UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO DOS PARÂMETROS QUE INFLUÊNCIAM A FLOCULAÇÃO NA SEDIMENTAÇÃO CONTÍNUA

JULIANA RODRIGUES LIRA

Uberlândia – MG
2010

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO DOS PARÂMETROS QUE INFLUÊNCIAM A FLOCULAÇÃO NA SEDIMENTAÇÃO CONTÍNUA

Juliana Rodrigues Lira

Orientador: Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno

Co-Orientador: Prof. Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia – MG

2010

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 27 DE ABRIL DE 2010.

BANCA EXAMINADORA:

_____

Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno

(Orientador – PPGEQ/UFU)

_____

Prof. Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes

(Co- Orientador - PPGEQ/UFU)

_____

Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca

(PPGEQ/UFU)

_____

Prof. Dr. Valéria Viana Murata

(PPGEQ/UFU)

_____

Dr.Lucas Meili

(DEQ/UFSCAR)

Dedico este trabalho aos meus pais, Magda e José Geraldo,
pois sem o amor e o esforço deles nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter dado força e coragem para terminar este trabalho.

Aos meus pais, Magda Elizabeth Rodrigues e José Geraldo Lira, pelo amor incondicional e por sempre ter a palavra certa.

Aos meus irmãos, Junior e Diego, pelo carinho e amizade.

Aos meus familiares de um modo geral que sempre estiveram na torcida pelo meu sucesso.

Ao meu namorado Edson, pelo carinho e companheirismo, que tornou a jornada da vida muito mais fácil.

Ao meu orientador João Jorge Ribeiro Damasceno, o qual me fez ver que é preciso saber crescer com os problemas e assim pude admirá-lo ainda mais como amigo e profissional.

Ao meu co-orientador Luís Cláudio de Oliveira Lopes, pela ajuda e profissionalismo.

Ao professor Luiz Gustavo pela amizade acima de tudo e pelo apoio em estágio docência.

Aos amigos Juliana, Christiane, Daniela, Ballu, Janaina, Beatriz, Priciane, Aline, Thalyta, Rafael, Diego, Marcelo, Ricardinho e Fábio Arouca, que sempre me ajudaram e apoiaram quando precisei.

Aos funcionários Silvino, José Henrique, Cleo, Cleide, Lucia, Thiago, Zuleide, Dona Ione e Sr. Alcides.

A todos que certa forma ajudaram na realização deste trabalho.

“Para conquistarmos algo na vida não basta ter talento, não basta ter força, é preciso também viver um grande amor”.

(Mozart)

SUMÁRIO

Índice de Figuras i

Índice de Tabelas iii

Simbologia iv

Resumo vii

Abstract viii

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3

2.1 – Conceitos sobre sedimentação 3

2.2 – Conceitos sobre coagulação/floculação 5

2.2 – Fundamentos teóricos do espessamento 5

2.3.1 – Modelagem do espessamento contínuo 8

2.3.1.1 – O modelo de Tiller e Chen (1988) 9

2.3.1.2 – Modelo Matemático de Arouca (2007) para o caso da Sedimentação Contínua 12

2.3.1.3 – Simulação numérica do modelo de Arouca (2007) proposto para a sedimentação contínua no estado estacionário 15

2.4 – Trabalhos relevantes na área 17

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS 31

3.1 – Materiais utilizados 31

3.1.1 – Unidade Experimental 32

3.2 – Metodologia 34

3.2.1 – Testes para determinação da melhor faixa de pH e agente floculante 34

3.2.2 – Caracterização de suspensões floculentas 35

3.2.3 – Testes para a determinação dos parâmetros da equação constitutiva para pressão nos sólidos para sedimentos de caulim 36

3.2.4 – Testes para a determinação dos parâmetros da equação constitutiva para permeabilidade para sedimentos de caulim 38

3.3 – Testes para determinação da taxa de sedimentação utilizando a metodologia de Kynch – Influência da altura inicial da coluna de suspensão 39

