indicavam uma estabilização dos valores nesse tempo). As figuras 8.5, 8.6, 8.7 e 8.8 apresentam esses resultados, sendo que no gráfico mais abaixo representa-se os dados coletados no transdutor posicionado junto ao fundo (posicionado a 0,5 cm) e o mais acima, os dados do último transdutor (posicionado a 15 cm). Em cada figura, os gráficos à esquerda

representam o comportamento dos ensaios com menor concentração volumétrica, a qual cresce no sentido da direita, e o instante zero representa o momento que a frente da corrente atinge o transdutor.

8.4.1 Série temporal do grupo não coesivo.

A figura 8.5 apresenta as séries temporais da velocidade para o grupo não coesivo.

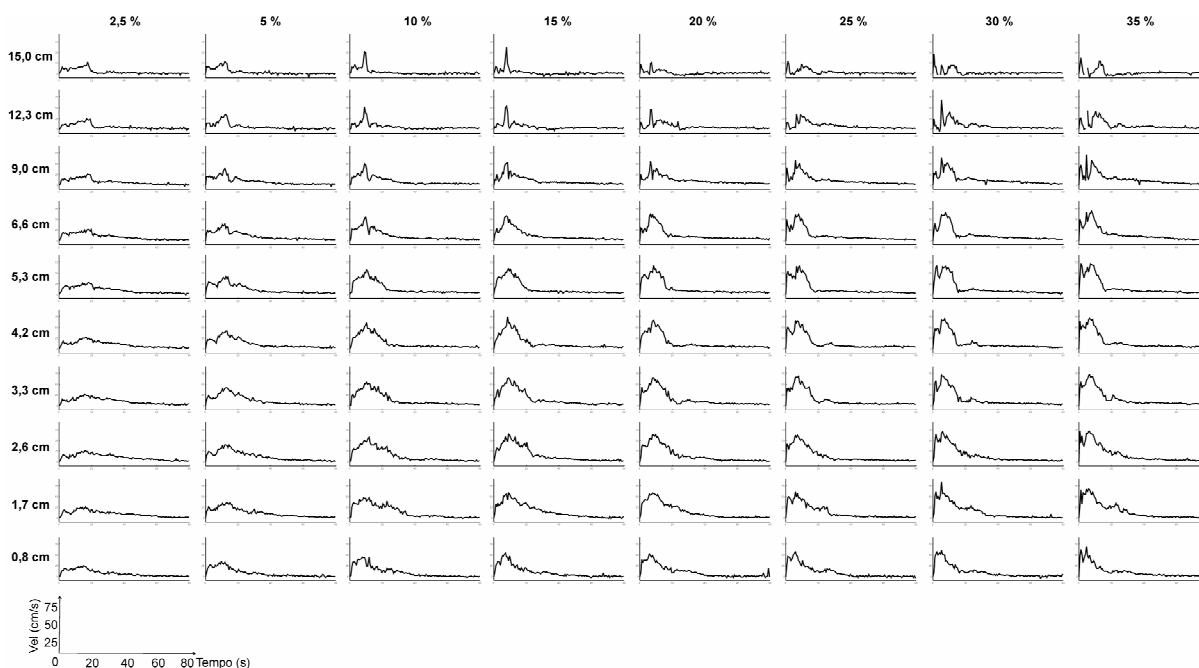


Figura 8.5 Séries temporais da velocidade para o grupo não coesivo

Como pode ser observado na figura 8.5, a passagem da frente da corrente (cabeça) pelo equipamento apresenta uma zona de aceleração da corrente nos instantes iniciais, seguido, posteriormente, pela passagem do corpo (ponto de máxima velocidade e início da desaceleração) e, após isso, pela passagem da cauda da corrente, caracterizada pela sua desaceleração. Este padrão é verificado em todos os ensaios, entretanto, ao longo da vertical, há uma mudança nos valores absolutos, com os maiores valores sendo registrados nas sondas mais próximas ao fundo (1,7 cm até 6,6 cm) e com os menores valores nas sondas superiores, indicando a zona de interface entre a corrente e o fluido ambiente. Foi observado também que, à medida que a concentração aumenta, o comportamento da velocidade da corrente ao longo do tempo se modifica, passando de um perfil mais distribuído e de menor amplitude, para os fluxos de mais baixa densidade, para um perfil com passagem de cabeça e corpo mais rápida e com uma deposição também mais rápida, conforme foi observado na definição do tempo da cabeça, corpo e cauda. A corrente seguiu o comportamento descrito anteriormente por Kneller (1995) e outros, ou seja, com um movimento “quase-permanente” e com a presença de oscilações de velocidade ao longo de uma velocidade média, provocada pelos processos dinâmicos desenvolvidos no interior do fluxo.

Nas sondas superiores (12 cm e 15 cm), é detectada a presença de uma contracorrente, devido tanto à presença de turbilhões na interface superior da corrente, quanto às ondas de reflexão no interior do canal.

Os resultados da velocidade também corroboram à visualização de uma camada mais concentrada junto ao fundo em praticamente todos os ensaios. Esta camada é melhor visualizada nas correntes com mais alta concentração (C_{vol} acima de 10%), nas quais é identificada uma desaceleração mais acentuada após a passagem do pico de máxima velocidade. Esse comportamento foi verificado também, no item anterior (item 8.3 - geometria da camada interna), indicando a deposição mais abrupta dos grãos.

Nos ensaios de mais alta concentração, a velocidade apresenta um aumento de velocidade, logo após a passagem da cabeça e do corpo. Esse aumento de velocidade está atribuído a passagem de uma frente de mistura sobre o sedimento que foi se depositando anteriormente, sendo sua visualização mais evidente nas sondas intermediárias (5 a 12 cm).

A influência da instabilidade na interface superior ao longo de toda a vertical é evidenciada, nos resultados, com o registro dos vórtices de Kelvin-Helmholtz nos instantes iniciais. No grupo não coesivo, como a espessura da corrente foi menor, o efeito na interface superior se propagou verticalmente ao longo de toda a sua espessura (p.ex. NC_35), porém, após isso, pouca influência é verificada nos ensaios.

8.4.2 Série temporal do grupo misto

A figura 8.6 apresenta a série temporal da velocidade para o grupo misto.

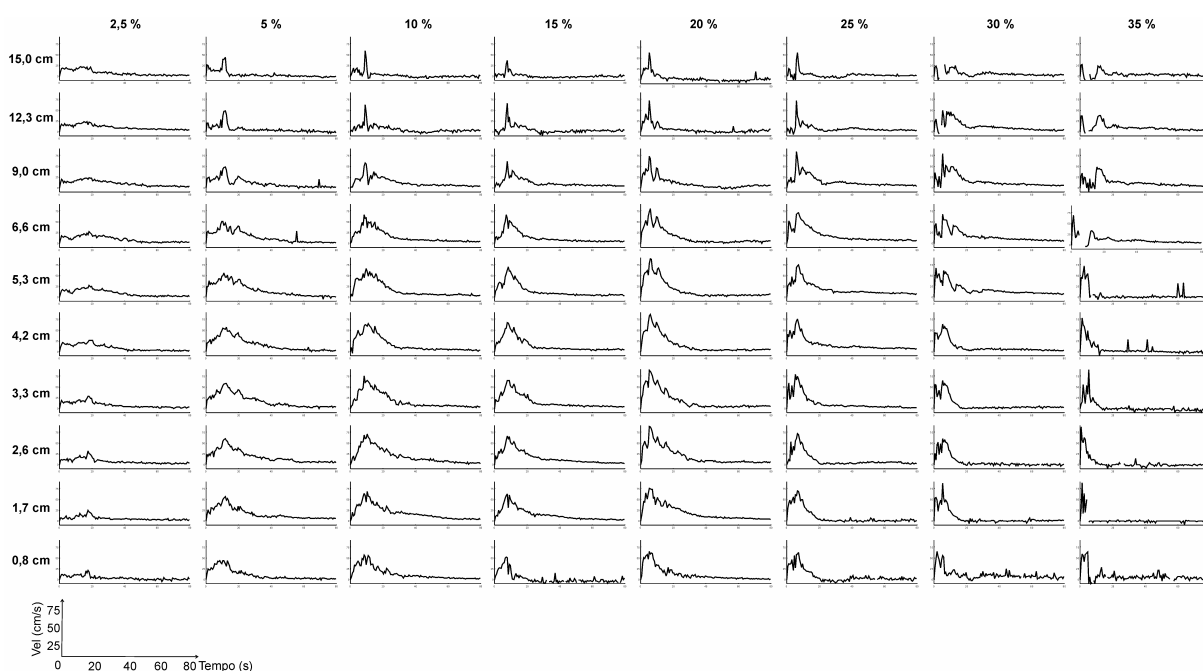


Figura 8.6 Séries temporais da velocidade para o grupo misto

Os resultados das séries temporais do grupo misto evidenciaram, novamente, um perfil mais distribuído ao longo do tempo para as correntes de mais baixa densidade e maiores valores de velocidade ocorrendo para os transdutores posicionados entre 1,7 cm até 6,6 cm. Entretanto, para os fluxos com concentração acima de 25% (M_25), foi verificado um novo padrão de comportamento com relação aos valores de velocidade. Nestes ensaios, junto às sondas do fundo, a presença de uma camada lamosa de fluido foi identificada provocando uma forte desaceleração da velocidade após a passagem da frente da corrente (após 20 s). Já para o ensaio M_35, esse processo é mais evidente, visto que a chegada da camada lamosa basal é abrupta, e, após isso, os valores de velocidade diminuem rapidamente seu valor médio, ou seja, não há uma desaceleração gradual da velocidade. Ainda neste ensaio (M_35), essa camada lamosa mais concentrada atingiu sua maior espessura, em torno dos 5,3 centímetros e notou-se a presença de uma segunda onda de corrente evoluindo do material previamente depositado, que passou a funcionar como um fundo móvel.

Um outro efeito que ocorreu nos experimentos desse grupo, se deu junto às sondas do fundo (aquelas posicionadas entre 0,5 cm a ~5 cm), quando da passagem da camada basal mais concentrada (camada lamosa) nos ensaios de mais alta concentração (> M_25). Nestas sondas, os valores de velocidade média diminuíram drasticamente, porém apresentando fortes oscilações junto ao fundo. Com base apenas neste resultado, é possível especular sobre dois fenômenos, não excludentes, que podem estar ocorrendo: o primeiro, descrito na literatura, seria a incorporação de fluido ambiente junto à interface inferior, que diluiria uma camada junto ao fundo e permitiria o desenvolvimento da corrente naquela região; e o segundo fenômeno seria de que esta zona estaria dentro da subcamada viscosa do fluido, na qual, apesar de ser dominada pelos efeitos viscosos, há pulsos “spots” de turbulência que provocariam o aumento da velocidade. Cabe salientar, também, que é nessa zona, junto ao fundo, que ocorrem os efeitos cisalhantes no fluxo, ou seja, é onde atua a máxima tensão de cisalhamento do escoamento.

Junto às sondas superiores, foi verificado o efeito de reflexão em alguns experimentos (p. ex. M_15 e M_25), entretanto esse fenômeno não influenciou significativamente no resultado.

8.4.3 Série temporal do grupo coesivo

A figura 8.7 apresenta os resultados da variação temporal da velocidade para os ensaios do grupo coesivo.

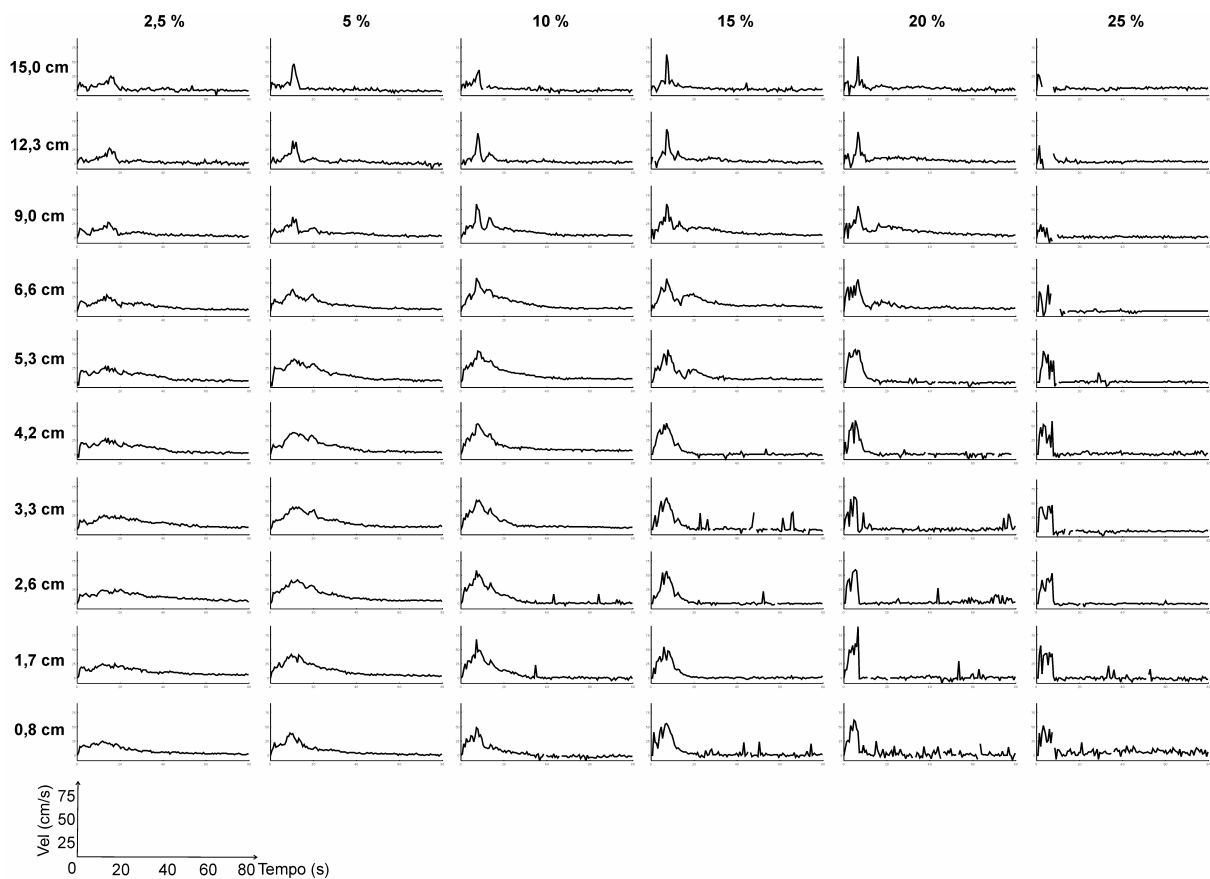


Figura 8.7 Séries temporais da velocidade para o grupo coesivo

Basicamente, nestes experimentos são reproduzidos os mesmos padrões apresentados pelo grupo não coesivo para baixa concentração (até 5%) e pelo grupo misto para as concentrações de 10% até 25%. Todos os processos descritos anteriormente se repetem nestes resultados, entretanto, com uma ordem de magnitude de valores maior. Para alta concentração, novamente foi detectada a passagem da camada lamosa junto ao fundo, sendo seu aparecimento mais gradual para os ensaios C_10 e C_15 (aceleração mais gradual), e muito abrupto para os ensaios C_20 e C_25 (aceleração instantânea). Nestes últimos ensaios, de mais alta concentração, a espessura desta camada atingiu as sondas posicionadas a seis centímetros e a doze centímetros, respectivamente. Novamente, junto ao fundo (0,9 cm), percebe-se uma zona com maiores valores de velocidade.

8.4.4 Série temporal do grupo transição

A figura 8.8 apresenta os resultados da variação temporal da velocidade para os ensaios do grupo transição.

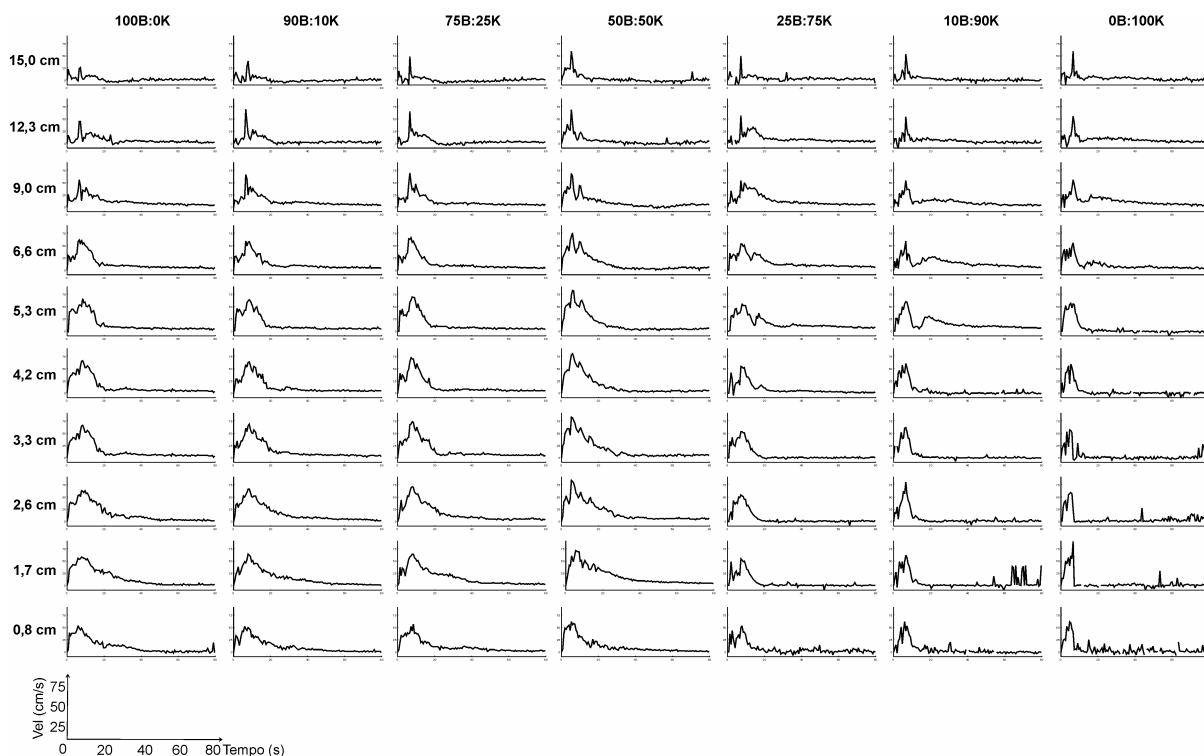


Figura 8.8 Séries temporais da velocidade para o grupo transição

Neste grupo, partindo do grupo não coesivo (100B:0K), passando pelo grupo misto (50B:50K) e chegando ao grupo coesivo (0B:100K), foi verificado que os ensaios intermediários apenas desenvolveram um comportamento gradual entre os grupos, não apresentando nenhum comportamento diferenciado que pudesse ser constatado. Apenas, no ensaio 10B:90K, a presença do material não coesivo (esferas de vidro) em 10%, evitou que a camada lamosa apresentasse um comportamento mais brusco de desaceleração após a passagem da frente, atenuando-a.

Breve discussão

Com a descrição das séries temporais de velocidade foram, basicamente, identificados três padrões de comportamento com relação à concentração inicial da corrente e com a presença de argila.

No primeiro comportamento ocorre para os fluxos de mais baixa concentração (< 10%), nos quais foram verificados que a velocidade apresenta um padrão mais distribuído com o tempo, ou seja, com uma aceleração não tão significativa e com uma desaceleração bem gradual (zona de waxing e waning, respectivamente, segundo Kneller, 1995). Esse padrão foi verificado nos três grupos ensaiados, enquanto que, para as correntes mais concentradas, o comportamento foi diferenciado, visto que os valores apresentaram um pico de mais alta velocidade nos instantes iniciais, seguido de uma desaceleração (waning) até o final do ensaio. Essa desaceleração foi diferenciada em termos

da concentração inicial e da presença de argila. Um segundo comportamento foi identificado com os fluxos não coesivo, mistos (até 30%), coesivos (até 15%) e transição (até 90% de argila), houve uma redução de velocidade mais gradual com o tempo, ainda que seja identificada nos ensaios a presença de uma camada mais concentrada junto ao fundo (não coesivo) e/ou a camada lamosa (mistos, coesivos e transição).

O terceiro tipo de comportamento ocorreu para os fluxos extremos do grupo misto e coesivo (M_35 e C_20 e C_25%), uma vez que foi identificada uma abrupta desaceleração do escoamento após o pico de velocidades, com as correntes praticamente parando e se depositado por congelamento (instantaneamente). Van Kessel & Kranenburg (1996); Mohrig & Marr (2003); entre outros, também estudaram detalhadamente correntes com mais alta concentração, encontrado um comportamento de escoamento muito similar.

Pela análise da velocidade, pode-se constatar, visualmente, que o comportamento de algumas séries de velocidades do grupo transição (p. ex. 25B:75K) é muito similar à série (C_15), bem como a série do grupo misto (M_35) e coesivo (C_20) são muito semelhantes, o que indica que a presença de argila influencia de tal maneira o escoamento, que praticamente ignora a presença das partículas não-coesivas, no caso as esferas de vidro.

Com relação à dinâmica do fluxo, foram identificados, pela análise da série temporal, a presença de turbilhões de Kelvin-Helmholtz na interface superior e a propagação destes vórtices para o interior da corrente (podendo incorporar água), ou seja, sua influência ao longo da vertical e que velocidade máxima da corrente ocorre nas sondas acima do fundo (entre 1,5 até 5 cm). Também, a presença da zona cisalhante junto ao fundo faz com que a velocidade naquela região seja maior que em alguns pontos acima dela.

8.5 CARACTERÍSTICAS CINEMÁTICAS DAS CORRENTES – PERFIL VERTICAL MÉDIO DE VELOCIDADES

Com os dados da série temporal da velocidade foram obtidos os perfis verticais de velocidade média da região da cabeça, do corpo e da cauda para todos os ensaios realizados. Sendo assim, neste capítulo serão apresentados esses resultados para cada grupo isoladamente. O enfoque principal desta análise será sobre o corpo da corrente, uma vez que, conforme será apresentado adiante, a região da cabeça não pode ser tratada em termos médios devido à ocorrência de forte tridimensionalidade nesta região e, como os sensores só tinham uma componente, o seu resultado não era significativo e a cauda pouco influencia na dinâmica do escoamento.

8.5.1 Perfil vertical médio de velocidades do grupo não coesivo.

A figura 8.9 apresenta os perfis verticais de velocidade média do grupo não coesivo para as regiões da cabeça, do corpo e da cauda da corrente.

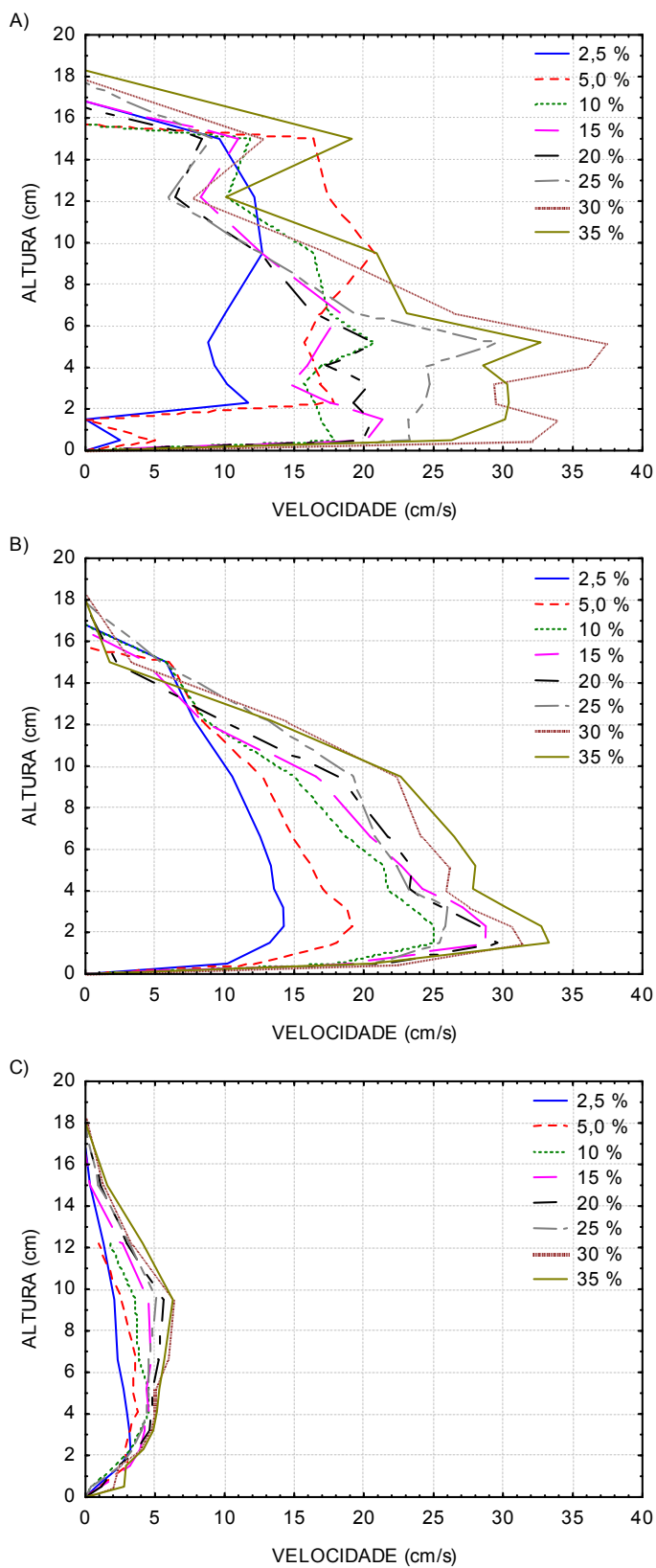


Figura 8.9 Perfis de velocidade verticais médios do grupo não coesivo: a) Cabeça; b) Corpo e c) Cauda.

Pela análise geral dos perfis de velocidade média da cabeça, do corpo e da cauda (figura 8.9), verifica-se que a velocidade média está diretamente ligada com a concentração volumétrica, já que ela aumenta com o aumento da concentração em cada ensaio. Apenas em poucas situações essa variação direta não foi caracterizada, podendo estar relacionada a singularidades do experimento, uma vez que não houve repetição dos mesmos.

Na região da cabeça (figura 8.9a), foi identificado um perfil de velocidades completamente diferente dos padrões de correntes de turbidez. Uma região de mais alta velocidade, com uma espécie de variação ao longo da vertical (serrilhada) se desenvolveu junto ao fundo e, logo acima deste ponto, foi notado um decrescimento dos valores, possivelmente gerado pelos efeitos tridimensionais do escoamento. Esse comportamento poderia indicar que o fluxo que se desenvolveu no interior da corrente (vindo do corpo) migrou, de baixo para cima, numa espécie de “arco” (*loop*) para as regiões atrás da cabeça, provocando vórtices no pescoço da corrente. Esse “arco” se formou devido à resistência do fluido ambiente que atua como um obstáculo à frente da corrente, analogamente à entrada de um escoamento rápido em ressalto hidráulico. Esse tipo de comportamento foi verificado em todos os ensaios, apenas com a diferença de magnitude nos valores de velocidade.

A variabilidade dos valores da velocidade média (oscilação dos valores do perfil) na parte mais rápida do fluxo (junto ao fundo), pode ser explicada pelas instabilidades secundárias (lobos e rachas) que estão atreladas à dinâmica da cabeça. Esse padrão de lobos e rachas, descrito em Simpson (1972), provoca o carreamento de água para o interior da corrente e fluxos reversos ao longo da cabeça. Devido a essas instabilidades no interior do fluxo, a utilização do perfil médio da cabeça não serve para descrever os fenômenos das correntes de turbidez, tendo sua análise um caráter mais qualitativo.

Já os perfis de velocidade média do corpo da corrente não-coesiva apresentam uma modificação de comportamento à medida que a concentração foi sendo incrementada (figura 8.9b). Nas correntes de mais baixa densidade, foi notado um perfil de velocidades melhor distribuído ao longo da altura, ou seja, com uma menor diferença entre o valor médio e máximo de velocidade. Quanto às correntes de mais alta densidade, há uma zona mais acentuada (nariz da corrente) que se desenvolve junto ao fundo, a qual foi atribuída à presença da camada de sedimentos mais concentrada junto ao fundo formada e ao longo do experimento. Acima disso, um perfil com velocidades maiores (perfil mais homogêneo) foi visualizado até as alturas de aproximadamente 10 cm a 12 cm seguido de uma estratificação um pouco mais gradual até os valores considerados como zero (limite da corrente com o fluido ambiente).

Quanto ao perfil da cauda da corrente (figura 8.9c), foi verificado que os valores absolutos de velocidade foram pequenos, indicando ser essa uma zona predominantemente de deposição. Devido à deposição de grãos que foi ocorrendo durante a passagem da corrente, o perfil de velocidades foi sendo deslocado para cima (aumento da altura da velocidade máxima) uma vez que, a corrente, se desenvolveu sobre o seu próprio depósito.

8.5.2 Perfil vertical médio de velocidades do grupo misto.

Os perfis verticais médios de velocidade para os ensaios do grupo misto (figura 8.10) apresentaram um comportamento um pouco diferenciado do grupo não coesivo. Para esse grupo a região da cabeça não será avaliada.

Na zona do corpo (figura 8.10b), as mudanças na forma do perfil de velocidades médio são evidentes, à medida que a concentração vai aumentando. Até o ensaio M_20 (fluxos de mais baixas concentração), os perfis determinados são bastante similares aos do grupo não coesivo, tanto na forma quanto na relação direta com a concentração volumétrica inicial. A presença de uma região de máxima velocidade junto ao fundo, também indica o desenvolvimento de uma zona mais veloz que se formou ao longo da passagem do fluxo.

Entretanto, para os fluxos mais concentrados ($C_{vol} > 20\%$), o perfil de velocidade médio evidencia a presença de uma zona do escoamento junto ao fundo com velocidades mais baixas. Essa zona é atribuída à formação de camada lamosa de sedimentos, a qual reduz os valores de velocidade da corrente nesta região e serve de fundo falso para a corrente sobre ela se desenvolver, atingindo inclusive velocidades máximas acima desta camada. A magnitude desse efeito foi sendo maximizada à medida que a concentração foi aumentando, ou seja, foi ocorrendo a diminuição do valor da velocidade média e o aumento da zona de baixa velocidade.

Para a zona da cauda (figura 8.10c), o comportamento observado para o corpo repetiu-se até o ensaio M_20, com a evidência da corrente mais concentrada junto ao fundo. Porém, acima da concentração de 20%, verifica-se que o fluxo se desenvolveu sobre um fundo móvel que praticamente estava depositado e com valores de velocidade muito próximos de zero.

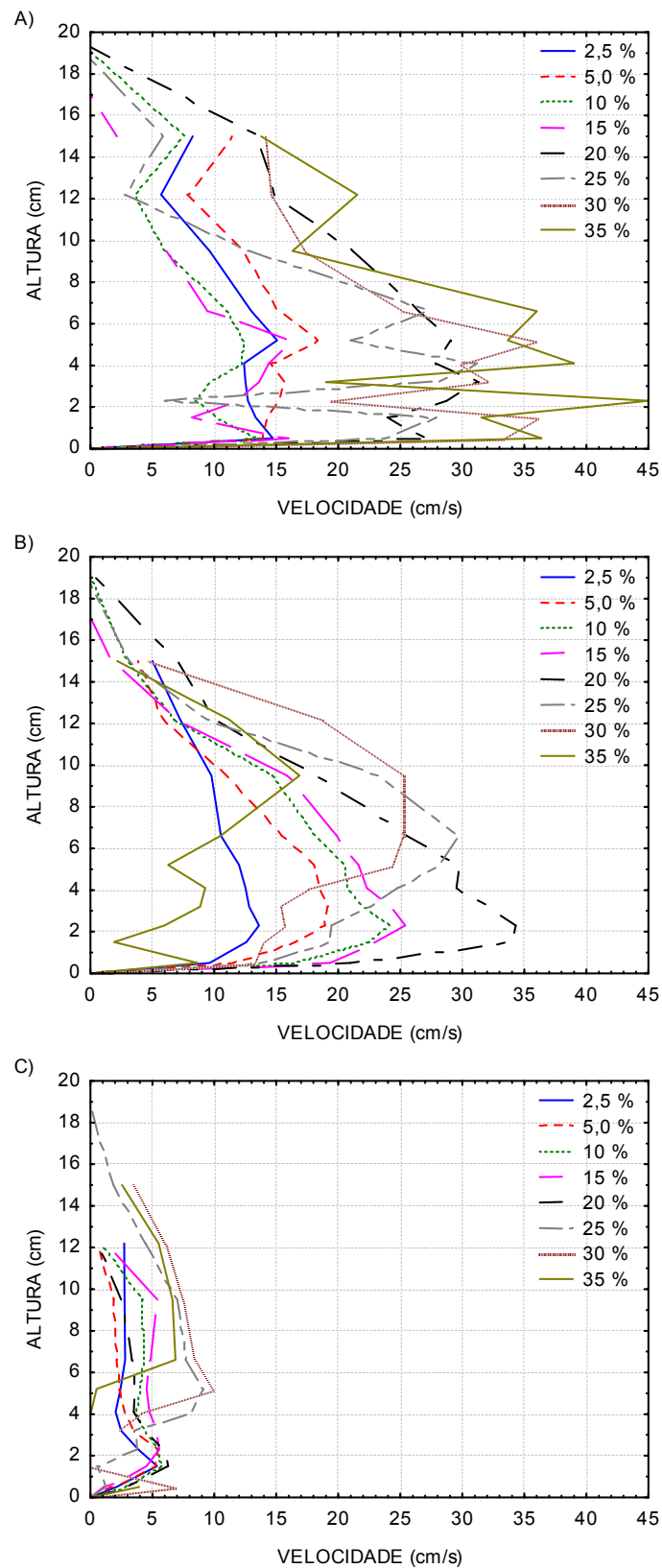


Figura 8.10 Perfis de velocidade verticais médios do grupo misto: a) Cabeça; b) Corpo e; c) Cauda.

8.5.3 Perfil vertical médio de velocidades do grupo coesivo.

O comportamento evidenciado no grupo coesivo (figura 8.11), praticamente foi o mesmo do grupo misto, entretanto, com outros limites de concentração.

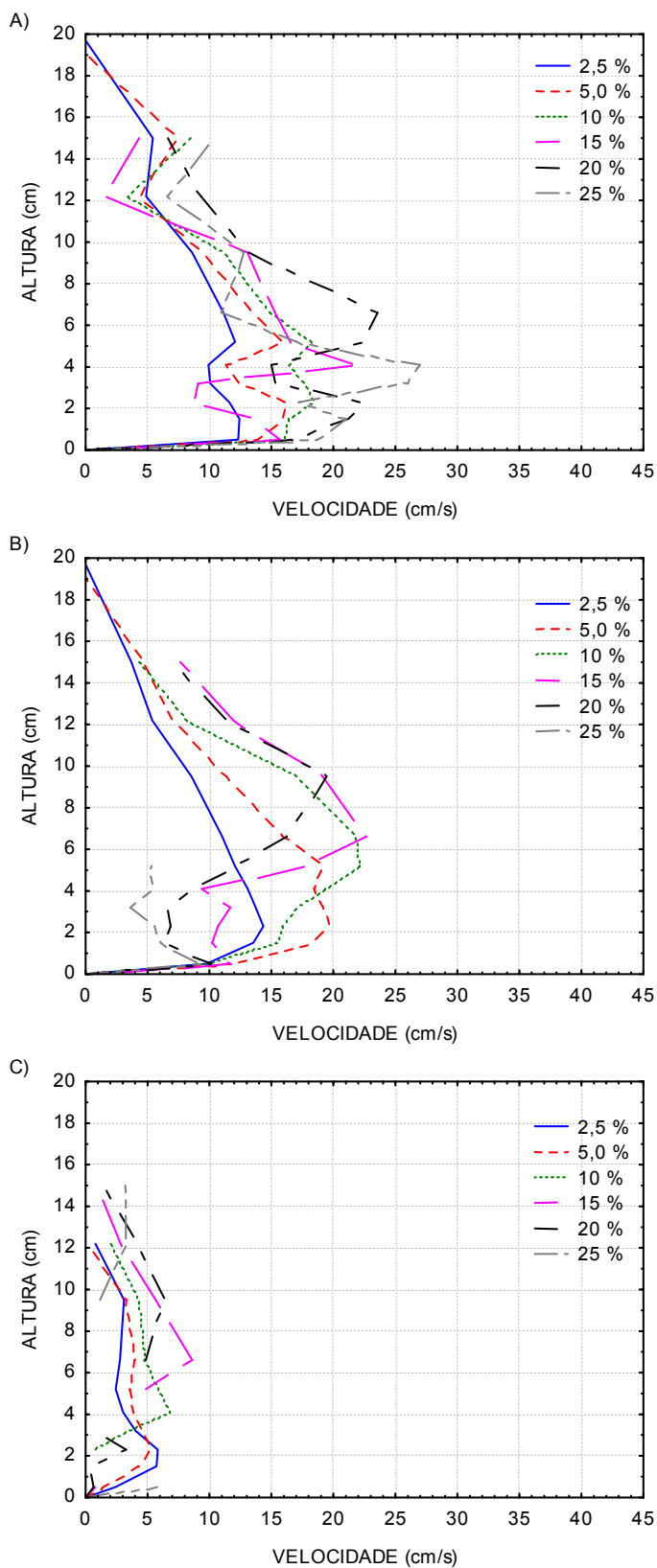


Figura 8.11 Perfis de velocidade verticais médios do grupo coesivo: a) Cabeça; b) Corpo e; c) Cauda.

Neste grupo, até a concentração de 10% (C_{10}), a corrente se desenvolve com o seu perfil padrão (similar ao perfil do grupo não coesivo) e, acima desta concentração, aparece a presença da camada mais lenta junto ao fundo (camada lamosa de sedimentos). Nota-se,

ainda, que o perfil de velocidades médio do ensaio C_25, apresentou os menores valores, praticamente nulos, o que não permitirá muitas análises para neste ensaio.

8.5.4 Perfil vertical médio de velocidades do grupo transição.

O perfil de velocidade médio do grupo transição apresentou um comportamento muito similar com o grupo misto e coesivo (figura 8.12), entretanto com um limiar não condicionado pela concentração, mas sim, pela presença de argila. Os perfis de velocidades do corpo das correntes apresentaram um padrão bem definido.

Do ensaio não coesivo (100B:0K) até o ensaio do grupo misto (50B:50K), as correntes se desenvolveram com uma predominância do sedimento não coesivo, ou seja, sem a presença da camada lamosa maciça e com uma distribuição de velocidades muito parecida com o grupo não coesivo. Já do grupo misto (50B:50K) até as correntes completamente coesivas (0B:100K), os perfis se assemelharam, como esperado, às correntes mais concentradas destes grupos, ou seja, com a forte estratificação provocada pela presença da camada lamosa junto ao fundo. Como a concentração inicial das correntes era a mesma, a altura da camada lamosa se manteve praticamente constante, indicando que a diminuição da velocidade para os grupos mais coesivos ocorreu devido à presença deste material, que retardou sua velocidade. O mesmo comportamento se observou na cauda da corrente.

Breve discussão

Foram levantados os perfis de velocidades médios das correntes de densidade simuladas nas regiões da cabeça, do corpo e da cauda. Verificou-se que, para a região da cabeça, a avaliação do perfil médio de velocidades não é apropriada, uma vez que nessa região há a presença de efeitos tridimensionais do escoamento, logo elas deveriam ser avaliadas separadamente, ou melhor, instantaneamente ao invés de um valor médio.

Na principal região do escoamento, o corpo da corrente, foi verificado que o padrão do perfil de velocidades, para a maioria das correntes, apresenta um pico com velocidade maior (velocidade máxima), sendo zero junto ao fundo (condição de não deslizamento dos escoamentos junto a parede) e com valores muitos baixos junto à interface superior.

Para os fluxos de mais baixa densidade, esse perfil é mais homogêneo ao longo da vertical, com os valores de velocidade máxima (nariz da corrente) e o valor médio sendo mais próximos, enquanto que, à medida que a concentração vai aumentando, os valores da velocidade máxima também aumentam, criando uma região mais saliente junto ao fundo e, por conseguinte, um perfil menos homogêneo.

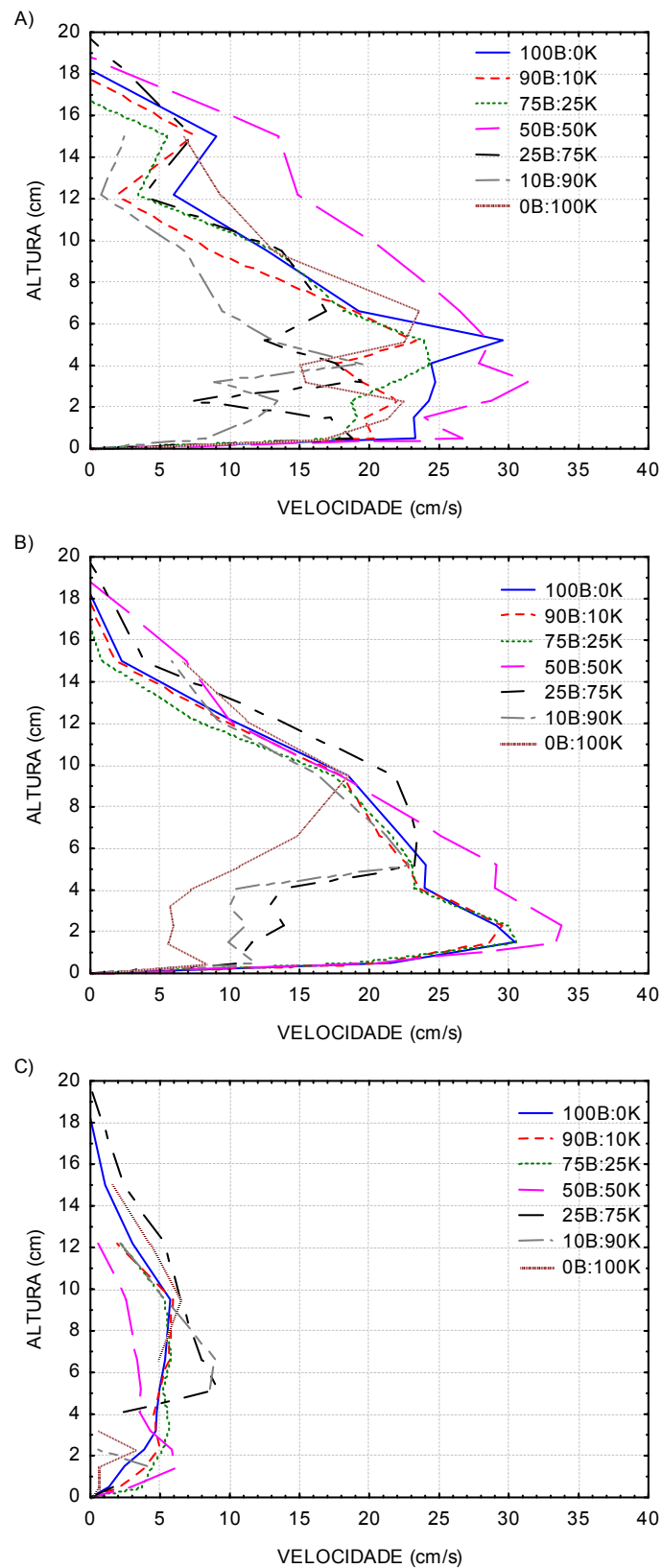


Figura 8.12 Perfis de velocidade verticais médios do grupo transição: a) Cabeça; b) Corpo e c) Cauda

Para os fluxos de mais alta concentração e com presença de argila, o comportamento do perfil de velocidades foi distinto. A presença de uma zona junto ao fundo com velocidades mais baixas indica que o comportamento hidrodinâmico do escoamento não foi tão simples

quanto o dos fluxos de mais baixa concentração. Essa zona de velocidades baixas é atribuída à passagem de uma camada lamosa de sedimentos, que escoam com uma velocidade praticamente constante (“plug” de sedimentos), reduzindo seus valores junto ao fundo e servindo de base (fundo móvel) para o escoamento que ocorre acima desta zona.

A identificação e a caracterização desse comportamento duplo nas correntes de mais alta densidade é importante para o entendimento dos processos deposicionais, cuja formação e desenvolvimento serão discutidas adiante.

O comportamento da cauda da corrente reproduz o comportamento do corpo, porém, com velocidades absolutas menores, indicando ser basicamente essa uma zona de desaceleração do fluxo e de deposição de grãos. Nos fluxos com presença de argila, houve a diferenciação da presença desta camada junto ao fundo, a qual serviu de base para o escoamento com menor velocidade acima dela.

8.6 CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS CORRENTES – ANÁLISE TEMPORAL

Os dados de concentração foram obtidos com a metodologia descrita no capítulo 6.5.2. A partir dos dados adquiridos durante a passagem da corrente, foi possível construir a série temporal da concentração auxiliando na interpretação da dinâmica interna da corrente. Neste caso, a série de dados foi truncada em 90 segundos, uma vez que, após este valor, a variação do registro da concentração foi considerada constante. As quatro sondas utilizadas estavam distribuídas na vertical e o instante zero representa o momento da chegada da corrente junto à primeira sonda. No Anexo H, encontram-se os dados brutos de concentração volumétrica de cada experimento.

8.6.1 Série temporal do grupo não coesivo

A figura 8.13 apresenta as séries temporais das quatro sondas de concentração utilizadas nos ensaios realizados para o grupo não coesivo. O comportamento dos valores variou com a concentração inicial, já que para as correntes de mais baixa concentração, esse perfil foi mais distribuído ao longo do tempo (crescimento inicial na passagem da frente e uma redução mais gradual ao longo do tempo) e para as correntes com mais alta concentração, foi verificada, junto ao fundo, uma subida brusca de valores (degrau) na chegada da corrente, seguido de um patamar com valores praticamente constantes e, por fim, uma descida também abrupta na zona do corpo da corrente, onde os valores da concentração foram reduzidos, indicando uma deposição mais rápida de material.

Para os fluxos mais concentrados foi identificada a formação e a passagem da camada interna mais estratificada junto ao fundo, com um rápido acréscimo dos valores de concentração medida, seguido de uma posterior redução dos mesmos. Para as sondas junto à superfície da corrente, verifica-se que as instabilidades que ocorrem na interface superior, como a presença dos vórtices provenientes das instabilidades de Kelvin-Helmholtz, são detectados através da diluição e, conseqüente, diminuição da concentração, provocadas pelo carreamento de água no interior da corrente. Esse fenômeno foi evidente nas correntes de mais alta concentração.

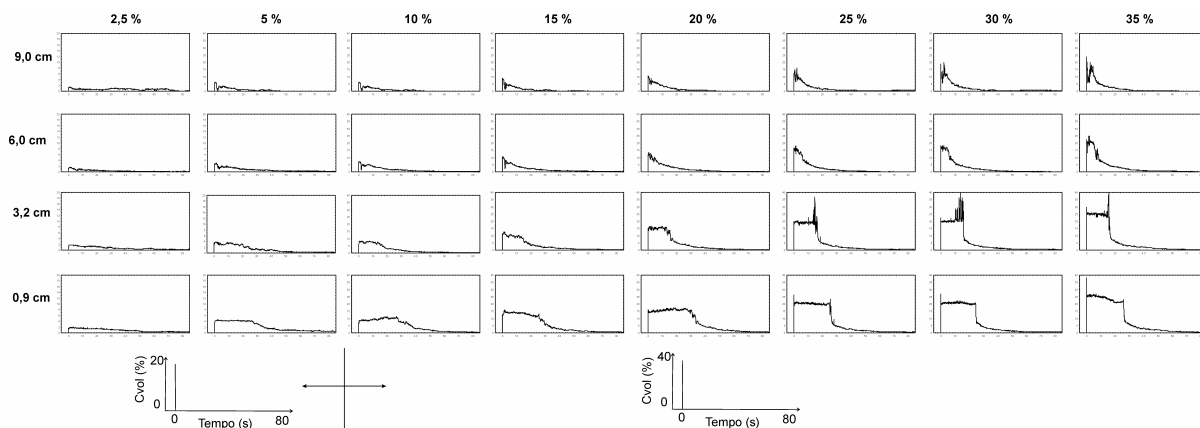


Figura 8.13 Série temporal da concentração para o grupo não coesivo.

8.6.2 Série temporal do grupo misto

A figura 8.14 apresenta o resultado para o grupo misto. Neste grupo de experimentos, a presença de argila mudou o comportamento da concentração ao longo do tempo.

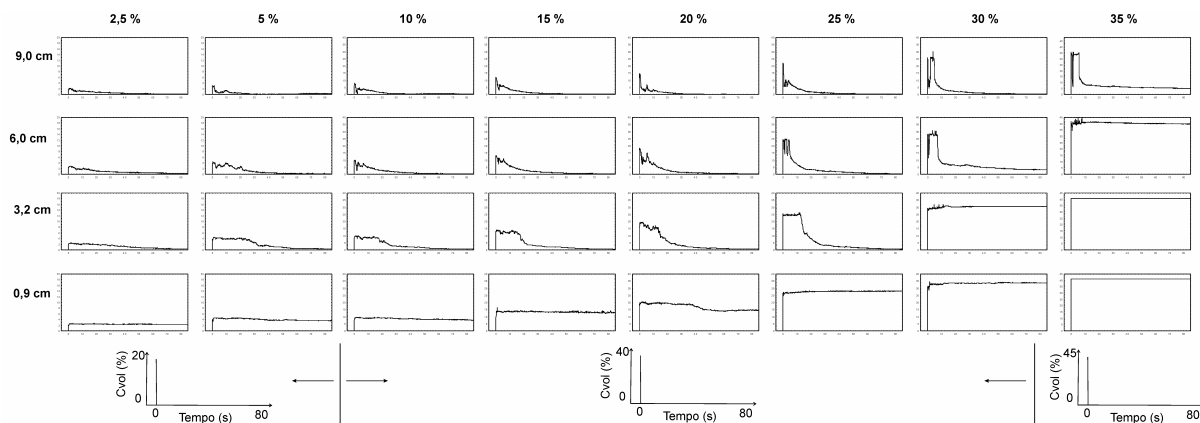


Figura 8.14 Série temporal da concentração para o grupo misto

Para as correntes de baixa concentração foi verificado que os valores de concentração foram invariáveis ao longo do tempo, principalmente na sonda junto ao fundo (0,9 cm). Já nas zonas mais próximas das superfícies, ocorre um efeito similar ao fluxo não coesivo, com a redução dos valores ao longo do tempo, ocasionado pela deposição de grãos e do carreamento do fluido ambiente para o interior da corrente.

Para os fluxos de mais alta concentração, a grande mudança no comportamento dinâmico da corrente se deu com o incremento da concentração e a formação de uma camada lamosa junto ao fundo. Nestes experimentos, as séries temporais apresentaram praticamente um único valor constante após a passagem da frente sobre o equipamento, devido à grande concentração dentro da camada lamosa.

Nas sondas mais superiores, ocorre novamente o comportamento dos fluxos não coesivos, com a chegada abrupta da corrente, a presença de um patamar e a redução drástica da concentração após sua passagem. As instabilidades de Kelvin-Helmholtz são verificadas na superfície, atingindo alturas intermediárias da corrente.

8.6.3 Série temporal do grupo coesivo

A figura 8.15 apresenta o resultado para o grupo coesivo. Neste grupo, o comportamento das correntes foi muito similar ao descrito para o grupo misto. A presença das séries temporais quase constantes foi originada pela presença da argila, a qual é mais difícil de se depositar, mantendo-se em suspensão por mais tempo. No ensaio C_25, os valores medidos para as quatro sondas apresentam, novamente, o comportamento tipo degrau, indicando que, nesse ensaio, a presença da camada lamosa atingiu sua maior espessura (~12 cm). Junto ao fundo, foi identificado o crescimento dos valores da concentração medida, progressivamente com o aumento da concentração inicial.

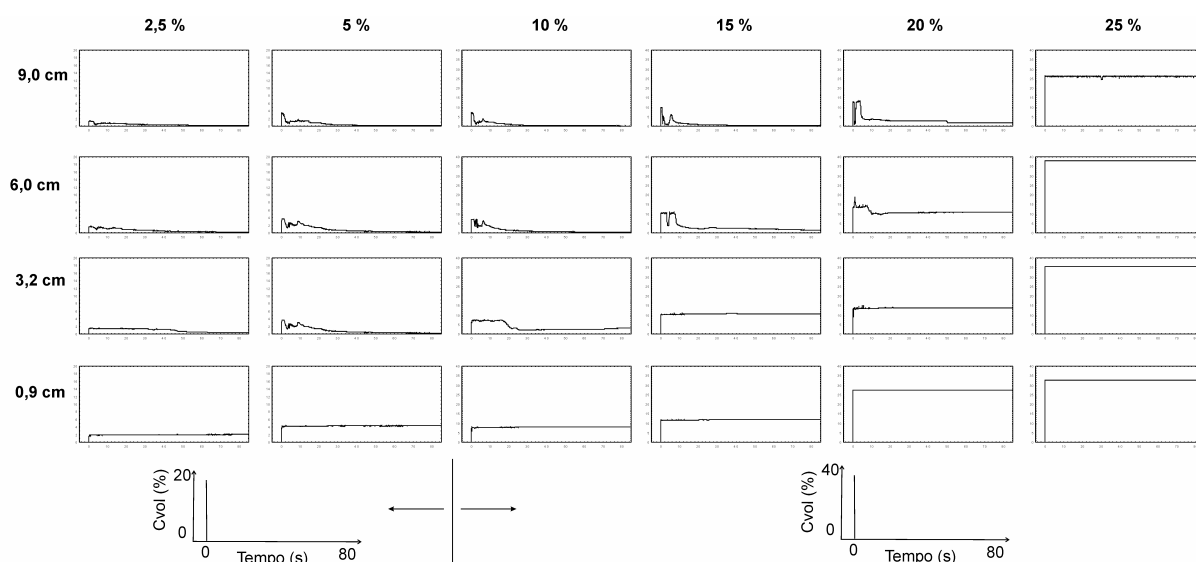


Figura 8.15 Série temporal da concentração para o grupo coesivo.

8.6.4 Série temporal do grupo transição

A figura 8.16 apresenta o resultado da medição das concentrações para o grupo transição. Neste grupo, novamente, se verifica o processo de transição entre os comportamentos descritos anteriormente. Ainda assim, novos padrões foram identificados. No

fluxo com apenas 10% de argila (90B:10K), foi notado, junto ao fundo, que os valores de concentração apresentaram uma influência da presença da argila, não se reduzindo gradualmente como os valores do ensaio 100B:0K. Esse comportamento vai se propagando com o aumento da presença de argila na mistura, pois as sondas acima do fundo (3,2 cm) começaram a apresentar essa mesma forma (25B:75K). Uma outra diferença foi notada nas sondas superiores, uma vez que, para as correntes mais coesivas, o comportamento da concentração seguiu o anteriormente exposto (subida abrupta seguida de um valor constante), enquanto que para as correntes menos coesivas a concentração atingiu um valor mais alto e, após atingido esse pico, houve a redução gradual dos valores.

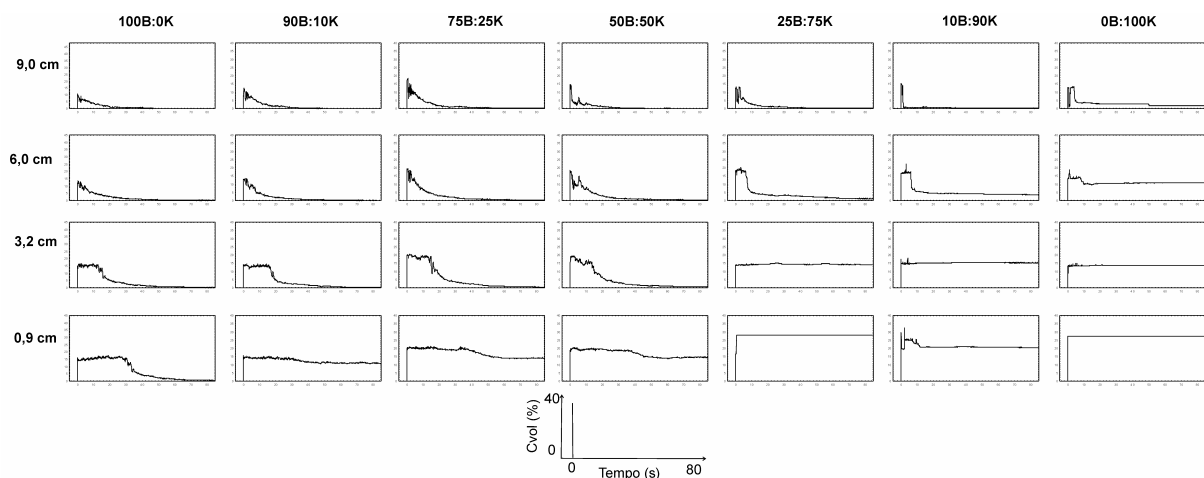


Figura 8.16 Série temporal da concentração para o grupo transição.

Breve discussão

Os resultados da análise da série temporal de concentração para os quatro grupos apresentaram comportamentos distintos para os fluxos formados por grãos não coesivos e por aqueles formados por grãos coesivos (argila). Além disso, houve uma variação de comportamento entre as correntes de mais baixa densidade e as correntes de mais alta densidade.

Assim como o perfil de velocidades, as correntes com mais baixa concentração apresentaram um comportamento mais gradual de crescimento e decrescimento de valores com o tempo. Em outras palavras, a passagem da corrente pela sonda de medidas de concentração apresentou um comportamento mais distribuído, não apresentando mudanças drásticas/abruptas ao longo do tempo. Por outro lado, para as correntes mais concentradas, ocorrem efeitos instantâneos mais significativos, com uma chegada abrupta da frente do fluxo, seguido de um decrescimento também abrupto. Antes do decaimento dos valores, porém, foi verificada a presença de uma camada mais concentrada junto ao fundo que incrementou os valores da concentração e que se depositou rapidamente.

Já para as correntes com presença de argila, o que pode ser destacado é a permanência da argila em suspensão mantendo os valores de concentração mais constantes ao longo do tempo. Naqueles experimentos de mais alta concentração, a presença da camada lamosa foi representada por um perfil praticamente constante (patamar de valor), o qual indicava que a sonda estava submersa nesta camada. Esse perfil era incrementado à medida que a concentração aumentava, sendo facilmente verificado pelo formato da série temporal. Os efeitos de saturação da sonda foram minimizados com a análise criteriosa dos dados. Nas correntes de mais baixa densidade, apesar da presença de argila, os valores foram mais distribuídos ao longo do tempo.

Já, na região superior da corrente, foi verificado que a dinâmica do fluxo é altamente influenciada pelas instabilidades que ocorrem na interface do fluido ambiente com a corrente. O carreamento de água e a consequente diluição da corrente foram registrados junto às sondas superiores, indicando ser este um fenômeno que não deve ser negligenciado na análise das correntes de turbidez. No caso, as correntes menos concentradas sofrem mais esta influência, pois qualquer alteração no valor da concentração é significativamente notada.

Os processos de transição, apresentados entre o comportamento não coesivo e coesivo (grupo transição), indicam a forte influência da presença de argila nos processos hidrodinâmicos do fluxo, uma vez que pode ser claramente visualizado o incremento da camada mais concentrada junto ao fundo e seu desenvolvimento gradual e sem descontinuidade, à medida que uma maior quantidade de argila está presente na mistura.

8.7 CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS CORRENTES - PERFIL VERTICAL MÉDIO

Com os dados da série temporal de concentração foram determinados os perfis verticais de concentração média para as regiões da cabeça, do corpo e da cauda em todos os ensaios realizados. Os perfis de concentração utilizaram os quatro dados obtidos em cada ponto com as sondas do medidor de concentração - UHCM. Apesar de não englobar toda a seção vertical da corrente, esses valores representam a variação de concentração que ocorre no interior do fluxo. Novamente, o foco da análise será a região do corpo da corrente .

8.7.1 Perfil vertical médio de concentração do grupo não coesivo

Os perfis de concentração do grupo não coesivo (figura 8.17) apresentam, para as regiões da cabeça e do corpo, uma diferença de valores que preserva a diferença de 5% observada na concentração inicial dos ensaios (excetuando o primeiro grupo, para o qual a

diferença é de 2,5%). Já para a cauda, os valores foram muito baixos, mostrando a diluição da corrente, com uma leve variação junto ao fundo.

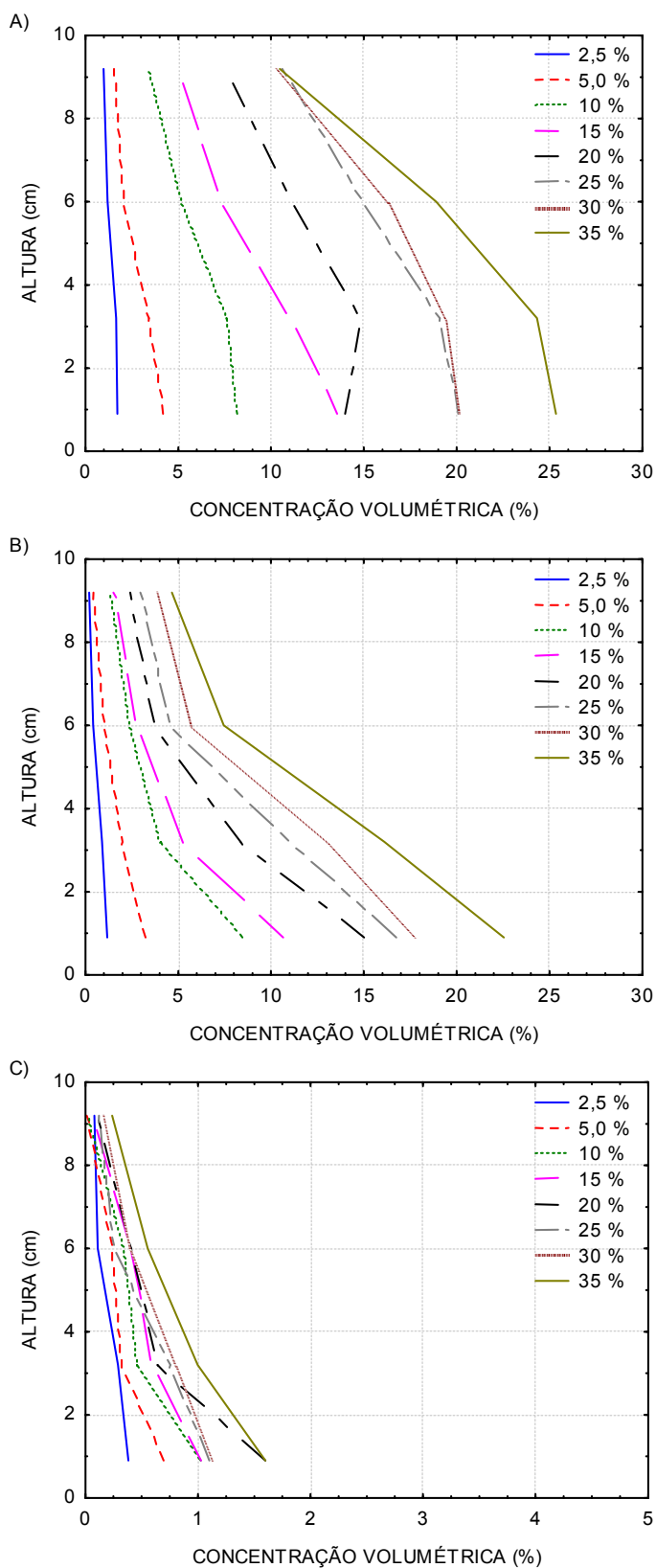


Figura 8.17 Perfis de concentração verticais médios do grupo não coesivo: a) Cabeça. b) Corpo e; c) Cauda

Na região da cabeça (figura 8.17a), as alturas do escoamento foram da ordem de 15 a 25 cm e a altura máxima amostrada pela sonda foi de 9,2 cm. Sendo assim, o resultado apresentado para a região da cabeça corresponde a menos da metade da altura total, o que explica uma maior uniformidade ao longo da vertical, especialmente nas correntes de mais alta concentração, onde observa-se valores de concentração eram constantes nas duas sondas junto ao fundo.

Na região do corpo (figura 8.17b), foi notado que todas as correntes exibiram um perfil de concentração médio, cuja forma da curva representa um decaimento ao longo da vertical, mas que, fisicamente, implica em maiores valores de concentração junto ao fundo e menores valores junto à interface superior. Nas correntes de mais baixa concentração volumétrica, esse perfil é mais distribuído ao longo da vertical, enquanto que para as correntes de mais alta concentração claramente se verifica uma maior estratificação junto ao fundo, aonde a corrente foi incrementando sua concentração volumétrica (camada mais concentrada).

Na região da cauda (figura 8.17c), o valor máximo médio da concentração foi de 2%, ou seja, sugerindo a formação de uma zona total de desaceleração, na qual o sedimento presente em suspensão, praticamente já havia se depositado.

8.7.2 Perfil vertical médio de concentração do grupo misto

Os perfis de concentração do grupo misto apresentaram um comportamento mais diferenciado (figura 8.18). A presença de 50% argila nos fluxos alterou a concentração ao longo da vertical, uma vez que a argila apresenta uma velocidade de queda dos grãos muito menor que a do material não coesivo, além de apresentar outras forças (coesão) que alteram o comportamento das partículas e a interação entre elas. Como pode ser observado, o valor para o ensaio M_35 apresentou uma concentração média no perfil em torno dos 60%, o que foi interpretado como a saturação da sonda sendo esse valor corrigido com base nos outros ensaios para 40%.

Na região da cabeça (figura 8.18a), novamente, o perfil representa o comportamento de uma pequena região da vertical se compararmos com a altura da corrente neste ponto. Sendo assim, essa análise não será realizada. Na região do corpo (figura 8.18b), o comportamento foi muito parecido com o grupo não coesivo, entretanto, há uma mudança nítida no formato do perfil nos três últimos ensaios, os quais apresentam claramente uma transição entre um perfil mais contínuo ao longo da vertical para perfis com a criação de patamares verticais apresentando concentração constante junto ao fundo. Essa transição indica a presença de uma camada mais concentrada junto ao fundo (camada lamosa), que foi evidenciada nestes experimentos. Já na região da cauda (figura 8.18c), a formação dessa

camada foi mais destacada, visto que praticamente só há registro de concentração com valores consideráveis junto ao fundo (até o ensaio M_25) e, nos ensaios mais concentrados, a presença de uma camada mais concentrada.

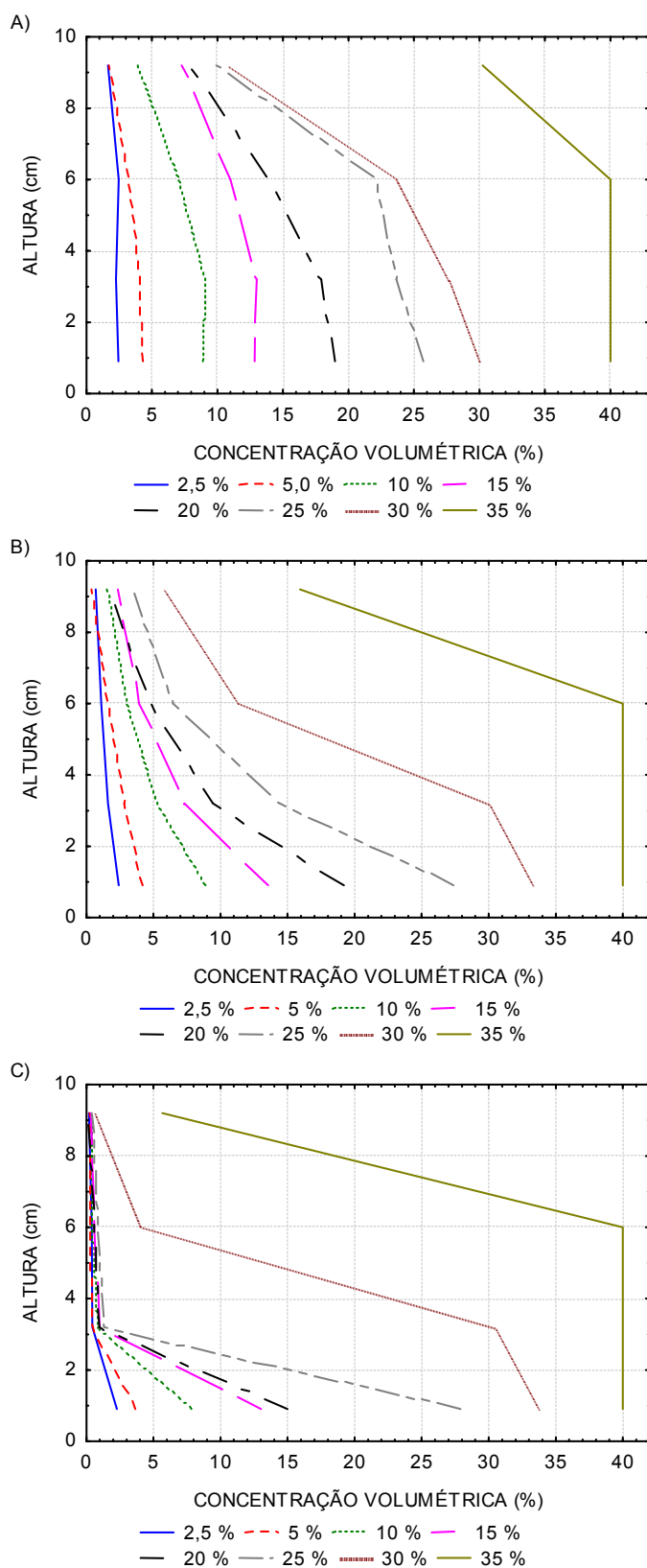


Figura 8.18 Perfis de concentração verticais médios do grupo misto: a) Cabeça; b) Corpo e; c) Cauda.

8.7.3 Perfil vertical médio de concentração do grupo coesivo.

Para o grupo coesivo, o comportamento foi muito similar ao do grupo misto para a região do corpo (figura 8.19).

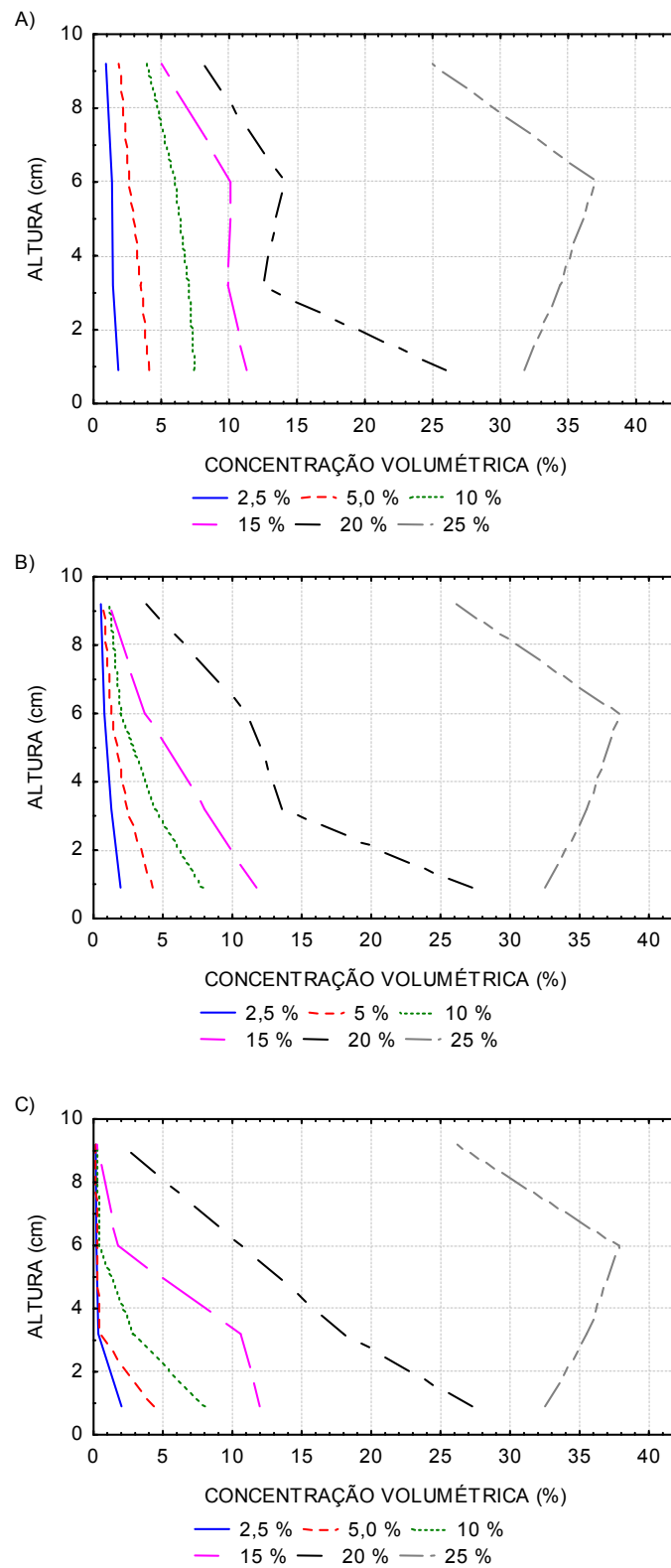


Figura 8.19 Perfis de concentração verticais médios do grupo coesivo: a) Cabeça; b) Corpo e c) Cauda.

Para os ensaios C_20 e C_25, os valores absolutos de concentração foram muito maiores que o incremento de concentração inicial, indicando que, junto ao fundo, houve um aumento da concentração da corrente. A transição dos perfis mais homogêneos na vertical para o perfil estratificado foi notado claramente nas regiões do corpo e da cauda. Esse ensaio (C_25) apresentou, ainda, um ponto de máximo de concentração, a 6 cm do fundo, com valores menores abaixo deste ponto. Como o material coesivo se mantém mais na corrente ao longo do tempo, a região da cauda apresenta concentrações com valores absolutos altos, como era previamente esperado, praticamente reproduzindo o comportamento da região do corpo.

8.7.4 Perfil vertical médio de concentração do grupo transição

Seguindo a mesma rotina para o grupo transição, os perfis de concentração determinados, apesar de terem o mesmo valor inicial, apresentaram comportamentos distintos (figura 8.20).

Na região do corpo, nota-se que a presença da argila mantém a concentração da corrente ao longo do tempo, enquanto que nos fluxos de grãos não coesivos, o material vai se depositando mais rápido e, conseqüentemente, diminuindo a concentração interna da corrente (100B:0K e 90B:10K). A concentração maior junto ao fundo é, novamente, evidenciada, porém a camada lamosa que se formou nos ensaios com maior presença de argila só ficou evidenciada na cauda, onde o fluxo já estava praticamente depositado.

Breve discussão

Através da avaliação de todos os perfis determinados, o que se verificou para praticamente todas as correntes de densidade simuladas independente de sua característica inicial, foi que houve um aumento da concentração média ao longo da vertical, sendo os maiores valores registrados junto ao fundo e os menores, junto à interface superior. Entretanto a maneira como a concentração foi variando ao longo da vertical é que diferiu de ensaio para ensaio. Nas correntes de mais baixa densidade, o aumento da concentração foi mais gradual e contínuo ao longo da vertical, enquanto que nas correntes de mais alta concentração e com presença de argila na mistura houve a formação de uma zona estratificada, com um perfil de concentração médio constante (zonas mais concentradas junto ao fundo). Essa transição de comportamento foi sendo gradual, à medida que a concentração foi sendo incrementada.

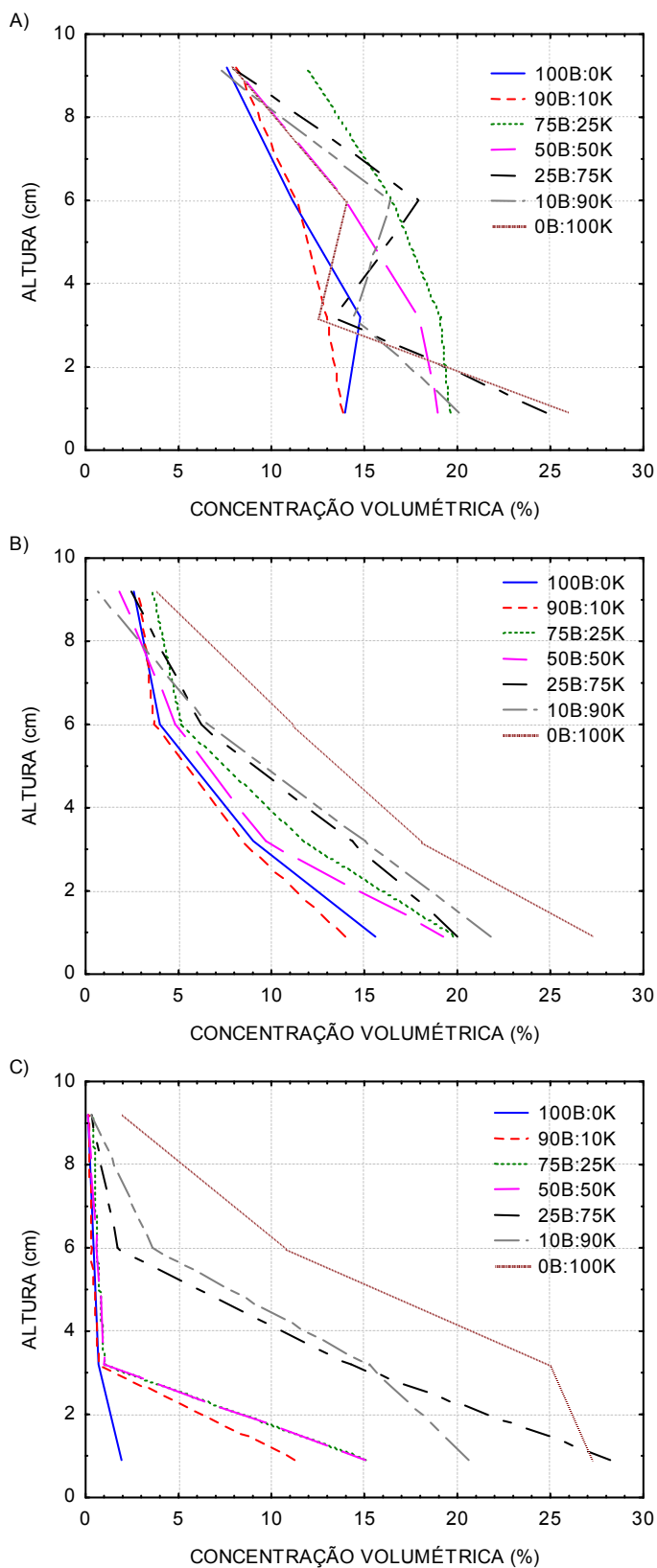


Figura 8.20 Perfis de concentração verticais médios do grupo transição: a) Cabeça; b) Corpo e; c) Cauda

Outro fator a destacar é que, diferentemente do perfil de velocidades no qual a presença de camada mais concentrada foi observada a partir do ensaio M_25 e C_15 e 25B:75K, no perfil de concentração apresentado, pela análise dos valores, poderia se

afirmar que esse fenômeno ocorreu a partir dos ensaios M_30 e C_25 e que, para o grupo transição, estaria apenas se iniciando. Isso evidencia, novamente, que tanto a concentração volumétrica inicial como a proporção de argilas são fatores fundamentais nos processos deposicionais das correntes de turbidez.

Os valores apresentados pelo perfil de concentração na passagem da cauda foram altamente influenciados pela camada de sedimento depositada previamente, o que alterou os valores para cada ensaio, maximizando-os. Esse fenômeno se deu, principalmente, para os fluxos de mais alta concentração, conforme discutem Kneller e McCaffrey (2003).

A falta de mais valores ao longo da vertical não permitiu uma avaliação mais criteriosa junto às interfaces inferior e, especialmente, na superior. A colocação da sonda ao longo da vertical buscava caracterizar melhor esse parâmetro, entretanto a máxima altura de alcance da sonda (9,2 cm) prejudicou a análise. Junto ao fundo, essa falta de valores é menos significativa, pois o perfil de velocidades encontrado na literatura indica valores muito próximos junto ao fundo e nos primeiros centímetros acima dele.

9 CONDICIONANTES HIDRÁULICOS

9.1 DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DA VELOCIDADE, ALTURA E CONCENTRAÇÃO.

A partir da medição dos perfis de velocidade e de concentração foi possível determinar seus valores médios na vertical, aplicando as equações integrais apresentadas por Ellison e Turner (1959).

$$\bar{U} = \frac{1}{h} \cdot \int_0^{\infty} u \cdot dz \quad (9.1)$$

$$\bar{U}^2 = \frac{1}{h} \cdot \int_0^{\infty} u^2 \cdot dz \quad (9.2)$$

$$\bar{U} \cdot \bar{C}_{vol} = \frac{1}{h} \cdot \int_0^{\infty} u \cdot c_{vol} \cdot dz \quad (9.3)$$

A fim de determinar a velocidade média do escoamento e a altura média da corrente foram utilizados onze valores do perfil de velocidades medidos ao longo da vertical (dez sondas acrescido de um valor zero no ponto de altura de mistura médio). Já para a obtenção da concentração média, foram utilizados os valores do perfil de concentração, acrescido de um valor zero, no ponto de altura de mistura médio. As equações foram então discretizadas, sendo apresentadas a seguir:

$$\bar{U} \cdot \bar{h} = \int_0^{\infty} u \cdot dz = \sum_{i=1}^{j-1} \frac{(u_i + u_{i+1})}{2} \cdot (z_{i+1} - z_i) \quad (9.4)$$

$$\bar{U}^2 \cdot \bar{h} = \int_0^{\infty} u^2 \cdot dz = \sum_{i=1}^{j-1} \frac{(u_i)^2 + (u_{i+1})^2}{2} \cdot (z_{i+1} - z_i) \quad (9.5)$$

$$\bar{U} \cdot \bar{C}_{vol} \cdot \bar{h} = \int_0^{\infty} u \cdot c_{vol} \cdot dz = \sum_{i=1}^{j-1} \frac{(u_i \cdot c_i) + (u_{i+1} \cdot c_{i+1})}{2} \cdot (z_{i+1} - z_i) \quad (9.6)$$

Onde:

\bar{U} = velocidade média (m/s)

u = velocidade média na altura z (m/s)

u_i e u_{i+1} = velocidade média no ponto i distante ao fundo (m/s)

\bar{h} = altura média do escoamento (cm)

\bar{C}_{vol} = concentração volumétrica média (%)

C_{vol} = concentração volumétrica média na altura z (%)

c_i e c_{i+1} = concentração volumétrica média no ponto i distante ao fundo (m/s)

z = distância à parede (m)

z_i e z_{i+1} = no ponto i distante ao fundo (m)

A tabela 9.1 apresenta os valores médios da velocidade, da altura e da concentração, calculados pelas equações discretizadas 9.4 a 9.6, conforme metodologia descrita em Parker et al (1987), Altinakar (1988) entre outros.

Tabela 9.1 Velocidade, altura e concentração médias obtidas pelas equações 9.4 a 9.6.

C_{vol}	Não-coesivo					C_{vol}	Misto				
	U	h	h_t	h_c	C		U	h	h_t	h_c	C
35	25,42	12,59	18,01	13,05	7,53	35	11,22	13,38	24,51	18,78	34,91
30	23,58	13,24	18,27	14,03	6,06	30	20,33	14,31	21,24	16,76	12,50
25	20,22	13,84	17,86	12,41	5,45	25	22,69	12,60	18,69	14,67	9,10
20	21,41	12,48	17,72	12,17	4,37	20	24,47	13,24	19,33	15,33	6,72
15	20,89	12,41	16,51	10,69	3,11	15	19,35	12,07	17,15	13,89	5,77
10	18,47	13,08	16,76	10,80	2,51	10	17,58	12,73	19,14	14,16	3,84
5	14,44	13,43	15,74	6,14	1,08	5	14,06	13,68	21,20	13,62	1,70
2,5	11,41	14,33	16,82	5,14	0,57	2,5	9,87	16,58	23,04	18,96	1,03
C_{vol}	Coesivo					Arg	Transição				
	U	h	h_t	h_c	C		U	h	h_t	h_c	C
25	9,08	2,34	28,93	25,82	26,73	100	12,69	13,67	26,87	20,93	9,10
20	12,68	17,11	26,69	20,59	8,59	90	15,40	13,33	23,56	18,68	6,20
15	15,24	15,90	23,00	18,26	3,93	75	18,42	12,98	19,73	16,48	7,62
10	16,58	13,95	21,23	16,78	2,73	50	24,17	13,12	18,79	15,93	7,63
5	14,70	13,65	19,14	15,93	1,66	25	21,82	11,77	16,68	14,05	9,84
2,5	10,31	14,17	19,66	15,21	0,95	10	20,97	12,82	17,76	14,45	7,72
						0	21,25	13,38	18,19	14,19	8,90

U = velocidade média (cm/s) C_{vol} = concentração volumétrica (%) h = altura média da corrente (cm)

h_c = altura da corrente sem considerar a camada de mistura (cm) h_t = altura total da corrente (cm)

Arg = porcentagem de argila (%) C = concentração média (%);

A partir desses valores foi possível realizar uma série de correlações que serão apresentadas a seguir.

9.1.1 Velocidade

Os perfis de velocidade que serão empregados representam a média temporal da variação da velocidade medida (ver capítulo 8.5).

9.1.1.1 Relação entre a velocidade média e a concentração volumétrica.

As velocidades médias das correntes de densidade obtidas pelo método aplicado em Ellison e Turner (1959) foram plotadas com relação à concentração volumétrica para as três regiões da corrente, ou seja, para a cabeça, para o corpo e para a cauda. A figura 9.1 apresenta esses resultados.

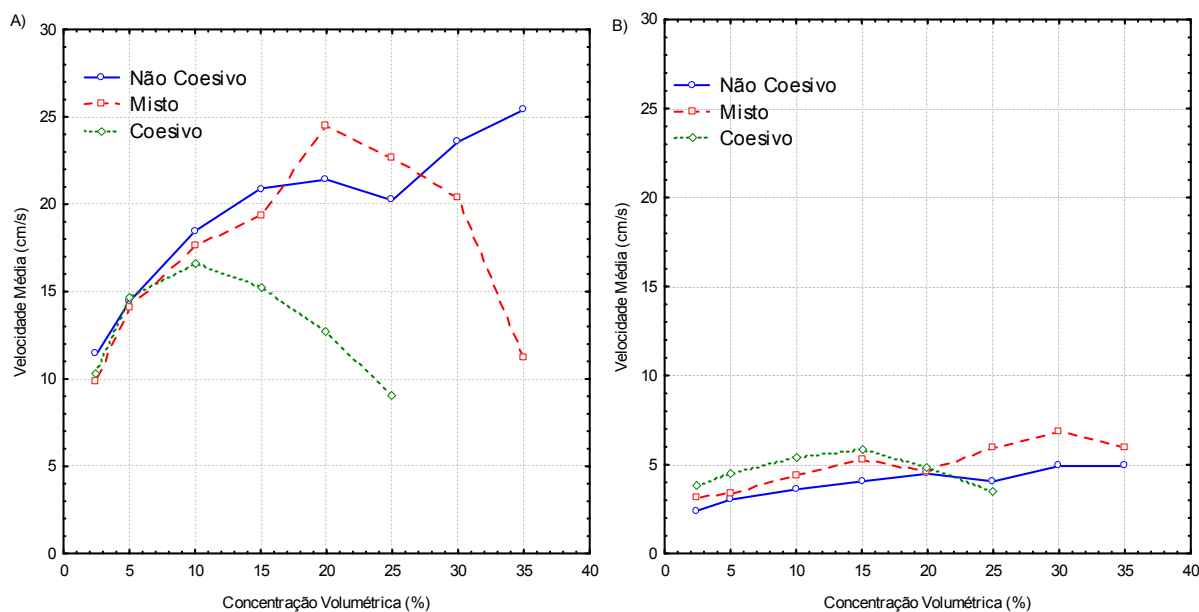


Figura 9.1 Relação entre a velocidade média das correntes e a concentração volumétrica: a) Corpo; e; b) Cauda

A análise de parâmetros médios das correntes de densidade na região da cabeça não será discutida nessa seção, devido à forte tridimensionalidade do escoamento que ocorre no seu interior que não permitem a análise de seus resultados com medidas de velocidade em uma só direção. Deste modo, apenas os resultados do corpo da corrente e a cauda serão avaliados para os três grupos de ensaios: o grupo não coesivo, o misto e o coesivo.

A figura 9.1a apresenta os valores médios de velocidade do corpo da corrente. Pela análise da figura, pode ser notado que, para as correntes de mais baixa densidade ($C_{vol} < 5\%$), os três grupos apresentaram o mesmo comportamento e, praticamente, os mesmos valores absolutos de velocidade. Já para os valores maiores de concentração, podem ser destacados dois comportamentos distintos, os quais consideram os diferentes tipos de grãos empregados. Para os fluxos não coesivos, foi verificado que a velocidade média foi sendo incrementada à medida que a concentração foi aumentando, entretanto esse crescimento não foi linear, apresentando um perfil tendendo a um valor máximo limite.

No grupo composto por material coesivo, o comportamento da velocidade média mostrou, primeiramente, um crescimento da velocidade com a concentração (até 10%) e, após isso, uma redução brusca dos valores, devido às mudanças hidrodinâmicas e reológicas descritas anteriormente.

O comportamento do grupo misto pode ser descrito como uma média dos dois grupos acima, visto que, até a concentração de 20%, as velocidades médias seguiam o comportamento dos fluxos não coesivos e, após esse valor, as forças coesivas preponderaram, fazendo reduzir seus valores médios.

A figura 9.1b ainda apresenta os valores de velocidade médio da região da cauda. Nesse caso, o comportamento é muito similar ao do corpo da corrente, entretanto com valores absolutos da ordem de cinco a seis vezes mais baixos, indicando que essa zona era de desaceleração do fluxo, preponderando, portanto, os processos deposicionais.

Na figura 9.2 são mostrados os valores obtidos para o grupo transição. Neste grupo, foi claramente verificada a influência da presença de argila na composição da mistura. Na transição do grupo não coesivo (100B:0K) para o grupo misto (50B:50K), foi verificado que há um incremento na velocidade média, chegando ao pico de maior velocidade (~ 25 cm/s). Após esse valor, porém, há um decaimento linear da velocidade média, à medida que a quantidade de argila aumenta, mostrando uma relação inversa entre as essas variáveis.

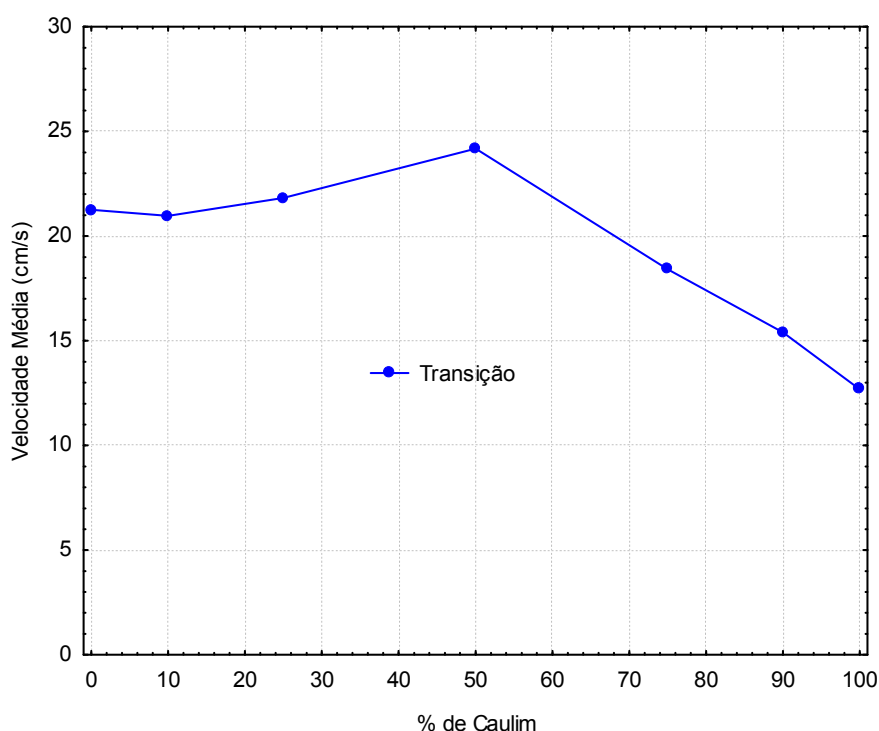


Figura 9.2 Relação da velocidade média do corpo das correntes do grupo transição e a presença de argila.

9.1.1.2 Valores máximos de velocidade

A figura 9.3 apresenta os valores de velocidade máxima das correntes ensaiadas para as regiões da cabeça e do corpo da corrente de densidade.

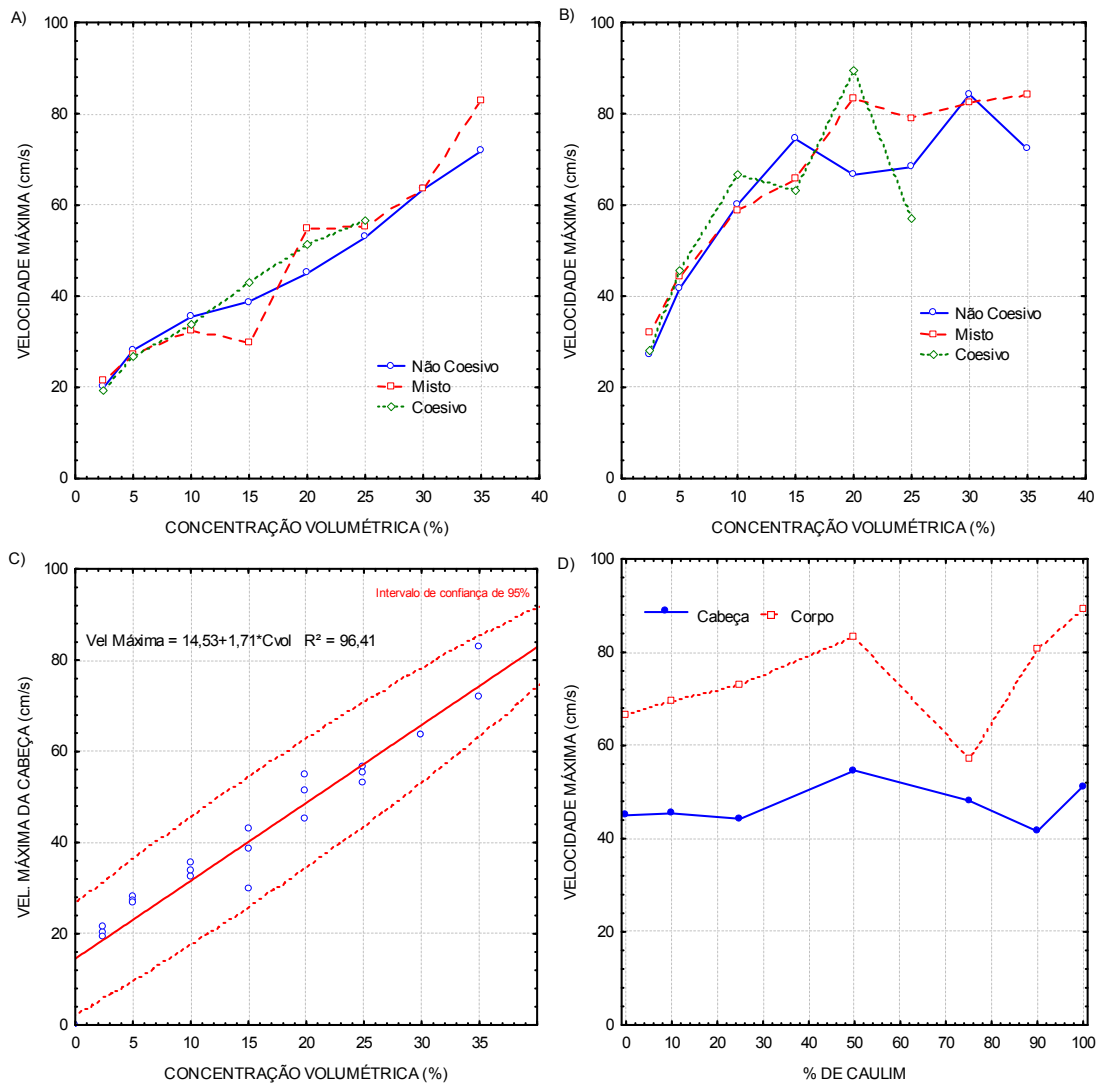


Figura 9.3 Valores de velocidade máxima em relação a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Cabeça; b) Corpo; c) Ajuste da equação para a zona da cabeça; d) Resultados do grupo transição.

Pela análise das figuras 9.3a e 9.3b foi constatado que, em termos de valores absolutos, a velocidade máxima das correntes de densidade ensaiadas foram aumentando com a concentração volumétrica, partindo de valores de 20 cm/s até 90 cm/s, aproximadamente. A região do corpo foi a que apresentou os maiores valores absolutos de velocidade, com o ensaio C_20 atingindo o maior valor entre todos os experimentos. A região da cabeça apresenta os valores um pouco menores, o que pode ser explicado pela resistência imposta pelo fluido ambiente. Esses valores comprovam, também, a capacidade destes fluxos de escoar a altas velocidades, mesmo tendo alta concentração e alta viscosidade, considerando ainda que o escoamento se deu sobre um plano praticamente horizontal (declividade 0,8°).

Em termos de tendência, a figura 9.3c ilustra que a velocidade da cabeça possui uma relação linear com a concentração volumétrica, ou seja, aumentando à medida que a concentração aumenta. Esses resultados mostram que a velocidade da corrente, em um

primeiro momento, é mais influenciada pela diferença de densidade entre os meios, do que, propriamente, pela composição da mistura.

Para essa região da cabeça, os dados dos três grupos foram agrupados e foi aplicada uma regressão linear simples, que resultou na equação apresentada abaixo, com o coeficiente de determinação (R^2) de 96,4%, para um intervalo de confiança de 95%.

$$\text{Vel}_{\text{Maxcab}} = 1,71 \cdot C_{\text{vol}} + 14,53 \quad (9.7)$$

Onde:

$\text{Vel}_{\text{Maxcab}}$ = velocidade máxima da cabeça da corrente de densidade (cm/s)

C_{vol} = concentração volumétrica inicial (%)

A equação (9.7) é válida para concentrações volumétricas maiores de 2% ($C_{\text{vol}} > 2\%$) e não depende do tipo de material empregado, indicando que os mecanismos que regem o movimento da cabeça pode estar mais relacionados à diferença de densidade entre os meios.

Com relação ao corpo da corrente, verifica-se que há uma diferenciação na análise da velocidade máxima, visto que as curvas representam uma tendência de comportamento de aumento não linear para os três grupos de experimentos, apesar dos dois valores (NC_20 e NC_25) ficarem um pouco abaixo desta tendência. Para o grupo coesivo, o efeito da quantidade de argila na mistura provocou uma diminuição da velocidade máxima para as correntes de mais alta concentração (C_25).

Para o grupo transição (figura 9.3d), o comportamento da velocidade máxima para a região da cabeça mostrou a proximidade dos valores entre os grupos (valor constante de ~ 50 cm/s). Para a região do corpo, há um crescimento linear com o incremento da argila (até o valor de 50%) e, após isso, há uma tendência de valores mais constantes, afóra a variabilidade do ensaio 25B:75K, que apresentou um valor muito abaixo de esperado.

9.1.1.3 Relações adimensionais entre as velocidades média e máxima

Os parâmetros de velocidade calculados no item 9.1.1.1 e 9.1.1.2, no caso, as velocidades médias e máximas da corrente, avaliadas na região da cabeça e do corpo foram correlacionados entre si e comparados com a concentração volumétrica das misturas. A tabela 9.2 e figura 9.4 apresentam os resultados dessa comparação.

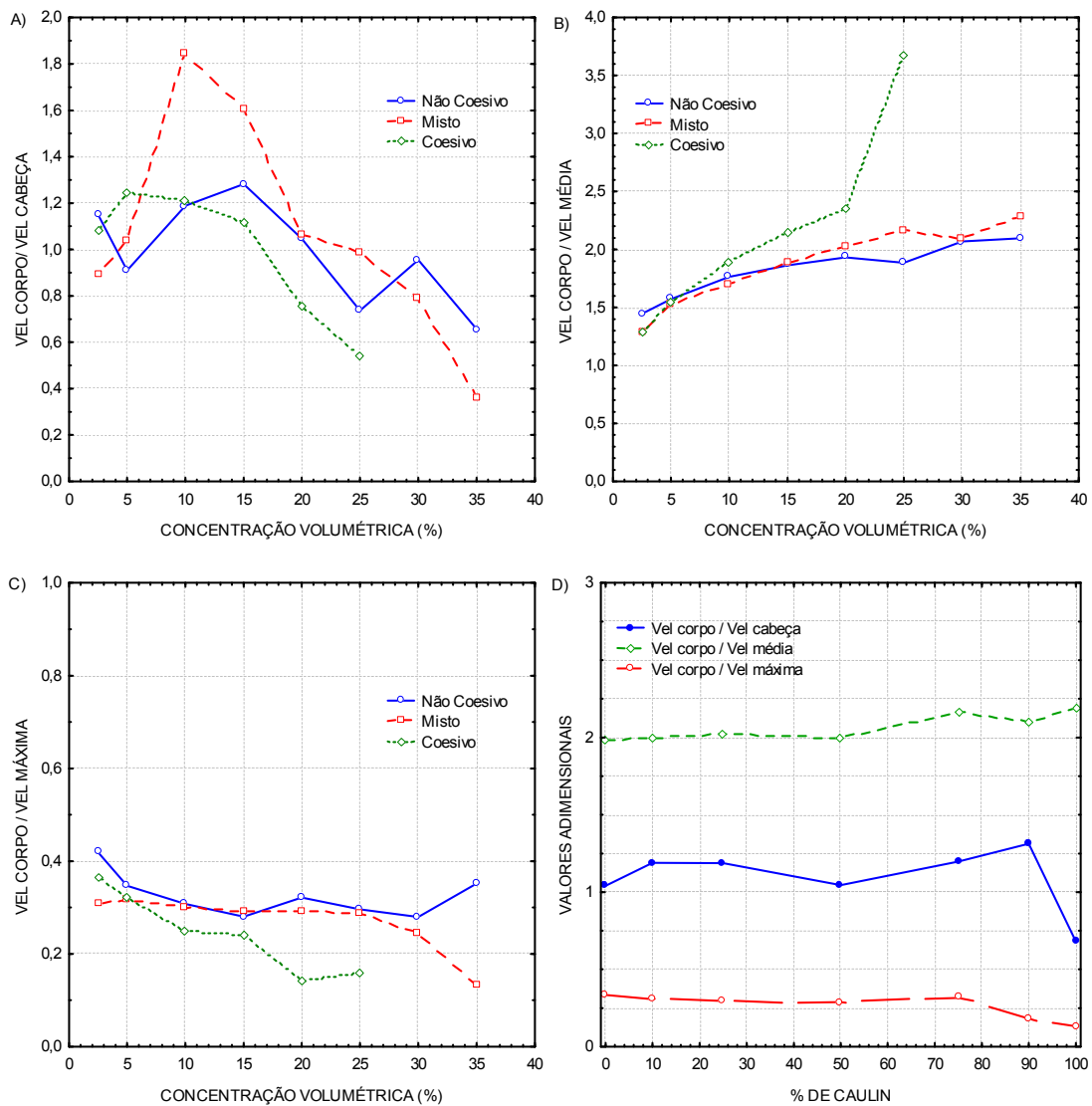


Figura 9.4 Relações entre parâmetros adimensionais com a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Velocidade do corpo pela velocidade da cabeça; b) Velocidade do corpo pela velocidade média da corrente; c) Velocidade do corpo pela velocidade máxima da corrente e; d) Resultados do grupo transição.

Como pode ser observado na figura 9.4a, a velocidade do corpo da corrente, nas correntes de menor concentração ($C_{vol} < 20\%$), praticamente predomina sobre a velocidade da cabeça, indicando valores maiores que um. Nesse caso, está implícito que as forças gravitacionais são preponderantes sobre as forças de empuxo que governam a frente de avanço. Simpson (1972), Middleton (1993), Kneller e Buckee (2000), entre outros, mostraram que essa velocidade seria de 30 a 40% maior que a da cabeça. Entretanto, à medida que a concentração aumenta foi verificado que a velocidade da cabeça começa a predominar sobre o corpo. Para os grupos misto e coesivo, esse fato corrobora com as análises demonstradas até então, já que o incremento da viscosidade da mistura causou uma desaceleração no corpo da corrente, ou seja, reduzindo seu valor na relação corpo/cabeça para valores menores que a unidade.

Este comportamento também foi verificado nas correntes não-coesivas, indicando que nos fluxos mais densos, a velocidade de avanço possui maior valor aliado a uma diminuição dos valores de velocidade do corpo, devido à rápida deposição de grãos no seu interior.

No caso da comparação da velocidade do corpo com a velocidade média geral da corrente, foi verificado que, independente do aumento de valores da concentração (figura 9.4b), o valor médio final, incluindo todos os ensaios, foi de, aproximadamente, 1,8 para os três grupos avaliados (não coesivo, misto e coesivo), independente do material utilizado. Esse valor foi diminuindo das correntes mais concentradas para as correntes menos concentradas. A mesma situação ocorre na relação entre a velocidade média do corpo e a velocidade máxima da corrente (figura 9.4c), cujo valor calculado foi de, aproximadamente, 0,3.

Tabela 9.2 Relações adimensionais entre a velocidade do corpo e as velocidades médias, máximas e da cabeça.

CVol	Vel corpo / Vel cabeça			Vel corpo / Vel média			Vel corpo / Vel máxima			ARG	Vel corpo /	Vel corpo /	Vel corpo /
	NC	M	C	NC	M	C	NC	M	C		Vel cabeça	Vel média	Vel máxima
											T	T	T
35	0,66	0,36		2,10	2,28		0,35	0,13					
30	0,96	0,79		2,07	2,10		0,28	0,25	100	0,67	2,19	0,13	
25	0,74	0,99	0,54	1,89	2,17	3,66*	0,30	0,29	90	1,31	2,09	0,18	
20	1,05	1,06	0,76	1,93	2,02	2,35	0,32	0,29	75	1,19	2,17	0,32	
15	1,28	1,61	1,12	1,87	1,89	2,14	0,28	0,29	50	1,04	2,00	0,29	
10	1,19	1,85	1,21	1,77	1,71	1,89	0,31	0,30	25	1,18	2,02	0,30	
5	0,91	1,04	1,25	1,57	1,53	1,54	0,35	0,32	10	1,19	1,99	0,31	
2,5	1,15	0,89	1,09	1,45	1,29	1,28	0,42	0,31	0	1,04	1,98	0,33	
Média	0,99	1,07	0,99	1,83	1,87	1,84	0,33	0,27	0,25		1,09	2,06	0,26
Desvio padrão	0,22	0,47	0,28	0,23	0,34	0,43	0,05	0,06	0,09		0,20	0,09	0,08

* ponto excluído devido aos pontos de medidas de velocidade do grupo C_25 estarem quase toda dentro da camada lamosa.

Para o grupo transição, a figura 9.4d apresenta os mesmos parâmetros analisados no item anterior mostrando que a variação da quantidade de argila na mistura pouco influenciou os valores obtidos. Pelas curvas, pode ser verificado que, com até 50% de argila na mistura, os parâmetros são constantes e que, após esse valor, há um pequeno aumento não muito significativo.

Breve discussão

O comportamento da velocidade média do escoamento foi obtido através das equações apresentadas em Ellison e Turner (1959) para os quatro grupos ensaiados, indicando que, em termos de valores absolutos médios, o escoamento atingiu no máximo a velocidade de 25 cm/s (ensaios NC_35 e M_20), o que pode ser considerado um valor alto para escoamentos de correntes de turbidez em laboratório ($Re \sim 10000$). A região da cabeça,

novamente, não foi analisada devido à presença de tridimensionalidades, as quais exigiriam dados das três componentes da velocidade. Quando comparados com a concentração inicial das misturas, três comportamentos foram identificados para os fluxos, os quais dependem do tipo de material presente na corrente. Até concentrações abaixo de, aproximadamente, 10% em volume, há uma primeira zona, com os valores médios de velocidade muito similares entre os grupos, tanto em relação aos valores absolutos, quanto em tendência de variação. Neste caso, a mudança do material presente na corrente muito pouco influenciou na dinâmica do fluxo.

O segundo tipo de comportamento se deu com as correntes não-coesivas, apresentando uma relação direta entre a velocidade e a concentração, porém não seguindo uma linearidade, mas um comportamento tendendo a um patamar de valor. E o terceiro tipo, foi o do fluxo coesivo que, após atingir um valor de máximo (em torno do ensaio C_10), apresentou velocidades decrescentes com a concentração.

As correntes mistas, nesse caso, apresentaram uma mistura desses dois comportamentos, onde até o ensaio M_20, predominou a fração não coesiva, ou seja, o comportamento não coesivo e, após isso, a parcela coesiva do escoamento prevaleceu, diminuindo os valores médios do corpo da corrente.

Esses três comportamentos são importantes para avaliarmos como se desenvolve a transição entre os grupos, não só no grupo de ensaio transição, o qual foi realizado apenas para a concentração volumétrica de 20%, mas para toda a faixa de concentrações ensaiadas. Ainda com base nesse valor, fica evidenciado que o comportamento das correntes de mais baixa densidade é completamente diferente das correntes de mais alta densidade, estando os fatores que provocam esta mudança fortemente ligados à presença de mais argila na mistura.

A presença da camada lamosa no escoamento, já descrita anteriormente, foi responsável pela diminuição dos valores médios do corpo, uma vez que, naquela zona, o fluxo fluía muito lentamente.

Os resultados da avaliação da velocidade máxima da corrente indicam que a concentração inicial de sedimentos é um fator preponderante na sua definição, independente se há ou não presença de argila. Na região da cabeça observa-se uma dependência linear entre a velocidade máxima nessa região e a concentração inicial da corrente. Essa relação foi obtida para todos os ensaios, independente do material utilizado (equação 9.7) e serve como estimativa inicial de valores que as correntes podem atingir, nas configurações utilizadas. Foi comprovado também que, na região da cabeça, a velocidade é um pouco mais lenta que a velocidade máxima do corpo, já que o fluxo no corpo vai empurrando o fluxo na

cabeça, tornado essa região muito instável, pois, ao mesmo tempo, ela vai sofrendo a forte resistência do fluido ambiente.

Para a região do corpo, que apresentou as maiores velocidades, a dependência entre a velocidade e a concentração inicial tende a aumentar não linearmente, uma vez que, para $C_{vol} > 20\%$, são verificados comportamentos diferenciados para os tipos de correntes. Esse fato é importante, pois mostra que as correntes apresentam um limiar máximo de velocidade com a concentração volumétrica, ou seja, que algum outro fator (p. ex. alteração no mecanismo de suporte dos grãos, comportamento reológico entre outros) influencia no seu processo dinâmico, impedindo que se mantenha a mesma relação linear de crescimento de velocidade encontrada nas correntes de mais baixa densidade.

Considerando as relações adimensionais apresentadas, diferentemente do descrito na literatura (Middleton, 1993 e Kneller e Buckee, 2000), a velocidade média do corpo foi maior que a velocidade média da cabeça para as correntes de mais baixa densidade ($C_{vol} < 15$ a 20%). Para as correntes mais concentradas, essa relação é muito próxima a um e, por vezes, menor que esse valor. Nos casos de correntes mais concentradas, a velocidade da cabeça, por ser maior, pode criar um desacoplamento do corpo (mais lento), entretanto nos experimentos não foi verificado esse fenômeno.

Para os três grupos, a relação entre a velocidade média e do corpo apresentaram valores variando com a concentração inicial, entretanto a substituição por um valor médio global não implicaria em muitos erros. Para a relação entre a velocidade do corpo e a velocidade média, o valor global foi de 1,8, enquanto que, para a velocidade do corpo com a velocidade máxima foi de 0,28.

A determinação da relação adimensionalizada da velocidade máxima da cabeça com a velocidade do corpo, em função da concentração inicial, mostrou que, com concentrações volumétricas de 2,5% a 15%, esse número decresce de 0,7 a 0,5 e que, após isso, aumenta de 0,5 a aproximadamente 1,0, para as correntes mais concentradas (C_{vol} de 15% a 35%). Partindo da concentração inicial da corrente, é possível estimar a velocidade máxima da corrente, com o uso da equação 9.7.

9.1.2 Características geométricas

9.1.2.1 Valores médios da geometria da corrente

A figura 9.5 apresenta a correlação dos resultados da altura média do fluxo obtida a partir das equações descritas no capítulo 9.1 (equações 9.1 a 9.3), com as duas espessuras geométricas médias determinadas através da análise das imagens descritas no item 6.5.3;

quais sejam: a espessura da camada de mistura e a espessura da corrente sem considerar esta camada de mistura. Também foram comparados esses valores de espessuras determinados para a cabeça da corrente e para o corpo da corrente.

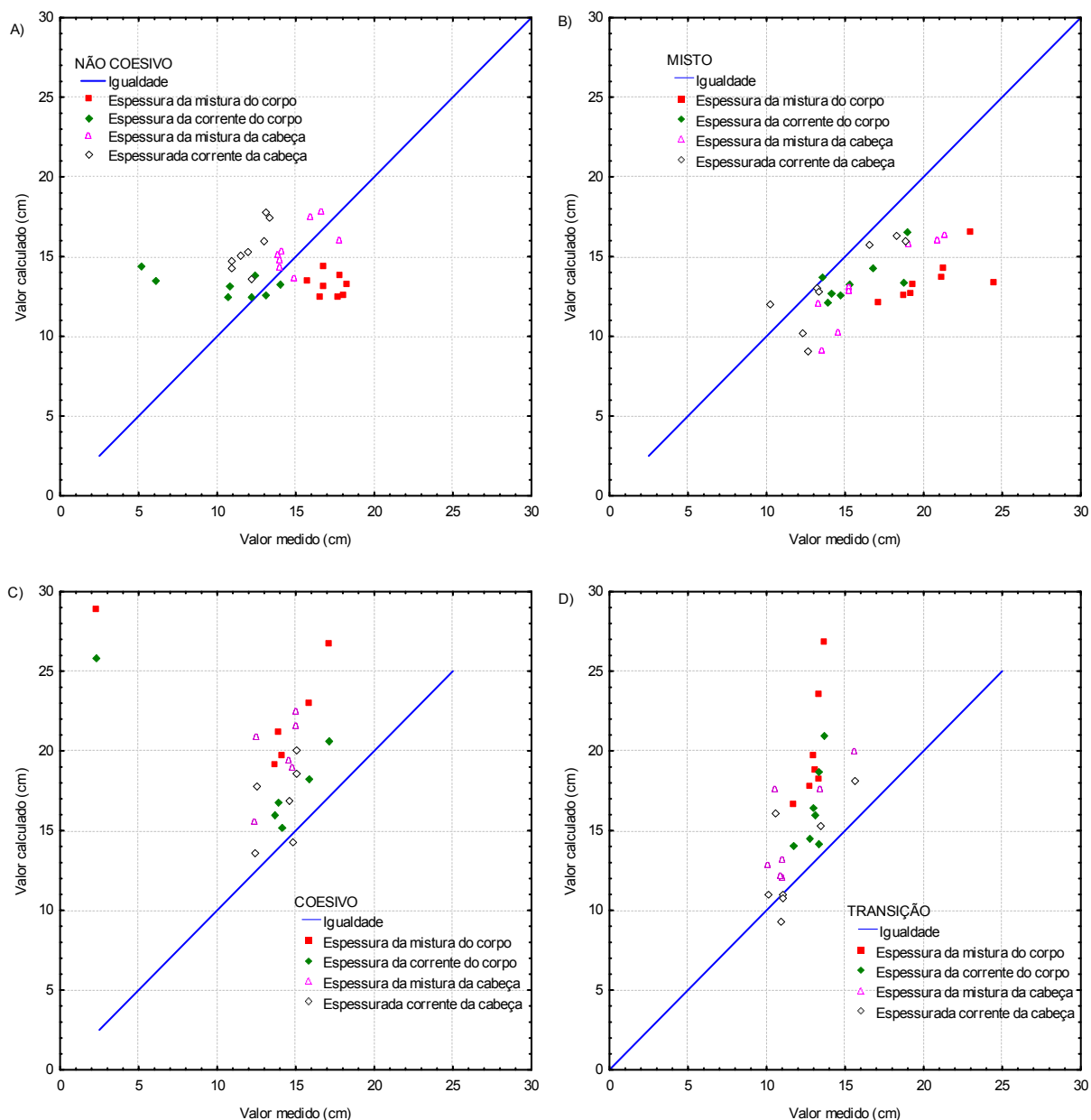


Figura 9.5 Comparação entre as alturas calculadas nas equações 9.1 a 9.3 e as espessuras médias medidas. a) grupo não coesivo b) grupo misto c) grupo coesivo e d) grupo transição

Como pode ser verificada na figura 9.5, a comparação entre as alturas calculadas e medidas foram significativamente diferentes para todos os casos analisados. Os valores medidos para a espessura do corpo, considerando a camada de mistura, foram sempre maiores que os valores calculados (acima da reta de igualdade). Por outro lado, a análise da espessura da corrente indica que, em alguns casos, há uma dispersão menor nos dados (grupo misto e coesivo). O mesmo aconteceu quando foi relacionada a região da cabeça e a região do corpo

da corrente, demonstrando um comportamento completamente aleatório nos dados, não permitindo estabelecer qualquer relação para cada um dos quatro grupo de ensaios analisados.

Excluindo o grupo não coesivo, os valores medidos foram sempre superiores aos valores calculados, indicando que o método de determinação da espessura através da metodologia (descrita no item 6.5.3) pode estar superestimando os valores. Por outro lado, nas equações 9.1 a 9.3, a definição do limite superior da integração no perfil de velocidades precisaria levar em conta a velocidade no fluido ambiente, o que não ocorreu, pois o limite superior arbitrado considerou que a velocidade, na interface superior da corrente foi nula.

9.1.2.2 Valores médios das características geométricas em função da concentração

A figura 9.6 apresenta a relação dos valores médios das características geométricas com a concentração inicial das misturas para os quatro grupos avaliados.

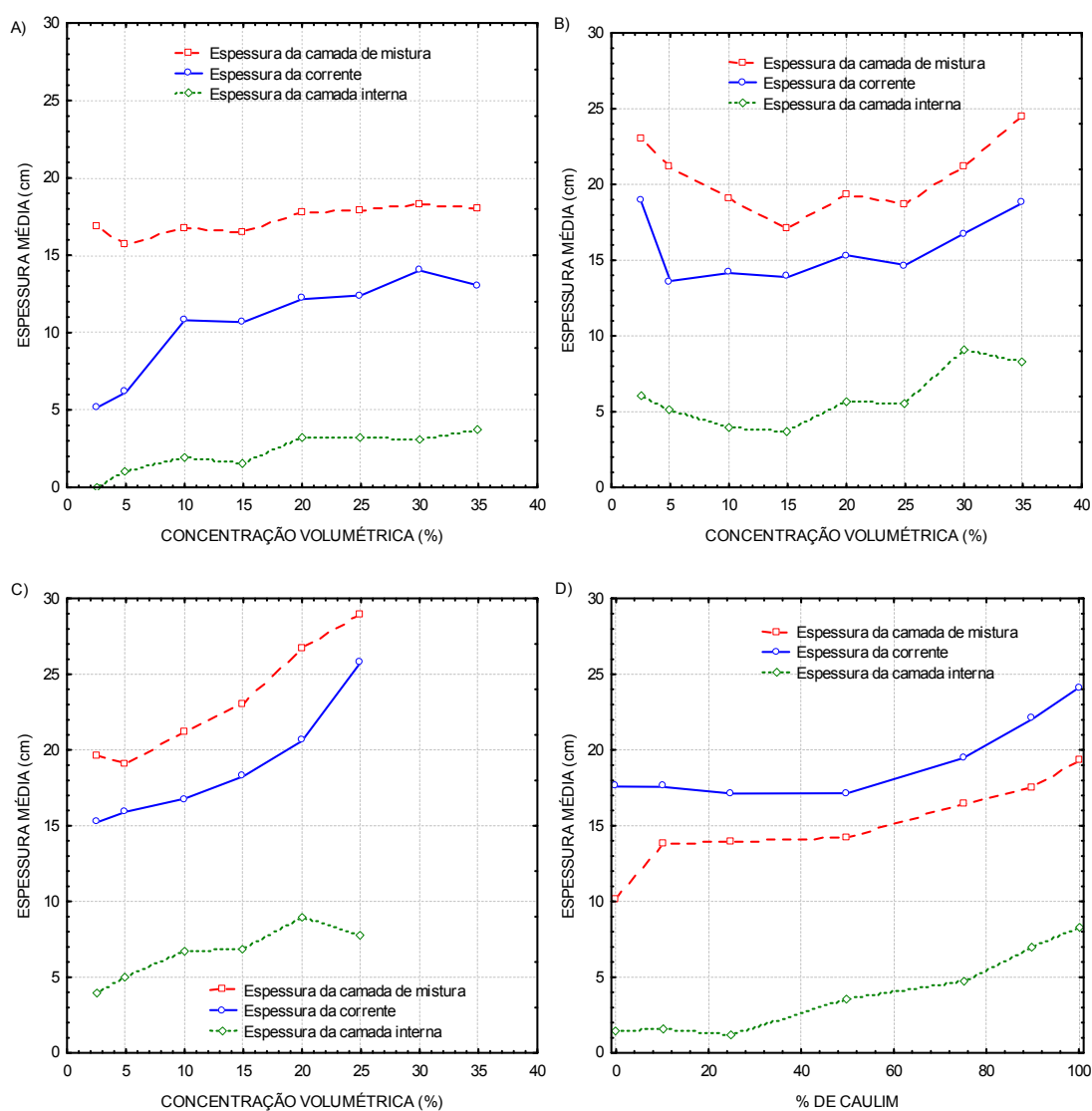


Figura 9.6 Relação dos valores médios das características geométricas com a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e; d) Grupo transição

Pela análise da figura 9.6 foi verificado que o comportamento das três espessuras geométricas apresentou a mesma tendência à medida que a concentração inicial foi sendo incrementada e que houve um comportamento distinto entre os grupos com a presença de argila (misto, coesivo e transição) e o grupo sem a presença de argila (não coesivos). No grupo não coesivo (figura 9.6a), há um aumento gradual da espessura da corrente em função da concentração até 20%, com os valores médios atingindo 10 cm (altura da corrente). Para os valores acima desta concentração, esse valor permaneceu constante. Já para o grupo misto e coesivo (figuras 9.6b e 9.6c), o comportamento foi distinto, com os maiores valores absolutos (~ 18 cm e ~ 25 cm, respectivamente) ocorrendo para os extremos da concentração ($C_{vol} < 5\%$ e $C_{vol} > 30\%$) e com um ponto de mínimo nos ensaios M_15 e C_10. Nota-se também que no grupo coesivo, há um aumento mais significativo dos valores das espessuras com o incremento da concentração. Isso se explica, pois a corrente se desenvolve acima de um fundo falso, no caso, a camada lamosa que se formou ao longo do experimento com espessuras significativas (atingindo a nove centímetros no experimento - C_25). Ainda, o grupo coesivo (à direita) apresentou as maiores dimensões absolutas nas três características avaliadas, sendo que os grupos misto e não coesivo apresentaram as menores dimensões. Novamente, esse comportamento pode ser explicado pela presença da argila, que, não sedimentando facilmente, conduz a espessuras de corrente com valores médios maiores.

No grupo transição (figura 9.6d) também se percebe a mesma tendência de aumento para as três espessuras geométricas, porém com um incremento mais acentuado para as correntes com maior presença de argila. O crescimento da camada lamosa basal é claramente percebido, já que nos fluxos com predominância de grãos não coesivos (% de argila < 50%), os valores são muito próximos a zero, ou seja, ocorre apenas uma fina camada de grãos junto ao fundo, enquanto que nos fluxos mais coesivos, esse valor chegou a aproximadamente nove centímetros para o fluxo com 100% coesivo (% de argila).

9.1.2.3 Relações adimensionais entre a zona da cabeça e do corpo

A figura 9.7 apresenta a relação adimensional entre a espessura média da cabeça e a espessura média do corpo, expressa em função da concentração volumétrica da corrente, para os quatro grupos simulados.

Nos três primeiros grupos de ensaios (NC, M e C) apresentados na figura 9.7a, foram constatados que há uma diminuição da espessura da cabeça com o aumento da concentração inicial, reduzindo sua importância no fluxo. Para os fluxos não coesivos, o limiar de mudança deste comportamento foi no ensaio NC_15, permanecendo o valor praticamente constante até as mais altas concentrações. Para o grupo misto, o comportamento é similar, apesar da

presença de um pico no ensaio M₂₀. Esse pico se explica pela ocorrência de um grande vórtice isolado junto à cabeça, o qual provocou um valor médio superestimado da cabeça (maior valor na figura 9.7a) e que, conseqüentemente, alterou o valor da relação. Se for desconsiderada a presença deste vórtice isolado, o comportamento seria muito similar ao grupo não coesivo, visto que, acima de 10% de concentração volumétrica, a dimensão do corpo é mais preponderante. Já para o grupo coesivo, esse comportamento é mais evidenciado, uma vez que, o corpo sofre um aumento devido à camada basal mais concentrada, proporcionando um aumento na sua dimensão se comparada com a da cabeça.

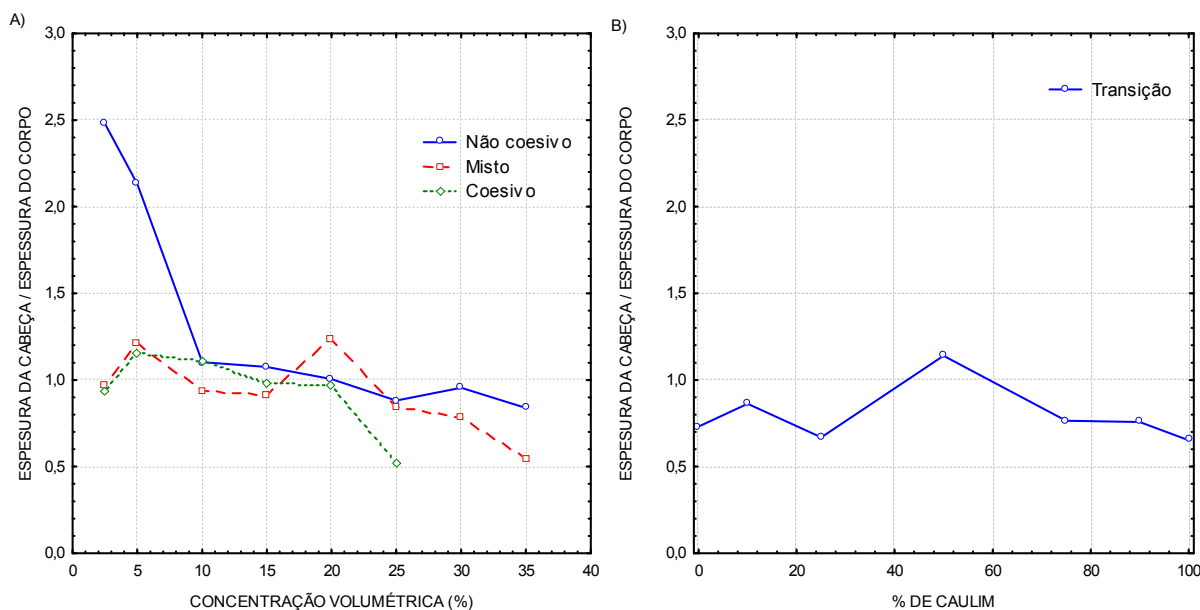


Figura 9.7 Relação entre o parâmetro adimensional da espessura da cabeça pela altura do corpo com: a) Concentração volumétrica (grupos NC, M e C) e; b) Presença de argila (grupo transição).

No grupo transição (figura 9.7b), foi verificado que a relação entre a espessura adimensionalizada e a concentração se mantém praticamente em torno do valor 0,8, entretanto há um pico no valor no ensaio M₂₀ (discutido anteriormente) que mascara essa tendência.

Breve discussão

Com base nos resultados apresentados na figura 9.5 criou-se uma incerteza entre os valores medidos (item 6.5.3) e os valores calculados pelas equações 9.1 a 9.3 na análise das características geométricas da corrente de densidade. Para evitar que tal confusão se crie no texto e nas análises subsequentes, foi determinado que as características geométricas utilizadas serão aquelas desenvolvidas através do método descrito no item 6.5.3, uma vez que esses foram medidos, a partir de visualizações do escoamento.

A determinação dos parâmetros médios da geometria da corrente apresentou comportamentos similares em termos de tendência entre as três características avaliadas

(*espessura da camada da mistura, da corrente e da camada interna*), apresentando valores proporcionais. Já com relação aos grupos ensaiados, houve a diferenciação do comportamento. Para as correntes puramente não coesivas, foi identificado o crescimento dos valores com a concentração inicial, o que não ocorre para os ensaios com presença de argila, onde, nos extremos, os valores são maiores que nos ensaios intermediários. Esse fenômeno ocorre nos ensaios M_20 e C_10, indicando os pontos de mínimo da altura média. Coincidentemente, esses ensaios representam os máximos valores de velocidade média (figura 9.1), ou seja, demonstrando a relação inversa entre a velocidade da cabeça e a altura da cabeça. Manica et al (2005) apresenta a mesma conclusão com base em ensaios por pulso num canal bidimensional de menor porte e com o uso de outro material sedimentar, no caso, o carvão mineral ($\rho_m = 1190 \text{ kg/m}^3$).

A determinação de um parâmetro adimensional como a relação entre a cabeça da corrente e seu corpo é importante para a parametrização destas correntes. Verificou-se que, novamente, com o aumento da concentração inicial, a relação vai diminuindo para todos os grupos ensaiados, significando que as correntes mais rápidas, possuem menores valores da espessura da cabeça da corrente.

9.1.3 Concentração média

9.1.3.1 Valores de concentração média em função da concentração inicial

Os valores de concentração média obtida com a aplicação das equações 9.1 a 9.3 para as regiões da cabeça, do corpo e da cauda foram relacionados com a concentração inicial das correntes de densidade. A figura 9.8 apresenta essa relação para os três primeiros grupos de ensaios.

Pela análise da figura 9.8 foi verificado que, para quase todos os experimentos, o valor da concentração média determinada ficou abaixo da concentração inicial. Esse resultado é óbvio, pois devido aos processos de deposição de grãos da corrente e da incorporação de fluido ambiente, houve a diminuição da diferença de densidade entre os meios. No corpo e na cauda da corrente, esse processo é melhor evidenciado, com os valores médios absolutos bem menores que o valor inicial. Porém, para dois ensaios (M_35 e C_25), esses valores foram maiores que a concentração inicial, pois a presença da camada mais concentrada junto ao fundo, que saturou a sonda de medições, deixou-a completamente imersa no interior da massa depositada.

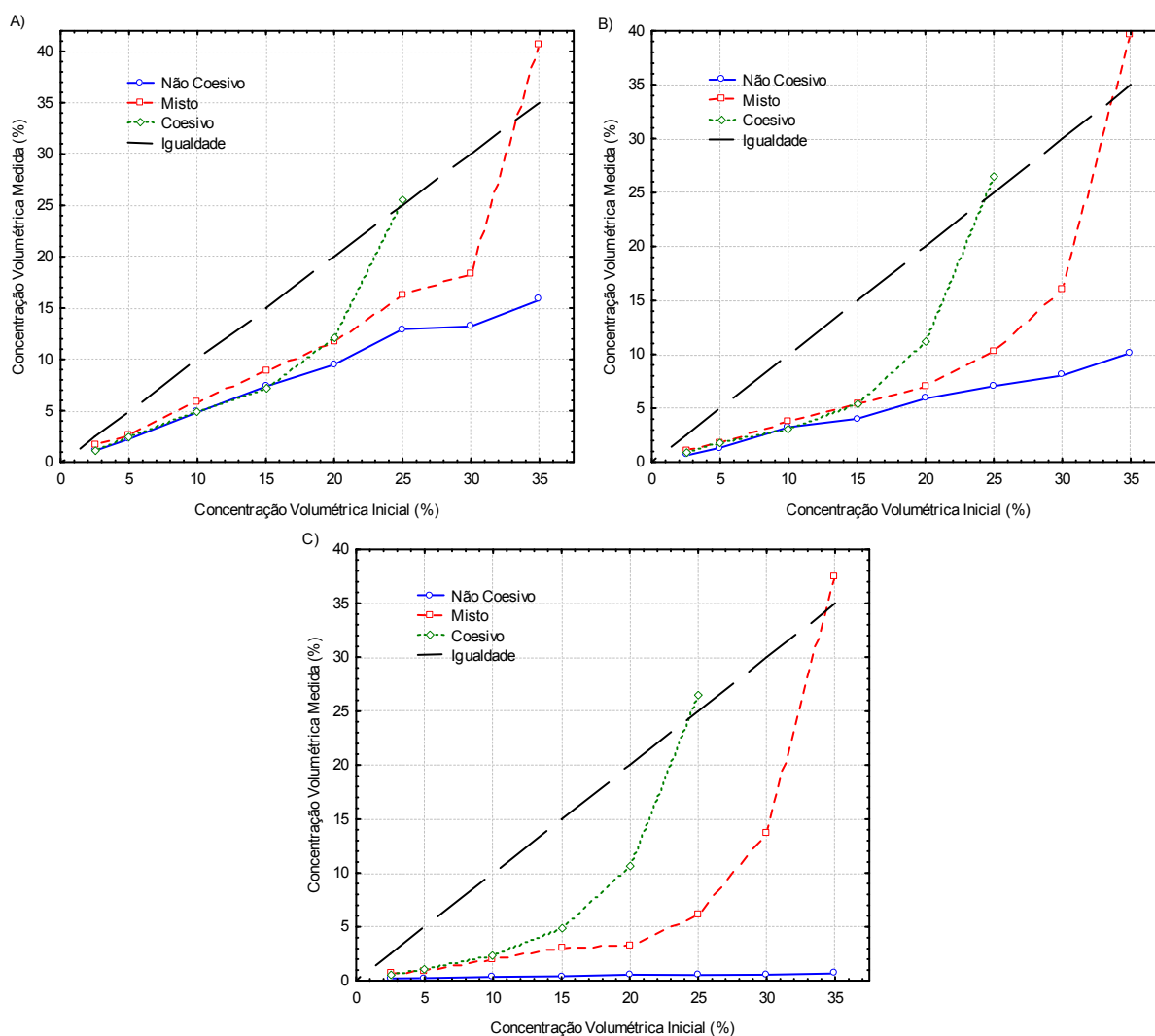


Figura 9.8 Relação da concentração média obtida nas equações 9.1 a 9.3 e a concentração volumétrica inicial: a) Cabeça; b) Corpo e c) Cauda.

Na região da cabeça da corrente (figura 9.8a), foi verificado que o comportamento dos valores médios tenderam a uma relação praticamente linear com a concentração inicial, com os valores mais próximos da condição de igualdade. Nesse caso, o fluxo perdeu um pouco de concentração, mas ainda mantém grande parte de sua carga em suspensão. Cabe salientar também que essa região representa, em termos de tempo, pouco mais de 5% do tempo total de evolução da corrente, sendo esse comportamento esperado.

Na região principal do escoamento, no caso o corpo da corrente (figura 9.8b), o comportamento para a concentração média foi diferenciado para os três grupos. No grupo não coesivo, a variação da tendência manteve o mesmo comportamento da cabeça, porém com valores absolutos menores. Nos grupos misto e coesivo, essa tendência se deu até um limiar de concentração inicial. Para as correntes de mais baixa densidade ($< 10\%$), essa linearidade foi verificada, com os valores muito próximos entre si, porém, à medida que a concentração foi aumentando, foi verificada a tendência de um comportamento mais exponencial, com uma grande variação de valores para a partir do ensaio M_30 e do ensaio C_15. Esse

comportamento, também era esperado, pois ficou evidente nos vídeos e nos resultados expostos até aqui, que a presença da camada de sedimento espessa junto ao fundo faria aumentar esse valor.

Na região da cauda da corrente (figura 9.8c), os valores apresentados foram muito menores, indicando que, nessa região, pouco material estava em suspensão, devido ao processo de deposição ao longo do tempo. Apenas nos dois ensaios de maior concentração do grupo misto e coesivo, foi verificada uma mudança no comportamento, visto que a sonda de concentração estava no interior do depósito lamoso.

Já a figura 9.9 apresenta as regiões da corrente (cabeça, corpo e cauda) para cada grupo separadamente.

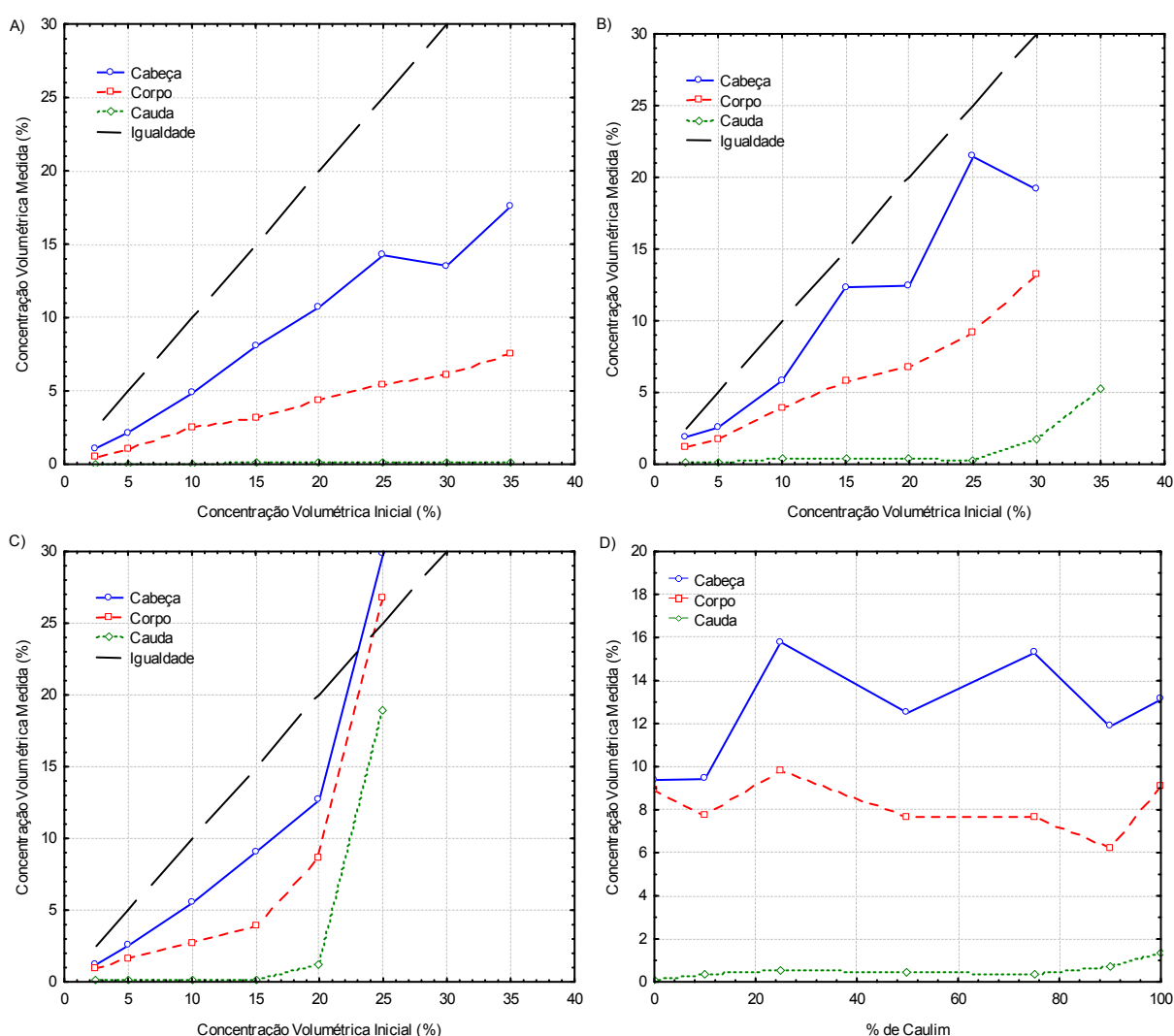


Figura 9.9 Relação da concentração média obtida nas equações 9.1 a 9.3 e a concentração volumétrica inicial e/ou presença de argila: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.

Para todos os grupos avaliados foi verificado que o comportamento da corrente de turbidez para as regiões da cabeça, do corpo e da cauda foram muito similares em tendência, ou seja, não houveram grandes alterações no processo dinâmico e deposicional. Apenas para o

grupo misto (M_35) houve uma pequena modificação nas regiões da cabeça e do corpo (valores mais altos), porém sem muita significância.

Em termos de valores absolutos, o cálculo da diferença entre a concentração da região da cabeça e do corpo mostrou que houve distinção entre o grupo sem a presença de argila e os grupos com presença de argila. Na região da cabeça, para o grupo não coesivo, houve uma redução de concentração volumétrica de 50% em relação a concentração inicial e uma redução de 30% para os grupos mistos e coesivos, enquanto que, para a região do corpo, esses valores foram de aproximadamente 80% e 55%, respectivamente. Na região da cauda, os valores foram aproximadamente 1%, 5% e 15%, para os grupos não coesivos, misto e coesivo.

No grupo transição, apenas a região da cabeça apresentou um pequeno aumento dos valores de concentração, à medida que mais argila foi sendo incorporada na mistura. Nas regiões do corpo e da cauda, esses valores de concentração foram quase constantes. Considerando os valores absolutos, a diferença entre os valores calculados e a concentração inicial, foi de 40% para a região da cabeça e 60% para a região do corpo.

9.1.3.2 Valores máximos de concentração

Neste capítulo será discutida a concentração máxima medida nas séries temporais da concentração para todos os grupos analisados. A figura 9.10 apresenta os valores da concentração máxima para a região da cabeça do corpo e da cauda.

Através da análise da figura 9.10, evidenciou-se que a concentração máxima da corrente de densidade foi, praticamente, a mesma da concentração inicial e, por vezes, nos ensaios com maior concentração acima desse valor, devido ao erro de saturação da sonda de medição. Esse fenômeno pode ser explicado pela pouca mistura na região da cabeça e pela formação de camada mais concentrada junto ao fundo na região do corpo para todos os tipos de corrente, independente do material utilizado. O único comportamento diferenciado foi observado para o grupo não coesivo, indicando que a deposição dos grãos foi acontecendo com o tempo, o que causou uma diminuição drástica nos valores máximos.

Cabe ressaltar também que aquisição desses valores máximos foi instantânea, ou seja, acontecendo em poucos instantes ao longo do ensaio para as corrente não coesivas. Já para as correntes mistas e coesivas, esse processo aconteceu no momento em que foi formada a camada lamosa junto ao fundo.

Os resultados do grupo transição indicam um crescimento dos valores da concentração, à medida que a presença de argila vai sendo incrementada. Das misturas não coesivas (até 50% de argila), verifica-se que o padrão segue quase constante para a cabeça e

corpo, enquanto que, para a cauda, devido à predominância do material não coesivo, houve deposição com os valores de concentração bem abaixo da concentração inicial. Porém, para as correntes com mais de 50% de argila, há um crescimento dos valores, muito influenciado pela presença da camada lamosa. Neste caso, a cauda (linha representada por losangos na figura 9.10d) também apresentou valores altos acompanhando a tendência da cabeça e do corpo.

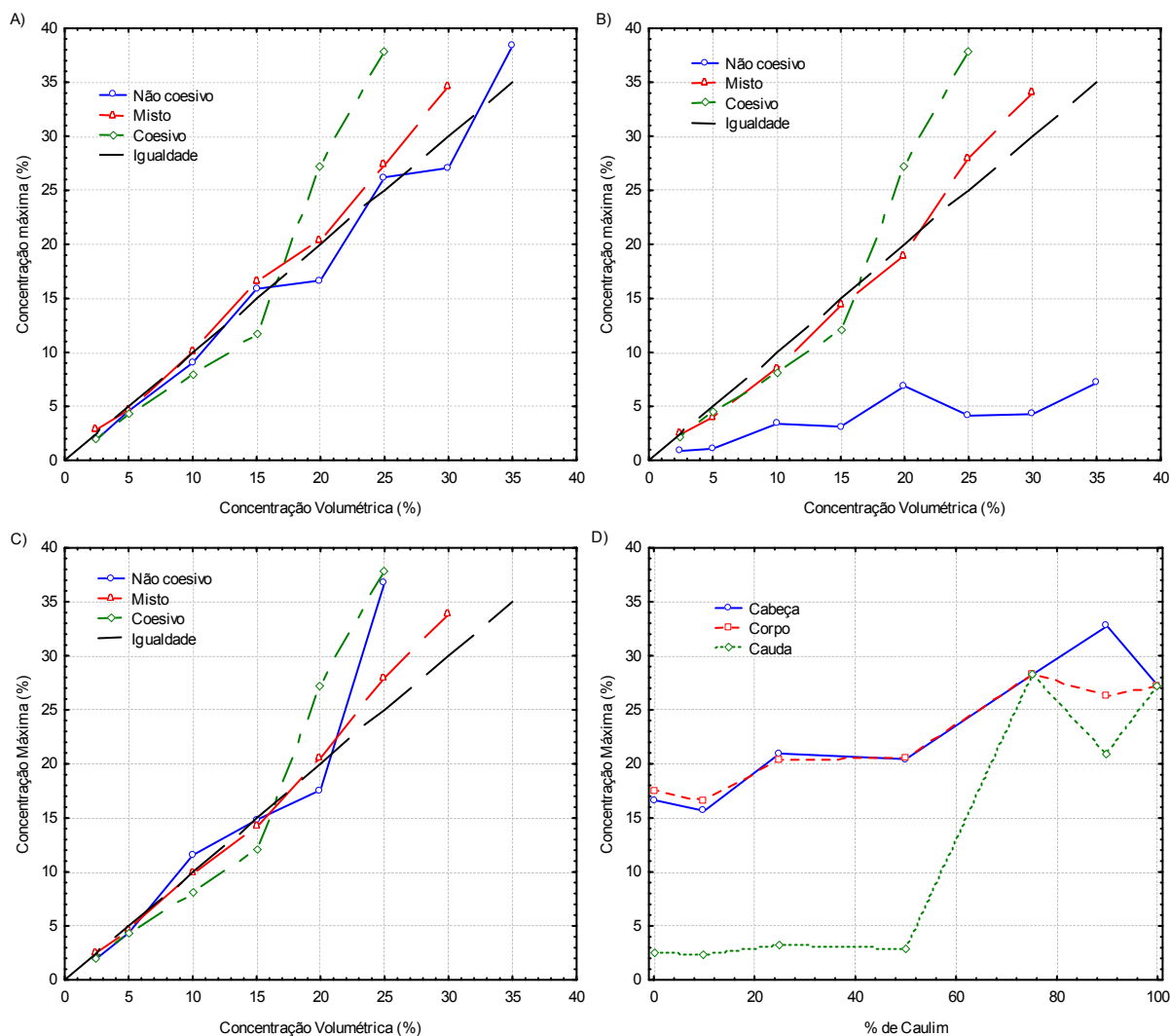


Figura 9.10 Relação dos valores máximos da concentração volumétrica com a concentração volumétrica inicial e/ou presença de argila: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.

9.1.3.3 Relações adimensionais para as concentrações medidas na cabeça e no corpo

A figura 9.11 apresenta a relação entre as concentrações média da cabeça e média do corpo da corrente, em função da concentração inicial da mistura.

Para os três grupos ensaiados (figura 9.11a), os valores da concentração média da cabeça foram maiores que os valores do corpo (valores > 1). Para os grupo não coesivo, essa relação é praticamente constante, com valor médio de $1,5 \pm 0,1$, ou seja, essa relação

independe da concentração inicial. O mesmo se dá para o grupo misto até o ensaio M_25, com os valores constantes e em torno de 1,5. Após isso, há um decrescimento significativo da diferença entre as regiões ficando os valores próximos a um.

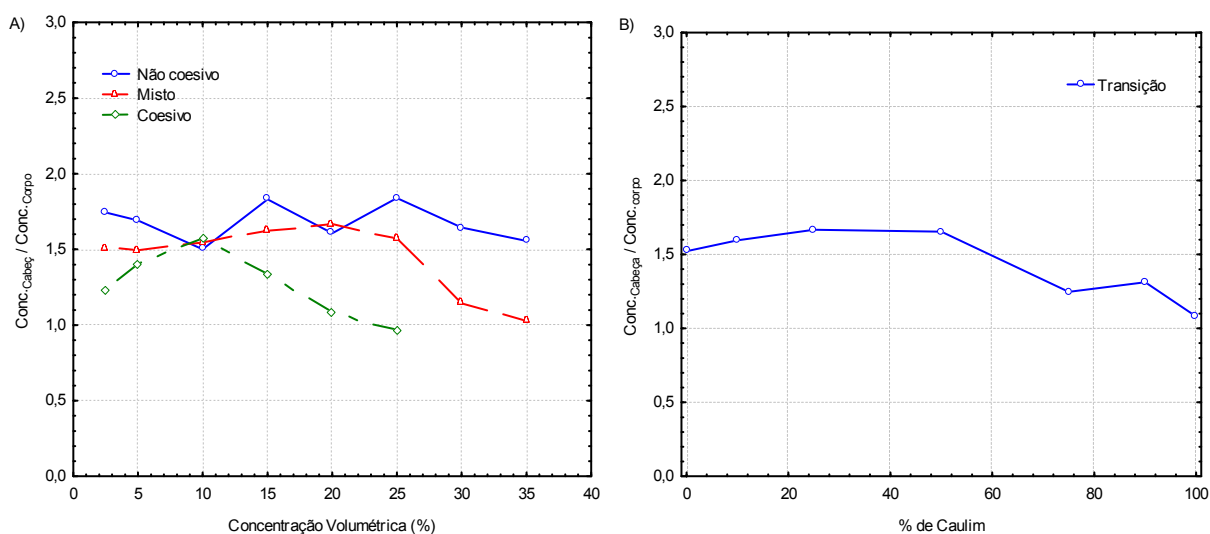


Figura 9.11 Relação entre o parâmetro adimensional da concentração média da cabeça pela concentração média do corpo com a: a) Concentração volumétrica (grupos NC, M e C) e b) Presença de argila (grupo transição)

Esse mesmo comportamento acontece para o grupo coesivo, uma vez que, após o ensaio C_10, também ocorre o mesmo decrescimento de valores. Nesses dois grupos, a mudança na diferença entre as concentrações da cabeça e do corpo era esperada, pois a presença da camada mais concentrada no corpo (camada lamosa) compensa a perda de concentração durante sua passagem, mantendo um valor alto que se aproxima dos valores da região da cabeça. Nos fluxos não coesivos, essa compensação não existe, mantendo constante a diferença entre as duas regiões.

Esse fenômeno pode ser melhor evidenciado nos resultados do grupo transição (figura 9.11b), demonstrando essa mudança de comportamento, à medida que a presença de argila foi aumentando nas misturas.

Cabe ressaltar que, para todos os resultados de concentração máxima apresentados acima, deve-se considerar os problemas de saturação que a sonda de concentração (UHCM) apresentou, especialmente junto ao fundo da corrente (interface inferior). Entretanto, conforme já foi relatado anteriormente, o aumento da concentração do corpo, devido à presença da camada lamosa foi visível, o que demonstra, independentemente do valor utilizado, um aumento considerável da concentração nesses pontos.

9.1.3.4 Parâmetros adimensionais da concentração volumétrica.

Com a adimensionalização dos perfis de concentração, foi possível também estabelecer outros parâmetros adimensionais que servem para caracterizar as correntes de

turbidez. Neste trabalho, a identificação destes parâmetros será realizada visando a obtenção de tendências, as quais permitam caracterizar as correntes de mais baixa de densidade e as de mais alta densidade. Assim, foram relacionados seis parâmetros adimensionais, combinando os dados medidos e calculados. A tabela 9.3 apresenta os parâmetros escolhidos e os valores das relações encontradas.

Tabela 9.3 Relações adimensionais da concentração para os quatro grupos de ensaios

Parâmetro	GRUPOS			
	NC	M	C	T*
$\frac{C_{\text{médio}}}{C_{\text{inicial}}}$	= 0,29	$C_{\text{médio}} = 1,15 \cdot e^{(0,087 \cdot C_{\text{inicial}})}$ (9.8)	$C_{\text{médio}} = 0,69 \cdot e^{(0,135 \cdot C_{\text{inicial}})}$ (9.11)	= 0,41
$\frac{C_r}{C_{\text{médio}}}$	= 2,13	$C_r = 12,55 \cdot \ln(C_{\text{médio}}) - 2,69$ (9.9)	$C_r = 10,25 \cdot \ln(C_{\text{médio}}) - 0,16$ (9.12)	-
$\frac{C_{\text{médio}}}{C_{\text{máximo}}}$	= 0,50	$C_{\text{médio}} = 1,45 \cdot e^{(0,072 \cdot C_{\text{máximo}})}$ (9.10)	$C_{\text{médio}} = 1,08 \cdot e^{(0,092 \cdot C_{\text{máximo}})}$ (9.13)	= 0,43
$\frac{C_r}{C_{\text{inicial}}}$	= 0,63	= 1,14	= 1,32	= 1,05
$\frac{C_r}{C_{\text{máximo}}}$	= 1,08	= 0,99	= 0,99	= 1,05
$\frac{C_{\text{máximo}}}{C_{\text{inicial}}}$	= 0,58	= 1,14	= 0,63	-

* valores médios

Os valores apresentados na tabela 9.3 indicam que algumas relações adimensionais para a concentração apresentaram valores constantes, enquanto outras relações apresentaram-se mais complexas, seguindo equações ajustadas analiticamente.

Breve discussão

Os resultados da concentração média dos fluxos simulados apresentaram uma forte influência da presença de argila para os fluxos mais concentrados, conforme descrito anteriormente, influenciando a ocorrência de processos hidrodinâmico e deposicional diferenciados para esses escoamentos. A presença da camada lamosa alterou completamente as tendências dos resultados, que demonstravam, até então, uma certa linearidade entre a concentração injetada e a concentração medida, tanto para a região da cabeça quanto à do corpo da corrente.

Essa comprovação de mudança do comportamento, novamente indica a modificação ocorrida para os fluxos mais concentrados, que apresentam um processo de fluxo completamente diferente. Os resultados do grupo transição, neste caso, serviram justamente para mostrar a variação de um processo dominado por material não coesivo até os processos dominados pelos fluxos coesivos.

Com relação aos valores máximos, apesar das sondas de medição estarem colocadas a 340 cm da fonte, foi possível encontrar valores praticamente idênticos à concentração inicial para todos os ensaios realizados. Para os ensaios com concentração de até, aproximadamente 20%, os valores medidos foram muito próximos aos valores iniciais de concentração, seguindo uma tendência linear. Após esse limiar, as concentrações medidas foram mais altas que a concentração inicial, especialmente para os fluxos com presença de argila. Nesse caso, o comportamento da curva seguiu uma tendência exponencial.

A relação entre as concentrações máximas, medidas na cabeça e no corpo, se manteve praticamente igual a 1, ou seja, não havendo muita diferença entre essas regiões. Nas correntes com a presença de argila, a cauda também manteve tal relação, o que indica que a argila é um dos principais componentes a determinar o comportamento do fluxo, para a concentração. Nas correntes não coesivas, essa relação ficou próxima a 1, porém para a cauda, foi drasticamente reduzida, uma vez que a deposição de parte do material acabou diminuindo a concentração do fluxo.

Cabe salientar, porém, que estes valores máximos, podem representar apenas um instante de tempo da corrente, não sendo significativo para uma análise mais global do fluxo, entretanto, o registro de tais valores, em uma distância de 3,4 m da fonte, indicam que estes fluxos teriam a capacidade de se desenvolver ainda mais.

Analizando a relação da concentração média no corpo e na cabeça, foi verificado que, para todos os ensaios, a cabeça apresentou um maior valor, ficando em torno de $1,5 \pm 0,1$. No escoamento, a cabeça representa menos de 5% do tempo total do escoamento, assim, os processos de deposição dos grãos e a diluição da corrente acontecem no corpo da corrente, explicando esse número ser 50% menor. Porém, novamente para as correntes mais concentradas e com presença de argila, esse número se reduz, uma vez que, as perdas de concentração ocorridas ao longo da passagem do corpo, são compensadas pela presença da camada mais concentrada (camada lamosa).

Por fim, os parâmetros adimensionais da concentração que foram ajustados e apresentados na tabela 9.3, permitem extrapolar qualquer dado referente à concentração, a partir de uma única leitura, nos grupos de ensaios realizados. Nesse caso, deve-se considerar as condições nas quais esses dados foram obtidos e as simplificações inerentes das simulações físicas realizadas.

9.2 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO ESCOAMENTO TURBULENTO.

Neste capítulo serão avaliadas as condições internas do escoamento turbulento, identificando a zona do perfil de velocidades onde ocorre a subcamada viscosa, bem como as

demais regiões internas deste perfil. Essas análises tomaram como base as equações apresentadas no capítulo 4.3.2.3, empregadas com os valores de velocidade de cisalhamento e de viscosidades médios, sendo os valores plotados para todos os ensaios realizados. A figura 9.12 apresenta o perfil de velocidades do corpo normalizado para os quatro grupos simulados.

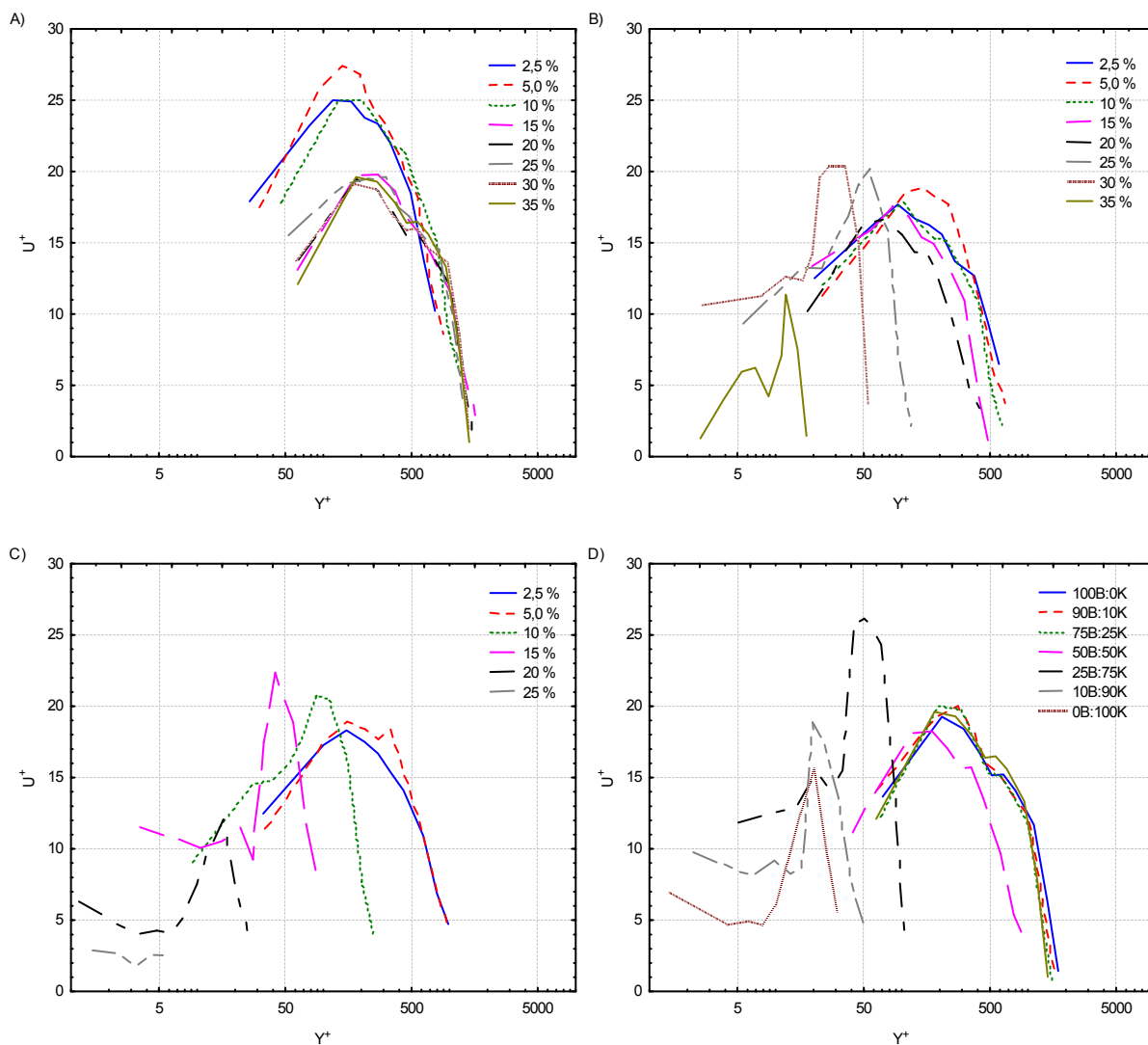


Figura 9.12 Perfil de velocidades normalizado: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.

Basicamente, os resultados apresentados na figura 9.12 são muito similares aos perfis de velocidade média do corpo da corrente, entretanto, através desta adimensionalização é possível verificar o comportamento dinâmico interno da corrente de turbidez.

Pela figura 9.12a foi verificado para o grupo não coesivo, que a influência da subcamada viscosa não se fez presente, uma vez que os valores adimensionalizados encontrados estão na região logarítmica e no perfil externo (Y^+ acima de 8), assemelhando-se aos perfis encontrados em jatos. Também são verificados que, para as diferentes

concentrações simuladas, os perfis adimensionalizados ficaram muito semelhantes entre si indicando que, neste tipo de fluxo, a variação da concentração não foi muito significativa.

Já para o grupo misto, nota-se uma maior variabilidade. Para os fluxos com mais baixa densidade, houve uma semelhança com o comportamento do grupo não coesivo, conforme foi constatado nos perfis médios de velocidade. Entretanto, para as correntes com concentração volumétrica acima daquela do ensaio M_20, há a indicação da presença da subcamada viscosa em pontos do perfil de velocidades (Y^+ abaixo de 8). Os experimentos que apresentaram a espessura da subcamada viscosa foram aqueles cujo aparecimento da camada mais concentrada junto à base ocorreu logo após a passagem da cabeça da corrente. Ainda, a zona com o perfil logarítmico de velocidades ($10 < Y^+ < 200$) apresentou poucos pontos nessa região, devido à falta de mais sondas de medição.

A mesma tendência foi encontrada para o perfil de velocidades do material coesivo, porém, os limites de concentração volumétrica para o qual já apresentaram o desenvolvimento de uma subcamada viscosa, se deu a partir do ensaio C_10. Os dados da corrente C_25 apresentaram problemas, devido a grande espessura da subcamada viscosa.

Para o grupo transição, o aumento da presença de argila (e não o da concentração) é que propiciou a formação da subcamada viscosa no escoamento. Essa formação se deu do experimento 25B:75K até o experimento 0B:100K. Nesses experimentos, a zona logarítmica de velocidades foi diminuindo e gerando a formação da subcamada viscosa no escoamento.

A figura 9.13 apresenta os dados plotados da zona logarítmica de velocidade ($20 < Y^+ < 200$) subsequente à subcamada viscosa no escoamento. Infelizmente, os dados medidos nesta região foram de, no máximo, três leituras, o que inviabiliza a realização de uma regressão logarítmica com mais precisão. Qualitativamente, porém, podem ser verificadas as tendências formadas pelas diferentes concentrações volumétricas para cada grupo ensaiado. Foi plotado também, o valor do perfil considerando água limpa (linha mais comprida). Para praticamente todos os grupos ensaiados, foi verificado que, para as correntes de mais baixa densidade, ou seja, aquelas com concentrações volumétricas menores que 10%, o coeficiente angular foi muito próximo aos de fluxos a superfície livre. O mesmo ocorre para misturas com porcentagem de argila menores que 50%. Para as mais altas concentrações, o padrão apresentado foi modificado, indicando um comportamento diferenciado de fluxo.

Breve discussão

A presença da subcamada viscosa nas correntes de densidade simuladas indica que a análise macroscópica do fluxo, isto é, com uma abordagem mais visual sobre o fluxo pode esconder alguns detalhes internos importantes para o entendimento dos processos

deposicionais. A camada lamosa, descrita nos itens 5.1 e 5.3 não é, necessariamente, laminar, como indicam a suas baixas velocidades e altas viscosidades. A alta intensidade da turbulência no interior da subcamada viscosa, através dos spots de turbulência, desmistifica o caráter laminar da corrente e pode trazer consequências sobre os processos deposicionais.

A análise da subcamada viscosa da zona logarítmica não pode ser melhor interpretada devido à falta de mais sondas ao longo da vertical, o que poderia caracterizar melhor estas regiões, com a realização dos ajustes e regressões pertinentes.

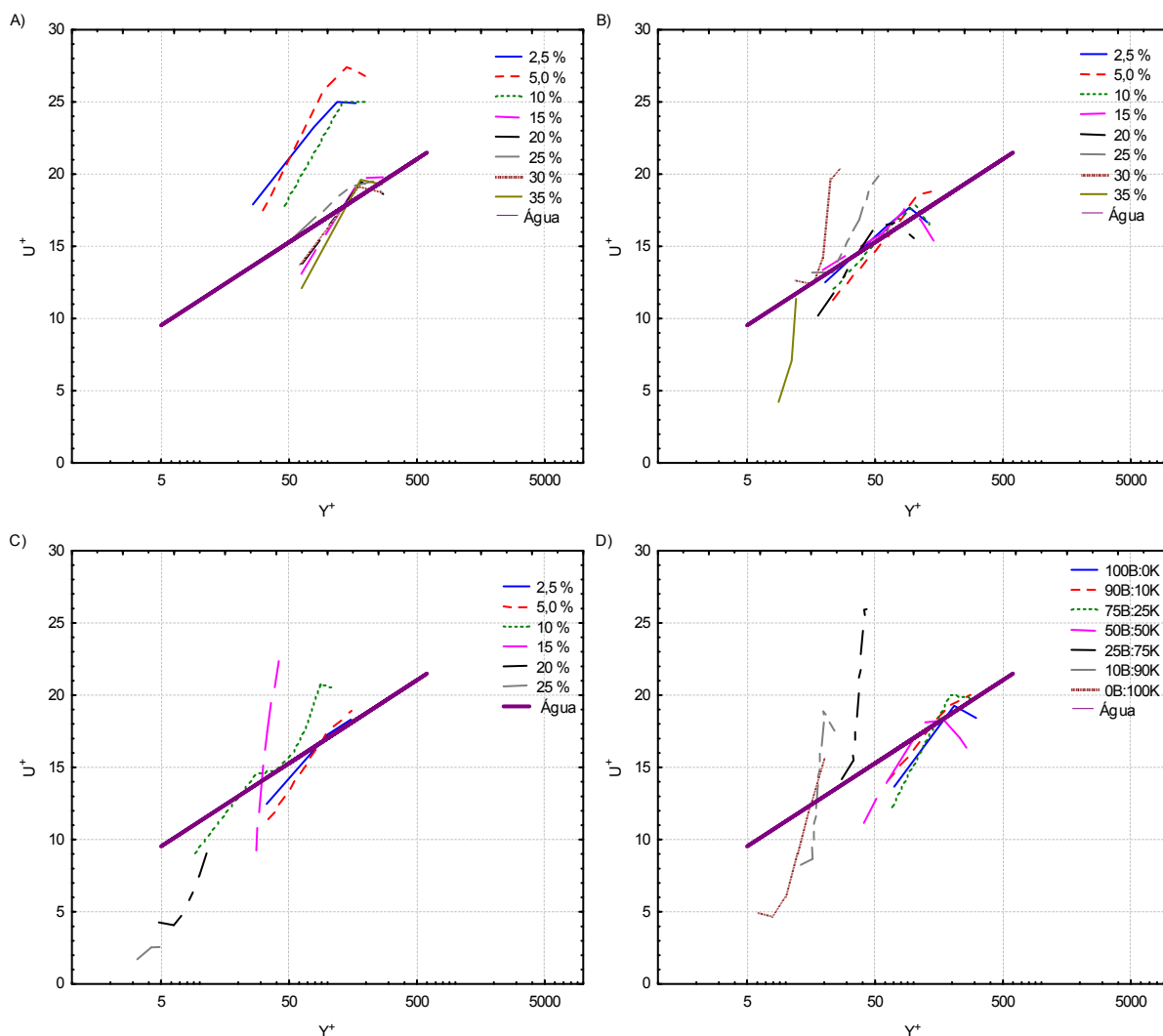


Figura 9.13 Detalhe da zona de perfil logarítmico no perfil de velocidades normalizado: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.

9.3 ADIMENSIONALIZAÇÃO DOS PERFIS VERTICAIS DE VELOCIDADE

9.3.1 Ensaios de mais baixa concentração

Os perfis de velocidades médias gerados foram adimensionalizados seguindo a metodologia apresentada em Michon et al (1955). Esses autores realizaram um estudo experimental de correntes de densidade de baixa concentração e, após a tentativa de aplicar a

lei logarítmica de velocidade nos seus experimentos, constataram que os resultados apresentados não foram satisfatórios na região próxima à parede, levando-os a propor uma lei exponencial para a velocidade, a qual relaciona parâmetros adimensionalizados de velocidade e da distância vertical ao fundo (figura 9.14). Assim, a equação proposta para a região da parede ($z < h_m$) foi a seguinte:

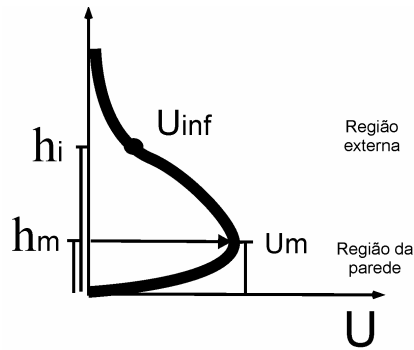


Figura 9.14 Esquema do perfil vertical de velocidade de uma corrente de turbidez.

$$\frac{u}{U_m} = \left(\frac{z}{h_m} \right)^{\frac{1}{m_1}} \quad (9.14)$$

Onde:

u = velocidade da corrente (m/s)

U_m = velocidade máxima da corrente (m/s)

z = distância ao fundo (m)

h_m = altura do ponto de máxima velocidade (m)

m_1 = parâmetro de ajuste da lei exponencial

Na região externa do perfil de velocidade ($z > h_m$), Michon et al. (1955) propuseram uma equação análoga a de um jato de corrente, sendo modelada a partir de uma distribuição gaussiana. A equação abaixo apresenta esta relação:

$$\frac{u}{U_m} = e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-h_m}{h_i-h_m} \right)^2 \right]} \quad (9.15)$$

Onde:

u = velocidade da corrente (m/s)

U_m = velocidade máxima da corrente (m/s)

z = distância ao fundo (m)

h_m = altura do ponto de máxima velocidade (m)

h_i = altura do ponto de inflexão da velocidade (m)

Altınakar (1988), desenvolvendo a mesma metodologia, concluiu que a altura da do ponto de inflexão do perfil de velocidades (h_i) era de difícil determinação na prática. Com base nisso, ele sugeriu que esse parâmetro fosse substituído pela metade da altura total da corrente. A equação 9.15 foi reescrita como abaixo.

$$\frac{u}{U_m} = e^{\left[-\alpha \left(\frac{z-h_m}{h_t-h_m} \right)^{m_2} \right]} \quad (9.16)$$

Onde:

u = velocidade da corrente (m/s)

U_m = velocidade máxima da corrente (m/s)

z = distância ao fundo (m)

h_m = altura do ponto de máxima velocidade (m)

h_t = altura total da corrente de densidade (m)

α e m_2 = são parâmetros de ajuste.

Essa metodologia foi aplicada nos experimentos desta tese que apresentaram perfis de velocidades similares ao padrão de um jato. Contudo, alguns ensaios dos grupos misto, coesivo e transição serão avaliados aplicando-se outra metodologia, a qual será apresentada a seguir. A determinação dos parâmetros de ajuste das leis dos perfis adimensionalizados de velocidade do corpo da corrente foi realizada com o uso aplicativo Statística® (tabela 9.4).

Tabela 9.4 Parâmetros ajustados para os perfis de velocidade.

Ensaio	Região da parede		Região acima da velocidade máxima		
	m_1	R^2	α	m_2	R^2
NC_2	2,86	89,75	1,84	2,68	94,47
NC_5	2,59	92,38	1,67	1,83	93,24
NC_10	2,61	92,49	2,14	1,79	97,51
NC_15	2,46	93,67	2,27	1,67	97,13
NC_20	2,22	95,50	2,51	1,75	94,38
NC_25	2,50	91,50	2,40	2,44	95,56
NC_30	2,24	95,22	2,58	2,15	92,98
NC_35	1,91	98,13	3,01	2,36	94,95
Média	2,42		2,30	2,08	
Desvio	0,29		0,43	0,38	
M_2	2,65	91,87	2,45	1,72	97,22
M_5	2,54	93,19	3,87	1,90	97,31
M_10	2,57	92,94	3,11	1,82	97,35
M_15	2,80	89,36	3,07	2,20	97,36
M_20	2,33	94,63	2,82	1,68	98,75
Média	2,58		3,06	1,86	
Desvio	0,17		0,52	0,21	
C_2	2,59	92,65	2,51	1,67	99,21
C_5	2,33	92,12	2,89	2,02	98,34
Média	2,46		2,70	1,85	
Desvio	0,18		0,27	0,25	
100B_0K	2,44		4,70	1,72	93,26
90B_10K	2,56		3,80	1,57	92,36
75B_25K	2,25		3,13	1,51	93,74
50B_50K	2,31		2,67	1,63	98,52
Média	2,39		3,58	1,61	
Desvio	0,14		0,88	0,09	

A figura 9.15 apresenta os perfis adimensionalizados de velocidade das correntes de densidade, perfis medidos e perfis ajustados, para os quatro grupos ensaiados.

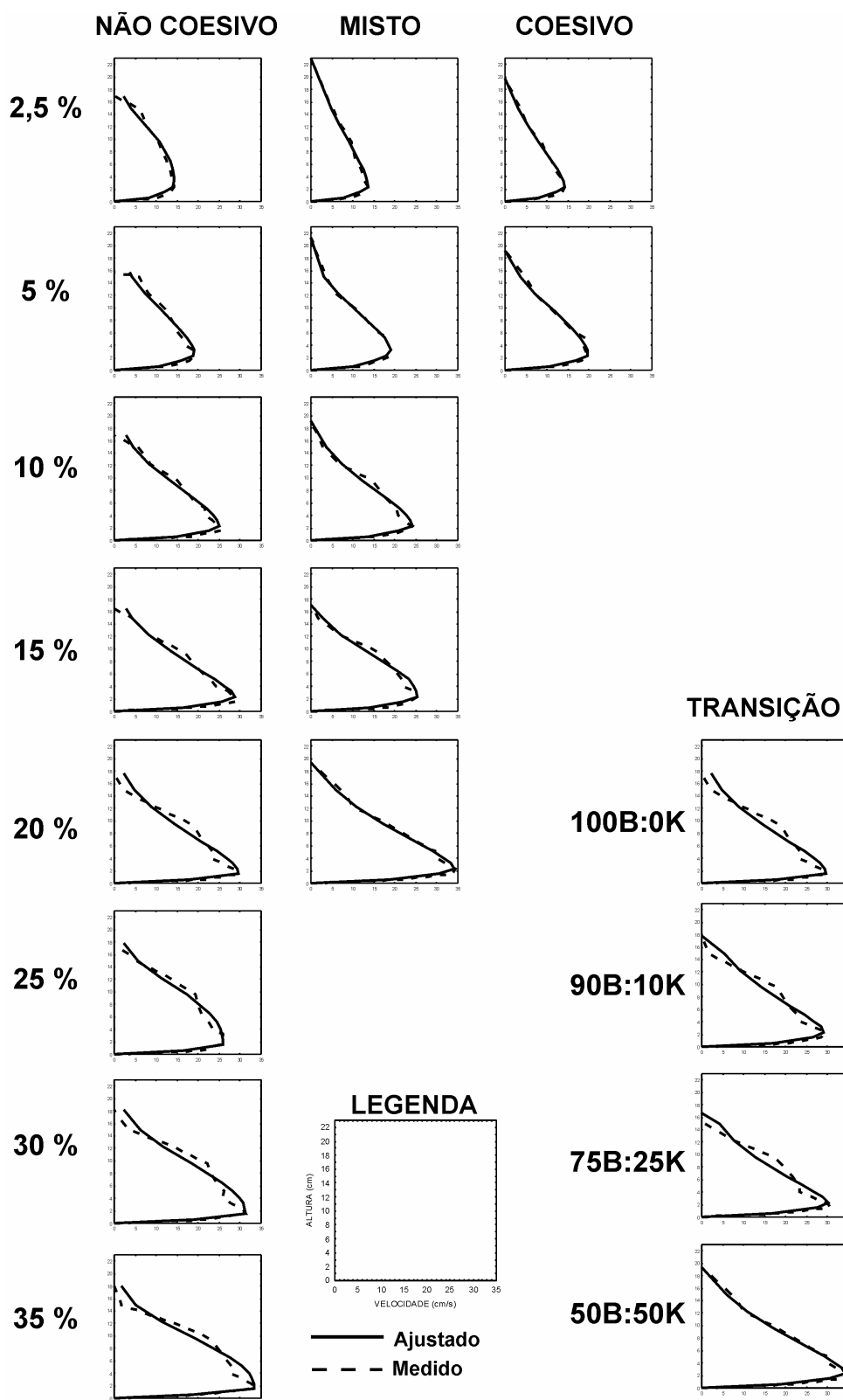


Figura 9.15 Comparação entre o perfil de velocidade medido e ajustado para os quatro grupos de ensaios.

Pela análise da figura 9.15, verifica-se que o ajuste realizado suaviza os perfis de velocidade das correntes de mais alta densidade nos pontos próximos à velocidade máxima, o

que baixou o coeficiente de determinação que estava mais próximo de 1. Por outro lado, esse modelo de ajuste corrige a simplificação adotada de considerar como zero a velocidade junto a interface superior da corrente, o que na prática não é assim, uma vez que a corrente induz um movimento no fluido ambiente.

Para as correntes de mais baixa densidade, o ajuste foi muito bom, (alto valor do coeficiente de correlação - R^2). Já para as correntes de mais alta densidade ($C_{vol} > 20\%$) foi notada uma leve suavização na região acima do nariz da corrente, indicando uma pequena mudança no comportamento hidrodinâmico interno da corrente.

A figura 9.16 apresenta uma análise da variação dos parâmetros de ajuste das leis dos perfis adimensionais de velocidade em função da concentração volumétrica inicial, para os grupos não coesivo, misto e coesivo. Nos dois últimos casos, os resultados foram parciais, pois as correntes de mais alta densidade foram analisadas separadamente.

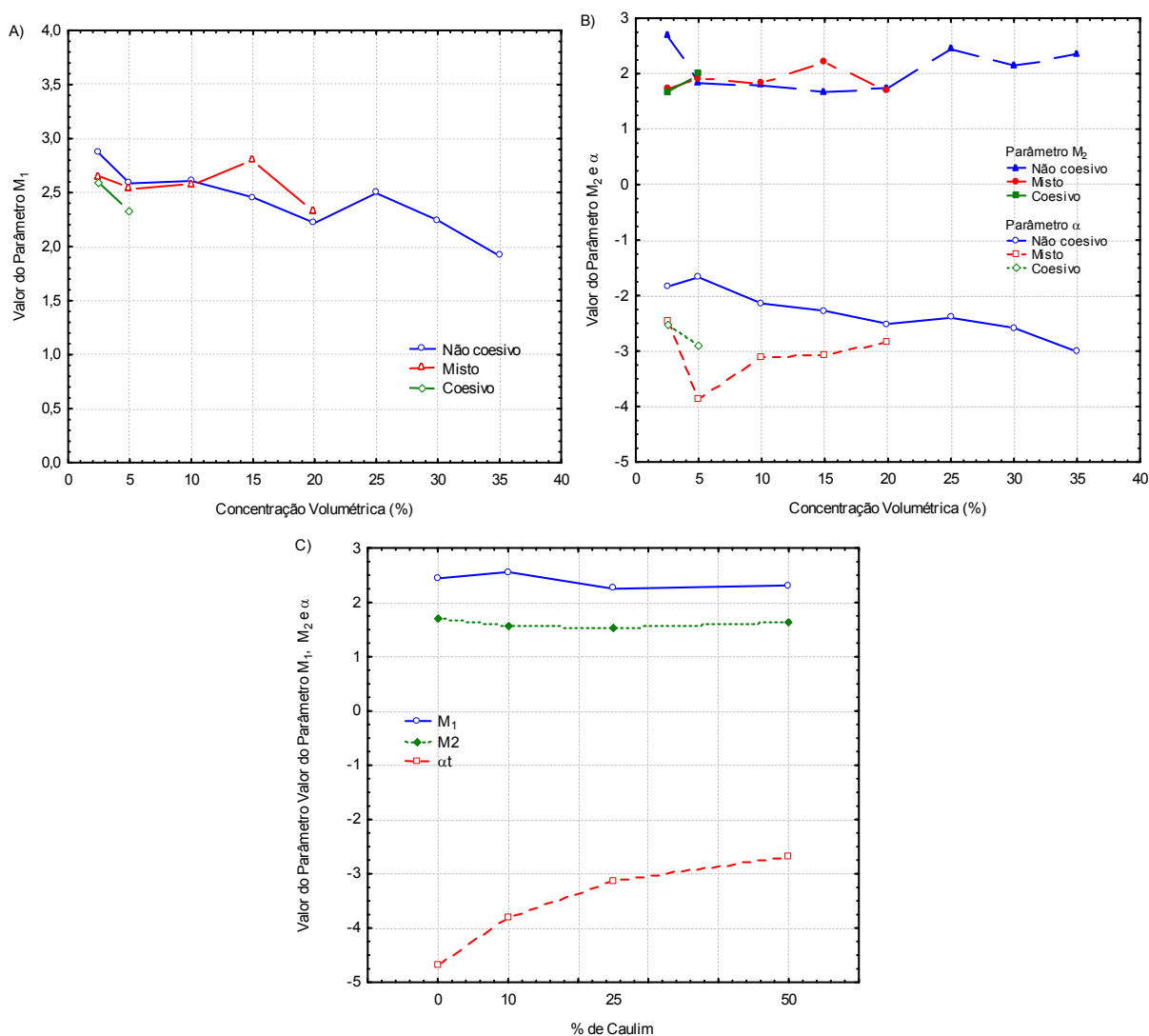


Figura 9.16 Relação dos parâmetros ajustados com a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Parâmetro m_1 ; b) Parâmetros m_2 e α e; c) Parâmetro m_1 , m_2 e α_t (transição)

Pelos resultados apresentados na figura 9.16, verifica-se que, apesar de algumas variabilidades, os parâmetros apresentam, em termos gerais, alguma tendência de comportamento. No caso do grupo não coesivo, no qual haviam mais dados, os parâmetros m_1 e alfa (α) apresentaram um decaimento praticamente linear com a concentração, enquanto que o parâmetro m_2 , pode ser substituído pelo seu valor médio ($\sim 2,0$). O ajuste de uma regressão linear às tendências observadas na figura 9.16, permite expressar os parâmetros m_1 e alfa (α) em função da concentração volumétrica, como segue:

$$m_1 = -0,022 \cdot C_{vol} + 2,81 \quad (9.17)$$

$$\alpha = -0,0352 \cdot C_{vol} - 1,69 \quad (9.18)$$

Onde:

α e m_1 = parâmetros da lei exponencial

C_{vol} = concentração volumétrica inicial (%)

Os coeficientes de determinação (R^2) foram de 88,52% para equação 9.17 e 91,65% para a equação 9.18, refletindo as variabilidades discutidas acima.

Para o grupo misto, verifica-se que os parâmetros não apresentam uma tendência clara de crescimento ou decréscimo, ficando no caso, mais constantes à medida que a concentração vai sendo incrementada. Para esse caso, a substituição dos valores dos parâmetros pela sua média pôde ser realizada com um pequeno erro, o qual deve ser considerado na sua aplicação.

Para o grupo transição, novamente foi possível determinar um perfil adimensional de velocidades para os ensaios com até 50% de argila em volume, visto que apenas o parâmetro alfa (α_t) apresenta uma variação com a concentração. Os outros parâmetros se mostraram pouco dispersos em relação à média podendo ser substituídos por ela. Um ajuste polinomial foi realizado para verificar a variação do parâmetro alfa (α_t) com a presença de argila, tendo sido encontrada a seguinte relação, com coeficiente de determinação do ajuste de 99,50%;

$$\alpha_t = -0,0009 \cdot Arg^2 + 0,0871 \cdot Arg - 4,66 \quad (9.19)$$

Onde:

α_t = parâmetros da lei exponencial aplicada à região externa do perfil de velocidades

Arg = quantidade de argila (%)

Partindo dos valores dos parâmetros ajustados e das suas expressões em função da concentração volumétrica, as equações 9.14 e 9.16 são reescritas para cada grupo,

considerando as condições acima citadas, assumindo, então, a forma apresentada na tabela 9.5.

Tabela 9.5 Equações adimensionalizadas para o perfil de velocidades dos grupos não coesivo, misto e transição

	REGIÃO DA PAREDE	REGIÃO EXTERNA
NÃO COESIVO	$\frac{U}{U_m} = \left(\frac{z}{h_m}\right)^{-0,022 \cdot C_{vol} + 2,81}$ <p style="text-align: right;">(9.20)</p>	$\frac{U}{U_m} = e^{\left[(0,0352 \cdot C_{vol} - 1,69) \cdot \left(\frac{z-h_m}{h_t-h_m}\right)^2 \right]}$ <p style="text-align: right;">(9.23)</p>
MISTO	$\frac{U}{U_m} = \left(\frac{z}{h_m}\right)^{2,58}$ <p style="text-align: right;">(9.21)</p>	$\frac{U}{U_m} = e^{\left[(-3,0) \cdot \left(\frac{z-h_m}{h_t-h_m}\right)^2 \right]}$ <p style="text-align: right;">(9.24)</p>
TRANSIÇÃO	$\frac{U}{U_m} = \left(\frac{z}{h_m}\right)^{2,39}$ <p style="text-align: right;">(9.22)</p>	$\frac{U}{U_m} = e^{\left[(-0,0009 \cdot Arg^2 + 0,0871 \cdot Arg - 4,66) \cdot \left(\frac{z-h_m}{h_t-h_m}\right)^{1,61} \right]}$ <p style="text-align: right;">(9.25)</p>

9.3.2 Ensaios de mais alta concentração

As correntes de mais alta densidade do grupo misto (M_25 até M_35), coesivo (C_10 até C_25) e transição (25B:75K até 0B:100K), cujos resultados evidenciaram a formação de uma segunda camada de mistura interna na corrente, caracterizada por um perfil de velocidades diferenciado e por velocidades mais baixas junto ao fundo, foram adimensionalizadas em quatro zonas, representadas pela figura 9.17 e definidas como segue:

- 1º zona: caracterizada pela presença da subcamada viscosa (item 9.2), sendo a velocidade considerada como linear;
- 2º zona: caracterizada por um perfil de velocidades tipo “plug” (relacionado à tensão de escoamento da mistura), o qual se caracteriza por apresentar uma velocidade praticamente constante ao longo da vertical;
- 3º zona: caracterizada pela zona abaixo da velocidade máxima da corrente, formada pela corrente que se desenvolveu sobre a camada lamosa depositada (fundo móvel para a corrente)
- 4º zona: caracterizada pela região situada acima da velocidade máxima (zona externa).

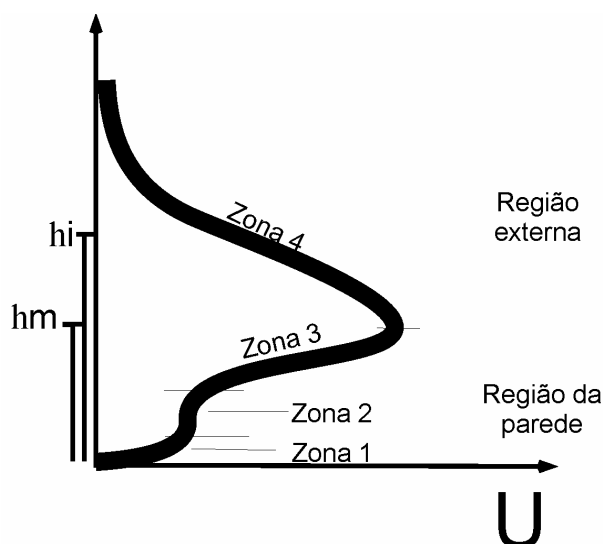


Figura 9.17 Esquema das zonas do perfil vertical de velocidade das correntes com maior presença de argila

A identificação das zonas descritas pela figura 9.18 foi realizada através da seguinte metodologia:

- Zona 1

Partindo da análise da figura 9.12 (item 9.2) foram determinadas as alturas da subcamada viscosa nos ensaios, considerando os pontos do gráfico que estavam na região de $Y^+ < 10$, região na qual a variação do perfil de velocidades pode ser considerada linear.

- Zona 2

A altura e a velocidade da zona de “plug” foram avaliadas através dos dados do perfil de velocidade médio, sendo, normalmente, a média de dois ou três pontos medidos nos ensaios. Em alguns ensaios (M_35 e C_20), o desenvolvimento desta região foi mascarado pela formação da subcamada viscosa.

- Zona 3

A determinação da terceira zona correspondeu à região acima da região de “plug”. Nesse caso, esta zona apresenta o mesmo formato da região descrita como “região da parede” na figura 9.17, porém, ao invés desse escoamento iniciar junto ao fundo, essa zona inicia após a região de “plug” (zona 2), caracterizando-se como uma segunda camada de mistura da corrente. Para que essa região fosse calculada, a equação 9.14 foi modificada, sendo adicionado um ponto, tanto na velocidade adimensionalizada, quanto na distância ao fundo adimensionalizada. Esse ponto corresponde à velocidade da camada lamosa (“plug” – zona 2) e à altura da camada lamosa (“plug” – zona 2). As novas equações propostas são as seguintes:

$$\frac{U - U_{\text{plug}}}{U_m - U_{\text{plug}}} = \left(\frac{z - h_{\text{plug}}}{h_m - h_{\text{plug}}} \right)^{\frac{1}{m_3}} \quad (9.26)$$

Onde:

U = velocidade da corrente (m/s)

U_m = velocidade máxima da corrente (m/s)

U_{plug} = velocidade do “plug” sedimentos (m/s)

z = distância ao fundo (m)

h_m = altura do ponto de máxima velocidade (m)

h_{plug} = altura do ponto de “plug” (m)

m_3 = parâmetro de ajuste da lei de potência

Com esse ajuste, a equação considera que a camada lamosa é a superfície inferior do escoamento (fundo móvel).

- Zona 4

A zona 4 foi definida seguindo a metodologia descrita anteriormente para a região superior do jato (equação 9.16).

Desta forma, as tabelas 9.6 e 9.7 apresentam os resultados da adimensionalização do perfil para este conjunto de ensaios, bem como os parâmetros ajustados e as alturas de cada zona delimitadas.

Tabela 9.6 Alturas ao longo do perfil vertical de velocidades de cada zona identificada para as correntes de mais alta concentração

$C_{\text{vol}} (\%)$	Misto							
	1° zona		2° zona		3° zona		4° zona	
	min	max	min	max	min	max	min	max
25	0,0	1,0	1,0	2,3	2,3	6,6	6,6	18,7
30	0,0	2,3	2,3	3,2	3,2	8,0	8,0	21,2
35	0,0	5,2	-	-	5,2	9,5	9,5	24,5

$C_{\text{vol}} (\%)$	Coesivo							
	1° zona		2° zona		3° zona		4° zona	
	min	max	min	max	min	max	min	max
10	0,0	1,0	1,0	2,3	2,3	5,2	5,2	21,2
15	0,0	1,5	1,5	4,1	4,1	6,6	6,6	21,0
20	0,0	4,1	-	-	4,1	9,5	9,5	26,7

Arg	Transição							
	1° zona		2° zona		3° zona		4° zona	
	min	max	min	max	min	max	min	max
75	0,0	1,5	1,5	4,1	4,1	6,0	6,0	19,7
90	0,0	2,3	2,3	4,1	4,1	6,0	6,0	23,6
100	0,0	3,2	3,2	4,1	4,1	9,5	9,5	26,9

Tabela 9.7 Parâmetros ajustados na equação 9.26 .

Ensaio	1° zona		2° zona		3° zona		4° zona	
	Altura	vel (cm/s)	m_3	R^2	α	m_3	R^2	
M_25	1,0	19,42	1,41	98,46	2,91	1,46	97,23	
M_30	2,3	15,44	1,37	91,64	4,26	2,04	96,17	
M_35	5,2	6,27	1,21	99,96	4,99	1,29	96,48	
Média			1,33		4,05	1,6		
Desvio			0,1		1,06	0,39		
C_10	1,0	16,16	0,78	99,92	0,75	2,07	99,42	
C_15	1,5	10,48	1,47	99,72	0,39	1,74	99,58	
C_20	5,2	8,51	1,82	97,90	3,43	1,02	99,75	
C_25	0	-	-	-	-	-	-	
Média			1,36		1,52	1,61		
Desvio			0,53		1,67	0,54		
25B_75K	1,5	13,03	2,71	86,33	6,67	2,91	99,98	
10B_90K	2,3	10,53	2,38	86,59	4,80	1,83	99,03	
0B_100K	3,2	6,41	1,70	98,23	8,24	1,75	93,53	
Média			2,26		6,57	2,16		
Desvio			0,52		1,72	0,65		

A figura 9.18 apresenta os perfis adimensionalizados a partir da aplicação da metodologia descrita acima.

Conforme mostra a figura 9.18, para os três grupos de ensaios analisados através desta metodologia, o comportamento do perfil foi muito similar, independente das condições iniciais da corrente.

A evolução do perfil da primeira coluna (à esquerda) até a terceira coluna, mostra um aumento da subcamada viscosa (ou diminuição da região de “plug” da zona 2) até o ponto em que há a passagem direta da zona 1 para a zona 3 (abaixo da velocidade máxima). Nesse caso, esse processo se deu tanto para as correntes mais concentradas (M_35), quanto para a corrente com maior presença de argila na sua composição (C_20 ou 0B:100K).

Breve discussão

Com o uso da metodologia desenvolvida por Michon et al (1955) e modificada por Altınakar (1988) foi possível estabelecer os perfis de velocidade adimensionalizados para todas as correntes simuladas, ajustando os parâmetros do modelo em função da concentração inicial. Nesse caso, essas equações podem ser aplicadas para uma gama maior de correntes, com diversos comportamentos. Essas equações, inicialmente ajustadas para as correntes de mais baixa densidade, foram adaptadas para representar o perfil de mais alta densidade, ou seja, com diferentes zonas e comportamentos ao longo da vertical. Desta

forma, foram propostas novas equações para a adimensionalização, as quais apresentaram resultados satisfatórios dentro das condições apresentadas.