3.4 – Descrição da operação do sedimentador contínuo 40

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES 43

4.1 – Efeito do pH e da concentração de agente floculante sobre a velocidade de sedimentação 43

4.1.1 – Comparação entre testes sem e com formação de flocos 48

4.2 – Testes com sulfato de alumínio 49

4.2.1 – Estimativa da densidade do aglomerado de partículas 49

4.2.2 – Caracterização do sistema particulado 51

4.3 – Determinação de equações constitutivas para a pressão nos sólidos 53

4.3.1 – Análise de um modelo de potências para a pressão nos sólidos 58

4.4 – Determinação da permeabilidade do meio poroso de suspensões aquosas de caulim 60

4.5 – Resultado do estudo experimental no sedimentador operando continuamente em estado estacionário com suspensões aquosas de caulim 63

4.6 – Determinação da capacidade do sedimentador e da altura do sedimento segundo a metodologia de Kynch (1952) 66

4.7 – Cálculo da altura do sedimento utilizando modelos de Tiller e Chen (1988) e de Arouca (2007) 69

4.7.1 – Resultados da simulação do modelo Tiller e Chen (1988) 69

4.7.2 – Resultados da simulação do modelo Arouca (2007) 72

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES 75

5.1 - Conclusões 75

5.2 - Sugestões 76

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 77

APÊNDICE 81

Índice de Figuras

2.1 – Diagrama ilustrativo de um espessador contínuo convencional, tipo Dorr-Oliver (FRANÇA e MASSARANI, 2002)..... 4

2.2 – Vista esquemática de um sedimentador convencional..... 8

2.3 – Altura do sedimento em função do fluxo de sólidos em um espessador contínuo 11

2.4 – O processo de sedimentação em batelada segundo a teoria de Kynch (DAMASCENO ,1992) 18

2.5 – Determinação gráfica da concentração e da velocidade de sedimentação através da teoria de Kynch. 19

3.1 – Gráfico da Distribuição granulométrica para o caulim 31

3.2 – A unidade experimental para experimentos de sedimentação contínua..... 32

3.3 – Teste de sedimentação em proveta para determinação da permeabilidade 38

4.1 – Distribuição dos resíduos relativa à velocidade de sedimentação 45

4.2 – Valores preditos em função dos observados relativos à velocidade de sedimentação.... 46

4.3 – Superfície de resposta e curva de contorno para a resposta velocidade de sedimentação em função do pH (X_1) e concentração de floculante (X_2) 47

4.4 - Comparação entre testes sem e com floco 48

4.5 – Fotografias dos ensaios sem e com floco 49

4.6 - Comparação entre testes com e sem floculante, pH=6 e cocentracao de floculante de 5 mg/L..... 50

4.7 – Ajuste paramétrico das variáveis k e $v_{t\infty}$ 52

4.8 – Distribuição de pressão nos sólidos na base do sedimento 57

4.9 – Distribuição de pressão nos sólidos na base do sedimento para suspensões com sulfato de alumínio..... 57

4.10 – Modelo de potências proposto para a equação constitutiva da pressão nos sólidos 59

4.11 – Modelo de potências proposto para a equação constitutiva da pressão nos sólidos com suspensões com sulfato de alumínio..... 59

4.12 – Ajuste dos dados experimentais pela equação de TILLER e LEU (1980) 62

4.13 – Ajuste dos dados experimentais pela equação de TILLER e LEU (1980) para suspensões com sulfato de alumínio..... 63

4.14- Perfil de concentração do sedimentador convencional com suspensão de caulim sem sulfato de alumínio..... 65

4.15 - Perfil de concentração do sedimentador convencional com suspensão de caulim com sulfato de alumínio..... 65

4.16 – Gráfico da altura do sedimento (L) *versus* fluxo de sólidos (q_s), para suspensões sem sulfato de alumínio..... 70