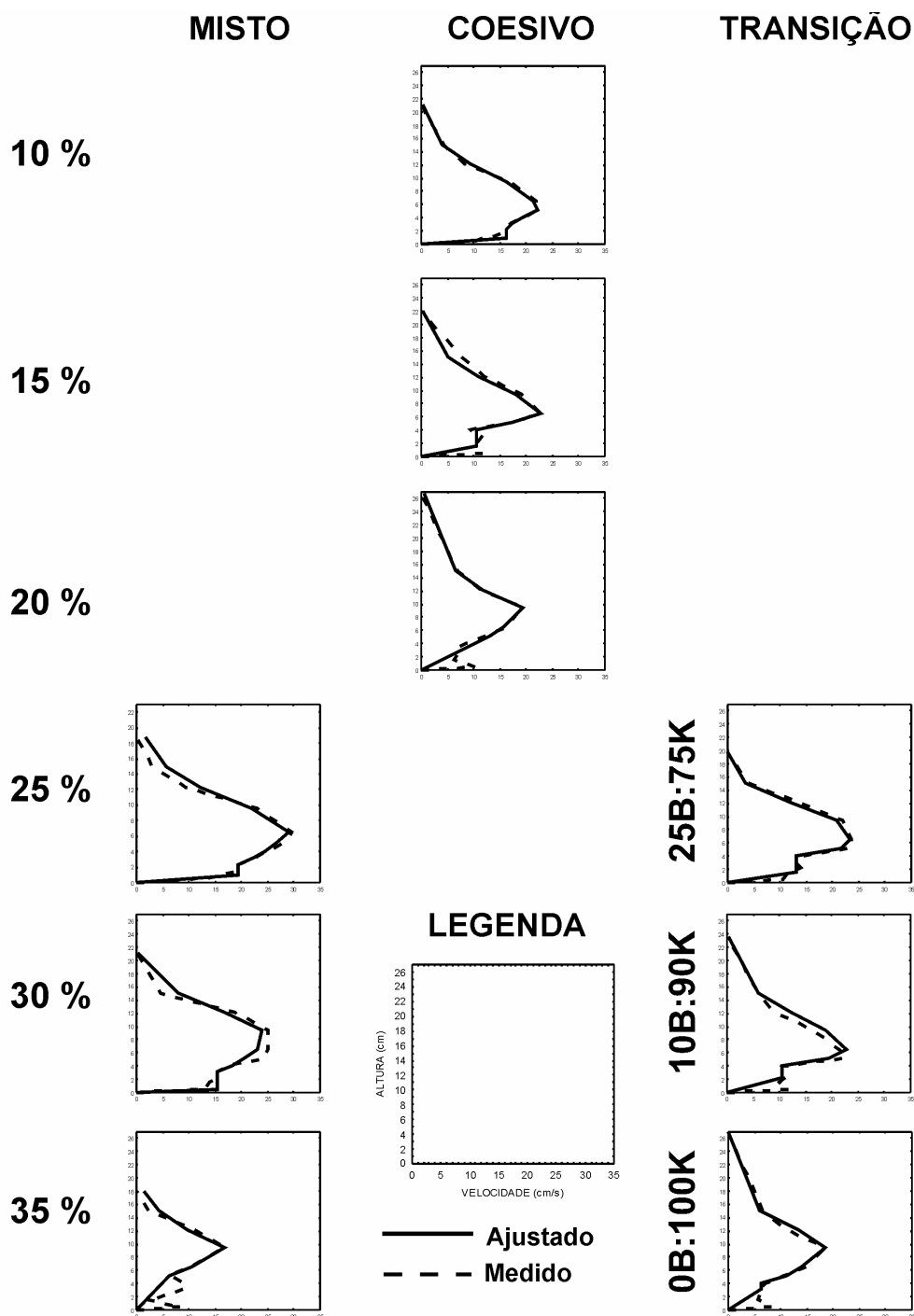


Figura 9.18 Comparação entre o perfil de velocidade medido e ajustado para ensaios de mais alta concentração (grupos misto, coesivo e transição).

A forma dos perfis de velocidades medidos para as correntes de mais alta densidade assemelha-se àqueles citados por Postma et al. (1988); McCave e Jones (1988) e Talling et al (2007), contudo estes autores não buscaram ajustá-los a leis analíticas.

Apesar do método utilizar muitas simplificações, as equações obtidas podem ser extrapoladas para correntes de turbidez com mais alta densidade.

Independente do tipo de ajuste realizado, a correlação dos resultados medidos e ajustados foram excelentes, de tal forma que com as curvas representam quase fielmente os dados medidos.

9.4 CONCENTRAÇÃO ADIMENSIONALIZADA PELA CONCENTRAÇÃO DE REFERÊNCIA

A partir dos perfis de concentração determinados no item 8.7, foi realizada uma adimensionalização dos mesmos, visando gerar curvas que representassem o comportamento da corrente em termos de sua variação de concentração ao longo da vertical. Para tanto, esse procedimento utilizou a relação entre dois parâmetros adimensionais: o primeiro definido como a concentração medida no ponto dividida pela concentração de referência e a segunda adotando uma característica geométrica, no caso, a distância do ponto ao fundo adimensionalizada pela altura total da corrente (z/h_t). No caso dos experimentos, a concentração de referência foi definida como sendo a concentração junto ao fundo, medida a 5% da altura total de fluxo. Calculando-se o valor desta distância do fundo verifica-se que esse valor se aproximava a 0,9 cm para a maioria dos experimentos. Portanto, foi definido que a concentração de referência seria a média dos valores de concentração registrados pela sonda mais próxima ao fundo (0,9 cm – item 6.5.2).

Como as medidas de concentração foram realizadas em apenas quatro pontos, foram adicionados mais dois pontos ao perfil de concentração ao longo da vertical. O primeiro deles corresponde à altura máxima da corrente, ou seja, já considerando o limite superior da camada de mistura, cujo valor de concentração foi considerado zero. O segundo ponto correspondeu à altura da corrente, sem considerar a camada de mistura, que foi interpolado linearmente entre o último ponto medido (9,2 cm) e o ponto de altura da camada de mistura da corrente.

Mesmo com a introdução simplificada de dois novos pontos ao longo da vertical, em alguns experimentos, como os com material coesivo que apresentaram a camada lamosa junto ao fundo (p. ex. M_35 e C_25), a quantidade de pontos medidos foi inferior à quantidade de pontos necessários para se obter uma boa correlação. Nesses casos, a presença da camada lamosa, praticamente soterrou as sondas, faltando medições acima desta camada. Entretanto, a determinação dos perfis foi realizada com ressalvas que serão apontadas posteriormente.

Num primeiro momento foi verificado que as curvas adimensionalizadas apresentaram uma tendência de comportamento que se aproximava de uma exponencial, seguindo os perfis típicos encontrados em escoamentos fluviais. Assim, foram realizadas uma série de regressões nos dados com o uso do aplicativo Statística®, ajustando-se a seguinte equação:

$$\frac{C(z)}{C_r} = A \cdot e^{\left(\frac{B \cdot z}{h_t}\right)} \quad (9.27)$$

Onde:

$C(z)$ = concentração volumétrica no ponto z (%)

C_r = concentração de referência (%)

h_t – Altura total da corrente (cm)

z – distância ao fundo (%)

A e B – parâmetros a serem determinados

A tabela 9.8 apresenta os parâmetros ajustados pelo aplicativo, bem como o coeficiente de determinação para cada regressão. A figura 9.19 apresenta os perfis adimensionalizados para os quatro diferentes grupos.

Tabela 9.8 Parâmetros ajustados na equação exponencial 9.27.

$C_{vol}(\%)$	Não Coesivo			Misto			Coesivo			Arg	Transição		
	A	B	R^2	A	B	R^2	A	B	R^2		A	B	R^2
2,5	1,25	-3,35	98,10	1,14	-3,56	99,58	1,16	-3,35	99,38	100K	1,177	-4,37	99,49
5	1,26	-3,70	99,59	1,20	-4,02	99,68	1,23	-4,52	99,68	90K	1,246	-3,98	99,03
10	1,24	-4,39	99,02	1,21	-4,11	99,79	1,25	-5,36	99,67	75K	1,257	-3,92	99,36
15	1,25	-4,42	99,33	1,22	-4,08	99,49	3,62*	-9,25*	99,80	50K	1,282	-5,30	99,90
20	1,24	-4,36	99,36	1,29	-5,56	99,85	2,80*	-8,59*	99,69	25K	1,234	-4,27	98,47
25	1,24	-3,95	98,91	1,27	-5,07	99,79	1,99*	-3,14*	98,10	10K	1,22	-5,12	98,96
30	1,22	-3,55	98,24	2,96*	-7,25*	98,99	-	-	-	0K	1,237	-5,92	96,76
35	1,19	-3,23	98,23	4,58*	-6,27*	97,59	-	-	-				
Média	1,24	-3,87	98,91	1,22	-4,39	99,69	1,22	-4,46	98,16		1,23	-4,69	98,85
Desvio padrão	0,02	0,48	0,57	0,053	0,752	0,14	0,058	0,831	2,837		0,033	0,759	1,027

* presença da camada lamosa (não foram considerados para o cálculo da média e do desvio padrão).

Pelo resultado da figura 9.19, podemos verificar que as correntes com mais baixa concentração inicial apresentam um comportamento adimensionalizado mais bem distribuído ao longo da vertical, ou seja, com valores maiores na sua parte superior. Por outro lado, à medida que a concentração inicial vai sendo incrementada, mais espessas ficam as curvas junto ao fundo e mais finas junto à superfície superior. Essa espécie de estratificação junto ao fundo é mais acentuada para as correntes com as maiores concentrações do grupo misto e coesivo (M_35 e C_25)

Conforme pode ser visualizado na tabela 9.8, para todos os grupos de ensaios realizados, o parâmetro A não variou significativamente, ficando o seu valor constante próximo a 1,23. Por outro lado, o parâmetro B apresenta uma pequena variação em função da

concentração inicial e do material da mistura. Ainda assim, o uso dos valores médios ajustados pode ser utilizado, sem muito erro.

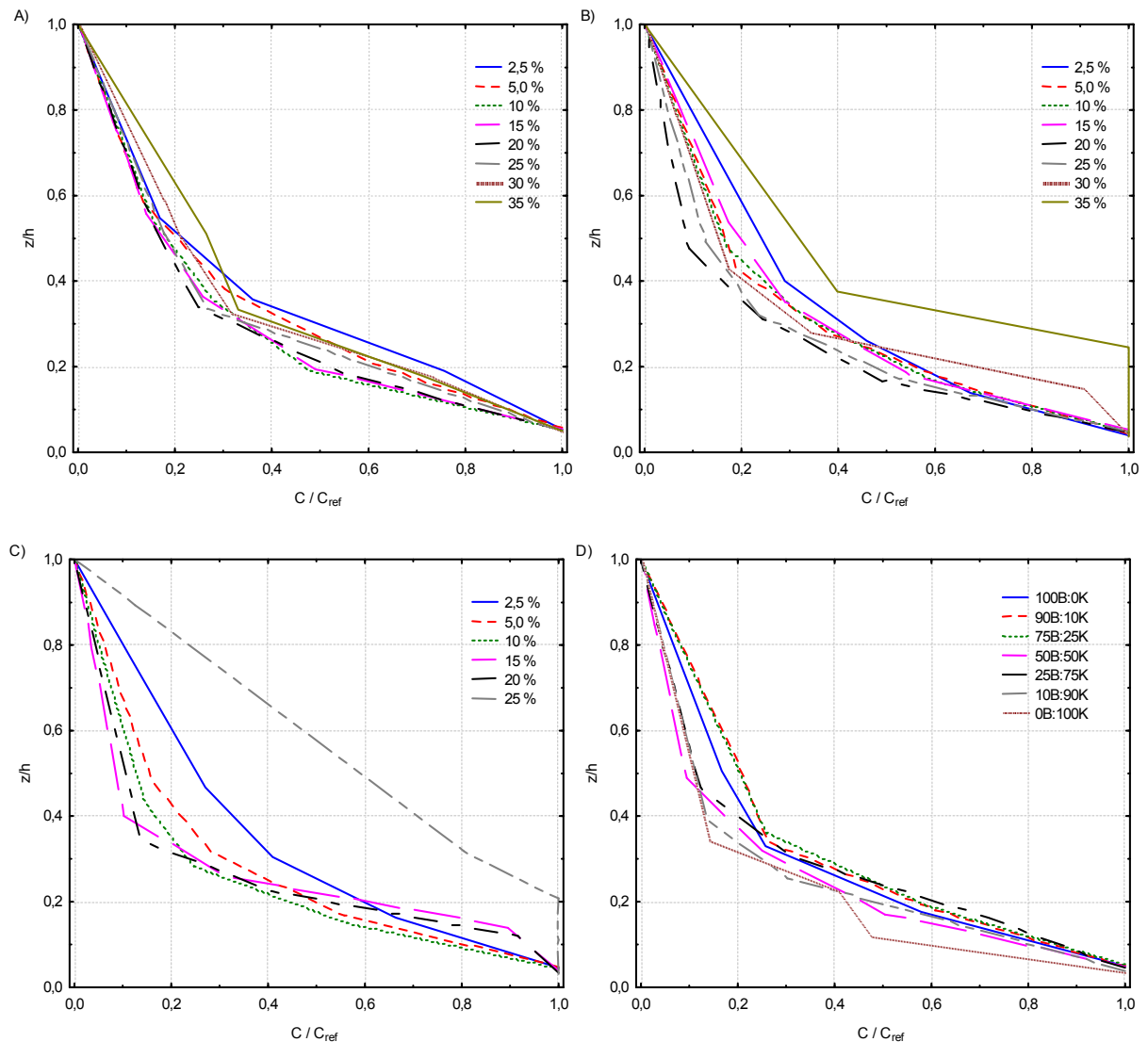


Figura 9.19 Perfis de concentração vertical adimensionalizados: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.

Substituindo os valores dos parâmetros A e B na equação 9.27 pode-se obter as expressões gerais para cada grupo isoladamente. Entretanto para o grupo misto, devido à formação da camada lamosa, para as concentrações volumétricas iniciais maiores de 30% e 35%, deve-se acrescentar a condição de:

$$\frac{C(z)_{(\text{misto})}}{C_r} = 1 \quad (9.28)$$

Onde:

$C(z)$ = concentração volumétrica no ponto z (%)

C_r = concentração de referência (%)

Para $z < h_{\text{camada lamosa}}$, forma-se um perfil vertical com a mesma concentração para os valores no interior da camada lamosa. A altura da camada lamosa foi definida para o grupo misto como sendo:

$$h_{\text{camada lamosa(misto)}} = 0,33 \cdot C_{\text{inicial}} - 6.4 \quad (9.29)$$

Onde:

$h_{\text{camada lamosa (misto)}}$ = Altura da camada lamosa do grupo misto (cm)

C_{inicial} = concentração inicial da mistura (%)

E para o grupo coesivo, para as concentrações iniciais maiores 15%, deve-se acrescentar a condição de

$$\frac{C(z)_{\text{(coesivo)}}}{C_r} = 1 \quad (9.30)$$

Onde:

$C(z)$ = concentração volumétrica no ponto z (%)

C_r = concentração de referência (%)

Para $z < h_{\text{camada lamosa}}$, formando um perfil vertical com a mesma concentração para os valores no interior da camada lamosa. Ainda, para este grupo, a camada lamosa pode ser relacionada com a concentração inicial, sendo expressa na equação.

$$h_{\text{camada lamosa (coesivo)}} = 0,042 \cdot C_{\text{inicial}}^2 - 0,85 \cdot C_{\text{inicial}} - 6.8 \quad (9.31)$$

Onde:

$h_{\text{camada lamosa (coesivo)}}$ = Altura da camada lamosa do grupo coesivo (cm)

C_{inicial} = concentração inicial da mistura (%)

As figuras 9.20 apresentam as curvas de concentração ajustadas para os dados, onde se pode notar alguma diferença entre os valores medidos e ajustados, devido ao próprio método de regressão.

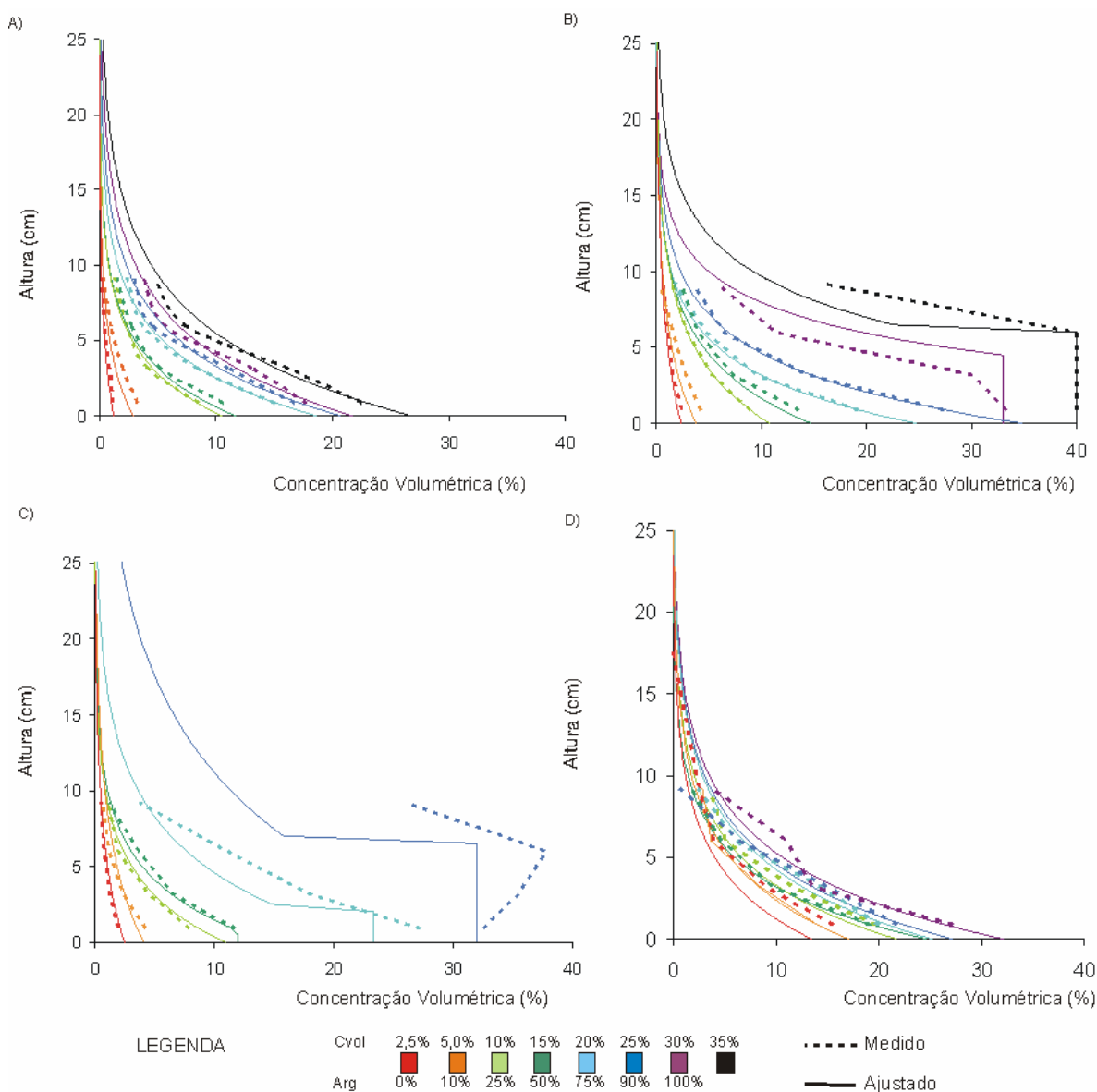


Figura 9.20 Perfis de concentração ajustados analiticamente: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.

Breve discussão

Os perfis adimensionalizados de concentração foram obtidos tentando simplificar ao máximo os parâmetros de entrada. Desta forma, visava-se estabelecer as relações de cada grupo para ser futuramente aplicado no entendimento das correntes de turbidez.

Metodologias encontradas na literatura como as de Graf e Altinakar (1998), Parker et al (1987) foram testadas e aplicadas, sendo os resultados encontrados muito similares a esses.

De uma maneira geral, os perfis ajustados seguiram a tendência dos valores medidos com o aumento da concentração inicial. Desta forma, pode-se praticamente garantir os resultados sem a necessidade da realização de mais repetições dos ensaios.

Para todos os grupos, a tendência exponencial dos perfis adimensionalizados, mostra que nestas correntes, à medida que se acrescenta material à mistura, há uma tendência de

criar zonas, mais concentradas junto ao fundo, conforme foi verificado no capítulo 8 (item 8.6 e 8.7).

Ainda, para os grupos mistos, coesivos e de transição, à medida que foi surgindo a camada lamosa junto ao fundo, o perfil de concentração, praticamente se manteve constante no interior desta camada, ou seja, houve a criação de perfil vertical com a mesma concentração até o fim desta camada. Para os grupos misto e coesivo, essa relação com a concentração inicial foi estabelecida.

9.5 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO JUNTO AO FUNDO

A determinação da tensão de cisalhamento para as correntes de turbidez é um assunto que não está totalmente discutido na literatura, pois poucos trabalhos são encontrados abordando esse tema, muitos deles baseados em estudos análogos realizados em canais abertos, com água limpa. Michon et al. (1955) e Garcia (1985) entre outros são alguns poucos exemplos que apresentam o cálculo da tensão de cisalhamento em correntes de turbidez com mais baixa concentração

Neste capítulo serão apresentados dois métodos de cálculo para determinar a tensão de cisalhamento junto ao fundo. Num primeiro momento, foi utilizado a metodologia apresentada em Michon et al (1955), e num segundo momento, foi feita uma adaptação, para o estudo das correntes de turbidez, do método de Clauser (desenvolvido em 1954),

9.5.1 Método apresentado em Michon et al (1955)

A metodologia aplicada por Michon et al (1955) visa desenvolver uma rotina para a determinação dos esforços cisalhantes em correntes de turbidez. Neste método, a determinação da velocidade de cisalhamento se dá, basicamente, pela integração da equação 9.37, a qual representa a integral do excesso da quantidade de movimento ao longo da vertical até o ponto de máxima velocidade junto ao fundo. Neste caso, o valor da tensão de cisalhamento junto ao fundo se dá no valor $z = 0$.

Para $0 \leq z \leq h_m$

$$\tau_b = S \cdot g \cdot \int_0^{h_m} \Delta\rho \cdot dz \quad (9.37)$$

Onde:

τ_b = tensão de cisalhamento junto ao fundo (Pa)

S = declividade do canal

g = aceleração da gravidade (m/s²)

h_m = Altura do ponto da velocidade é máxima (cm)

z = distância ao fundo (cm)

$\Delta\rho$ = variação da massa específica (kg/m^3)

A tabela 9.9 apresenta, para os quatro grupos de ensaios realizados, os valores calculados pelo método apresentado em Michon et al (1955) e a figura 9.21 apresenta os valores plotados.

Tabela 9.9 Valores da tensão de cisalhamento junto ao fundo – Método de Michon

C_{vol}	τ_B (Pa)			U^* (m/s)			Arg	τ_B	U^*
	NC	M	C	NC	M	C			
2,5	0,024	0,049	0,040	0,0049	0,0069	0,0062			
5	0,066	0,086	0,087	0,0079	0,0089	0,0090	100	0,556	0,0196
10	0,173	0,181	0,161	0,0123	0,0126	0,0119	90	0,444	0,0181
15	0,218	0,276	0,239	0,0136	0,0150	0,0142	75	0,575	0,0198
20	0,306	0,391	0,556	0,0157	0,0172	0,0196	50	0,392	0,0172
25	0,342	0,558	0,662	0,0164	0,0196	0,0208	25	0,403	0,0174
30	0,362	0,678		0,0167	0,0209		10	0,285	0,0152
35	0,460	0,815		0,0183	0,0222		0	0,318	0,0159

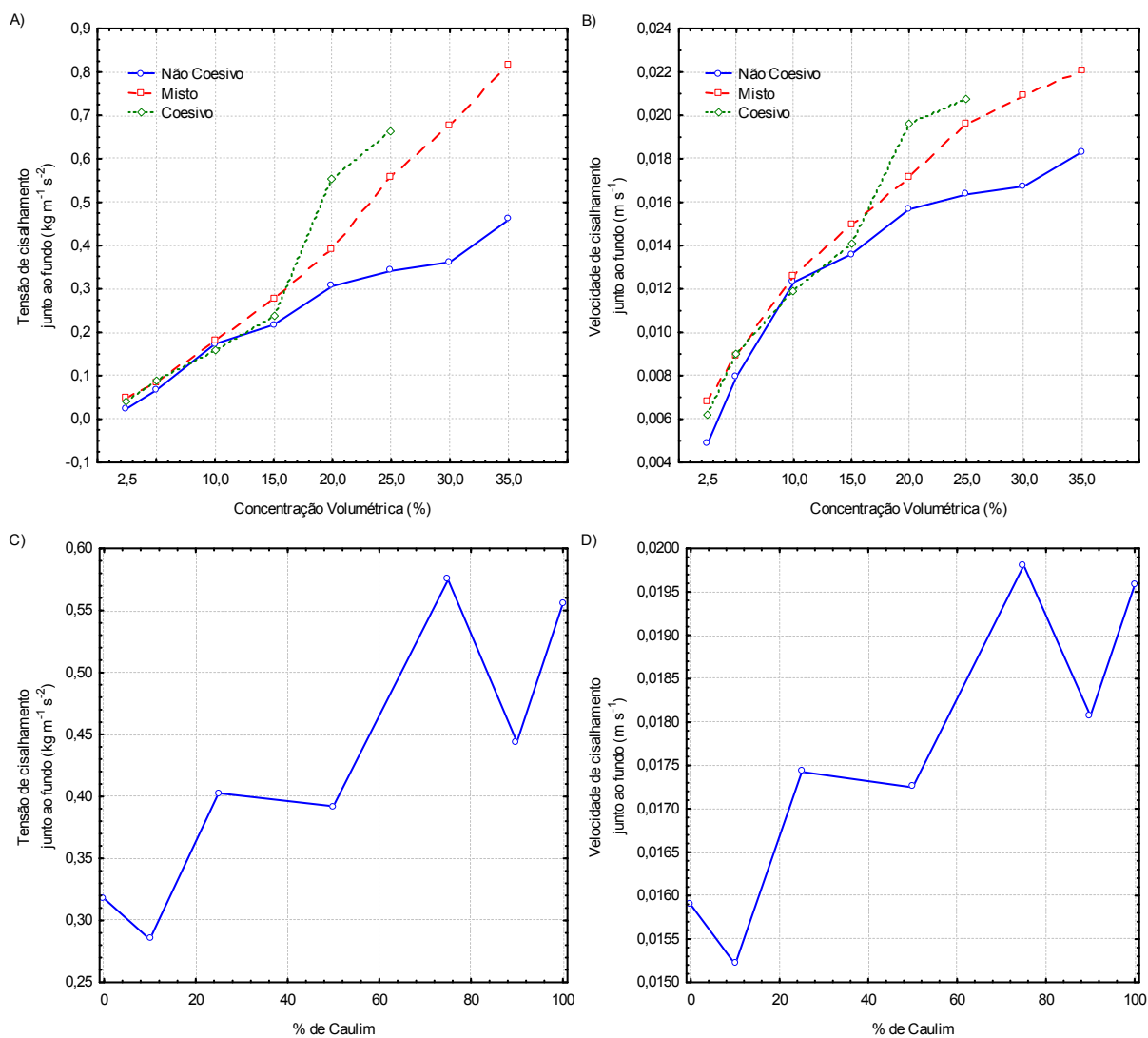


Figura 9.21 Relação entre a tensão de cisalhamento (a e c) e pela velocidade de cisalhamento (b e d) e a concentração volumétrica e/ou presença de argila calculado pelo método apresentado em Michon et al, 1955.

Pelas figuras 9.21a e 9.21b, verifica-se que há uma tendência bem definida nos quatro grupos de ensaios. Considerando que esse método considera apenas a componente paralela da gravidade reduzida junto ao fundo, ele deve ter levado em conta o aumento da concentração quando a camada lamosa estava presente, o que incrementa o valor da tensão cisalhante com o incremento da concentração inicial.

No grupo transição (figuras 9.21c e 9.21d), há um leve incremento linear da tensão de cisalhamento com o incremento da argila.

9.5.2 Método de Clauser

Num segundo momento, foi adaptado o método desenvolvido por Clauser (1954) para água limpa para determinar a tensão de cisalhamento junto ao fundo nas correntes de densidade. Neste método, a lei da parede para o perfil de velocidades é rearranjada para:

$$\frac{u}{U_m} = \lambda \left[2,5 \cdot \ln \frac{z \cdot U_m}{\nu} \cdot \lambda + 6,25 \right] \quad (9.38)$$

Onde:

$$\lambda = \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (9.39)$$

$$C_f = 2 \cdot \left(\frac{u^*}{U_m} \right)^2 \quad (9.40)$$

u = velocidade da corrente no ponto (m/s)

U_m = velocidade máxima (m/s)

C_f = coeficiente de perda de carga

z = distância ao fundo (cm)

u^* = velocidade de cisalhamento (m/s)

ν = viscosidade cinemática (m²/s)

O método utiliza a velocidade adimensionalizada pela velocidade máxima e a distância à parede adimensionalizada pela velocidade máxima e viscosidade cinemática. São arbitrados diferentes valores de C_f e calculados os perfis, sendo determinados, a sentimento, os pontos dos dados medidos que se enquadram dentro do intervalo delimitado por duas curvas com diferentes valores de C_f . Desta forma, o valor de coeficiente de perda é determinado e, por conseguinte, com o uso da equação 9.40, a velocidade de cisalhamento junto ao fundo. A tabela 9.10 apresenta, para todos os grupos, os valores encontrados para a tensão de cisalhamento junto ao fundo e para a velocidade de cisalhamento das correntes.

Tabela 9.10 Valores da tensão de cisalhamento junto ao fundo e velocidade de cisalhamento – Método de Clauser.

C_{vol}	τ_B (Pa)			U^* (m/s)			Arg	τ_B	U^*
	NC	M	C	NC	M	C			
2,5	0,024	0,049	0,040	0,0049	0,0069	0,0062			
5	0,066	0,086	0,087	0,0079	0,0089	0,0090	100	0,556	0,0196
10	0,173	0,181	0,161	0,0123	0,0126	0,0119	90	0,444	0,0181
15	0,218	0,276	0,239	0,0136	0,0150	0,0142	75	0,575	0,0198
20	0,306	0,391	0,556	0,0157	0,0172	0,0196	50	0,392	0,0172
25	0,342	0,558	0,662	0,0164	0,0196	0,0208	25	0,403	0,0174
30	0,362	0,678		0,0167	0,0209		10	0,285	0,0152
35	0,460	0,815		0,0183	0,0222		0	0,318	0,0159

A figura 9.22 apresenta a variação da tensão de cisalhamento e da velocidade de cisalhamento em função da concentração volumétrica inicial para os três grupos ensaiados.

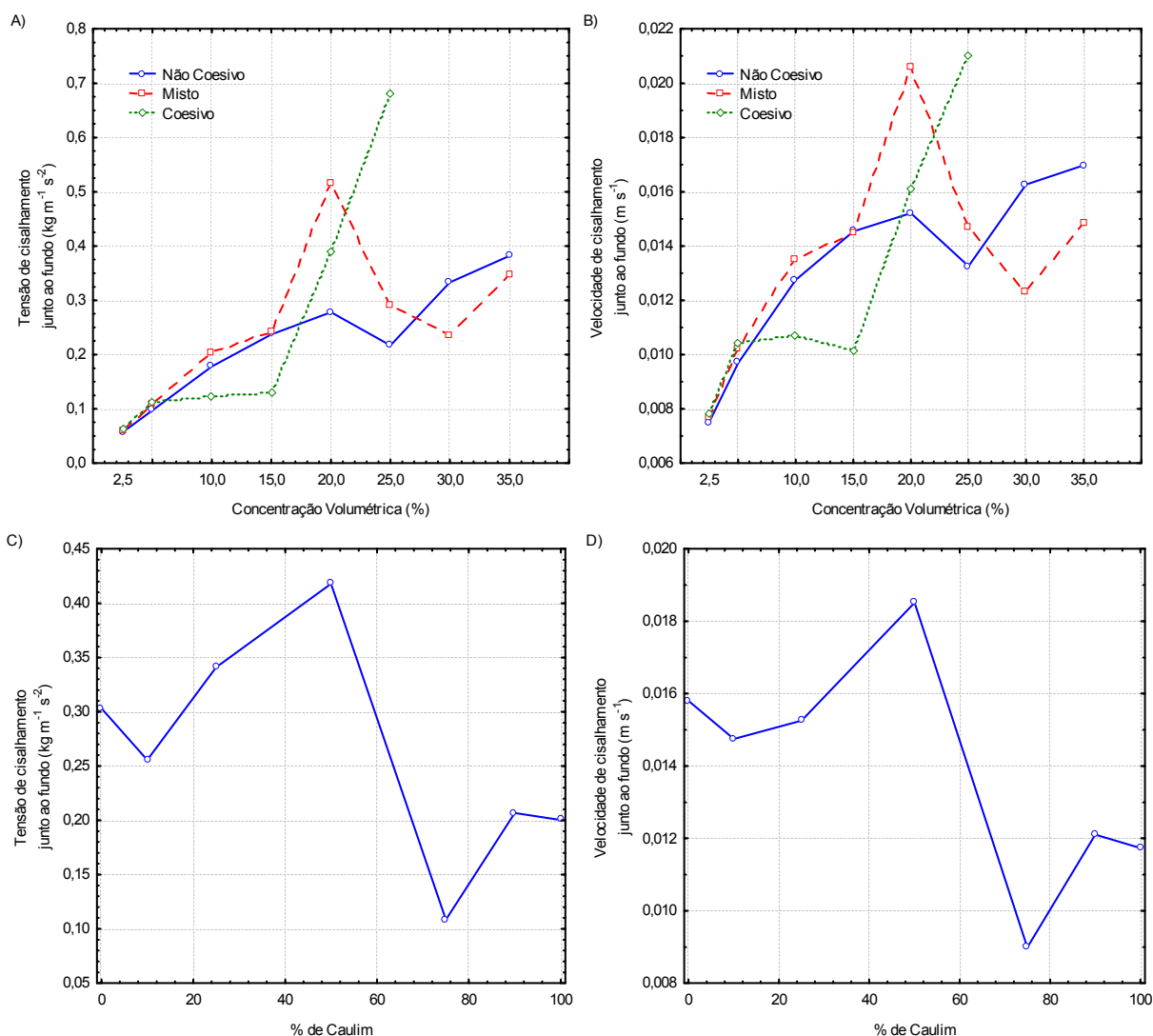


Figura 9.22 Relação entre a tensão de cisalhamento (a e c) e a velocidade de cisalhamento (b e d), calculadas pelo método de Clauser (1954), com a concentração volumétrica e/ou presença de argila

Pela figura 9.22, nota-se que tanto a tensão de cisalhamento junto ao fundo quanto a velocidade de cisalhamento médias são incrementadas com o aumento da concentração inicial. No grupo misto, o experimento M_20 parece ficar um pouco acima da tendência, porém, como foi realizada apenas uma repetição, o valor pode ser considerado uma variabilidade do ensaio. O mesmo ocorre para o valor NC_25, que está levemente abaixo da tendência.

Nota-se que o método de Clauser, quando aplicado para correntes de turbidez, mostrou, para os três grupos, um incremento de valor com a concentração inicial, entretanto, com um patamar para o grupo misto e coesivo em torno dos 10 % e seguido de um novo crescimento. Foi verificado também, uma alteração nos valores de mais alta densidade para o grupo misto (não considerando o ensaio M_20) e o grupo coesivo. Essa alteração nos valores ocorreu justamente na região na qual a camada lamosa se fez presente, o que pode implicar que o método não seja válido para essa condição. Já para o grupo não coesivo, os valores foram mais constantes.

No grupo transição, o que pode ser observado, novamente, é a diferença de comportamento para a tensão de cisalhamento entre as correntes com presença de argila predominantemente não-coesivas (inferior a 50% de argila) e as correntes predominantemente coesivas. Pelo método de Clauser, nota-se que claramente há uma diferenciação nos valores, sendo os valores encontrados menores que os valores para fluxos com menos presença de argila.

9.5.3 Comparação dos métodos

A figura 9.23 apresenta a comparação entre os dois métodos utilizados para estimativa da tensão de cisalhamento e da velocidade de cisalhamento para os quatro grupos de ensaios.

Pela análise da figura 9.23, pode ser verificado que os dois métodos apresentam resultados mais próximos quando as correntes são de mais baixa concentração, tanto em tendência quanto em valores absolutos. Já para as correntes de mais alta concentração, a diferença entre ambos os métodos é verificada, principalmente, nos ensaios com a presença de argila, enquanto que nos grupos com predominância de material não coesivo, as similaridades foram maiores. Isso é melhor comprovado no grupo transição, no qual há uma significativa diferença entre os valores para as correntes com maior presença de argila.

Breve discussão

A tensão de cisalhamento junto ao fundo foi definida por dois métodos para tentar caracterizar esse parâmetro que muito pouco é discutido nas correntes de turbidez. Desta

forma, utilizou-se o método apresentado por Michon et al (1955) e se propôs um método alternativo de análise, baseado na metodologia desenvolvida por Clauser (1954). Entretanto, o método de Clauser não se mostrou adequado para as correntes mais concentradas e com presença de argila, devido ao fato de que esse método parte da hipótese de lei logarítmica para o perfil de velocidades do escoamento e, para essas misturas, poucos dados foram medidos nessa região logarítmica (item 9.2). Ainda assim, os resultados apresentados pelas duas metodologias são razoavelmente próximos para as correntes sem a presença de argila.

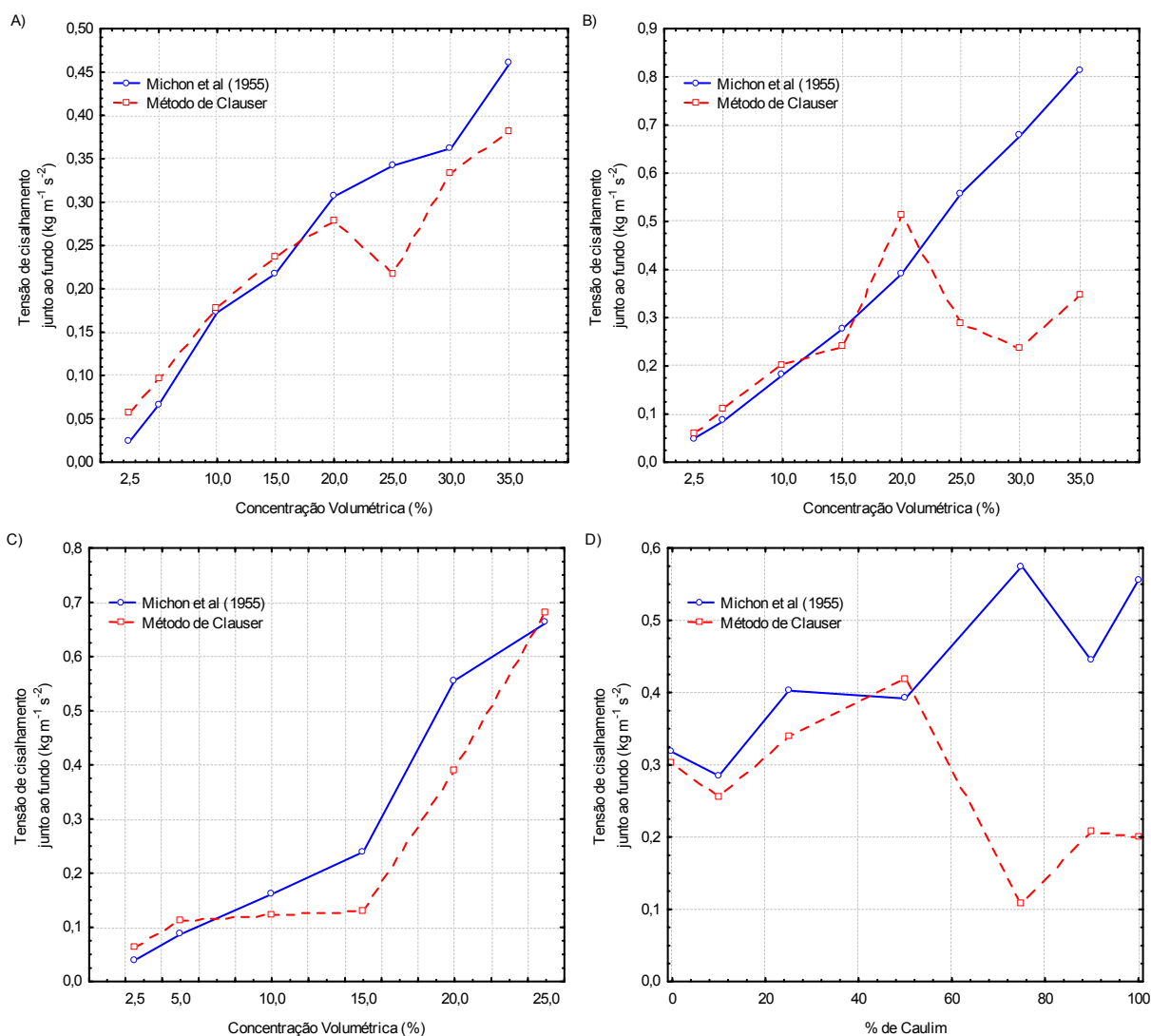


Figura 9.23 Comparação dos valores da tensão de cisalhamento calculados pelos métodos de Michon e de Clauser: a) Grupo não coesivo; b) Grupo misto; c) Grupo coesivo e d) Grupo transição.

9.6 PERFIL DE FLUXO DE SEDIMENTOS E CAPACIDADE DE TRANSPORTE DO FLUXO

O fluxo de sedimento reduzido representa a vazão mássica do sedimento que passa por unidade de largura ao longo do tempo, sendo importante para verificar o comportamento de

uma corrente de densidade em termos de sua conservação de massa. Neste trabalho foi possível avaliar esse parâmetro, uma vez que a concentração, a velocidade e a altura da corrente foram medidas. Foi utilizada então, a seguinte equação para estimar o fluxo de sedimentos por unidade de largura.

$$FS = g' \cdot C_{vol} \cdot \bar{h} \cdot \bar{U} \quad (9.41)$$

Onde:

\bar{U} = velocidade média da corrente (m/s)

C_{vol} = concentração volumétrica média (%)

g' = gravidade reduzida (m/s²)

\bar{h} = altura média da corrente, camada de mistura (m)

FS = fluxo de sedimentos por unidade de largura (m³/s³)

Como pode ser observado, a unidade (m³/s³) resultante do fluxo de sedimentos não é usual. Desta maneira, pode-se multiplicar a equação 9.41 pela massa específica do material empregado, obtendo-se assim, a vazão mássica de material por unidade de largura, que é representada por N.m⁻¹.s⁻¹, amplamente utilizada nos estudos de Mecânica Fluvial. Nesse trabalho, como o valor da massa específica do material empregado era praticamente a mesma (~ 2600 kg/m³), essa multiplicação não foi realizada, ficando o resultado expresso em fluxo de sedimentos.

A partir dos valores das séries temporais da velocidade e de concentração, além dos valores da altura total da corrente, foi possível estabelecer o perfil vertical do fluxo de sedimentos para as correntes de turbidez ensaiadas e, a partir delas, comparar o aumento da concentração volumétrica. Esses perfis foram ainda adimensionalizados, respectivamente, pela altura da camada de mistura máxima e pelo fluxo de sedimento máximo, cujos resultados serão analisados para cada grupo separadamente.

9.6.1 Grupo não coesivo

A figura 9.24a apresenta o perfil de fluxo de sedimentos para as correntes do grupo não coesivo. A partir destes resultados podem ser identificados dois tipos de comportamentos da forma dos perfis com relação ao incremento da concentração. Nos ensaios de mais baixa densidade (NC_2, NC_5, NC_10 e NC_20), foi verificado um fluxo de sedimentos mais concentrado junto ao fundo, com a predominância do escoamento nesta região, criando uma leve estratificação no seu interior. A partir do ensaio NC_20, essa estratificação se intensifica para alturas maiores, criando uma frente de onda mais espessa com maior carga de

sedimentos. A análise do perfil adimensionalizado (figura 9.24b) comprova os dois tipos de comportamentos acima descritos.

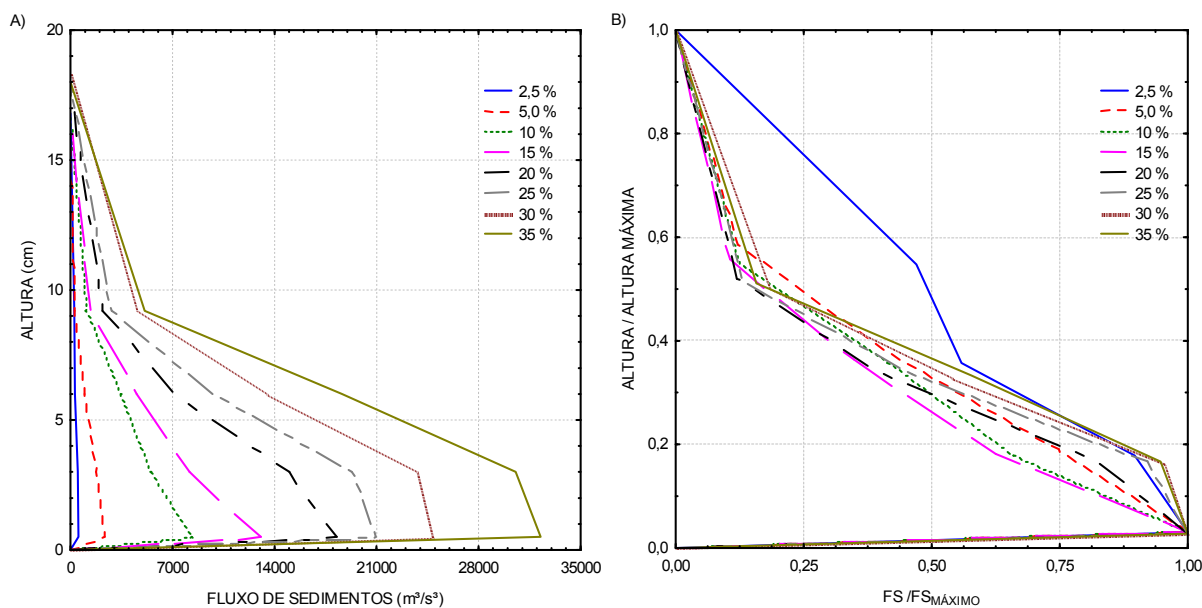


Figura 9.24 Perfis de fluxo de sedimentos verticais médios do grupo não coesivo: a) Valores absolutos e b) Valores adimensionalizados pelo valor máximo.

9.6.2 Grupo misto

A figura 9.25a apresenta os perfis de fluxo de sedimento para as correntes do grupo misto.

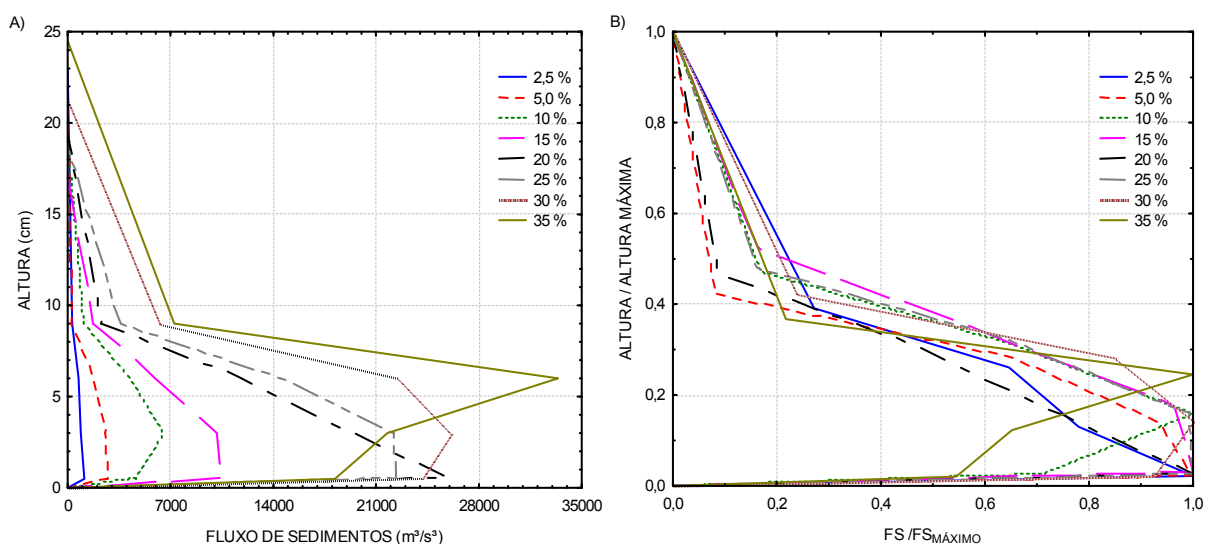


Figura 9.25 Perfis de fluxo de sedimentos verticais médios do grupo misto: a) Valores absolutos e b) Valores adimensionalizados pelo valor máximo.

Nas curvas são verificados que há maiores valores de fluxo de sedimentos junto ao fundo, o qual vai ficando cada vez mais espesso à medida que a concentração vai aumentando. Já no ensaio M_30, se nota um perfil bem estratificado, com um grande fluxo de sedimentos junto ao fundo e com valores mais baixos acima. Já no ensaio M_35, a influência da camada

lamosa se fez presente, reduzindo os valores de velocidade junto ao fundo e com o aumento do fluxo de sedimento numa região mais acima (corrente diluída sobre esse fundo móvel).

9.6.3 Grupo coesivo

A figura 9.26 apresenta os perfis de fluxo de sedimentos para o grupo coesivo.

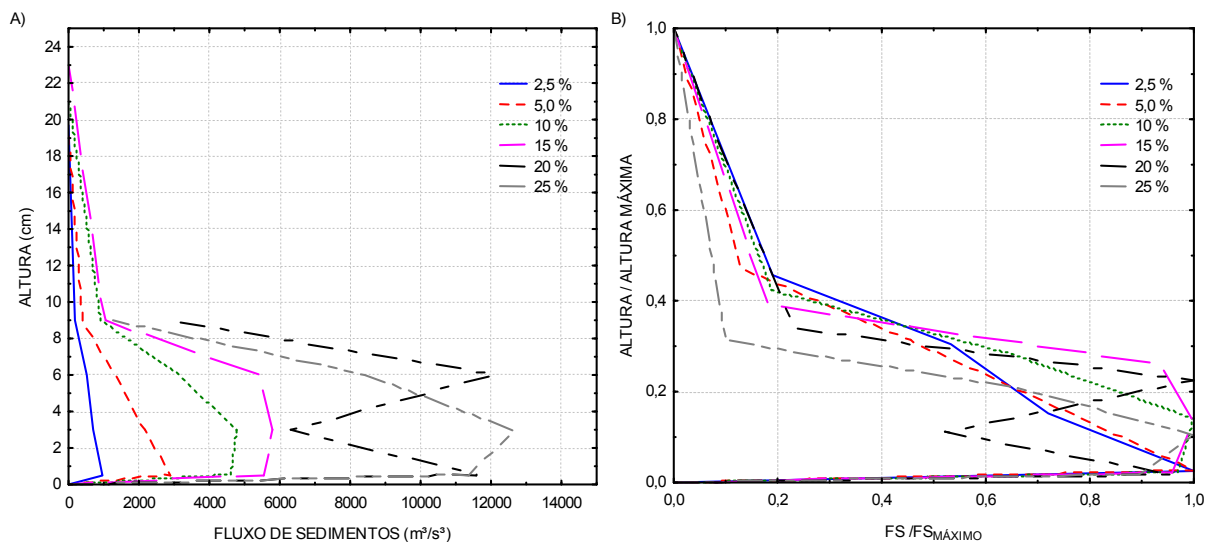


Figura 9.26 Perfis de fluxo de sedimentos verticais médios do grupo coesivo: a) Valores absolutos e b) Valores adimensionalizados pelo valor máximo.

Pela figura 9.26, nota-se que o comportamento é similar ao do grupo misto, entretanto, para a última fase, nota-se que há uma nova forma de perfil (com um dente no meio), que pode ser explicada pela variação da concentração e da velocidade descritas no item 9.3.

9.6.4 Grupo transição

A figura 9.27 apresenta os perfis de fluxo de sedimentos para o grupo transição.

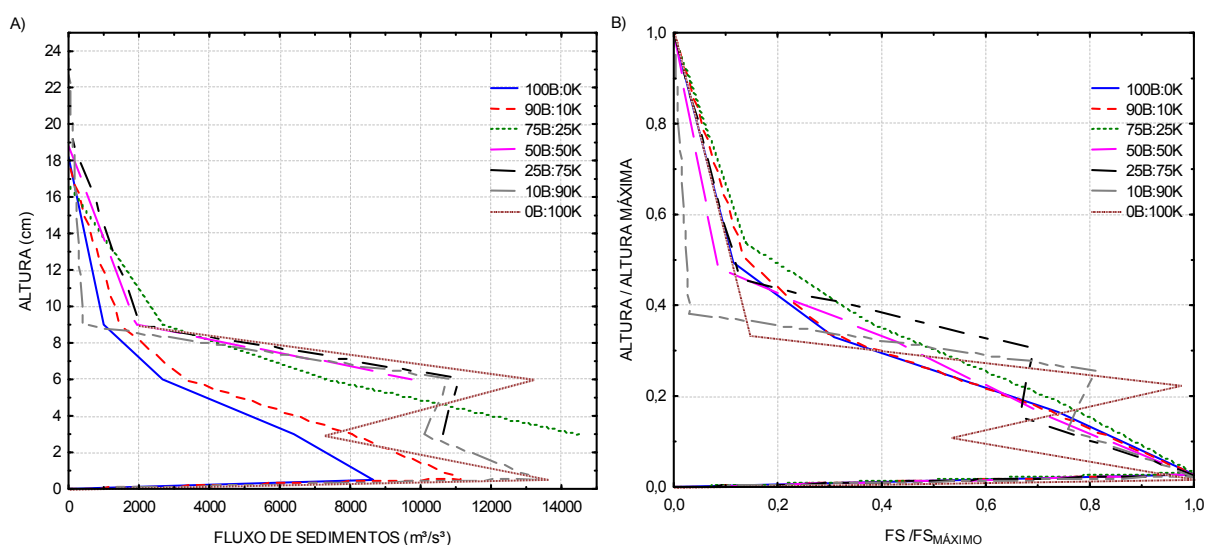


Figura 9.27 Perfis de fluxo de sedimentos verticais médios do grupo transição: a) Valores absolutos e b) Valores adimensionalizados pelo valor máximo.

Pela análise da figura 9.27, foi verificada uma nítida mudança entre o comportamento das correntes não coesivas e o das correntes coesivas. O aumento da presença de argila nas misturas causou a formação de um perfil estratificado, com a tendência da formação de um “dente” em alturas medianas (causadas pela formação da zona de “plug” de sedimentos).

Breve discussão

A análise do fluxo de sedimentos apresentou, desde os ensaios do grupo não coesivo até os ensaios do grupo coesivo, uma transição de comportamento que foi sendo função do aumento da concentração e da presença de argila na mistura. Essa transição começou com um fluxo de sedimentos mais distribuído ao longo da vertical, passando pelo início da criação de uma zona estratificada junto ao fundo com maior quantidade de material presente. Essa zona estratificada novamente muda, ficando mais encorpada (espessa) e escoando praticamente como uma frente de onda e, por fim, foi verificada a influência tanto da camada lamosa, a qual fez aumentar o fluxo e a quantidade de massa junto à zona de velocidade máxima (acima da camada), bem como dos efeitos do escoamento junto à parede, no caso o fundo.

10 CONDICIONANTES DEPOSICIONAIS

Neste capítulo serão abordados os aspectos deposicionais gerados nos experimentos, começando por uma descrição qualitativa, seguido de uma análise dos parâmetros macroscópicos do depósito e, por fim, pela análise das imagens microscópicas com a obtenção de outros parâmetros deposicionais.

Nos experimentos, a análise das características deposicionais ao longo do canal foi realizada até a distância de 320 cm da comporta. Após esse ponto, os valores foram desconsiderados, devido a alterações causadas pela presença intrusiva dos equipamentos de medição de velocidade e de concentração, os quais perturbavam o depósito gerado.

10.1 DESCRIÇÃO QUALITATIVA DOS DEPÓSITOS BASEADO NOS VÍDEOS.

Neste primeiro momento, será apresentada uma descrição qualitativa da formação dos depósitos gerados nos experimentos para todos os grupos ensaiados, seguindo a mesma metodologia empregada na descrição dos processos dinâmicos. Para tanto, os vídeos gerados foram analisados, permitindo extrair informações quanto ao processo de deposição dos grãos ao longo do tempo. Utilizou-se, para esta análise, as imagens geradas pela segunda câmera de vídeo, instalada a 300 cm da comporta. Em alguns ensaios, uma leve turbidez da água, oriunda da dificuldade de limpeza do tanque, alterou a qualidade do vídeo, e, por consequência, suas análises.

Pela análise dos vídeos dos ensaios do grupo não coesivo foi possível identificar dois processos de deposição distintos ao longo do tempo (figura 10.1). Para as correntes de mais baixa concentração, neste caso até o ensaio NC_15, à medida que a corrente foi passando pelo local de observação, um depósito delgado de grãos foi se formando e se acumulando ao longo do tempo. Foi verificado, também, que uma camada de grãos mais concentrada junto ao fundo foi se formando (altura da camada interna – item 6.5.3), após alguns segundos da passagem da cabeça do fluxo e que, posteriormente, se depositou gradualmente com a passagem do corpo e da cauda do fluxo.

Já para as correntes de mais alta concentração ($C_{vol} > NC_{15}$), houve uma diferenciação no processo de deposição. Nestes experimentos, não houve a deposição nos instantes iniciais da corrente, porém, a camada interna estratificada junto ao fundo, nitidamente visualizada ao longo do tempo, foi se concentrando junto ao fundo e, gradativamente, diminuindo sua espessura até que praticamente toda a sua massa sedimentasse quase que instantaneamente, formando depósitos mais espessos. Sobre essa

camada recém depositada, a cauda da corrente continua fluindo, causando uma delgada deposição, por gravidade, sobre o depósito formado.

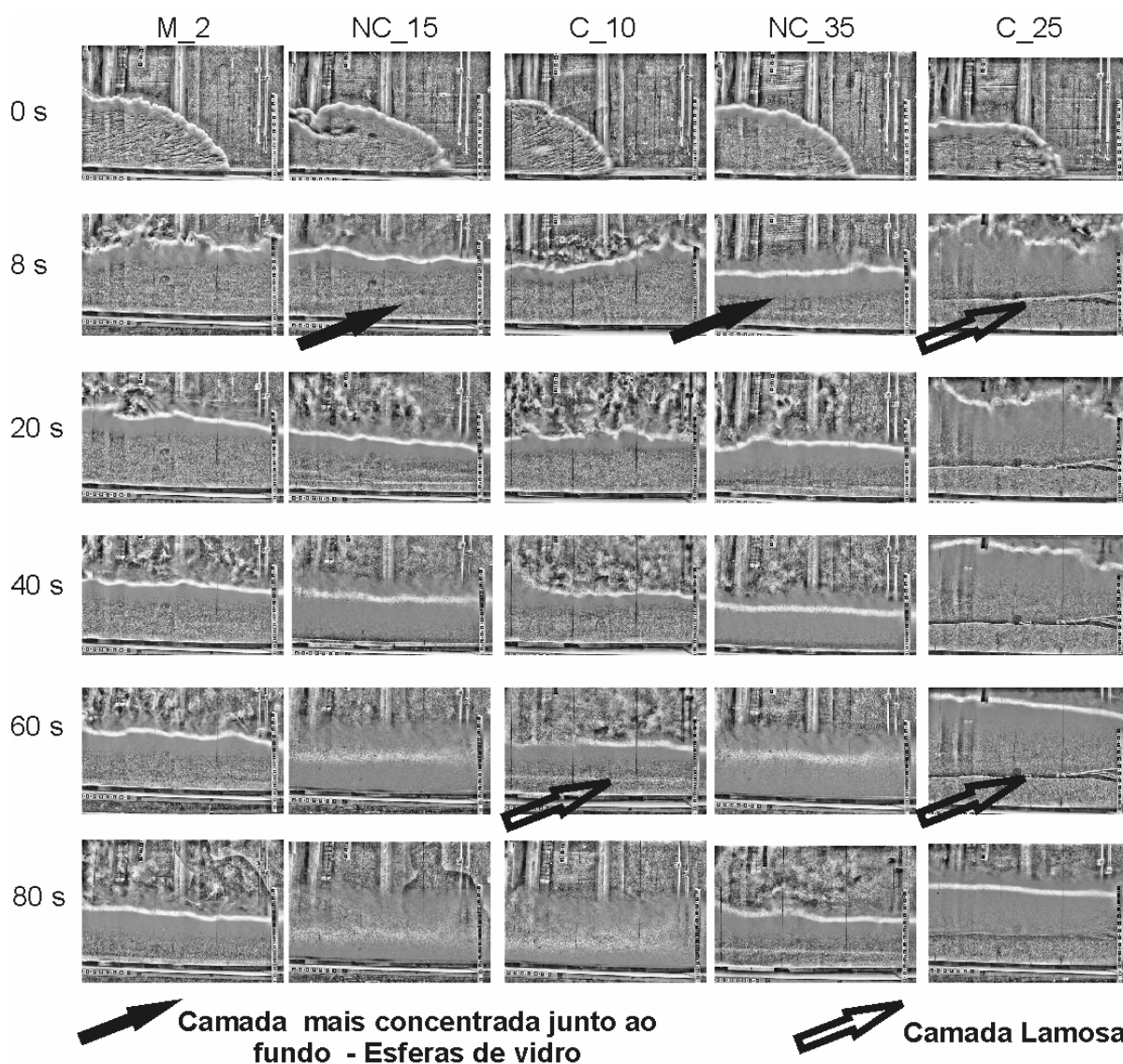


Figura 10.1 Mosaico de imagens da simulação em diferentes instantes do ensaio, destacando as camadas mais concentradas junto ao fundo.

Para os grupos misto e coesivo, os processos deposicionais, verificados pela análise de vídeo, apresentaram alguns pontos em comum com o grupo não coesivo. Para as correntes de mais baixa concentração ($C_{vol} < 5\%$), o processo de deposição por gravidade dos grãos foi verificado novamente, especialmente para o ensaio M_2, enquanto que, para os outros ensaios, a presença da argila dificultou a visualização da formação destas camadas junto ao fundo (início da deposição). Nos ensaios com mais alta concentração ($C_{vol} > 5\%$), foi identificada a camada interna estratificada (camada lamosa) mais espessa, a qual se desenvolveu logo após a passagem da cabeça, sendo responsável pela deposição, praticamente instantânea, do material lamoso (grãos não coesivos e coesivos). Sobre essa camada lamosa,

foi identificado que uma corrente mais diluída continuava a fluir nos momentos finais do escoamento.

Para o grupo transição, foram identificados dois processos distintos, à medida que a presença de argila na mistura foi aumentando. Para as correntes com até 50% de argila na mistura, foi verificado o mesmo processo deposicional que ocorreu para as correntes de mais alta concentração do grupo não coesivo, ou seja, com a presença de uma camada interna de grãos, visualmente nítida, que se depositou praticamente em massa após a passagem do corpo da corrente. Já para os ensaios com as misturas mais coesivas ($Arg > 50\%$), foi verificado o mesmo processo do grupo misto e coesivo, nos quais a chegada de uma camada lamosa que se deposita instantaneamente, forma um fundo móvel para a corrente que se desenvolve acima dela.

Em todos os ensaios, após seu término, os grãos presentes em suspensão decantaram naturalmente até o esvaziamento do tanque. Contudo, esse processo ocorreu mais rapidamente para os grãos não coesivos do que para os grãos coesivos devido à diferença na velocidade de queda dos grãos.

Breve discussão

Com a análise qualitativa baseada somente nos vídeos gerados nos experimentos, conclui-se que dois diferentes processos de deposição ocorrem à medida que aumenta a concentração da mistura e/ou porcentagem de argila presente na mistura.

O primeiro processo está associado à desaceleração do fluxo, à deposição dos grãos por gravidade e à pouca capacidade de transporte das correntes de mais baixa concentração. Esse aspecto foi melhor visualizado nas correntes não-coesivas, uma vez que a formação do depósito foi acompanhada instante a instante.

O segundo processo está associado à presença de uma camada de grãos mais concentrada junto ao fundo, a qual se formou ao longo do tempo do escoamento para todos os ensaios. Para as correntes de mais alta concentração, essa camada foi nítida e sua influência no processo dinâmico e deposicional mais efetiva. Neste caso, para as correntes não coesivas de mais alta concentração, o processo deposicional parece estar associado a um colapso dos grãos após atingir uma condição de falta de alimentação (fim da alimentação do fluxo) ou, ainda, pela saturação da camada mais concentrada junto ao fundo que provoca um depósito mais instantâneo. Já para as correntes com presença de argila, a formação da camada lamosa, previamente discutida nos capítulos 7, 8 e 9, indica que um comportamento dinâmico e reológico diferenciado é que causa a formação deste tipo de depósito.

Nos fluxos de mais alta concentração, foi verificado que a passagem do corpo e da cauda da corrente (fluxo secundário mais diluído) ocorria sobre o depósito previamente depositado. Nas análises que serão realizadas a seguir, esse fenômeno será melhor comentado.

Em todos os depósitos formados nos ensaios, a parcela de grãos mais finos decantou naturalmente formando uma delgada película de sedimento sobre o material depositado durante a passagem da corrente.

10.2 ANÁLISE MACROSCÓPICA DOS DEPÓSITOS

10.2.1 Formação do depósito ao longo do tempo – Taxa de deposição

Através das imagens geradas por vídeo, foi possível estabelecer, para alguns experimentos, a evolução da formação do depósito ao longo do tempo, quantificando sua espessura e determinando uma taxa de deposição dos grãos para cada grupo ensaiado. Nas simulações dos grupos, onde houve a predominância de material não coesivo (grupo não coesivo e transição), esse procedimento foi realizado para praticamente todos os ensaios, uma vez que a visualização interna da corrente foi facilitada, pois não havia a presença de argila. O mesmo não ocorreu para os grupos com presença de material argiloso, nos quais a turbidez da mistura dificultou a visualização do processo da formação do depósito. Desta forma, os resultados serão apresentados para cada grupo separadamente.

10.2.1.1 Grupo não coesivo

Discretizando as imagens de vídeo quadro-a-quadro, foi possível acompanhar a formação do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição), criando uma série temporal de deposição. Desta forma, pode-se quantificar as observações descritas no item anterior, bem como identificar e entender o processo deposicional para o grupo não coesivo. A figura 8.2 apresenta os resultados encontrados.

Pela análise da série temporal da variação da espessura do depósito foi possível identificar os dois processos de deposição descritos qualitativamente no item 10.1. Como pode ser observado na figura 10.2a, para o ensaio NC_2, a deposição ocorreu logo após a passagem da corrente, aumentando sua espessura gradativamente (linearmente) até o fim do ensaio (aproximadamente 80 segundos), com uma taxa praticamente constante. Já para o ensaio NC_5, houve alteração nessa taxa de deposição, ou seja, após a passagem da cabeça, houve um aumento mais significativo do depósito até os 40 segundos da passagem do fluxo, após isso, a taxa de deposição foi diminuindo, com a decantação ocorrendo na cauda da

corrente. Esse aumento significativo estava atrelado à camada de grãos junto ao fundo, a qual causou uma maior deposição de grãos num intervalo de tempo menor.

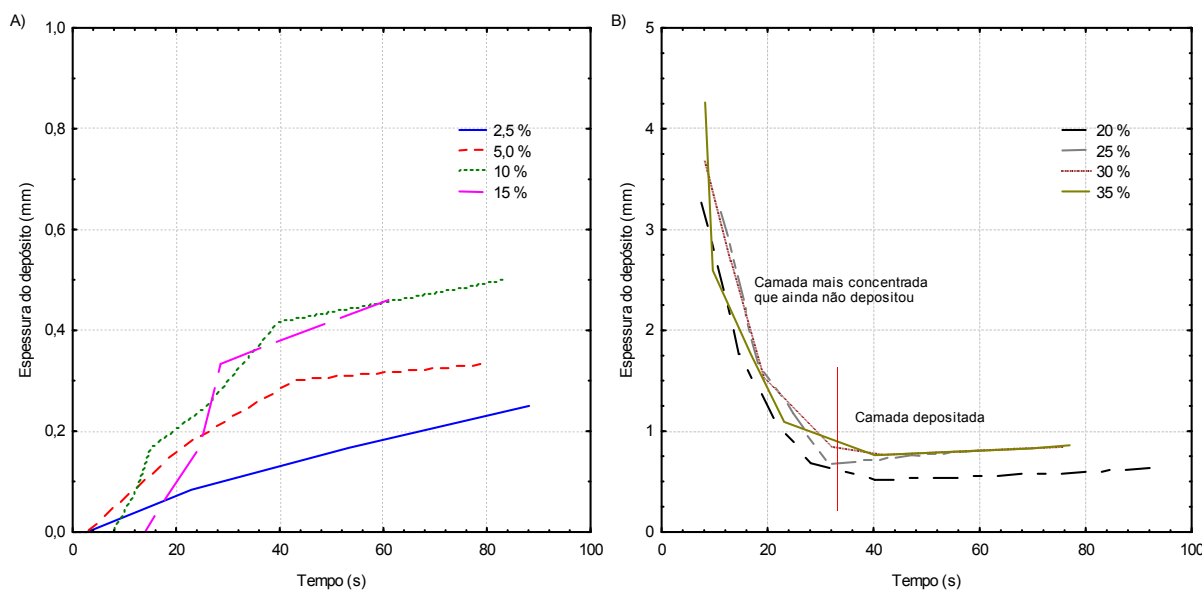


Figura 10.2 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) para os ensaios do grupo não coesivo: a) Concentração volumétrica de 2,5 até 15%; e b) Concentração volumétrica de 20 até 35%.

Para os ensaios NC_10 e NC_15, esse comportamento foi ampliado com uma zona de não-deposição no início do ensaio (até os 15 segundos iniciais), provocada pelas maiores velocidades das correntes, ou seja, quando da passagem da cabeça e do corpo da corrente. Após essa zona de não deposição, houve um aumento significativo da taxa de deposição, (expresso na figura 10.2 por uma mudança abrupta na inclinação da reta), seguido pela posterior deposição por suspensão, típica da cauda da corrente. Nesses casos, a presença da camada estratificada é notada com mais intensidade, sendo ela responsável por esse aumento da deposição dos grãos em menor tempo.

Para as correntes de mais alta concentração (maior que o ensaio NC_20), o processo deposicional é distinto, uma vez que a maior parte dos grãos suspensos não foi se formando gradualmente, pela deposição dos grãos ao longo do tempo, mas sim, de uma maneira mais rápida (abrupta deposição), após, aproximadamente, 40 segundos (figura 10.2b). Neste caso, a deposição dos grãos aconteceu pela diminuição gradativa da camada interna mais concentrada junto ao fundo, a qual foi se compactando, e que depositou grande parte dos grãos, praticamente, de maneira instantânea. O momento que esse processo ocorre é indicado na figura 10.2b pelo ponto de menor valor das curvas e, logo após isso, a deposição de grãos é resultante da parte da corrente que continuou escoando sobre esse depósito prévio.

10.2.1.2 Grupo misto

Para o grupo misto, a avaliação da taxa de deposição ao longo do tempo não foi realizada para todos os experimentos, visto que a presença de argila dificultava a visualização da criação do depósito. Ainda assim, foi possível determiná-la para os três ensaios com mais baixa concentração (até o ensaio M_10). A figura 10.3a apresenta os resultados destes três ensaios.

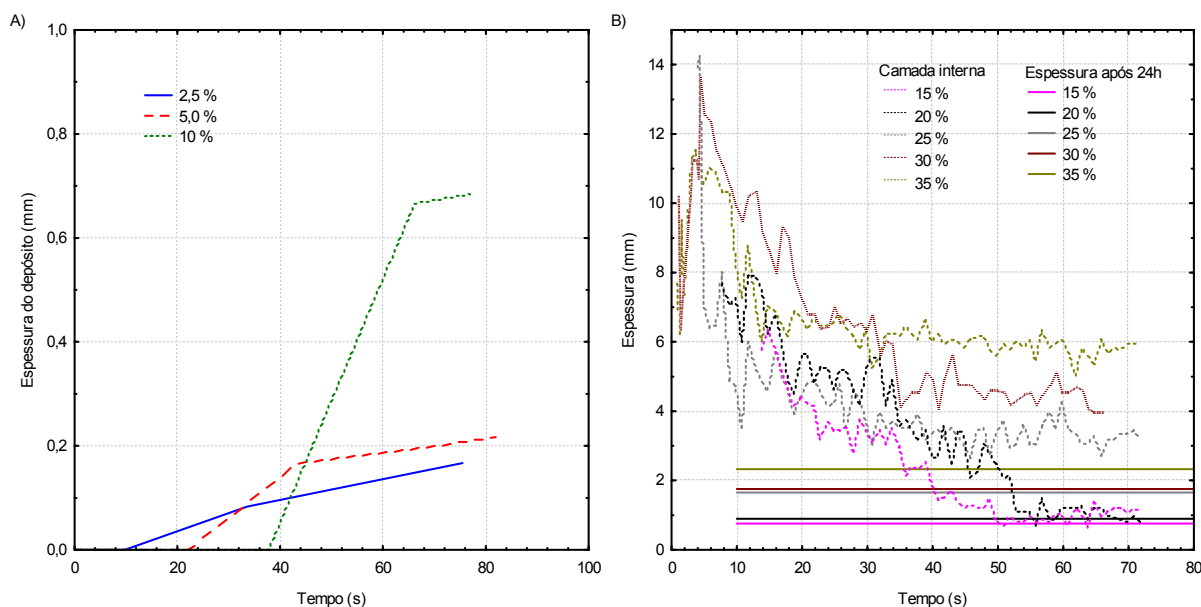


Figura 10.3 a) Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) para os ensaios do grupo misto (concentração volumétrica de 2,5 até 10%) e; b) Série temporal da altura da camada interna da corrente e a relação com a espessura final do depósito após 24h.

Pela análise da figura 10.3a foi, praticamente, possível identificar o mesmo comportamento visualizado para as correntes não-coesivas de mais baixa concentração. No ensaio M_2, o depósito começou a ser formado logo após a passagem da corrente e seguiu uma tendência quase linear de aumento de espessura. Já nos ensaios M_5 e M_10, o comportamento da taxa de deposição apresentava uma zona de não-deposição nos primeiros segundos (20 e 40 segundos, respectivamente) e, em seguida, um crescimento na taxa de deposição. Esse aumento mais rápido está associado à formação de uma camada mais concentrada junto ao fundo, identificada nos vídeos (item 10.1). Logo após isso, a espessura do depósito continuou a crescer, porém com uma taxa de deposição menor (região da cauda da corrente).

O comportamento das correntes de mais alta concentração não pode ser avaliado da mesma maneira, entretanto, algumas considerações podem ser realizadas com base no comportamento da espessura da camada interna estratificada (item 8.3 - geometria das correntes), que foi detectada e se desenvolveu ao longo da corrente.

Para estes ensaios de mais alta concentração, o processo deposicional visualizado foi a geração de uma camada lamosa junto ao fundo, a qual se formava e fluía após a passagem da cabeça do fluxo. Com a parada desta camada lamosa, os grãos presentes no interior da mesma também paravam e se depositavam instantaneamente, numa espécie de congelamento (depósito em massa) de grãos compostos por argila e grãos não coesivos (esferas de vidro). A figura 10.3b apresenta as medidas de espessura da camada interna estratificada (determinada com o método descrito no item 6.5.3), desde o seu início (pontilhado) até os valores finais (linha cheia) e ainda, a espessura final do depósito. Esse decréscimo dos valores até atingir um patamar em torno de um valor médio é a taxa de deposição do grupo misto para as mais altas concentrações.

10.2.1.3 Grupo coesivo

O grupo coesivo seguiu a mesma tendência do grupo misto, porém a visualização do incremento do depósito não pode ser realizada para nenhum ensaio. Assim, uma alternativa de análise deste grupo foi avaliar a série temporal da variação da espessura do depósito da camada interna estratificada para o grupo coesivo (figura 10.4), que apresenta o comportamento do fluxo e de depósito. Nesse caso, a figura apresenta os dados plotados da espessura da camada interna do escoamento ao longo do tempo, bem como os valores da espessura do depósito formado após 24 horas.

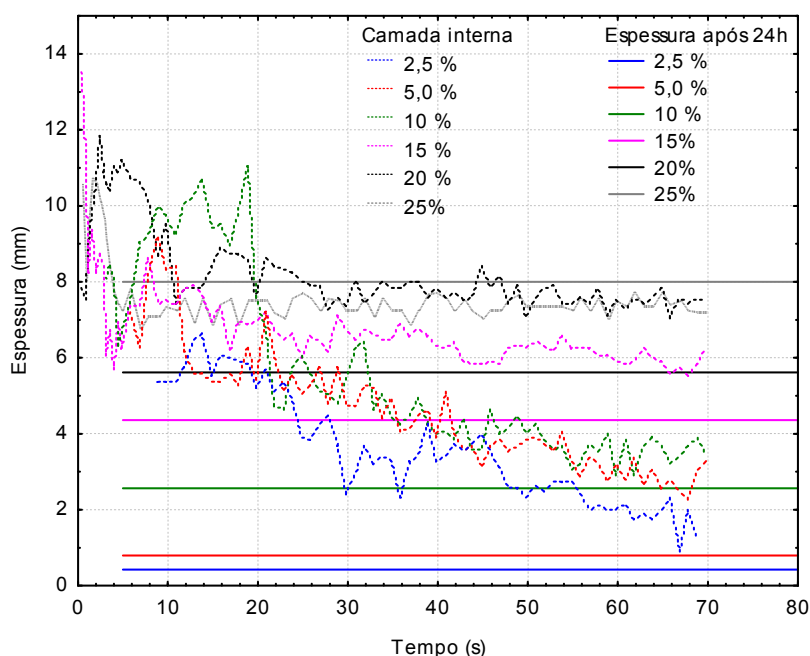


Figura 10.4 Série temporal da altura da camada interna da corrente e a relação com a espessura final do depósito após 24h para o grupo coesivo.

Para as mais baixas concentrações foi verificado que os ensaios C_2 e C_5, apesar de apresentarem uma camada mais concentrada junto ao fundo (em menor espessura),

depositaram uma quantidade de grãos muito pequena, o que gerou depósitos delgados de material, com difícil obtenção dos valores da taxa de deposição.

Para as correntes de mais alta concentração, foi identificada, novamente, a presença da camada lamosa, a qual se formava logo após a passagem da cabeça da corrente. Como pode ser observado na figura 10.4, os valores da espessura praticamente eram constantes após a passagem dos primeiros segundos (15 segundos), indicando que os processos deposicionais e dinâmicos destas correntes foram distintos daqueles do grupo não coesivo e misto. Essa estagnação, quase instantânea, da camada lamosa constitui um fundo móvel para receber o desenvolvimento de, praticamente, todo corpo e cauda da corrente sobre esse depósito lamoso, implicando num depósito final distinto.

10.2.1.4 Grupo transição

Nos ensaios do grupo transição só foi possível estabelecer a série temporal do depósito para as correntes de concentração com predomínio de material não coesivo (quantidade de argila menor que 50%). A figura 10.5 apresenta esses resultados.

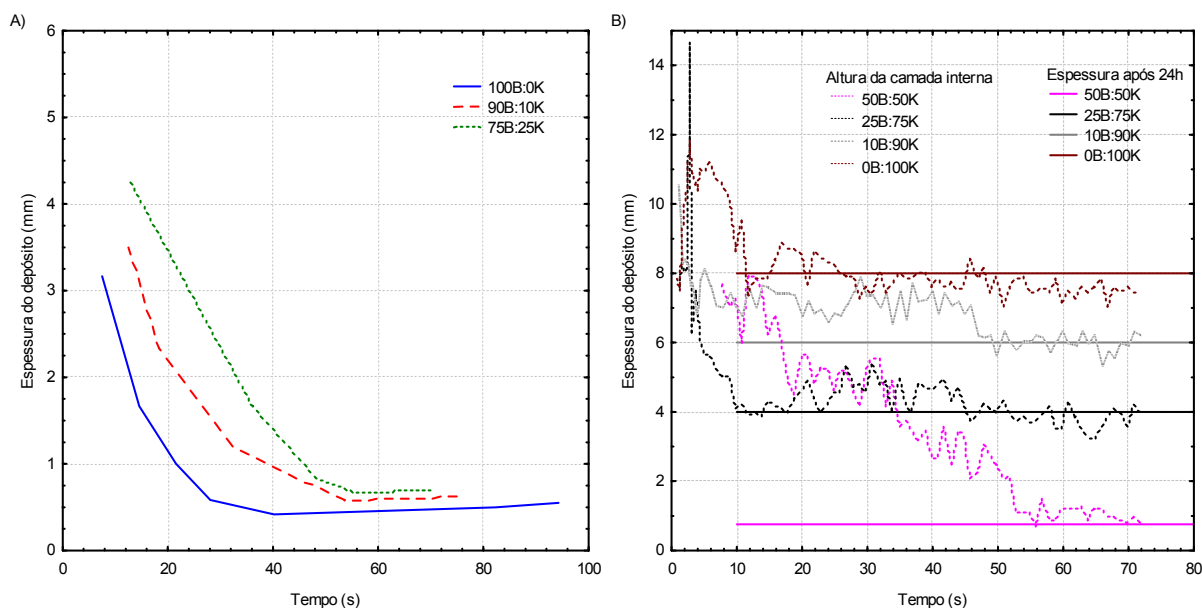


Figura 10.5 a) Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) para os ensaios do grupo transição (presença de argila até 25%) e; b) Série temporal da altura da camada interna da corrente e a relação com a espessura final do depósito após 24h.

Pela análise da figura 10.5, novamente pode ser visto um comportamento muito similar ao das correntes mais concentradas do grupo não coesivo, pelo qual o depósito se cria a partir de uma deposição em massa da carga mais concentrada junto ao fundo e seguida pela deposição do material mais fino no topo deste depósito. Essa tendência seguiu um comportamento de incremento da espessura do depósito, à medida que a presença de argila foi aumentando na mistura.

Para as correntes do grupo transição, com presença de argila maior que 50%, o comportamento apresentado foi similar ao do grupo misto e ao do grupo coesivo com concentração elevada, ficando evidenciada, novamente, a presença da camada lamosa que causou o depósito da maior parte do material presente na corrente. Apenas para o ensaio 50B:50K, a altura da camada interna não foi constante ao longo de todo o tempo, indicando um decréscimo. Tal resultado indica que, próximo a esse valor de porcentagem de argila, pode estar situado o limite que causa a mudança de comportamento, alterando o processo deposicional da corrente.

Comparando os valores determinados pela análise dos vídeos com o valor da camada interna estratificada determinada pelo item 6.5.3, os valores foram próximos, validando o uso desse parâmetro para estimar a taxa de variação da espessura do depósito.

Breve discussão

A avaliação da taxa de deposição para os grupos de ensaios baseada na quantificação do depósito ao longo do tempo apresentou que esse parâmetro está fortemente influenciado pelas propriedades do fluxo, no caso a composição da mistura e a concentração volumétrica inicial, as quais conduziram a condições dinâmicas e deposicionais diferenciadas.

Pelos resultados, foi verificado que a taxa de deposição apresentou dois comportamentos distintos, contudo na proximidade da mudança, deve ser investigada uma transição entre as correntes de mais baixa concentração e as correntes de mais alta concentração (grupo não coesivo). Além disso, há uma outra transição que se estabelece entre as correntes não coesivas e as correntes coesivas.

Para as correntes de mais baixa concentração, foi verificado que a deposição inicia logo após a passagem da corrente, seguindo um modelo mais clássico de deposição por suspensão devido a desaceleração. Também, foi verificada uma zona de não deposição, a qual foi aumentando com o aumento da concentração.

10.2.2 Variação longitudinal do depósito – Espessura do depósito final após 24 horas.

A espessura do depósito final foi medida utilizando a metodologia descrita no capítulo 6.5.4 e empregando as imagens registradas vinte e quatro horas após o ensaio. Assim, os valores apresentados não representam o depósito completamente seco, uma vez que não era possível drenar toda a água em tempo hábil. Nos depósitos com presença de argila, a quantidade de água no seu interior era maior, o que gerou valores mais significativos de

espessura, enquanto que para os depósitos não coesivos, a drenagem era um pouco mais eficiente, pois o meio era mais poroso. Assim, os valores de espessura determinados para os depósitos não coesivos estão mais próximos da espessura real do depósito. A quantificação dessa água no interior dos depósitos será apresentada no próximo item.

A figura 10.6 apresenta os valores medidos de espessura do depósito ao longo do canal para os quatro grupos ensaiados. Os valores estão divididos em intervalos de 40 cm, desde a origem (comporta) até o ponto onde foram colocadas as sondas de medição de velocidade e concentração (340 cm). Após esse ponto, os valores foram desconsiderados devido à influência intrusiva destes equipamentos.

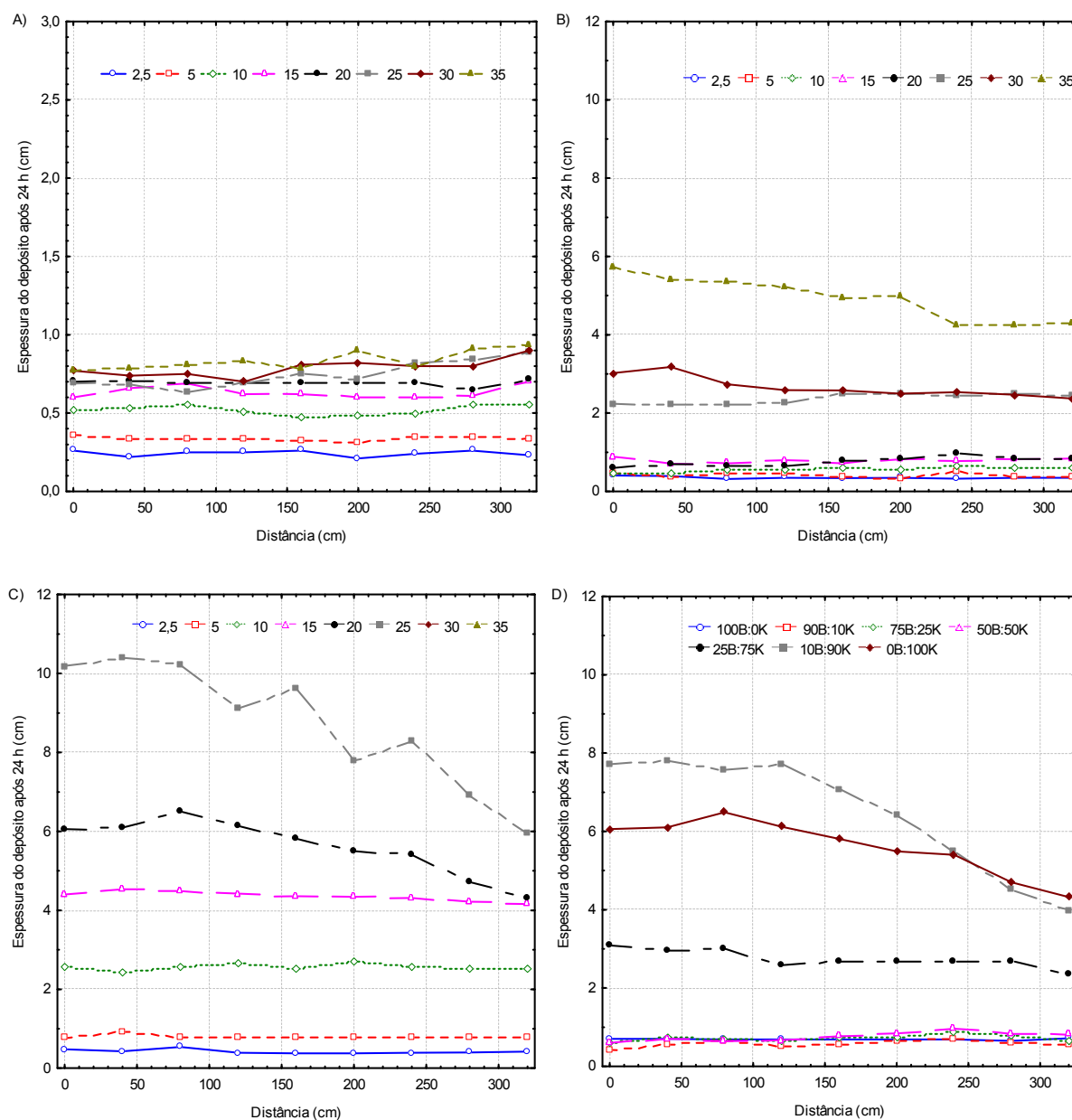


Figura 10.6 Resultado da espessura dos depósitos após 24h ao longo da distância para os quatro grupos simulados: a) Não coesivo; b) Misto; c) Coesivo e; d) Transição

Como pode ser visualizado na figura 10.6, para a maioria dos ensaios simulados, a espessura ao longo da distância foi praticamente constante sem uma variação significativa nos valores. Apenas para alguns ensaios com presença de material coesivo (grupos misto, coesivo e transição) foram verificadas pequenas variações ao longo da distância, com um decréscimo gradual à medida que a corrente atingiu as porções mais à jusante do canal. Nesses casos específicos, a variação de espessuras se deu nos ensaios com correntes mais concentradas, as quais desenvolveram a camada lamosa durante o fluxo. Na realidade, essa camada lamosa, apesar de apresentar uma aparência externa maciça, retinha muita água no seu interior, caracterizando um depósito inconsolidado (*soft deposit*), que se desmanchava após o manuseio. Assim, a água no interior desse depósito, nas zonas mais à montante, provocava esse aumento na espessura, enquanto que, nas zonas mais à jusante, parte dessa água intersticial era drenada com a água do tanque, provocando a diminuição dos valores de espessura.

Em termos de valores absolutos de espessura, foi verificado que o grupo não coesivo apresentou os valores mais baixos, sendo todos os depósitos finais menores que 1 cm. Já para os grupos mistos e coesivos foram identificados dois comportamentos distintos. Para as correntes de mais baixa concentração, as espessuras encontradas nos dois grupos foram muito pequenas (< 1 cm), indicando que os processos envolvidos na deposição foram muito similares aos do grupo não coesivo. Esse comportamento ocorreu para ensaios do grupo misto (até o ensaio M_20) e do grupo coesivo (até o ensaio C_5). Já para concentrações maiores que esses valores, foi verificado um acréscimo significativo da espessura, principalmente devido à formação da camada lamosa ao longo do escoamento.

O mesmo procedimento ocorre para o grupo transição, no qual a presença de argila, em teor menor que 50%, apresenta espessuras muito pequenas e, acima deste valor, a espessura aumenta significativamente.

A figura 10.7 apresenta a relação entre os valores médios de espessura e a concentração volumétrica para cada grupo simulado evidenciando os dois tipos de comportamentos descritos acima.

Pela figura 10.7, nota-se que a espessura do depósito é diretamente proporcional à concentração volumétrica, demonstrando que a maior presença de material granular na mistura acarreta nesse aumento de espessura. No grupo não coesivo, a variação da espessura com a concentração volumétrica é bem gradual e segue um modelo tipo logarítmico, ou seja, com uma variação relativa alta para as concentrações iniciais, mas tendendo a um valor limite. O mesmo ocorre para o grupo misto até o ensaio M_20, no qual foi claramente identificada a mesma tendência do grupo não coesivo. Já para os valores acima de M_20, há uma mudança

brusca na tendência, tornando-a praticamente linear, com um alto coeficiente angular. No grupo coesivo, esse processo ocorre a partir da espessura do ensaio C_5, com uma relação linear brusca que apresenta uma tendência de comportamento muito próxima à parte mais concentrada do grupo misto, indicando as similaridades entre os comportamentos dos grupos.

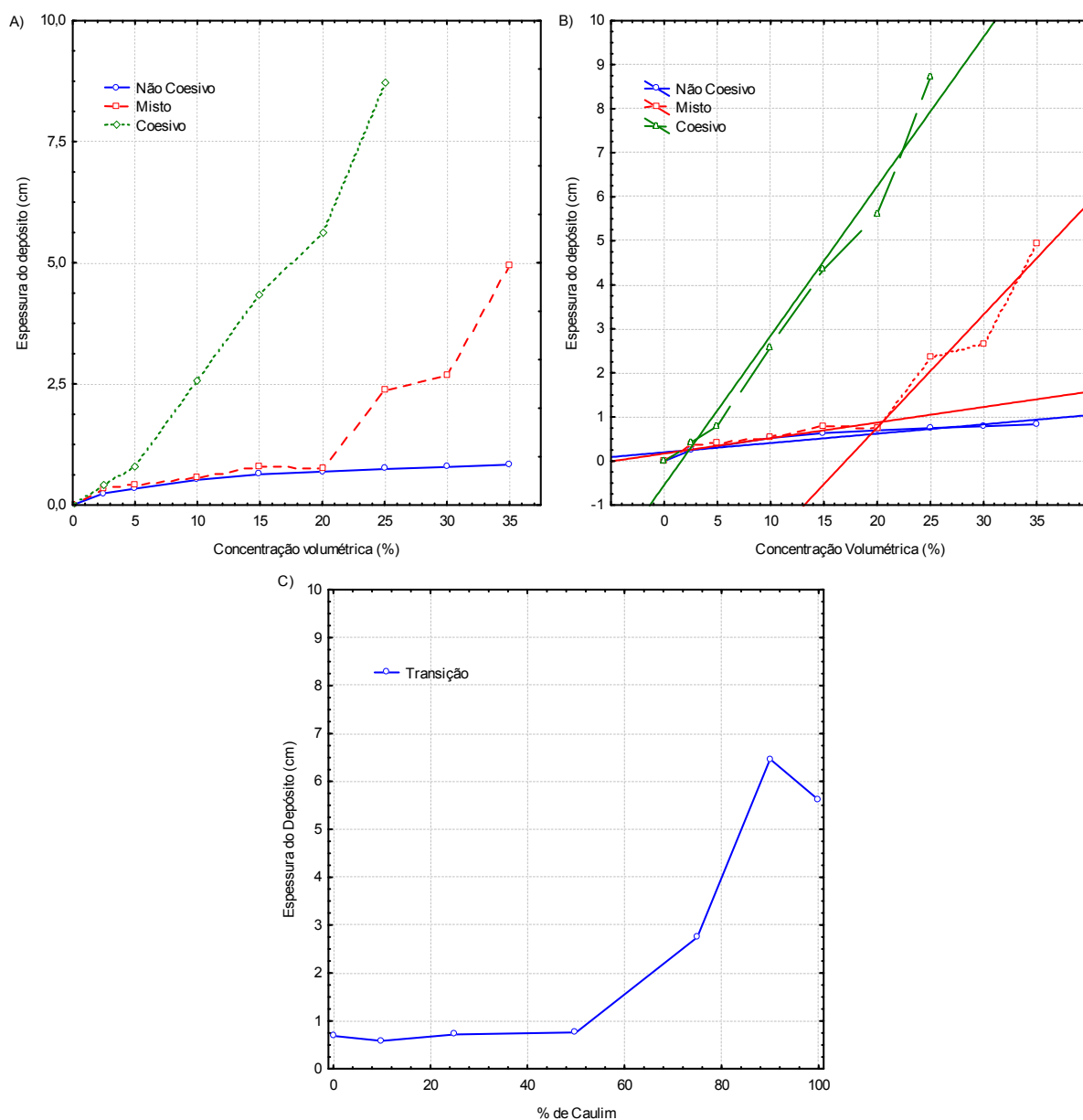


Figura 10.7 Relação dos valores médios de espessura do depósito após 24h e a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Valores medidos; b) Valores com o ajuste de tendência linear e; c) Valores do grupo transição.

No grupo transição, a variação da espessura com o incremento de argila é muito similar a dos ensaios anteriores, contudo, este aumento ocorre devido à presença de argila na mistura e não devido ao aumento de concentração, pois esta é constante. Para as correntes predominantemente não coesivas (até o ensaio 50B:50K), o valor da espessura é praticamente constante ($\sim 0,8$ cm), enquanto que, para os fluxos mais coesivos (Arg > 50 %), a presença da

camada lamosa e seu espesso depósito altera o comportamento, tornando-o praticamente linear e com forte declividade para essa reta de tendência.

Breve discussão

A análise da espessura do depósito, após 24 horas do ensaio, não representa os valores finais da espessura da camada depositada, porém apresenta um método para comparar os diferentes processos de deposição que ocorreram para as correntes de turbidez simuladas com diferentes concentrações. Neste ponto, os resultados mostraram que houve uma evidência muito grande de modificação do comportamento hidrodinâmico da corrente para os fluxos com presença de argila e de mais alta concentração, ou seja, para os ensaios com concentrações acima dos valores do ensaio M_20 e C_5 e 50B:50K. Para esses ensaios, a presença da camada lamosa junto ao fundo fez com que o depósito apresentasse, não só um aumento significativo de espessura, mas uma diferenciação da sua consistência, passando de um padrão mais consolidado (grupo não coesivo) para um depósito completamente não consolidado, com uma matriz composta por água, argila e sedimentos.

Essa mudança no comportamento pode estar seriamente relacionada com a mudança reológica do fluxo para esses tipos de corrente, cujo comportamento plástico das misturas, causaram um depósito em massa e com característica peculiar.

Ao longo da distância, o comportamento da espessura do depósito não foi significativamente alterado, indicando que o fluxo possuiu uma homogeneidade ao longo do comprimento, ou melhor, que o depósito que foi simulado, no espaço disponível do canal (comprimento do canal), representa uma fase do processo deposicional da corrente de turbidez, que, no caso, seria próxima à zona fonte de sedimentos.

10.2.3 Balanço de massa de sedimentos - Capacidade de transferência de sedimentos

Decorrido os experimentos, toda a massa de sedimentos depositada era coletada, secada e pesada. Desta maneira, foi obtida a massa relativa de depósito, a qual representa a relação entre a massa total depositada no canal e a massa total injetada. A figura 10.8 apresenta esse resultado expresso com relação à concentração inicial para os grupos não coesivo, misto e coesivo, bem como com relação ao grupo transição. Esse resultado expressa, indiretamente, a capacidade de transferência dos fluxos, uma vez que indica o quanto de material a corrente tinha capacidade para transportar para jusante e que não seria, portanto, depositado ao longo dos 4,5 metros do canal.

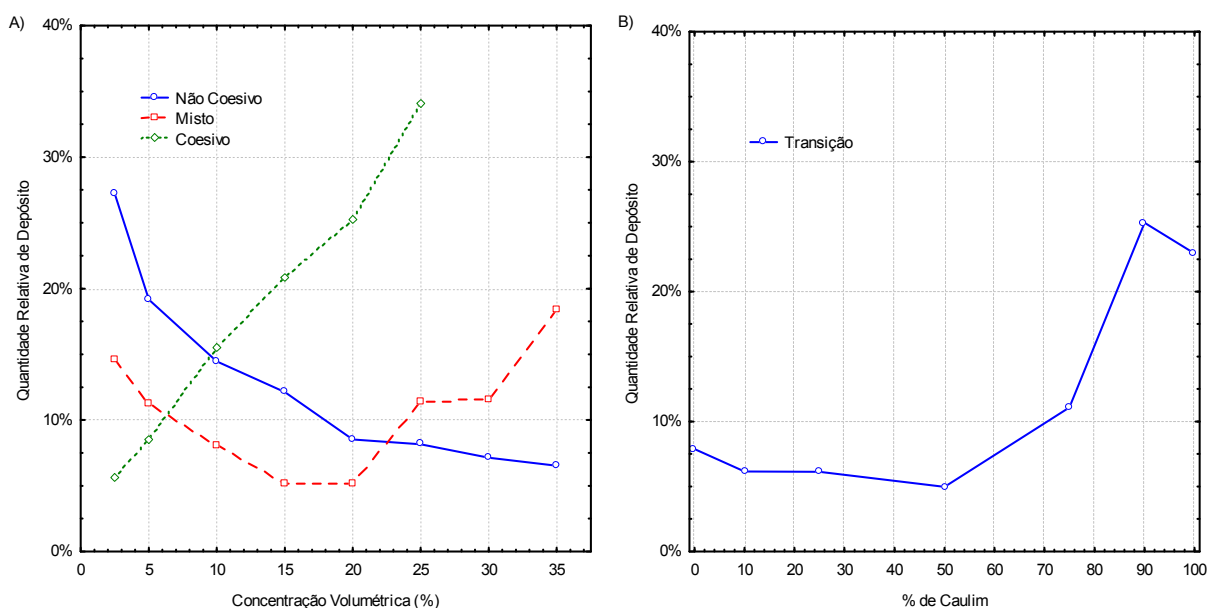


Figura 10.8 Relação da quantidade relativa de depósito e a concentração volumétrica e/ou presença de argila: a) Valores do grupo não coesivo, misto e coesivo e b) Valores do grupo transição.

Os resultados da figura 10.8, novamente apresentam dois comportamentos distintos. Nos fluxos não coesivos, o valor da massa de depósito relativa foi diminuindo (capacidade de transporte da corrente aumentando) com o incremento da concentração, sendo que esse decréscimo seguiu uma tendência de comportamento exponencial. Já o grupo misto apresentou essa mesma tendência para os ensaios com concentração menores que M_20, inclusive com, praticamente, a mesma inclinação da curva do grupo não coesivo. Já para os ensaios mais concentrados, a presença da camada lamosa fez aumentar o valor desse parâmetro, devido à grande quantidade de massa presente nesses depósitos, seguindo, neste caso, uma tendência praticamente linear de crescimento, com exceção do valor do ensaio M_25 que saiu um pouco da tendência. Neste grupo fica evidente a presença destes dois comportamentos, com a existência de um ponto de mínimo (entre M_15 e M_20), que evidencia a mudança de comportamento do fluxo e, conseqüentemente, do depósito.

No grupo coesivo, por outro lado, houve um crescimento da quantidade de massa depositada à medida que a concentração volumétrica aumenta (tendência linear), indicando que esses fluxos possuem baixa capacidade de transporte, apesar de serem formados por grãos com baixa velocidade de queda.

Para o grupo transição, o mesmo procedimento que ocorreu para o grupo misto se verificou novamente, porém, levando em conta o aumento da quantidade de argila na mistura. Do grupo não coesivo até o misto (< 50% de argila), o comportamento seguiu o do grupo não coesivo, com um decréscimo linear dos valores. Já para as correntes com mais de 50% de

argila na sua composição, foi verificado, novamente, o aumento da quantidade de material depositado (diminuição da capacidade de transferência) dos grãos.

Breve discussão

Através da análise da quantidade de massa relativa do depósito ficaram mais evidentes as mudanças do comportamento do fluxo para as correntes com presença de material não coesivo e material coesivo, quando se analisa todo o espectro de concentração inicial imposta, desde a baixa até a alta concentração.

Em termos de material presente na mistura, os resultados indicaram que a mudança de comportamento do fluxo e do depósito ocorreu entre os ensaios M_15 e M_20, visto que o fluxo se comportava predominantemente como um fluxo não coesivo com a tendência de aumento de sua capacidade de transferência com a concentração inicial (mesma forma da curva da figura 10.8) e mudou, com a acumulação de mais material depositado no tanque, se comportando como um fluxo coesivo (reta linear de aumento da figura 10.8).

O mesmo ocorre para o grupo transição, onde até 50 % de presença de argila, há um acréscimo da capacidade de transporte dos fluxos, evidenciada pela menor quantidade de massa depositada, que reverte para uma grande quantidade depositada após o ensaio 50B:50K.

Os resultados mostraram, também, que nos ensaios do grupo misto, o fluxo apresentou uma maior capacidade de transferência de grãos para as concentrações volumétricas menores que 20 %, em relação aos mesmos ensaios do grupo não coesivos. Nesse caso, a presença de argila na mistura foi a responsável por esse aumento. O mesmo ocorreu para o grupo transição, o qual apresentou uma maior capacidade de transferência de grãos com o acréscimo de apenas 10 % de argila na mistura.

10.2.4 Tamanho de grão do material depositado

A granulometria dos depósitos ao longo da distância foi realizada em intervalos de 40 cm, a partir de amostras coletadas, as quais foram, posteriormente, analisadas com um analisador de partículas a laser, perfazendo, ao todo, mais de 500 amostras granulométricas. Para a análise dos resultados foi calculado o diâmetro médio dos depósitos, avaliado a partir da equação 10.1.

$$D_{\text{Médio}} = \frac{d_{25} + d_{50} + d_{75}}{3} \quad (10.1)$$

Onde:

$D_{\text{médio}}$ = diâmetro médio dos grãos depositados no canal (micra)

D_{25} = percentil de 25% da distribuição granulométrica acumulada (micra)

D_{50} = percentil de 50% da distribuição granulométrica acumulada (micra)

D_{75} = percentil de 75% da distribuição granulométrica acumulada (micra)

A figura 10.9 apresenta os resultados da variação do diâmetro médio ao longo da distância, para os quatro grupos ensaiados.

Conforme pode ser observado na figura 10.9, no grupo não coesivo e para o grupo coesivo, a variação da granulometria ao longo da distância não foi muito evidenciada. A explicação para isso parte do material bruto utilizado, o qual possuía pouca variação granulométrica, ou seja, a argila praticamente apresentava uma granulometria uniforme, enquanto que, no caso do material não coesivo, a faixa de variação era muito pequena (0-50 micra). A tendência natural dos grãos foi se depositar, seguindo a velocidade de queda das partículas, a qual está relacionada ao diâmetro do grão. No caso destes experimentos, a falta de uma grande variação ao longo da distância indica que o fluxo possuía uma capacidade de transporte que não permitiu a segregação interna do material, mantendo o diâmetro dos grãos mais constantes ao longo da distância.

Apenas no grupo misto ocorrem pequenas variações de valores em torno de uma média, entretanto, pouco pode ser afirmado com relação a isso.

A figura 10.9 também apresenta a relação entre os valores médios do diâmetro e a concentração (Figura 10.9e), bem como a variação do diâmetro com a presença de argila (Figura 10.9f). Para o grupo não coesivo foi verificado um pequeno aumento do tamanho do grão à medida que a concentração foi sendo incrementada, entretanto, esse aumento não foi muito significativo. Para o grupo misto, as correntes de mais baixa concentração apresentaram os maiores valores do diâmetro médio, indicando que há predominância de esferas de vidro nos depósitos, enquanto que nas correntes com mais alta concentração, os valores são menores, uma vez que a argila aparece em quantidades maiores.

No grupo coesivo, não é notada nenhuma diferença entre os valores. Já ao grupo transição, ocorre o mesmo efeito do grupo misto, visto que, para as correntes com menor presença de argila, os grãos maiores são predominantes, e, à medida que argila vai sendo incrementada na mistura, o valor de $d_{\text{médio}}$ vai diminuindo. Para os depósitos das correntes com presença de argila acima de 50%, o depósito é praticamente composto por argila, uma vez que não houve muita variação dos valores medidos.

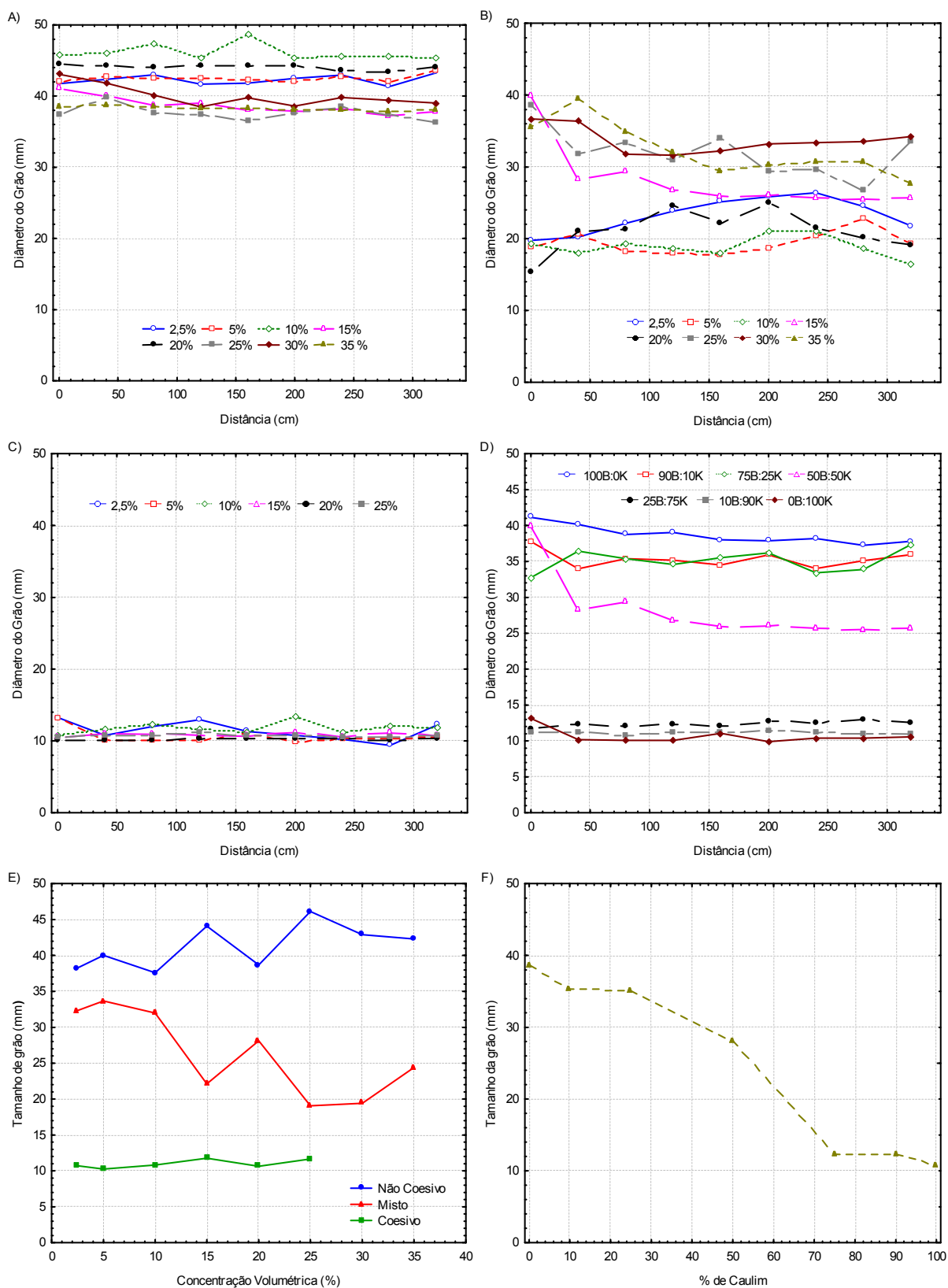


Figura 10.9 Variação do diâmetro do grão depositado com a distância à comporta: a) Não coesivo; a) Misto, c) Coesivo; d) Transição; e) Variação do diâmetro do grão depositado com a concentração volumétrica (grupos NC, M e C) e; f) Variação do diâmetro do grão depositado com a presença de argila (grupo transição).

Breve discussão.

Os resultados apresentados para a variação da granulometria ao longo de toda a distância do canal corroboram, novamente, com os resultados apresentados quando da análise macroscópica do depósito. Em outras palavras, nos indica, novamente, dois comportamentos relacionados às diferenças hidrodinâmicas e reológicas do fluxo para as correntes de não coesivas e coesivas. Pelo diâmetro do grão foi possível identificar qual o material predominou no depósito, com os maiores valores ocorrendo para as correntes com material não coesivo, enquanto que os menores valores indicaram a presença de material coesivo. Nos grupos mistos e transição, os valores comprovaram essa transição dos grãos pela mudança gradual dos grãos coesivos (diâmetros menores) para os não coesivos (diâmetros maiores).

10.3 ANÁLISE MICROSCÓPICA DO DEPÓSITO.

Aplicando a metodologia descrita no capítulo 6.5.7, foi possível coletar amostras indeformáveis do depósito, formado pela passagem das correntes, em três pontos distintos do canal. A 80 cm da comporta, a 180 cm da comporta e a 280 cm da comporta (próximo aos equipamentos – 320 cm da comporta). Com o auxílio de técnicas de preparação de lâminas e de polimento de rochas, foi possível processar as amostras num microscópio eletrônico de varredura, e, deste modo, avaliar esses depósitos na escala da presença de grão de esferas de vidro e argila (caulim). Nos capítulos seguintes serão apresentados os resultados obtidos com o uso de tal técnica.

Cabe salientar que, nos ensaios do grupo coesivo, não foram coletadas amostras, uma vez que, para a obtenção de parâmetros resultantes dessa análise, deveria haver uma modificação metodológica capaz de detectar as variações nos depósitos lamosos, já que a argila utilizada possuía um alto grau de uniformidade.

10.3.1 Apresentação das imagens microscópicas

A figura 10.10 apresenta um mosaico de todas as imagens processadas com o uso do microscópio eletrônico de varredura (MEV), para os grupos não coesivo, misto e transição (de 100B:0K até 25B:75K). Os espaços representados por um retângulo vazio representam as amostras perdidas durante o procedimento de coleta, devido a problemas operacionais. As imagens foram reordenadas acompanhando o incremento da concentração (grupos não coesivos e misto) e/ou da presença de argila (transição).

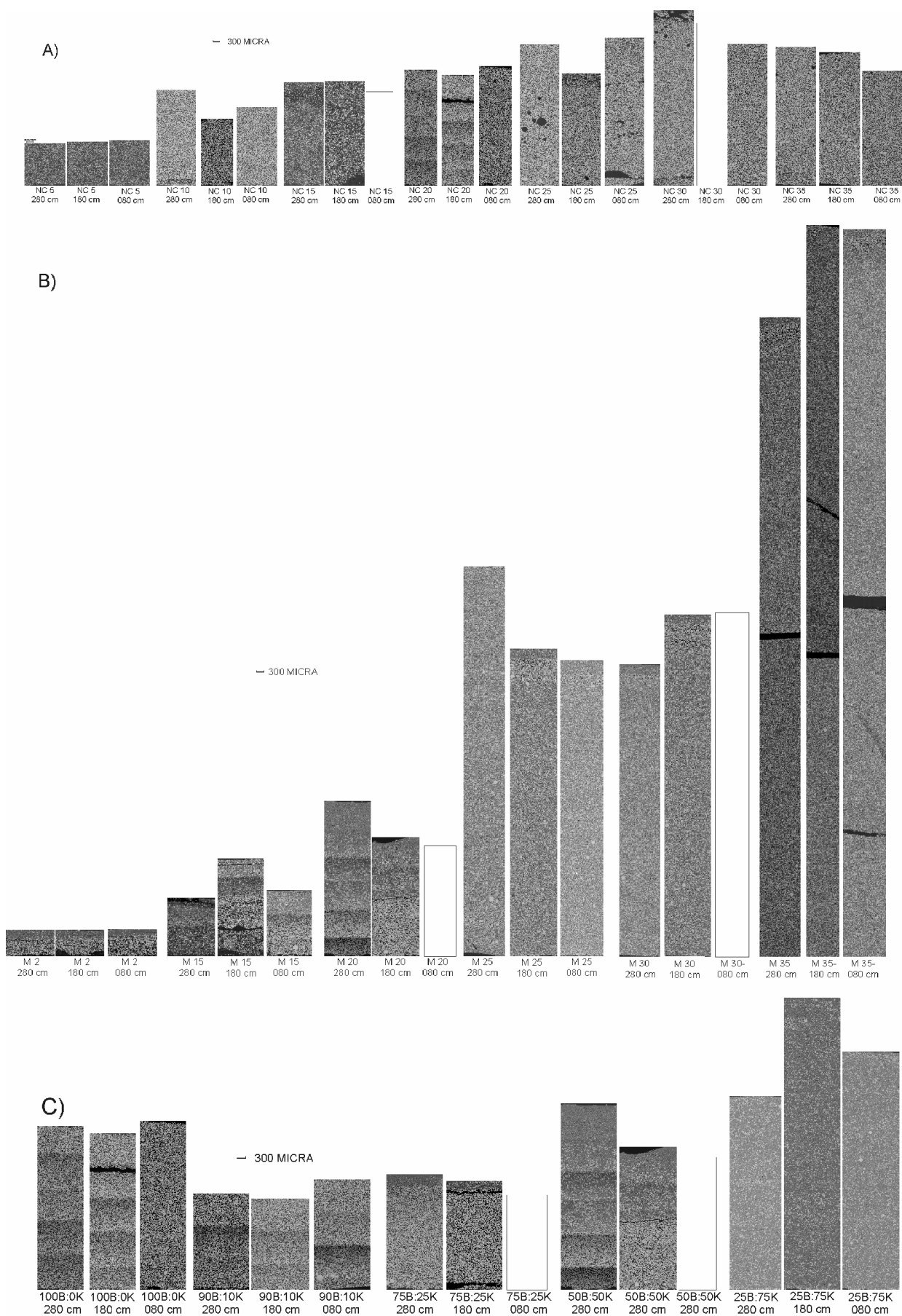


Figura 10.10 Imagem das amostras processadas no MEV em três posições ao longo do canal.
a) Grupo não coesivo; B) Grupo misto e; C) Grupo transição.

Numa análise geral, foram identificados os mesmos padrões de depósito descritos na análise macroscópica do depósito, principalmente quanto à espessura do mesmo e a suas variações. Foi verificado também que, em alguns ensaios, há uma variação de espessura entre as três amostras de cada ensaio. Como foi relatado no item 10.2.2, os depósitos apresentaram uma espessura praticamente constante ao longo do ensaio, pode-se, então, concluir que essas diferenças derivam de problemas do método aplicado, que, em alguns casos, não vedavam completamente o cilindro coletor, permitindo um pouco de vazamento do depósito quando da sua coleta. Essas pequenas diferenças ocorreram em poucos ensaios. Ainda, em dois ensaios do grupo não coesivo (NC_5 e NC_15), a qualidade das imagens não foi ideal, devido a problemas na coleta e no polimento das mesmas; mesmo assim, elas foram processadas na tentativa de identificação de algum padrão de comportamento.

Em algumas imagens, houve a presença de manchas pretas que representam espaços vazios criados no procedimento de impregnação do depósito com resina. Em certos depósitos, essa interrupção se deu ao longo de toda a horizontal. Além disso, na montagem do mosaico de fotos foi criada uma faixa horizontal mais escurecida, a qual não tem nenhuma relação com as características deposicionais do ensaio.

10.3.2 Descrição microscópica do grupo não coesivo.

Neste item serão apresentados os resultados obtidos pela análise microscópica das imagens de MEV para o grupo não coesivo. Neste grupo, foi possível coletar a maior quantidade de amostras nos ensaios, cobrindo a faixa de concentração inicial de 5% até 35%. Entretanto, nos ensaios com concentrações de 5% (NC_5) e 15% (NC_15), as imagens não ficaram com a qualidade desejada, por isso eles serão analisados com ressalvas. O ensaio NC_2 apresentou uma espessura muito pequena, o que impediu a possibilidade de criação das lâminas microscópicas devido à dificuldade em manuseá-las.

10.3.2.1 Descrição visual das imagens microscópicas

As imagens geradas no processamento do MEV para o grupo não coesivo são apresentadas na figura 10.11.

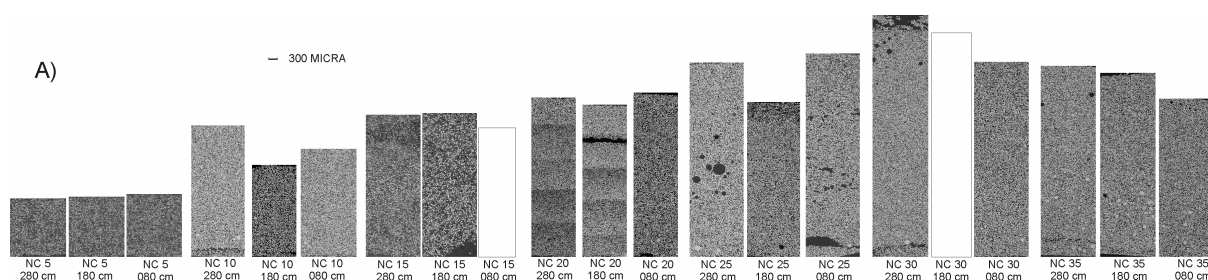


Figura 10.11 Imagem das amostras processadas no MEV em três posições ao longo do canal para os ensaios do grupo não coesivo

Num primeiro momento, foi realizada uma observação qualitativa das imagens a fim de buscar alguma mudança no comportamento que caracterizasse seu processo deposicional. Através da análise visual dos depósitos deste grupo, muito pouco foi constatado diretamente. Para praticamente todos os experimentos, foi notada uma pequena gradação normal dos grãos ao longo da vertical, com os grãos maiores embaixo e os grãos menores acima. Entretanto, essa diferenciação não é muito evidente. Nos ensaios de mais alta concentração (NC_25, NC_30, NC_35), esse comportamento é melhor ilustrado, com as partes superiores do depósito apresentando grãos mais finos. Ainda, no ensaio NC_35, foi constatado que partículas maiores das esferas de vidro se encontram no meio da matriz de sedimentos e não junto ao fundo, que seria o local esperado de se encontrar esses grãos maiores. Essa presença de grãos espalhados no meio do depósito pode ser indício de um comportamento hidrodinâmico ou um processo deposicional diferenciados.

As imagens processadas para os três locais de deposição não apresentam muita diferença visual entre elas, sugerindo a não ocorrência de modificações do processo deposicional ao longo do comprimento.

Como auxílio para a interpretação das imagens, alguns parâmetros foram quantificados, os quais serão apresentados a seguir.

10.3.2.2 Porcentagem do tipo de sedimento presente nos depósitos

O processamento da porcentagem do tipo dos grãos presentes nos depósitos do grupo não coesivo foi realizado seguindo a metodologia descrita no capítulo 6.5.9. A tabela 10.1 apresenta os valores determinados, bem como a figura 10.12 apresenta a relação entre esses valores de porcentagens de grão com a concentração inicial da mistura, avaliadas nas três localizações amostradas.

Tabela 10.1 Valores de porcentagem do tipo de sedimento para o grupo não coesivo.

C _{vol} (%)	80 cm				180 cm				280 cm			
	ST	EV	Ca	V	ST	EV	Ca	V	ST	EV	Ca	V
2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	49,62	49,62	-	50,38	48,05	48,05	-	51,95	47,76	47,76	-	52,24
10	61,37	61,37	-	38,63	57,34	57,34	-	42,66	61,18	61,18	-	38,82
15	54,18	54,18	-	45,82	48,33	48,33	-	51,67	-	-	-	-
20	60,79	60,79	-	39,21	66,52	66,52	-	33,48	56,54	56,54	-	43,46
25	56,31	56,31	-	43,69	59,89	59,89	-	40,11	59,61	59,61	-	40,39
30	58,29	58,29	-	41,71	-	-	-	-	56,31	56,31	-	43,69
35	60,55	60,55	-	39,45	60,55	60,55	-	39,45	63,39	63,39	-	36,61
Média	57,3	57,3	-	42,7	56,78	56,78	-	43,22	57,46	57,46	-	42,54
Desvio padrão	4,28	4,28	-	4,28	7,3	7,3	-	7,3	5,47	5,47	-	5,47

ST= % sedimento total no depósito

EV – % material não-coesivo (esferas de vidro);

Ca – % material coesivo (caulin)

V = % de vazios na amostra

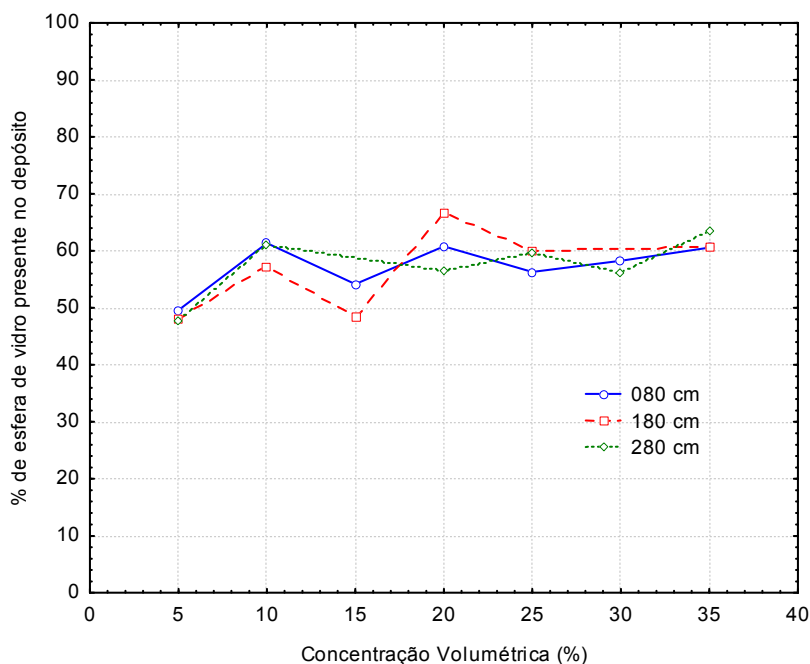


Figura 10.12 Relação entre a porcentagem de esfera de vidro presente no depósito e a concentração volumétrica para os ensaios do grupo não coesivo.

Como pode ser observado na tabela 10.1, a porcentagem dos grãos, no caso o material não- coesivo, foi praticamente constante nos depósitos para todos os ensaios do grupo não coesivo, com um valor de, aproximadamente, 60% de grãos não coesivos e 40% de espaços vazios. Cabe salientar que, pelo método adotado, não se pode afirmar se esses espaços vazios são realmente ocos ou se contêm grãos que não foram captados pelo microscópio eletrônico. Como todas as análises foram realizadas com o mesmo método, essa incerteza foi considerada a mesma. Os ensaios NC_5 e NC_15 apresentaram valores um pouco abaixo dos 60% de grãos, porém, como foi salientado anteriormente, a qualidade das imagens não foi boa, o que pode explicar essa diferença.

Pela análise da figura 10.12, pode-se notar também que, para as três amostras coletadas ao longo da distância, o comportamento apresentado foi o mesmo, sem variações significativas desse parâmetro. Isso indica que o fluxo apresentou uma homogeneidade no seu comportamento, conforme já foi descrito anteriormente nos capítulos 10.2.2 e 10.2.4.

10.3.2.3 Gradação dos depósitos

Através da imagem processada pelo MEV e da metodologia desenvolvida para o tratamento das imagens, foi possível estabelecer a porcentagem de grãos presentes ao longo da vertical sendo sua presença calculada para cada linha da imagem. A figura 10.13 apresenta esse resultado, sendo que a imagem foi dividida em duas regiões, ou seja, uma no topo e outra na base, sendo calculada a quantidade de material nessas regiões para as faixas granulométrica intervaladas em 10 micra, criando dois pontos no gráfico (um para cada

região). Assim, pela linha une esses dois pontos e pela inclinação da reta é possível verificar a graduação dos grãos (ver legenda da figura 10.13).

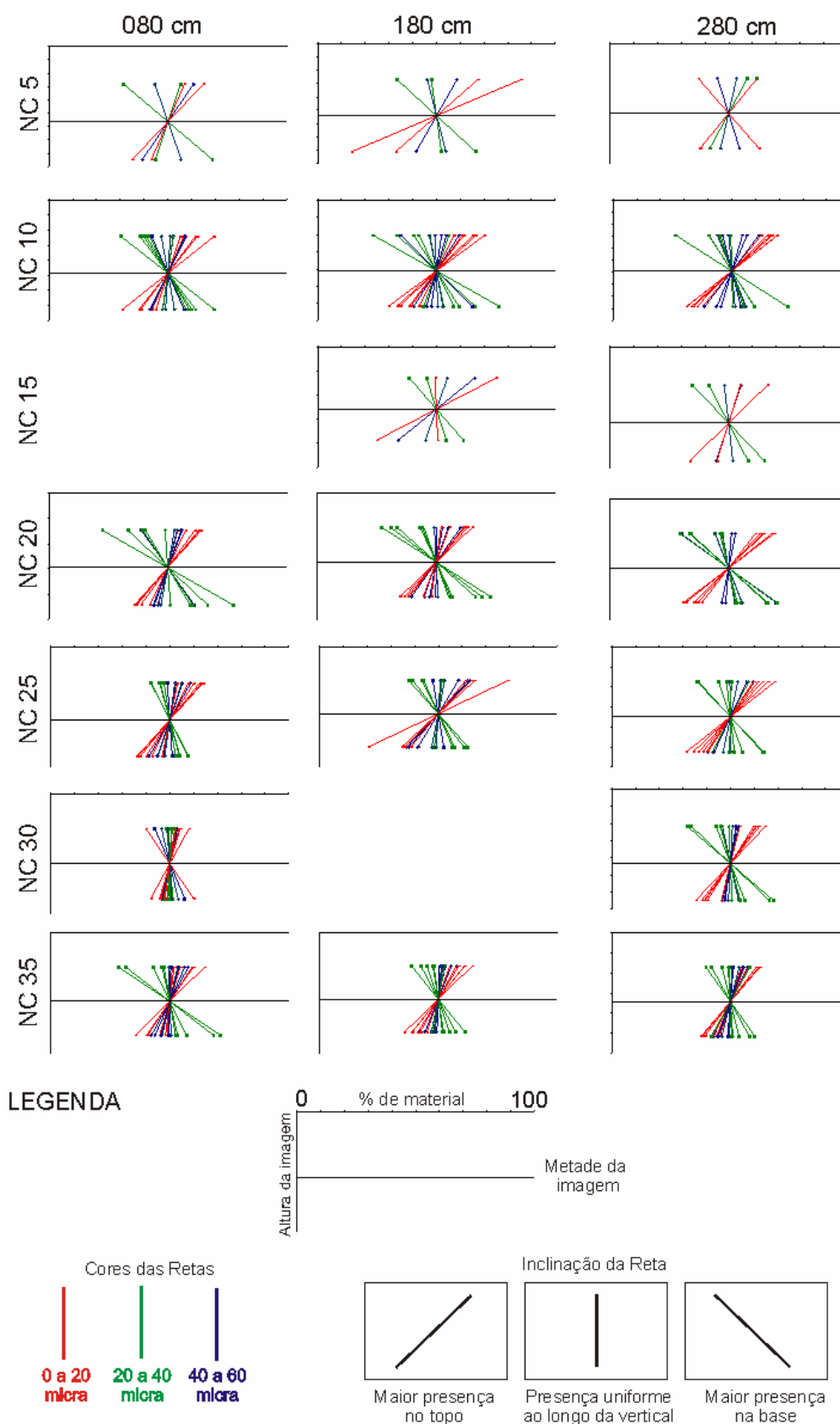


Figura 10.13 Porcentagem de esfera de vidro presente no depósito ao longo da altura (gradação) para os ensaios amostrados do grupo não coesivo.

A figura 10.13 apresenta todos os ensaios amostrados nas três localizações. Num primeiro momento, foi percebido que a variação longitudinal entre as três amostras coletadas de cada ensaio é mínima, ou seja, não houve uma mudança significativa dos padrões encontrados ao longo da distância. Para as concentrações mais baixas, a tendência dos depósitos foi uma gradação normal, com os grãos mais finos (vermelhos) presentes na porção superior do depósito e os grãos mais grossos (verdes) nas porções mais inferiores. Já para as correntes de mais alta concentração, foi verificado que esse comportamento ainda predominou, porém, com a tendência de apresentar uma homogeneidade maior ao longo da vertical (linhas mais verticais), o que indicaria um perfil mais maciço de distribuição de grãos. Essa transformação, de uma gradação normal para a gradação maciça, indicou que houve uma deposição dos grãos em suspensão pela desaceleração do fluxo e, num segundo momento, um processo mais instantâneo de deposição. Cabe lembrar que os ensaios NC_5 e NC_15 são apresentados com ressalvas, devido a má qualidade das imagens.

10.3.2.4 Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical

A figura 10.14 mostra o valor da variação do diâmetro médio dos grãos ao longo de toda a espessura do depósito. Esse diâmetro foi calculado em intervalos de 100 linhas verticais (pixels) e visava mostrar tendências do comportamento dos grãos ao longo da vertical. Para cada ensaio (concentração inicial diferente), os valores das três amostras ao longo da distância foram inseridos no mesmo gráfico. Os primeiros intervalos (junto à base) e o último (junto à superfície) devem ser considerados com cautela, devido às falhas presentes (vazios) nessas interfaces e causadas pelo método de aquisição das amostras indeformáveis.

Conforme demonstra a figura 10.14, novamente ficou evidente a pouca variação dos diâmetros entre os três locais de coleta ao longo da distância, com as curvas apresentando as mesmas tendências de comportamento. Com relação à variação de concentração inicial, foi verificado que, para todos os ensaios, há um decréscimo no valor do diâmetro médio dos grãos da base para o topo do depósito, ou seja, um afinamento dos grãos à medida que vai se distanciando do fundo. Para os fluxos de mais alta concentração (acima de 15%), houve uma variação mais abrupta junto ao topo onde ocorre tal afinamento, (setas indicativas no desenho), enquanto que, nos fluxos de menor concentração, esse decréscimo é mais gradual. A exceção do ensaio NC_25, no qual haviam muitos espaços vazios (falhas) que provocavam uma diminuição nos valores e, conseqüentemente, uma grande variação ao longo da vertical, os valores tenderam a se manter dentro de um valor médio.

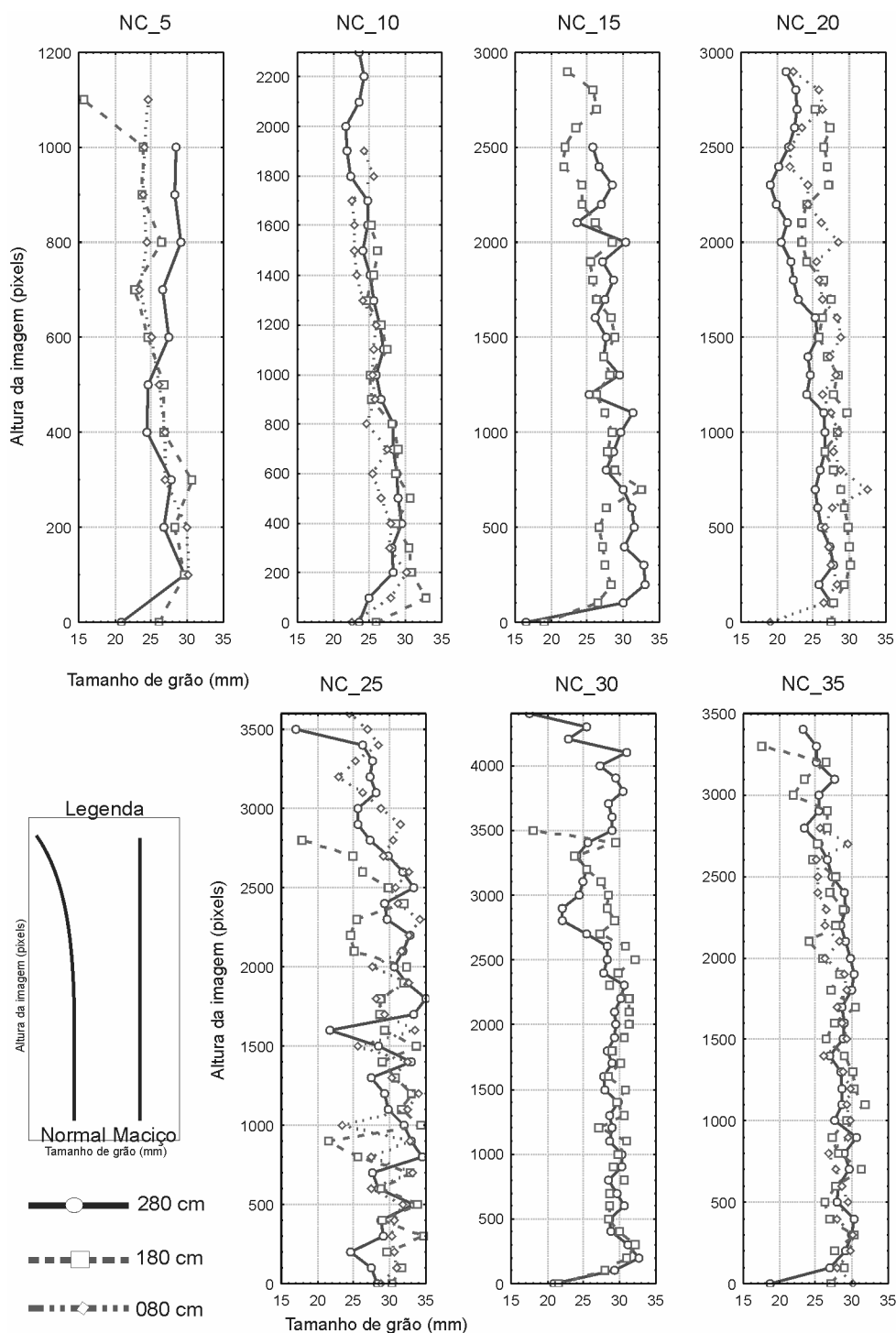


Figura 10.14 Valor do diâmetro médio dos grãos ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo não coesivo.

10.3.2.5 Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical - Laminações

A figura 10.15 apresenta o valor do diâmetro médio do grão ao longo do comprimento, de toda a espessura do depósito, em intervalos de 25 linhas, com um maior detalhe para esse parâmetro. Essa maior discretização foi determinada para identificar laminações de grãos presentes ao longo do ensaio, verificando se havia alternância entre os grãos mais finos e os

grãos mais grossos no interior do depósito, bem como ao longo da distância, servindo de base para a determinação dos distintos processos dinâmicos e deposicionais.

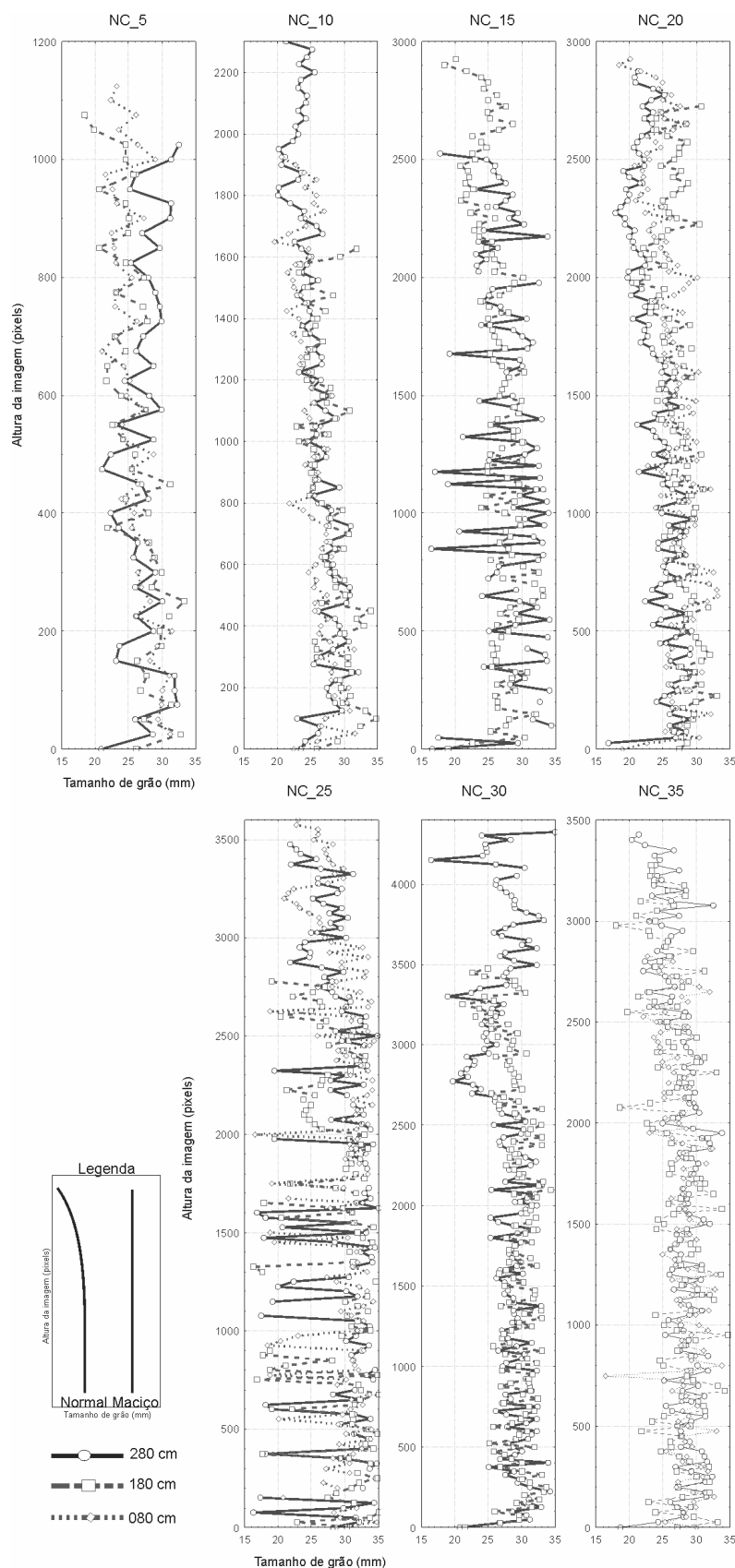


Figura 10.15 Valor do diâmetro médio dos grãos (intervalado a cada 25 pixels na vertical) ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo não coesivo.

Através da análise da figura 10.15, foi verificado que ao longo da vertical houve uma certa variação entre o tamanho do diâmetro médio do grão para todos os ensaios, entretanto essas variações não são muito significativas em termos da ocorrência de uma laminação de grãos. Apenas no ensaio NC_25 são verificadas fortes mudanças do tamanho do grão ao longo da vertical, entretanto, esse comportamento não parece estar associado à nenhuma tendência ou padrão deposicional. Neste grupo de experimentos, normalmente, os espaços vazios entre os grãos maiores são preenchidos pelos grãos menores, levando a uma maior uniformização dos diâmetros quando analisados em intervalos verticais. Ainda assim, em alguns experimentos, pode ser verificado algumas variações que indicaram uma laminação de grãos no interior. A figura 10.15 também mostra que, ao longo da distância, o comportamento desse parâmetro seguiu um comportamento bem constante, com pouquíssimas variações entre as três amostras coletadas, como por exemplo, o ensaio NC_30, que apresentou as curvas muito próximas. Cabe salientar, que a análise deste parâmetro foi um pouco prejudicada pela não uniformidade das espessuras das amostras.

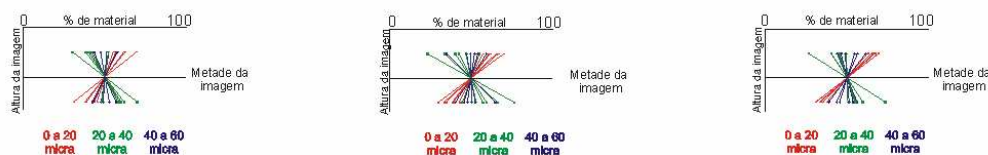
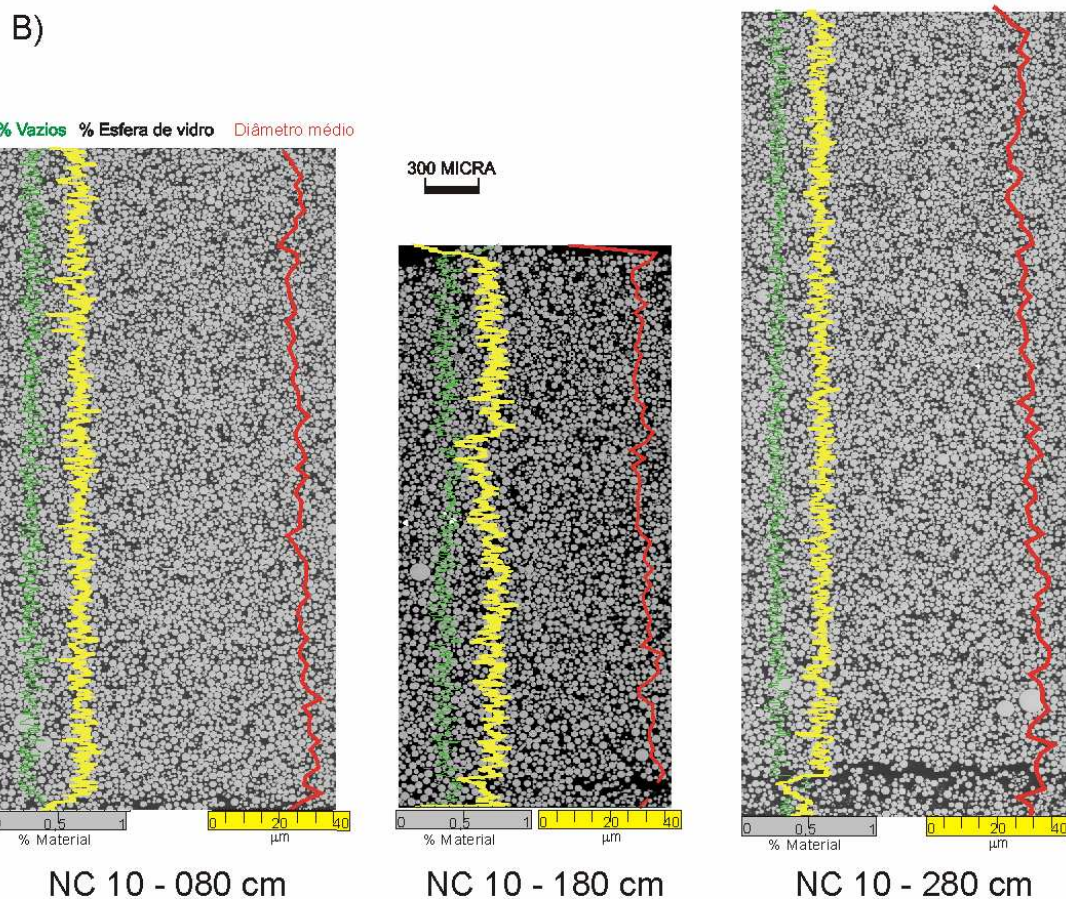
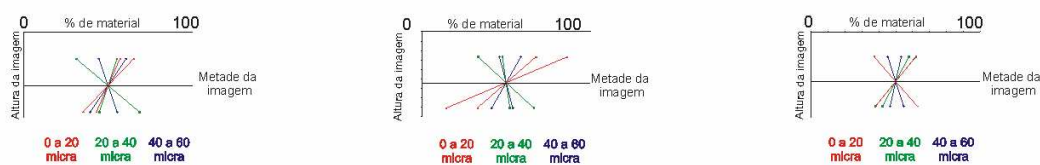
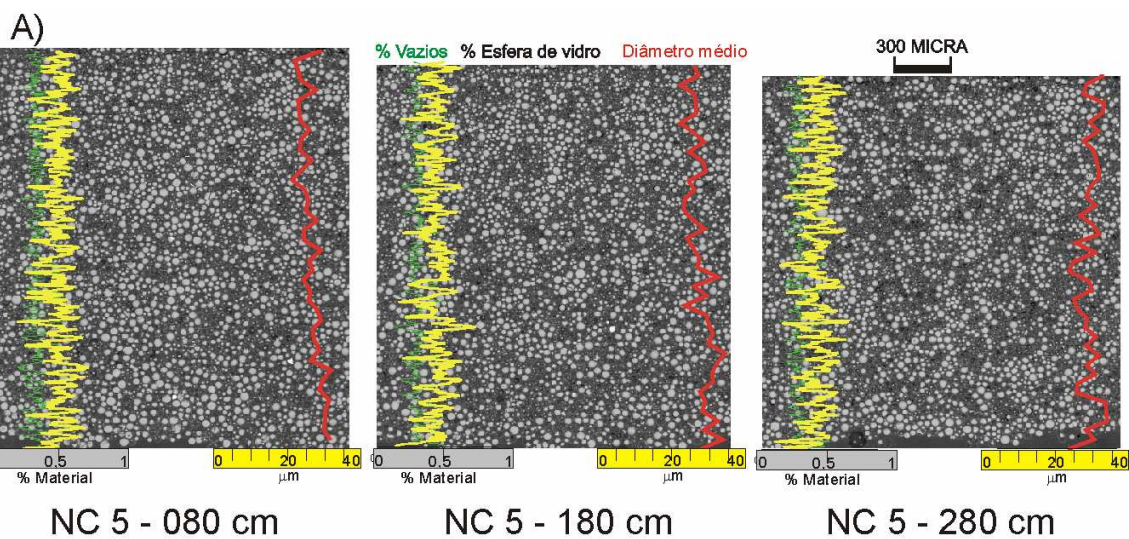
Breve discussão

As figuras 10.16a-g representam a síntese da análise microscópica do grupo não coesivo. Com a compilação dos resultados obtidos nas imagens original, foi possível observar os resultados descritos ao longo deste item.

Iniciando com as correntes de mais baixa concentração, os fluxos apresentam, basicamente, uma graduação normal de sedimentos, com aproximadamente 60% de grãos na amostra e com pouca laminação. Já para as correntes de mais alta concentração, as imagens apresentam uma tendência de depósitos parcialmente gradados, com um afinamento na região superior do canal, provocado, provavelmente, pela porção final do escoamento do fluxo. A quantidade de sedimentos ainda apresenta um leve aumento de valores, porém não muito além dos 60%, para os fluxos de mais baixa concentração.

A presença de grãos maiores no meio da matriz, nos fluxos de mais alta concentração, pode indicar uma mudança no mecanismo de deposição dos grãos, uma vez que não houve tempo para a segregação dos grãos (deposição mais instantânea).

Alguma diferença no contraste das imagens (p. ex. 10.16d), não indicam diferenças no depósito ao longo da vertical, são apenas marcas oriundas da montagem do mosaico das imagens. Também, nas imagens 10.16a e 10.16c, a qualidade do polimento das amostras foi baixa, gerando uma amostra com excesso de espaços vazios (tons cinzas).

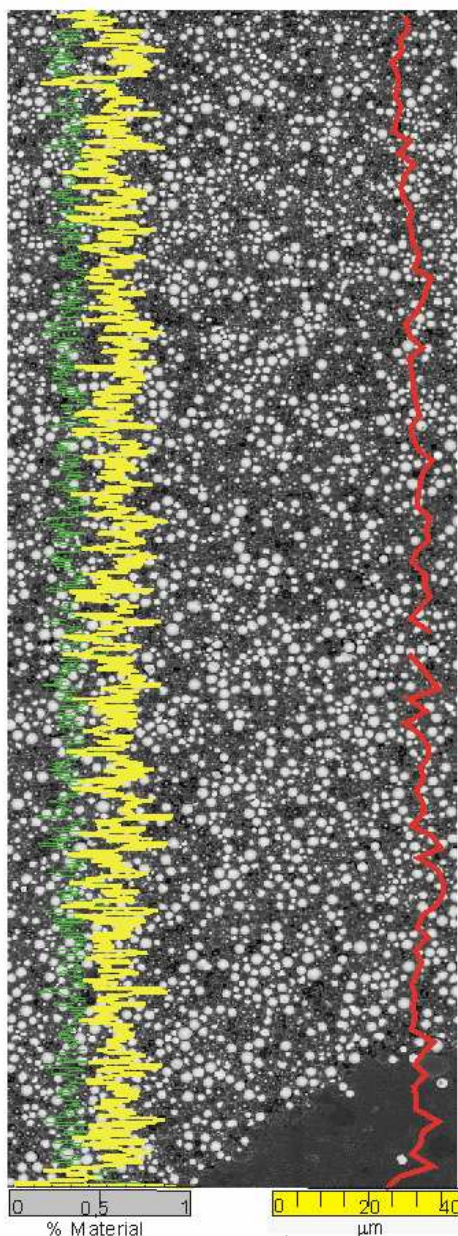


C)

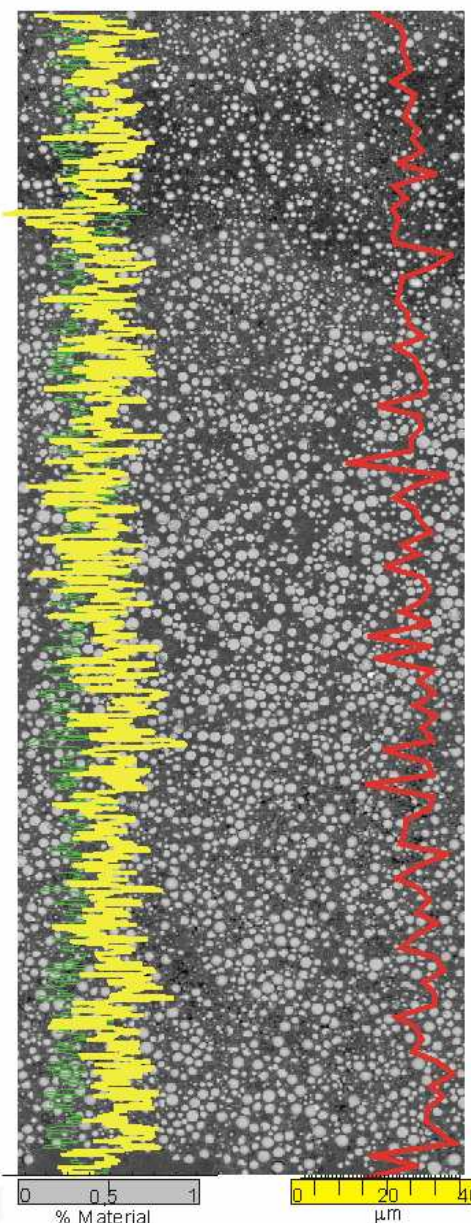
300 MICRA

NC 15 - 080 cm - Falha

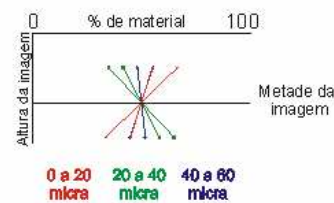
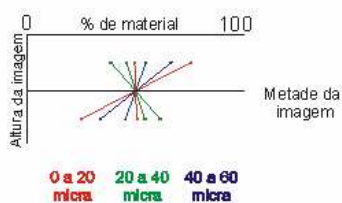
% Vazios % Esfera de vidro Diâmetro médio



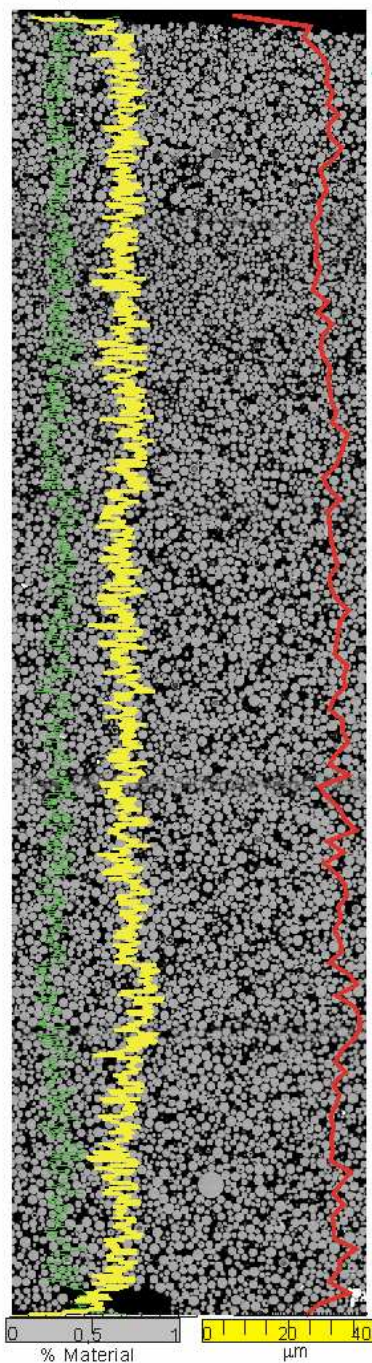
NC 15 - 180 cm



NC 15 - 280 cm

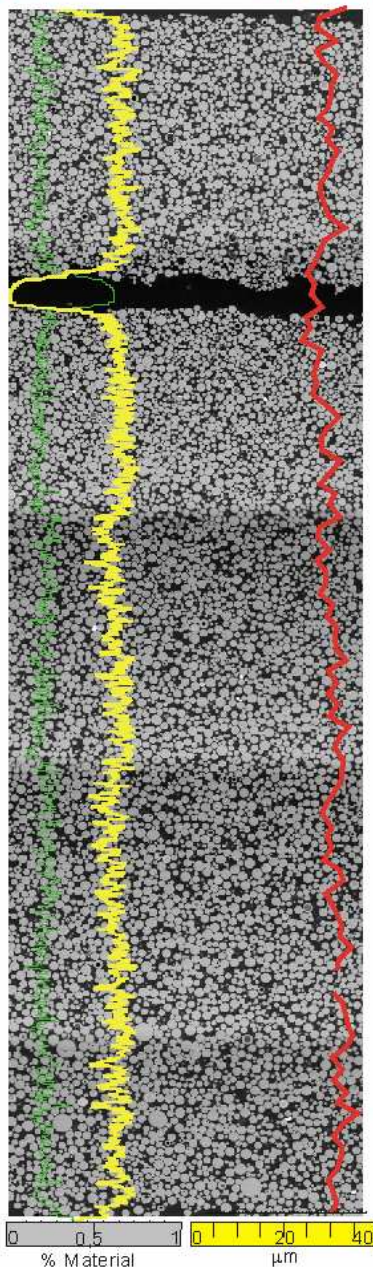


D)

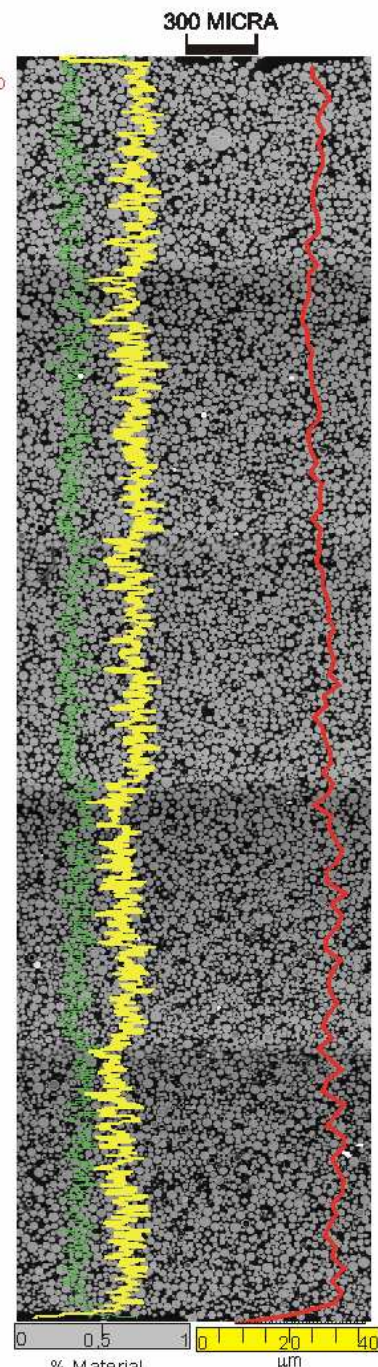


NC 20 - 080 cm

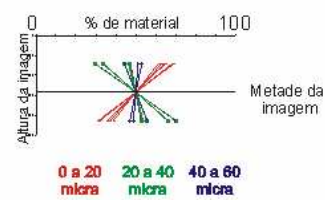
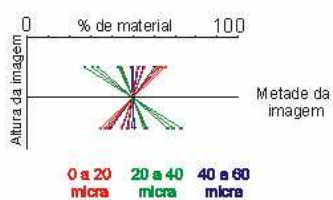
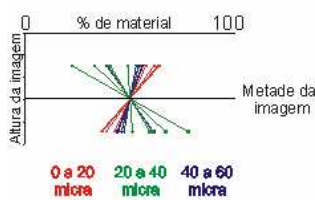
% Vazios % Esfera de vidro Diâmetro médio



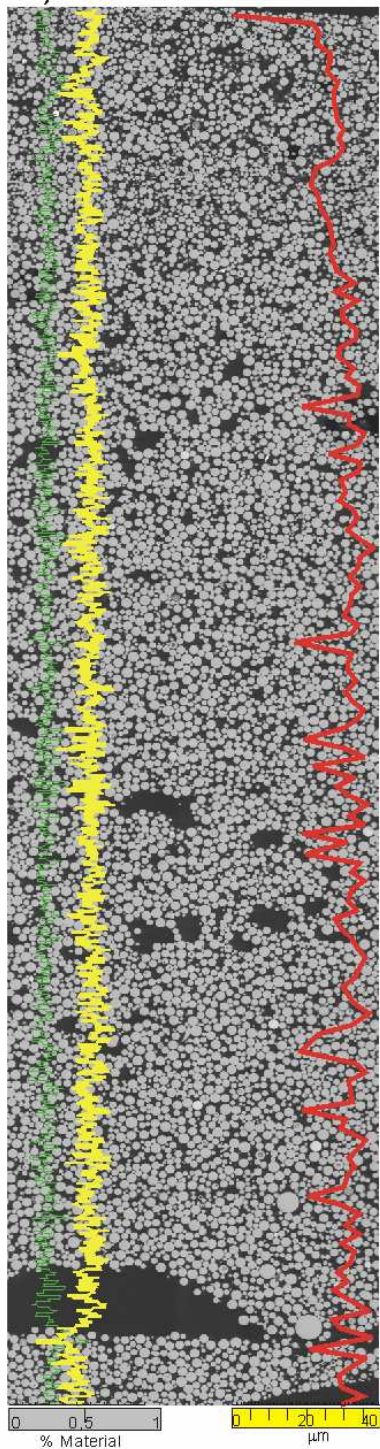
NC 20 - 180 cm



NC 20 - 280 cm

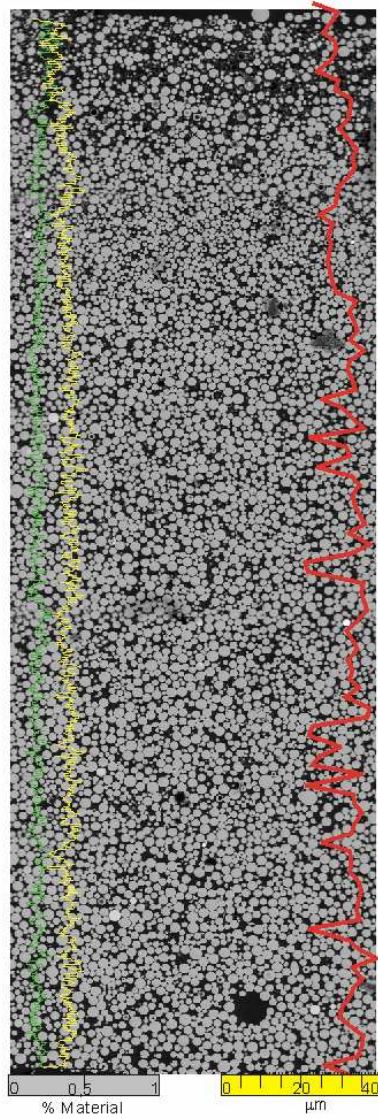


E)

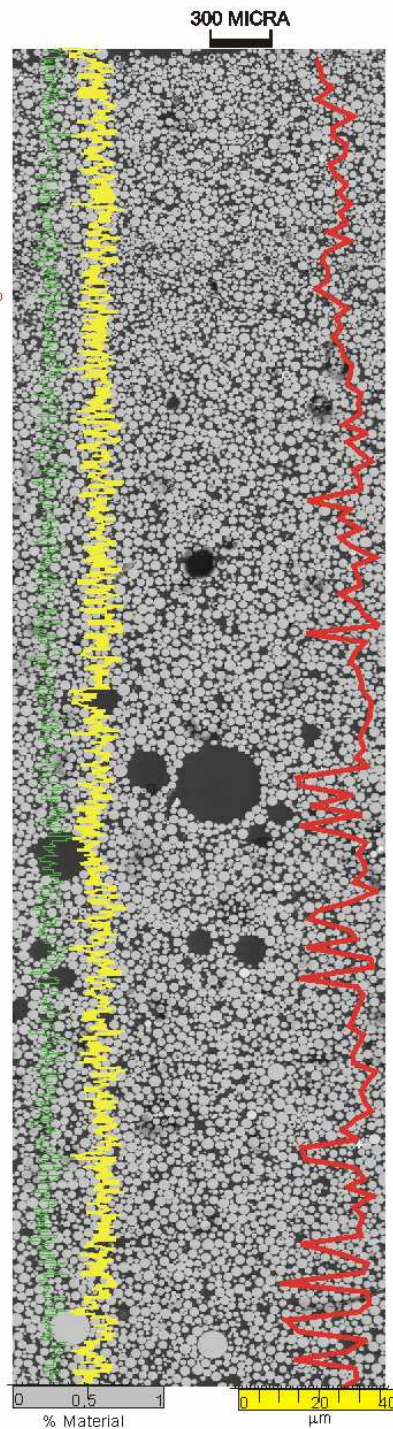


NC 25 - 080 cm

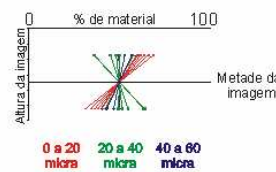
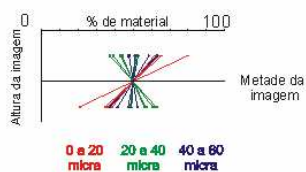
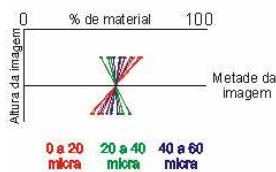
% Vazios % Esfera de vidro Diâmetro médio



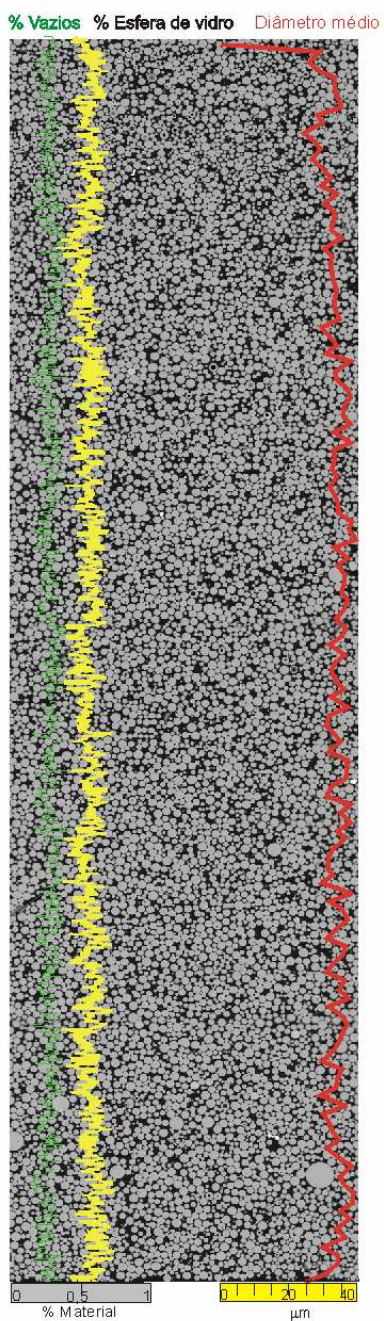
NC 25 - 180 cm



NC 25 - 280 cm

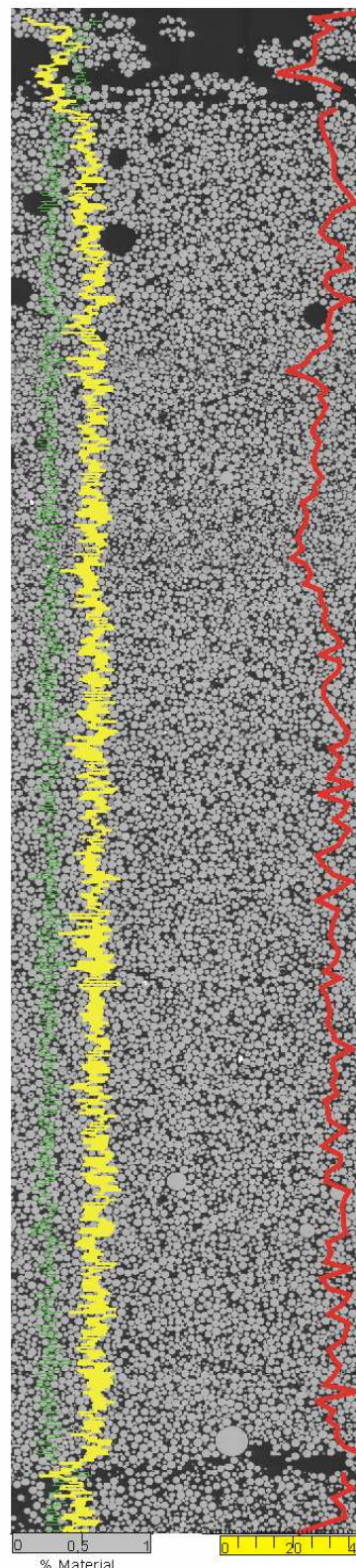


F)

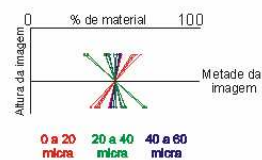
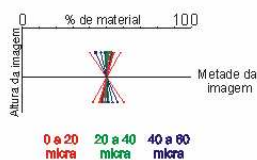


NC 30 - 080 cm

NC 30 - 180 cm- Falha



NC 30 - 280 cm



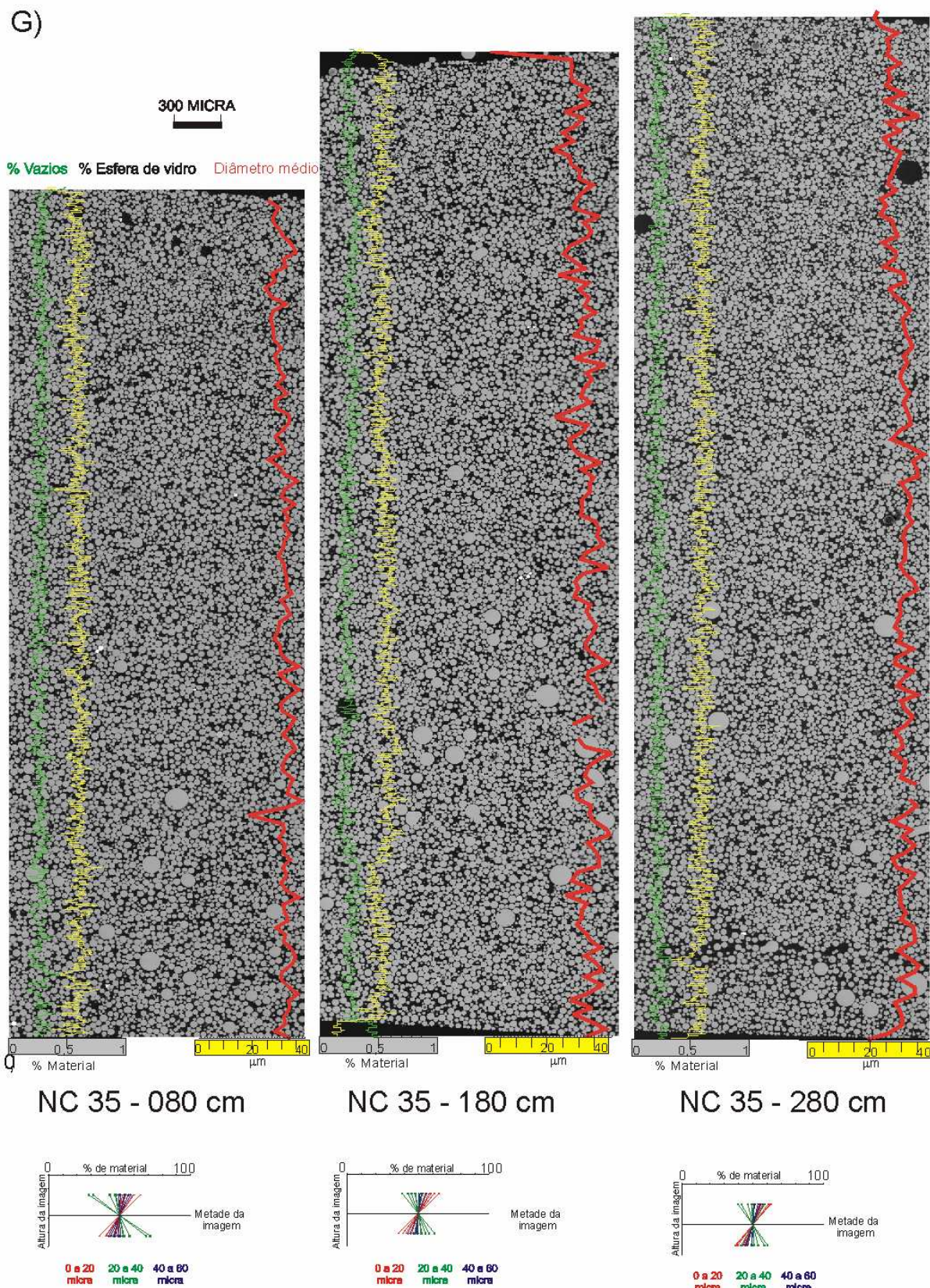


Figura 10.16 Imagens processadas no MEV com o resumo dos parâmetros avaliados ao longo do item 10.3.2: a) $C_{\text{vol}} = 5\%$; b) $C_{\text{vol}} = 10\%$; c) $C_{\text{vol}} = 15\%$; d) $C_{\text{vol}} = 20\%$; e) $C_{\text{vol}} = 25\%$; f) $C_{\text{vol}} = 30\%$; g) $C_{\text{vol}} = 35\%$.

10.3.3 Descrição microscópica do grupo misto.

Neste item serão apresentados os resultados obtidos pela análise microscópica das imagens de MEV para o grupo misto. Para esse grupo, não foi possível coletar as amostras dos ensaios M_5 e M_10, bem como uma amostra do ensaio M_15, localizada a 280 cm da comporta, não apresentou uma boa qualidade devido ao processo de impregnação e polimento.

10.3.3.1 Descrição visual das imagens microscópicas

As imagens processadas para o grupo misto foram organizadas e apresentadas conforme a figura 10.17, mostrando-as, nas três posições ao longo do canal, para cada concentração ensaiada. No caso, os depósitos dos ensaios M_5 e M_10 não foram coletados.

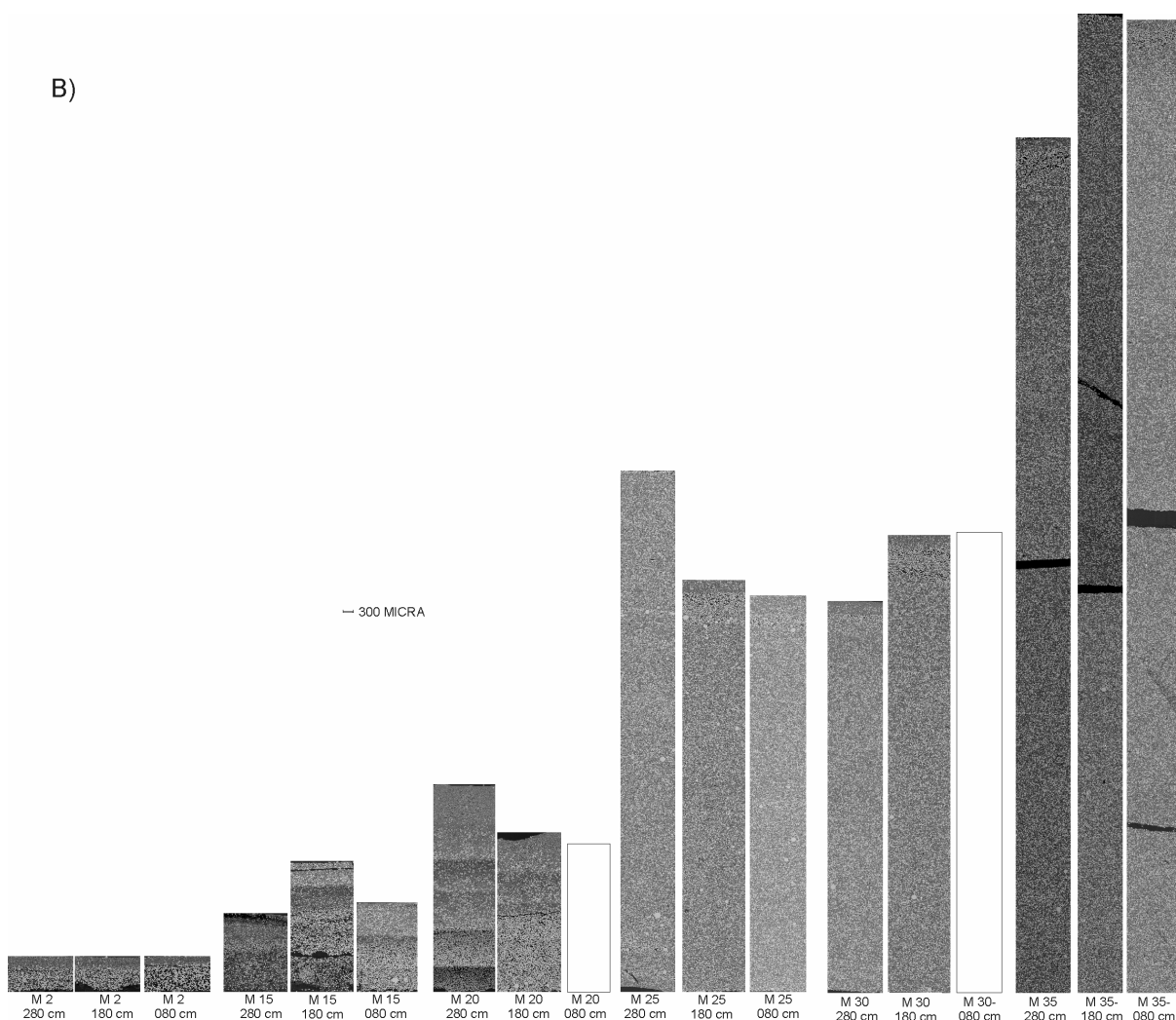


Figura 10.17 Imagem das amostras processadas no MEV em três posições ao longo do canal para os ensaios do grupo misto.

A análise do grupo misto foi facilitada pela presença da argila no depósito, a qual favoreceu o contraste com os grãos não coesivos (esferas de vidro), sendo possível a identificação de três padrões de depósitos distintos. O primeiro padrão de deposição se

caracterizou por apresentar o modelo clássico para as correntes de mais baixa concentração, ou seja, a deposição por gravidade dos grãos. Nesta situação, há uma interface nítida entre as esferas de vidro (depositados por arraste e suspensão) e a argila, a qual provém da decantação do material em suspensão após a passagem do fluxo. Esse comportamento foi identificado para o grupo M_2. Para os ensaios M_15 e M_20, foi identificado um segundo tipo de depósito, onde há a formação de uma zona intermediária, situada entre os grãos não coesivos, na base, e a argila, presentes no topo. Essa zona intermediária apresenta uma matriz coesiva com as esferas de vidro no seu interior. Já o terceiro tipo de depósito identificado ocorreu com grandes espessuras de depósito e com a predominância de argila na matriz, ao longo de toda a sua espessura. Esse comportamento foi identificado para os fluxos M_25, M_30 e M_35, ou seja, nos ensaios com mais alta concentração. Nesse tipo de depósito, foi também identificada uma feição diferenciada junto ao topo destas camadas. Nessa superfície superior do depósito, verificou-se uma outra sequência de depósito com as mesmas características do ensaio M_2 (baixa concentração), com a presença de esferas de vidro sem argila na matriz e com uma fina camada de argila no topo. Esse comportamento é muito interessante, pois apresenta um depósito mais lamoso junto ao fundo que funciona como base para uma corrente mais diluída no topo.

10.3.3.2 Porcentagem do tipo de sedimento presente nos depósitos

A figura 10.18 apresenta a porcentagem do tipo de sedimentos presentes ao longo da vertical, avaliada para os ensaios do grupo Misto.

Através da análise da figura 10.18, foram identificados os três tipos de depósitos descritos no item anterior, mostrando os locais em que são encontrados uma maior quantidade de grãos não coesivos (esferas de vidro) no depósito (linha cinza) e de grãos coesivos (linha preta). Assim, para as correntes de mais baixa concentração, houve uma divisão nítida entre os grãos não coesivos e os grãos coesivos ao longo da vertical. Essa separação evidencia que a corrente carregou sua carga de material em suspensão, depositando os grãos não coesivos junto ao fundo e que, após o fim do experimento, o material mais fino decantou sobre o depósito previamente formado. Para os depósitos dos ensaios M_15 e M_20, foi criada uma camada mista (intermediária) composta de uma matriz mais coesiva, porém, com grãos não coesivos. Essa camada mista foi associada à camada mais concentrada criada junto ao fundo (camada lamosa), a qual começou a ser tornar mais significativa com o aumento da concentração inicial.

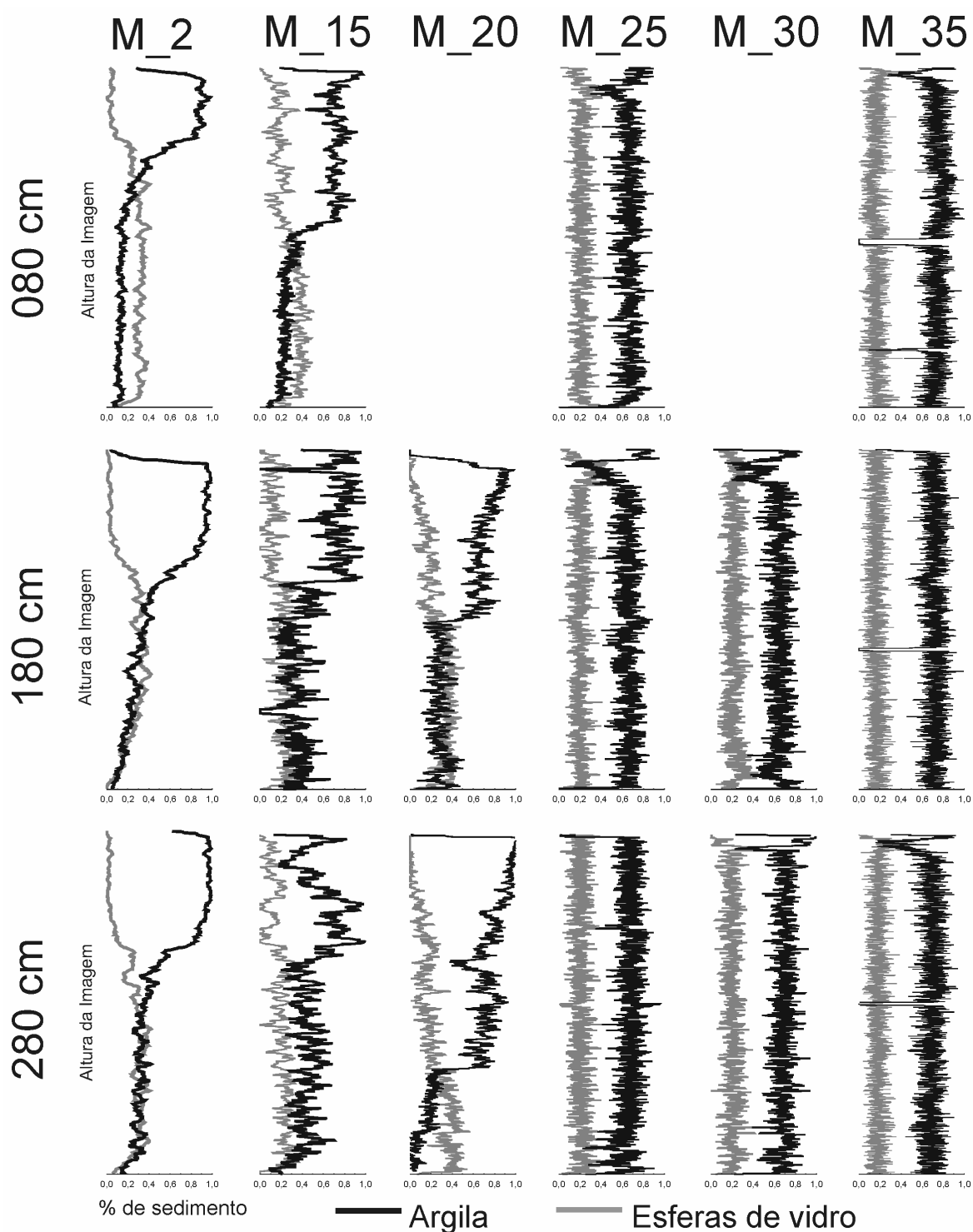


Figura 10.18 Porcentagem do tipo de sedimentos ao longo da vertical para os ensaios do grupo misto.

Esse tipo de depósito representa uma transição entre os depósitos de mais baixa concentração e os depósitos das correntes de mais alta concentração, uma vez que, para os ensaios com concentrações maiores que a do ensaio M_20, a presença da argila foi predominante ao longo de quase toda a vertical, indicando a mudança de comportamento, tanto do processo hidrodinâmico quanto do processo deposicional atuantes. Nesse terceiro tipo de depósito identificado, foi verificada, junto ao topo, a presença de uma inversão do

material predominante no depósito, visto que nessa região ocorreu um depósito de baixa concentração, provocado pela passagem do corpo e da cauda da corrente sobre a camada lamosa depositada previamente.

A tabela 10.2 e a figura 10.19 apresentam os valores médios de porcentagem de grãos não coesivos e de grãos coesivos para todos os ensaios do grupo misto para as três amostras localizadas ao longo do canal.

Tabela 10.2 Valores de porcentagem do tipo de sedimento para o grupo misto

C _{vol} (%)	80 cm				180 cm				280 cm			
	ST	EV	Ca	V	ST	EV	Ca	V	ST	EV	Ca	V
2,5	70,10	37,40	32,70	29,80	76,00	28,60	47,30	23,90	84,30	30,50	53,80	15,60
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	86,20	40,00	46,10	13,78	77,30	27,40	49,80	22,60	76,50	28,10	48,40	23,40
20	-	-	-	-	81,70	34,70	47,00	18,20	86,20	28,90	57,30	13,70
25	97,60	31,80	65,80	2,36	94,80	31,50	63,20	5,10	97,10	31,20	65,80	2,80
30	-	-	-	-	95,60	33,00	62,50	4,30	98,40	29,70	68,70	1,50
35	-	-	-	-	95,70	25,00	70,60	4,20	94,40	27,30	67,00	5,50
Média	84,63	36,4	48,2	15,31	86,85	30,03	56,73	13,05	89,48	29,28	60,17	10,42
Desvio padrão	13,82	4,19	16,65	13,78	9,52	3,66	9,99	9,52	8,58	1,47	8,23	8,58

ST= % sedimento total no depósito

EV – % material não-coesivo (esferas de vidro);

Ca – % material coesivo (caulin)

V = % de vazios na amostra

Como pode ser observado na figura 10.19, o comportamento dos valores médios para as três regiões amostradas, foi muito similar, com pequenas diferenças entre eles. Foi verificado também, que os fluxos de mais baixa concentração apresentaram uma grande quantidade de espaços vazios (linha rosa), porém, com o incremento da presença de argila no depósito, esses vazios foram sendo preenchidos pelo material mais fino, diminuindo seu valor para menos que 5% do total.

A figura 10.19 também mostra um aumento significativo de argila no depósito, a partir do ensaio M_20, indicando que ocorreram modificações no escoamento e no depósito. Por outro lado, a presença de grãos não coesivos se manteve praticamente constante, entre 30 e 40% para todos os ensaios. Neste caso, se compararmos com o grupo não coesivo cuja presença de grãos não coesivos era de 60%, menos material não coesivo ficou depositado, mostrando que houve um aumento da capacidade de transporte destes grãos para esse tipo de fluxo.

Se forem analisadas somente a presença de argila e do material não coesivo, nota-se o crescimento da presença argila entre os entre os ensaios M_15 e M_20 (segundo padrão de depósito), bem como, um patamar de predominância de argila, para os ensaios M_25, M_30 e M_35 (terceiro tipo de depósito identificado).

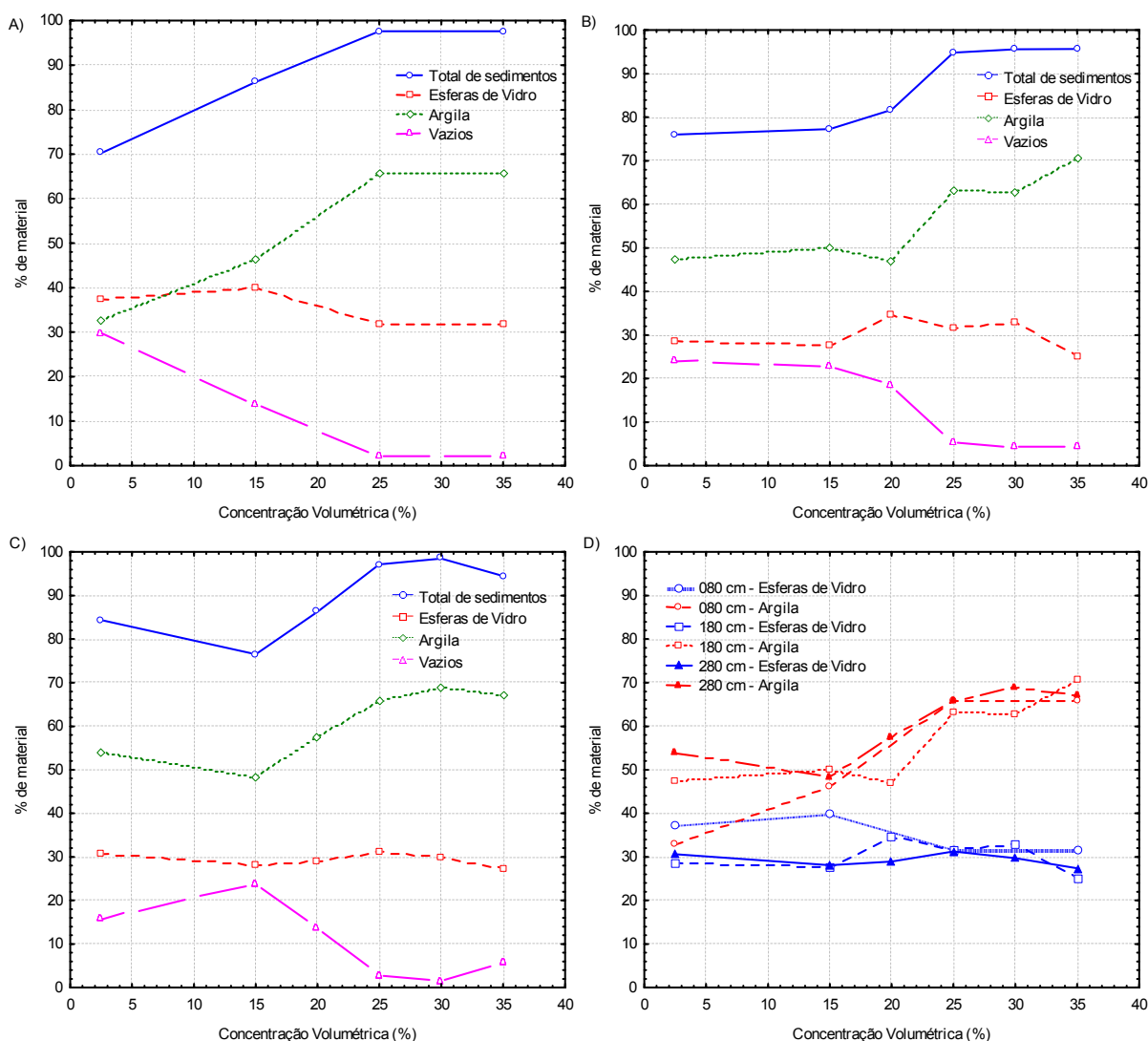


Figura 10.19 Relação entre a porcentagem de tipo de sedimento presente no depósito e a concentração volumétrica para os ensaios do grupo misto. a) a 80 cm da fonte. b) a 180 cm da fonte. c) a 280 cm da fonte e d) só esfera de vidro e argila nas três posições.

10.3.3.3 Gradação dos depósitos

Para a obtenção da gradação dos grãos ao longo da vertical, no grupo misto, foram analisados somente a presença de grãos não coesivos. A técnica aplicada não pode ser realizada para os grãos de argila, pois esses não apresentavam diferenças significativas em tamanho (amostra melhor selecionada), nem um padrão de forma de grão compatível com o método utilizado (pouco arredondadas).

Os resultados apresentados na figura 10.20 indicam que, novamente, ao longo da distância, o comportamento do depósito, quanto à gradação de grãos, foi muito similar para as três amostras verificadas. Para as correntes com concentrações menores que 20%, o comportamento que predomina para todos os depósitos é a gradação normal de grãos, ou seja, com os grãos maiores junto à base e a os menores junto ao topo.

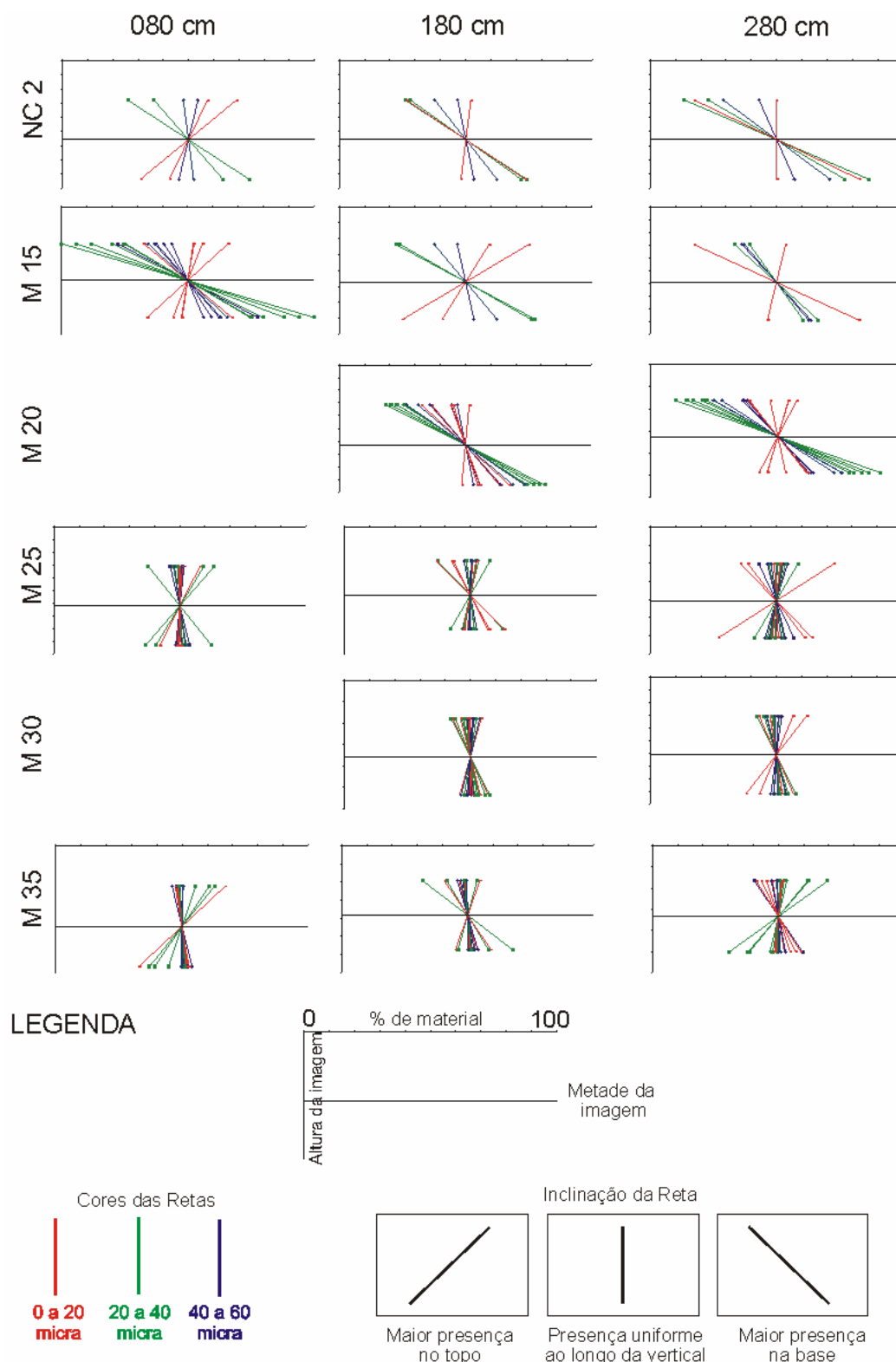


Figura 10.20 Porcentagem de esfera de vidro presente no depósito amostrados no MEV ao longo da altura (gradação) para os ensaios do grupo misto.