4.17 – Gráfico da altura do sedimento (L) *versus* fluxo de sólidos (q_s), para suspensões com sulfato de alumínio..... 71

4.18 – Gráfico da altura do sedimento (L) *versus* fluxo de sólidos (q_s), para suspensões sem sulfato de alumínio, para o modelo Arouca 73

4.19 – Gráfico da altura do sedimento (L) *versus* fluxo de sólidos (q_s), para suspensões sem sulfato de alumínio, para o modelo Arouca 73

A.1 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 15 mg de floculante/L de suspensão..... 81

A.2 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 3 mg de floculante/L de suspensão..... 81

A.3 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 10 mg de floculante/L de suspensão..... 81

A.4 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 10 mg de floculante/L de suspensão..... 81

A.5 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 10 mg de floculante/L de suspensão..... 82

A.6 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 10 mg de floculante/L de suspensão..... 82

A.7 – Velocidade de sedimentação para pH 5,8 e 10 mg de floculante/L de suspensão..... 82

A.8 – Velocidade de sedimentação para pH 7,2 e 10 mg de floculante/L de suspensão..... 82

A.9 – Velocidade de sedimentação para pH 7,0 e 15 mg de floculante/L de suspensão..... 83

A.10 – Velocidade de sedimentação para pH 7 e 5 mg de floculante/L de suspensão..... 83

A.11 – Velocidade de sedimentação para pH 6,0 e 15 mg de floculante/L de suspensão..... 83

A.12 – Velocidade de sedimentação para pH 6,0 e 5 mg de floculante/L de suspensão..... 83

Índice de Tabelas

2.1 – Correção do expoente n em função do número de Reynolds 20

3.1 – Parâmetros do modelo RRB 32

3.2 – Planejamento Experimental 34

4.1 – Planejamento fatorial, valores codificados, valores originais e velocidade de sedimentação 43

4.2 – Resultados da regressão múltipla para a velocidade de sedimentação, com todas as variáveis e seus respectivos parâmetros e níveis de significância..... 44

4.3 – Resultados da regressão múltipla para a velocidade de sedimentação, apresentando apenas as variáveis significantes com seus respectivos parâmetros e níveis de significância..44

4.4 – Dados de concentração e velocidade obtidos através de ensaio de sedimentação em batelada, pH=6 e concentração de sulfato de alumínio igual a 0,2mg/g de sólido..... 52

4.5 – Pressão dos sólidos para o sedimento de caulim na sedimentação sem a adição de sulfato de alumínio 54

4.6 – Pressão dos sólidos para o sedimento de caulim na sedimentação com adição de sulfato de alumínio 55

4.7 – Parâmetros de ajuste do modelo de potências para a pressão nos sólidos 60

4.8 – Resultados experimentais do teste para a determinação da permeabilidade sem sulfato de alumínio..... 60

4.9 – Resultados experimentais do teste para a determinação da permeabilidade com sulfato de alumínio 61

4.10 – Parâmetros estimados para equação constitutiva de permeabilidade..... 62

4.11 – Resultados experimentais obtidos no sedimentador contínuo operando com suspensões de caulim 64

4.12 – Resultados experimentais obtidos no sedimentador contínuo operando com suspensões de caulim com sulfato de alumínio 64

4.13 – Altura do sedimento e capacidade de sedimentadores operando com suspensões aquosas de caulim 67

4.14 – Altura do sedimento e capacidade de sedimentadores operando com suspensões aquosas de caulim com sulfato de alumínio 68