Esse resultado representa a predominância dos grãos não coesivos nesse depósito, não havendo muita influência da argila no escoamento. Já para os fluxos com concentrações maiores que 20%, a gradação dos grãos não coesivos foi praticamente maciça, ou seja, com as retas na vertical indicando uma homogeneidade ao longo de toda a espessura. Do ensaio

M_25 para o ensaio M_30 houve ainda, uma tendência para transição entre a gradação maciça e a gradação normal, enquanto que, para o ensaio M_35, foram verificados dois pontos de amostra com gradação maciça tendendo à gradação inversa. Estes três ensaios, apesar destas diferenças, indicaram que o depósito se deu, praticamente em massa, com os grãos maiores sendo suportados completamente pela matriz coesiva, sem tempo para que ocorresse, internamente, segregação por gravidade.

10.3.3.4 Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical

O comportamento descrito acima, também pode ser visualizado na figura 10.21, apresentando o valor do diâmetro médio do grão ao longo da vertical, considerando um intervalo de análise de 100 linhas (pixels).

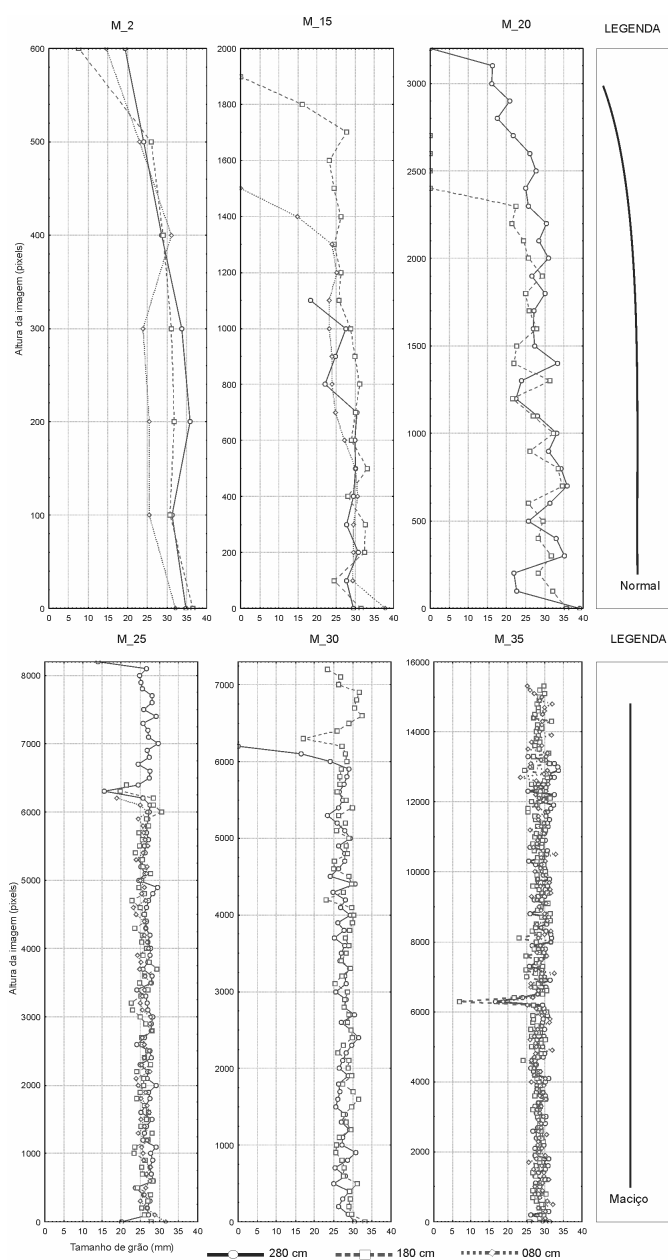


Figura 10.21 Valor do diâmetro médio dos grãos ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo misto.

Pela análise da figura 10.21, os dois tipos de comportamento anteriormente descritos foram notados claramente, com a gradação normal ocorrendo para os fluxos com concentrações menores que 20% (linha curvada à esquerda no topo) e a gradação maciça (linha vertical), para os fluxos concentrações maiores que esse valor. Ao longo da distância, foi verificada pouca variação entre as três diferentes amostras (três linhas).

10.3.3.5 Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical - Laminações

A figura 10.22 apresenta o diâmetro médio dos grãos discretizados em intervalos de 25 linhas, visando a visualização de laminações de grãos no interior dos depósitos.

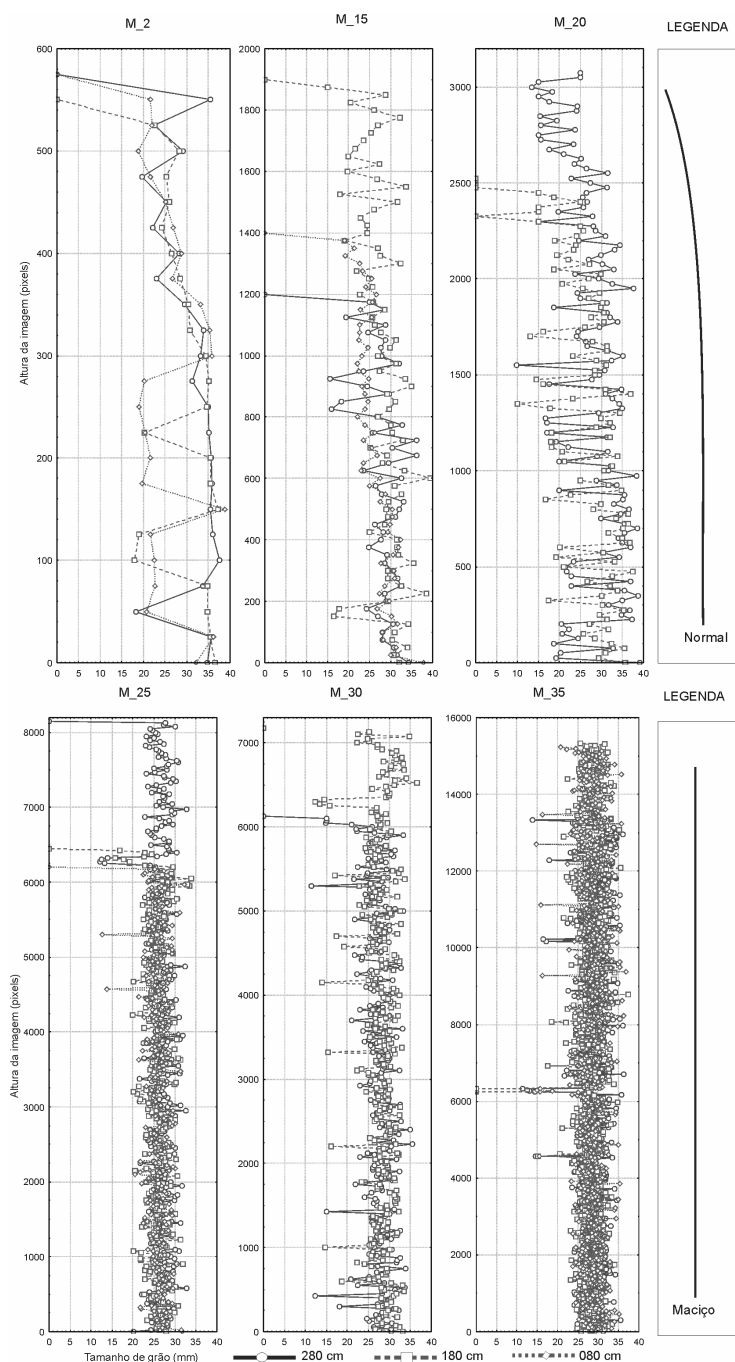


Figura 10.22 Valor do diâmetro médio dos grãos (intervalado a cada 25 pixels na vertical) ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo misto.

Ao contrário do grupo não coesivo, os resultados para o diâmetro médios dos grãos apresentados na figura 10.22 indicam uma grande variação dos valores ao longo de toda a espessura da amostra. Nos experimentos M_15 e M_20, ficou evidente a alternância do diâmetro médio do grão, especialmente quando é atingida a zona intermediária do depósito com a presença da matriz coesiva. Esse comportamento também foi identificado nos depósitos mais concentrados, nos quais predominam zonas de grãos mais grossos e grãos mais finos. O ensaio M_30 é um bom exemplo desse comportamento. Ainda no ensaio M_35, foi identificada uma laminação ao longo das três amostras ao longo da distância (altura da imagem em torno de 450 pixel). Nesse ponto, há uma quebra na sequência alternada de grossos e finos. Nesses depósitos, também foi encontrada a presença da camada menos concentrada no topo da amostra, onde há uma laminação de grãos mais grossos, seguidos dos grãos mais finos, provenientes da decantação final dos grãos.

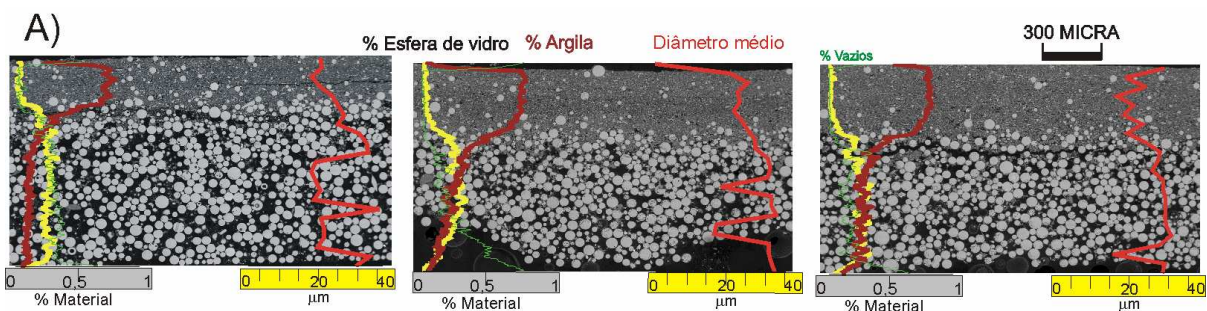
Breve discussão

As figuras 10.23a-f apresentam a síntese dos resultados do grupo misto. Para esse grupo, a presença da argila facilitou a interpretação das imagens, sendo identificados três estágios de depósitos distintos, representando uma transição entre a baixa concentração e a alta concentração. Nos fluxos de mais baixa concentração, foram reproduzidos os depósitos com gradação normal, com a presença bem definida da argila no topo (oriunda da decantação) e dos grãos não coesivos junto à base. Já para as correntes de concentração intermediárias (M_15 e M_20), houve o aparecimento de uma terceira camada intermediária no meio do depósito com uma matriz de argila e esferas de vidro, oriunda da formação da camada lamosa durante o desenvolvimento do fluxo.

Por fim, para as correntes de mais alta concentração, a presença da argila predomina sobre o fluxo, gerando um depósito completamente maciço, com uma matriz coesiva e com as esferas de vidro no interior. No topo desta camada, houve a reprodução fiel dos depósitos gerados nos ensaios de mais baixa concentração, mostrando que o depósito mais maciço serviu de base para o desenvolvimento do corpo e da cauda da corrente (coarse-tail grading).

A presença de argila e dos grãos não coesivos foram sendo alteradas progressivamente nos depósitos, à medida que a concentração era incrementada, com a diminuição dos espaços vazios, os quais passaram a ser ocupados pela argila.

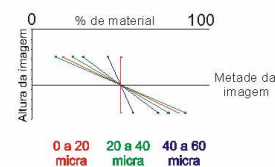
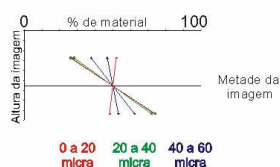
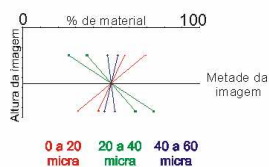
Alguma diferença no contraste das imagens (p. ex. 10.23c) não são diferenças no depósito ao longo da vertical, mas apenas são marcas oriundas da montagem do mosaico das imagens.



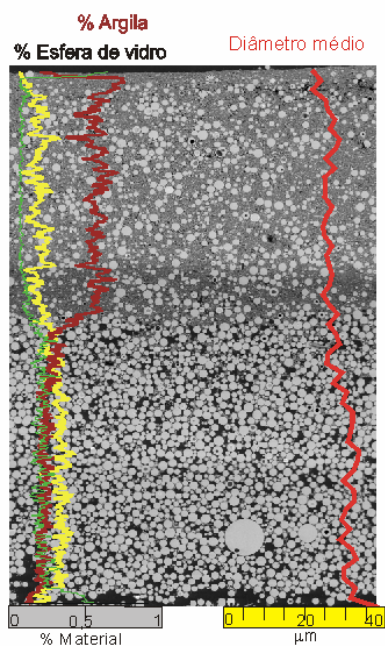
M 2 - 080 cm

M 2 - 180 cm

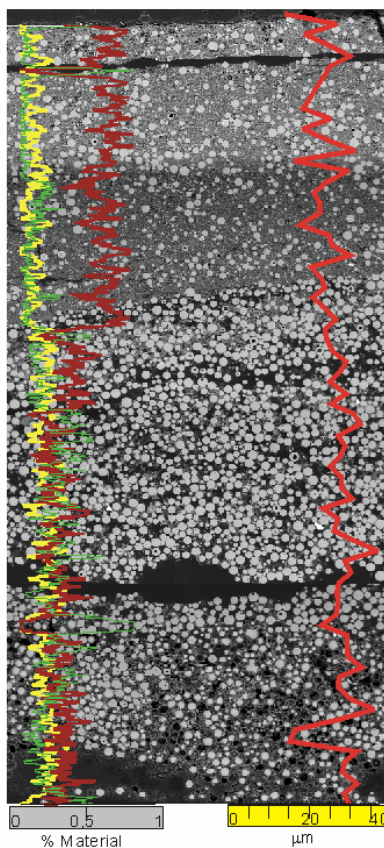
M 2 - 280 cm



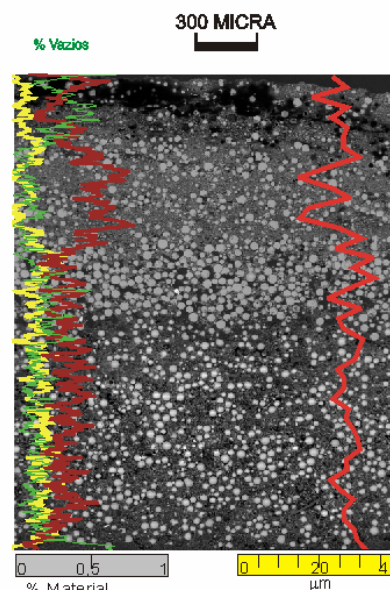
B)



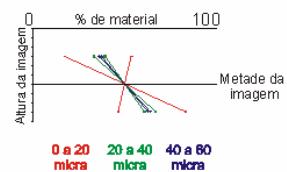
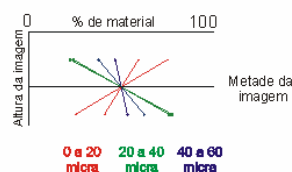
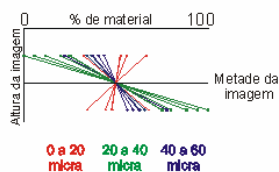
M 15 - 080 cm

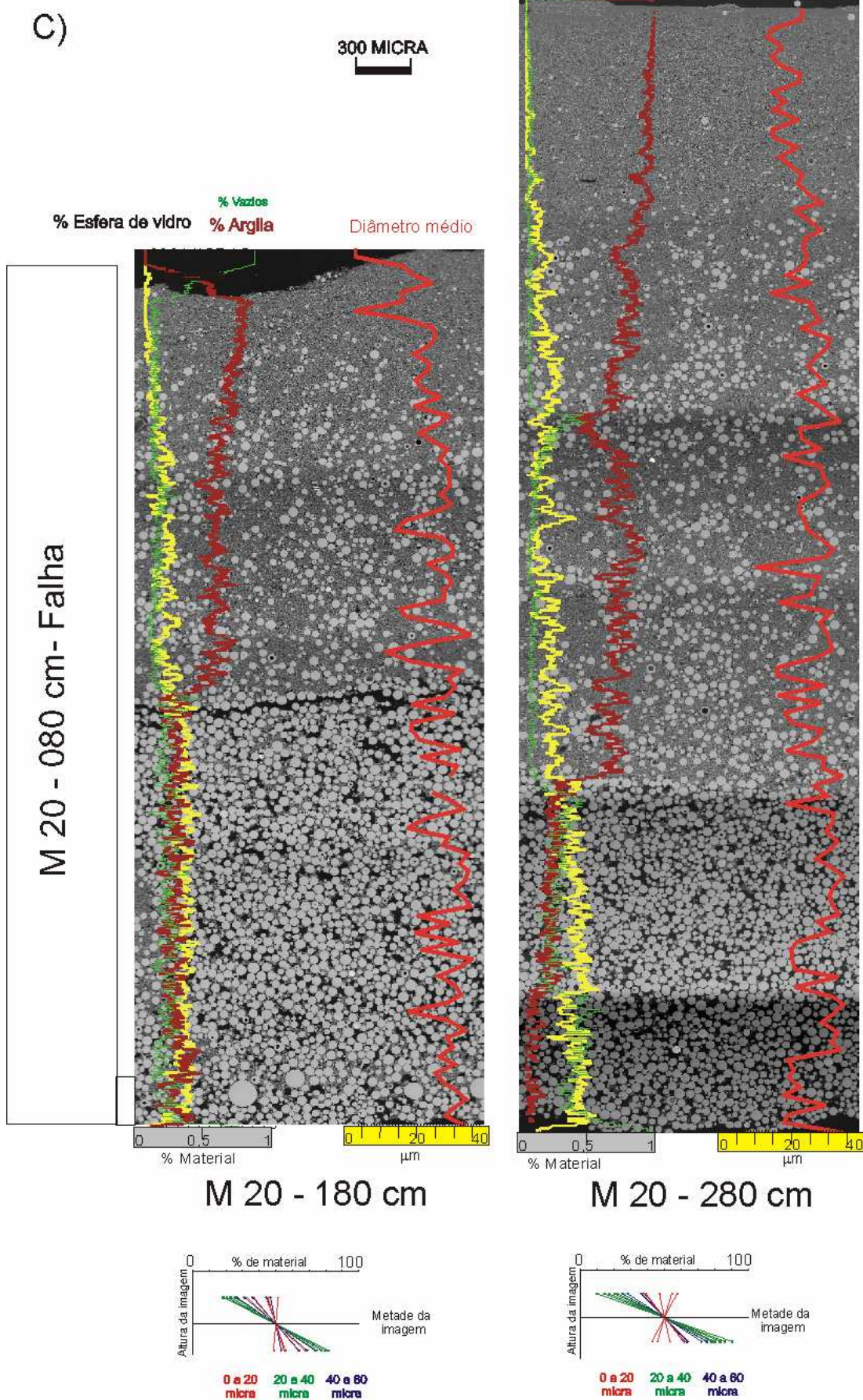


M 15 - 180 cm

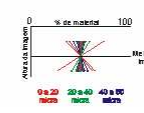
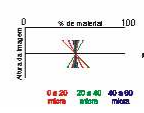
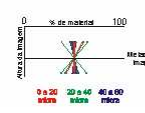
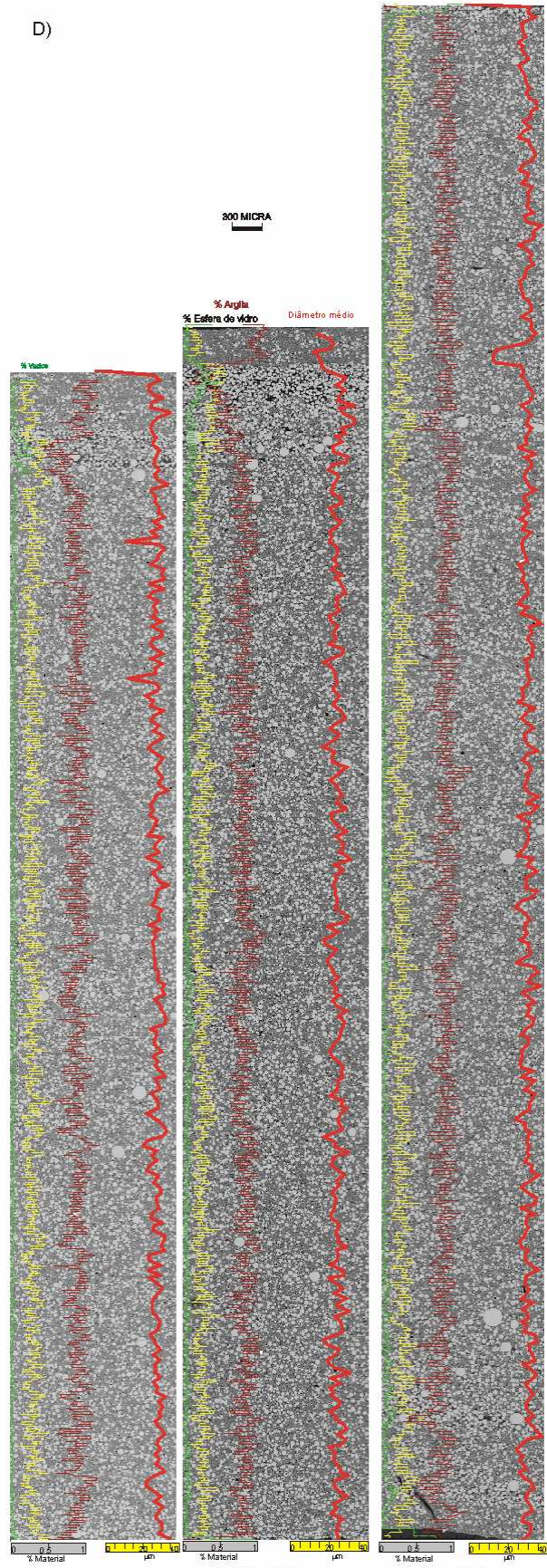


M 15 - 280 cm



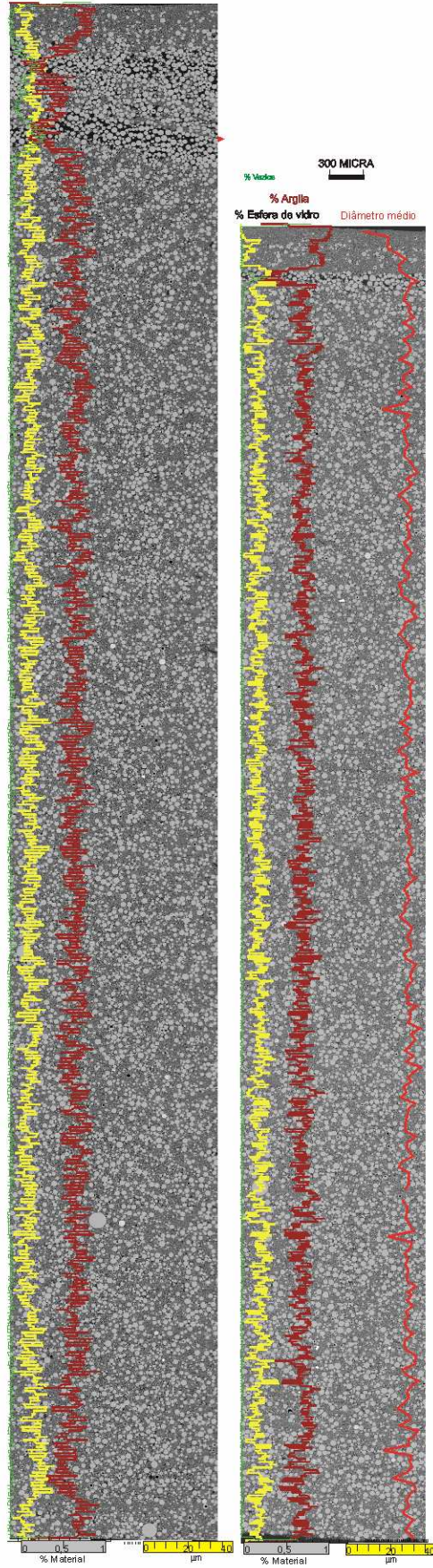


D)



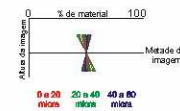
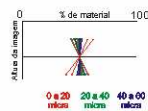
E)

M 30 - 080 cm- Falha



M 30 - 180 cm

M 30 - 280 cm



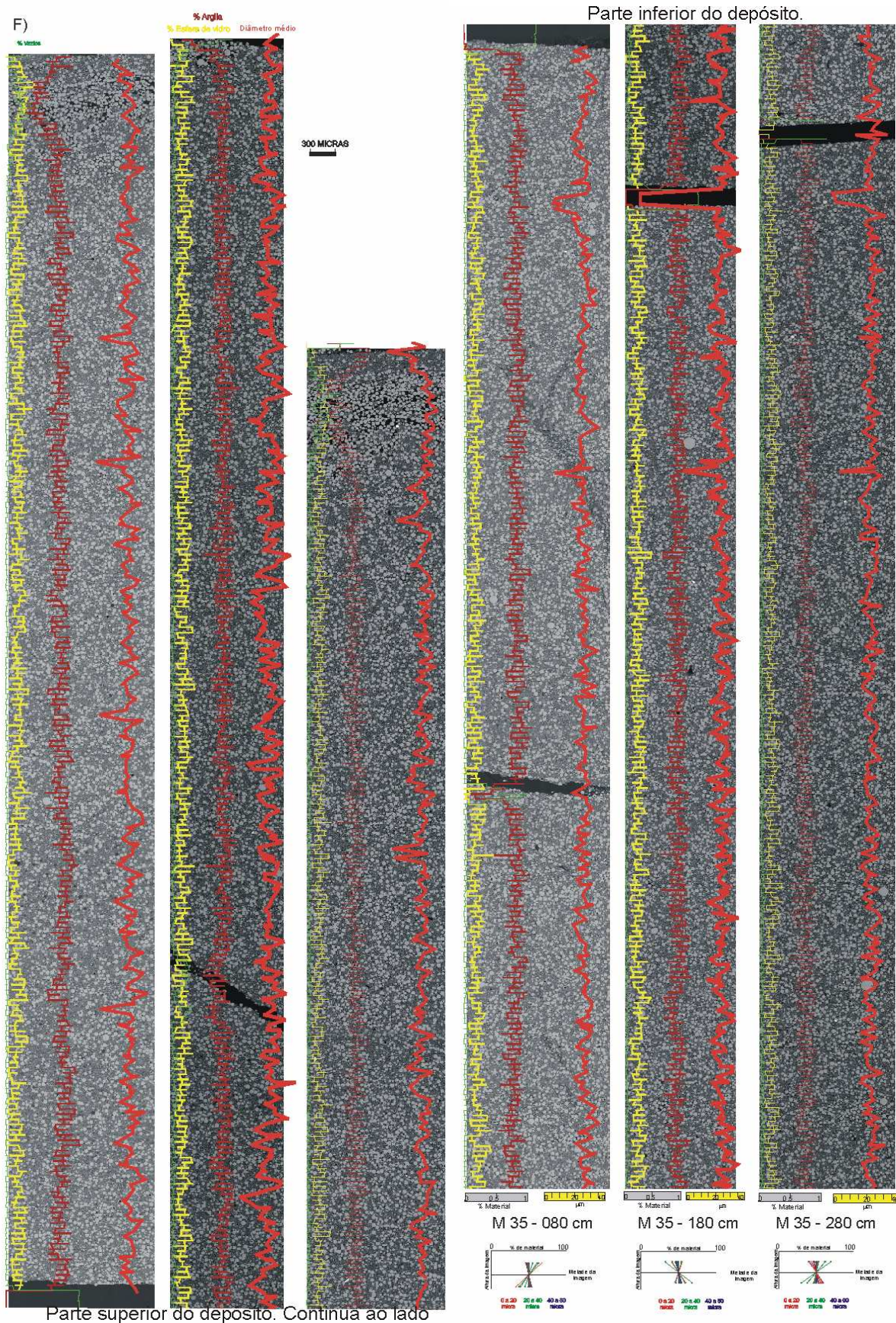


Figura 10.23 Imagens processadas no MEV do grupo misto com o resumo dos parâmetros avaliados ao longo do item 10.3.3: a) $C_{vol} = 2,5\%$; b) $C_{vol} = 15\%$; c) $C_{vol} = 20\%$; d) $C_{vol} = 25\%$; e) $C_{vol} = 30\%$ e; f) $C_{vol} = 35\%$;

10.3.4 Descrição microscópica do grupo transição

Neste item serão apresentados os resultados, de cinco dos sete ensaios deste grupo, do grupo transição e obtidos pela análise microscópica das imagens de MEV. Os dois experimentos com maior quantidade de argila (10B:90K e 0B:100K), não foram amostrados pela dificuldade de análise da argila pela metodologia proposta.

10.3.4.1 Descrição visual das imagens microscópicas

As imagens do grupo transição estão apresentadas na figura 10.24, segundo o teor inicial de argila adotado para cada ensaio.

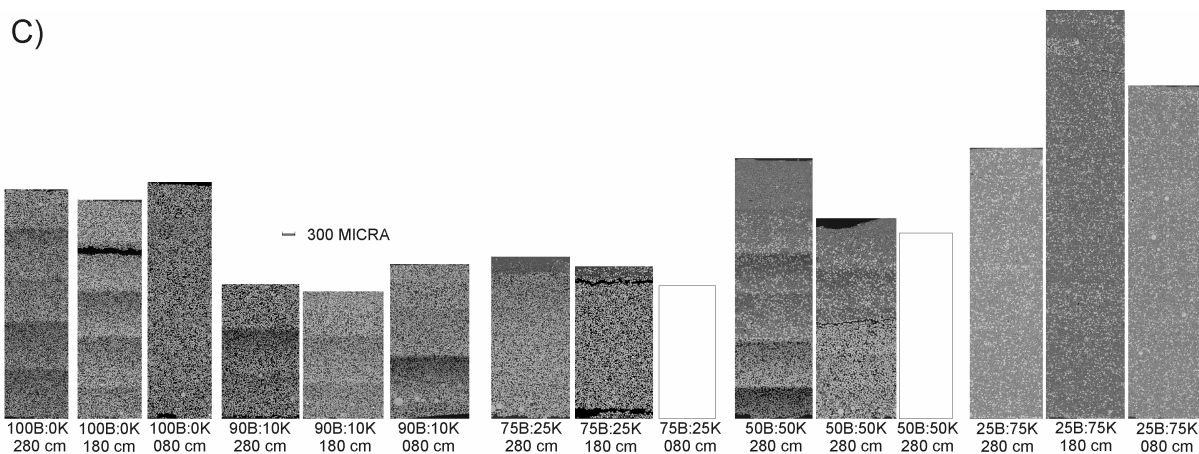


Figura 10.24 Imagem das amostras processadas no MEV em três posições ao longo do canal para os ensaios do grupo transição

Qualitativamente, as imagens apontam pouca influência da argila no depósito dos três ensaios predominantemente não coesivos (100B:0K até 75B:25K), já que elas foram encontradas apenas no topo do depósito, devido à decantação dos grãos. Nesse caso, muito pouca argila foi encontrada no interior da matriz. O comportamento começou a se modificar no ensaio (50B:50K, o qual equivale ao ensaio M_20), identificando-se o depósito com três camadas bem distintas descritos no grupo misto, ou seja, com material não coesivo mais grosso junto ao fundo (base), com argila no topo e com uma camada intermediária de argila e esferas de vidro. Acima do teor de 50% de argila presente na corrente, a predominância dos grãos coesivos foi total, sendo a matriz do depósito dominada por esse tipo de grãos. Junto ao topo, porém, não foi identificada a presença marcante do depósito das correntes com mais baixa concentração, o que pode se explicado pela menor quantidade de esferas de vidro na mistura.

10.3.4.2 Porcentagem do tipo de sedimento presente nos depósitos

A figura 10.25 apresenta o resultado da análise, ao longo da vertical, da porcentagem dos tipos de sedimentos.

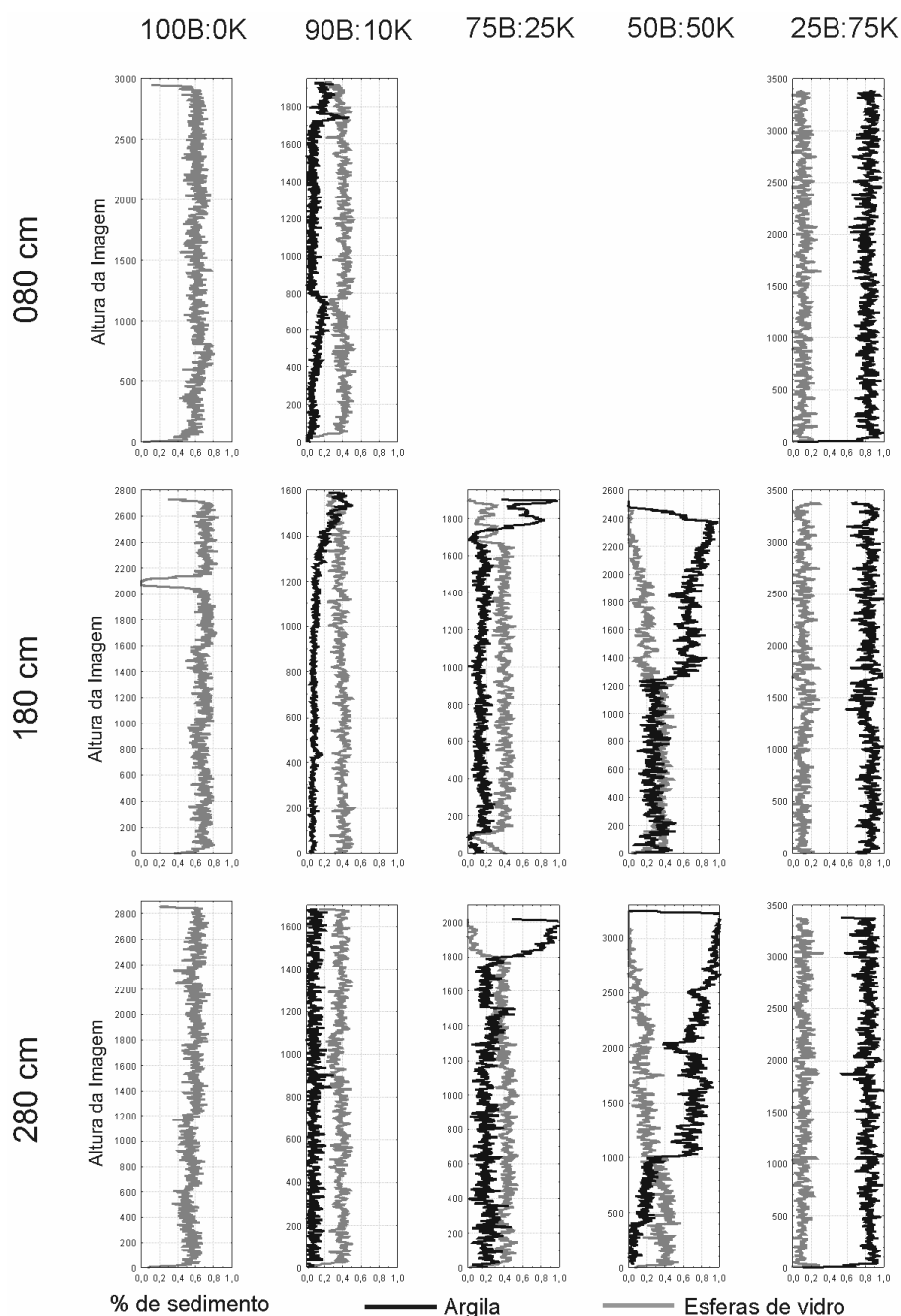


Figura 10.25 Porcentagem do tipo de sedimentos ao longo da vertical para os ensaios do grupo transição.

Pela análise da figura, foram identificados, novamente, os três tipos de comportamento descritos para o grupo misto, porém dessa vez, a variável do estudo foi a quantidade de argila presente na mistura. Para as correntes menos coesivas (pouca presença de argila), o material não coesivo predominou na amostra, com uma inversão dos valores junto ao topo. Naturalmente, com o incremento da argila na mistura, a tendência seria da predominância desse material, o que foi comprovado gradativamente, com o incremento da chamada camada intermediária no depósito entre os grãos puramente coesivos (topo) e não coesivos (base). A partir dos 75% de argila, o predomínio foi total, com a modificação da matriz do depósito.

A tabela 10.3 e a figura 10.26 apresentam os valores médios da porcentagem de grãos para cada ensaio em função da variação do teor de argila.

Tabela 10.3 Valores de porcentagem do tipo de sedimento para o grupo transição.

C _{vol} (%)	80 cm				180 cm				280 cm			
	ST	EV	Ca	V	ST	EV	Ca	V	ST	EV	Ca	V
0	60,79	60,79	-	39,21	66,52	66,52	-	33,48	66,52	66,52	-	33,48
10	69,51	60,03	9,48	30,49	70,12	58,60	11,52	29,88	61,74	55,77	5,97	38,26
25	-	-	-	-	70,85	52,20	18,64	29,15	81,58	53,68	27,91	18,42
50	-	-	-	-	81,73	34,70	47,03	18,27	86,29	28,95	57,34	13,71
75	98,15	16,33	81,82	1,85	98,93	16,37	82,56	1,07	98,63	16,12	82,50	1,37
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	76,15	45,72	30,43	23,85	77,63	45,68	31,95	22,37	78,95	44,21	34,74	21,05
Desvio padrão	19,55	25,45	44,75	19,55	13,19	20,15	33,18	13,19	14,99	20,87	34,90	14,99

ST = % sedimento total no depósito EV = % material não-coesivo (esferas de vidro);
Ca = % material coesivo (caulin) V = % de vazios na amostra

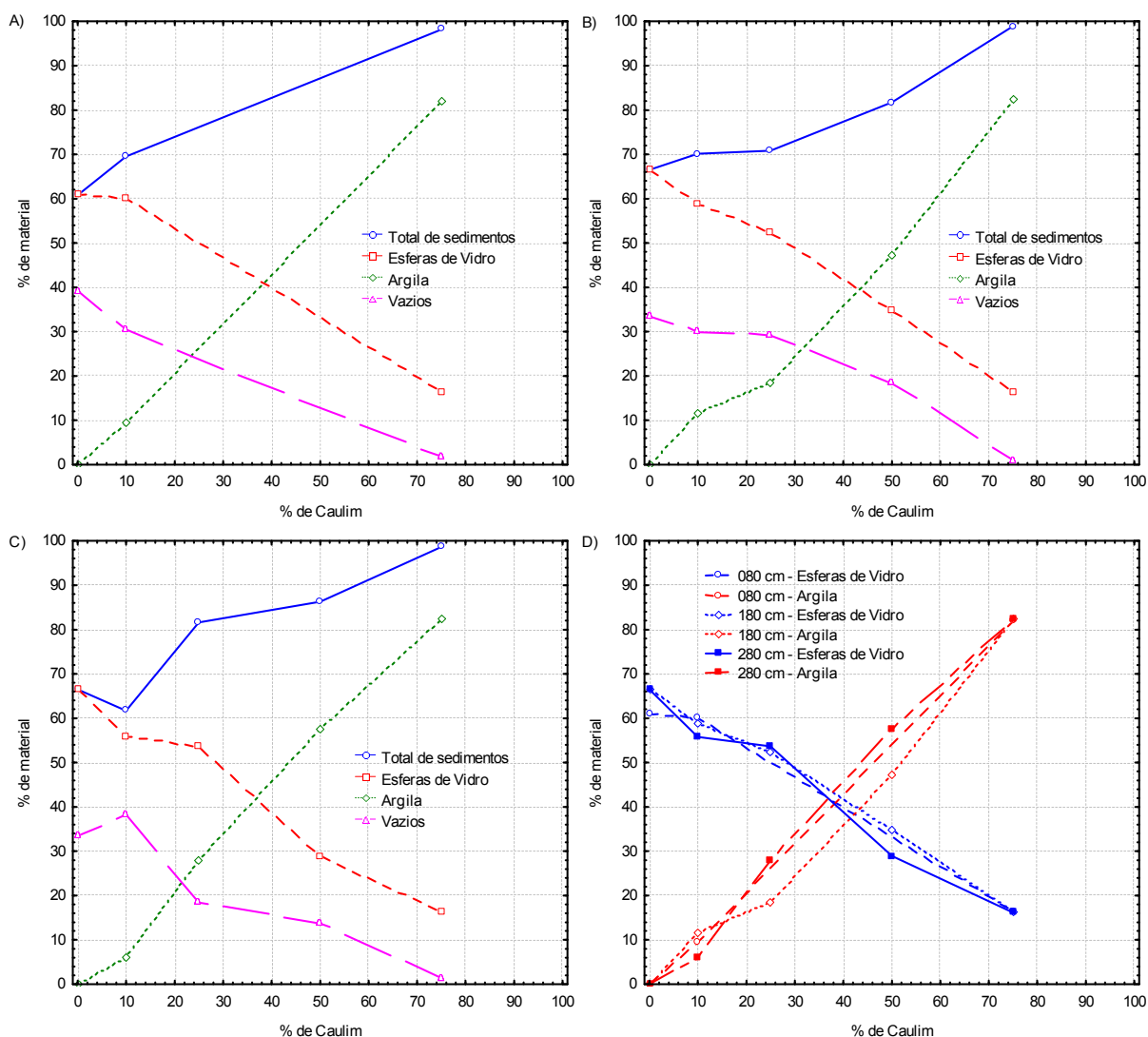


Figura 10.26 Relação entre a porcentagem de tipo de sedimento presente no depósito e a concentração volumétrica para os ensaios do grupo transição: a) 80 cm da fonte; b) 180 cm da fonte; c) 280 cm da fonte e; d) Só esfera de vidro e argila nas três posições.

Novamente, o comportamento verificado foi praticamente o mesmo já descrito anteriormente, ou seja, com o incremento de sedimento total à medida que o depósito vai ficando mais argiloso (diminuindo os espaços vazios) e não apresentando muita diferença entre as três posições do canal. Como neste caso, a quantidade de sedimentos na mistura foi variável, foi notado que a presença de grãos não coesivos decresceu linearmente com o incremento da argila, mantendo uma proporção com a quantidade injetada.

10.3.4.3 Gradação dos grãos

Com relação à gradação granulométrica dos grãos não coesivos, a figura 10.27 apresenta os resultados determinados.

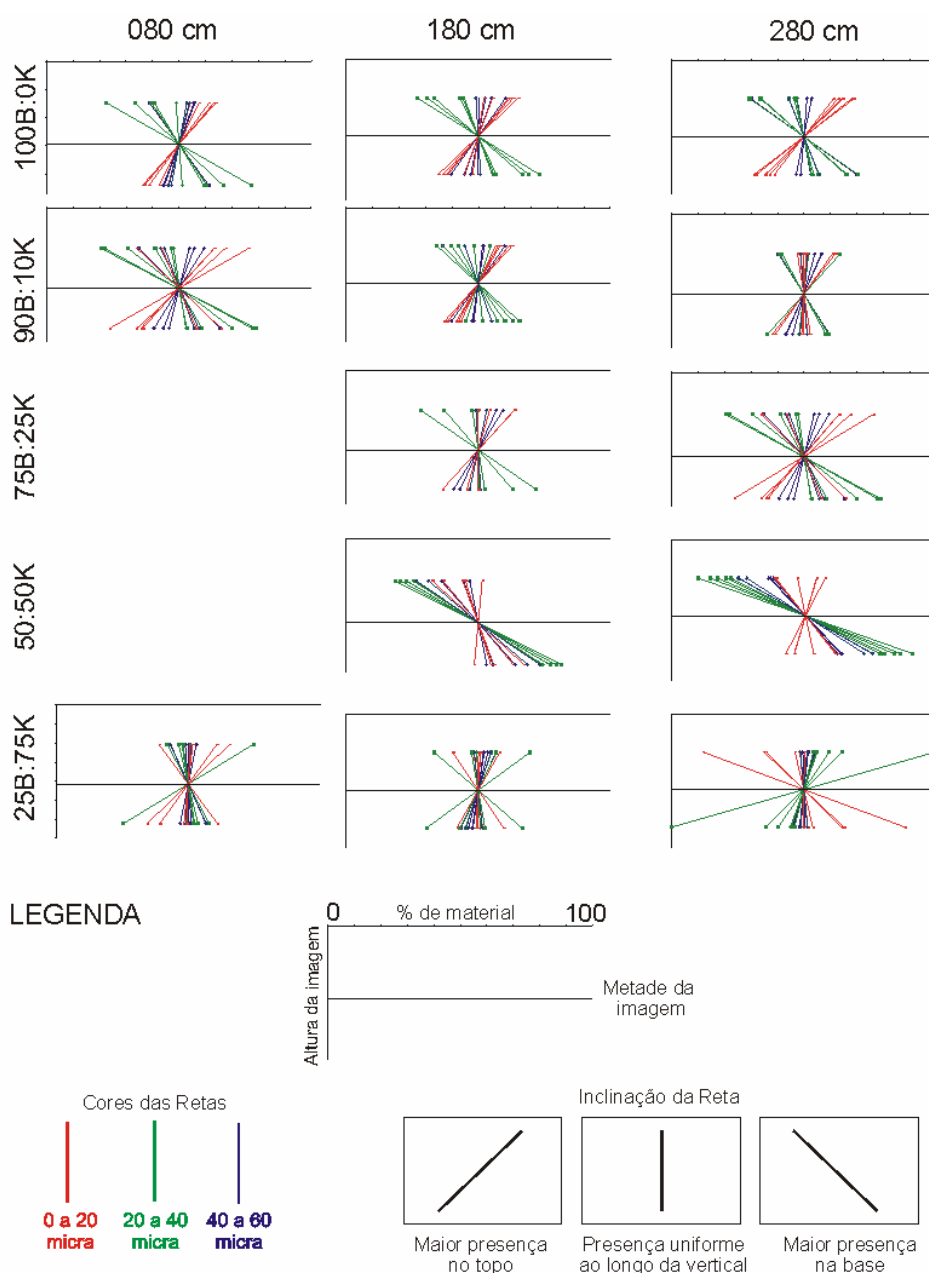


Figura 10.27 Porcentagem de esfera de vidro presente no depósito amostrados no MEV ao longo da altura (gradação) para os ensaios do grupo transição.

Também, para esse tipo de resultado, o comportamento encontrado foi similar ao do grupo misto, ou seja, para os fluxos com predominância de material não coesivo, o depósito apresentou uma gradação normal, enquanto que, para os depósitos predominado por material coesivo, o comportamento foi de depósito maciço.

10.3.4.4 Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical

Seguindo a mesma metodologia empregada para os grupo não coesivo e misto, a figura 10.28 apresenta a distribuição do diâmetro médio dos grãos ao longo da vertical do depósito para as três amostras coletadas no experimento. Nesse caso, o intervalo utilizado para determinar o diâmetro médio dos grãos foi 100 linhas da imagem (100 pixels).

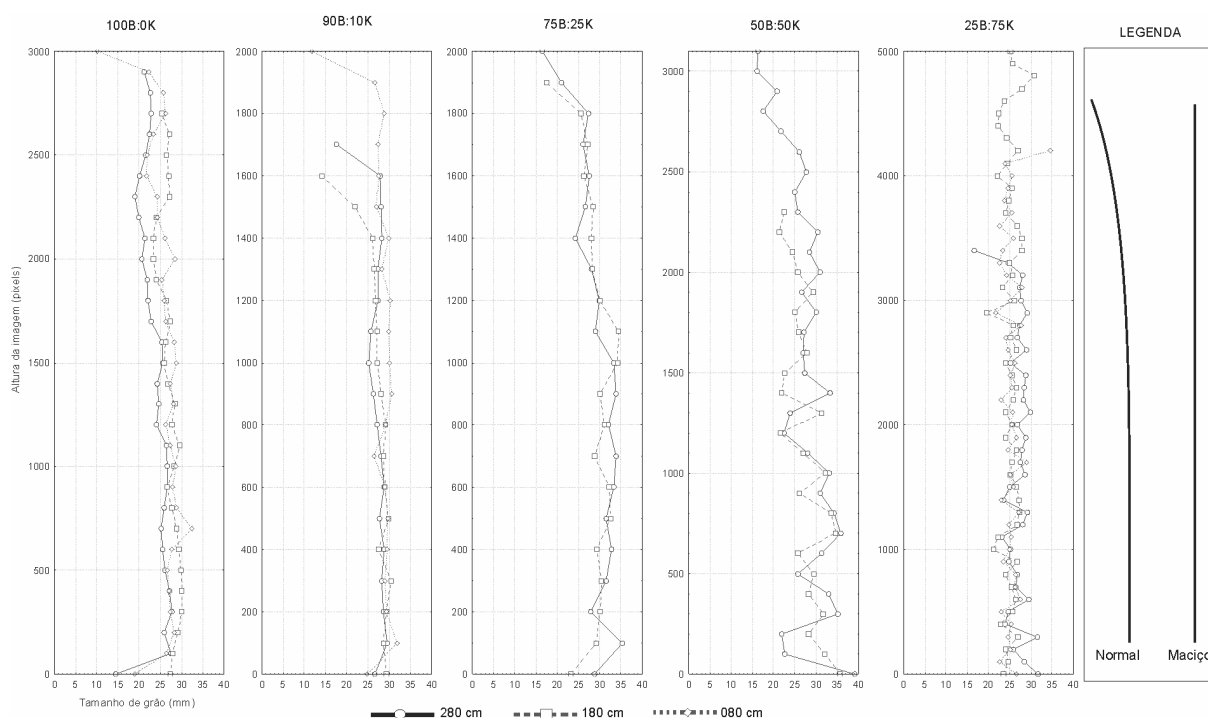


Figura 10.28 Valor do diâmetro médio dos grãos ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo transição.

Como pode ser observado na figura 10.28, os resultados encontrados seguiram a mesma tendência dos resultados descritos anteriormente, com a clara presença de material mais grosso junto ao fundo do depósito (base) e com um afinamento em direção ao topo. Entretanto, para o ensaio 25B:75K, predominou a presença de argila no depósito, sendo constatada a distribuição mais homogênea das esferas de vidro ao longo a vertical, caracterizando assim, uma gradação maciça,

10.3.4.5 Distribuição do tamanho do grão médio ao longo da vertical - Laminações

A análise do diâmetro médio dos grãos ao longo da vertical aliada à porcentagem de material depositada pode nos indicar se houve algum processo de laminação no interior da corrente, de modo a identificar a mudança no processo deposicional. A figura 10.29 apresenta

o valor do diâmetro médio dos grãos em intervalos de 25 linhas da imagem (intervalado a cada 25 pixels na vertical).

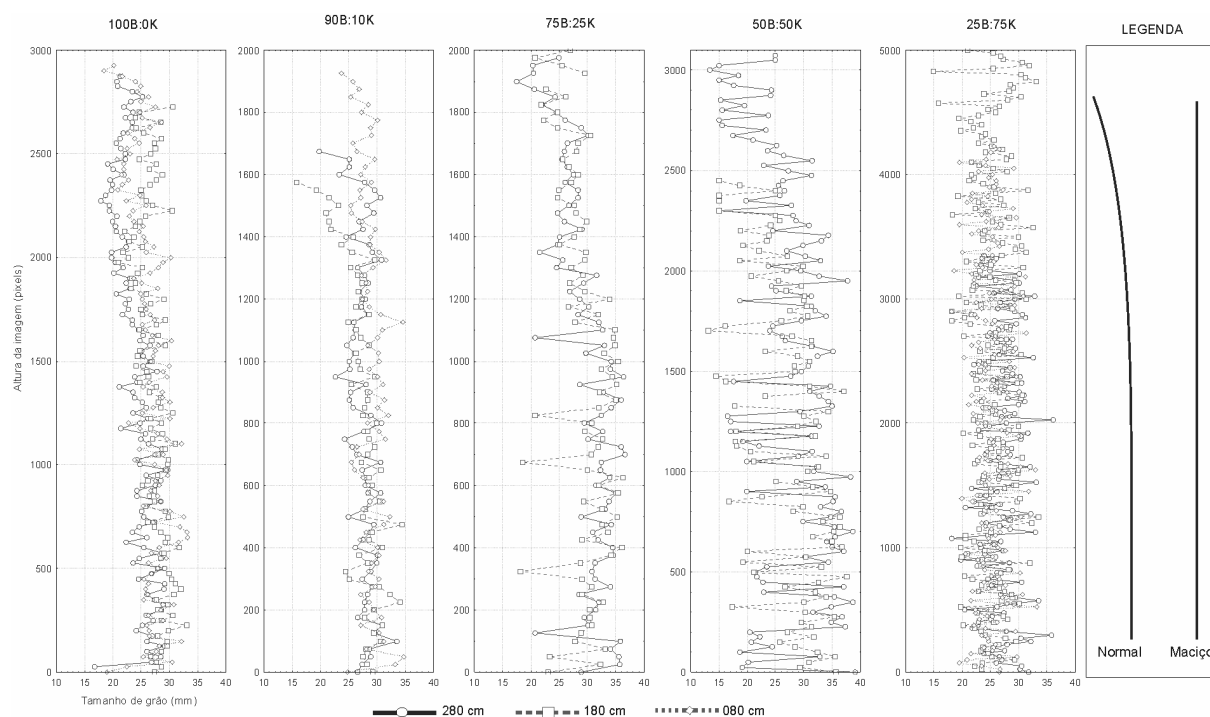


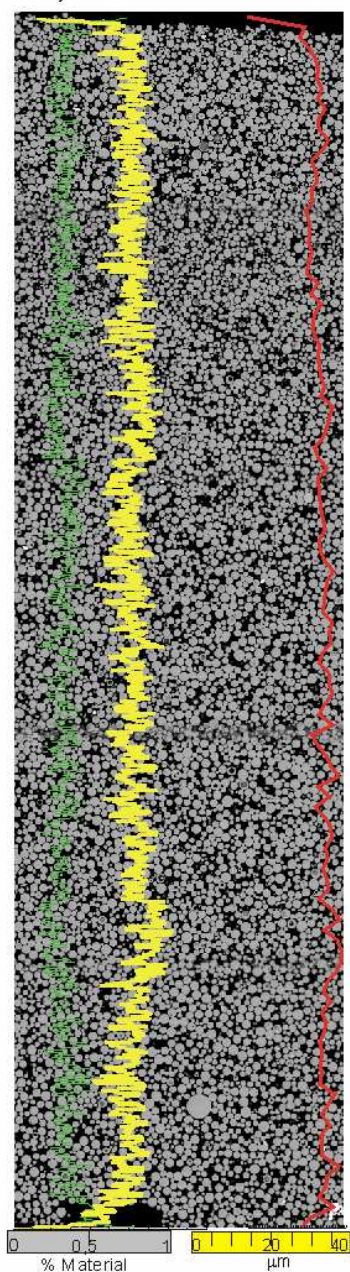
Figura 10.29 Valor do diâmetro médio dos grãos (intervalado a cada 25 pixels na vertical) ao longo da altura em três posições do canal para os ensaios amostrados do grupo transição.

Apesar dos grãos de argila não serem identificados pela metodologia utilizada, os resultados apresentados para a laminação dos grãos podem ser considerados, uma vez que, pelo método aplicado, quando não há presença de esferas de vidro na linha da imagem, estaria-se detectando a argila presente. Desta forma, foi notada que a laminação foi melhor identificada para as correntes com maiores porcentagens de argila, ou seja, 50B:50K e 25B:75K. O experimento 75B:25K apresentou alguma variação do tamanho do grão na vertical, entretanto esse comportamento está associado a ocorrência espaços vazios na amostra e não a espaços preenchidos por argila.

Breve discussão

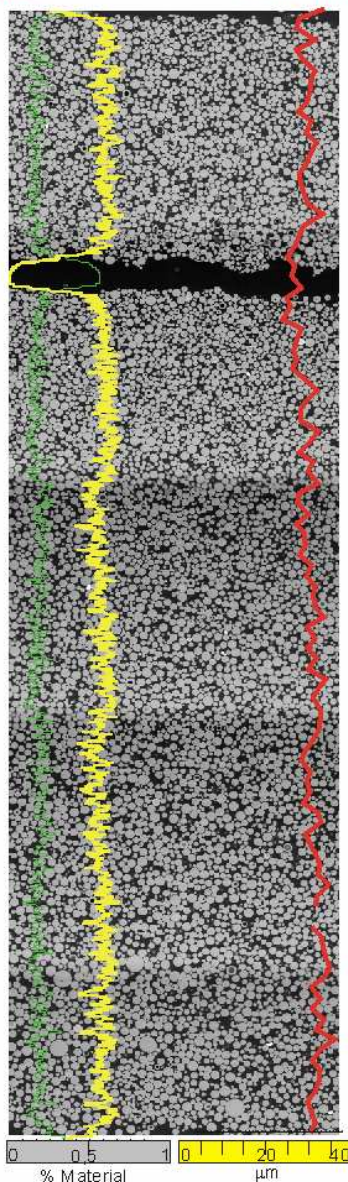
As figuras 10.30a-e sintetizam os resultados do grupo transição. O incremento da presença de argila, novamente alterou o comportamento dinâmico e deposicional do fluxo, uma vez que os três padrões identificados no item anterior se repetiram. Esse resultado demonstra que não só a concentração volumétrica altera o comportamento do fluxo, mas o efeito da presença de argila e seu incremento indicam que esse parâmetro pode ser fundamental para a dinâmica do fluxo. Alguma diferença no contraste das imagens (p. ex. 10.30a e 10.30b) não são diferenças no depósito ao longo da vertical, mas apenas marcas oriundas da montagem do mosaico das imagens.

A)

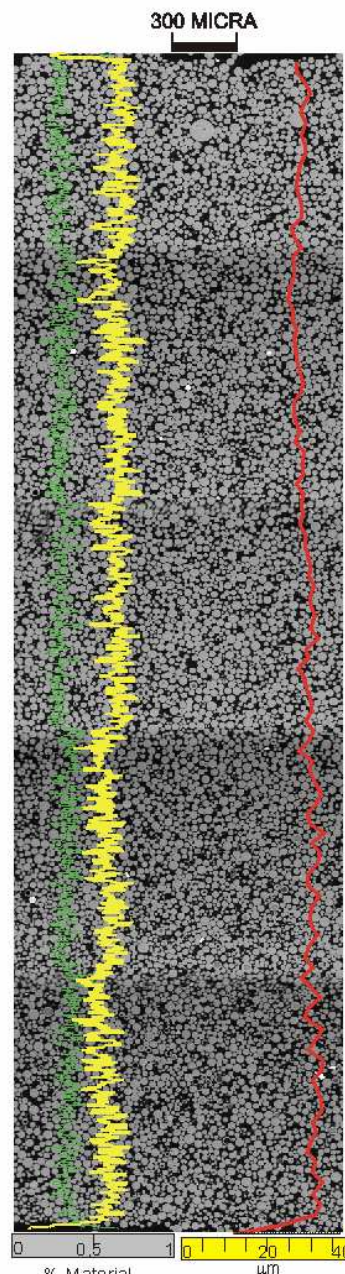


100B:0K - 080 cm

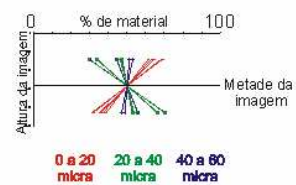
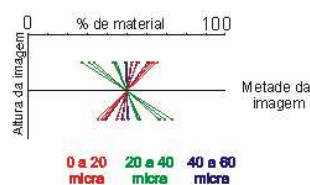
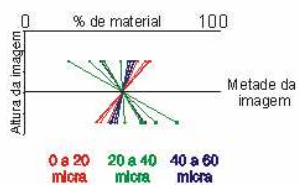
% Vazios % Esfera de vidro Diâmetro médio



100B:0K - 180 cm

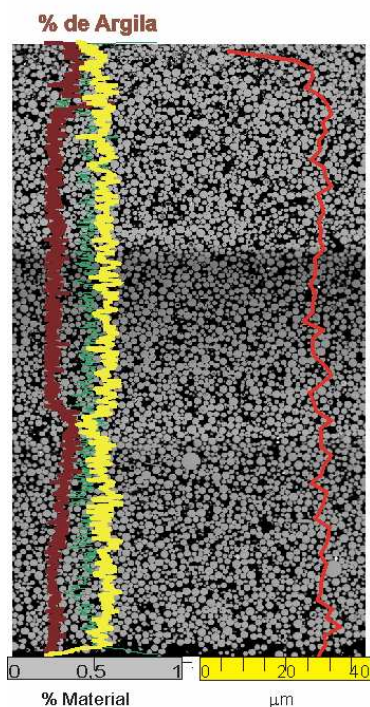


100B:0K - 280 cm

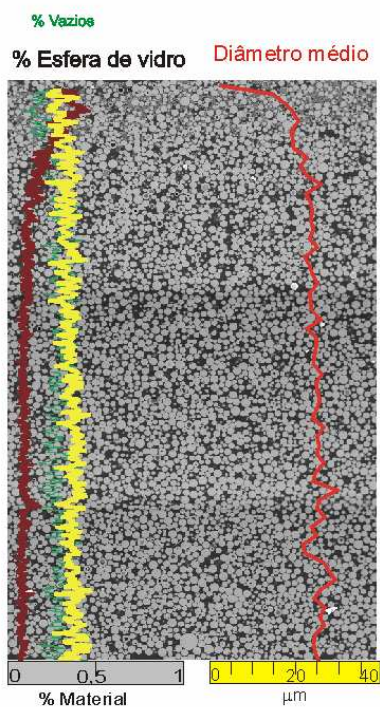


B)

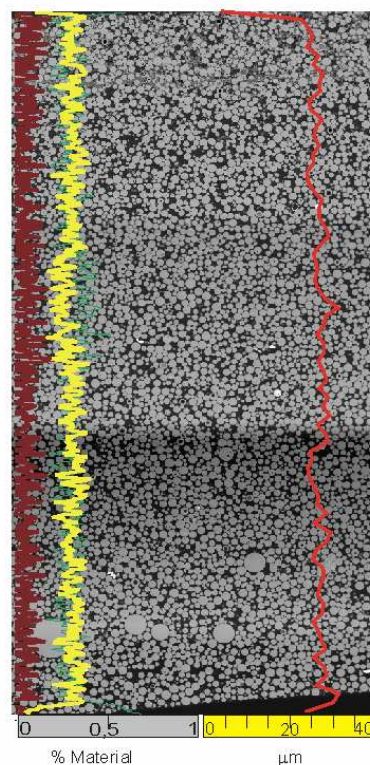
300 MICRA



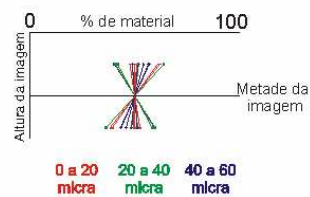
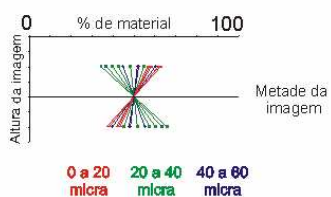
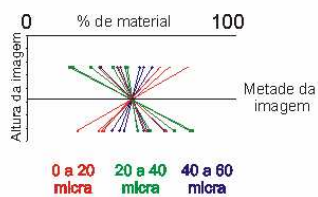
90B:10K - 080 cm



90B:10K - 180 cm



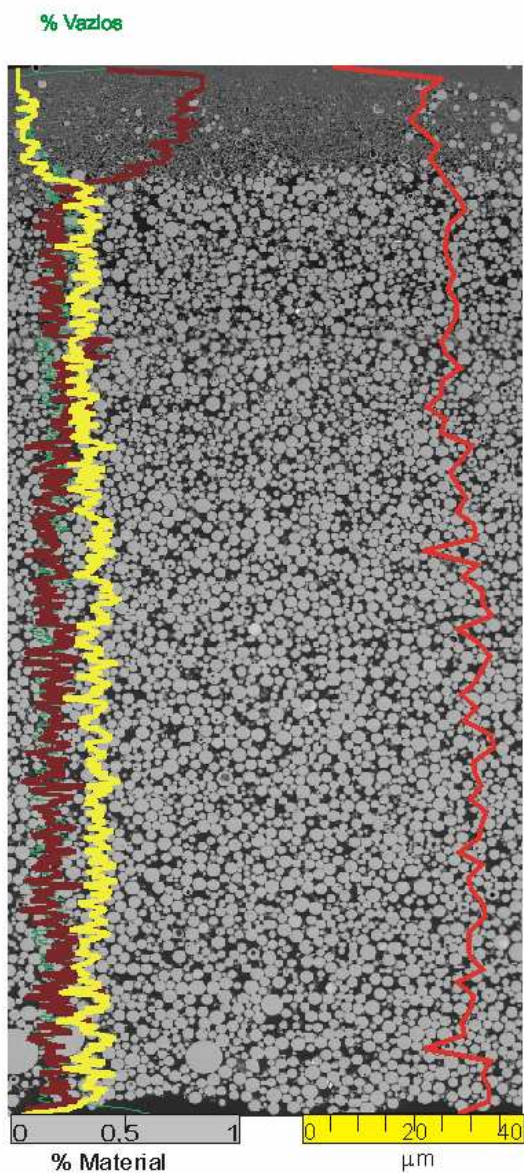
90B:10K - 280 cm



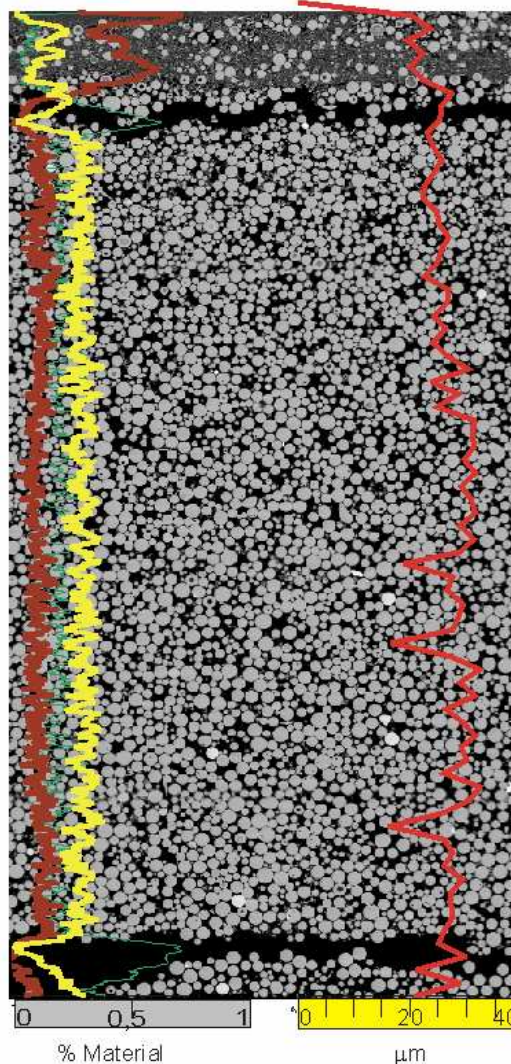
C)

300 MICRA

75B:25K - 080 cm - Falha

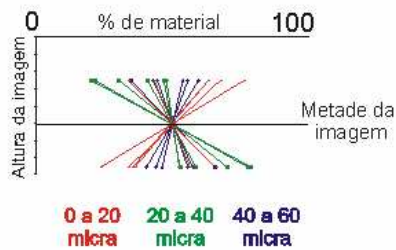
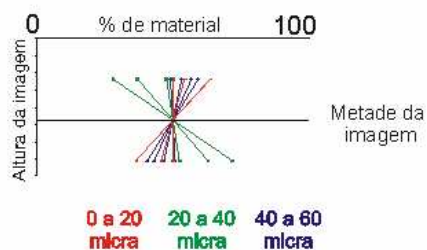


% de Argila
% Esfera de vidro Diâmetro médio



75B:25K - 180 cm

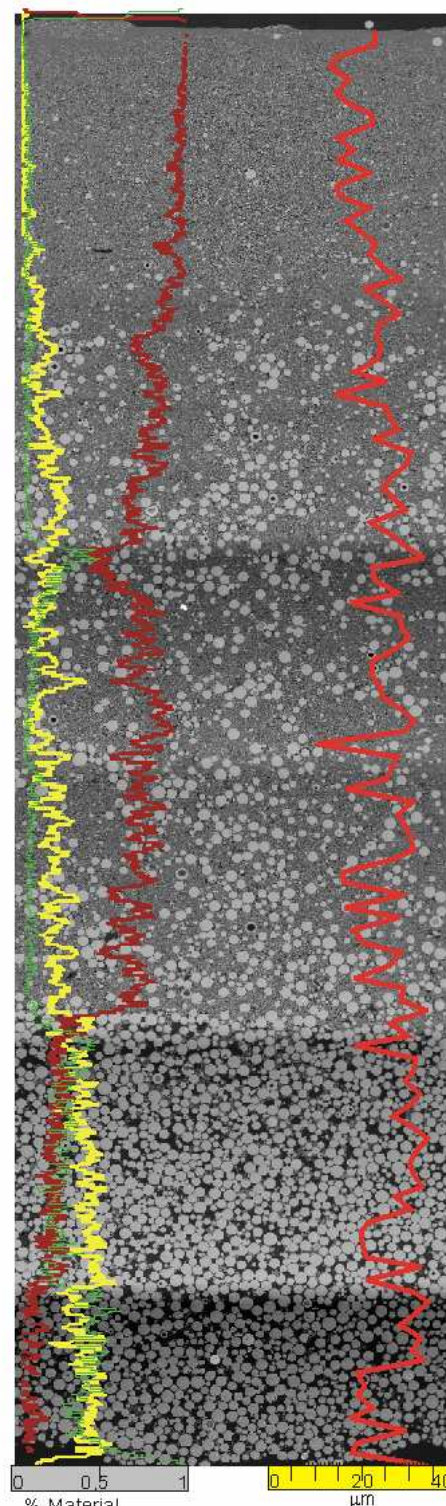
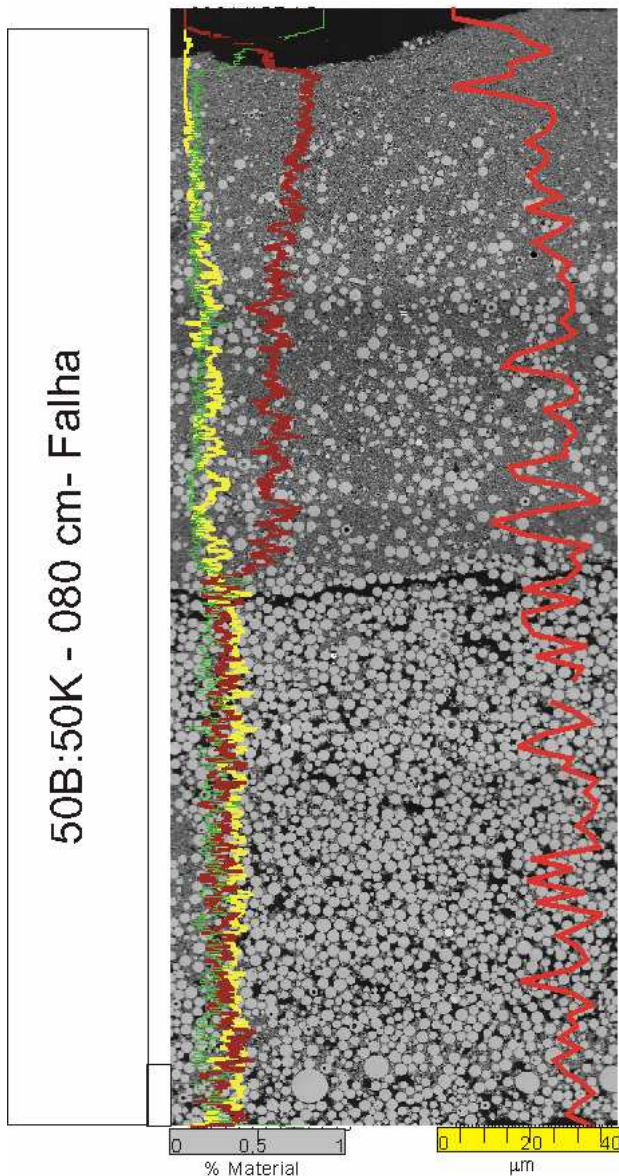
75B:25K - 280 cm



D)

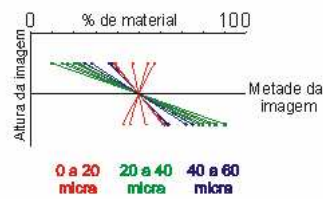
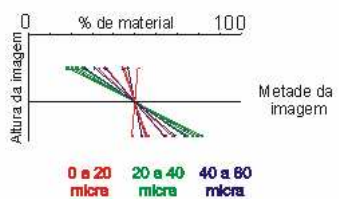
300 MICRA

% Esfera de vidro % Vazios % Argilla Diâmetro médio



50B:50K - 180 cm

50B:50K - 280 cm



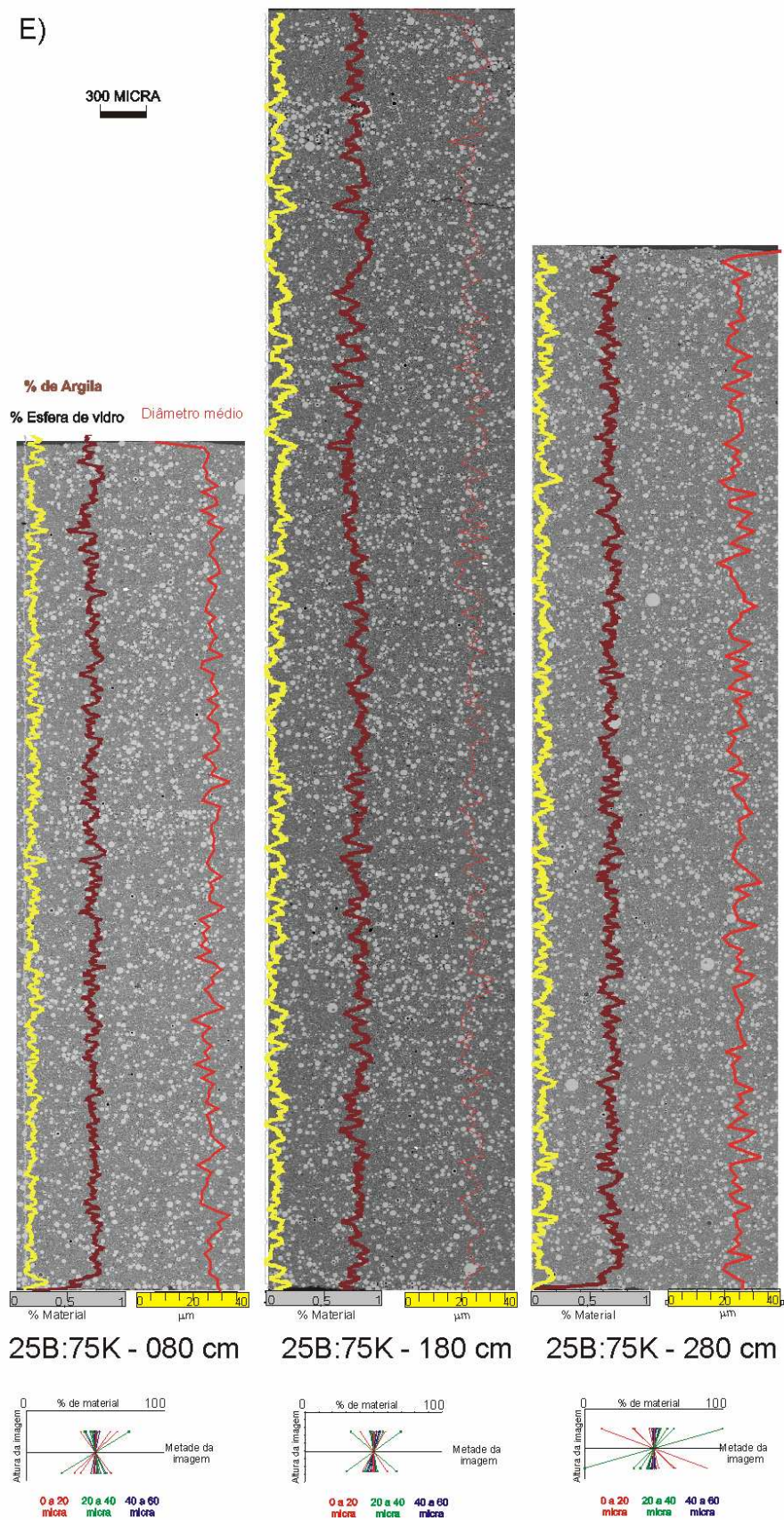


Figura 10.30 Imagens processadas no MEV para o grupo transição com o resumo dos parâmetros avaliados ao longo do item 10.3.3: a) 100B:0K; b) 90B:10K; c) 75B:25K; d) 50B:50K e; e) 25B:75K.

10.4 SÍNTESE DO DEPÓSITO FINAL.

A avaliação dos depósitos formados pela simulação experimental permitiu coletar dados para correlacionar os processos hidrodinâmicos dos fluxos simulados com o seu resultado final. Dessa forma, tanto a caracterização macroscópica do depósito quanto a caracterização microscópica (imagens processadas no MEV) servem de subsídio para o entendimento dos mecanismos de deposição desses fluxos. Ainda, a avaliação de algumas características ao longo da distância do canal é fundamental para o entendimento da evolução espacial das correntes de turbidez e de como se processam suas transformações internas.

Com relação aos depósitos formados, foram notadas diferenças com relação ao incremento da concentração volumétrica do fluxo, sendo, nesse caso, avaliada pelo grupo não coesivo, porém a presença de argila altera significativamente os depósitos, gerando a formação de até três padrões de deposição distintos para os fluxos do grupo misto e transição.

Cabe salientar, ainda, que a metodologia desenvolvida para a avaliação das propriedades microscópicas do depósito permitiu uma boa aproximação dos resultados, em especial, para os fluxos com presença significativa de esferas de vidro.

11 ACOPLAMENTO DOS PROCESSOS HIDRODINÂMICOS COM O DEPÓSITO: MODELOS GERADOS COM BASE NA REOLOGIA, CONCENTRAÇÃO E PRESENÇA DE ARGILA

Nos capítulos 7, 8, 9 e 10 foram apresentados e analisados os resultados dos experimentos quanto às características reológicas, geométricas, hidrodinâmicas e deposicionais dos fluxos simulados, tendo como variáveis de entrada a concentração volumétrica e o tipo de sedimento (presença de argila) utilizado.

Com base nesses resultados detalhados anteriormente, buscar-se-á, nesse capítulo, acoplar os processos hidrodinâmicos das correntes simuladas com as características dos depósitos formados, estabelecendo a correlação entre as condições iniciais de fluxo com o resultado final.

11.1 DIAGRAMA SÍNTESE DOS RESULTADOS

Na busca de uma correlação entre os parâmetros hidrodinâmicos e deposicionais, em um primeiro momento, procurar-se-á realizar uma síntese dos dados, buscando verificar se eles podem ser agrupados segundo suas características cinemáticas, geométricas, deposicionais e reológicas.

A tabela 11.1 apresenta as variáveis avaliadas nessa síntese, mostrando as faixas de concentração e/ou presença de argila que resultavam nesses tipos de tendência.

Pela tabela 11.1 pode ser notado que, para cada parâmetro avaliado, os ensaios foram agrupados até quatro zonas delimitadas pela concentração (grupos não coesivo, misto e coesivo) e presença de argila (transição). Com base na média dos valores encontrados em cada um destes agrupamentos, foi possível criar um diagrama síntese que ilustra uma delimitação, através de uma linha ligando esses valores médios, na qual os fluxos são classificados em regiões com comportamentos semelhantes com relação às características hidrodinâmicas, geométricas, reológicas e deposicionais. A figura 11.1 apresenta esse diagrama síntese dos resultados.

Tabela 11.1 Agrupamento de igual comportamento quanto aos parâmetros avaliados, definidos segundo faixas de concentração (ensaios NC, M e C) e/ou presença de argila (ensaios T)

Ensaios	Variável	Agrupamento	Características cinemáticas velocidade								Concentração				Geometria			
			Série temporal		Perfil de velocidade		Vel. Média		Vel. Máxima		Série temporal		Perfil de concentração		Espessura cabeça/corpo		Geometrias Médias	
			Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
NC	Concentração Volumétrica	1	0	10	0	5	0	10	0	15	0	20	0	5	0	20	0	5
		2	10	25	5	20	10	25	15	30	20	35	5	35	20	35	5	25
		3	25	35	25	35	25	35	30	35							25	35
		4																
M	Concentração Volumétrica	1	0	10	0	5	0	10	0	20	0	5	0	5	0	20	0	15
		2	10	20	5	20	10	20	20	35	10	20	5	25	20	35	15	35
		3	20	30	20	35	20	35			20	30	25	35				
		4	30	35							30	35						
C	Concentração Volumétrica	1	0	5	0	5	0	5	0	10	0	5	0	2,5			0	5
		2	5	10	5	15	5	10	10	20	5	15	5	20			5	25
		3	10	20	20	25	10	25	20	25	15	20	20	25				
		4	20	25							20	25						
T	% de Argila	1	0	25	0	25	0	50			0	10	0	10			0	50
		2	25	75	25	50	50	100			10	50	10	50			50	100
		3	75	90	50	100					50	100	50	90				
		4	90	100									90	100				

Ensaios	Variável	Agrupamento	Características Hidrodinâmicas								Depósito				Reologia			
			Subcamada viscosa		Tensão de cisalhamento		Fluxo de sedimento		Taxa de deposição		Espessura depósito		Balanço de massa		Gradação		Comportamento	
			Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
NC	Concentração Volumétrica	1	0	15	0	35	0	5	0	0	20	0	0	15	0	20	0	35
		2	15	35			5	20	15	20	35	15	15	35	20	35		
		3					20	35										
		4																
M	Concentração Volumétrica	1	0	20	0	20	0	2,5	0	0	10	0	0	10	0	10	0	15
		2	20	35	20	35	5	20	10	10	35	10	10	25	10	35	15	35
		3					20	30	25			25	25	35				
		4					30	35										
C	Concentração Volumétrica	1	0	5	0	15	0	2,5	0	5					0	5	0	5
		2	10	25	15	25	2,5	5	5	25					5	25	5	25
		3					5	20										
		4					20	25										
T	% de Argila	1	0	50	0	50	0	10	0	0	50	0	0	10	0	50	0	25
		2	50	100	50	100	10	50	10	50	100	10	10	50	50	100	25	100
		3					50	100	50			50	50	100				
		4																

Seguindo os intervalos delimitados na tabela 11.1, foi possível estabelecer seis regiões, onde os valores das variáveis foram diferenciados. Os critérios de determinação de cada região serão descritos a seguir, apresentando os condicionantes reológicos, hidráulicos e deposicionais das correntes de turbidez de mais baixa concentração até as correntes de mais alta concentração.

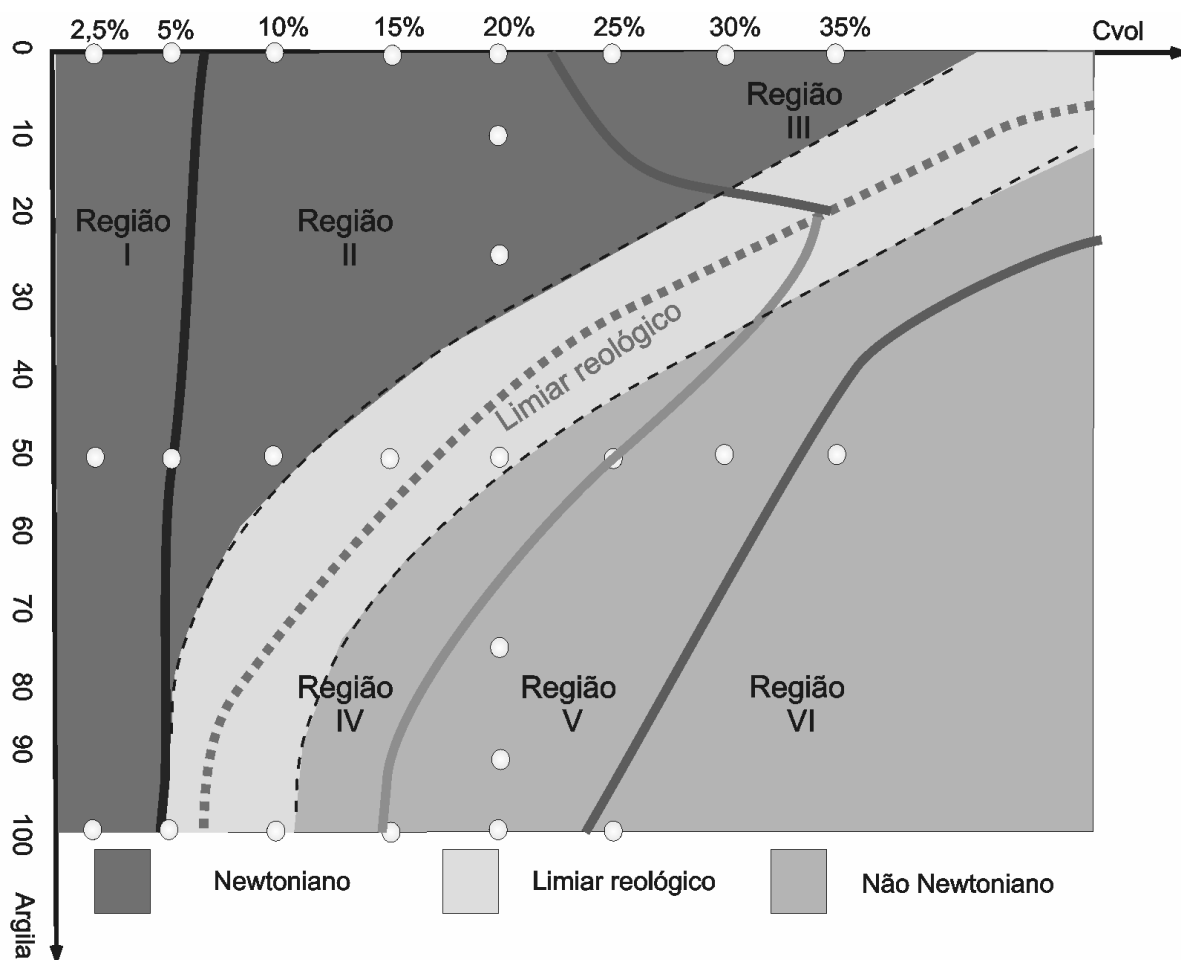


Figura 11.1 Relação da concentração volumétrica e da presença de argila utilizados na definição das seis regiões de fluxo-depósito.

11.2 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A DELIMITAÇÃO DAS SEIS REGIÕES.

Após a definição das seis regiões com tipos de fluxo diferenciados, serão descritas as características de cada região com relação aos seus aspectos reológicos, geométricos, hidrodinâmicos e deposicionais, mostrando as diferenças entre cada uma delas. Para tal, os seguintes parâmetros foram avaliados.

11.2.1 Comportamento reológico das misturas

O comportamento reológico é uma propriedade do fluido que serve para verificar como ocorre a distribuição de tensões nas misturas utilizadas nos experimentos. Essa propriedade atuou como um limite para a definição das seis regiões, dividindo no caso, os fluxos Newtonianos daqueles não-Newtonianos. A presença de argila nas misturas comandou a mudança no comportamento reológico, de tal forma que, na figura 11.1, nota-se que nas regiões I, II e III, a mistura tem o comportamento de um fluido Newtoniano, enquanto que nas regiões IV, V, VI ela tem comportamento não newtoniano. Entre as linhas tracejadas há uma

zona de transição, caracterizada como limiar reológico, no qual pode ocorrer a mudança de um comportamento para o outro.

A utilização da caracterização do comportamento reológico como elemento para classificar as diferentes regiões só foi possível, porque, em função do tipo de fluido (Newtoniano e não Newtoniano), foram detectadas variações no comportamento hidrodinâmico e deposicional dos fluxos.

11.2.2 Relação entre a espessura da cabeça e do corpo.

O aspecto geométrico avaliado foi a relação entre a espessura média da cabeça e do corpo, uma vez que, elas representam a influência das forças de empuxo (cabeça) com as forças gravitacionais da corrente (corpo).

11.2.3 Regime do escoamento – Valores globais médios

Através dos valores globais médios da velocidade de propagação, da espessura e da viscosidade cinemática das correntes, foi possível calcular o número de Reynolds e o número de Froude densimétrico dos fluxos, bem como correlacioná-los num diagrama, visando detectar os regimes. A figura 11.2 apresenta esse diagrama com os seis regimes sendo identificados pela legenda (prismas de diferentes formas).

$$a) \text{ Número de Froude densimétrico: } Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'h}} \quad (11.1)$$

O número de Froude Densimétrico (no qual aceleração da gravidade é substituída pela aceleração reduzida pela diferença de densidade dos fluidos), reflete a razão entre as forças de inércia e as gravitacionais. Deve ser similar no modelo e no protótipo garantindo assim a semelhança dinâmica no regime do escoamento. Se o seu valor for maior que um, é dito que o escoamento é supercrítico ($Fr_d > 1$), caso contrário, é chamado de subcrítico ($Fr_d < 1$). Entretanto, o número de Froude densimétrico deve ser utilizado com ressalvas em fluxos de mais alta concentração (e/ou em fluxos estratificados), devido às variações de concentração ao longo da altura do escoamento, o que pode inviabilizar a sua utilização para efeitos de escala. O número de Froude Densimétrico, que também pode ser chamado de número de Richardson (Ri), se for reordenado ($Ri = 1/ Fr_d^2$), poderá indicar o regime e o grau de mistura na interface.

$$b) \text{ Número de Reynolds: } Re = \frac{Uh}{\nu} \quad (11.2)$$

O número de Reynolds, que representa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas, é utilizado para saber em que regime está operando o escoamento, isto é, se no regime laminar ou turbulento. Em linhas gerais, se o valor é abaixo de 500, ele é dito laminar;

se ele é acima de 2000 ele é dito turbulento. Entre estes limites, o regime é ora laminar, ora turbulento, sem um padrão definido (zona de transição).

Em laboratório, é difícil alcançar um valor para o número de Reynolds que garanta uma turbulência completamente desenvolvida ($Re > 2000$), mas se as simulações apresentarem um valor acima deste, o número de Reynolds torna-se irrelevante para o estudo, pois, admitimos, por invariância assintótica, que o fluxo é totalmente turbulento.

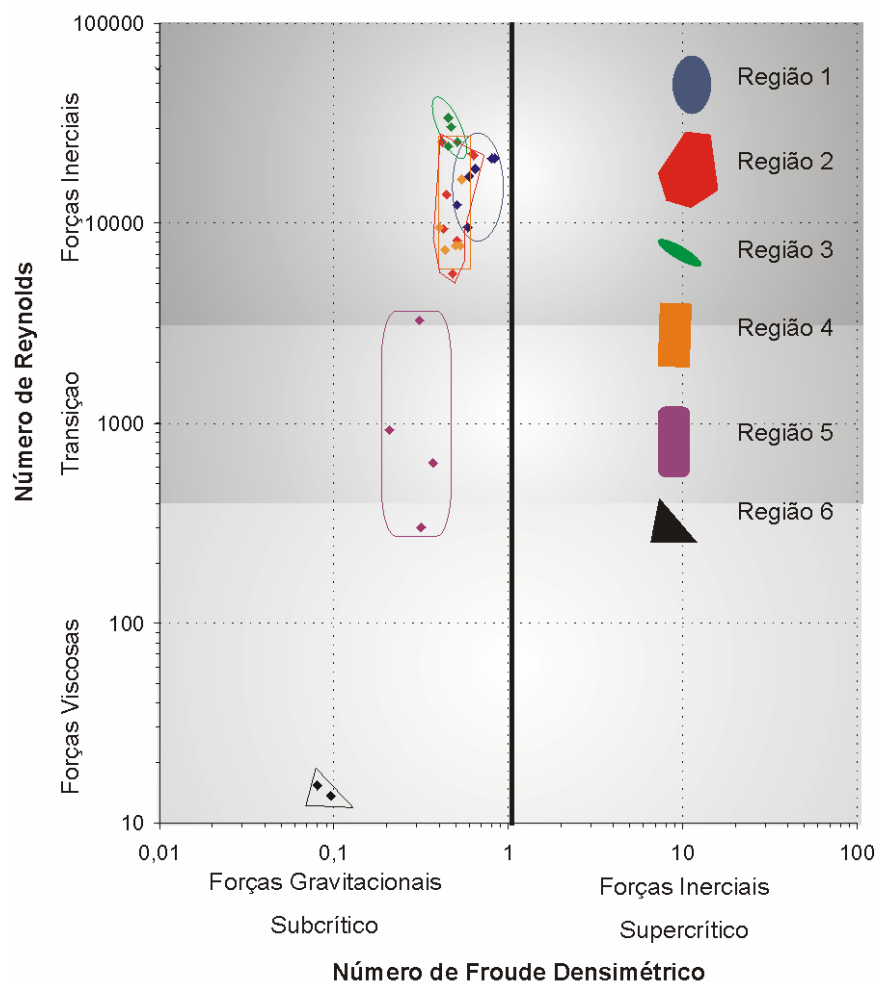


Figura 11.2 Relação do número de Reynolds médio com o número de Froude densimétrico médio indicando os ensaios correspondentes a cada região.

Pela análise da figura 11.2, podemos constatar que, para todos os experimentos realizados, o número de Froude densimétrico médio possui valor abaixo de unidade, ou seja, os escoamentos são lentos. Nesse caso, as forças gravitacionais seriam preponderantes sobre as forças de inércia do escoamento. Huang et al (*in press*) discutem o valor do número de Froude densimétrico crítico, mostrando que nem sempre o valor unitário serve como valor para a definição do limite entre regime subcrítico e supercrítico em correntes de densidade .

11.2.4 Perfil de velocidade, concentração e fluxo de sedimentos

Com a realização dos experimentos, foi possível determinar um padrão para cada regime de escoamento, no que diz respeito aos perfis verticais médios de velocidade, de concentração e do fluxo de sedimentos. Tais perfis representam os padrões idealizados para cada região, sendo apresentados na figura 11.3, e permitem visualizar a evolução de uma região à outra. Posteriormente, será realizada a descrição detalhada desses perfis para cada região separadamente.

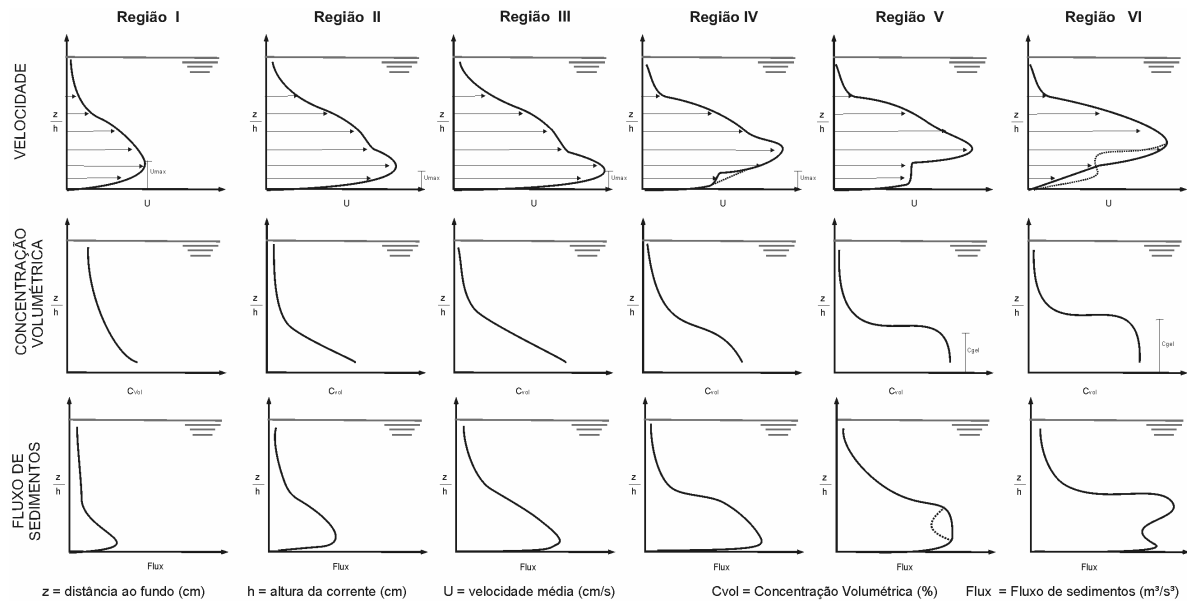


Figura 11.3 Perfil vertical médio de velocidade, concentração e fluxo de sedimentos para as seis regiões determinadas.

11.2.5 Análise temporal – Mecanismo de suporte dos grãos

A figura 11.4 apresenta os resultados da variação da velocidade e da concentração ao longo do tempo, indicando a séries temporais características desses parâmetros. Buscou-se, a partir da análise da forma das curvas medidas, representar graficamente o comportamento dessas variáveis sem atentar para os valores numéricos. Foi mantida a mesma escala de tempo para os dois parâmetros, simplesmente para se ter uma noção da forma dessa variação.

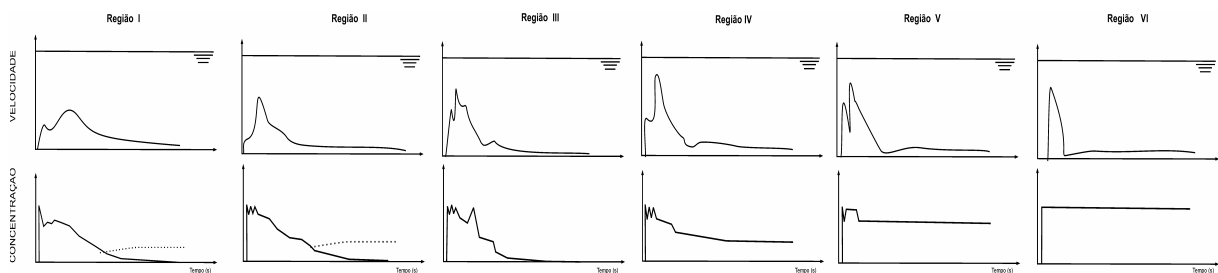


Figura 11.4 Série temporal da velocidade e concentração para as seis regiões determinadas.

Com base nessa análise apresentada na figura 11.4, bem como na descrição do fluxo já realizada anteriormente com base nos vídeos gerados, serão apontados prováveis mecanismos de suporte dos grãos, bem como serão descritos os processos hidrodinâmicos que foram evidenciados nos dados.

11.2.6 Intensidade da turbulência

Com os dados da análise temporal da velocidade, é possível aproximar os valores da intensidade da turbulência na direção do fluxo ao longo de todo o escoamento através do cálculo da raiz média quadrada da velocidade (*Root-Mean-Square - RMS*), apresentada na equação abaixo.

$$u_{\text{rms}} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_{\text{inst}} - \bar{U})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11.3)$$

Onde:

u_{rms} = Intensidade da turbulência na direção do escoamento (m/s)

u_{inst} = velocidade instantânea na direção do escoamento (m/s)

\bar{U} = velocidade média no ponto (m/s)

11.2.7 Depósitos

No capítulo 10 foram apresentados todos os resultados da caracterização dos depósitos gerados. Nessa síntese serão apresentados os modelos do depósito final, expresso ao longo do espaço, procurando englobar parâmetros como a gradação dos grãos, a distribuição do diâmetro médio, a espessura do depósito, a presença de laminação dos grãos e a porcentagem de argila no depósito, além do balanço de massa.

11.2.8 Mecanismos de deposição

Neste item serão apresentados os diferentes mecanismos de deposição associados aos experimentos. Num primeiro momento, eles serão divididos pelas respectivas regiões e, posteriormente, no capítulo 12 serão discutidos em conjunto com os dados da literatura.

11.2.9 Outros Parâmetros

Além desses parâmetros descritos acima, algumas relações adimensionais e análise dos valores médios ao longo da vertical foram utilizadas como parâmetros de classificação das regiões e serão apresentados ao longo do texto.

11.3 DETALHAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DE CADA REGIÃO

11.3.1 REGIÃO I

11.3.1.1 Comportamento reológico das misturas

Todas as misturas utilizadas nas regiões I apresentam um modelo reológico Newtoniano, ou seja, com uma relação de tensão-deformação linear e, conseqüentemente, com um valor de viscosidade dinâmica constante. No capítulo 7 foram apresentadas as equações constitutivas para a determinação dos valores da viscosidade, tendo como parâmetros de entrada a concentração inicial e a presença de argila.

11.3.1.2 Relação entre a espessura da cabeça e a do corpo

Nesta primeira região, o que pode ser verificado durante a passagem do fluxo foi a presença de uma zona da cabeça bem desenvolvida, seguida pelo corpo e pela cauda em desaceleração. A zona da cabeça da corrente apresentou uma espessura média maior que a espessura do corpo, seguindo a forma geométrica das correntes de densidade clássicas, descritas na literatura (Middleton, 1966; Simpson, 1972 entre outros), indicando que elas estão sofrendo uma resistência maior do fluido ambiente.

Além de ser mais espessa, a cabeça da corrente apresentou uma maior extensão nestes fluxos, uma vez que o tempo de passagem da cabeça pelo ponto de medida foram os maiores dentre todas as séries de ensaios.

11.3.1.3 Regime de fluxo

A região I se caracteriza por apresentar um valor médio global para o número de Reynolds dentro do regime turbulento pleno, indicando que as forças de inércia são preponderantes sobre as forças viscosas. Quanto ao número de Froude densimétrico, essa região apresenta valores médios globais mais próximos de um, indicando que as forças de inércia e gravitacionais estariam próximas do equilíbrio (figura 11.2).

11.3.1.4 Perfis verticais médios de velocidade concentração e fluxo de sedimentos

A figura 11.5 apresenta os perfis verticais médios da velocidade, da concentração e do fluxo de sedimentos para a região I.

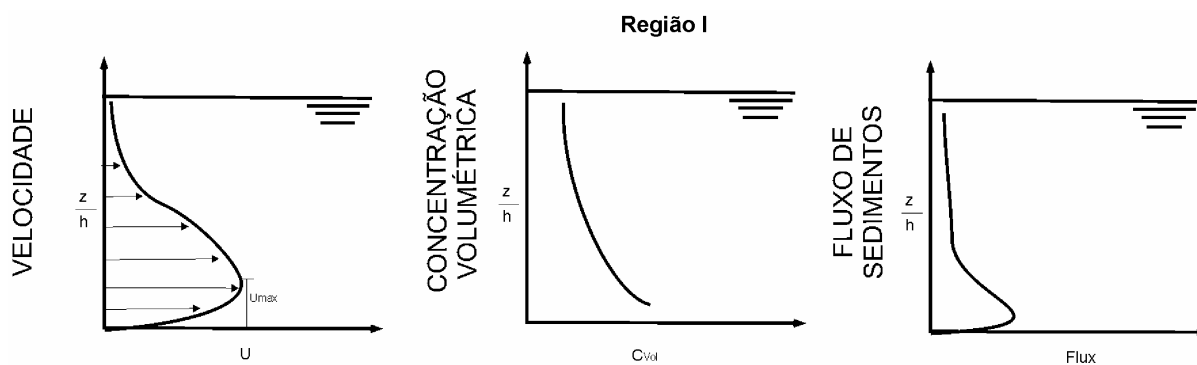


Figura 11.5 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região I.

Nesta região, a corrente de densidade apresentou um perfil de velocidades com um ponto de velocidade máxima, situado a uma certa distância do fundo, que subdivide o perfil em uma zona próxima à parede (fundo) e uma zona externa. Na superfície superior, a falta de mais sondas de velocidade ao longo da vertical não permitiu um estudo aprofundado desta área, porém pode ser notado que a velocidade do fluxo se aproxima de zero na interface. A influência da contra-corrente formada pelo fluido ambiente também não foi considerada.

Na região I, o perfil de concentração apresenta a forma de uma curva, que representa uma tendência de decaimento à medida que se aproxima do fundo, porém significando um aumento da concentração e, conseqüente, aumento da viscosidade junto ao fundo.

Nessa região, não há uma mudança brusca no valor da concentração entre os pontos mais próximos à superfície e os pontos próximos junto ao fundo, indicando uma maior uniformização da concentração ao longo da vertical. Como as concentrações iniciais foram mais baixas nesse grupo, os valores medidos de concentração também foram os menores.

O perfil de fluxo de sedimento característico desta região indica valores maiores junto ao fundo, próximo da zona de mais alta velocidade do fluxo, e valores menores junto à interface superior.

11.3.1.5 Análise temporal velocidade e concentração

A figura 11.6 apresenta a série temporal da velocidade e da concentração para a região I. Pela análise da série temporal da velocidade e da concentração, foi verificado que os fluxos do primeiro grupo apresentaram variações destas grandezas, com um comportamento suavizado ao longo do tempo, sem a presença de mudanças bruscas no comportamento desses parâmetros. A aceleração local da frente da corrente foi claramente identificada, notando-se a passagem da zona da cabeça, de um vórtice mais longo (indicado na figura 11.6) após sua passagem e da zona do corpo, com o pico de máxima velocidade também suavizado. Após a passagem desse pico, houve o início da fase de desaceleração do fluxo, com a gradual diminuição de velocidade ao longo do corpo e da cauda. Concomitantemente, a concentração

da corrente, seguiu esse mesmo comportamento ao longo do tempo, com os valores de concentração elevados na região da corrente, indicando uma zona de pouca deposição de material e, após isso, a perda de material em suspensão, à medida que o fluxo vai desacelerando. Contudo, não ocorre um pico de concentração na região inicial do corpo, indicando que o fluxo só perdeu material ao longo do tempo. Na região do corpo e da cauda, as curvas apresentam praticamente o mesmo formato, indicando a correlação entre um parâmetro e outro.

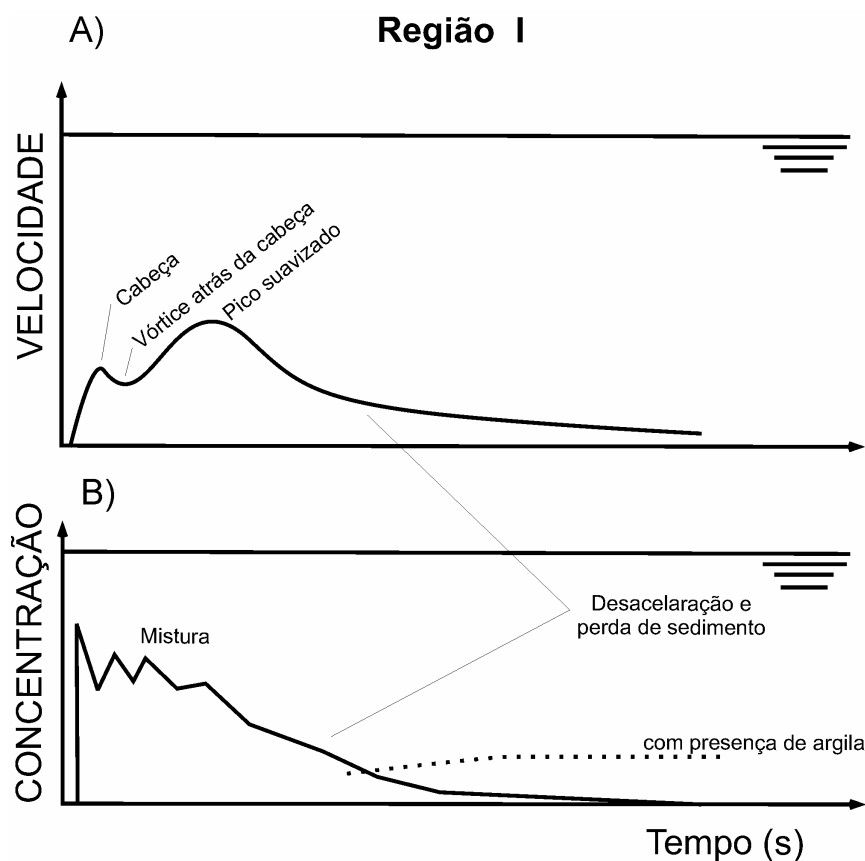


Figura 11.6 Séries temporais características da região I. a) Velocidade da corrente. b) Concentração volumétrica.

Quando esses fluxos apresentam argila na sua composição, mesmo que em baixa quantidade, o comportamento da série temporal da concentração é um pouco modificado na sua região final do corpo e da cauda (linha tracejada na figura 11.6), devido à baixa velocidade de queda dessas partículas e da coesão, fazendo com que as partículas se mantenham em suspensão por mais tempo, turvando a água e, somente após uma longa espera, decantando naturalmente.

11.3.1.6 Mecanismo de suporte dos grãos

Durante todo o tempo do experimento, o fluxo manteve-se turbulento para as correntes de turbidez dessa região, sendo a componente ascendente dessa turbulência um dos principais mecanismos de suporte dos grãos. A avaliação da variação ao longo do tempo do número de

Reynolds (considerando a altura da corrente e a viscosidade absoluta e/ou aparente), mostra que os valores desse parâmetro foram elevados a maior parte do tempo, apenas diminuindo na região da cauda (desaceleração da corrente – *waning flow*). A figura 11.7a apresenta esse resultado, bem como a variação do número de Reynolds global médio ao longo da vertical (figura 11.7b).

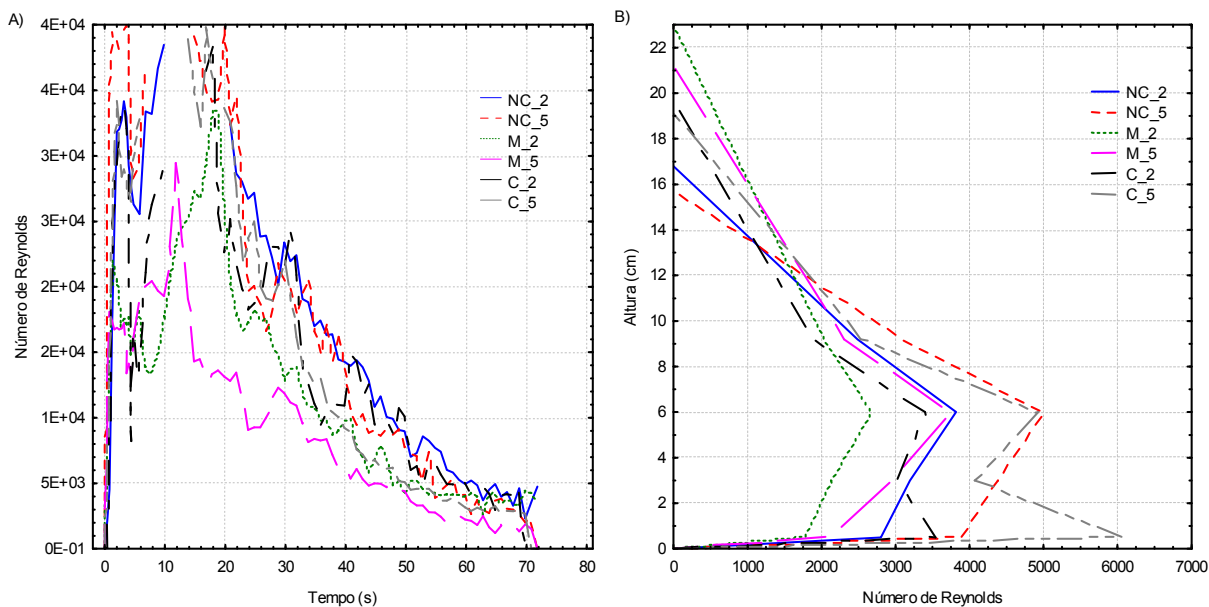


Figura 11.7 a) Série temporal do número de Reynolds (gráfico truncado acima de 40000) e b) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região I.

Nessa região, apesar das velocidades serem menores, devido à baixa concentração das misturas, a turbulência do escoamento atingiu valores elevados, até mesmo para simulações em laboratório, com Reynolds plenamente desenvolvido (mais de 40000).

Os fluxos dessa região, apesar de apresentarem argila na sua composição, não demonstraram que a coesão e as interações entre as partículas fossem significativas para alterar o mecanismo de suporte dos grãos. A correlação das séries temporais da velocidade e concentração apresentou uma grande similaridade, o que nos faz concluir que, apesar da existência de material coesivo, não foi criada uma matriz coesiva suficiente para governar os mecanismos de suporte de grãos.

11.3.1.7 Intensidade da turbulência

Com a equação 11.3, foi possível calcular esse parâmetro da intensidade turbulenta e, através de um gráfico de contorno, identificar visualmente, as zonas com maior intensidade da turbulência (figura 11.8).

Nesta primeira região, a maior turbulência (cores quentes) ocorre na região da cabeça e, principalmente, no vórtice gerado atrás da cabeça, até o pico de deposição da corrente. Na região do corpo, a turbulência se dá em pontos isolados (valores em verde).

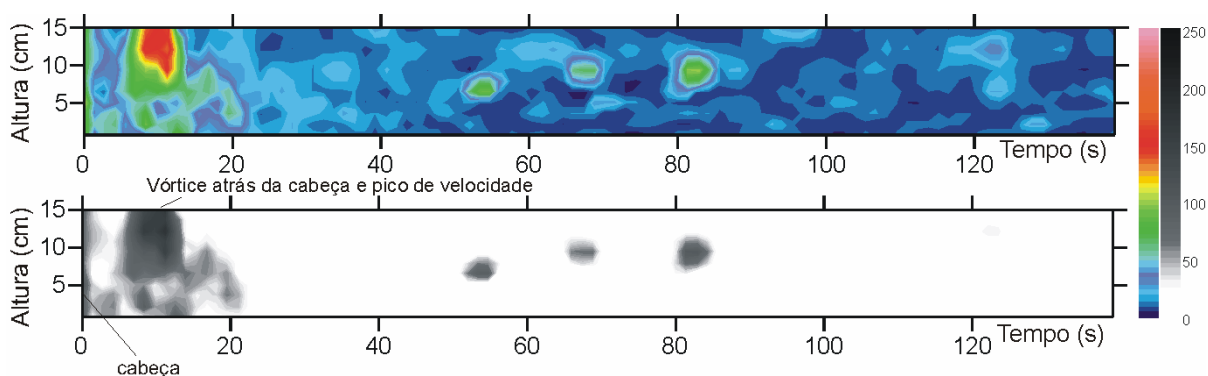


Figura 11.8 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região I, em duas escalas de cores distintas.

Avaliando o resultado da figura 11.8 em conjunto com a série temporal da concentração (figura 11.6), pode-se dizer que os momentos iniciais de passagem da corrente seriam de menor deposição até a passagem do pico de velocidade. Entretanto não são verificados maiores valores dessa intensidade da turbulência ao longo de toda a vertical, o que pode explicar o início de um processo deposicional nas zonas mais próximas ao fundo.

11.3.1.8 Presença da camada interna do escoamento (bipartição)

Nos experimentos dessa região, efetuados com concentrações maiores (próxima ao limite de divisão determinada), o fluxo começa a apresentar a formação de uma camada de sedimento suspenso mais concentrada junto ao fundo, cuja influência não foi muito significativa no depósito final dos grãos, porém, que pode indicar que o limiar utilizado para dividir a primeira e a segunda região é por volta dos 5% de concentração.

A avaliação da espessura da camada de sedimento junto ao fundo e da sua velocidade mostra, ao longo do tempo, que essa camada apresentou muitas oscilações em sua superfície, indicando o desenvolvimento de um fluxo junto ao fundo.

A análise da série temporal do número de Reynolds (figura 11.9) dessa camada interna do escoamento, considerando a espessura da altura interna e as sondas de concentração e velocidade mais próximas ao fundo, indica, para todos os fluxos, características de turbulência bem desenvolvida só reduzindo seus valores após a deposição dos grãos.

11.3.1.9 Velocidade e concentração média

Em termos de velocidade média global, a primeira região mostra que a velocidade média do corpo é maior do que a velocidade da cabeça, indicando que os efeitos de inércia do corpo preponderam sobre as forças gravitacionais que governam a região da cabeça. Já para a concentração média, a cabeça da corrente foi, aproximadamente, 1,5 vezes maior que a concentração média da região do corpo, uma vez que na cabeça se perdeu muito pouco de material ao longo do tempo e da distância percorrida da fonte até o ponto de medição.

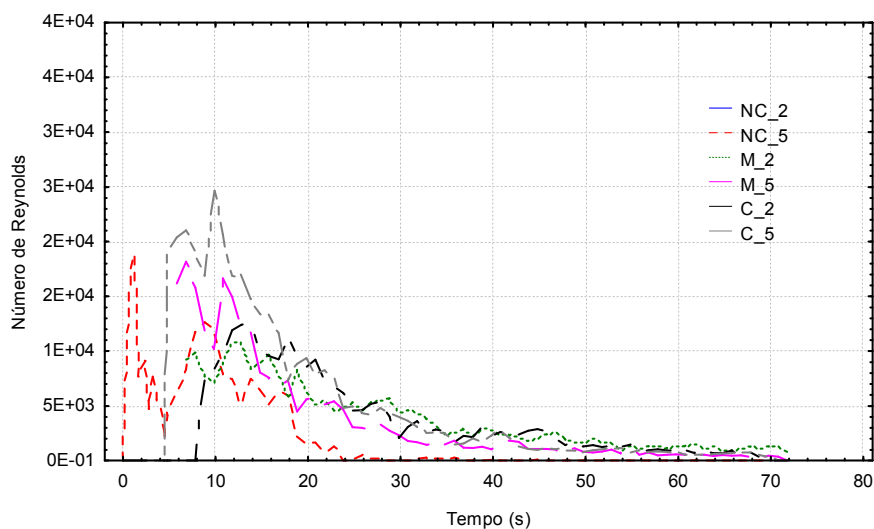


Figura 11.9 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada junto ao fundo dos ensaios da região I

11.3.1.10 Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical

O depósito gerado pelos fluxos considerados como pertencentes à primeira região apresentam uma gradação normal, com o decrescimento do tamanho do grão da partícula à medida que a distância ao fundo aumenta (figura 11.10).

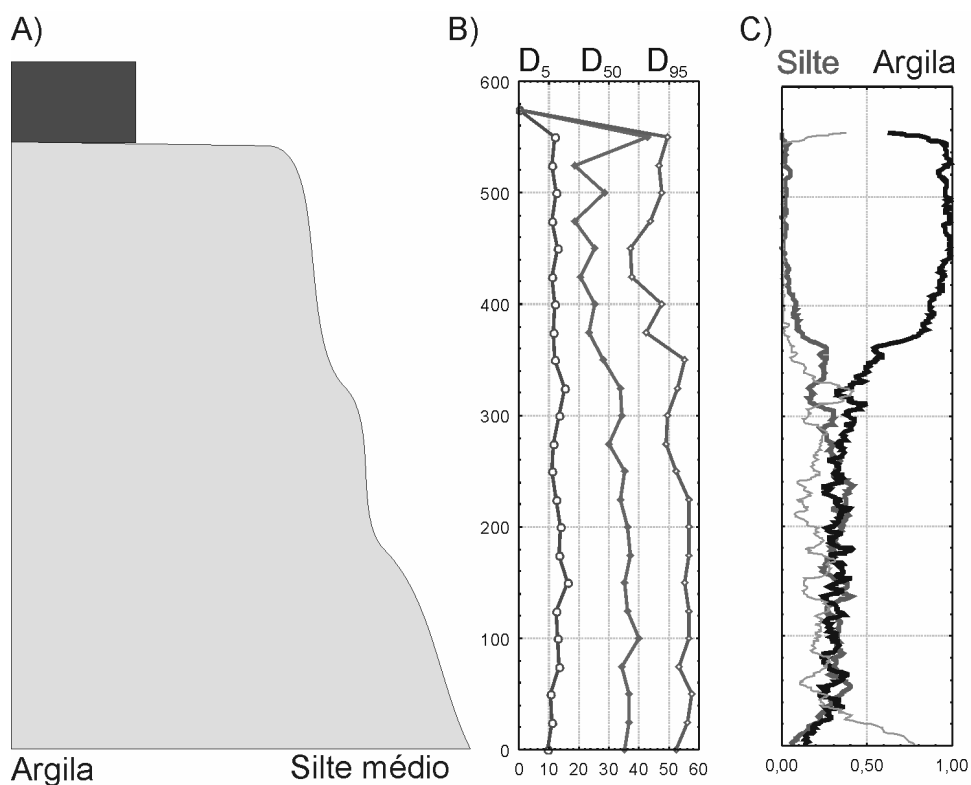


Figura 11.10 a) Modelo de graduação do depósito para a região I; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . e; c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.

Essa gradação normal é causada pela segregação dos grãos, ocorrida, em grande parte, durante a desaceleração do fluxo, o que proporcionou uma seleção destes grãos, ficando os grãos maiores junto ao fundo e os menores junto à superfície.

Nos ensaios com material puramente não coesivo, essa gradação é diretamente determinada pelos grãos de esferas de vidro (areia), observando-se o decrescimento dos diâmetros característicos, no caso o D_5 , D_{50} e D_{95} .

Já nos fluxos com presença de argila (grupos misto e coesivos com concentração menor do que 5%), o que se verifica é um depósito com predomínio total de grãos não coesivos junto ao fundo e com a argila se encontrando no topo, constituindo uma camada selante sobre o depósito.

Através da avaliação da presença de argila na vertical, pode-se ver, na figura 11.10, que o contato entre os grãos não coesivos e coesivos é bem destacado, claramente indicando processos deposicionais diferenciados. No topo, mais de 95% do sedimento é formado por argila.

11.3.1.11 Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade)

A distribuição granulométrica do depósito depende do tipo de composição da mistura. Devido ao diâmetro médio dos sedimentos, entre as esferas de vidro ($d_{50} \sim 41$ micra) e os grãos de caulim ($d_{50} \sim 8$ micra), serem diversos, a distribuição granulométrica apresenta uma característica bimodal, ou seja, com a predominância de dois picos (tamanhos de grãos diferenciados). Nesse caso, as diferenças entre as regiões podem ser determinadas pela forma dessa distribuição, ou seja, com a presença da bimodalidade (argila na composição) e unimodalidade (pouca argila na composição).

Os depósitos do grupo coesivo não serão avaliados, uma vez que não há diferenciação significativa nos resultados dos depósitos argilosos (todas as curvas são idênticas). Já para o grupo não coesivo, isso será realizado, pois há menor seleção dos grãos (distribuição do material bruto é mais extensa).

A figura 11.11 apresenta um resultado médio da distribuição granulométrica do depósito. Nos fluxos sem a presença de argila, fica evidente a unimodalidade da curva, com sua forma apresentando uma leve assimetria à direita e, com relação a curtose, sendo classificada como sendo leptocúrtica (baixa dispersão dos dados em relação a moda).

Já nos experimentos com presença de argila (grupo misto), a forma da curva apresenta uma bimodalidade, entretanto com uma predominância maior dos grãos de esferas de vidro ($\sim 70\%$) contra 22% de argila.

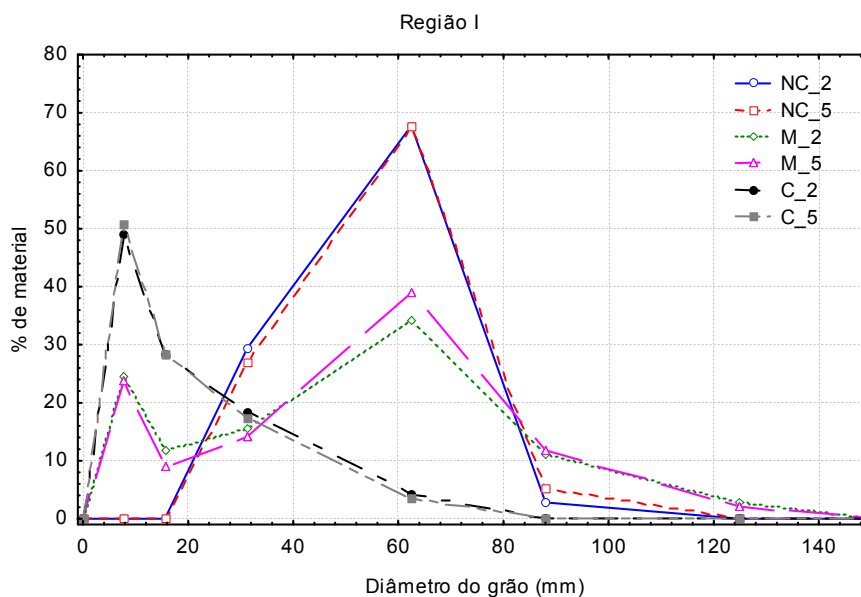


Figura 11.11 Distribuição granulométrica característica do depósito da região I.

11.3.1.12 Espessura relativa do depósito

Com os dados da espessura do depósito medidos após 24 horas do ensaio (item 10.2.2) e a espessura do fluxo (item 8.3), foi possível determinar a relação entre eles, de modo a verificar a influência dos parâmetros de entrada no depósito final. Com os dados de todos os ensaios, foi calculada uma média dos valores para as diferentes regiões, sendo verificado que nos ensaios da região I, a relação entre a espessura do depósito e a espessura do fluxo foi por volta dos 2% (desvio padrão = 0,97), indicando que a magnitude da espessura do depósito final pode ser considerada quase insignificante se comparada com a altura do fluxo.

11.3.1.13 Quantidade de material depositado - balanço de massa

Com os dados do balanço de massa realizado nos experimentos, foi possível identificar a relação entre a massa depositada no depósito e a massa injetada, descontando o material que fica retido no compartimento de mistura. Nos experimentos da região I, a média dessa relação foi de aproximadamente 15% (desvio padrão ~ 7), indicando que apenas essa quantidade de material ficou depositada no canal, enquanto que mais de 85% do material seguiu para jusante (dreno do tanque). Esse resultado indica que as correntes desse grupo teriam uma maior capacidade para fluir, se o tanque fosse maior. O desvio padrão das médias da relação entre as massas nessa região foi um pouco elevada, devido às diferenças entre os resultados do grupo não coesivo e coesivo.

11.3.1.14 Mecanismos de deposição

Durante os fluxos, independentemente da presença de argila na mistura, foi observado que o principal mecanismo de deposição destas correntes foi através da deposição de

partículas individuais, que estavam em suspensão, causadas pela desaceleração do fluxo e, conseqüente, dissipação de turbulência do escoamento.

Neste tipo de fluxo, ocorreu a segregação natural dos grãos (seleção), ou seja, os grãos maiores (velocidade de queda maior) foram se depositando, primeiro por gravidade seguido dos grãos menores (menor velocidade de queda), no caso, o caulim (argila) que se depositou primeiro individualmente (grão-a-grão) e, posteriormente, pelo processo de decantação, após a parada do fluxo, originando os depósitos com gradação normal.

Nos experimentos, a visualização dos sedimentos sem presença de argila foi mais fácil, devido a maior rapidez da queda dos grãos, enquanto que nos ensaios com argila, essa visualização foi dificultada, devido à menor velocidade de queda dos grãos. Apesar da tendência das argilas em formarem flocos, devido à coesão de suas partículas, não houve indícios da formação de grandes flocos que alterassem o mecanismo de deposição dos grãos.

Os fluxos com concentrações maiores, dentro dessa região, apresentaram o início da formação de uma camada mais concentrada junto ao fundo, indicando uma possível modificação no mecanismo de deposição dos grãos.

Devido à baixa quantidade de grãos presentes na mistura, não foi verificado o efeito de uma decantação impedida (*hindered settling*), a qual atuaria como um elemento contrário à deposição natural dos grãos.

11.3.1.15 Taxa de deposição

O depósito começou a ser formado (figura 11.12) tão logo ocorreu a passagem da cabeça da corrente e foi se acumulando do fundo para cima (deposição agradacional).

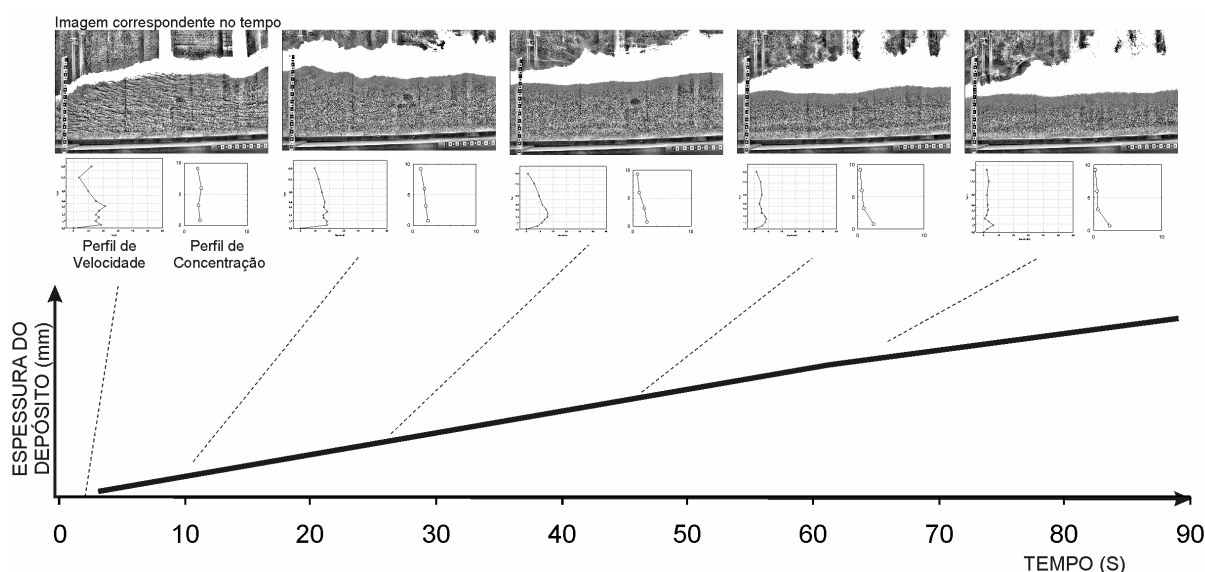


Figura 11.12 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região I.

A taxa de deposição foi quantificada e apresentou uma tendência linear de aumento, com uma pequena diminuição na inclinação da curva nos instantes finais. A taxa de deposição foi correlacionada com os perfis instantâneos da velocidade e da concentração mostrando, ao longo do tempo, como essas variáveis foram se alterando e causando a deposição dos grãos.

11.3.2 REGIÃO II

11.3.2.1 Comportamento reológico das misturas

O comportamento reológico das misturas da região II é de um fluido Newtoniano, com relação linear entre a tensão-deformação.

11.3.2.2 Relação entre a espessura da cabeça e do corpo

Os fluxos desta região apresentaram um comportamento da relação entre a espessura da cabeça e do corpo diferenciado com aquele observado na região I. As correntes continuaram a apresentar uma cabeça bem definida, porém, o seu tempo de passagem pela seção de medida foi menor e sua espessura média foi aproximadamente igual a do corpo. Admite-se, nesta região, que o aumento da concentração e/ou a presença de argila, compensou a resistência imposta pelo fluido ambiente, aumentando a velocidade de avanço e provocando uma diminuição na espessura média da cabeça.

11.3.2.3 Regime de fluxo

A segunda região se caracteriza por apresentar os fluxos novamente no estado turbulento pleno, com os valores de Reynolds médio acima de 8000 (figura 11.2).

11.3.2.4 Perfis verticais médios de velocidade concentração e fluxo de sedimentos

A figura 11.13 apresenta os perfis verticais médios da velocidade, da concentração e do fluxo de sedimentos para a região II.

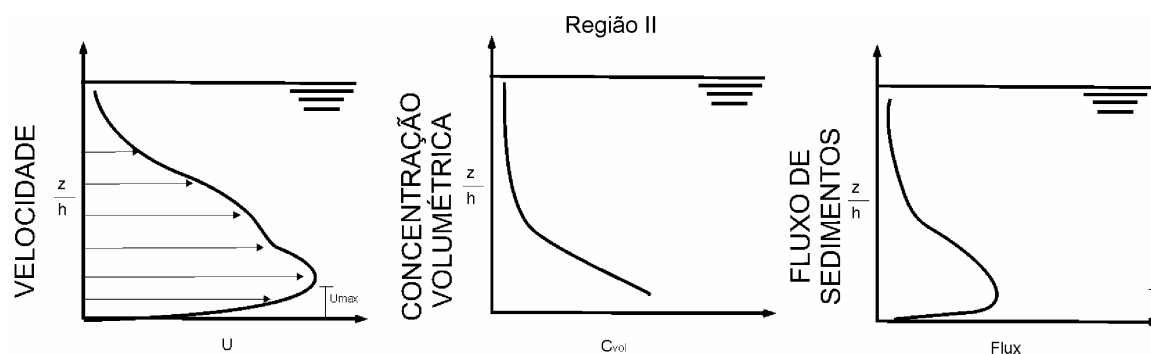


Figura 11.13 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região II.

O perfil de velocidade da segunda região apresentou uma leve modificação com relação ao da primeira região, indicando uma zona junto ao fundo mais proeminente (junto a velocidade máxima). Esse bico mais avantajado corresponde à formação, durante a passagem do fluxo, de uma camada suspensa mais concentrada junto ao fundo que causou uma aceleração naquele ponto.

Nessa região, o perfil de concentração começa a desenvolver uma zona mais concentrada junto ao fundo, notando-se um leve aumento dos valores nessa região. Também, a diferença dos valores de concentração entre as partes inferior e superior da corrente foi maior, com o aparecimento de um ponto de inflexão (apesar da pouca diferença entre os dados). Esse comportamento está atrelado às mudanças ocorridas no desenvolvimento do fluxo, que provocaram a criação de uma camada mais concentrada de suspensão junto ao fundo.

O perfil de fluxo de sedimentos para essa região indica, novamente, uma maior concentração de grãos junto ao fundo, porém com os maiores valores atingindo uma altura um pouco maior que a da região I (perfil mais espesso).

11.3.2.5 Análise temporal velocidade e concentração Presença de argila

A figura 11.14 apresenta a série temporal da velocidade e da concentração a região II, a qual apresenta uma modificação com relação a da primeira região. Avaliando o formato da variação da série de velocidades pode ser notado que o perfil suavizado de velocidade (sem a presença de uma inflexão acentuada dos valores) apresentado pela região I, não é repetido. A zona de aceleração da corrente, quando da sua chegada ainda é de fácil visualização (determinação da região da cabeça seguida de vórtice), porém o comportamento da velocidade do corpo é diferenciado, uma vez que há um pico máxima velocidade mais evidente. Logo após esse pico de velocidade, pode ser visualizada uma desaceleração mais acentuada (*waning flow*), onde, rapidamente, o fluxo atinge velocidades muito baixas até o seu final (cauda da corrente).

A vinculação desse perfil de velocidade com o de concentração pode ser realizada ao se avaliar a forma da curva da série temporal de concentração. Nessa segunda região, houve uma alteração do comportamento da concentração ao longo do tempo, já que, após a passagem da corrente, o fluxo mantém os valores mais concentrados por mais tempo, até praticamente atingir o pico de velocidade. Nesse caso, a velocidade mais alta, nesse início, auxiliou na manutenção dos grãos em suspensão por mais tempo. Nessa zona inicial da corrente é verificada apenas a influência das instabilidades na interface superior, as quais provocaram uma variação dos valores da concentração.

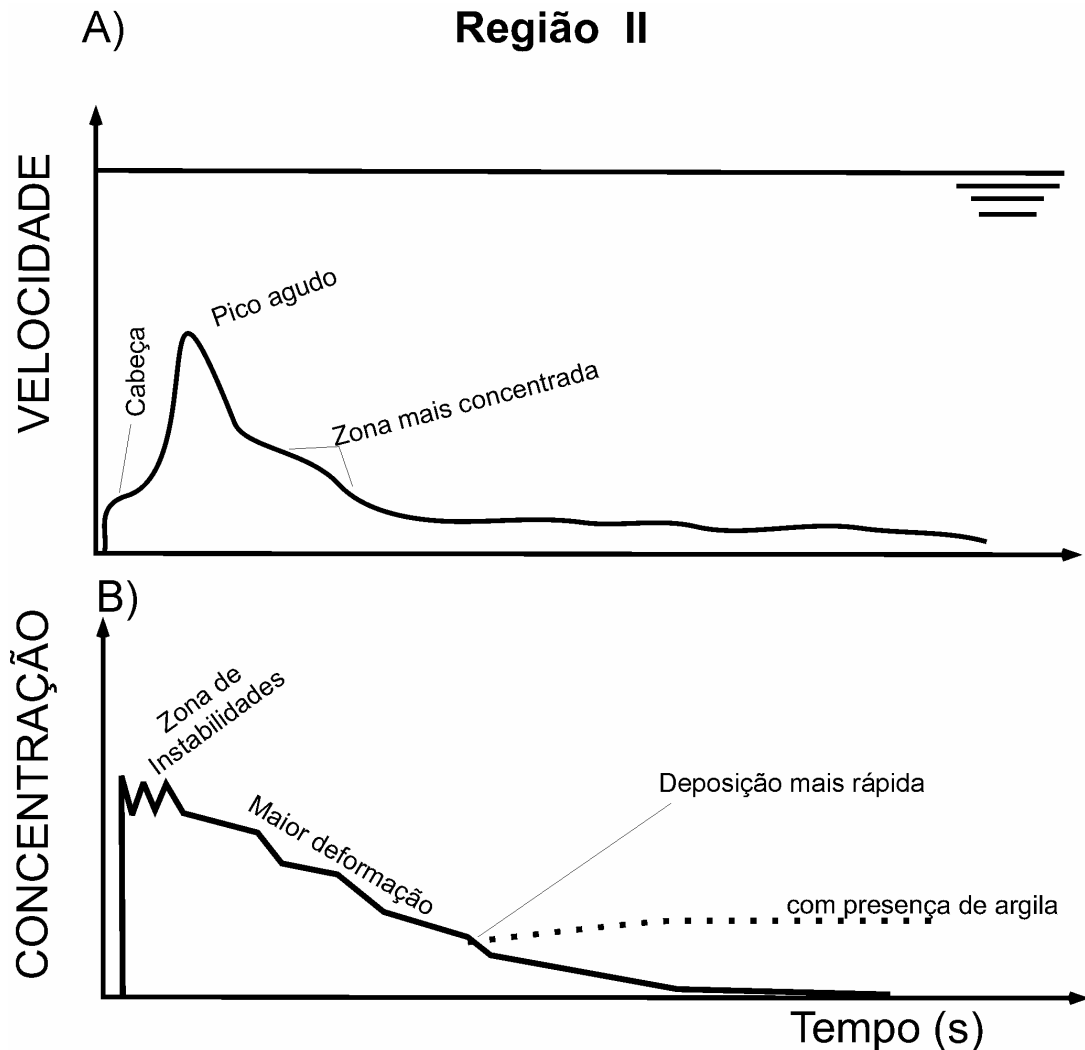


Figura 11.14 Séries temporais características da região II: a) Velocidade da corrente e; b) Concentração volumétrica.

Após a zona do pico de velocidade, a concentração também diminui, pois há a desaceleração da corrente. Entretanto, o perfil de concentração apresenta o indício da formação de uma camada de material suspenso mais próxima ao fundo (pequena saliência nos valores na desaceleração – indicado no gráfico). Essa camada foi se formando pela deposição dos grãos em suspensão (*fall-out*) e será discutida a seguir (item 11.3.2.14 - mecanismo de deposição).

O aumento da concentração na zona de desaceleração precedeu uma deposição mais rápida dos grãos, após a criação da camada mais concentrada junto ao fundo.

Na região da cauda do escoamento, novamente, são verificados dois comportamentos para a concentração, devido à presença de argila na mistura, a qual mantém os valores dessa variável mais constante ao longo do tempo (linha tracejada).

11.3.2.6 Mecanismo de suporte

Com relação ao mecanismo de suporte dos grãos, o que pode ser observado nesses fluxos, a partir da análise da variação temporal do número de Reynolds (figura 11.15a), é que o fluxo possui características turbulentas ao longo de todo o seu desenvolvimento, sendo apenas no final, com a desaceleração completa da corrente, que ocorre a dissipação dessa turbulência. Novamente, o escoamento atinge valores de turbulência da ordem de mais de 40000, o que pode ser considerado como turbulência plenamente desenvolvida.

Considerando o perfil vertical médio da variação do número de Reynolds (figura 11.15b), foi identificado que a turbulência vai diminuindo com o aumento da concentração e/ou presença de argila junto ao fundo. Para os fluxos mais concentrados (M_15 e 75B:25K), os valores médios já indicam valores abaixo de 2000, o que pode ser considerado um limite entre o regime turbulento e a zona de transição (ora turbulento, ora laminar).

Esse aumento das forças viscosas, causadas pelo aumento da concentração e ou presença de argila, representam a divisão entre os fluidos Newtonianos (região II) e não Newtonianos (região IV). Considerando esse fator, pode-se evidenciar que não só a turbulência que começa a operar como mecanismo de suporte dos grãos, mas sim, a influência da matriz coesiva e a interação dos grãos coesivos que começam a ser significativas no desenvolvimento do fluxo.

Nos fluxos sem a presença de argila, a camada friccional (sem coesão) de mais alta densidade junto ao fundo pode aumentar a interação entre as partículas, ocasionando uma modificação no mecanismo de suporte dos grãos, podendo criar uma pressão dispersiva por conta das colisões entre as partículas.

Devido ao aumento da concentração inicial nestes fluxos, pode ocorrer o aparecimento da decantação impedida dos sedimentos (*hindered settling*), uma vez que o choque entre as partículas no interior dessa camada, mantém os grãos em suspensão (aumento da capacidade de transporte dos grãos), retardando a sedimentação dos mesmos.

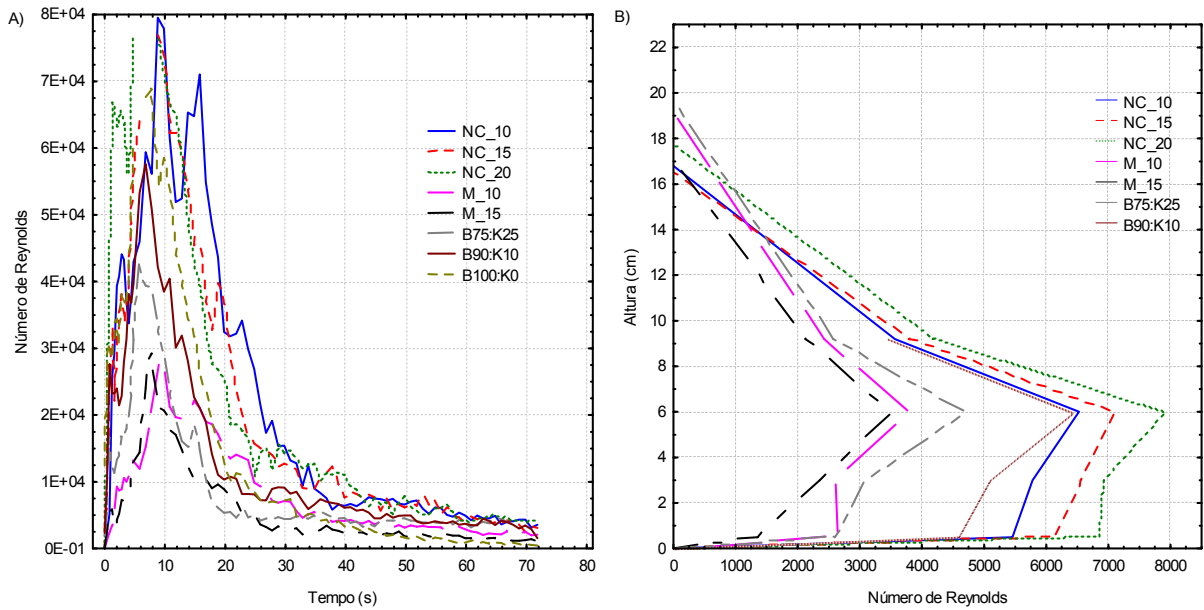


Figura 11.15 a) Série temporal do número de Reynolds e; b) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região II.

11.3.2.7 Intensidade da turbulência

A avaliação da velocidade de turbulência (U_{rms}) foi realizada e apresentada na figura 11.16.

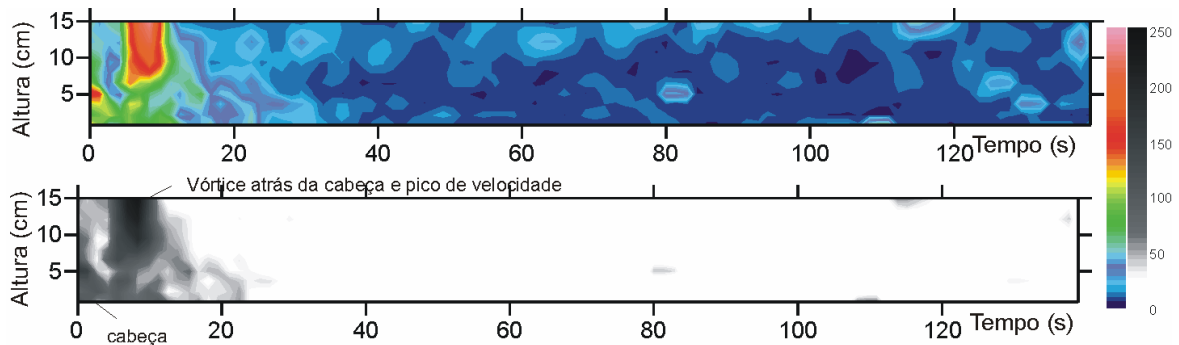


Figura 11.16 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região II, em duas escalas de cores distintas

Como pode ser observado, a região inicial do escoamento apresenta as maiores intensidades turbulentas ao longo do tempo, causadas não só pela presença de um vórtice, logo atrás da cabeça, mas também pelos processos de mistura junto às interfaces superior e inferior, que ocorreram no interior da cabeça e do início do corpo. A intensidade da turbulência, ao longo de toda a vertical, salienta o que foi apresentado na análise da série temporal da concentração, uma vez que a turbulência foi elevada nessa região não permitindo a deposição de grãos e, conseqüentemente, causando a diminuição dos valores da concentração.

11.3.2.8 Presença da camada interna do escoamento (bipartição)

Nos experimentos dessa região, foi constatado o aparecimento de uma camada de grãos em suspensão mais próxima ao fundo, caracterizando uma estratificação no fluxo (ou bipartição) causada por uma transformação gravitacional (conforme Fischer, 1983).

A análise da série temporal do número de Reynolds dessa camada interna do escoamento (figura 11.17) indica que os fluxos com menor presença de material coesivo apresentam características turbulentas bem desenvolvidas ao longo de praticamente 30 a 40 segundos do fluxo e que, posteriormente, esses valores diminuem a praticamente a zero, causando a deposição dos grãos. Durante o fluxo, podem ser verificadas muitas ondulações dessa camada interna, indicando que a mesma sofre a influência da interface superior da corrente. Alguns autores, por exemplo: Del Rey (2006), Felix e Peakall (2006), Baas et al, (2009) entre outros, buscaram estudar esse comportamento, entretanto essa influência deve ser melhor estudada.

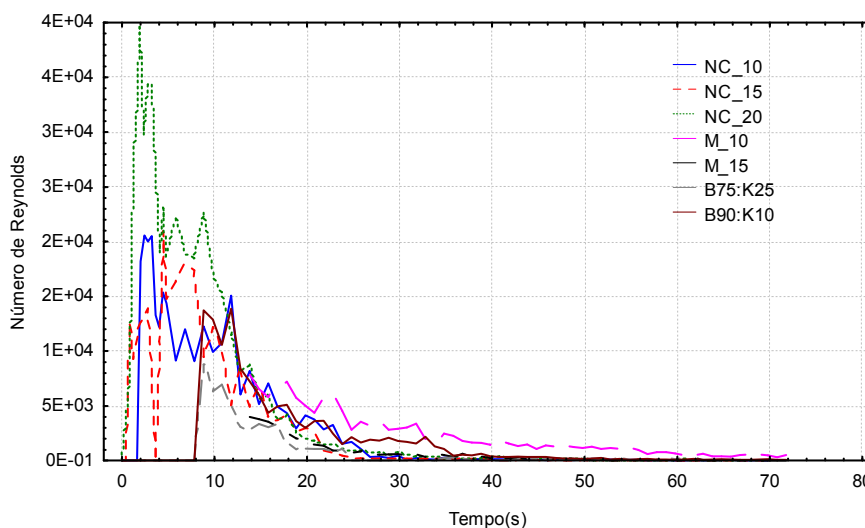


Figura 11.17 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada dos ensaios da região II.

Nos fluxos com presença de material coesivo, o comportamento dessa camada é diferenciado, apresentando valores turbulentos nos instantes iniciais do seu aparecimento (até 15 s) e, após isso, uma parada praticamente total (brusca desaceleração). Essa característica pode estar associada ao termo “carpete de tração”, idealizado por Sanders (1965) e comentado por Lowe (1982), Sohn (1997) entre outros. Ainda, essa camada mais viscosa junto ao fundo se desenvolve, também, com a presença de ondulações e se deformando, porém, conforme pode ser visualizado na figura 11.17, essas oscilações não são muito marcantes quanto aquelas apresentadas pelos fluxos não coesivos (NC_10, NC_15 e NC_20).

11.3.2.9 Velocidade e concentração média

Nessa segunda região, a velocidade média do corpo ainda é maior que a velocidade média da cabeça, entretanto o aumento da concentração e/ou presença de argila provocou uma redução entre dois valores e, conseqüentemente, a relação se tornou mais próxima do valor um. As forças gravitacionais ainda preponderam sobre as forças de empuxo presentes na cabeça. Já a concentração média da região da cabeça preponderou sobre a concentração do corpo, indicando que houve uma maior mistura daquela região e, conseqüentemente, menor perda de grãos. Já no corpo, a deposição dos grãos ao longo do caminho reduz a carga em suspensão, diminuindo também os valores médios. Nesse caso, os valores médios de concentração do corpo são, aproximadamente, 1,5 vezes menores que os da cabeça.

11.3.2.10 Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical

Nos ensaios pertencentes à segunda região começa a aparecer a transição entre os depósitos gradados normalmente e os depósitos parcialmente gradados, os quais são caracterizados por apresentar uma zona não gradada junto ao fundo e uma zona com gradação normal acima dessa (figura 11.18).

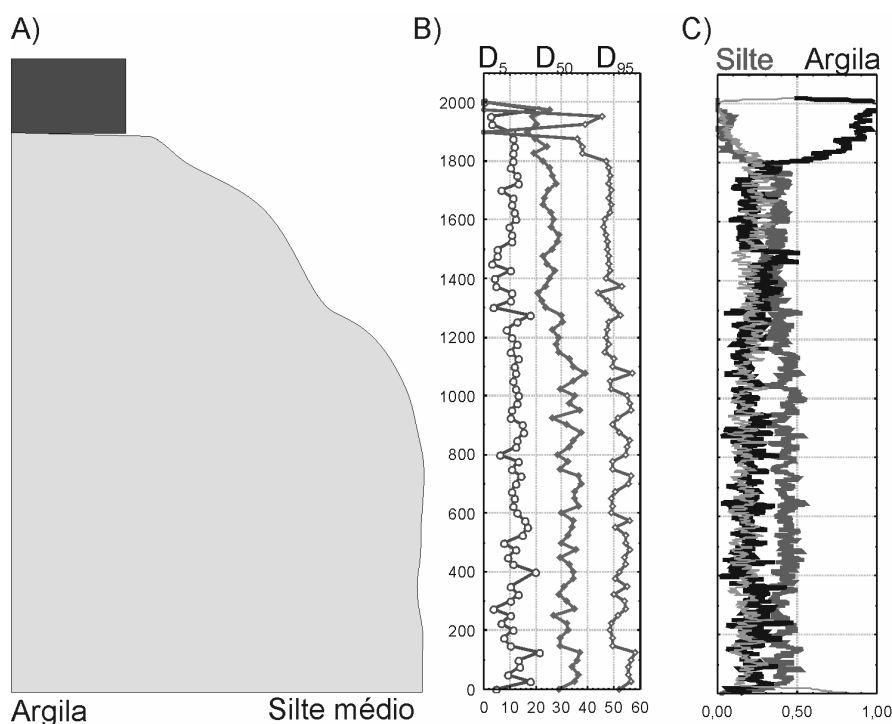


Figura 11.18 a) Modelo de gradação do depósito para a região II e; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.

Nos fluxos sem a presença de argila, nas regiões junto ao fundo, há uma pequena camada uniforme de sedimentos, seguida de uma camada com decréscimo dos valores médios dos grãos, causados por uma pequena modificação do processo deposicional (discutido a seguir).

Nos fluxos com a presença de argila, novamente, é verificada a formação de uma camada selante junto ao topo, indicando a deposição dos grãos por decantação, após a parada da corrente. A transição entre os depósitos com grãos não coesivos com argila é abrupta, com pouca presença de argila distribuída abaixo dessa camada selante. A porcentagem de argila no topo chega, novamente, a mais de 90%.

O ensaio M_15 apresenta um comportamento um pouco diferenciado com relação a essa presença de argila ao longo da vertical, o que indica que esse grupo está no limite entre as regiões III e IV, sob o ponto de vista desse parâmetro de análise (depósito).

11.3.2.11 Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade)

A curva de distribuição granulométrica desses depósitos (figura 11.19) apresenta, para os fluxos sem a presença de argila (ensaios do grupo não coesivo), um comportamento muito similar ao da primeira região, com uma distribuição unimodal com leve assimetria à direita e um comportamento leptocúrtico (baixa dispersão dos dados em relação a moda). À medida que a presença de argila vai aumentando nas misturas (ensaios do grupo transição e misto), a curva vai se tornando bimodal, com o pico de argila ocorrendo em torno dos 10 a 30% e o pico de grãos de esferas de vidro se reduzindo para 30 a 65%. Nesse caso, os valores encontrados foram sendo mais equilibrados (menor diferença entre os picos) para os ensaios que foram se aproximando do limiar reológico (divisão entre as regiões II e IV), no caso, os ensaios M_15 e 75B:25K.

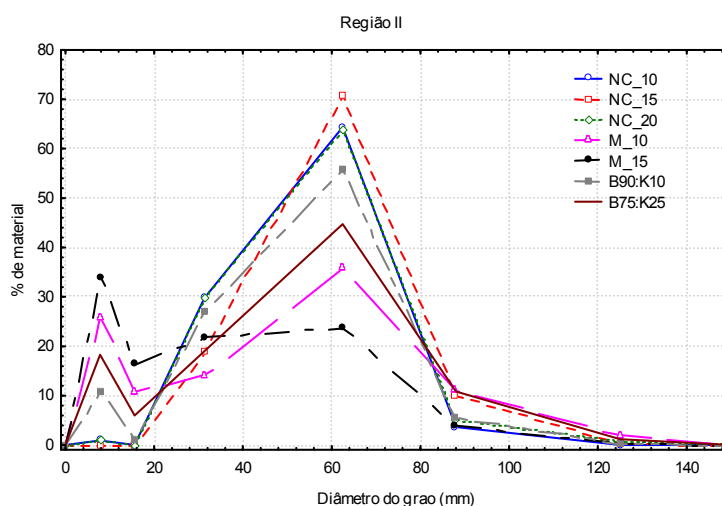


Figura 11.19 Distribuição granulométrica característica do depósito da região II.

11.3.2.12 Espessura relativa do depósito

A relação entre a espessura do depósito após 24 horas e a espessura do fluxo foi calculada para os ensaios dessa região, indicando um leve aumento se comparada a da região I, ficando a média dos resultados em torno de 3,6% (desvio padrão de 0,69).

11.3.2.13 Quantidade de material depositado - balanço de massa

A quantidade de material depositado nessa região foi, em média, 8,7% (desvio padrão de 3,4), representando uma diminuição do valor com relação aos fluxos da primeira região e indicando, assim, uma maior capacidade dessa mistura de transportar sedimentos à jusante (menos material depositado no tanque).

11.3.2.14 Mecanismos de deposição

O mecanismo de deposição dos fluxos dessa região se caracteriza por apresentar, além da sedimentação partícula a partícula provocada pela perda da componente ascendente da turbulência (para escoamentos mais próximos do limite entre a região I e II), outros fenômenos, que modificaram o processo deposicional.

Nos escoamentos sem presença de argila, as partículas em suspensão foram sedimentando nas zonas mais próximas ao fundo, criando uma região com grãos em suspensão mais concentrada, a qual escoava com uma alta turbulência. Essa camada mais concentrada junto ao fundo era, então, alimentada pelos grãos que estavam em suspensão (acima) e o espaço para que os grãos se movimentassem livremente ficava mais restrito, causando assim, uma deposição mais rápida dos sedimentos (maior taxa de sedimentação na primeira metade do escoamento). Como consequência desse processo, os fluxos dessa região II formaram os depósitos parcialmente gradados, ou seja, com uma zona junto ao fundo onde não houve tempo suficiente para a segregação natural dos grãos (seleção pela velocidade de queda), gerando depósitos mais maciços (menos gradados) e, acima disso, um depósito normalmente gradado, provocado pela segregação dos grãos nos estágios finais da deposição.

Nos fluxos com presença de argila, houve a identificação da presença da camada mais concentrada junto ao fundo (camada lamosa), a qual se formou durante o escoamento e que escoava numa região turbulenta. Devido à dificuldade causada pela turbidez da corrente, a taxa de deposição para esses fluxos só foi possível de ser avaliada diretamente, através da análise das imagens do vídeo, após os 35 segundos do ensaio M_10. Pelas imagens, notou-se que essa camada lamosa, mais concentrada, depositou uma grande quantidade de grãos (até ~ 40 segundos), restando apenas, no final do fluxo, uma deposição por suspensão mais diluída.

Apesar da formação dessa camada lamosa parecer modificar o mecanismo de deposição dessas correntes, o resultado final do depósito mostra uma divisão nítida entre os grãos de esferas de vidros posicionados e a argila no seu topo e que houve, ainda, uma deposição preferencial dos grãos não coesivos (maior velocidade de queda) seguido dos grãos

de argila no seu topo, evidenciando que o depósito ocorreu, através de partículas isoladas e, posteriormente, por decantação. A distribuição do diâmetro médio dos grãos ao longo da vertical apresentou características parcialmente gradadas, ou seja, com a falta de segregação (seleção) dos grãos nos instantes iniciais (grãos com mesmo diâmetro), seguida de uma camada gradada normalmente acima desta e de uma camada selante de argila no seu topo.

Nesses fluxos, ainda, é possível que as partículas coesivas em suspensão (argila) tenham formado flocos, devido à forte interação eletrostática, que foram alterando o tamanho da partícula e contribuindo para a formação da camada lamosa.

Os ensaios NC_20 e M_15 apresentaram os indícios de uma transição entre as regiões III e IV que serão discutidas a seguir

Outro fenômeno, que provavelmente contribuiu para a modificação do mecanismo de deposição dos grãos, foi o efeito da decantação impedida (*hindered settling*), uma vez que, nessas concentrações intermediárias, ocorre uma maior interação partícula-a-partícula em relação aos fluxos da região I, com conseqüente diminuição dos espaços entre os poros, o que retarda a sedimentação da partícula.

11.3.2.15 Taxa de deposição

Nesta segunda região, as partículas em suspensão presentes nos fluxos não se depositaram nos instantes iniciais do fluxo devido à alta aceleração (*waxing flow*) da região da cabeça e do início do corpo. A figura 11.20 apresenta um exemplo da taxa de deposição dos grãos para essa região.

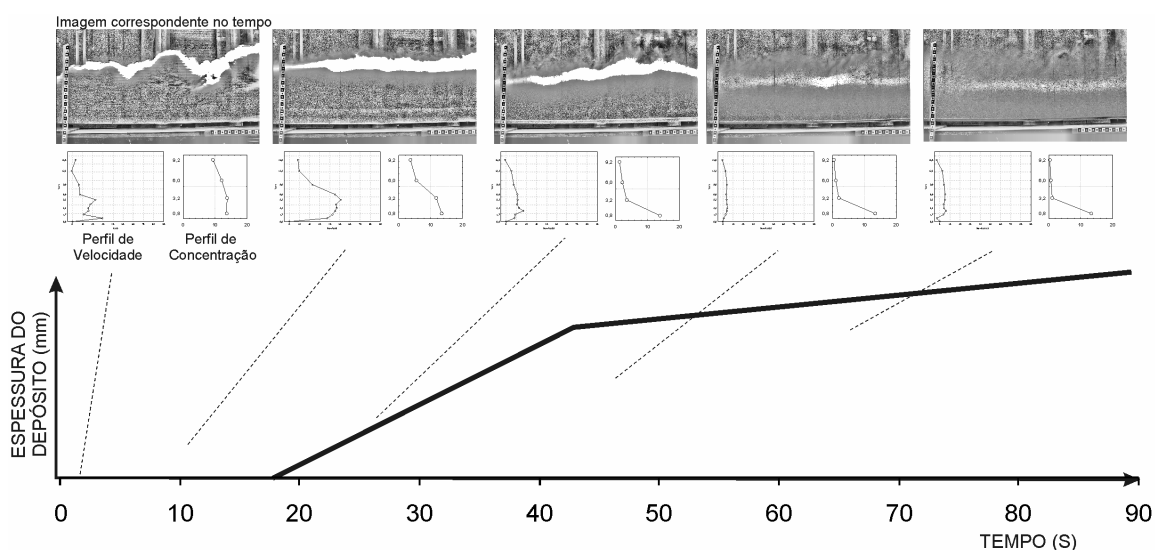


Figura 11.20 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região II.

Nos escoamentos sem presença de argila, só após, aproximadamente 8 segundos (pico de velocidade máxima), é que foi identificada a formação das primeiras camadas do depósito, devido ao início da desaceleração do fluxo (*waning flow*). Nesse caso, as partículas em suspensão foram sedimentando para as regiões mais próximas ao fundo, criando uma região mais concentrada junto ao fundo. Essa camada então se depositou, com uma taxa de deposição maior nos instantes iniciais do fluxo, atingindo praticamente 80% da espessura total do depósito, seguido de uma deposição mais lenta dos grãos até o fim do experimento, causando diferença na gradação ao longo da vertical (parcialmente gradado e gradado normalmente).

Nos fluxos com presença de argila, houve a identificação da formação da camada lamosa durante o escoamento (após 5 a 10 segundos), que escoava em regime turbulento. Após, aproximadamente, 35 segundos do ensaio M_10, a taxa de deposição pode ser acompanhada através das imagens, o que não dá certeza quanto ao início da deposição antes desse tempo. Pelo perfil de velocidade instantâneo apresentado na figura 11.20, a modificação do perfil aos 25 segundos, indica que, próximo a esse tempo, já se iniciou a formação do depósito. Para os outros experimentos dessa região (90B:10K, 75B:25K e M_15), a identificação dessa taxa de variação se deu pela análise da altura da camada lamosa formada nesses experimentos, ou seja, uma visualização indireta desse parâmetro.

11.3.3 REGIÃO III

11.3.3.1 Comportamento reológico das misturas

As misturas de sedimentos que compõem a região III apresentam um comportamento reológico com características Newtonianas.

11.3.3.2 Relação entre a espessura da cabeça e do corpo

Nos fluxos desta região, com baixa presença de argila e mais alta densidade ($C_{vol} > 25\%$), foi verificada uma tênue diferenciação entre as espessuras da cabeça e do corpo, sendo a espessura do corpo ligeiramente superior a espessura da cabeça. O tempo de passagem da cabeça foi muito pequeno (2% do tempo total do fluxo), o que indica um aumento de velocidade de avanço da corrente, sendo explicado pelo excesso de densidade provocado pelas altas concentrações de sedimento.

11.3.3.3 Regime de fluxo

Os escoamentos na terceira região também são turbulentos com os valores de Reynolds médio acima de 20000. O aumento na magnitude do Reynolds deve-se ao aumento

da velocidade (forças inerciais), que acompanha o aumento da concentração inicial (figura 11.2).

11.3.3.4 Perfis verticais médios de velocidade concentração e fluxo de sedimentos

A figura 11.21 apresenta os perfis verticais médios da velocidade, da concentração e do fluxo de sedimentos para a região III.

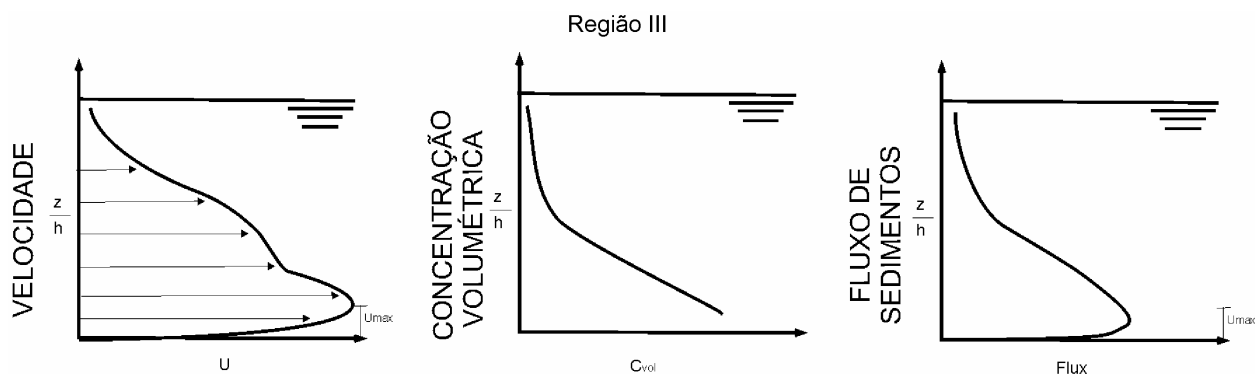


Figura 11.21 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região III.

Nessa região, composta por fluxos não coesivos, a tendência do perfil de velocidade já observada na região II se acentuou. Novamente, há a presença de uma zona mais destacada junto zona onde ocorre a velocidade máxima do escoamento, onde os valores medidos foram maiores, em termos absolutos, contudo, a velocidade máxima ocorreu mais próxima do fundo. Nesses experimentos, ficou muito destacada a presença da camada de mais alta concentração junto ao fundo, o que provocou essa mudança no perfil vertical de velocidades.

O perfil de concentração também é uma evolução daquele característico da segunda região, uma vez que a curva apresenta, novamente, uma diferença entre as concentrações junto ao fundo e as concentrações próximas da interface superior. Houve o aumento da espessura dessa zona mais concentrada e o ponto de inflexão (mudança da tendência) localizou-se a uma distância maior do fundo.

Com relação ao fluxo de sedimentos, o que pode ser verificado é um perfil mais pontiagudo junto ao fundo, com uma influência maior ao longo da vertical. A presença da camada mais concentrada junto ao fundo, durante a passagem do fluxo, gerou um perfil mais concentrado na cabeça da corrente. Por outro lado, devido à maior influência da concentração ao longo da vertical, a área de influência do fluxo de sedimentos foi maior.

11.3.3.5 Análise temporal da velocidade e da concentração

A figura 11.22 apresenta a série temporal da velocidade e da concentração a região III.

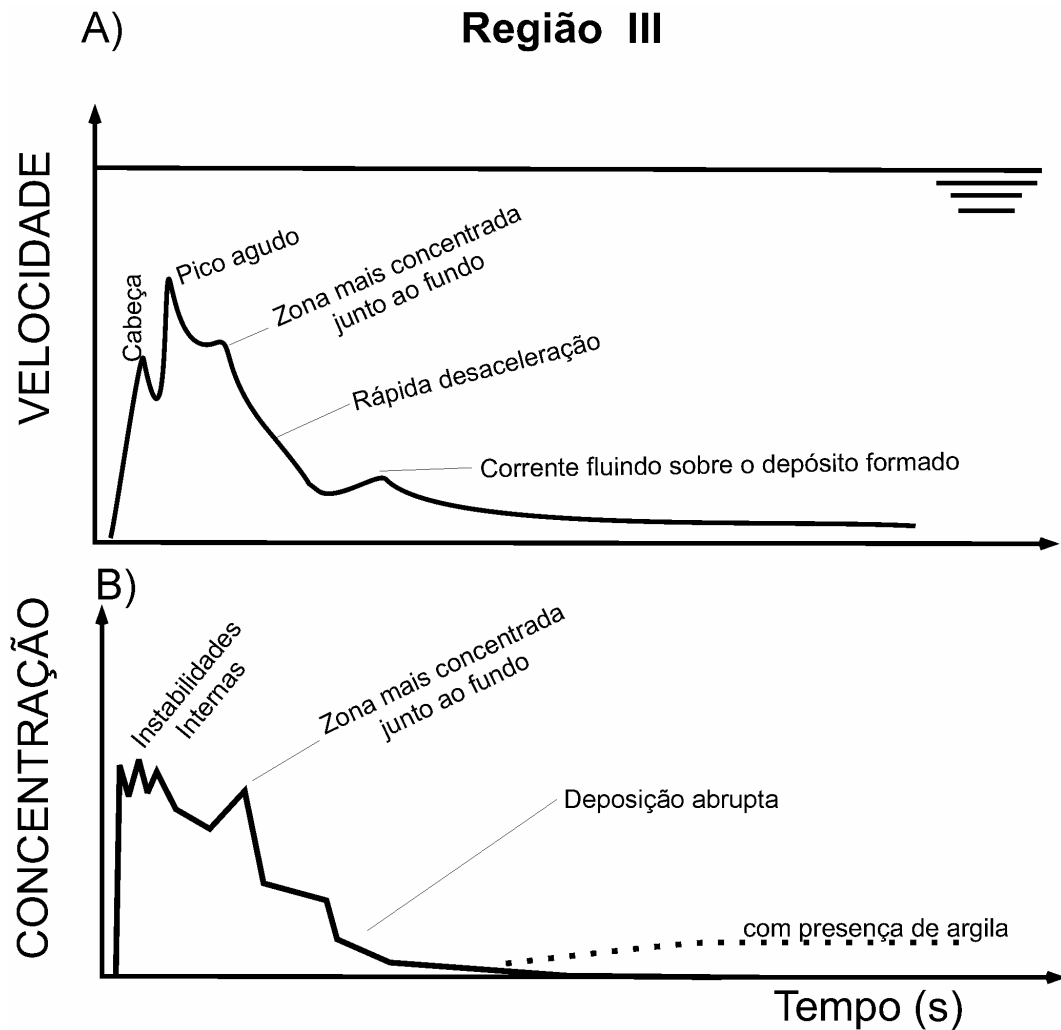


Figura 11.22 Séries temporais características da região III. a) Velocidade da corrente. b) Concentração volumétrica.

A terceira região, identificada baseada na análise temporal da velocidade e concentração, corresponde aos fluxos com maior concentração e, praticamente, não coesivo. Desta forma, a análise do mecanismo de suporte dos grãos no interior do escoamento é menos complexa.

Nessa terceira região, pode ser verificada, na série temporal da velocidade, uma fase de aceleração muito abrupta, praticamente vertical, devido à rápida passagem da cabeça (primeiro pico), representando menos de 1% do tempo total do escoamento. Após a passagem dessa frente, a corrente rapidamente atinge o pico de velocidade máxima, devido às forças gravitacionais do corpo e, posteriormente, começa a sua desaceleração (*waning flow*), também, mais rápida, uma vez que, valores muito baixos de velocidade são atingidos. Após essa desaceleração, o que se verifica é a passagem de uma segunda onda de sedimentos que corresponde ao fluxo final do corpo e da cauda da corrente, a qual escoar sobre o depósito previamente formado e que vai desacelerando até sua parada final.

Esse processo é melhor visualizado na série temporal da concentração, já que, após a passagem da frente, o fluxo mantém constantes os valores de concentração nos instantes iniciais, seguindo o mesmo processo descrito para a segunda região. Após ser atingido o pico de concentração, começa a deposição dos grãos, uma vez que a velocidade vai diminuindo. Nesse parâmetro fica evidente o momento de formação da camada de material suspenso mais concentrada junto ao fundo, cuja causa é a rápida deposição dos grãos que estavam em suspensão (pico na zona de desaceleração). Após esse pico, há uma redução abrupta da concentração, indicando uma forte deposição dos grãos que estavam em suspensão. No final, apenas a corrente mais diluída, com a carga de grãos mais finos (velocidade de queda menor), vai escoando e depositando esse material ao longo do tempo.

Nessa região, a presença de argila é prevista em, no máximo até 15 - 20% do valor, o que não acarretaria muita mudança no comportamento do fluxo, em termos hidrodinâmicos. Somente ocorreria uma mudança na parte final da concentração (linha pontilhada na figura 11.19), o que manteria um valor de concentração maior na cauda da corrente. Devido à falta de experimentos com diferentes teores de argila, essa região III não será muito discutida.

11.3.3.6 Mecanismo de suporte

O mecanismo de suporte de grãos nesses fluxos é, basicamente, a presença da turbulência ao longo de todo o escoamento, contudo ocorrem outros mecanismos de suporte como as interações entre os grãos, responsáveis pela formação da camada de sedimentos mais concentrada junto ao fundo.

A análise temporal instantânea do número de Reynolds (figura 11.23a) indica valores acima de 10000 ao longo de praticamente todo o escoamento. O perfil vertical médio do número de Reynolds apresenta (figura 11.23b), junto ao fundo, valores um pouco menores devido à presença do depósito que vai se formando ao longo do experimento e que, conseqüentemente, reduz os valores de velocidade.

Já na camada mais concentrada junto ao fundo, as altas colisões entre os grãos podem causar o aumento da pressão dispersiva, mantendo-os em suspensão por mais tempo. Por outro lado, a contínua alimentação desta camada pelos grãos presentes acima dessa zona, gera uma compactação e um aumento de sua concentração, até o ponto no qual ocorre uma espécie de saturação. Nesse momento, ocorre a deposição abrupta dos grãos (colapso friccional dos grãos). Além disso, o aumento da concentração dessa camada interna do fluxo aumenta o impedimento a decantação (*hindered settling*), alterando o mecanismo de suporte desses grãos.

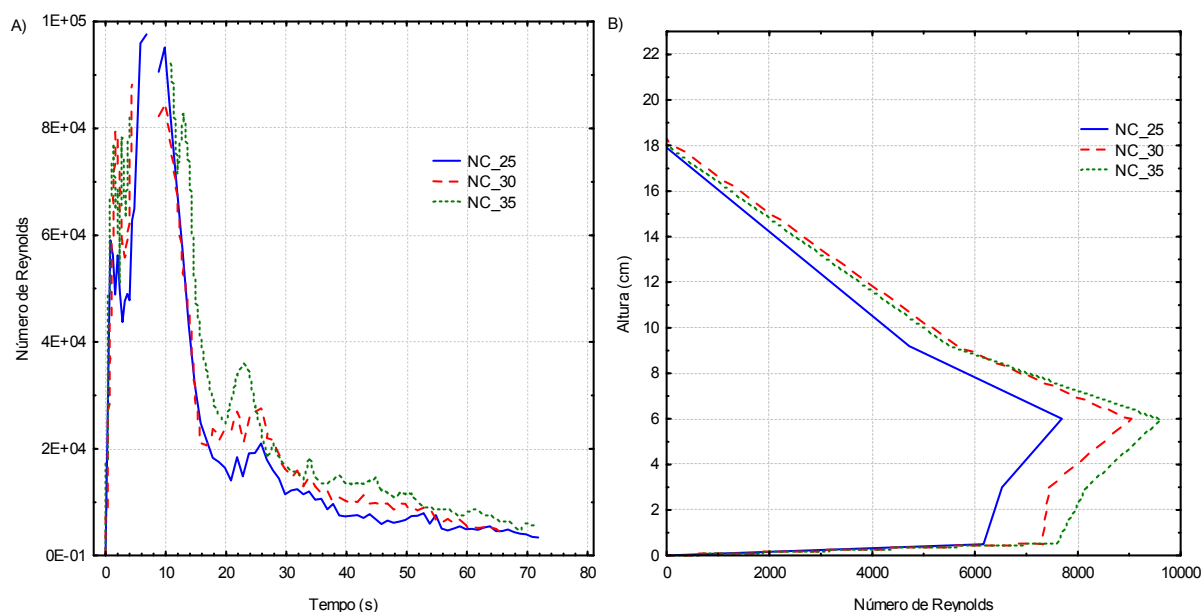


Figura 11.23 a) Série temporal do número de Reynolds. B) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região III.

11.3.3.7 Intensidade da turbulência

Nesta região III, a intensidade da turbulência do escoamento (figura 11.24) foi maior na região inicial da cabeça, devido à alta velocidade do fluxo causada pelo aumento da concentração. Atrás da zona da cabeça, é verificada uma zona central com uma grande intensidade da turbulência, junto à superfície e junto ao fundo, representadas pela turbulência gerada pelas instabilidades na interface superior e pela turbulência gerada pela segunda onda de fluxo que se desenvolveu sobre o depósito previamente formado.

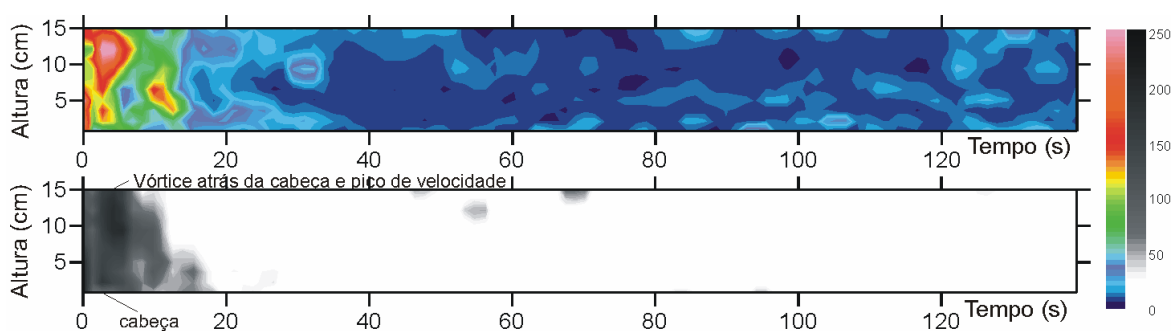


Figura 11.24 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região III, em duas escalas de cores distintas

11.3.3.8 Presença da camada interna do escoamento (bipartição)

A camada interna bipartida formada nessa região apresenta uma característica diferenciada se comparada com a região II, uma vez que sua aceleração é maior e a sua desaceleração é mais rápida também. A figura 11.25 apresenta o desenvolvimento do número de Reynolds da camada interna, descrevendo as oscilações dos valores, o que implica em

movimentos ondulatórios dessas camadas (ondas internas de sedimentos) que podem interferir no mecanismo de deposição. Entretanto, após atingir um pico de número de Reynolds alto, houve uma rápida desaceleração, com uma menor quantidade de movimentos ondulatórios, mostrando a rápida deposição dos grãos dessa camada.

Essa transição pode ser verificada pela presença de turbulência nessa camada, uma vez que ela apresenta um alto grau de turbulência durante o seu desenvolvimento inicial, porém, após a sua passagem (aproximadamente 20 a 25 s), os grãos se depositaram e os valores foram reduzidos a praticamente zero.

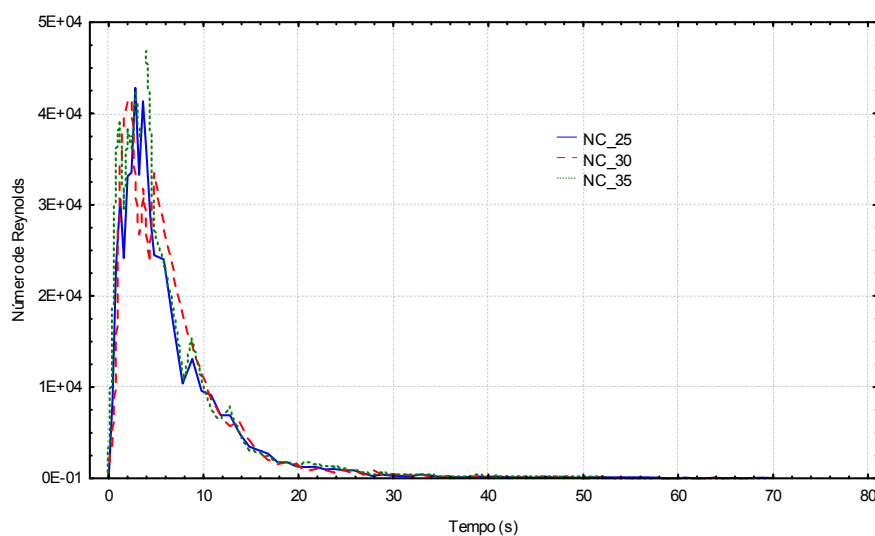


Figura 11.25 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada junto ao fundo dos ensaios da região III.

11.3.3.9 Velocidade e concentração média

A velocidade média apresentou um comportamento diferenciado ao das outras regiões, com valores de velocidade média da cabeça praticamente iguais à velocidade do corpo, indicando um equilíbrio entre as forças de empuxo e as forças gravitacionais. Com relação à concentração média, novamente, a cabeça apresenta um valor maior (1,5 vezes) com relação ao corpo.

11.3.3.10 Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical

A terceira região de depósitos identificada diz respeito às correntes não coesivas (simuladas) que apresentaram depósitos parcialmente gradados, com os valores do diâmetro médio do grão mais próximos à região junto ao fundo e, acima disso, uma gradação normal, com o afinamento dos grãos no topo do depósito (figura 11.26).

Nesta região III, não foram realizados experimentos com presença de argila na mistura, sendo seu resultado não avaliado nesse trabalho.

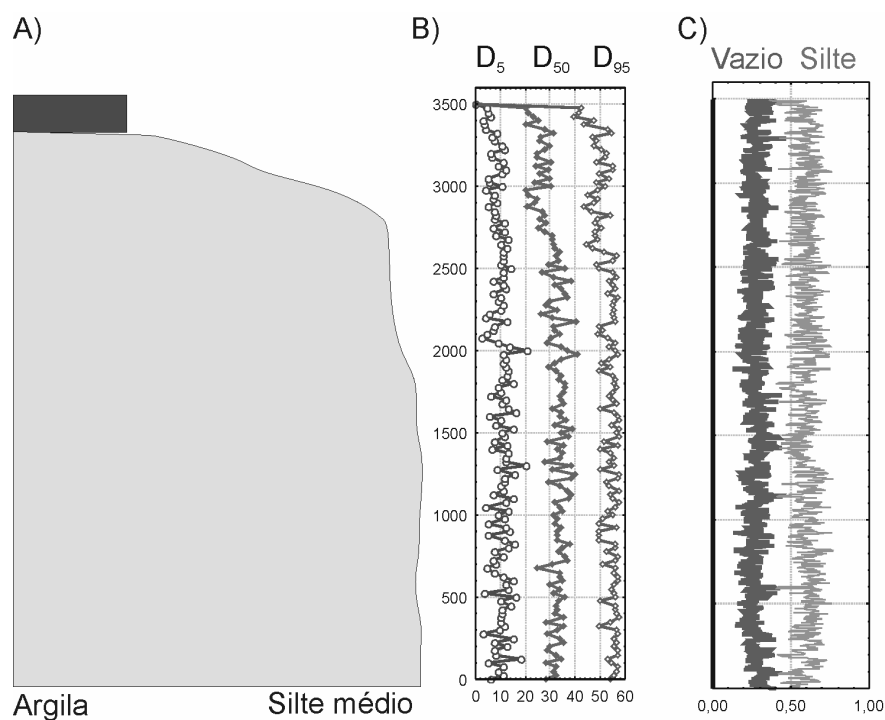


Figura 11.26 a) Modelo de gradação do depósito para a região III; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . e; c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.

11.3.3.11 Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade)

Nessa região III, a curva de distribuição granulométrica representa somente a ocorrência das esferas de vidro, uma vez que não foram realizados experimentos com presença de argila. Assim, o resultado desse parâmetro apresenta uma curva com característica unimodal, praticamente simétrica e com uma menor dispersão entre os valores (leptocúrtica), aumentando assim o pico da moda da distribuição para valores da ordem de 75% (figura 11.27).

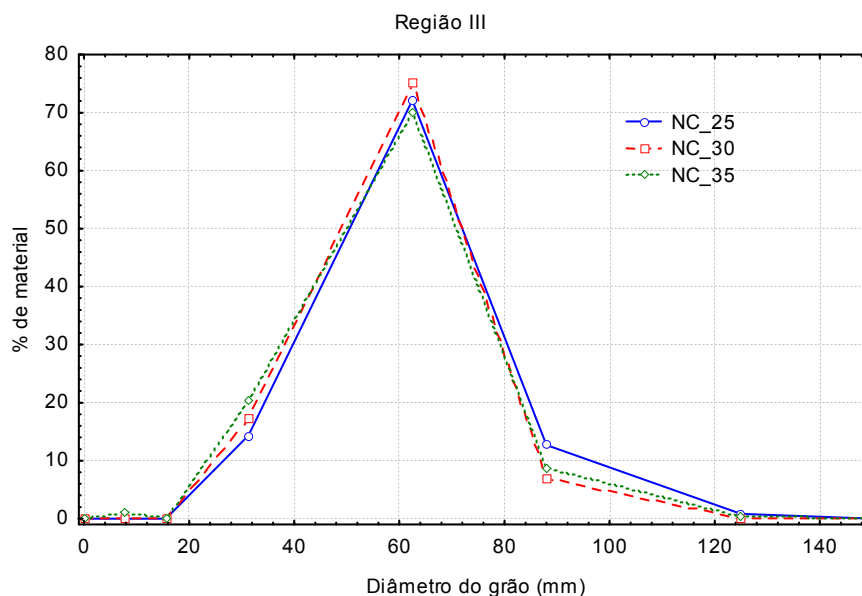


Figura 11.27 Distribuição granulométrica característica do depósito da região III.

Essa pequena diferença na forma da curva (menor dispersão em torno da moda) pode ser explicada pela melhor seleção dos grãos durante o escoamento, o qual carregou os sedimentos mais finos à jusante, não depositando essa fração sobre o canal, durante o percurso das correntes

11.3.3.12 Espessura relativa do depósito

A média da relação entre as espessuras do depósito medidas após 24 horas e a espessura do fluxo nos ensaios dessa região indica um aumento, com relação às regiões anteriores, de 4,4% (desvio padrão de 0,20), evidenciando que a maior concentração dos grãos na mistura da corrente está gerando uma espessura de depósito igualmente maior.

11.3.3.13 Quantidade de material depositado - balanço de massa

A quantidade de material depositado no canal foi a menor entre todas as regiões, com os valores ficando reduzidos a 7,3% (desvio padrão de 0,8), indicando que a corrente tinha uma capacidade de transportar mais de 90% do material em suspensão por distâncias maiores.

11.3.3.14 Mecanismos de deposição

O mecanismo de deposição da região III representa a continuação do desenvolvimento daquele observado na segunda região, uma vez que a carga em suspensão torna-se progressivamente concentrada em direção ao fundo, escoando em condição turbulenta, e o mecanismo de suporte dos grãos pode apresentar, além dessa turbulência, a interação entre os grãos como um fator importante, tendo como consequência uma deposição mais abrupta, já que ocorre uma dissipação da energia causada pelo choque entre essas partículas, além da diminuição do espaço para elas se movimentarem, acarretando na queda dos grãos de forma mais rápida.

Além disso, a deposição abrupta dos sedimentos, após a formação dessa camada de sedimentos em arraste junto ao fundo, pode ser um primeiro indício de um congelamento friccional, onde os grãos não coesivos colapsam e se depositam de maneira mais rápida e não selecionada (sem segregar os grãos por tamanho). Apesar da concentração inicial da corrente não indicar o congelamento friccional de grãos (*frictional freezing*), o qual é normalmente descrito para concentrações maiores, durante a passagem do fluxo, essa camada mais concentrada pode atingir valores de concentração instantâneos maiores do que a concentração inicial, indicando ser possível a ocorrência desse fenômeno nesse tipo de região.

A alta interação entre os grãos também é responsável pelo depósito ser parcialmente gradado, pois, junto ao fundo, há uma maior uniformidade dos diâmetros dos grãos e acima dele, há uma gradação normal causada pela deposição de grãos individuais que escoam na

região final do corpo e da cauda da corrente. A segregação é inibida pela alta concentração devido ao espaço entre os poros tornarem-se muito pequenos com relação ao tamanho da partícula, não permitindo que a mesma segregue. No ensaio NC_35, a presença de grãos maiores no meio do depósito indica uma evidência maior da não segregação e do início do congelamento friccional dos grãos.

Nessa região, a influência da presença de argila não foi avaliada experimentalmente. Sua influência no escoamento e nos depósitos é uma idealização com base nos dados adquiridos nos outros experimentos (grupo misto e transição) que se encontravam próximos ao limites entre as regiões II e III, bem como entre as regiões II e IV.

11.3.3.15 Taxa de deposição

Nos ensaios da região III, não há uma evidência muito significativa de deposição dos grãos nos primeiros 25 a 30 segundos do fluxo, por conta da alta velocidade e da intensidade da turbulência nas regiões da cabeça e do início do corpo (figura 11.28). Foi verificada, também, a formação de camada de sedimentos em suspensão mais próxima ao fundo após o pico de máxima velocidade (~ 8 segundos), que se desenvolveu por, aproximadamente, 25 segundos. Após esse momento, houve a deposição abrupta dos sedimentos, com mais de 90% da carga total de sedimentos se depositando.

Nos instantes finais do ensaio, apenas a deposição por sedimentação dos grãos presentes na corrente mais diluída (final do corpo e cauda da corrente) foi identificada, aumentando a espessura do depósito final em poucos milímetros.

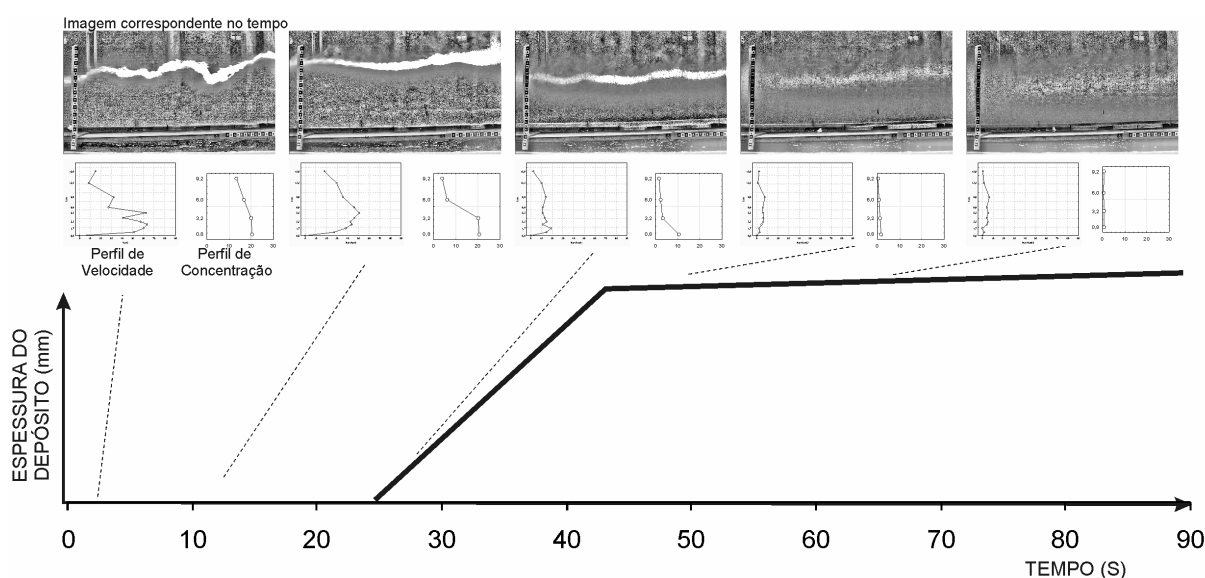


Figura 11.28 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região III

11.3.4 REGIÃO IV

11.3.4.1 Comportamento reológico das misturas

Esta região apresenta um comportamento não Newtoniano, mais especificamente um comportamento plástico de Herschel-Bulkley.

Estes fluxos se caracterizam por apresentar uma tensão crítica inicial (*yield stress*), alterando o comportamento do escoamento e dos depósitos gerados. Nesse tipo de comportamento reológico, o cálculo da viscosidade dinâmica não é mais direto, sendo necessário determinar a viscosidade aparente que, por sua vez, depende do gradiente de velocidade (deformação) e da concentração ao longo da vertical.

11.3.4.2 Relação entre a espessura da cabeça e a do corpo

Na região IV, assim como na região II, a relação entre a espessura da cabeça e do corpo da corrente apresentou um valor próximo à unidade. A concentração volumétrica inicial dos fluxos, nas regiões II e IV, também foram similares, contudo, há uma diferenciação quanto às propriedades reológicas das misturas.

11.3.4.3 Regime de fluxo

A quarta região tem comportamento muito similar ao comportamento da região II, com valores de Reynolds praticamente na mesma ordem de grandeza e fluxo turbulento. Entretanto, essa região se diferencia pelo fato de apresentar um comportamento reológico particular (figura 11.2).

11.3.4.4 Perfis verticais médios de velocidade concentração e fluxo de sedimentos

A figura 11.29 apresenta os perfis verticais médios da velocidade, da concentração e do fluxo de sedimentos para a região IV.

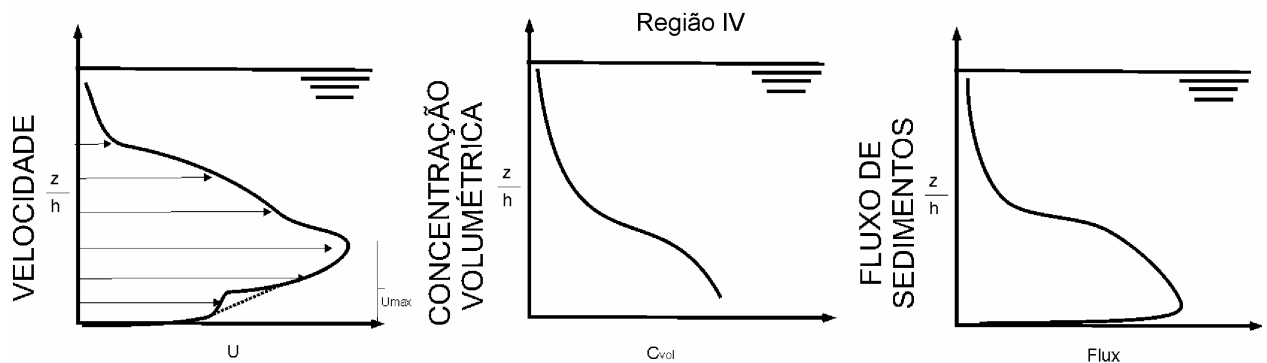


Figura 11.29 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região IV.

Na quarta região, registraram-se as modificações mais drásticas no perfil de velocidades. Como essas misturas apresentavam um comportamento não Newtoniano, sob a influência da tensão inicial crítica e da alta viscosidade junto ao fundo, o perfil de velocidades apresentou a formação de um escoamento tipo “plug” junto ao fundo, logo acima da camada cisalhante, no qual pode ser verificada a presença da subcamada viscosa.

Assim, o perfil de velocidades apresenta quatro zonas de escoamento, sendo uma zona de influência da subcamada viscosa (camada cisalhante); a região de “plug”, quando o valor da tensão de cisalhamento é menor que a tensão crítica ao escoamento (*yield strength*), e o perfil de jato dividido em duas regiões acima da zona de “plug”.

Em alguns experimentos (M_20 = 50B:50K) não foi detectada a presença da camada de “plug”, entretanto, esse ensaio se encontra dentro do intervalo de incerteza de mudança de comportamento, sendo então classificado dentro dessa quarta região.

Cabe ressaltar que nesses fluxos foram identificados, pela primeira vez, a formação da camada lamosa de sedimento durante a passagem do fluxo.