Simbologia

a – parâmetro da equação constitutiva de pressão nos sólidos de Tiller e Leu (1980) .... $M^0L^0T^0$

a – parâmetro da equação de Arouca (2007) ..... $M^0L^0T^0$

A – área do sedimentador ..... $M^0L^2T^0$

b – vetor intensidade do campo ..... $M^0L^0T^0$

b – parâmetro da equação constitutiva de pressão nos sólidos ..... $M^0L^0T^0$

b – parâmetro da equação de Arouca (2007) ..... $M^0L^0T^0$

C - concentração mássica de sólido ..... $M^1L^{-3}T^0$

C_D – coeficiente de arraste ..... $M^0L^0T^0$

d - diâmetro médio das partículas ..... $M^0L^1T^0$

d_{fl} - diâmetro médio do floco ..... $M^0L^1T^0$

D' – parâmetro da Equação (3.1) ..... $M^0L^1T^0$

D - coeficiente de difusão ..... $M^0L^0T^{-1}$

g – aceleração da gravidade ..... $M^1L^{-2}T^0$

H – altura do sedimento ..... $M^0L^1T^0$

k – permeabilidade ..... $M^0L^2T^0$

k_f – grau de floculação ..... $M^0L^0T^0$

k_0 – parâmetro da Equação (3.9) ..... $M^0L^0T^0$

k_1 – parâmetro da Equação (2.28) ..... $M^0L^0T^0$

k_2 – parâmetro da Equação (2.28) ..... $M^0L^0T^0$

$\underline{l_i}$ – vetor campo de interação ..... $M^0L^0T^0$

L – altura do sedimento ..... $M^0L^1T^0$

m_s – massa de sólidos no sedimento ..... $M^1L^0T^0$

$\underline{m}$ – força resistiva ..... $M^1L^{-2}T^{-2}$

n – parâmetro da Equação (2.17) ..... $M^0L^0T^0$

n – parâmetro da Equação (3.1) ..... $M^0L^0T^0$

$\underline{n}$ - vetor normal-unitário à superfície S ..... $M^0L^0T^0$

P_i – pressão no constituinte i ..... $M^1L^{-1}T^{-2}$

P_s – pressão dos sólidos ..... $M^1L^{-1}T^{-2}$

P_s' – derivada da pressão nos sólidos ..... $M^1L^{-1}T^{-2}$

P_a – parâmetro da Equação (3.7) ..... $M^1L^{-1}T^{-2}$

P_{sc} – pressão dos sólidos crítica ..... $M^1L^{-1}T^{-2}$

Q_f – vazão de alimentação ..... $M^0L^3T^{-1}$

Q_0 – vazão de *overflow* ..... $M^0L^3T^{-1}$

Q_U – vazão de *underflow* ..... $M^0L^3T^{-1}$

q_S - fluxo de sólidos no sedimentador ..... $M^0L^1T^{-1}$

Re_∞ - número de Reynolds ..... $M^0L^0T^0$

t - tempo ..... $M^0L^0T^1$

t_R - tempo de residência dos sólidos ..... $M^0L^0T^1$

$\underline{\underline{T}}_i$ – tensor tensão no constituinte i ..... $M^1L^{-1}T^{-2}$

$\underline{\underline{T}}_i$ ' – tensor extra (parte constituinte do tensor) ..... $M^1L^{-1}T^{-2}$

u - concentração volumétrica (variável computacional) ..... $M^0L^0T^0$

u_0 - concentração volumétrica inicial (variável computacional) ..... $M^0L^0T^0$

u_c - concentração crítica (variável computacional) ..... $M^0L^0T^0$

u_D - concentração de sólido no descarte ..... $M^0L^0T^0$

u_F - concentração alimentação ..... $M^0L^0T^0$

u_L - concentração volumétrica na posição x=L (variável computacional) ..... $M^0L^0T^0$

$u_{máx}$ -concentração máxima ..... $M^0L^0T^0$

$\underline{v_i}$ – vetor velocidade do componente i da mistura ..... $M^0L^1T^{-1}$

v_f – velocidade do fluido ..... $M^0L^1T^{-1}$

$\underline{v^*}$ – velocidade relativa fluido - sólido ..... $M^0L^1T^{-1}$

v_S - velocidade de sedimentação num ensaio em batelada ..... $M^0L^1T^{-1}$

v_{S0} - velocidade inicial de sedimentação num ensaio em batelada ..... $M^0L^1T^{-1}$