O perfil de concentrações também apresenta uma modificação devido à presença da camada lamosa junto ao fundo, a qual foi identificada e medida ao longo do escoamento, gerando valores altos de concentração e, praticamente, estratificando o fluxo em duas regiões: uma com grande quantidade de sedimentos (abaixo) e outra com pouco sedimento presente na mistura (acima). Cabe ressaltar que nesta região, a concentração ainda não atingiu a concentração de gel (*Concentration Gelling*) das misturas coesivas (Winterwerp, 2002).

O perfil do fluxo de sedimentos também foi alterado nessa quarta região, apresentando a formação da influência da camada lamosa junto ao fundo, criando uma região, junto ao fundo, maior e mais espessa. Acima do ponto de máximo, há a formação de uma região mais proeminente na vertical indicando que o fluxo de sedimentos foi aumentado.

11.3.4.5 Análise temporal da velocidade e da concentração

A figura 11.30 apresenta a série temporal da velocidade e da concentração a região IV. A quarta região apresenta o primeiro grupo da transição entre os fluxos Newtonianos e os fluxos não-Newtonianos, o que, conseqüentemente, acarreta em mudanças nos processo hidrodinâmicos e no mecanismo de suporte dos grãos.

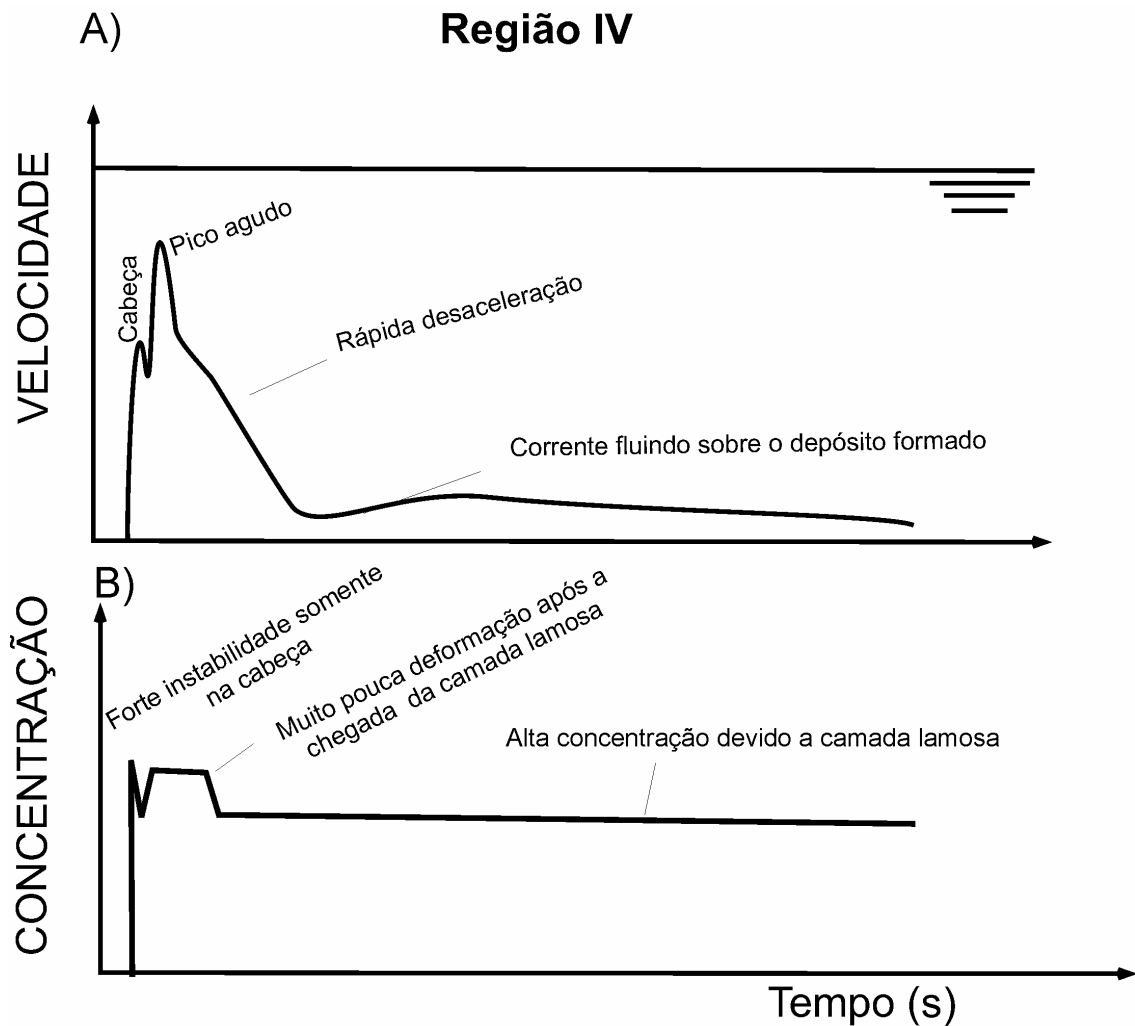


Figura 11.30 Séries temporais características da região IV: a) Velocidade da corrente e; b) Concentração volumétrica

Pela análise da série temporal da velocidade, o que pode ser observado é a forte aceleração nos instantes iniciais, com uma região da cabeça quase insignificante com relação ao tempo de sua passagem, com a formação de um leve vórtice logo atrás e a rápida ocorrência do pico de máxima velocidade. Nesse caso, o tempo em que esse pico foi alcançado ficou muito próximo ao da chegada da corrente. Após esse pico, a corrente sofreu uma forte desaceleração, com valores de velocidade muito próximos a zero. A explicação, para essa forte desaceleração, pode ser evidenciada na série temporal da concentração, uma vez que o padrão apresentado indica uma mudança do comportamento causado pela presença da argila nas misturas, a qual ocasionou a formação de uma camada lamosa mais concentrada junto ao fundo. Após a passagem da cabeça da corrente e dos instantes iniciais do corpo (apresentando uma variação de valores de concentração), ocorre uma diminuição dos valores de concentração até atingir um valor, praticamente constante (patamar), o qual representa a chegada da camada lamosa, que, após isso, praticamente se mantém indeformada.

11.3.4.6 Mecanismo de suporte

Com relação ao mecanismo de suporte dos grãos, a série temporal do número de Reynolds (figura 11.31a), bem como o seu perfil vertical médio (figura 11.31b), indicam que a presença da argila na mistura atua como fator inibidor da turbulência, especialmente junto ao fundo, uma vez que as forças viscosas preponderam nessa zona. A matriz coesiva começa a ganhar importância nesse contexto, uma vez que, claramente, ocorre mudança no comportamento hidrodinâmico da corrente. O empuxo do fluido intersticial (água com argila) e a poro-pressão também contribuem para manter os grãos flutuando nessa camada lamosa.

Nessa região aparecem os primeiros escoamentos com a influência da subcamada viscosa junto ao fundo e do escoamento em “plug”, causado quando a tensão crítica ao escoamento (*yield strength*) não é superada pela tensão de cisalhamento do escoamento.

A presença da subcamada viscosa indica a predominância das forças viscosas que atuam no escoamento, porém, não implica num fluxo laminar, uma vez que uma alta intensidade da turbulência pode ser gerada no interior dessa camada, através de “spots” de turbulência.

Esse comportamento, já comentado anteriormente, é novamente reforçado no perfil vertical do número de Reynolds que indica uma mudança de valores, especialmente, nas zonas junto ao fundo.

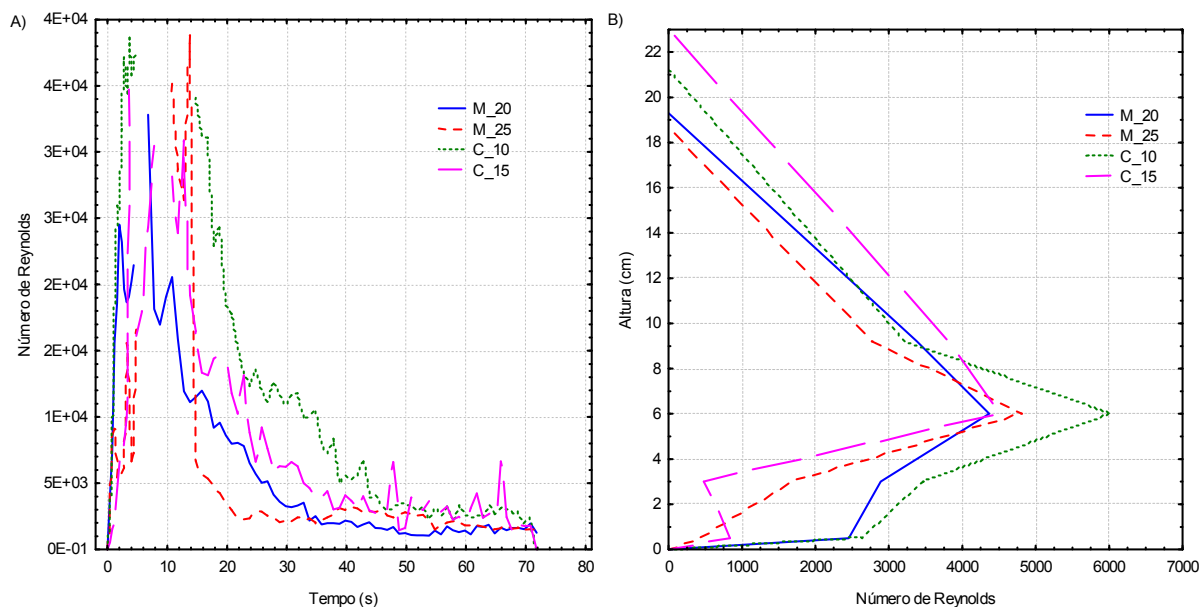


Figura 11.31 a) Série temporal do número de Reynolds e; b) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região IV.

11.3.4.7 Intensidade da turbulência

A intensidade da turbulência foi avaliada para os ensaios desta quarta região (figura 11.32) com os maiores valores ocorrendo na região que se estende da cabeça até a chegada do

pico de velocidade máxima do corpo. Essa intensidade se mantém ao longo de toda a vertical, praticamente numa condição homogênea.

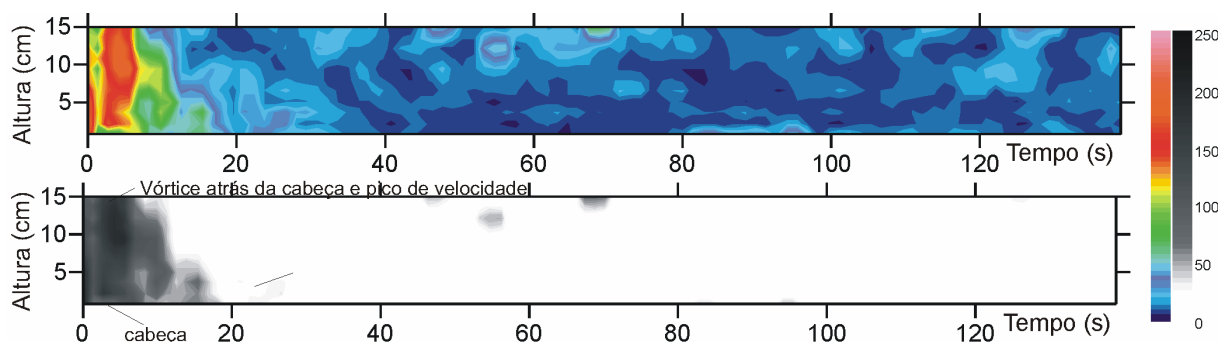


Figura 11.32 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região IV, em duas escalas de cores distintas

11.3.4.8 Presença da camada interna do escoamento (bipartição)

Nos escoamentos dessa região, novamente foi identificada a presença de uma camada mais concentrada de sedimentos, no caso, a camada lamosa, que se desenvolveu ao longo do escoamento. Essa bipartição do escoamento é melhor compreendida quando avaliamos a série temporal do número de Reynolds (figura 11.33), a qual indica turbulência nos instantes iniciais (valores acima de 4000) e, após isso, uma diminuição dos valores até a predominância das forças viscosas (partes finais do fluxo).

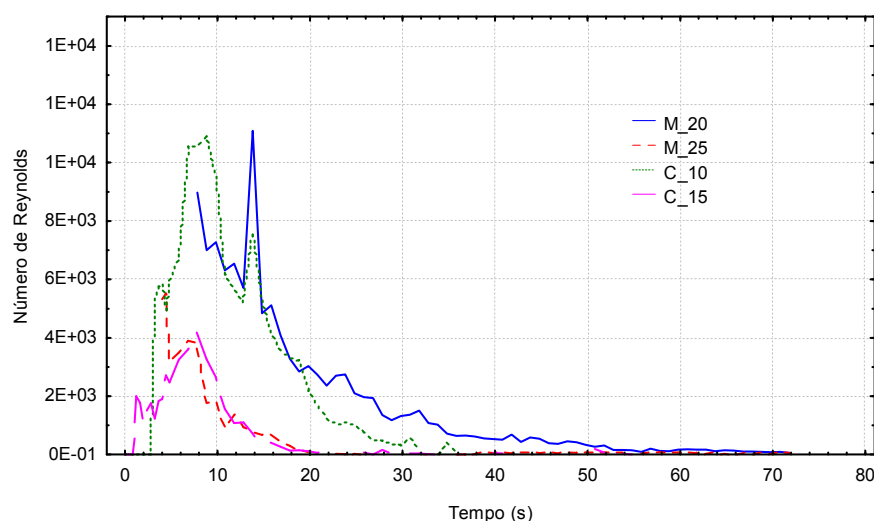


Figura 11.33 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada junto ao fundo dos ensaios da região IV.

A diferença entre a camada lamosa formada nos ensaios da região IV e a camada lamosa formada nos ensaios da região II é a sua deformação, pois na região IV, a camada pouco se deformou após a sua chegada ao ponto de medição, o que pode ser evidenciado na figura 11.30 pelo o valor constante da concentração.

Os ensaios M_25 e C_25 apresentam um comportamento um pouco diferenciado para essa camada, indicando que, em torno dessas concentrações, é que se encontra a transição entre as regiões IV e V.

11.3.4.9 Velocidade e concentração média

A avaliação da relação entre as velocidades médias do corpo e da cabeça apresenta, novamente, nos fluxos mais concentrados e/ou com mais presença de argila, a cabeça da corrente como sendo o local com maior velocidade, turbulência e mistura. Cabe ressaltar também, que a zona frontal é praticamente insignificante se comparada com o tempo total do fluxo. As forças viscosas que atuam nesses escoamentos causam a diminuição da velocidade média do corpo da corrente, sendo assim, os valores foram menores. Já a concentração média da corrente é um pouco diferenciada, uma vez que, a camada lamosa, com sua alta concentração local próxima ao fundo, aumentou os valores médios do corpo. Como consequência, a diferença entre a cabeça e o corpo apresentada nos outras regiões (~1,5 vezes) diminuiu para valores próximos a 1,3.

11.3.4.10 Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical

A quarta região apresenta, na sua configuração, um depósito gradado normalmente ao longo da vertical, porém o grande diferencial dessa região para as três primeiras é a presença de argila ao longo de mais da metade da vertical, criando três camadas deposicionais distintas (figura 11.34): uma camada inferior com a presença de, praticamente, areia/silte (esferas de vidro) limpa (sem argila); acima dessa camada, uma região lamosa, com uma matriz de areia e argila não gradada, e seguida, no topo, de uma camada puramente de argila (que seria a camada selante do depósito).

Ao longo da vertical dessas três camadas, a presença de argila varia de mais de 90% (topo - selante) para 60% a 70% (na camada intermediária) e menos de 20% na região junto ao fundo, fazendo com que a separação destas regiões seja claramente distinguida. Na camada intermediária, as esferas de vidro encontradas não apresentam nenhuma gradação, estando simplesmente dispersas na matriz lamosa.

Junto ao fundo, o material não coesivo apresenta uma gradação tendendo levemente à gradação normal, com um afinamento do tamanho dos grãos em função da distância ao fundo. Pode-se supor que, à medida que a quantidade de areia (esferas de vidro) vai diminuindo (região se aproximando dos fluxos puramente coesivos na figura 11.1), a camada junto ao fundo vai diminuindo sua espessura, sendo dominada pela matriz lamosa. Nas correntes sem a presença de grãos não coesivos (puramente argilosos), o depósito é um pouco diferenciado, notando-se a camada de argila ao longo de toda a sua distribuição. Nesse caso,

os detalhes internos do depósito (parâmetros avaliados nas imagens geradas pelo microscópio eletrônico de varredura) não foram avaliados.

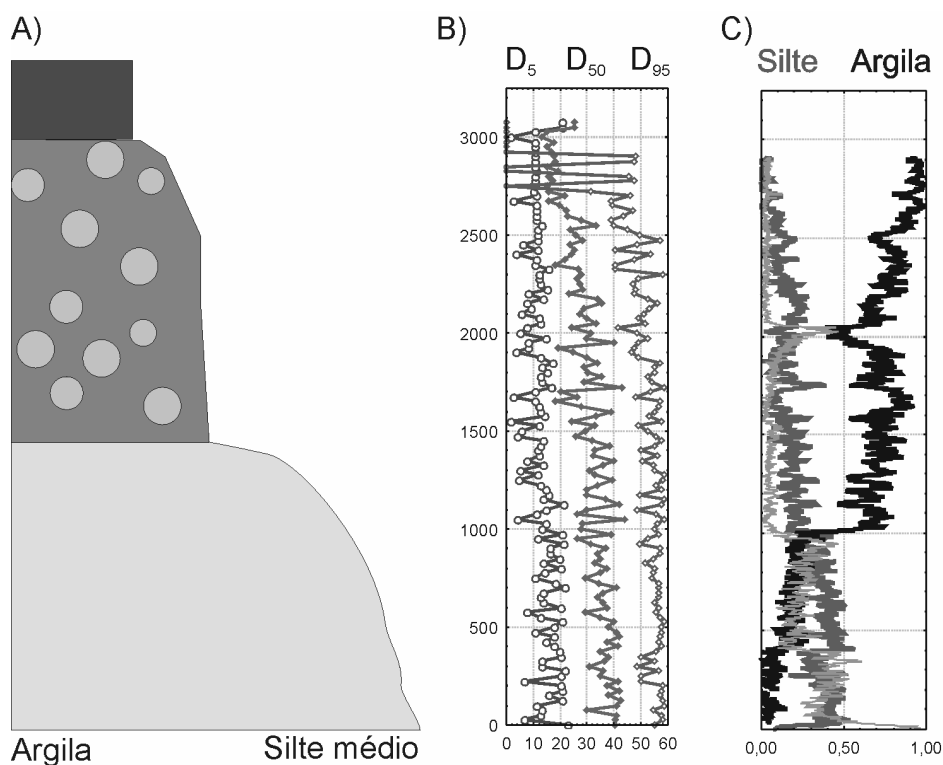


Figura 11.34 a) Modelo de gradação do depósito para a região IV; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . e; c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.

11.3.4.11 Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade)

Com relação à distribuição dos grãos nos depósitos da região IV (figura 11.35), pode ser verificado que a curva apresenta a mesma característica bimodal das regiões anteriores, porém com diferença quanto ao sedimento predominante. No caso, a fração argila foi mais presente no depósito. O pico de deposição da parcela da argila varia entre 30 - 40% enquanto que o pico da parcela das esferas de vidro é da ordem de 20 - 30%.

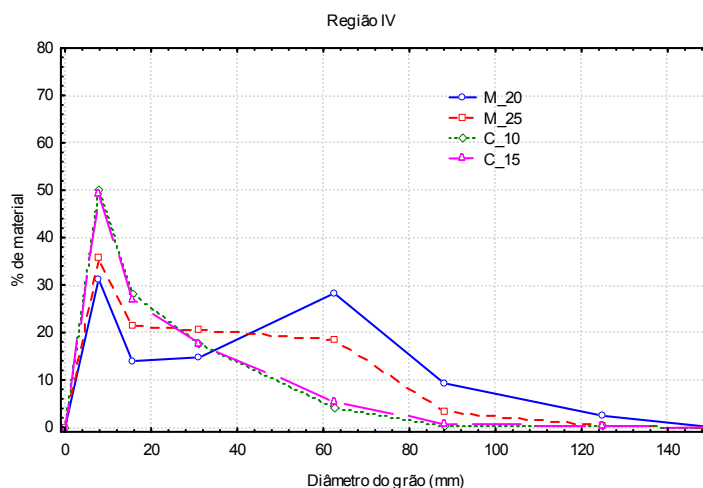


Figura 11.35 Distribuição granulométrica característica do depósito da região IV

11.3.4.12 Espessura relativa do depósito

A relação entre a espessura do depósito e a espessura do fluxo aumentou para essa região, com os valores chegando a 12,2% (desvio padrão de 5,98), ou seja, um aumento de mais de 100% com relação à região III. Nesse caso, o comportamento não-Newtoniano da corrente e a presença da camada lamosa junto ao fundo, fizeram com que uma maior quantidade de material ficasse retida na calha. Cabe ressaltar, também, que os depósitos de argila continham muita quantidade de água no seu interior, o que produziria, se fosse medida a espessura do depósito final, valores menores.

11.3.4.13 Quantidade de material depositado - balanço de massa

O aumento da espessura do depósito, discutido no item anterior, está relacionado ao aumento da quantidade de material depositado nos experimentos. Através do balanço de massa foi possível estimar que, em média, 13,4% (desvio padrão de 6,6) do material ficou depositado durante os experimentos.

Apesar dessas misturas conterem argila na sua matriz, o que induziria a um aumento da capacidade de transporte dos grãos, os efeitos provocados por esses grãos coesivos, especialmente a mudança do comportamento reológico do escoamento, serviu de efeito contrário, formando com isso, depósitos mais espessos e com maior quantidade de material. O alto desvio padrão do material que ficou depositado pode ser explicado pela presença do ensaio M_25 que está no limiar entre as regiões IV e V.

11.3.4.14 Mecanismos de deposição

Nessa quarta região de deposição o que foi verificado é a transição de comportamento dos fluxos da região II com maior presença de argila na mistura. Entretanto, o efeito do comportamento não-Newtoniano dessas misturas, causadas pela maior presença de argila e concentração, foi o responsável por uma alteração no mecanismo de deposição das partículas.

Nessa região, a formação da camada lamosa junto ao fundo durante o escoamento apresentou um comportamento um pouco diferenciado, com uma deformação (movimentação) um pouco menos intensa que aquela dos fluxos da segunda região. Dentre os depósitos menos concentrados nesse fluxo (M_20 e C_10), apenas o depósito M_20 foi estudado ao nível microscópico. Nesse caso, esse depósito apresenta o início da formação (parcial) do escoamento tipo “plug” de sedimentos, o que causa uma deposição em massa, do topo do depósito até a base.

Nessa zona de “plug”, a tensão de cisalhamento do fluido é menor do que a tensão crítica do escoamento (*yield strength*), gerando uma parada da massa suspensa, a qual, por sua vez, se deposita instantaneamente (congelamento coesivo). Como esse processo é

praticamente instantâneo, não há segregação (seleção) de grãos no seu interior, sendo que os grãos que estavam sendo transportados, praticamente param na posição, normalmente caótica, em que estavam.

Junto ao fundo, porém, esse fenômeno não ocorreu, devido à presença de uma zona mais cisalhante. Nesse caso, as esferas de vidro ainda tiveram uma certa liberdade para se depositar no fluxo, uma vez que a influência da camada lamosa tipo “plug” não atuou nessa zona. Já no topo, a deposição de grãos de argila ocorre individualmente durante o fluxo e por decantação, após a parada do mesmo.

Nesses fluxos, devido ao aumento da quantidade de argila presente nas misturas, o escoamento pode possuir concentração próxima da concentração de gel das partículas coesivas, a qual modifica a estrutura do depósito, uma vez que os grãos coesivos começam a atuar como se fosse um sólido.

11.3.4.15 Taxa de deposição

Devido à dificuldade de visualização do fluxo, causado pela turbidez da água (presença de argila na suspensão), os momentos iniciais do depósito não puderam ser exatamente quantificados para a avaliação do taxa de deposição (figura 11.36), entretanto, com base nos perfis de velocidade e de concentração, nota-se que, após a passagem da cabeça da corrente e do pico de máxima velocidade, ocorre a desaceleração do fluxo, com o início da formação da camada lamosa turbulenta que escoava numa região turbulenta (deformando-se bastante e apresentando ondulações na interface) e, após 20 a 30 segundos, ocorre a deposição em massa dessa camada (parada do sistema).

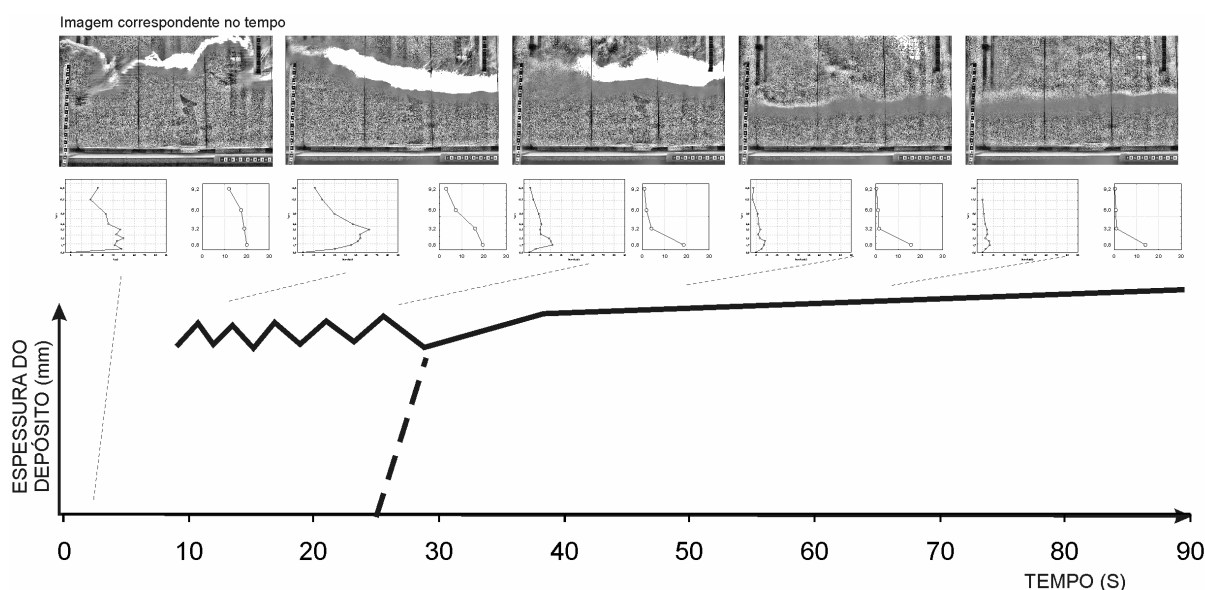


Figura 11.36 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região IV

Na parte final do ensaio, somente um fluxo remanescente diluído foi verificado, escoando e depositando individualmente os grãos, da base para o topo, até a final do ensaio.

11.3.5 REGIÃO V

11.3.5.1 Comportamento reológico das misturas

Esta região apresenta um comportamento não-Newtoniano, mais especificamente, um comportamento plástico de Herschel-Bulkley.

11.3.5.2 Relação entre a espessura da cabeça e do corpo

Na região V foi verificado que a altura média do corpo foi se tornando preponderante sobre a altura da cabeça, uma vez que houve o aumento da espessura do corpo causado pela criação de uma camada lamosa junto ao fundo. Além disso, o incremento da concentração volumétrica, causou o aumento da velocidade de avanço e a diminuição da espessura da cabeça.

11.3.5.3 Regime de fluxo

Na região V, os fluxos começam a apresentar mudanças de comportamento (figura 11.2). Apesar de ainda estarmos dentro da faixa dos fluxos turbulentos, a influência das forças viscosas (fluidos não Newtonianos) começa a ser sentida, de forma a diminuir a ordem de grandeza do número de Reynolds médio, o qual atinge, no máximo, o valor de 4000, ficando a maior parte dos escoamentos na zona de transição ($400 < Re < 2000$).

11.3.5.4 Perfis vertical de velocidade, de concentração e de fluxo de sedimentos

A figura 11.37 apresenta os perfis verticais médios da velocidade, da concentração e do fluxo de sedimentos para a região V.

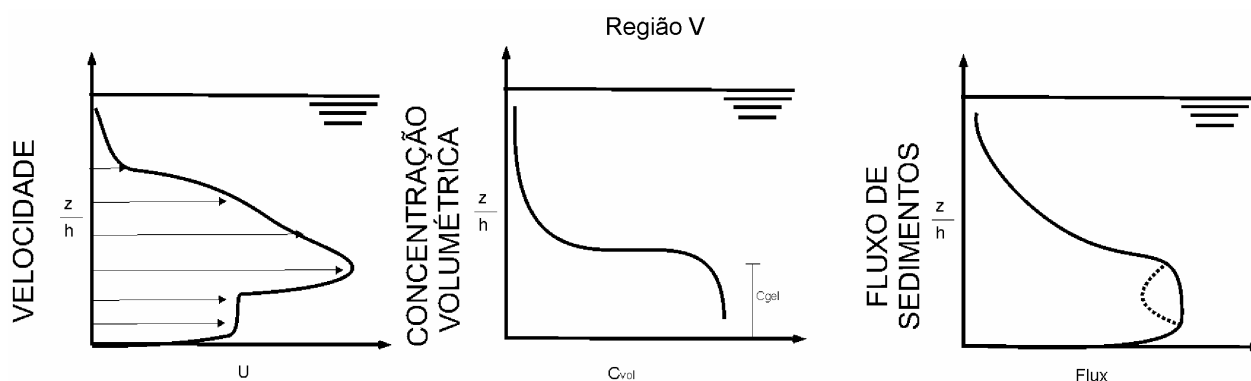


Figura 11.37 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região V.

Na região V, o perfil de velocidade apresenta a continuação dos efeitos descritos nos fluxos da quarta região, com a formação de um perfil complexo que indica a presença de uma zona de “plug” de sedimentos. Nesse caso, todos os fluxos apresentaram a influência viscosa junto ao fundo (presença da camada lamosa) e da subcamada viscosa.

O perfil de concentrações na região V apresenta um caráter completamente estratificado, com altas concentrações junto ao fundo e baixas concentrações junto à superfície superior. Na região mais concentrada próxima ao fundo, os valores foram praticamente constantes e próximos à concentração de gel dos sedimentos coesivos. Essa camada mais concentrada está relacionada à camada lamosa desenvolvida no escoamento.

O perfil de fluxo de sedimentos apresentou um comportamento com uma frente de avanço, caracterizada por possuir os valores constantes ao longo da vertical em alguns casos (p. ex. 25B:75K). Houve a formação de uma reentrância no meio desta camada, provocada pela influência do escoamento de “plug” junto a esse ponto ao longo da vertical (tracejado na figura 11.37), enquanto que, junto ao fundo e logo acima dessa reentrância, os valores de velocidade foram maiores.

11.3.5.5 Análise temporal velocidade e concentração

A figura 11.38 apresenta a série temporal da velocidade e da concentração para os ensaios da região V.

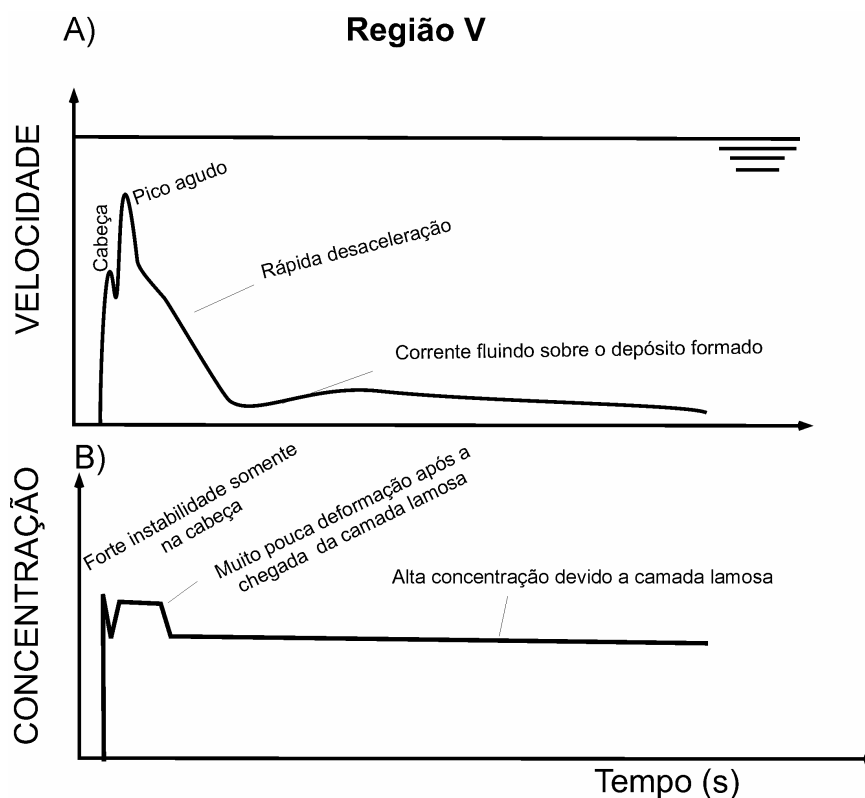


Figura 11.38 Séries temporais características da região V. a) Velocidade da corrente. b) Concentração volumétrica..

A análise da série temporal de velocidades e de concentração da quinta região indica que a influência do comportamento não-Newtoniano (presença de argila e alta concentração) é mais significativa no comportamento da velocidade, já que nesta grandeza apresenta, praticamente, o mesmo comportamento descrito na quarta região, porém, com um ciclo de aceleração/desaceleração mais rápido, totalizando, aproximadamente, 12 - 18 segundos ao invés de 20 - 25 segundos da região anterior. Os dados ainda registram que, sobre o material depositado, houve a passagem de uma segunda frente de onda, representando o escoamento mais diluído da parte final do corpo e da cauda.

A série de concentração apresenta uma modificação com relação aos comportamentos anteriores, com a detecção da passagem da cabeça e dos instantes iniciais do corpo, onde houve o registro de oscilações significativas dos valores e, após isso, a série temporal registra a chegada da camada mais concentrada junto ao fundo, no caso a camada lamosa, praticamente indeformável e com um valor constante de concentração.

11.3.5.6 Mecanismo de suporte

O mecanismo de suporte dos grãos para essa região é altamente influenciado pela maior viscosidade aparente da mistura, no caso, a matriz coesiva, causada pelas interações eletrostáticas das partículas de argila. Assim, nota-se que a turbulência medida sofre uma diminuição em termos médios, como é demonstrado na figura 11.39.

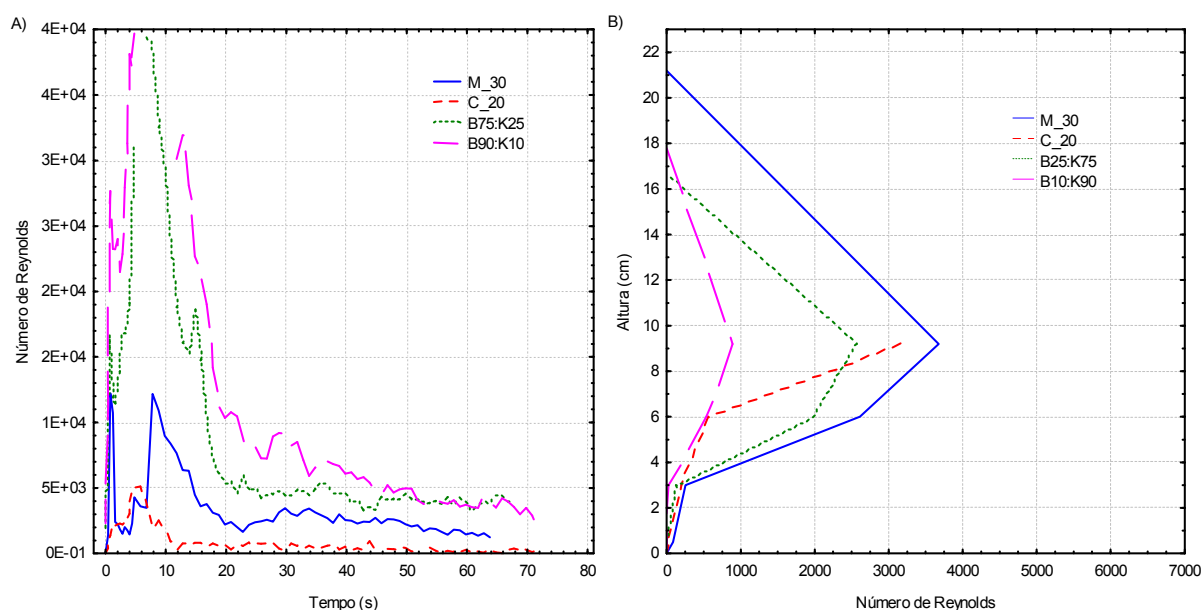


Figura 11.39 a) Série temporal do número de Reynolds e; b) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região V.

A Figura 11.39a apresenta a série temporal da variação do número de Reynolds, indicando que as forças viscosas preponderam em dois desses fluxos, após a ocorrência de uma região inicial turbulenta. Já o perfil vertical de variação do número de

Reynolds (figura 11.39b), que avalia regiões do escoamento em camadas, mostra que, junto ao fundo, há uma forte influência das forças viscosas, uma vez que os valores médios estão muito abaixo daquele limite para o regime turbulento.

Novamente, nesses fluxos, foi detectada a ocorrência da subcamada viscosa, o que explica a redução do número de Reynolds pela predominância das forças viscosas naquela zona, bem como o escoamento tipo “plug”, caracterizado pelos fluxos que apresentam uma tensão crítica mínima a ser ultrapassada para que haja o escoamento.

11.3.5.7 Intensidade da turbulência

Nos fluxos dessa região V, as maiores intensidades turbulentas (figura 11.40), novamente, foram verificadas junto à região inicial do fluxo (até 10 segundos), mostrando uma homogeneidade vertical praticamente constante nessa região. Após isso, ocorre uma transição abrupta entre essa alta intensidade da turbulência e a baixa intensidade, a qual representa a chegada da camada mais concentrada (camada lamosa). Junto ao fundo, podem ser identificados alguns aumentos na intensidade da turbulência, os quais podem estar associados à geração de “spots” de turbulência no interior da subcamada viscosa, entretanto um estudo mais detalhado deve ser realizado. Essas mesmas variações de intensidade da turbulência ocorrem na interface superior da camada lamosa, indicando a ocorrência de efeitos cisalhantes entre a camada lamosa e o fluxo remanescente da corrente.

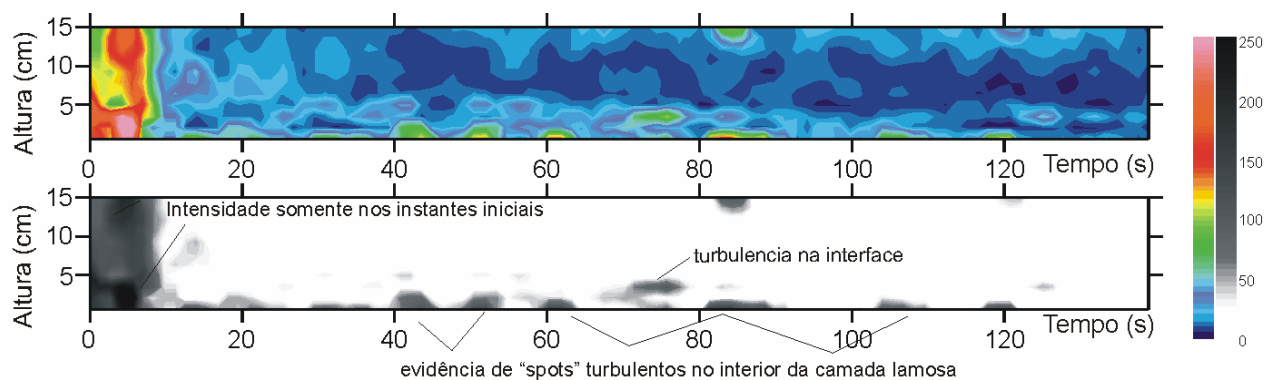


Figura 11.40 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região V, em duas escalas de cores distintas.

11.3.5.8 Presença da camada interna do escoamento (bipartição)

A características mais marcantes da camada bipartida formada nesses fluxos foi sua rápida chegada ao ponto de medição e sua parada mais abrupta, gerando menores deformações (ondulações) na interface superior. A análise da série temporal do número de Reynolds (figura 11.41) indica essa transformação gravitacional do escoamento, seguindo a evolução apresentada nas regiões anteriores, onde a sua formação, durante a passagem do fluxo, mostra a transição entre os fluxos deformáveis (escoando com se fossem ondas

internas) e os fluxos indeformáveis, os quais estariam atrelados a um escoamento tipo “plug” com um congelamento em massa (ensaios C_20 ou 0B:100K).

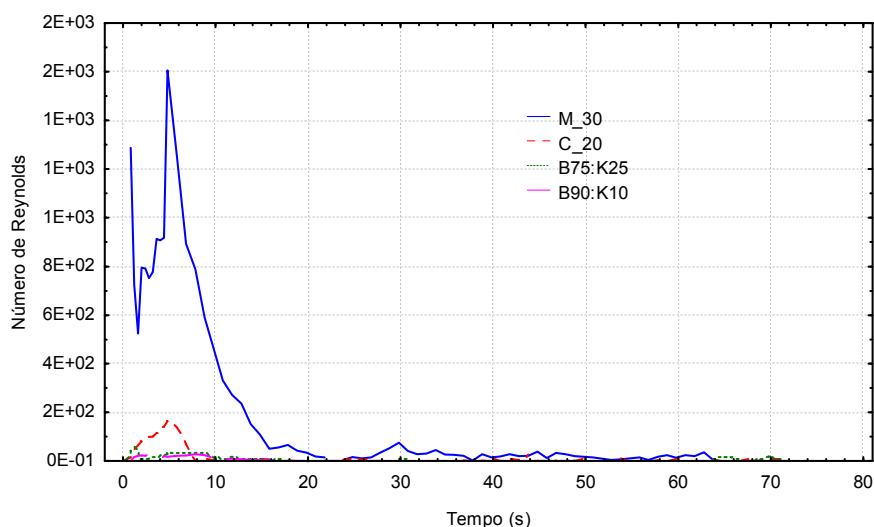


Figura 11.41 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada junto ao fundo dos ensaios da região V.

11.3.5.9 Velocidade e concentração média

A avaliação da velocidade média do escoamento indica que a velocidade média da cabeça prepondera sobre a velocidade média do corpo, uma vez que essa última é reduzida pelas mudanças internas do escoamento, provocadas pela alta viscosidade aparente da mistura nessa região (presença da tensão crítica, escoamento tipo “plug” etc.). Já com a concentração média ocorre o contrário; como houve grande deposição de material causado pela chegada da camada lamosa, o valor da concentração média do corpo aumenta, igualando-se aos valores medidos na cabeça da corrente. Nesse caso, os valores da cabeça foram medidos em uma condição dinâmica e os do corpo foram medidos após uma condição praticamente estática (camada lamosa indeformável).

11.3.5.10 Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical

A quinta região apresenta um depósito não gradado e dominado pela matriz lamosa, com as esferas de vidro presentes dispersas no seu interior. A matriz lamosa é o resultado da presença de argila nesses experimentos, a qual se encontra predominando ao longo de toda a espessura (>70%), causando uma distribuição dos grãos de areia ao longo da vertical. Alguns grãos maiores são encontrados no meio do depósito, indicando a mudança total de comportamento de deposição dos escoamentos dessa região (figura 11.42).

Junto ao topo desse depósito, dependendo da quantidade de argila presente na matriz (menos de 50%), pode ser formado um depósito resultante do fluxo desacelerado do corpo e da cauda da corrente. Nesse caso, essa pequena fração do depósito, em torno de 5% da

espessura se comparado com sua altura total, apresenta grãos de esferas de vidro praticamente limpos (sem a matriz de argila) e com gradação, além de uma camada selante de argila, no topo, oriunda da decantação dos grãos. A interface entre esses dois tipos de depósitos é nítida, com presença, inclusive, de grãos maiores que remanesciam na corrente diluída junto à interface lamosa. Nos ensaios do grupo transição (mais de 50% de argila na matriz inicial), esse comportamento não foi identificado.

Junto ao topo do depósito, pode ser encontrada uma camada somente com material argiloso, resultado da decantação desses grãos, porém essa interface é mais difícil de ser visualizada, devido à sua pequena espessura.

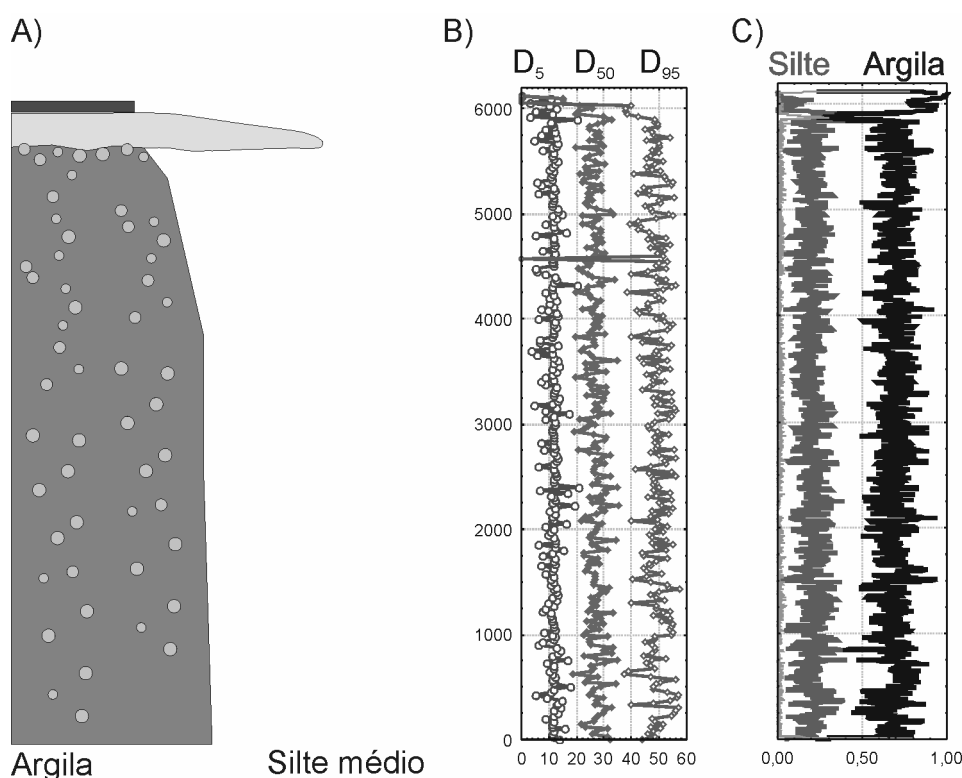


Figura 11.42 a) Modelo de gradação do depósito para a região V; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . e; c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.

11.3.5.11 Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade)

Nos depósitos da região V, a distribuição granulométrica tende a apresentar uma distribuição bimodal, com a presença de argila e esferas de vidro ao longo de toda a sua distribuição. Nesse caso, ocorre a maior influência do tamanho de grão correspondente à argila (35-50%) na análise do diâmetro médio dos grãos, pois, como pode ser observado, o pico da distribuição granulométrica é deslocado à esquerda, com a distribuição correspondente às esferas de vidro sendo menos influente no pico (~20%) e se distribuindo mais ao longo do depósito (figura 11.43).

Esse resultado dos grãos menos selecionados, com o predomínio de uma distribuição mais extensa, indica mudanças no mecanismo de deposição que serão comentados a seguir.

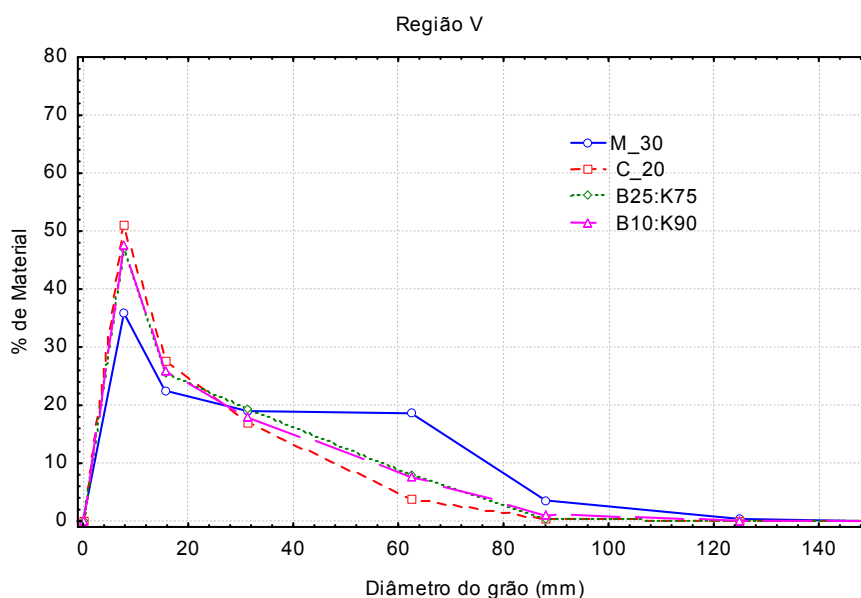


Figura 11.43 Distribuição granulométrica característica do depósito da região V

11.3.5.12 Espessura relativa do depósito

A espessura relativa do depósito após 24 horas com relação à espessura do fluxo teve um aumento se considerado em relação a região IV, chegando a praticamente 18% do total (desvio padrão de 8,3). Nesse caso, novamente, as características não newtonianas do fluido, com a geração de um escoamento com o desenvolvimento de uma camada lamosa junto ao fundo (escoando como um “plug”), fizeram com que esse valor fosse maior do que com aqueles fluxos com menor presença de argila. O depósito, apesar de espesso, possui bastante água no seu interior, a qual, ao longo do tempo, vai sendo expulsa dos poros e o depósito vai sendo compactado. No caso destes experimentos, não houve tempo para o depósito compactar, resultando em depósitos com bastante presença de água no interior.

11.3.5.13 Quantidade de material depositado - balanço de massa

Com relação ao percentual de massa depositada no canal, novamente, houve um aumento considerável para os fluxos dessa região, uma vez que, a média dos sedimentos depositados dessa região foi de 19% (desvio padrão de 8,3).

11.3.5.14 Mecanismos de deposição

Nessa quinta região, o mecanismo de deposição associado aos fluxos foi o congelamento em massa do fluxo após a passagem de uma região com maior turbulência inicial (cabeça e início do corpo, nos primeiros 15 - 20 segundos do escoamento), ocasionado

pela influência da matriz coesiva (argila) presente nessas misturas que provocaram o escoamento tipo “plug” no fluxo (alta viscosidade). Nesse caso, devido à maior concentração e à presença de argila nas misturas, o comportamento reológico não-Newtoniano, com uma maior tensão crítica inicial, foi um dos fatores importantes para a formação desse tipo de depósito. Assim, como na quarta região, esse tipo de deposição não permite a segregação dos grãos, podendo ser encontrados grãos (clastos) maiores no meio do depósito, os quais resultam da parada instantânea da massa dos sedimentos (arranjo caótico não gradado).

Nessa região, os grãos de argila presentes na mistura em concentrações mais altas sofrem a influência da concentração de gel das partículas coesivas (*gel point – concentration gelling*), uma vez que, segundo a literatura, isso ocorre para concentrações de argila entre 80 e 180 g/l, o que equivale a uma fração do volume sólido 0,03 e 0,07 (Whitehouse et al., 2000 e Winterwerp, 2002). Os experimentos da região V estariam dentro dessa faixa, de forma que as forças que atuam sobre esses depósitos são transmitidas para toda a massa depositada e não sobre cada partícula isolada, auxiliando a formação da camada lamosa junto ao fundo.

No topo desse tipo de depósito é encontrado o depósito gradado, causado pela corrente diluída que escoou sobre esse depósito lamoso, cujo processo de deposição camada está muito associado ao mecanismo de deposição descrito na primeira região. Essa camada gradada normalmente apresenta espessura muito menor que o depósito não gradado lamoso, representando, no caso dos experimentos, em torno de 5% do depósito total.

11.3.5.15 Taxa de deposição

Similarmente à região IV, o depósito dos ensaios da região V se formou de cima para baixo, com a camada de “plug” ocorrendo no interior da corrente, até sua base (figura 11.44).

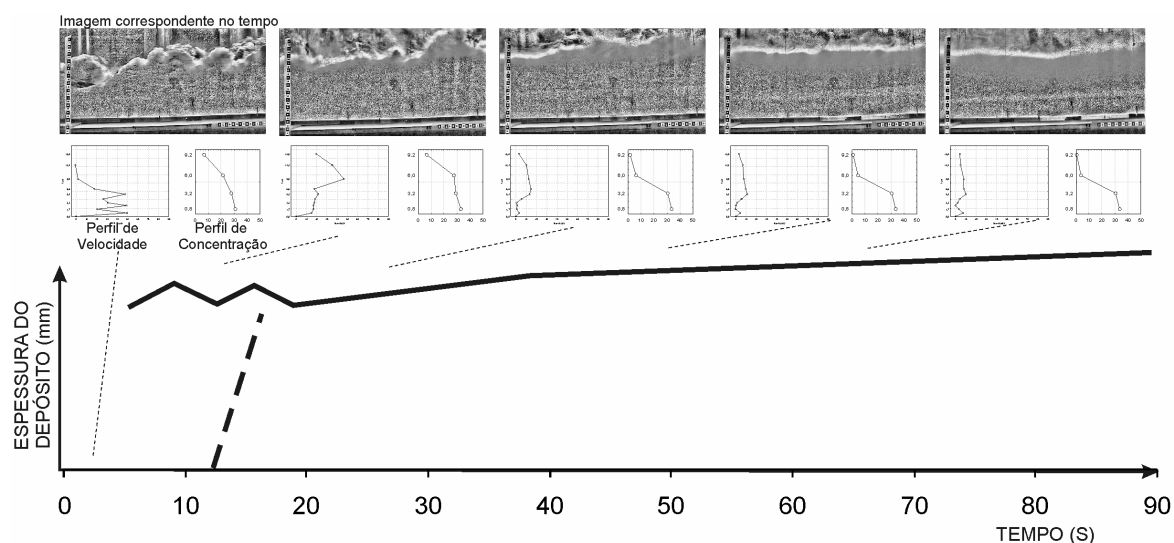


Figura 11.44 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região V.

Nesse caso, esse “plug” de sedimentos se formou praticamente ao longo de toda a vertical, excetuando nas zonas muito próximas ao fundo (zonas cisalhantes junto ao fundo), o que caracteriza uma chegada abrupta de sedimentos (cerca de 15 a 20 segundos). A dinâmica dessa camada interna (lamosa) foi menos turbulenta que a observada nos ensaios da região IV, com menores oscilações junto ao seu topo. Após a chegada da camada lamosa, é possível identificar uma segunda onda de sedimentos, mais diluída, que escoou sobre o depósito formado. Na interface entre a camada lamosa e o fluxo remanescente, a tensão de cisalhamento existe, porém seu valor é menor do que a tensão de cisalhamento junto ao fundo.

11.3.6 REGIÃO VI

11.3.6.1 Comportamento reológico das misturas

Assim como o regime V, as misturas do regime VI apresentam um comportamento reológico não-Newtoniano (plástico), seguindo a lei de Herschel-Bulkley.

11.3.6.2 Relação entre a espessura da cabeça e do corpo

Na região VI, o tempo de passagem da cabeça é menor do que 1% do tempo total do fluxo, sendo praticamente insignificante sua presença no escoamento. A espessura média do corpo é maior que a espessura média da cabeça, principalmente devido à presença da camada lamosa junto ao fundo, a qual aumentou significativamente o valor da espessura média total do corpo da corrente.

11.3.6.3 Regime de fluxo

A sexta região é aquela que apresenta o comportamento mais distinto dentre todas as regiões, uma vez que as forças viscosas preponderam sobre todo o escoamento, reduzindo drasticamente os valores do número de Reynolds para abaixo de 100 (figura 11.2).

Nota-se, então, que em todas as outras regiões, o escoamento é turbulento, exceto na região V, onde as forças viscosas começaram a aumentar e na região VI, onde os fluxos tornam-se viscosos.

11.3.6.4 Perfis vertical de velocidade, de concentração e de fluxo de sedimentos

A figura 11.45 apresenta os perfis verticais médios da velocidade, da concentração e do fluxo de sedimentos para a região VI.

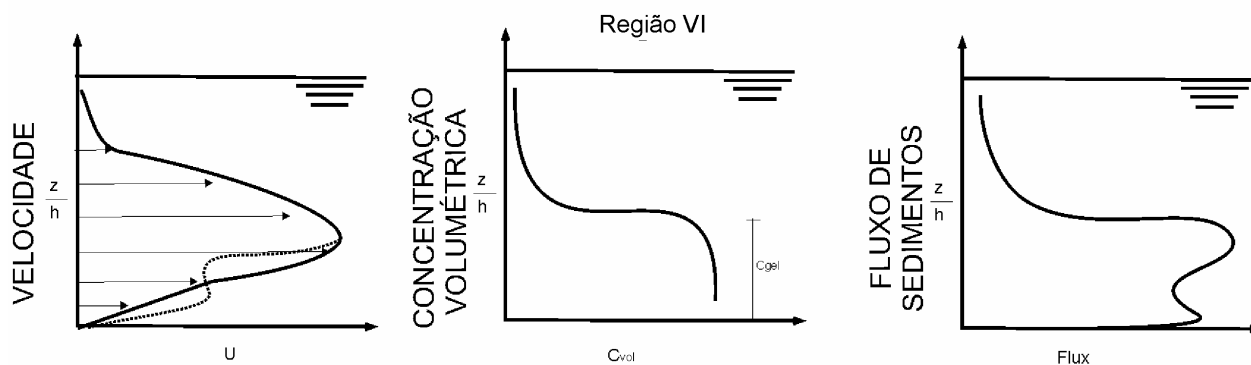


Figura 11.45 Perfis verticais médios da velocidade, concentração e fluxos de sedimentos para a região VI.

O perfil de velocidade dos ensaios da sexta região é uma continuação do perfil apresentado na região V, porém, em alguns casos, pode ocorrer uma pequena modificação com relação às outras regiões não-Newtonianas (regiões IV e V). Nesses casos e em alguns fluxos, a espessura da subcamada viscosa atingiu valores muito altos, sendo possível representar o perfil de velocidades como sendo linear e suprimindo a zona de “plug”.

Na região VI, a concentração apresentou uma evolução do perfil apresentado na região anterior, com uma nítida estratificação entre os escoamentos e com valores de concentração muito próximos do valor da concentração de gel. A diferença nesse caso, foi a espessura da estratificação, a qual atingiu alturas maiores no interior do fluxo, devido ao aumento da espessura da camada lamosa nos experimentos dessa região.

O perfil do fluxo de sedimentos apresentou uma frente de avanço com uma reentrância no seu interior, o que causou uma estratificação desse perfil, indicando uma zona com maior quantidade de material junto à região mais concentrada e valores praticamente insignificantes na zona mais próxima da interface superior.

11.3.6.5 Análise temporal da velocidade e da concentração

A figura 11.46 apresenta a série temporal da velocidade e da concentração para os ensaios da região VI.

A observação da série temporal tanto da velocidade quanto da concentração, indica, nitidamente, a mudança do comportamento do escoamento para esse tipo de região. Quanto à velocidade, apenas nos instantes iniciais (5 a 10 s) é verificada alguma variação nos valores, com uma aceleração brusca seguida de uma desaceleração, igualmente brusca. Após esse tempo, os valores de velocidade foram muito baixos, sendo, praticamente, um valor constante próximo à zero. Após isso, foi detectada a presença da camada lamosa, com uma espessura mais significativa, que desacelerou após a sua chegada no ponto de medição. Esse comportamento é evidenciado na série de concentração, já que, após a chegada do fluxo junto

às sondas, os valores indicam pequenas oscilações junto à superfície superior, porém, com um valor constante ao longo de todo ensaio. Esse valor constante da concentração pode estar atrelado ao congelamento coesivo da camada lamosa, após atingir a concentração de gel dos fluxos coesivos.

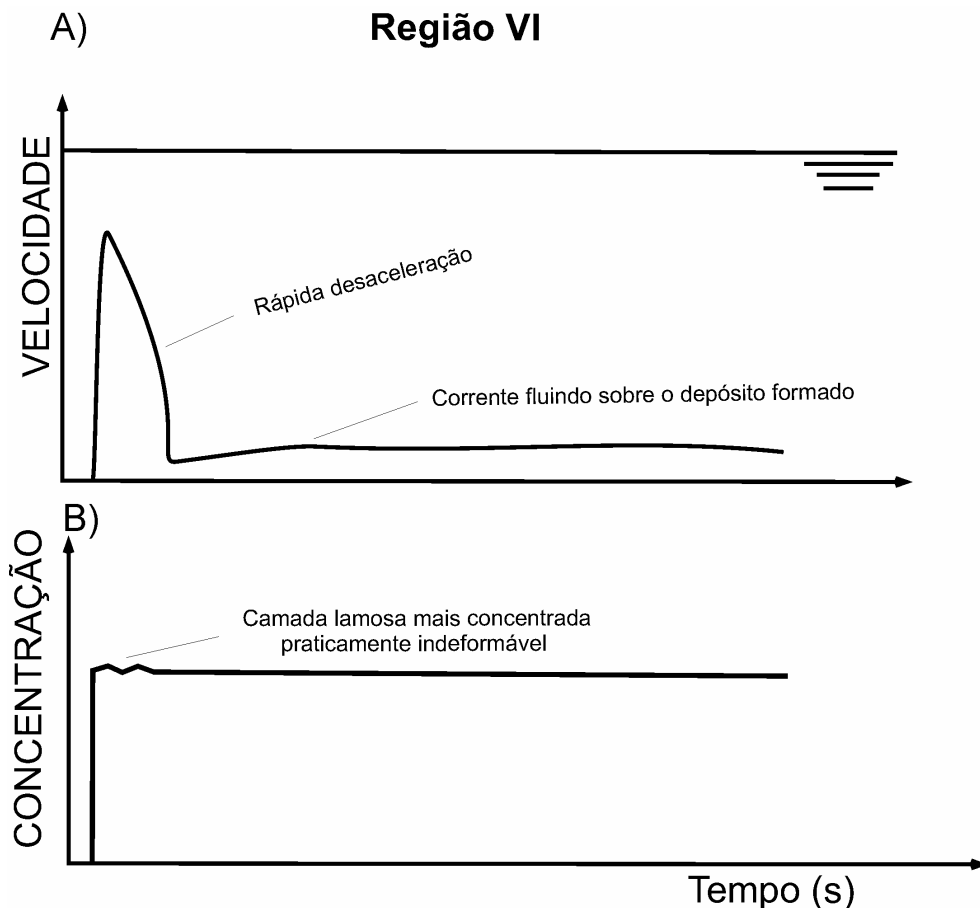


Figura 11.46 Séries temporais características da região VI: a) Velocidade da corrente. e; b) Concentração volumétrica.

11.3.6.6 Mecanismo de suporte

O mecanismo de suporte dos grãos, para os ensaios da região VI, é a matriz coesiva da mistura, uma vez que a alta viscosidade desses fluxos, suprimiu, quase que por completo, a turbulência. A análise da série temporal do número de Reynolds (figura 11.47a) apresenta esses valores, notando-se que o Reynolds médio máximo é da ordem de 40, caracterizando um fluxo com predominância total das forças viscosas.

A alta tensão crítica inicial dessas misturas, também, apresenta um efeito significativo no comportamento hidrodinâmico, uma vez que, quando a tensão de cisalhamento fica abaixo desse valor, o comportamento de “plug” ocorre nesses fluxos, com reflexos no transporte e na deposição dos grãos. Também, a espessura da subcamada viscosa, nesses fluxos, foi alta, indicando uma zona preponderante dos efeitos viscosos.

Apenas na metade superior do fluxo, foram observados valores de Reynolds mais altos, relacionado ao fluxo diluído remanescente do corpo e da cauda do escoamento (figura 11.47b), contudo os valores médios ainda se encontram na zona de escoamento de transição.

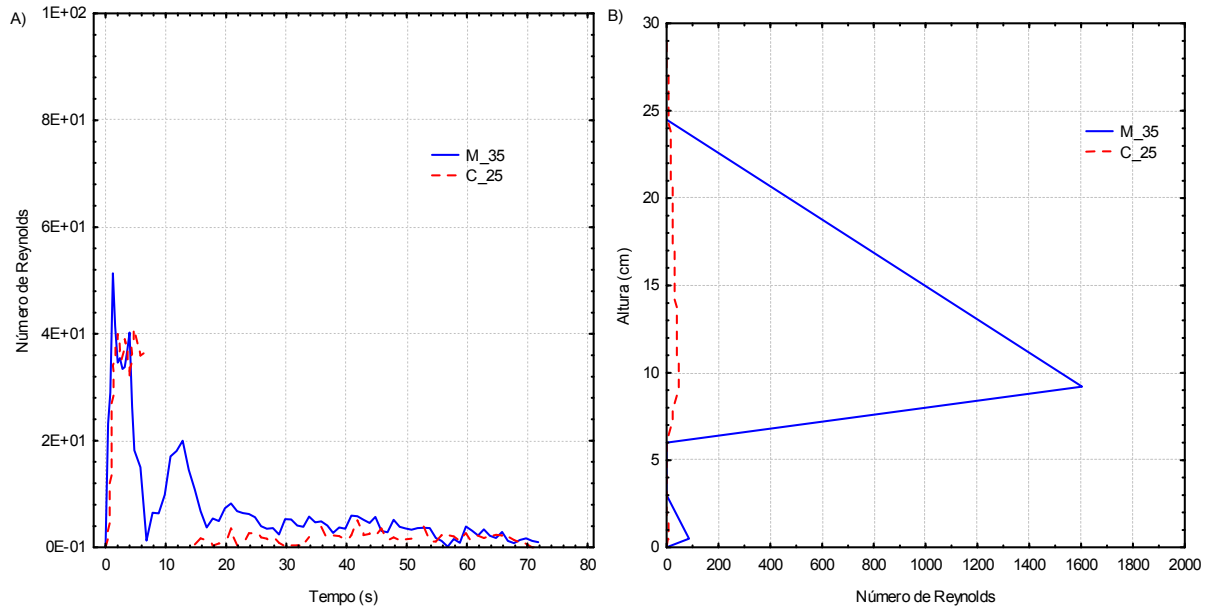


Figura 11.47 a) Série temporal do número de Reynolds. b) Perfil vertical médio do número de Reynolds para a região VI.

11.3.6.7 Intensidade da turbulência

A avaliação da intensidade da turbulência (figura 11.48) nos fluxos da região VI indica, novamente, uma mudança brusca no comportamento, passando de uma alta intensidade, nos seis segundos iniciais do fluxo, para valores mais baixos, nos segundos restantes. Novamente, junto ao fundo são verificados pontos de turbulência, que podem indicar a presença de spots de turbulência no interior da subcamada viscosa. Junto à interface superior da camada lamina (camada interna), é verificada uma camada de mistura, com um aumento de intensidade da turbulência nesse local.

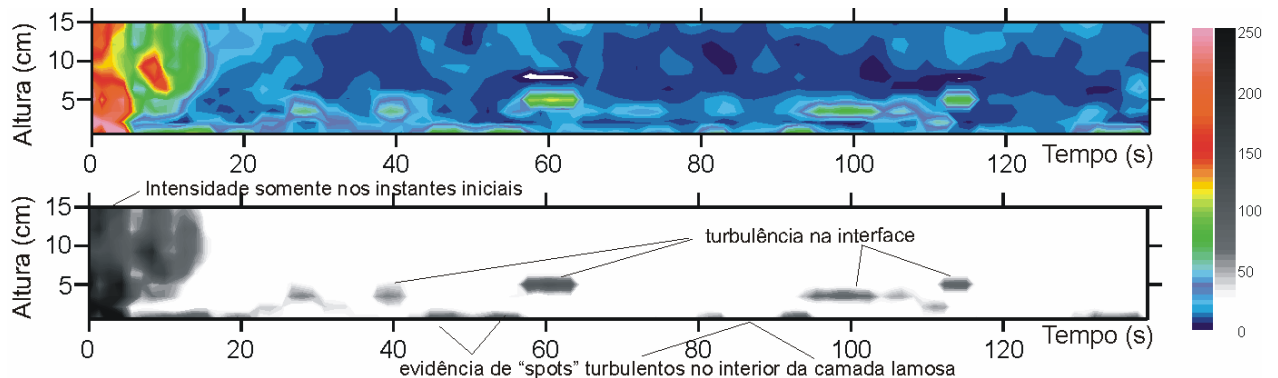


Figura 11.48 Intensidade da turbulência (U_{rms}) na direção do escoamento para os resultados da região VI, em duas escalas de cores distintas

11.3.6.8 Presença da camada interna do escoamento (bipartição)

A presença da camada lamosa bipartida na região VI apresenta comportamento um pouco diferenciado daquele da região V, já que o grau de deformação dessa corrente, após a sua chegada, foi mínimo, tendo sido registradas apenas algumas ondulações na superfície dessa camada. A análise do número de Reynolds da camada interna (figura 11.49) indica que, em fluxos mais coesivos (C_25), o seu comportamento foi completamente dominado pelas forças viscosas, enquanto que no fluxo misto (M_35), houve um leve aumento dos valores do número de Reynolds nos instantes iniciais, seguido de uma parada abrupta (congelamento coesivo).

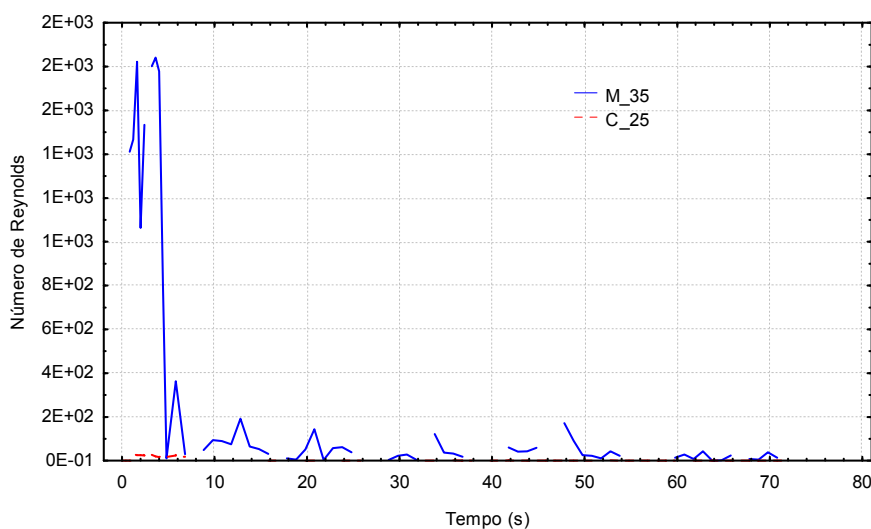


Figura 11.49 Série temporal do número de Reynolds para a camada interna mais concentrada junto ao fundo dos ensaios da região VI.

11.3.6.9 Velocidade e concentração média

A avaliação da velocidade e da concentração média indica um comportamento muito similar ao da região V, porém com a velocidade média do corpo menor e a concentração do corpo maior, alterando um pouco os valores da concentração em relação com a cabeça (~ 1).

11.3.6.10 Gradação e porcentagem de sedimento ao longo da vertical

O depósito característico da sexta região é muito similar ao da região V, porém há pequenas diferenças, pois a maior influência da argila na distribuição dos grãos, acarreta numa pequena alteração do comportamento desse parâmetro. Nesses fluxos também são encontrados grãos maiores ao longo da espessura do depósito, indicando uma maior influência da matriz lamosa em suportar esses grãos em suspensão (figura 11.50). Sendo assim, esse depósito se caracteriza por ser não gradado (extinção do escoamento turbulento) com presença de clastos (grãos isolados) na sua matriz. Também, no topo do depósito formado,

encontra-se o depósito resultante da corrente mais diluída, o qual apresenta características do depósito de mais baixa concentração (região I).

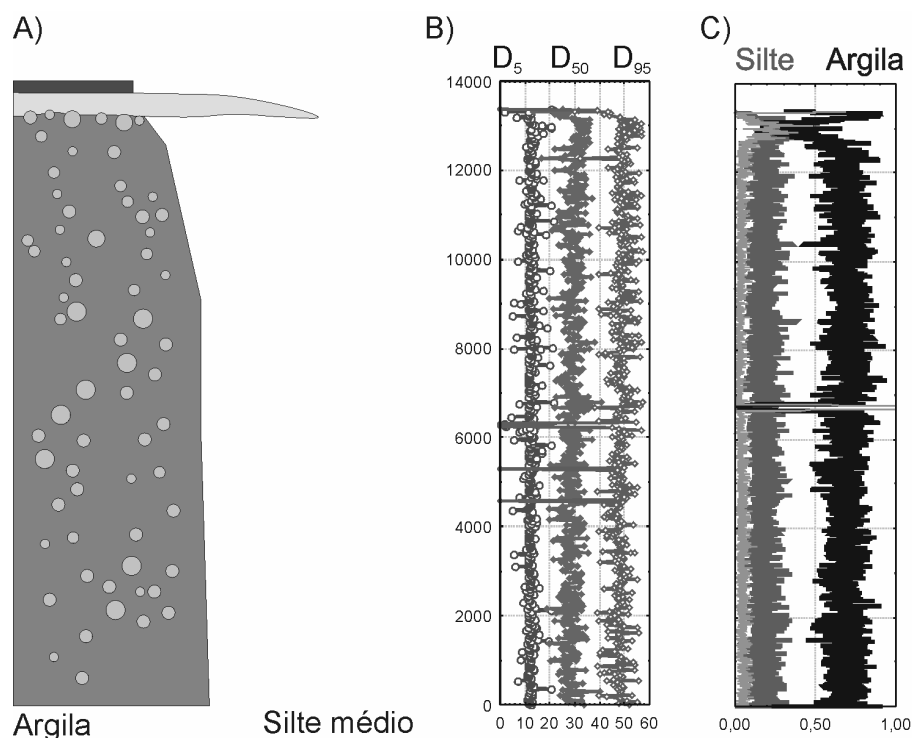


Figura 11.50 a) Modelo de gradação do depósito para a região VI; b) Diâmetro médio ao longo da vertical D_5 , D_{50} e D_{95} . e; c) Distribuição do tipo de sedimento ao longo da vertical.

11.3.6.11 Distribuição granulométrica (uni ou bimodalidade)

A curva de distribuição granulométrica apresentada na figura 11.51, para os fluxos da região VI, mostra um comportamento muito parecido com o da região V, porém, com uma maior influência da argila.

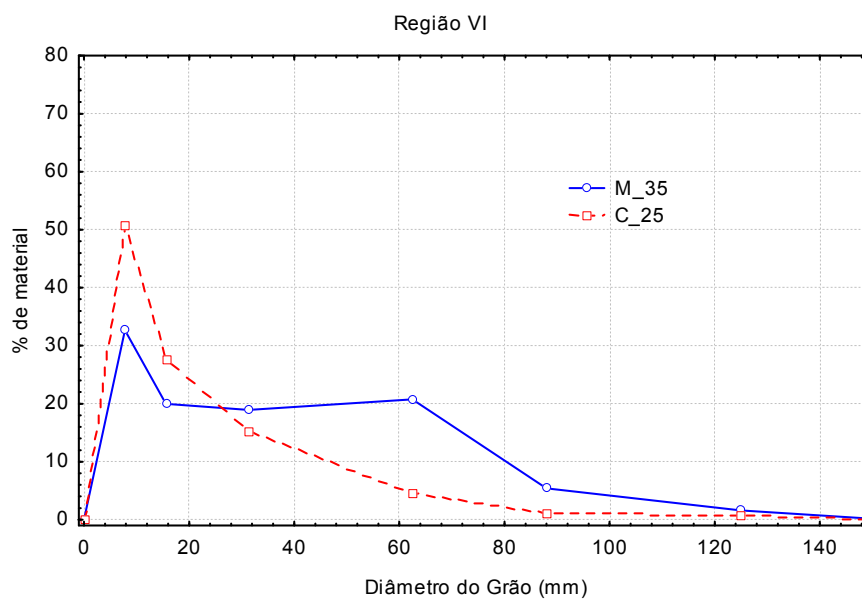


Figura 11.51 Distribuição granulométrica característica do depósito da região VI

A bimodalidade do fluxo é menos evidente, pois, após o primeiro pico de sedimentos (influência dos grãos de argila, com, aproximadamente, 50% de material depositado), há um patamar de valores praticamente constantes (influência das esferas de vidro, com aproximadamente, 20% do material depositado). A influência da argila pode ser verificada na forma da curva da distribuição granulométrica, uma vez que os resultados do grupo C_25 (somente material coesivo) estão logo acima do primeiro pico, mostrando como seria o resultado final dos depósitos, para os fluxos sem a presença de grãos não coesivos (esferas de vidro).

11.3.6.12 Espessura relativa do depósito

A espessura relativa do depósito em relação à espessura do fluxo também aumentou nessa região, passando a, aproximadamente, 23% (desvio padrão de 5,3) e indicando que as modificações no comportamento reológico das misturas descritas anteriormente, ocasionaram mudanças significativas nesse parâmetro.

11.3.6.13 Quantidade de material depositado - balanço de massa

A quantidade de massa depositada no canal, para os fluxos da região VI, também acompanham o aumento descrito no item anterior, onde, aproximadamente 26% (desvio padrão de 11) do sedimento se depositou durante a realização do experimento, comprovando que a presença da camada lamosa, ainda que contenha bastante água no seu interior, aumentou a quantidade de material depositado.

11.3.6.14 Mecanismos de deposição

O mecanismo de deposição da sexta região apresenta um comportamento muito similar ao descrito na região V, já que o mesmo mecanismo de deposição é identificado, ou seja, o congelamento em massa devido à alta viscosidade aparente do fluido, entretanto o processo de transporte dessa massa de sedimentos foi um pouco diferenciado. A camada lamosa mais concentrada, com esferas de vidro e argila que se formou desde a quarta região, apresenta um comportamento menos deformável (camada mais viscosa), com sua presença imediatamente após a passagem da cabeça da corrente (~ 5 a 8 segundos) e com o escoamento tipo “plug” de sedimento que depositou praticamente toda a carga em suspensão.

Nesse caso, pouca alteração das propriedades foram verificadas após a chegada dessa frente de sedimentos que “congelou” no fluxo. Apenas, junto ao fundo, foram encontradas evidências de uma maior intensidade da turbulência causada, provavelmente, pelos “spots” de turbulência desenvolvidos no interior da subcamada viscosa.

Nesses experimentos, a matriz coesiva apresenta uma tensão crítica maior, o que pode estar relacionado à competência do escoamento, a qual poderia manter na sua matriz grãos de diâmetro maior. Esse processo ficou evidenciado nos depósitos do ensaio M_35, pois vários grãos de esferas de vidro, com maior diâmetro, foram visualizados ao longo da vertical, sem que houvesse uma segregação definida (depósito não gradado). Contudo, no topo do depósito, devido à ação da corrente diluída que escoou sobre o depósito lamoso, são encontrados depósitos gradados.

11.3.6.15 Taxa de deposição

Nessa região, a única alteração com relação à região V se deu pela chegada mais rápida da camada lamosa, a qual foi praticamente instantânea após a passagem da cabeça. A figura 11.52 apresenta a variação da taxa de deposição, relacionando-a aos perfis de velocidade e de concentração.

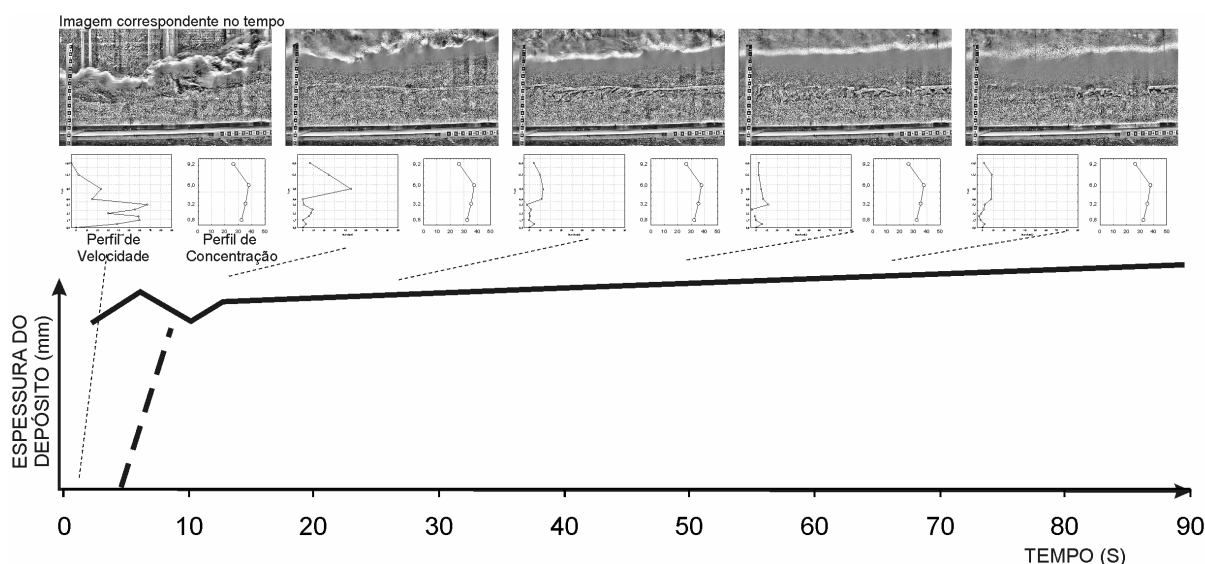


Figura 11.52 Variação da espessura do depósito ao longo do tempo (taxa de deposição) com os respectivos perfis de velocidade e concentração instantâneos e a imagem correspondente em diferentes instantes dos ensaios da região VI.

11.4 INFERÊNCIAS (OBSERVAÇÕES) DOS RESULTADOS NA EVOLUÇÃO ESPACIAL DO FLUXO

A maioria dos resultados apresentados nesse trabalho foram adquiridos e/ou medidos pelos equipamentos posicionados a 340 cm da fonte de sedimentos. Sendo assim, os aspectos hidrodinâmicos relacionados à evolução espacial da corrente, como por exemplo, o carregamento de fluido ambiente na corrente (*entrainment*) não puderam ser avaliados. Apenas a visualização do fluxo (uma câmera posicionada a 180 cm da fonte) e alguns parâmetros relacionados ao depósito foram coletados ao longo de todo o trecho do canal. Com base nisso,

será realizado uma inferência sobre a evolução espacial das correntes de turbidez simuladas e agrupadas segundo as regiões já apresentadas.

A figura 11.53 apresenta uma síntese, para todas as regiões, da espessura relativa do depósito com relação à espessura do fluxo e da quantidade relativa de material depositado (QDR) ao longo do canal (balanço de massa) para cada região.

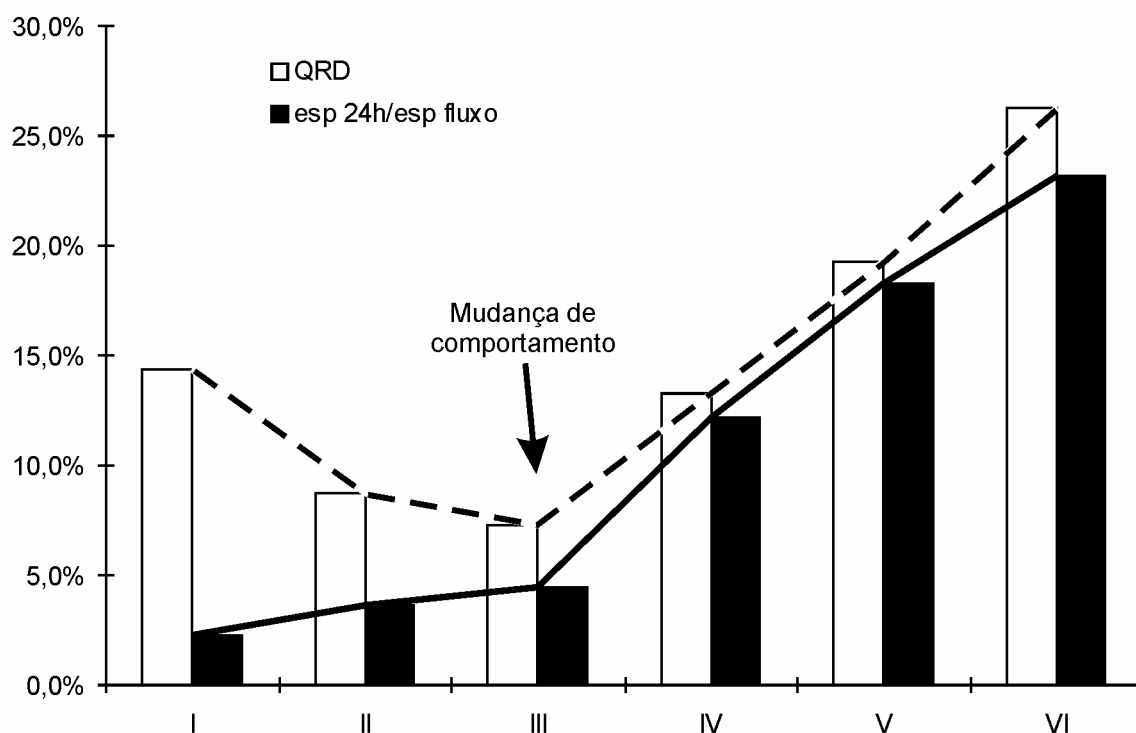


Figura 11.53 Valores médios da quantidade relativa de material depositado (QDR) e da relação entre a espessura do depósito após 24h e a espessura do fluxo para as seis regiões determinadas.

A figura 11.53, mostra a influência da mudança do modelo reológico da mistura (passando de Newtoniano para não Newtoniano) acarreta uma mudança brusca do comportamento e altera consideravelmente os valores dos parâmetros graficados, representada pelo ponto de inflexão entre a terceira e quarta região. Nas três primeiras regiões de fluxo da corrente (regiões I, II e III), a espessura relativa aumenta gradualmente e a taxa de relativa de material depositado decresce seus valores, enquanto que nas três regiões finais (regiões IV, V e VI), há um aumento mais significativo (maior inclinação) dos valores para ambos os parâmetros.

Nas três primeiras regiões (I, II e III), tanto o aumento da concentração quanto a presença de argila, aumentaram a capacidade de transporte de sedimentos do fluxo, indicando que esses experimentos poderiam transportar os sedimentos para regiões mais distais, uma vez que pouco material ficou retido no tanque. Os fluxos mais concentrados (próximo à fonte) se

transformam em fluxos mais diluídos, devido ao decréscimo gradual da velocidade, causado por transformações de superfície (carreamento de água nas interfaces) e por transformações gravitacionais, ou seja, deposição desse sedimento ao longo do tempo/espaço. Com uma menor velocidade, menor turbulência no escoamento e presença de grãos em suspensão, a corrente diminui, conseqüentemente, sua capacidade de transporte até sua parada final. Nesse caso, os grãos maiores tendem a se depositar primeiro, nas zonas mais próximas às zonas iniciais, e ocorre um gradual afinamento do tamanho de grão, à medida que aumenta a distância à fonte (figura 11.54).

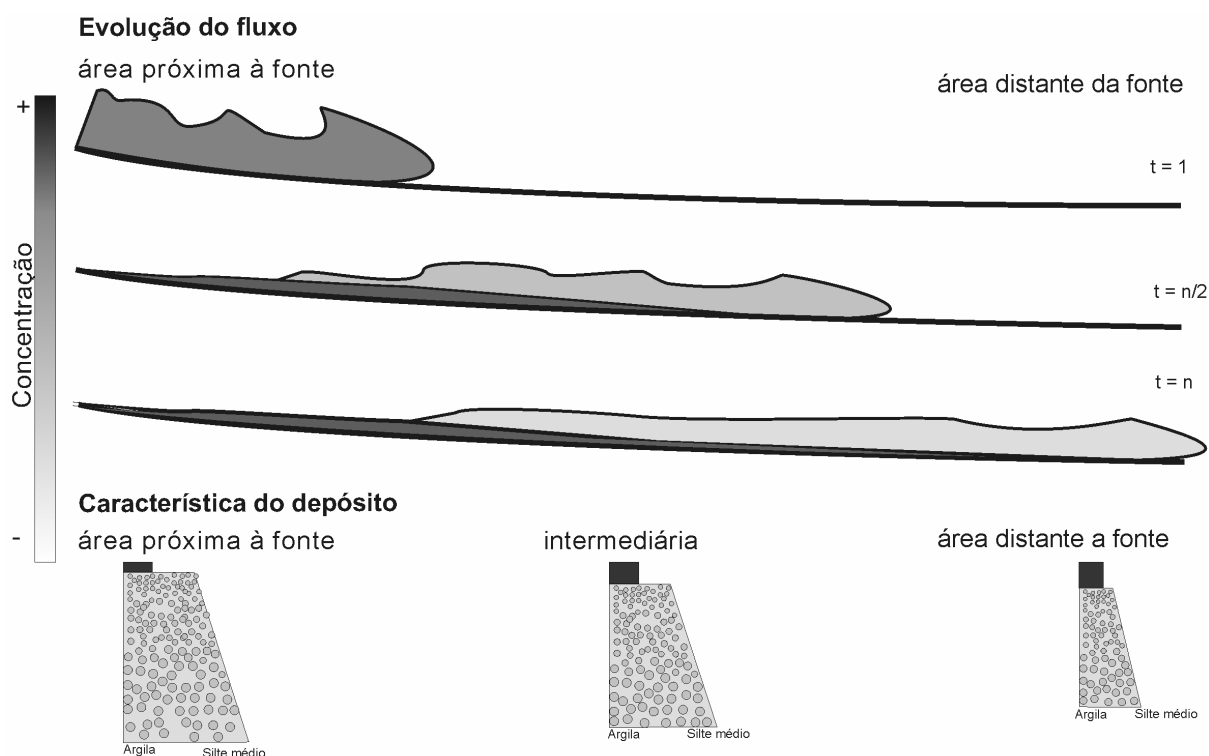


Figura 11.54 Modelo idealizado de evolução espacial para a transição dos fluxos entre a região I e a região II (menor concentração e com menor presença de argila).

Nos ensaios mais concentrados e com maior presença de argila, nessas três primeiras regiões, ficou evidenciada a formação de uma zona mais concentrada junto ao fundo, o que implica em diferenças no comportamento espacial das correntes, especialmente no seu mecanismo de deposição. Nesse caso, a medida “indireta” do aumento da capacidade de transporte desses fluxos (menor valor do depósito relativo na figura 11.53) poderia acarretar em maiores distâncias percorridas pela corrente. Entretanto, a avaliação da concentração de sedimentos ao longo do tempo, mostra que também há sedimentações mais bruscas, ou seja, há uma redução de carga maior, que implicaria numa maior diluição da corrente remanescente e, conseqüente, diminuição do alcance da corrente. Nesse caso, esse fenômeno aconteceria nas regiões mais próximas à fonte (zonas próxima e intermediária), onde se encontraria uma gradação mais uniforme (não gradadas). Após essa zona, os depósitos tenderiam a escoar e

segregar os grãos pelo seu tamanho médio, desde os grãos maiores até as argilas (figura 11.55).

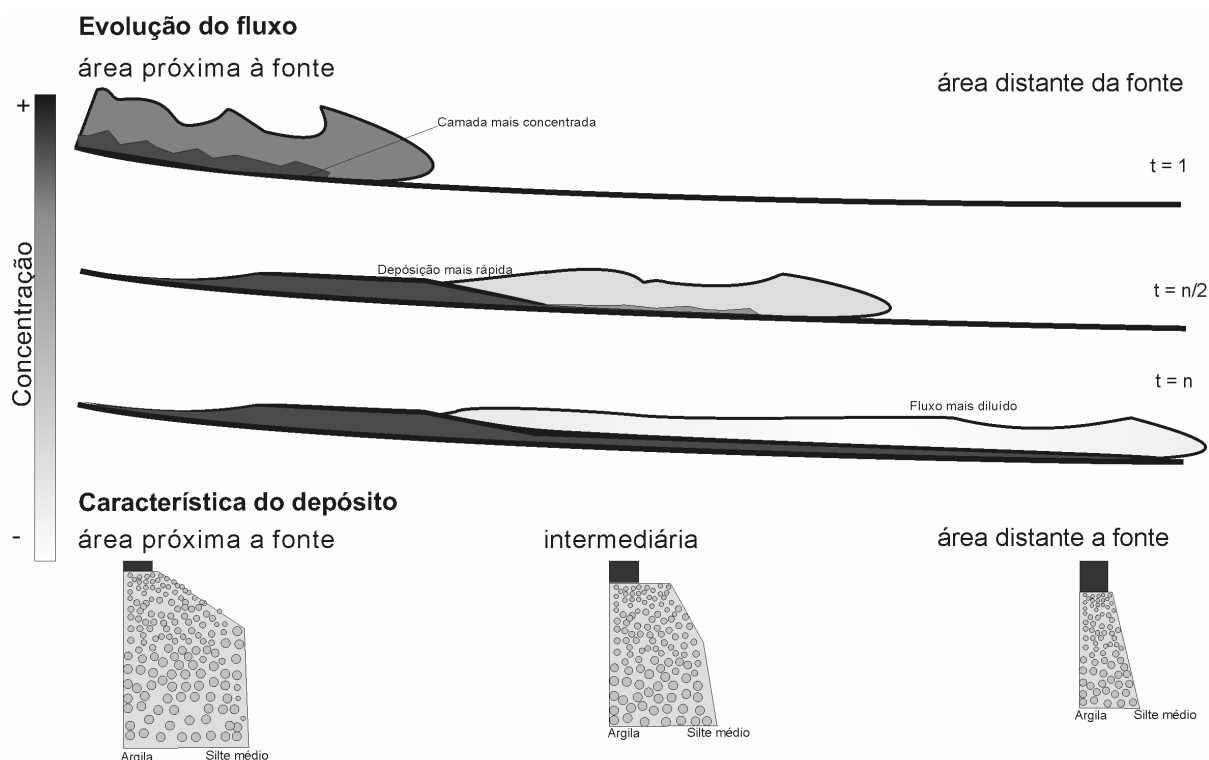


Figura 11.55 Modelo idealizado de evolução espacial para a transição dos fluxos da região II e da região III.

Se fosse considerada toda a evolução, ao longo do espaço, desses dois modelos idealizados para os fluxos do regime Newtoniano, os experimentos representariam as zonas mais proximais, uma vez que, ao longo de todo o canal de ensaio, as características granulométricas dos depósitos foram muito similares, como pouca variação nos 3,40 metros do canal. O último metro e vinte do canal não foi avaliado devido ao posicionamento dos equipamentos que perturbaram o escoamento das correntes.

Já para os ensaios que continham argila na sua composição, nas três primeiras regiões, foi verificado que, ao longo do depósito, as amostras coletadas em três pontos do canal (80 cm, 180 cm e 280 cm da fonte) sofreram um aumento gradativo da presença de argila, normalmente identificada pelo aumento da camada selante no topo do depósito. Nesse caso, a capacidade de transporte do fluxo transferiu esse sedimento mais à jusante.

A evolução espacial do depósito, para as regiões dominadas pelas misturas não newtonianas (IV, V e VI), apresentou um comportamento diferenciado (figuras 11.56 e 11.57). O aumento da espessura relativa do depósito e da quantidade relativa de material depositado pode indicar que o aumento da capacidade de transporte de grãos do fluxo, causada por uma condição de maior concentração e maior presença de argila, foi contrabalançada pelas forças causadas pela condição não newtoniana das misturas (aumento das

forças viscosas), as quais começaram a preponderar no escoamento, fazendo o mesmo escoar como uma massa praticamente sólida (camada lamosa) e apresentando a espessura do depósito final mais próxima da espessura da corrente.