$v_{t\infty}$ - velocidade terminal da partícula isolada no regime de Stokes ..... $M^0L^1T^{-1}$

V – volume da mistura ..... $M^3L^0T^0$

V_f – volume do fluido ..... $M^3L^0T^0$

V_{floc} – volume de floculante ..... $M^3L^0T^0$

V_s – volume do sólido ..... $M^3L^0T^0$

V_{sed} – volume de sedimento ..... $M^3L^0T^0$

V_T – volume total ..... $M^3L^0T^0$

x - posição ..... $M^0L^1T^0$

Y – fração de tamanhos de partículas com diâmetro inferior a d ..... $M^0L^0T^0$

z_0 - altura inicial da suspensão em um teste de proveta ..... $M^0L^1T^0$

z_i - interseção da tangente à curva de sedimentação ..... $M^0L^1T^0$

β – parâmetro da Equação (3.7) ..... $M^0L^0T^0$

β – parâmetro definido da Equação (3.14) e (3.15) ..... $M^0L^1T^{-1}$

η – parâmetro da Equação (3.9) ..... $M^0L^0T^0$

μ – viscosidade do fluido ..... $M^1L^{-1}T^{-1}$

ρ_f – densidade do fluido ..... $M^1L^{-3}T^0$

ρ_i – concentração mássica aparente de um constituinte da mistura ..... $M^1L^{-3}T^0$

ρ_{fl} – densidade do floco ..... $M^1L^{-3}T^0$

ρ_p – densidade do aglomerado de partículas ..... $M^1L^{-3}T^0$

ρ_s – densidade do sólido seco ..... $M^1L^{-3}T^0$

ρ_u – densidade da lama ..... $M^1L^{-3}T^0$

ε_f – concentração volumétrica do fluido ..... $M^0L^0T^0$

ε_i – concentração volumétrica do constituinte i ..... $M^0L^0T^0$

ε_S – concentração volumétrica do sólido ..... $M^0L^0T^0$

ε_{Sc} – concentração volumétrica de sólidos crítica ..... $M^0L^0T^0$

ε_{Sm} – concentração volumétrica de sólidos máxima ..... $M^0L^0T^0$

ε_{S0} – concentração volumétrica inicial de sólidos ..... $M^0L^0T^0$

ε_{SU} – concentração de sólidos na lama ..... $M^0L^0T^0$

ϕ – esfericidade ..... $M^0L^0T^0$

Γ- Parâmetro do modelo matemático alternativo ..... $M^0L^0T^{-1}$

Resumo

Alguns fatores podem influenciar a sedimentação de uma suspensão de partículas tais como a forma da partícula, densidade e a distribuição do tamanho. Partículas com diâmetros maiores sedimentam mais rapidamente, enquanto as partículas muito finas tendem a permanecer muito tempo em suspensão. Tendo em vista que uma forma de contornar o pequeno diâmetro das partículas é utilização de agentes floculantes, este trabalho tem como um de seus objetivos estudar o efeito da concentração de floculante e do pH da água sobre a velocidade de sedimentação. No estudo experimental foi utilizado o sulfato de alumínio como floculante para suspensões aquosas de caulim, com um polieletrólito como auxiliar de coagulação. Após testes variando a concentração de floculante pode ser observado que as velocidades de sedimentação são maiores para a concentração de floculante igual a 5 mg/L de suspensão. Já para o pH, as velocidades de sedimentação são maiores para o valor 7.

Numa segunda etapa, foram realizados testes experimentais em um sedimentador contínuo utilizando suspensões sem e com o uso de sulfato de alumínio (0,2 mg/L de suspensão). Os resultados revelaram que, conforme esperado, a concentração de sólidos no *underflow* foi maior para suspensões aquosas de caulim com sulfato de alumínio, mesmo não tendo sido observada a formação de flocos. Nessas experiências, também foi levantada a altura de sedimento produzida em operações estacionárias.