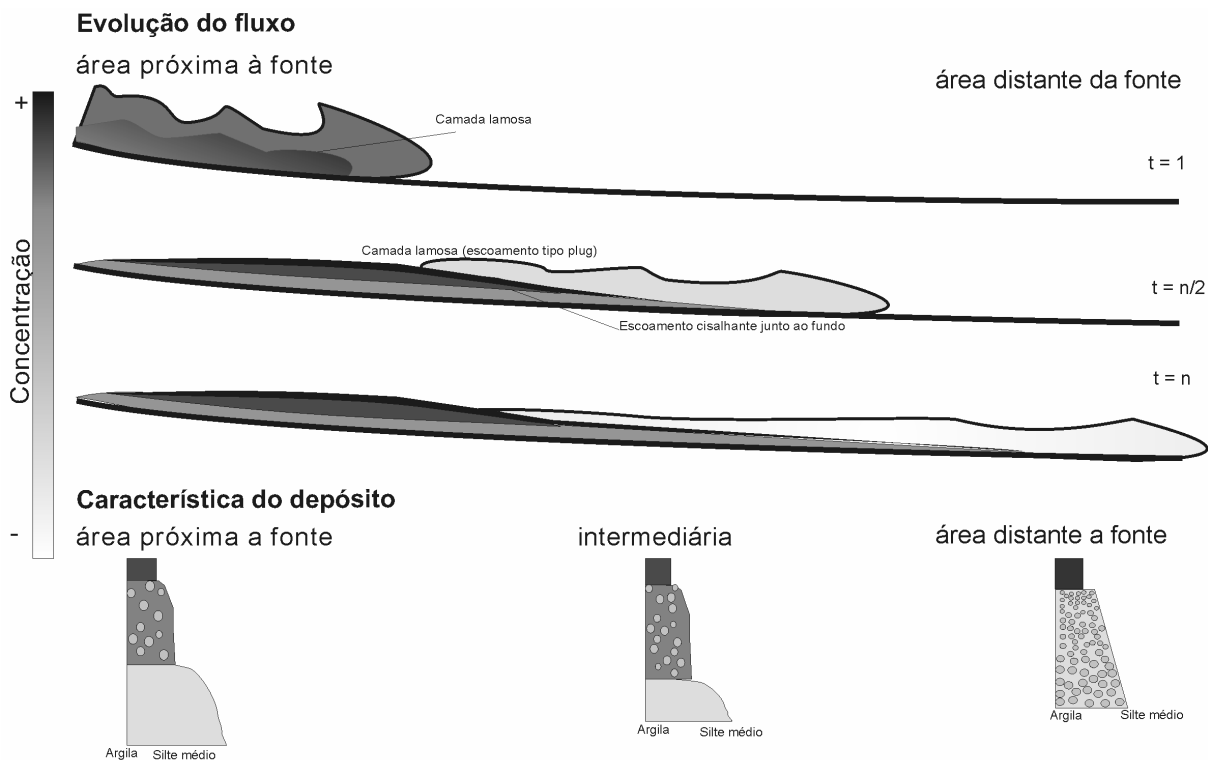


Figura 11.56 Modelo idealizado de evolução espacial para os fluxos da região IV

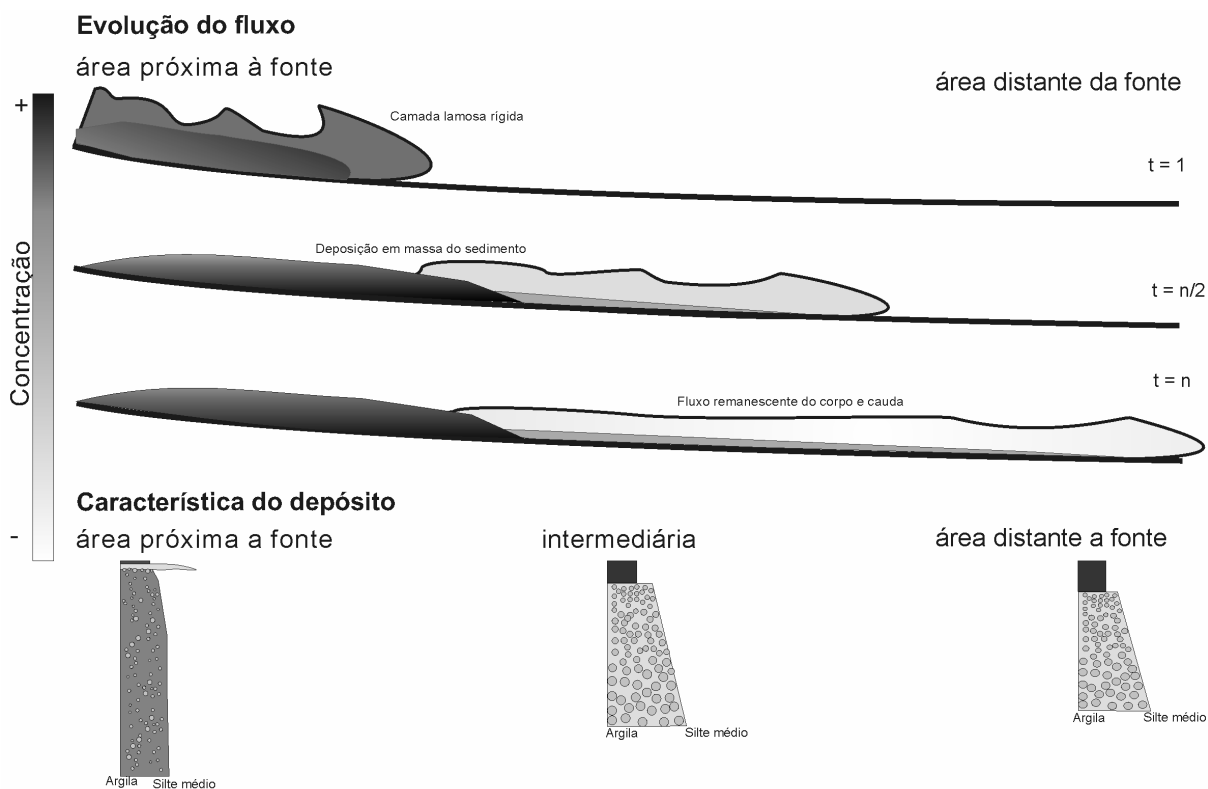


Figura 11.57 Modelo idealizado de evolução espacial para os fluxos da região V e VI

Nesse caso (regiões IV, V e VI), a distância percorrida por essa massa de sedimentos não é muito longa, uma vez que o escoamento (tipo “plug”) dessa camada lamosa, apesar de possuir uma certa mobilidade, não produz turbulência suficiente para manter os sedimentos em movimento. Pelo contrário, as características muito viscosas dessa zona do escoamento só contribuem para a parada do sistema. As transformações de superfície e gravitacionais que ocorrem ao longo de toda a espessura da corrente, não são suficientes para que levar esses sedimentos adiante. Como consequência, uma grande carga de sedimentos fica mais próxima da região proximal, enquanto que apenas uma corrente mais diluída e remanescente escoava para as regiões mais distantes da fonte.

Nos experimentos compreendidos nas regiões IV, V e VI, esse comportamento foi identificado ao longo de todo o comprimento do canal, havendo o aumento da presença de sedimentos finos (argila) nos depósitos mais distais. Nesse caso, novamente, a diferença da distribuição granulométrica na horizontal foi muito pequena, não sendo possível encontrar alguma tendência definida.

A diferença entre os modelos apresentados nas figuras 11.56 e 11.57 ocorre na maneira como se forma a camada mais concentrada junto ao fundo, uma vez que na primeira (figura 11.56), a camada mais concentrada apresenta uma deformação maior (maior fluidez) com a presença de maiores ondulações ao longo do tempo, além de começar a sofrer a influência da viscosidade, com a diminuição do grau de turbulência no escoamento. Nesse caso, o escoamento junto ao fundo apresenta a formação de um escoamento em “plug” e de um escoamento cisalhante, que gera depósitos lamosos com presença de clastos na matriz ao longo do espaço. Já no modelo apresentado na figura 11.57, a camada lamosa mais concentrada fluiu de forma praticamente indeformável e vem acompanhada por um congelamento instantâneo do sedimento.

11.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS, HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS

Os resultados dos parâmetros analisados nos capítulos anteriores (capítulos 7 ao 10) serviram de base para a criação da figura 11.1 que identificou seis regiões de fluxo, as quais estão relacionadas ao comportamento reológico das misturas, bem como aos processos geométricos, hidrodinâmicos e deposicionais das correntes de densidade simuladas. Para os intervalos delimitados na figura 11.1, foi possível caracterizar detalhadamente cada uma destas regiões, a partir da análise de causa-efeito, ou seja, partindo do estudo da mistura, de características do escoamento hidrodinâmico do fluxo até o respectivo depósito formado.

Ao todo foram utilizados 22 parâmetros, descritos no item 11.3, para a caracterização dessas regiões, os quais foram divididos em oito categorias: geometria; reologia; análise dos perfis verticais médios; valores médios, análise das séries temporais, dinâmica interna do escoamento, características deposicionais e relações adimensionais.

A tabela 11.2 apresenta um resumo do comportamento desses 22 parâmetros, mostrando as diferenças entre cada região e servindo de base para a síntese dos resultados.

Para cada um dos parâmetros, foi idealizado um modelo de comportamento que descreve, fielmente, os resultados obtidos nas simulações. A análise de alguns parâmetros, como o mecanismo de suporte de grãos, foram comparados, a partir das observações dos ensaios, com as descrições encontradas na bibliografia, tais como as encontradas em Middleton e Hampton (1973), Lowe (1979), Lowe (1982), Mulder e Alexander (2001), entre outros. Uma análise mais criteriosa do mecanismo de suporte de grãos deve ser melhor estudada.

Pela análise da tabela 11.2, as seis regiões de fluxo podem ser resumidas em termos gerais como segue:

Região I – Fluxo Newtoniano de baixa concentração, turbulento e subcrítico, mantido pela componente ascendente da turbulência, com deposição de partículas individuais, gerando depósitos gradados normalmente com ou sem presença de camada selante de argila no topo.

Região II – Fluxo Newtoniano de média concentração, turbulento e subcrítico com a formação de uma camada turbulenta ondulada (deformável) e mais concentrada e com presença de argila junto ao fundo, mantido pela turbulência e com influência da decantação impedida, gerando depósitos parcialmente segregados (maciços) junto à base e gradados normalmente junto ao topo, com ou sem presença de camada selante de argila.

Região III – Fluxo Newtoniano de mais alta concentração, turbulento, subcrítico com nítida estratificação (bipartição) de uma camada turbulenta fortemente ondulada (deformável) e mais concentrada junto ao fundo, mantido pela turbulência e com influência da decantação impedida, apresentando uma deposição de grãos mais abrupta (próximo ao congelamento friccional), gerando depósitos menos segregados (maciços) junto à base e com uma gradação normal junto ao topo, com ou sem presença de camada selante de argila.

Tabela 11.2 Resumo dos 22 parâmetros avaliados para as seis regiões determinadas.

	REGIÃO I	REGIÃO II	REGIÃO III	REGIÃO IV	REGIÃO V	REGIÃO VI
GEOMETRIA	1) RELAÇÃO ENTRE A ESPESSURA DA CABEÇA E DO CORPO $H_{cab} > H_{corpo}$	$H_{cab} = H_{corpo}$	$H_{cab} = H_{corpo}$	$H_{cab} = H_{corpo}$	$H_{cab} < H_{corpo}$	$H_{cab} < H_{corpo}$
REOLOGIA	2) COMPORTAMENTO REOLÓGICO Tensão vs Deformação	Tensão vs Deformação	Tensão vs Deformação	Tensão vs Deformação	Tensão vs Deformação	Tensão vs Deformação
PERIS VERTICAIS MÉDIOS	3) PERFIL DE VELOCIDADE Z/H vs Vel	Z/H vs Vel	Z/H vs Vel	Z/H vs Vel	Z/H vs Vel	Z/H vs Vel
	4) PERFIL DE CONCENTRAÇÃO Z/H vs Cvx	Z/H vs Cvx	Z/H vs Cvx	Z/H vs Cvx	Z/H vs Cvx	Z/H vs Cvx
	5) PERFIL DE FLUXO DE SEDIMENTO Z/H vs Fluxo sed.	Z/H vs Fluxo sed.	Z/H vs Fluxo sed.	Z/H vs Fluxo sed.	Z/H vs Fluxo sed.	Z/H vs Fluxo sed.
	6) PERFIL DO N° DE REYNOLDS MÉDIO Z/H vs Reynolds	Z/H vs Reynolds	Z/H vs Reynolds	Z/H vs Reynolds	Z/H vs Reynolds	Z/H vs Reynolds
	7) REGIÃO DA SUB CAMADA VISCOSA Z/H vs y*	Z/H vs y*	Z/H vs y*	Z/H vs y*	Z/H vs y*	Z/H vs y*
VALORES MÉDIOS	8) RELAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DA CABEÇA E DO CORPO $VEL_{cab} < VEL_{corpo}$	$VEL_{cab} < VEL_{corpo}$	$VEL_{cab} > VEL_{corpo}$	$VEL_{cab} > VEL_{corpo}$	$VEL_{cab} > VEL_{corpo}$	$VEL_{cab} > VEL_{corpo}$
	9) RELAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA DA CABEÇA E DO CORPO $CVOL_{cab} = 1,5 CVOL_{corpo}$	$CVOL_{cab} = 1,5 CVOL_{corpo}$	$CVOL_{cab} = 1,5 CVOL_{corpo}$	$CVOL_{cab} = 1,3 CVOL_{corpo}$	$CVOL_{cab} = 1,1 CVOL_{corpo}$	$CVOL_{cab} = CVOL_{corpo}$
	10) QUANTO A TURBULENÇA MÉDIA TURBULENTO	TURBULENTO	TURBULENTO	TURBULENTO	FORÇAS VISCOVAS	FORÇAS VISCOVAS
SÉRIE TEMPORAL	11) SÉRIE TEMPORAL DE VELOCIDADE VEL vs TEMPO	VEL vs TEMPO	VEL vs TEMPO	VEL vs TEMPO	VEL vs TEMPO	VEL vs TEMPO
	12) SÉRIE TEMPORAL DE CONCENTRAÇÃO Cvx vs TEMPO	Cvx vs TEMPO	Cvx vs TEMPO	Cvx vs TEMPO	Cvx vs TEMPO	Cvx vs TEMPO
	13) INTENSIDADE TURBULENTE ALTA vs BAIXA vs TEMPO	ALTA vs BAIXA vs TEMPO	ALTA vs BAIXA vs TEMPO	ALTA vs BAIXA vs TEMPO	ALTA vs BAIXA vs TEMPO	ALTA vs BAIXA vs TEMPO
DINÂMICA INTERNA DO ESCOAMENTO	14) COMPORTAMENTO DA CAMADA INTERNA POUCO EVIDENTE E ONDULADA	EVIDENTE E ONDULADA	EVIDENTE E FORTEMENTE ONDULADA	MUITO EVIDENTE E ONDULADA	MUITO EVIDENTE E POUCO ONDULADA	MUITO EVIDENTE E MUITO POUCO ONDULADA
	15) MECANISMO DE SUPORTE TURBULENÇA E EMPUXO	TURBULENÇA E EMPUXO POUCA INFLUÊNCIA DA MATRIZ COESIVA	TURBULENÇA E EMPUXO INTEGRAÇÃO ENTRE GRÃOS IMPEDIMENTO A DECANTAÇÃO	TURBULENÇA E EMPUXO MATRIZ COESIVA IMPEDIMENTO A DECANTAÇÃO	MATRIZ COESIVA FRACA TURBULENÇA EMPUXO FLUIDO INTERSTICIAL	MATRIZ COESIVA FRACA TURBULENÇA EMPUXO FLUIDO INTERSTICIAL
	16) MECANISMO DE DEPOSIÇÃO Inspirado em Amy et al (2008) GRÃO A GRÃO	GRÃO A GRÃO POUCA FLOCULAÇÃO MARGINAL	GRÃO A GRÃO INÍCIO DO CONGELAMENTO FRICIONAL	GRÃO A GRÃO INÍCIO CONGELAMENTO COESIVO	CONGELAMENTO COESIVO	CONGELAMENTO COESIVO
CARACTERÍSTICAS DEPOSIÇÃOIS	17) TIPO DE DEPÓSITO D50 vs A/B	D50 vs A/B	D50 vs A/B	D50 vs A/B	D50 vs A/B	D50 vs A/B
	18) PORCENTAGEM DO TIPO DE SEDIMENTO % SILTE vs % ARGILA	% SILTE vs % ARGILA	% SILTE vs % ARGILA	% SILTE vs % ARGILA	% SILTE vs % ARGILA	% SILTE vs % ARGILA
	19) DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO DEPÓSITO SILTE vs ARGILA vs AMF	SILTE vs ARGILA vs AMF	SILTE vs ARGILA vs AMF	SILTE vs ARGILA vs AMF	SILTE vs ARGILA vs AMF	SILTE vs ARGILA vs AMF
	20) TAXA DE DEPOSIÇÃO ESP. DEP vs TEMPO	ESP. DEP vs TEMPO	ESP. DEP vs TEMPO	ESP. DEP vs TEMPO	ESP. DEP vs TEMPO	ESP. DEP vs TEMPO
RELAÇÕES ADIMENSIONAIS	21) RELAÇÃO ENTRE A ESPESSURA DO DEPOSITO E A ESPESSURA DA CORRENTE = 2%	= 4%	= 5%	= 12%	= 18%	= 23%
	22) RELAÇÃO ENTRE A MASSA DE SEDIMENTO DO DEPOSITO E A MASSA INJETADA = 15%	= 9%	= 7%	= 14%	= 19%	= 26%

Região IV – Fluxo não Newtoniano de média concentração, baixa turbulência, supercrítico, com formação de uma camada lamosa mais concentrada junto ao fundo com menores ondulações, com influência das forças viscosas e coesivas, formação de um “plug” de sedimentos (congelamento coesivo), gerando depósitos do topo à base por congelamento coesivo com uma camada de grãos não coesivos levemente gradados junto ao fundo, uma camada lamosa com grãos não coesivos dispersos não gradados na matriz e com a presença de uma camada selante.

Região V – Fluxo não-Newtoniano de alta concentração, com turbulência nos instantes iniciais, subcrítico, com formação de uma camada lamosa mais concentrada junto ao fundo com ondulações, influência das forças viscosas e coesivas (matriz coesiva), com formação de um “plug” homogêneo de sedimentos (congelamento coesivo), gerando depósitos do topo à base por congelamento coesivo, depósito não gradado com predominância de uma matriz lamosa com grãos dispersos, com ou sem a presença de um depósito gradado no topo, resultado do fluxo remanescente do corpo e cauda.

Região VI – Fluxo não-Newtoniano (plástico) de alta concentração, dominado pelas forças viscosas, subcrítico, com formação de uma camada lamosa mais concentrada junto ao fundo com poucas ondulações, fortemente resistente ao escoamento (*yield strength*) devido ao empuxo e às forças coesivas (matriz coesiva), com formação de um “plug” homogêneo de sedimentos (congelamento coesivo) que formou depósitos do topo à base por congelamento coesivo, depósito não gradado com predominância de uma matriz lamosa com grãos dispersos, com ou sem a presença de um depósito gradado no topo, resultado do fluxo remanescente do corpo e cauda.

A identificação desses regimes foi baseada em observações dos resultados de experimentos físicos que apresentam, como condição “*sine qua non*”, uma reprodução com simplificações do fenômeno natural. No caso dos experimentos realizados, além da redução da escala geométrica de reprodução do fenômeno, o tanque de simulação era estreito. Dessa forma, os efeitos na direção transversal ao escoamento (componente Y), apesar de existirem, sofreram a influência das paredes do canal. Na direção X (comprimento) e Z (altura), a influência dos efeitos da parede não eram muito significativos. Por outro lado, a propriedade reológica das misturas e alguns fenômenos hidrodinâmicos (efeitos da coesão) e deposicionais (sedimentação dos grãos) são independentes da escala, corroborando para os resultados apresentados na tabela 11.2.

O tipo de alimentação utilizado nos experimentos foi do tipo pulso de material, o qual representa um evento catastrófico e instantâneo, a partir de uma mudança brusca de comportamento (no caso, a liberação da comporta). O sedimento utilizado nos experimentos,

especialmente as esferas de vidro, apresentou um diâmetro médio que representaria, com uma granulometria extensa, do silte médio até a areia muito fina. Nesse caso, estudos com maiores diâmetros dos grãos devem ser realizados para a comprovação dos limites entre as diferentes regiões determinadas. A forma esférica do sedimento, é outro fator que pode influenciar o resultado final e as comparações com o fenômeno natural, devido à falta de uma heterogeneidade (formas variadas), normalmente presente nos sedimentos naturais.

Além disso, tanto os experimentos físicos, quanto a caracterização reológica das misturas foram realizadas para a concentração volumétrica máxima de 35%. Nesse caso, as regiões III e VI ficaram com uma fronteira aberta, sem a delimitação de um limite superior. Amy et al (2006) apresentam um estudo sobre processos de sedimentação, no qual determinam o valor de concentração volumétrica de 50% para os fluxos não coesivos como o início de um outro comportamento deposicional. Esse valor pode então ser adotado no diagrama da figura 11.1 como o limite superior para a região III. Já o limite superior da região VI pode estar atrelado ao início do comportamento dos fluxos de detritos, que vêm sendo estudado ao longo dos anos por diversos autores (p. ex. Hampton, 1972; Marr et al, 1993; Ishtad et al, 1999; entre outros).

Como foi citado anteriormente, os modelos de evolução espacial dos fluxos aqui apresentados são uma visualização baseada nos resultados obtidos pelos experimentos apresentados, mais especificamente, dos resultados do depósito gerado ao longo de toda a extensão do tanque. Sua aplicabilidade ao ambiente natural deve ser realizada com cuidado, uma vez que os efeitos de escala devem ser levados em conta na extrapolação do resultado.

Por fim, os valores dos limites apresentados na figura 11.1 não podem ser considerados como um marco singular da mudança dos comportamentos de uma região à outra. Para cada curva que delimita as regiões, deve ser considerada uma faixa de valores em torno daquele valor (semelhantemente a um intervalo de confiança, em estatística), que indicaria uma transição gradual de uma região a outra. Essa observação é importante, uma vez que diversos resultados de alguns experimentos, dependendo do parâmetro analisado, poderiam ser classificados em duas regiões, uma vez que apareceram no limiar entre uma região e a outra. Nesse caso, a falta de uma repetibilidade nos experimentos, já que foi realizado um só evento para cada situação de ensaio, serviria para diminuir as variabilidades existentes nas simulações experimentais.

12 DISCUSSÃO SOBRE A CLASSIFICAÇÃO DE CORRENTES DE TURBIDEZ DE ALTA DENSIDADE

12.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA

Ao longo dos últimos 60 anos, a classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos, em especial as correntes de turbidez de alta densidade, têm sido o centro de controvérsia entre pesquisadores em diferentes áreas (ver histórico dessa discussão no capítulo 4.2), sobretudo as correntes de turbidez de alta densidade. Shanmugam (2006) comenta que, para esse termo, houve uma proliferação de 34 sinônimos, os quais seriam reflexo das visões de diferentes pesquisadores que atuam em áreas distintas (método experimental versus estudos de campo).

Os diferentes esquemas de classificação apresentados até então se baseavam, normalmente, em diferentes parâmetros, tais como: densidade do fluido (concentração de grãos); mecanismo de suporte dos grãos; estado do fluxo; comportamento reológico; tamanho e composição dos grãos (ver tabela 4.3). Entretanto, essas definições são inconsistentes, uma vez que essas propriedades influenciam umas às outras (Shanmugam, 2006).

A intenção de classificar as correntes de turbidez de alta densidade com base, por exemplo, somente, na massa específica e, conseqüentemente, na concentração, não é simples devido à dificuldade de se estabelecer os valores limites de transição entre as correntes de turbidez de alta densidade e outros tipos de fluxos, uma vez que vários valores são adotados para diferenciar tais fluxos (figura 12.1).

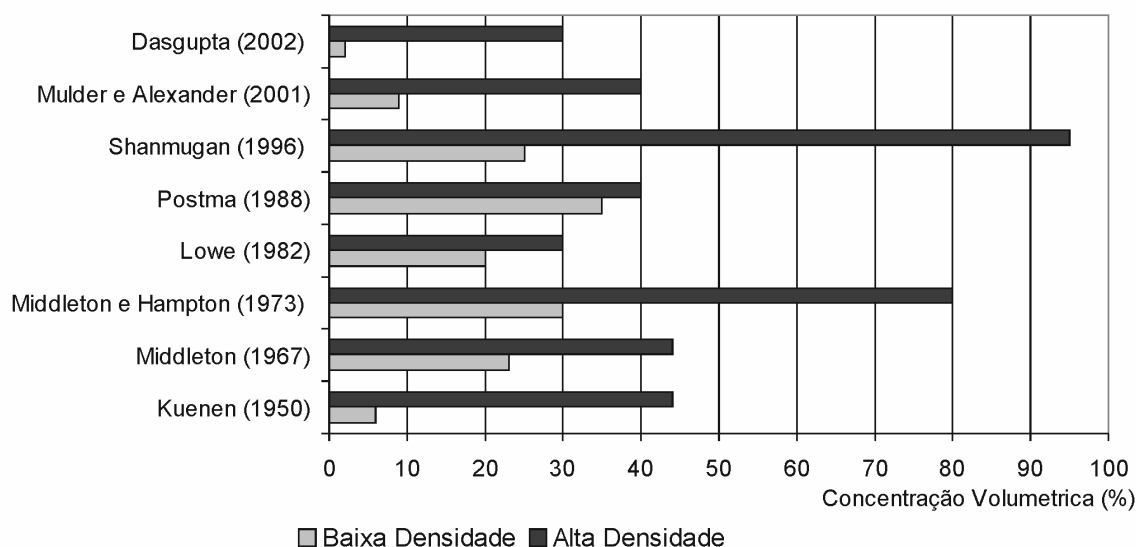


Figura 12.1 Classificação de correntes de baixa e alta densidade baseada na concentração volumétrica as misturas.

Baas et al. (2004) comentaram que não há um único valor de densidade que transforma uma corrente de baixa densidade em uma corrente de alta densidade, uma vez que esse limiar de densidade depende dos sedimentos e das propriedades do fluido (p.ex. distribuição granulométrica, quantidade de argila e intensidade da turbulência).

Por outro lado, Gani (2004) advoga que o comportamento reológico das correntes de densidade é o parâmetro menos ambíguo para a classificação desses fluxos, uma vez que não há uma variação gradual entre os fluxos ditos Newtonianos e os fluxos não Newtonianos, ou seja, essas duas possibilidades são excludentes. Nesse caso, o autor está priorizando o fato do comportamento reológico ser uma propriedade da mistura (fluido) e não do escoamento.

As classificações de correntes de turbidez baseadas no comportamento reológico (tabela 10.1) seguiram sempre uma linha indicando que as correntes de turbidez de baixa densidade seriam newtonianas, enquanto que os fluxos com alta densidade seriam considerados não-Newtonianos. Uma confusão associada a essas classificações é relacioná-las com a região de escoamento em que as correntes estão operando, ou seja, se laminar ou turbulento. Alguns autores, como Lowe (1979) e Shanmugam (1996) apresentam que os fluxos de baixa densidade são Newtonianos e turbulentos, sendo altamente independentes da concentração de sedimentos, enquanto que os fluxos de alta densidade são fluxos plásticos e laminares, pois a turbulência sozinha não pode manter em suspensão o sedimento, o que inclui outros mecanismos de suporte. Na realidade, a reologia e o regime de escoamento são classificações independentes. Na natureza, fluxos com ambos os comportamentos podem operar juntos, como por exemplo, as lamas de bentonitas utilizadas em poços de perfuração, apresentam um escoamento tanto no regime laminar e quanto no turbulento, apesar de possuir um comportamento reológico tipicamente não Newtoniano. O mesmo raciocínio pode, então, ser aplicado às correntes de densidade.

Já as classificações baseadas no mecanismo de suporte de grãos começaram a ser melhor desenvolvidas a partir do trabalho de Middleton e Hampton (1973), seguidos por Lowe (1982), Postma et al. (1988), Shanmugam (1996) e Mulder e Alexander (2001). A tabela 10.2 apresenta um resumo destas classificações.

O mecanismo de suporte dos grãos (item 4.3.3.2) são dependentes, entre outros fatores, da concentração de grãos, das propriedades reológicas da mistura, da composição e do tipo de sedimento, o que altera a propriedade das misturas e, conseqüentemente, modifica o comportamento do fluxo.

Tabela 12.1 Classificação de correntes de baixa e alta densidade baseada no comportamento reológico.

Autor (es)	Ano	Tipo de fluxo	Newtoniano	Não Newtoniano
Dott	1963	Baixa densidade		
		Alta Densidade		
Lowe	1979	Baixa densidade		
		Alta Densidade		
	1982	Baixa densidade		
		Alta Densidade		
Shanmugan	1996	Corrente de Turbidez		
		Detritos Arenosos		
Mulder e Alexander	2001	Correntes de turbidez		
		Concentrados		
		Hiper concentrados		
Dasgupta	2002	Baixa densidade		
		Correntes de Turbidez		
		Hiper concentrados		
		Fluxo de Detritos		
Gani	2004	Corrente de turbidez		
		Fluxos densos		
		Fluxo de detritos		

Tabela 12.2 Classificação de correntes de baixa e alta densidade baseada pelo mecanismo de suporte dos grãos

Autor (es)	Ano	Mec. Suporte	Turbulência	Liquefação Fluidização	Pressao Dispersiva	Matriz Coesiva	Empuxo	Decantação Impedida
Middleton e Hampton	1973	Baixa densidade						
		Alta Densidade						
Lowe	1979	Baixa densidade						
		Alta Densidade						
	1982	Baixa densidade						
		Alta Densidade arenosa						
		Alta Densidade cascalhosa						
Postma et al.	1988	Baixa densidade						
		Alta Densidade						
Shanmugan	1996	Detritos Arenosos						
		Correntes de tubidez						
Mulder Alexander	2001	Concentradas						
		Hiper concentrados						

Por esta razão, os autores nomearam como correntes de turbidez, somente aqueles fluxos onde o mecanismo de suporte dos grãos é a turbulência e chamaram estes fluxos de baixa densidade. Os fluxos altamente concentrados (alta densidade), por possuir uma maior concentração de grãos, apresentariam diversos mecanismos de suporte ao mesmo tempo, como, por exemplo, a pressão dispersiva e a fluidização ou a matriz coesiva e a pressão dispersiva, além da turbulência que estaria presente (Middleton e Hampton, 1973 e Lowe, 1979). Lowe (1982) também dividiu os fluxos em baixa densidade e alta densidade com base na população de grãos e no mecanismo de suporte. No caso da alta densidade, ele ainda fez uma outra subdivisão em fração arenosa e fração cascalhosa, onde, para cada tipo,

estariam atuando mecanismos de suporte de grãos diferentes, sendo eles a turbulência, o empuxo (*buoyant lift*) e a decantação impedida (*hindered settling*) para a fração arenosa, enquanto que para a fração cascalhosa atuaria também, a pressão dispersiva.

Em fluxos de densidade estratificados, chamados bipartidos, os processos que operam durante a deposição na sua base são muito diferentes daqueles que operam na zona acima. Postma et al. (1988), nos seus experimentos, especularam que na região mais concentrada atuam os processos de pressão dispersiva, do empuxo (*buoyant lift*) e da decantação impedida (*hindered settling*) e que a alta concentração e densidade do fluxo tendem a amortecer a turbulência. Já na região acima, a turbulência é o principal mecanismo de suporte.

Shanmugam (1996), na sua classificação de fluxos de detritos arenosos, que representariam os fluxos de turbidez de alta densidade, apresentou como principais mecanismos de suporte a pressão dispersiva, a matriz coesiva, o empuxo (*buoyant lift*) e a decantação impedida (*hindered settling*). Esta camada basal, com alta concentração de sedimentos, pode aumentar a decantação impedida (*hindered settling*) e congelar clastos de pelitos e grânulos de quartzo em posições flutuantes.

Kneller e Buckee (2000) argumentaram que o papel da turbulência nas correntes de turbidez (correntes em suspensão), no transporte e na deposição, vem sendo debatido pelas comunidades acadêmicas, principalmente no caso da deposição das partículas no interior das correntes de alta densidade, ou seja, se ocorrem em massa ou grão a grão, ou ainda, se há ligação entre os depósitos e tipo de transporte ocorrido. Um ponto de vista apresentado é que as correntes de alta densidade são não newtonianas e não são suportadas pela turbulência, mas sim pela matriz coesiva ou por interação intragranulares. Neste caso, a deposição se dá por um congelamento instantâneo (imobilização coesiva). Por outro lado, há um ponto de vista em que a região de transporte, mesmo para altas densidades, é dominada pela turbulência e a deposição ocorre grão a grão.

Já Mulder e Alexander (2001) consideraram que a principal distinção entre os fluxos se dá pelo predomínio ou não das forças coesivas e friccionais entre as partículas. Nos fluxos coesivos, há a resistência da tensão da matriz que se opõe à percolação de água no fluxo, mantendo a coerência do corpo do fluxo. Já nos fluxos friccionais, há uma interação entre as partículas, aumentando o espaço intergranular, o qual é preenchido por água. Neste caso, as características do fluxo dependem diretamente da concentração de grãos, a qual pode variar muito durante o seu deslocamento, devido à entrada de água ou à decantação de sólidos. Os fluxos friccionais, por sua vez, são classificados como correntes de turbidez quando a concentração é inferior a 9%, que é o critério adotado por Bagnold (1962) para definir suspensões turbulentas.

Nestas condições, a turbulência é o principal mecanismo de suporte das partículas. Nas correntes de densidade concentradas, há uma mudança no mecanismo de sustentação dos grãos, a qual não permite mais a livre segregação granulométrica que ocorre nas correntes de turbidez, embora esta ainda possa ocorrer (pressão dispersiva). A segregação granulométrica deixa de ocorrer nos fluxos hiperconcentrados (matriz coesiva) e a reologia passa a ser não-newtoniana.

12.2 CLASSIFICAÇÃO DE CORRENTES DE TURBIDEZ DE ALTA DENSIDADE

No capítulo 11, foi apresentada a definição de seis modelos de regiões de fluxo e de depósito, os quais caracterizaram um amplo espectro de fluxos gravitacionais de sedimentos. Através da avaliação das propriedades reológicas da mistura, das propriedades hidrodinâmicas e posicionais do fluxo, foi possível estabelecer uma nova abordagem para o entendimento genérico desse tema.

Na abordagem apresentada foram utilizados três parâmetros: quais sejam, a concentração dos grãos, a presença de argila e o comportamento reológico da mistura. Nesse caso, diversas propriedades da mistura, do escoamento e do depósito puderam ser avaliadas (resumo na tabela 11.2), as quais apresentaram comportamentos distintos. Essas diferenças foram influenciadas, tanto pela concentração da mistura, quanto pela presença de argila.

A variação desses dois parâmetros (concentração e presença de argila), utilizados para a definição de seis modelos de região para o fluxo e depósito, influenciou fortemente as propriedades reológicas da mistura, uma vez que o aumento da concentração e/ou a presença de argila causou a modificação dessa propriedade, servindo de divisor para as regiões (limiar reológico), no caso, das regiões compostas pelas misturas caracterizadas como newtonianas (regiões I, II e III) e as misturas caracterizadas como não newtonianas (regiões IV, V e VI).

A avaliação global dessas diversas propriedades permitiu verificar que muitas variáveis estão envolvidas no processo de formação, escoamento e deposição das correntes de densidade, tornando a classificação destes escoamentos uma tarefa complexa. Dentro desse contexto, pode-se dizer que os esquemas de classificações baseados somente em um desses parâmetros isoladamente, desprezando a correlação entre essas variáveis, não representam essa complexidade na sua totalidade.

Outro fator que deve ser considerado na classificação dos escoamentos é a transformação de um tipo de fluxo de densidade em outro durante o seu desenvolvimento, o que vem sendo discutido pelos pesquisadores nos últimos tempos. A busca pelo entendimento dos processos de transformação de um fluxo de mais alta concentração em fluxos menos concentrados tem sido realizada através de hipóteses de evolução ao longo do tempo e do

espaço, indicando que diferentes tipos de transformações e de processos poderiam acontecer em um único evento. Dessa forma, a divisão entre um fluxo e outro não representa uma condição singular, mas sim, um processo de transição entre esses fluxos que dificulta ainda mais o entendimento global desse processo.

Na literatura apresentada no capítulo 4.2 e brevemente discutida acima, alguns autores classificaram as correntes de densidade com apenas um parâmetro isolado, porém, a maioria buscou integrar na sua classificação vários parâmetros e conceitos, buscando sempre o entendimento da evolução completa de um fluxo, tanto temporalmente quanto espacialmente. Entretanto, muitos destes conceitos foram baseados em hipóteses teóricas, sem a preocupação de integrar todos os parâmetros do fluxo e do depósito ou sem a comprovação, via experimentos ou estudos de campo, dessas hipóteses.

Pelos seis modelos de regiões de fluxo e depósito apresentados no capítulo 11, pode-se seguir, em termos gerais, dois caminhos para a transição entre os fluxos gravitacionais de sedimentos naturais, tendo como base a concentração do fluido e a presença de argila (figura 12.2). Na figura 12.2 são apresentados esses dois caminhos possíveis de transição entre os fluxos gravitacionais de sedimentos, cujo ponto inicial é meramente ilustrativo, já que, irá depender da concentração inicial do fluxo e da presença de argila dos fluxos naturais. As setas propõem uma evolução espacial desses fluxos (item 11.4), com suas transformações ao longo do tempo. Nesse caso, o início do caminho se dá nos maiores valores de concentração (representando uma proximidade a fonte de sedimentos) e termina com a parada do sistema, ou seja, com os valores dos parâmetros tendendo a zero.

Através da visualização da figura 12.2, nota-se que o caminho A, apresenta fluxos com maior predominância de material não coesivo, que seriam fortemente dominados pela concentração inicial do fluxo, uma vez que a presença de argila, nesse caso, estaria mais restrita no fluxo (<10%).

Ao longo desse caminho (seta A), apesar de possuir o mesmo comportamento reológico, houve modificações no comportamento hidrodinâmico e, conseqüentemente, no comportamento deposicional desses fluxos, passando da primeira região até a terceira (capítulo 11). Esse primeiro caminho (seta A) representa, com algumas restrições, o que seria a evolução dos fluxos não coesivos (friccionais) teorizados por Mulder e Alexander (2001), cuja classificação teórica de fluxos gravitacionais de sedimentos, faz uma divisão entre os fluxos ditos não coesivos (seta A) e os fluxos coesivos (seta B). Dentro dos fluxos não coesivos (friccionais), segundo esses autores, haveria a subdivisão em fluxos hiperconcentrados, concentrados e correntes de turbidez (mais detalhes no item 4.2.1).

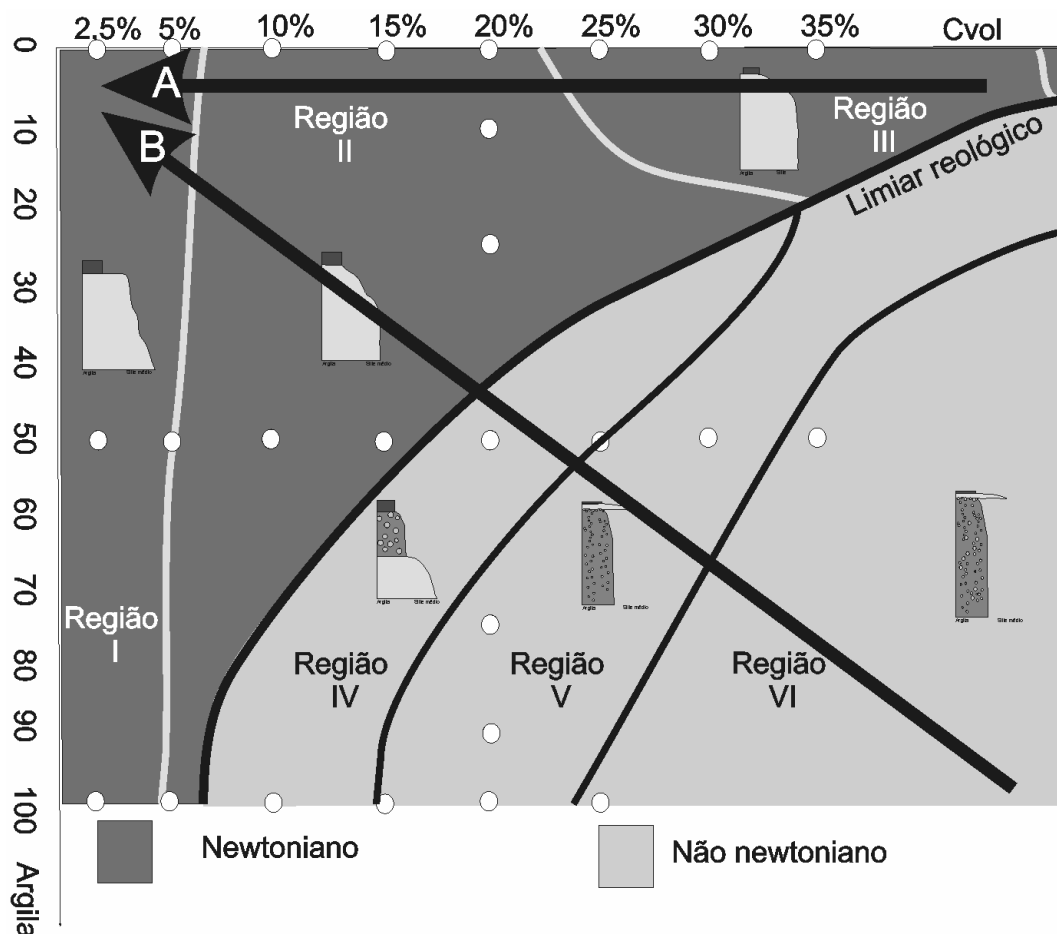


Figura 12.2 Dois caminhos possíveis de transição entre os fluxos gravitacionais de sedimentos. Fluxos com pouca presença de argila (seta A). Fluxos com muita presença de argila (seta B)

O segundo caminho (seta B) representa uma transição praticamente completa entre os fluxos gravitacionais de sedimentos, desde os fluxos com presença de grãos não coesivos e com presença de argila em diferentes proporções, englobando, praticamente todas as regiões (exceto a região III) do diagrama.

Pelas classificações encontradas na literatura, pode-se encontrar dois extremos consensuais, quando se avalia a classificação do espectro de fluxos gravitacionais de sedimentos: um limite inferior, caracterizado por um fluxo de baixa concentração, baixa presença de argila, com o mecanismo de suporte dos grãos turbulento e com comportamento reológico Newtoniano; e um limite superior, caracterizado por um fluxo com mais alta concentração, maior presença de argila, com característica de um fluxo laminar e com um comportamento não Newtoniano. A esses dois fluxos são atribuídos os nomes de correntes de turbidez e de fluxo de detritos, respectivamente.

Pela delimitação das regiões apresentadas, os dois extremos, seriam a região I e as regiões V e VI, que representariam, respectivamente as correntes de turbidez de baixa densidade (ou correntes de turbidez), conforme a definição clássica, e os fluxos de detritos.

No caso das correntes de turbidez (de baixa densidade), independentemente da presença de argila na mistura, o fluxo é Newtoniano, com concentrações em torno de 6%. Já nos fluxos de detritos, o fluxo é não-Newtoniano com alto teor de argila e com uma mais alta concentração volumétrica. No caso dos experimentos, o tamanho de grãos utilizado foi correspondente ao máximo de areia muito fina, o que caracterizaria esses fluxos como fluxo lamoso (*mudflow*, conforme McCave e Jones, 1988 e Mulder e Alexander, 2001).

Ao longo da quarta região, aparece um depósito que apresenta características de correntes de turbidez e de fluxo de detritos, o que, segundo Gani (2004), tem sido uma nova controvérsia no estudo dos fluxos gravitacionais de sedimentos nos últimos dez anos. Esse tipo de depósito também tem recebido muitos nomes, tais como: *linked debrites*, fluxos lamosos (*slurry flows*), fluxo de detritos arenosos (*sandy debris flows*), entre outros. Esse tipo de depósito estaria associado a uma estratificação reológica, ou seja, causada pela ação dos fluxos bipartidos, que geraram tanto uma camada lamosa junto ao fundo com característica não-newtoniana, quanto uma corrente diluída remanescente junto ao topo (corpo e cauda), com características newtonianas (Sanders, 1965 e Tinterri, et al, 2003). Assim, essa estratificação reológica ocorre, frequentemente, pelo aumento da concentração de sólidos localmente junto ao fundo e pelo tamanho e composição dos grãos em suspensão. Na realidade, a incorporação ou a perda de sólidos em suspensão nas correntes de turbidez é uma constante durante o seu deslocamento, desde sua iniciação até a sua extinção. Este fato determina mudanças nas propriedades hidrodinâmicas do fluxo e, conseqüentemente, no depósito gerado.

Ao longo do caminho B, o que pode ser notada é a transformação gradual de uma região à outra, resultado das modificações das condições apresentadas no capítulo 11. Entretanto, ao longo desse caminho, não foi especificado, claramente, o que seriam as correntes de turbidez de alta densidade. A tabela 12.3 apresenta as diferentes classificações das correntes de turbidez de alta densidade postuladas ao longo dos últimos 60 anos e expressas com base na concentração volumétrica dos grãos, na reologia da mistura e no mecanismo de suporte e, ainda, no depósito final da corrente. A partir das classificações apresentadas nesta tabela, foi realizada uma comparação com os modelo de regiões de reologia/fluxo/depósito propostos, buscando enquadrá-las nas mesmas propriedades e visando encontrar um padrão que possa permitir uma classificação generalista para esses tipos de fluxo. Assim, a tabela 12.3 também apresenta o resultado das comparações realizadas, bem como indica quais os caminhos que os demais autores seguiram para a adotar suas classificações, quais sejam, considerando uma maior influência de grãos não coesivos (caminho A) e/ou uma maior influência dos grãos coesivos (seta B).

Tabela 12.3 Comparação das classificações existentes na literatura com a classificação proposta para os fluxos gravitacionais de sedimentos.

Autor (es)	Ano	Fluxo	Concentração vol. (%)		REOLOGIA		MECANISMO DE SUPORTE					COMPARAÇÃO	
			min	max	Newtoniano	Não Newtoniano	Turbulência	Pressão Dispersiva	Matriz Coesiva	Empuxo	Decantação Impedida	Regime	Caminho
Kuenen e Migliorini	1950	Baixa Densidade	0	6								I	A
		Alta Densidade	6	60								II e III	
Dott	1963	Baixa Densidade										I, II, III	A e B
		Alta Densidade										IV, V, VI	
Middleton	1967	Baixa densidade	0	23								I e II	A
		Alta Densidade	23	44								III	
Middleton e Hampton	1973	Baixa Densidade	0	30								I, II e III	B
		Alta Densidade	30	44								IV, V	
		Fluxo de Detritos	44	84								VI	
Lowe	1979	Baixa Densidade										I	A e B
		Alta Densidade										II, III	
		Fluxo de Detritos										VI	
	1982	Baixa Densidade	0	20								I e II	B
		Alta Densidade arenosa	20	30								IV	
		Alta Densidade cascalhosa									-		
Postma et al.	1988	Baixa Densidade	0	35								I, II e III	B
		Alta Densidade	35	40								IV	
Shanmugam	1996	Corrente de Turbidez	0	20								I,	B
		Detritos Arenosos	20	30								IV, V	
		Fluxo de Detritos	30	80								VI	
Mulder e Alexander	2001	Correntes de turbidez	0	9								I	A
		Concentrados	9	23								II e III	
	2001	Hiper concentrados	23	45								no limiar superior do III	B
		Fluxo Lamoso	45	80								IV, V e VI	
		Fluxo de Detritos	45	80								VI com grãos maiores	
Dasgupta	2002	Baixa Densidade	0	2								-	B
		Correntes de Turbidez	2	30								I, II e III	
		Hiper concentrados	>30									IV, V	
		Fluxo de detritos não coesivos	>30									no limiar superior do III	
		Fluxo de detritos coesivos	>30									IV	
Gani	2004	Corrente de turbidez	0	9								I, II e III	B
		Fluxos densos	10	35								IV, V	
		Fluxo de detritos não coesivos	35	90								no limiar superior do III	
		Fluxo de detritos coesivos	35	90								IV	
Amy et al	2006	Regime I										I e II	B
		Regime II										III	
		Regime III										IV	
		Regime IV										-	
		Regime V										V e VI	

As classificações para os fluxos gravitacionais de sedimentos propostas na literatura, com ênfase para as correntes de turbidez de alta densidade, e expostas na tabela 12.3, indicam uma grande variabilidade dos termos, conforme já amplamente criticado por Shanmugam (2006). A comparação com as regiões de fluxo identificadas nesse estudo, buscou englobar a maioria das características propostas pelos diferentes autores, porém nem sempre uma comparação exata pôde ser realizada. Segundo a tabela 12.3, excetuando o limite

inferior (região I) e o limite superior (região VI), todas as outras quatro regiões, poderiam ser consideradas como correntes de turbidez de alta densidade, ora por um parâmetro (p ex. a concentração), ora por outro (p.ex. depósito formado). Entretanto, seguindo os dois caminhos propostos de fluxo (setas A e B), foi verificado que as regiões II e III, correspondem, na maioria dos casos, aos fluxos de alta densidade, quando a classificação é enfocada na concentração volumétrica dos fluxos com pouca presença de argila (caminho A), enquanto que, seguindo pelo caminho B, as regiões IV e V, correspondem a maioria dos casos encontrados na literatura para esse tipo de fluxo de alta densidade. Contudo, a região V apresenta suas propriedades muito similares às da região VI, especialmente se relacionado ao mecanismo de suporte de grãos, aos mecanismos de deposição e, principalmente, ao depósito final. Nesse caso, essa região V poderia ser classificada como uma região de transição entre os fluxos de alta densidade e os fluxos de detritos.

Sendo assim, é possível estabelecer um diagrama simplificado para unificar todas as classificações descritas na tabela 12.3 e nos modelos das regiões de fluxo-depósito definidos no capítulo 11 (tabela 11.2). Essa classificação se baseia nas propriedades dos fluidos e nos processos hidrodinâmicos e deposicionais, apresentando quatro grandes grupos de fluxos, conforme apresentado na figura 12.3.

Por essa classificação mais abrangente (figura 12.3), as regiões extremas (I, V e IV) representariam as correntes de turbidez (de baixa densidade) e os fluxos de detritos (1° e 2° estágios), enquanto que os fluxos das regiões II e III, representariam as correntes de turbidez de alta densidade com preponderância de efeitos inerciais e os fluxos da região IV as correntes de turbidez de alta densidade com preponderância de efeitos viscosos. Assim, o termo “correntes de turbidez de alta densidade” estaria representando todos aqueles fluxos já caracterizados anteriormente ao longo dos últimos 60 anos pelos diferentes autores e pelos diversos esquemas de classificação, razão pela qual, optou-se pelo agrupamento na terminologia das regiões II e III e da região IV, apenas diferenciando-os com base nas forças preponderantes do escoamento (número de Reynolds). Cabe ressaltar, que essa classificação não invalida as seis regiões descritas, detalhadamente, no capítulo 11.

A região V foi apresentada como a primeira aproximação dos fluxos de detritos, uma vez que, comparado com a região VI (2° aproximação), apesar das semelhanças no depósito final, apresenta diferentes propriedades hidrodinâmicas, conforme já discutido no capítulo 11. Essa nomenclatura é apenas sugestiva, uma vez que, a falta de mais ensaios no interior da região VI, impede a realização de uma classificação mais definitiva sobre esses tipos de fluxos. A linha pontilhada entre as regiões V e VI na figura 12.3 indica que essa fronteira está aberta e as interpretações nestes locais devem considerar essas indefinições.

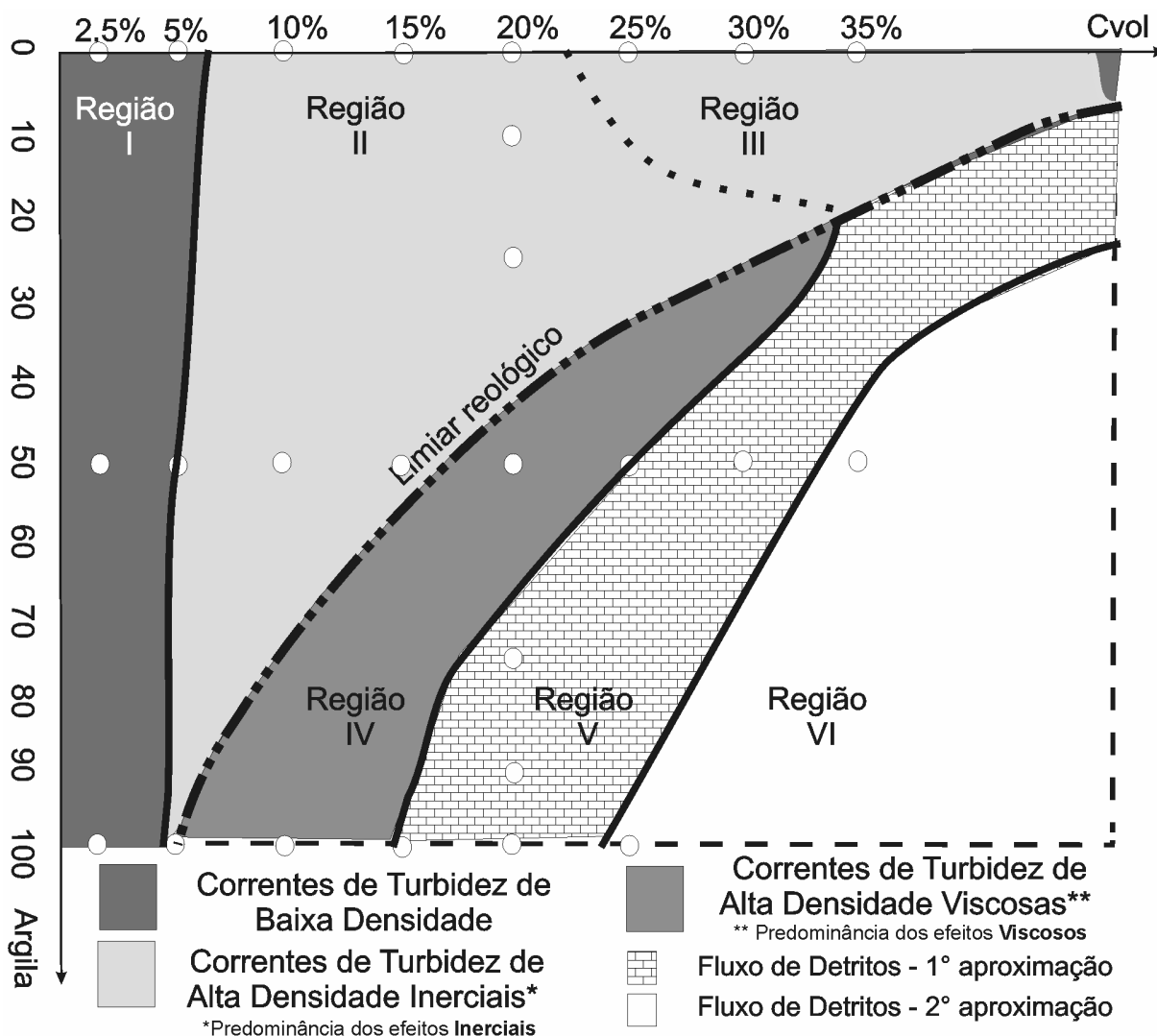


Figura 12.3 Classificação proposta por este trabalho para as correntes de turbidez de alta densidade.

Obviamente, essa classificação simplificada, acaba por criar mais sinônimos para o estudo desse tema, incorporando-se à enorme lista descrita com mais de 30 nomes. Com relação à utilização dos termos Inercial e Viscoso, optou-se por utilizar essa nomenclatura para correntes de alta densidade, uma vez que, a turbulência do escoamento é um dos pontos de tantas discussões nos fluxos gravitacionais de sedimentos. Nos resultados dos experimentos foi mostrado que todos os fluxos apresentaram alguma característica de turbulência, seja global, seja instantânea. Em todos os fluxos das regiões I, II e III, a turbulência média do escoamento foi plenamente desenvolvida, ou seja, com um alto valor do número de Reynolds. Nesse caso, as forças inerciais preponderaram sobre as forças viscosas, caracterizando esses fluxos como correntes de turbidez de alta densidade inercial. Já nos fluxos das regiões IV, V e VI, as forças viscosas do escoamento, altamente influenciadas pela mais alta presença de argila e da concentração de sedimentos, fez com que, em termos médios, a turbulência fosse dissipada. Porém, apesar dos valores do número de Reynolds

serem muito baixos, houve a detecção de alta intensidade turbulenta no interior da subcamada viscosa, na forma de pulsos instantâneos (“*spots*” de turbulência), inviabilizando o uso do termo laminar para esses fluxos. Dessa forma, a adoção do termo viscoso (força viscosa predominante) é mais apropriada.

Shanmugam (2006, pg. 255) comenta que o estudo do entendimento das correntes de turbidez de alta densidade deve ser focado na reologia e no estado (regime) do fluxo, evitando assim a proliferação de sinônimos para as correntes de mais alta densidade. Enquanto que Gani (2004, pg. 6) sentencia que o sucesso da interpretação dos depósitos dos fluxos gravitacionais de sedimentos depende do grau de precisão com que se pode estabelecer a ligação da física entre o processo e o produto sedimentológico.

Dentro desse contexto, a classificação aqui apresentada abrange o que descreveu esses dois últimos autores (Shanmugam, 2006 e Gani, 2004), uma vez que a classificação desenvolvida acima apresenta o comportamento reológico da mistura como um fator condicionante (limiar reológico) e também, relaciona o estado (região do fluxo), com a nomenclatura baseada nas forças inerciais e forças viscosas (número de Reynolds). Além disso, os resultados obtidos através da simulação física permitiram que fossem avaliados mais de vinte parâmetros do escoamento, com um forte embasamento no processo físico das correntes de densidade, bem como do estudo detalhado do depósito.

Por essa classificação aqui apresentada, o termo turbidez pode ser empregado para todos os fluxos, uma vez que a condição de água turva (classificação proposta por Johnson, 1938) de uma mistura de água e sedimentos mantidas em suspensão é satisfeita nesses casos. A restrição do uso desse termo, somente para os fluxos da região I, no caso das correntes de turbidez de baixa densidade (por exemplo: a classificação de Mulder e Alexander, 2001; Shanmugam, 1996; e outros) seria um preciosismo supérfluo e desnecessário.

Na classificação proposta nesse trabalho, a ideia de transformação dos fluxos ao longo do tempo e do espaço é mantida, com as diversas possibilidades de ocorrência desse fenômeno, uma vez que, a partir de uma condição inicial de fluxo (concentração e presença de argila), pode haver a evolução teórica completa de um fluxo iniciando como um fluxo de detritos, passando a uma corrente de turbidez de alta densidade viscosa, correntes de turbidez de alta densidade inercial e, por fim, uma corrente de turbidez de baixa densidade. Nestas transformações fica implícita a mudança nos processos hidrodinâmicos e deposicionais apresentados anteriormente. Na literatura, os principais trabalhos que enfocaram este tema foram: Hampton, (1972); Middleton e Hampton, (1973); Fischer, (1983); Mutti et al., (1999);

Lowe e Guy, (2000); Tinterri et al, (2003); Amy et al, (2006); Felix e Peakall, (2006) e Baas et al (2009).

Novamente, é importante ressaltar que os limiares de transição entre uma região ou outra não é um valor único, mas sim, uma faixa de valores gradual que representa essa mudança. O mesmo vale para o limiar reológico das misturas que, apresentam uma variabilidade em torno da linha representada no diagrama (figuras 11.2, 12.2 e 12.3).

Com relação às características deposicionais dos regimes classificados neste trabalho, nota-se que, nas correntes de turbidez de alta densidade inerciais, o padrão deposicional foi muito parecido, com a formação de um depósito mais uniforme (não gradado) junto à base e com uma gradação normal no topo. Já para as correntes de turbidez de alta densidade viscosas, houve uma certa diferenciação entre a quarta região e a quinta região. Nesse caso, a região IV estaria mais relacionada ao chamado fluxo híbrido bipartido, o qual resulta em um depósito intermediário entre as correntes de turbidez e os fluxos de detritos (sinônimos: densitos, *linked debrites*, fluxo lamoso e fluxo de detrito arenosos, etc), enquanto que a região V, estaria mais relacionada ao fluxo que depositou sua carga em massa, resultado do congelamento coesivo (alusão ao fluxo de detritos). Neste caso, tanto os processos hidrodinâmicos e deposicionais, quanto a propriedade reológica da mistura são fortemente influenciados pelas forças viscosas (resultado da alta presença de argila e da concentração volumétrica), indicando a possível transição das correntes de turbidez de alta densidade para os fluxos de detritos.

Dentre as diversas propriedades avaliadas para servir como base para a classificação, apenas o mecanismo de suporte dos grãos foi o único idealizado a partir das observações dos ensaios. Assim, a classificação apresentada corrobora com os estudos da literatura, afirmando que a componente ascendente da turbulência é o principal mecanismo de suporte dos grãos para as correntes de turbidez e que, para os demais fluxos, diversos outros mecanismos acontecem ao longo do tempo e espaço, simultaneamente ou não.

Amy et al (2006) apresentam um estudo experimental sobre os mecanismos de suporte e de deposição de grãos que foi realizado de maneira estática, através de tubos unidirecionais de sedimentação. Através da modificação da presença de argila e da concentração volumétrica, os autores conseguiram desenvolver um diagrama de fases de deposição final (estática) e extrapolaram o resultado para os fluxos gravitacionais de sedimentos. Os autores ainda ressaltam que a componente cisalhante do fluxo não foi avaliada. O resultado apresentado na figura 12.2, seria um complemento do trabalho realizado por tais pesquisadores, uma vez que, as ideias apresentadas para o modelo de suporte de grãos e dos mecanismos de deposição foram muito parecidas com os fluxos simulados nesse estudo,

apenas apresentando algumas divergências com relação ao limites entre as regiões (figura 12.4). Como os processos de deposição são independentes da escala, a extrapolação do resultado do trabalho destes autores pode ajudar a inferir aos mecanismos de suporte de grãos e de deposição dos fluxos naturais de sedimentos.

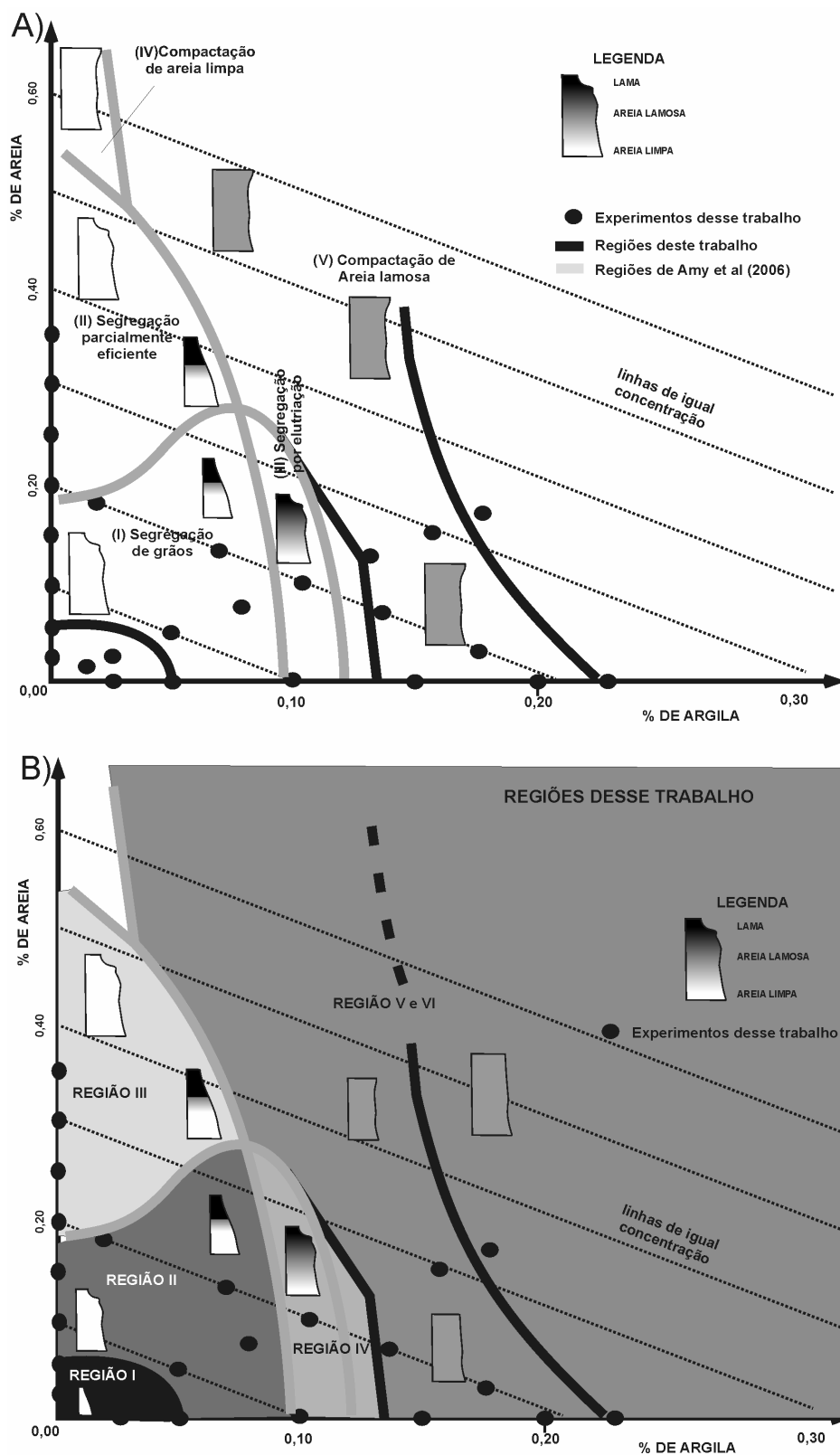


Figura 12.4 a) Diagrama de Amy et al (2006) modificado para incluir as regiões determinadas nesse trabalho e; b) Esquema mostrando as regiões determinadas nesse trabalho.

No caso de Amy et al (2006), cinco regiões foram delimitadas, sendo que nesse estudo, apresentado no capítulo 11, foram seis regiões. A primeira região de Amy et al (2006) foi subdividida em duas, bem como a quinta região, enquanto que a quarta região desses autores, corresponde a uma faixa de valores não avaliadas nesse estudo. Devido aos resultados serem similares, essa complementação dos resultados possibilita idealizar sobre o desenvolvimento dos fluxos com diferentes condições iniciais de presença de argila e concentração.

12.3 SÍNTESE FINAL

Nesse capítulo foi apresentada uma classificação para os fluxos gravitacionais de sedimentos, enfocando principalmente as correntes de turbidez de alta densidade. A partir dos dados apresentados no capítulo 11, foram caracterizadas seis regiões de fluxos que apresentaram propriedades distintas com relação à concentração volumétrica inicial e à presença de argila, as quais permitiram a comparação com as classificações de correntes de turbidez de alta densidade existentes na literatura, além de estabelecer uma nova proposição de classificação destes fluxos. Cabe salientar que essa nova classificação é simplificada e genérica, porém foi fortemente embasada nas propriedades físicas dos fluxos, nos processos hidrodinâmicos e deposicionais. Tradicionalmente, os parâmetros utilizados para classificar esse tipo de fluxo eram, até então, a concentração do fluxo, o mecanismo de suporte de grãos, o regime do fluxo, o tamanho do grão e a reologia, entre outros, e, dificilmente, esses parâmetros eram conectados entre si, ou, quando isso era realizado, muitas vezes, se lançavam hipóteses teóricas (baseadas em experimentos e ou estudos de depósitos no campo) que eram difíceis de comprovar na prática. A classificação apresentada nesse trabalho englobou, praticamente, todos os parâmetros utilizados até o presente momento, verificando a influência de cada parâmetro sobre o resultado final. Desta forma, foi possível agregar todas as classificações desses fluxos em um espectro simplificado, porém totalmente baseado em resultados medidos em laboratório. Apenas a variação do tamanho de grão não foi realizada para esses fluxos, porém esse resultado pode ser estimado, com base nos resultados apresentados.

13 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou um estudo experimental de correntes de turbidez de alta densidade, cuja premissa inicial era gerar, caracterizar e compreender as correntes de turbidez de alta densidade, empregando a técnica de modelagem física deste fenômeno.

A partir dos resultados da série de 25 experimentos realizados nesse trabalho, foi possível caracterizar os processos hidrodinâmicos e deposicionais, não só das correntes de turbidez de alta densidade, mas também, dos fluxos gravitacionais de sedimentos, criando, pela primeira vez, uma classificação capaz de identificar o tipo de fluxo e os pontos de transição entre eles.

Os resultados apresentados permitiram classificar os ensaios em seis regiões de fluxo, baseando-se na relação de causa-efeito, ou seja, nas características iniciais dos fluxos (concentração inicial e da quantidade de argila presente na mistura) e no depósito gerado. Nesse caso, tanto a concentração volumétrica, quanto a quantidade de argila, influenciaram diretamente no comportamento reológico das misturas utilizadas e, conseqüentemente, no comportamento hidrodinâmico e deposicional das correntes de turbidez simuladas. Sendo assim, o comportamento reológico da mistura foi utilizado como um terceiro parâmetro na classificação.

As seis regiões de classificação dos fluxos permitem a extrapolação do resultado, do modelo físico para os ambientes naturais. Essas regiões também foram comparadas com as classificações existentes na literatura vigente sobre correntes de turbidez de alta densidade e, como resultado, foi proposta uma nova classificação não só para esses tipos de fluxos, mas para os fluxos gravitacionais de sedimentos, tendo como base o processo físico e os resultados experimentais.

A classificação proposta por este trabalho englobou diversos parâmetros de análise (22 parâmetros, no total) que foram, totalmente baseados nos resultados físicos gerados nos experimentos. Esse fato qualifica essa classificação, uma vez que, ao longo dos anos, diversas proposições, nomenclaturas e classificações apresentadas para esse tema, partiram de hipóteses teóricas, não comprovadas fisicamente. A nomenclatura proposta não visa criar uma nova terminologia, mas sim, busca esclarecer, via fenômeno físico, os processos que ocorrem nos diferentes tipos de fluxos de densidade.

Os seis tipos de fluxo/depósitos identificados seguem uma transição entre os fluxos de detritos (mais concentrados, com maior presença de argila e não newtonianas) e as correntes de turbidez de baixa densidade (menos concentrados, com menor presença de argila e newtonianas). Os fluxos intermediários foram classificados como as correntes de turbidez de

alta densidade, dentro do qual dois tipos foram caracterizados: as correntes de turbidez de alta densidade inercial (com predominância dos efeitos inerciais, Newtoniana e pouca presença de argila) e as correntes de turbidez de alta densidade viscosas (com predominância dos efeitos viscosos, maior presença de argila e não Newtoniana). Essa nomenclatura visa eliminar o termo laminar, erroneamente utilizado para esses tipos de fluxos.

Além da proposição de uma nova classificação para os fluxos de turbidez, esse estudo apresentou outras conclusões pertinentes à metodologia experimental utilizada, bem como à caracterização reológica, hidrodinâmica e deposicional dos estudos de correntes de turbidez. Dentro desse contexto, pode-se destacar que:

- A utilização de 10 sondas de velocidade e de 4 sondas de concentração no mesmo ponto de medição foi extremamente satisfatória e, mesmo sendo intrusivas, permitiram a aquisição de uma grande quantidade de dados ao longo do tempo. Uma limitação dos resultados é dada pelo fato das sondas de velocidade terem sido instaladas na direção do fluxo. Uma recomendação a ser feita, seria instalar as sondas nas três direções do escoamento, obtendo-se, assim, um campo de velocidades mais completo das correntes de turbidez.

- O método desenvolvido nesse trabalho, o qual utilizou uma lousa interativa para a caracterização das espessuras da corrente também apresentou resultados extremamente satisfatórios, uma vez que, apesar de ser uma atividade trabalhosa e repetitiva, permitiu a composição da série temporal das geometrias em três níveis distintos, obtendo-se a espessura da corrente, a espessura da camada de mistura e a espessura da camada interna mais concentrada junto ao fundo, as quais auxiliaram na interpretação dos resultados.

- O método para a coleta de amostras indeformáveis do depósito e seu processamento no Microscópio Eletrônico de Varredura permitiu uma caracterização detalhada do interior do depósito, possibilitando o estudo da disposição grão-a-grão. Esse resultado é importante para a extrapolação dos resultados da modelagem física para os depósitos naturais.

- A declividade utilizada nos experimentos buscou reproduzir os valores encontrados na natureza, neste caso, representando um declive de $0,8^\circ$. Na literatura corrente sobre correntes de turbidez de alta densidade, muitos trabalhos experimentais reproduziram o fenômeno com uma distorção enorme na vertical, com a declividade atingindo, muitas vezes, o valor de 25° , o que representa uma condição praticamente irreal para esse tipo de fenômeno (correntes de turbidez subaquosas) na natureza.

- Uma das vantagens da modelagem física é a reprodução do fenômeno de forma controlada. Neste trabalho, foi realizada somente uma simulação para cada diferente

condição de mistura, porém, mantendo uma coerência na escolha dos parâmetros a serem modificados de um ensaio e outro. Apenas pequenas variabilidades foram constatadas nos resultados, as quais poderiam ser minimizadas com a realização de repetições, reduzindo, assim, as incertezas dos resultados.

Neste trabalho, ainda, foi utilizado um reômetro para caracterizar as misturas utilizadas nos experimentos. Assim, foi possível estabelecer o modelo da relação tensão/deformação das misturas, classificando-as corretamente sob o ponto de vista reológico, e estabelecendo equações constitutivas de determinação da viscosidade dinâmica (e/ou aparente) das misturas em relação a concentração volumétrica, ao gradiente de deformação e à presença de argila.

Como a caracterização reológica das misturas independe do tipo de fenômeno em estudo, as equações constitutivas determinadas podem ser utilizadas, não só para correntes de turbidez, mas também para qualquer situação que respeite as condições na qual foram obtidas, ou seja, com os mesmos materiais utilizados, as mesmas faixas granulométricas e respeitando a faixa de concentração volumétrica (até 35 %) e de temperatura (em torno dos 19°C).

Os dados reológicos obtidos nesse estudo foram resultados de mais de três repetições, porém recomenda-se que essa avaliação seja ampliada para concentrações maiores que as utilizadas, bem como que seja avaliada a influência do tamanho dos grãos e de outras temperaturas na viscosidade das misturas.

Com todos os dados obtidos nos experimentos foi possível caracterizar as correntes de turbidez com relação à concentração volumétrica e à presença de argila. Foram obtidas as séries temporais dos dados, que permitiram determinar os perfis verticais médios de velocidade e de concentração para a cabeça, o corpo e a cauda da corrente. Além disso, foi proposta uma adimensionalização desses perfis, com o desenvolvimento de um equacionamento dos mesmos, verificando-se que ocorre uma modificação significativa entre os escoamentos de mais baixa concentração e os de mais alta concentração, o mesmo ocorrendo com a quantidade de argila presente na mistura.

Outros condicionantes hidráulicos também foram avaliados, tais como a tensão de cisalhamento junto ao fundo e o perfil vertical do fluxo de sedimentos, o qual praticamente sintetiza o comportamento dos fluxos ensaiados e suas diferenças entre si.

Para tornar os dados independentes de escala, alguns parâmetros médios das zonas da cabeça da corrente, mas, principalmente, do corpo da corrente foram adimensionalizados e comparados com a concentração volumétrica e/ou presença de argila na mistura.

A avaliação das propriedades deposicionais em três pontos ao longo do canal e em duas escalas (macro e micro-escala), foi importante para a identificação dos processos

hidrodinâmicos associados aos mecanismos de deposição (análise em macro-escala), bem como a caracterização detalhada da gradação e tipo de sedimento presente nesses depósitos (análise em microescala). Através dessas análises conjuntas, os modelos de causa-efeito puderam ser melhor caracterizados, bem como foi possível extrapolar a evolução do fluxo/depósito ao longo do espaço.

Os resultados obtidos, neste trabalho, apresentam condições de contorno que devem ser consideradas, quando se pretende aplicar os resultados para os depósitos gravitacionais de sedimentos naturais. Nesse caso, recomenda-se que, para os trabalhos futuros, os experimentos sejam reproduzidos em outra escala de simulação (um tanque maior ou menor), para quantificar a influência do efeito de escala sobre os resultados simulados. Também, recomenda-se que outras faixas granulométricas, acima do tamanho correspondente à areia muito fina, sejam simuladas, para verificar se os pontos de transição entre as mudanças das regiões de fluxos se alteram ou se os parâmetros e leis ajustadas são válidas para essas novas condições.

A principal recomendação, porém, visa sugerir a realização de ensaios com proporções intermediárias de presença de argila na mistura, extrapolando os dados do grupo transição, e com diferentes concentrações volumétricas (não só para $C_{vol} = 20\%$). Também se recomenda ampliar o estudo para as concentrações acima de 35% para os grupos não coesivo e misto, uma vez que, nas condições de ensaios utilizadas, o grupo coesivo apresentava problemas na sua operacionalização experimental. Assim procedendo, os fluxos de detritos seriam melhor caracterizados quanto aos mecanismos hidrodinâmicos e deposicionais.

Por mais que se buscasse avaliar, nesse trabalho, um grande número de parâmetros, alguns dados não foram totalmente esgotados na sua análise, especialmente, os condicionantes hidráulicos do escoamento. Recomenda-se aprofundar os estudos hidrodinâmicos dessas correntes de densidade, principalmente estudando os efeitos da turbulência interna do escoamento e suas implicações sobre o depósito.

Por fim, cabe mencionar que os resultados apresentados nesta tese podem servir como base de dados para a elaboração de modelos de simulação numérica, uma vez que as correlações e adimensionalizações aqui discutidas, sobretudo no que concerne às características geométricas e cinemáticas da corrente, normalmente não encontradas suficientemente detalhadas na literatura.

14 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, J.; MORRIS, S. 1994. Observation on experimental, nonchannelized, high-concentration turbidity currents and variations in deposits around obstacles. Journal of Sedimentary Research, Tulsa, v. A₆₄, n. 4, p.899-909.

ALEXANDER, J.; MULDER, T. 2002 Experimental quasi-steady density currents. Marine Geology, Amsterdam, 186, 195-210.

AMY, L. A., TALLING, P. J., EDMONDS, V. O., SUMNER, E. J. & LESEUR, A. (2006) An experimental investigation on sand-mud suspension settling behaviour and implications for bimodal mud content of submarine flow deposits. Sedimentology 53, 1411–1434.

AVILA, M. D., DUCKER, R. E. e CORREA, I. S. 2002. Modelagem física de correntes de densidade não conservativas: um método para interpretação e avaliação de depósitos turbidíticos. XLI Congresso Brasileiro de Geologia, João Pessoa, Brasil.

ÁVILA, M. D. 2003. Modelagem física de correntes de densidade no estudo de depósitos turbidíticos. [manuscrito]. [106 f.]: il. Dissertação (mestrado) - *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2000. Ori.: Correa, Iran Carlos Stalliviere.

ALTINAKAR, M. S. 1988. Weakly depositing turbidity currents on small slopes. Tese submetida à *Ecol. Pol. Fed. Lausanne*.

BAAS, J.H.; KESTEREN, W.V.; POSTMA, G. 2004. Deposits of depletive high-density turbidity currents: a flume analogue of bed geometry, structure and texture. Sedimentology, Oxford, v51, p. 1053-1088.

BAAS, J. H., MCCAFFREY, W.D., PATTACI, M. & WYTON, J. (2006) Experimental turbidity current transport and deposition using scaled realistic bathymetry. AAPG Houston, April 9th-12th, Abstract Volume.

BAAS, J. H. BEST, J. L. PEAKALL, J; WANG, M (2009) A phase diagram for turbulent, transitional and laminar clay suspension flows.

BAGNOLD, R.A. (1954) Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newton fluid under shear. Proc. R. S. London, Ser., 225, 49-63.

BAGNOLD, R. A. 1962. Auto-suspension of transported sediment: turbidity currents. Proceedings of the Royal Society of London, London, n. 265, p. 315-319.

BEST, J.L.; KIRKBRIDE, A.D.; PEAKALL, J. 2001 Mean flow and turbulence structure of sediment-laden gravity currents: new insights using ultrasonic Doppler velocity profiling. In W.D. McCaffrey, B.C. Kneller & J. Peakall (Eds.), Particulate Gravity Currents, International Association of Sedimentologists, Special Publication, Blackwell Science Ltd., p.159-172.

BOGGS JR, S. (2006) Principles of sedimentology and stratigraphy. Pearson, Prentice Hall, 662 pag.

BONNECAZE, R. T.; HUPPERT, H. E.; LISTER, J. R. 1993. Particle-driven gravity currents. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v. 250, p. 339-369.

BOUMA, A. H. 1962. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation. Amsterdam: Elsevier; 168p.

BRAMLETTE, M. N. e BRADLEY W. H. (1940). Geology and Biology of North Atlantic deep-sea cores. US Geological Survey Professional paper, 196.

BRITO, D.U.; MEDEIROS, D. S.; MANICA, R.; BORGES, A. L. de O.; MAESTRI, R. D. Emprego de equipamento de visualização (ecógrafo médico) para o estudo de correntes de densidade não conservativas. Revista Técnica de Energia Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, v. 2, p. 54-59, 2002.

BRITTER, R. E.; LINDEN, P. F. 1980. The motion of the front of a gravity current travelling down a incline. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.99, pt 3, p. 531-543.

BRITTER, R. E.; SIMPSON, E. J. 1978. Experiments on the dynamics of a gravity current head. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.88, p.223-240.

BURSIK, M. I.; WOODS, A. W. 2000. The effects of topography on sedimentation from particle-laden turbulent density currents. Journal of Sedimentary Research, Tulsa, v.70, n. 1, p. 53-63.

CHOUX, C.M.A., BAAS, J.H., MCCAFFREY, W.D. AND HAUGHTON, P.D.W. (2005) Impact of concentration on velocity, grain size and density structure of experimental gravity flows. Sedimentary Geology 179 49–69

CLAUSER, F.H. (1954) Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients, J. Aerosol Sci. 21 (2), pp. 91–108.

COUSSOT, P. 1997. Mudflow Rheology and Dynamics. IAHR Monograph Series. Ed. Taylor & Francis.

DALY, R.A. (1936) Origin of submarine “canyons”. Amer. Journ. Sci., v. 31, n. 186, 401-420.

D’ÁVILA, R. S. F.; PAIM, P. S. G., 2003. Mecanismos de transporte e deposição de turbiditos. In: Paim, P. S. G.; Faccini, U. F.; Netto, R. G. (eds) Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares. Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

DASGUPTA, P. 2002. Sediment Gravity flow – The conceptual problems. Earth Science Reviews, Amsterdam, v.1281. p.1-17.

DEL REY, A.C. (2006) Simulação física de processos gravitacionais subaquosos: uma aproximação para o entendimento da sedimentação marinha profunda. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre (RS), 229 pp.

DOTT Jr, R. H. 1963. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 47: 104-128.

DUCKER, R. 2002. “Avaliação da capacidade portante de frações finas nas correntes de turbidez. Dissertação (Mestrado em Engenharia) de Mestrado- Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH Porto Alegre/UFRGS.84p

EINSTEIN, A. (1906) Investigations on the theory of the Brownian movement (from the annalen der physik (4), 19, pp. 289-306

ELISSON, T.H.; TURNER, J. S. 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.6, p.423-448.

FABIAN, S. 2002. Modelagem física de correntes de densidade em canal bidimensional de declividade variável, 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FELIX, M., STURTON, S. AND PEAKALL, J. (2005) Combined measurements of velocity and concentration in experimental turbidity currents. *Sed. Geol.*, 179, 31–47.

FELIX, M. e PEAKALL, J..(2006) Transformation of debris flows into turbidity currents: mechanisms inferred from laboratory experiments. *Sedimentology*, 53, 107-123.

FISCHER, R. V. 1983. Flow transformations in sediment gravity flows. Geology, Boulder, v.11, p.273-274.

FOREL, F.A. (1885) Les ravins sous-lacustres des fleuves glaciaires. *C.R. Acad. Sci (Paris)*, 101, 725–728.

GANI, M. R. 2004. From Turbid to Lucid: A straightforward approach to sediment gravity flows and their deposits. *The Sedimentary Record*. September.

GARCIA, 1985. Experimental study of turbidity currents. Dissertação de mestrado. *Univ. de Minnesota*

GARCIA, M.; PARKER, G. 1993. Experiments on entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current. Journal of Geophysical Research, v. 98, n.C3, p. 4793-4807.

GLADSTONE, C.; PHILLIPS, J.C.; SPARKS, R.S.J. 1998 Experiments on bidisperse, constant-volume gravity currents: propagation and sediment deposition. *Sedimentology*, 45, 833-843.

GRAF, W. e ALTINAKAR, M. S. (1998), “Turbidity currents”, In: “*Fluvial Hydraulics: Flow and Transport processes in channels of simple geometry*”, Jonh Wiley e son Ltda., pag. 468-516.

GUIRRO, A. C. (2008) Simulações físicas com correntes de turbidez num tanque sem confinamento lateral: efeitos da variação do tamanho dos grãos e da vazão. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre (RS), 229 pp.

HAUGHTON, P.D.W., BARKER, S.P. and McCaffrey, W.M. (2003) Linked Debrites in sand-rich turbidite systems – origin and significance. *Sedimentology*, 50, 459-482.

HAMPTON, M.A. 1972 The role of subaqueous debris flow in generating turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 42(4), 775-793.

HUANG, H, IMRAN, J e PIRMEZ, C (in press) The critical densimetric froude number of subaqueous gravity currents can be non-unity or non-existent. *Journal of sedimentary research*.

HUPPERT, H. E.; SIMPSON, J. E. 1980. The slumping of gravity currents. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.99, pt 4, p. 785-799.

ILSTAD, T., ELVERHØI, A., ISSLER, D., AND MARR, J.(2004): Subaqueous debris flow behaviour and its dependence on the sand/clay ratio: a laboratory study using particle tracking, *Marine Geol.*, 213, 415–438, doi:10.1016/j.margeo.2004.10.017.

KELLMAN, P. (2007) – Comunicação pessoal. University of Leeds.

KNELLER, B. 1995. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. In: *Characterization of deep marine clastic systems*. London: The Geological Society Special Publication, p. 31-49. (Geological Society Special Publication, n. 94).

KNELLER, B.; BRANNEY, M. J. 1995. Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive sands. *Sedimentology*, Oxford, v.42, p. 607-616.

KNELLER, B.C., BENNETT, S.J. and McCAFFREY, W.D. (1999) Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents. *J. Geophys. Res. Oceans.*, 94, 5281-5291.

KNELLER, B.; BUCKEE, C. 2000. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. *Sedimentology*, Oxford, v.47, Suppl. 1, p. 62-94.

KNELLER, B.; McCAFFREY, W. D. 2003. The interpretation of vertical sequences in turbidite beds: the influence of longitudinal flow structure. *Journal of Geophysical Research*, v.75 N° 5; p. 706-713.

KUENEN, P. H. 1937. Experiments in connection with Daly's hypothesis on the formation of submarine canyons. *Leidse Geological Meded.*, 8, 327-335.

KUENEN, P. H. 1950. Turbidity currents of high density. In: *Proceedings of 18th International Geological Congress (1948)*, London, p. 44-52.

KUENEN, P. H. 1951. Properties of turbidity currents of high density. Tulsa: Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, p. 1-14. (Special Publication. n. 2).

KUENEN, P. H.; MIGLIORINI, C. I. 1950. Turbidity currents as a cause of graded bedding *Journal of Geology*, 58, 91-127

LAVAL, A., CREMER, P., BEGHIN, P. e RAVENNE, C. 1988. Density surges: two-dimensional experiments. *Sedimentology*, Oxford, v.35, p. 73-84.

LIGGETT, J. A. (1994). *Fluid Mechanics* – McGraw- Hill, Inc. 495 pag.

LOWE, D. R. 1979. Sediment gravity flows: Their classification and some problems of application to natural flows and deposits. *SEPM (Special Publication n. 27)*, p 75-82.

LOWE, D. R. 1982. Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, v.52, n.1, p. 279-297.

LOWE, D. R.; GUY, P. 2000. Slurry-flow deposits in the Britannia formation (lower Cretaceous, North Sea: a new perspective on the turbidity current and debris flow problem. *Sedimentology*, Oxford, v.47, p. 31-70.

LUTHI, S. 1981. Experiments on non-channelized turbidity currents and their deposits. *Marine Geology*, Amsterdam. V.40, p. M₅₉-M₆₈.

MAESTRI, R. D; BORGES, A.L.O; E MANICA, R (2007) Investigação Experimental Sobre Condições de Aporte de Sedimentos em Correntes de Turbidez. Anais do VII ENES: Encontro nacional de engenharia de sedimentos. Porto Alegre, ABRH, 149-164

MAESTRI, R. D; UNGARETTI, R. L.; BORGES, A.L.O; E ROSAURO, N. L. (2006) Hidráulica I – Notas de Aula. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, UFRGS.

MANICA, R. 2002. “Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada, 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) de Mestrado- Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH Porto Alegre/UFRGS.130p.

MANICA, R.; DEL REY, A. C.; MAESTRI, R. D.; BORGES, A. L. de O.; VIANA, A. R. 2005. Influência do mecanismo de iniciação na dinâmica dos fluxos e na geometria dos depósitos gerados: observações obtidas a partir de estudo experimental de correntes de densidade não-conservativas. B. Geoci. Petrobras 13(1): 43-60.

MANICA, R., SARTOR, R; MAESTRI, R. D.; BORGES, A. L. O. (2006). Turbidity Currents Physical Simulation in a Small-Scale Model of Large Dimensions (Canyon Almirante Câmara – Campos Basin, Brazil): Methodology and Preliminary Results. In: AAPG Annual Meeting, Houston, Texas, EUA.

MARR, J.G., HARFF, P.A., SHANMUGAN, G. e PARKER, G. (2001) Experiments on subaqueous sandy gravity flow: the role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures. GSA Bulletin, 113(11), 1377-1386.

McCAFFREY, W.D.; CHOUX, C.M.; BAAS, J.H.; HAUGHTON, P.D.W. 2003 Spatio-temporal evolution of velocity structure, concentration and grain-size stratification within experimental particulate gravity currents. Marine and Petroleum Geology, v. 20, p. 851-860.

McCAVE, I, N e JONES, P.N (1988). Deposition of ungraded muds from high-density non turbulent turbidity currents. Nature Vol 333. p 250-252.

MICHON, X.; GODDET, J. e BONNEFILLE, R. 1955. Etude Theorique et experimentale des courants de densite. 2 vol. Lab. Nat. d’Hydraulique Chatou, França.

MIDDLETON, G. V. 1966a. Small-scale models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension. Journal of Sedimentary Petrology, Tulsa, v.36, n.1, p. 202-208.

MIDDLETON, G. V. 1966b. Experiments on density and turbidity currents I. Motion of the head. Canadian Journal of Earth Sciences, Ottawa, v.3, p. 523-546.

MIDDLETON, G. V. 1966c. Experiments on density and turbidity currents II. Uniform flow of density currents . Canadian Journal of Earth Sciences, Ottawa, v.3, p. 627-637.

MIDDLETON, G.V. 1967 Experiments on density and turbidity currents III. Deposition of sediment. . Canadian Journal of Earth Sciences, Ottawa, 4, 475-505.

MIDDLETON, G. V. 1970. Experimental studies related to problems of flysch sedimentation. In: Flysch Sedimentology in North America. Lajoie. p. 253-272 (Geological Association of Canada Special Paper, 7).

MIDDLETON, G. V. 1993. Sediment deposition from turbidity currents. Annual Review of Earth Planet Science, Palo Alto, v.21, p. 89-114.

MIDDLETON, G. V.; HAMPTON, M. A. 1976. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: *Marine Sediment Transport and Environmental Management*. New York, Wiley, p. 197-218.

MIDDLETON, G. V.; NEAL, W. J. 1989. Experiments on the thickness of beds deposited by turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, v.59, n.2, p. 297-307.

MOHRIG, D.; ELVERHOI, A.; PARKER, G. 1999 Experiments on the relative mobility of muddy subaqueous and subaerial debris flows, and their capacity to remobilize antecedent deposits. *Marine Geology* 154, 117-129.

MOHRIG, D. & MARR, J.G. 2003 Constraining the efficiency of turbidity current from submarine debris flow and slides using laboratory experiments. *Marine and Petroleum Geology*, Amsterdam 20, 883-899

MOTTA, V. F. 1972. *Curso de Teoria da Semelhança*. Porto Alegre, Ed. URGs. 154p.

MULDER, T.; ALEXANDER, J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, Oxford, v.48, p. 269-299.

MUTTI, E.; TINTERRI, R.; REMANCHA, E.; MAVILLA, N. ANGELLA, S.; FAVAL, L. 1999. *An introduction to the analysis of ancient turbidite basins from an outcrop perspective*. Tulsa: AAPG 86p. (AAPG Course Notes, 39).

MUTTI, E.; BERNOULLI, D.; RICCI LUCCHI, F. e TINTERRI, R. (2009). Turbidites and turbidity currents from Alpine "Flisch" to the exploration of continental margins. *Sedimentology*, 56, 267–318 doi: 10.1111/j.1365-3091.2008.01019.x.

NGUYEN, Q e BOGER, D.(1992) Measuring the flow properties of yield stress fluids. *Annual Review. Fluid Mechanics*, 24, 47-88

NORMARK, W.R.; PIPER, D. J. W. 1991. Initiation processes and flow evolution of turbidity currents: implications for the depositional record. *SEPM (Special Publication n. 46)*. p.207-230.

OUCHI, S.; ETHRIDGE, F.G.; JAMES, E.W.; SCHUMM, S.A. 1995 Experimental study of subaqueous fan development. In Harley, A.J. & Prosser, D.J. (eds), *Characterization of Deep Marine Clastic Systems*, Geological Society Special Publication, 94, 13-29.

PAOLA, C. 2000. Quantitative models of sedimentary basin filling. *Sedimentology*, Oxford, suppl. 1. v.47, p. 121-178.

PARKER, G., FUKUSHIMA, Y., AND PANTIN, H.M., 1986, Self accelerating turbidity currents: *Journal of Fluid Mechanics*, v. 171, p. 145–181.

PARKER, G., GARCIA, M., FUKUSHIMA, Y. e YU, W. (1987) Experiments on turbidity currents over a erodible bed. *Journal of Hydraulic Research*, 25, 123-147.

PARSONS, J.D.; SCHWELLER, W.J.; STELTING, C.W., SOUTHARD, J.B.; LYONS, W.L.; GROTZINGER, J.P. – 2002 – A preliminary experimental study of turbidite fan deposits. *Journal of Sedimentary Research*, Tulsa, v72, 5, 619-628

PEAKALL, J.; ASHWORTH, P.; BEST, J.L. (1996) Physical modelling in fluvial geomorphology: principles, applications and unresolved issues,, In: Rhoads, B.L., Thorn, C.E. (Ed) *The Scientific Nature of Geomorphology*, Wiley & Sons, Chichester, pp.221-253.

POSTMA, G.; NEMEC, W.; KLEINSPEHN, K.L. 1988 Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. Sedimentary Geology, 58, 47-61.

PRATSON, L.F., IMRAN, J., PARKER, G., SYVITSKI, J.P.M. & HUTTON, E. 2000 Debris Flows Vs. Turbidity Currents: A Modeling Comparison Of Their Dynamics And Deposits. In BOUMA, A.H. and STONE C.G.: Fine-Grained Turbidite Systems, AAPG Mem., 72, p 57–72.

RAVENNE, C.; BEGHIN, P. 1983. Apport des experiences en canal à l'interprétation sédimentologique des depots de cones détritiques sous-marins. Revue de l'I.F.P., v.38, p. 279-297.

READING, H. G. 1996. Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy. Blackwell Publishing Limited. 688 pag.

RODRÍGUES, E. L. S.; VASQUEZ, V. N. S.; MANICA, R. ; BORGES, A. L. O. 2004. Comparação de métodos de determinação da granulometria do material depositado em simulações físicas de correntes de densidade. In: XVI Salão de Iniciação Científica da UFRGS. Porto Alegre,

SANDERS, J. E. 1965. Primary sedimentary structures formed by turbidity currents and related resedimentation mechanisms. In: Middleton, G. V. (Ed), Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation, SEPM(Special Publication, n.12), p. 192-219, Tulsa.

SAKAY, T., Yokokawa, M., Kubo, Y., Endo, N., Masuda, F., 2002. Grain fabric of experimental gravity flow deposits. Sedimentary Geology, Amsterdam, v. 3046.

SHANMUGAM, G. 1996. High-density turbidity currents: Are they sandy debris flows?. Journal of Sedimentary Research, Tulsa, v. 66, n. 1, p.2-10

SHANMUGAM, G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm 1950s-1990s. Deep-water processes and facies models: a critical perspective. Marine and Petroleum Geology, Guilford, v.17. p.285-342.

SHANMUGAN, G. 2002 – Ten turbidite Myths. Earth Science Reviews, Amsterdam, 1241.

SHANMUGAN, G. 2006. Deep- Water process and facies models: implications for sandstone petroleum reservoirs. 1.ed. Handbook of Petroleum Exploration and Production – Volume 5. Elsevier, 476p.

SIMPSON, E. J. 1972. Effects of the lower boundary on the head of a gravity current. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.53, p.759-768.

SIMPSON, E. J. 1997. Gravity currents in the enviroment and the laboratory. 2.ed. Cambridge University, 244p.

SIMPSON, E. J.; BRITTER, R. E. 1979. The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.94, p.447-495.

STOW, D. A. V.; 1994. Deep sea processes of sediment transport and deposition. In: Pye, K. Sediment Transport and Depositional Process. 1.ed. Oxford, Blackwell Science. p. 257-293.

TALLING, P.J., AMY, L.A., WYNN, R.B., PEAKALL, J. and ROBINSON, M. (2004) Beds comprising debrite sandwiched within co-genetic turbidite: origin and widespread occurrence in distal depositional environments. *Sedimentology* 54, 163-194.

TALLING, P. J.; WYNN, R. B.; MASSON; D. G., FRENZ, M.; CRONIN, B. T.; SCHIEBEL,R; AKHMETZHANOV, A. M., DALLMEIER-TIESSSEN, S., BENETTI, S.; WEAVER, P. P. E.; GEORGIPOULOU, A.; ZUHLSDORFF, C. e AMY, L. A. (2007) Onset of submarine debris flow deposition far from original giant landslide. *Nature* Vol 450 doi:10.1038/nature06313.

TINTERRI, R., DROGO, M., CONSONNI, A., DAVOLI, G. & MUTTI, E. 2003 Modelling Subaqueous Bipartite sediment Gravity Flows on the Basis of Outcrop Constraints: First Results. *Marine and Petroleum Geology*, 20, p 911-933.

TOKUHASHI, S., 2003. Discussion on the meaning of the term "turbidity current" and "turbidite", and historical perspective. In: INTERNATIONAL CONFERENCE "DEEP WATER PROCESSES IN MODERN AND ANCIENT ENVIRONMENTS", Barcelona, 2003

VAN KESSEL, T., KRANENBURG, C (1996) Gravity current of fluid mud on sloping bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112, 710-717.

WAN, Z.;WANG, Z., 1994,. Hyperconcentrated Flow. IAHR Monograph Series, A. A. Balkema. Rotterdam 290p

WHITEHOUSE, R., SOULSBY, R., ROBERTS, W.; MITCHENER, H. (2000) Dynamics of Estuarine Muds. Thomas Telford, London, 210 pp.

WINTERWERP, J. C. (2001), Stratification effects by cohesive and non-cohesive sediment, *J. Geophys. Res.*, 106, 22,559– 22,574.

WINTERWERP, J.C. (2002) On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. *Cont. Shelf Res.*, 22, 1339–1360.

15 ANEXOS

Os anexos deste trabalho estão no DVD da tese e contêm 8 anexos, numerados seguindo a ordem alfabética de A até H. No DVD, os arquivos estão localizados em pastas, separadamente, para facilitar o acesso.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)