Foram realizadas experiências objetivando obter as equações constitutivas para a pressão nos sólidos bem como para a permeabilidade do sedimento e com elas efetuar simulações utilizando dois modelos matemáticos, modelo de Tiller e Chen (1988) e modelo de Arouca (2007), de modo a obter numericamente a altura final do sedimento em operações em estado estacionário, com o objetivo de comparar os resultados experimentais obtidos. Os resultados obtidos na resolução dos modelos mostraram que o modelo Tiller e Chen (1988) produziu um desvio de 39,0% do resultado experimental para suspensões sem sulfato de alumínio e de 14,3% para suspensões com sulfato de alumínio. Já o modelo Arouca (2007) resultou em valores muito próximos dos obtidos experimentalmente, com desvios menores que 3% para suspensões com e sem sulfato de alumínio.

Abstract

Some factors may influence the sedimentation of a suspension of particles such as particle shape, density and size distribution. Particles with diameters larger settle more quickly, while the very fine particles tend to remain long in suspension. Considering that one way around the small diameter of the particles is the use of flocculating agents, this work has as one of its goals to study the effect of flocculant concentration and pH of the water on the sedimentation rate. In the experimental study was used as flocculant aluminum sulfate to aqueous suspensions of kaolin, with a polyelectrolyte as a coagulation aid. After testing different concentrations of flocculant can be observed that the settling velocities are larger for the concentration of flocculant equal to 5 mg / L suspension. As for pH, settling velocities are larger for the value 7.

In a second step, experimental tests were performed in a continuous settler using suspensions with and without the use of aluminum sulfate (0.2 mg / L of suspension). The results revealed that, as expected, the concentration of solids in the underflow was greater for aqueous suspensions of kaolin with aluminum sulfate, even if not observed the formation of flakes. In these experiments, also raised the height of sediment produced in stationary operations.

Experiments were carried out aiming at obtaining the constitutive equations for the pressure in solids and to sediment permeability and they perform simulations using two mathematical models, model Tiller and Chen (1988) model and Arouca (2007), in order to get numerically the final height of the sediment in steady state operations, in order to compare the experimental results. The results obtained in the resolution of the models showed that the model Tiller and Chen (1988) produced a deviation of 39.0% in the experimental result for suspensions without aluminum sulfate and 14.3% for suspensions with aluminum sulfate. Already the model Arouca (2007) resulted in values close to those obtained experimentally, with deviations of less than 3% for suspensions with and without aluminum sulfate.

Capítulo 1
Introdução

A sedimentação é uma das operações unitárias mais utilizadas na indústria química, como por exemplo, nas indústrias de beneficiamento de minério, alimentícias, no tratamento de água, assim como, em estações de tratamento de efluente. É um processo de separação sólido-fluido baseado na diferença de densidade entre o sólido e o líquido. Pela ação da gravidade as partículas sólidas presentes em uma corrente líquida são removidas, o que oferece ao processo as características de baixo custo e grande simplicidade operacional (FRANÇA e CASQUEIRA, 2007).

Os sedimentadores são amplamente utilizados na indústria química e por isso há um crescente interesse no conhecimento do dimensionamento e operação desses equipamentos, com o fim de melhorar a utilização e eficiência no atendimento aos objetivos operacionais**.**

Uma forma de conhecer melhor estes equipamentos é utilizar modelos matemáticos para o seu projeto. Um dos pioneiros a propor um modelo matemático para a sedimentação foi Kynch, em 1952. Kynch propôs um modelo cinemático da sedimentação com base apenas no desenvolvimento da equação da conservação da massa para fase sólida. A publicação de Kynch motivou a indústria mineral a explorar essa nova teoria para o projeto de sedimentadores.

Os modelos atuais utilizam a Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo para desenvolver uma teoria fenomenológica para a sedimentação, com o uso das equações da continuidade e do movimento para os constituintes da mistura. Além da incorporação de equações constitutivas apropriadas, que devem ser obtidas empiricamente.

A sedimentação de uma suspensão aquosa de partículas ou flocos pode sofrer a influencia de fatores tais como: a natureza das partículas, distribuição de tamanhos, forma, densidade específica, propriedades químicas e mineralógicas, a quantidade de sólidos na suspensão, etc.

Partículas esféricas ou com forma aproximada à esférica têm uma maior facilidade de sedimentar do que partículas de mesmo peso com formato irregular (FRANÇA e MASSARANI, 2002). Comportamento semelhante é observado na sedimentação de partículas de maior diâmetro, diante das muito finas. Uma alternativa à irregularidade e ao pequeno diâmetro de partículas é a floculação, que promove a aglomeração das partículas resultando

em unidades maiores e com forma mais aproximada da esférica, implementando melhorias às características de sedimentação da suspensão.

Suspensões floculadas apresentam diversas características diferentes da suspensão de partículas, uma delas é a taxa de sedimentação consideravelmente maior do que a da suspensão original, devido à grande quantidade de água que o floco contém nos seus interstícios.

Os processos de floculação reúnem as melhores alternativas de atenuar a irregularidade na forma da partícula, ou ainda no seu diâmetro. Desse modo, o processo de aglomeração das partículas forma unidades maiores e de formato mais regular, que, conseqüentemente, sedimentam mais facilmente.

Alguns fatores podem influenciar na floculação, tais como a espécie e concentração de floculante, pH da água, tempo de misturas rápidas e lentas, agitação, etc.

Este trabalho tem como objetivo estudar o efeito da concentração de floculante e o pH da água na velocidade de sedimentação. Determinar experimentalmente os parâmetros das equações constitutivas para pressão nos sólidos e permeabilidade para sedimentos e utilizar modelos matemáticos para o cálculo da altura do sedimento e comparar com resultados experimentais.

Essa dissertação é constituída de cinco capítulos. No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre estudos relevantes sobre sedimentação e floculação. O Capítulo 3 apresenta os equipamentos, os materiais utilizados e a metodologia experimental aplicada no trabalho. Já o Capítulo 4 é constituído dos resultados obtidos e suas discussões e por fim no Capítulo 5 encontram-se as conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2
Revisão Bibliográfica

Este Capítulo contém trabalhos relevantes sobre a sedimentação e sobre o uso de floculantes como auxiliares na sedimentação e a evolução do tema ao longo dos anos.

2.1 – Conceitos sobre sedimentação

A sedimentação é um dos processos de separação sólido-fluido baseados na diferença entre as densidades dos constituintes de uma suspensão, a remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida se dá pela ação do campo gravitacional. Esta operação é baseada em fenômenos de transporte, onde a partícula sólida em suspensão está sujeita à ação das forças da gravidade, do empuxo e de resistência ao movimento.

Na literatura, costuma-se classificar os sedimentadores em dois tipos: os espessadores, que têm como produto de interesse o sólido e são caracterizados pela produção de espessados com alta concentração de sólidos e os clarificadores, que têm como produto de interesse o líquido e se caracterizam pela produção de espessados com baixas concentrações de sólidos. Industrialmente os espessadores são os mais utilizados e operam, geralmente, em regime contínuo (FRANÇA e MASSARANI, 2002).

Na indústria da mineração, os espessadores são largamente utilizados para as seguintes finalidades: obtenção de polpas com concentrações adequadas a um determinado processo subsequente; espessamento de rejeitos com concentração de sólidos elevada, visando transporte e descarte mais eficazes; recuperação de água para reciclo industrial; recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação utilizados em processos hidrometalúrgicos.

Os tipos de espessadores variam em função da geometria ou forma de alimentação do equipamento. Basicamente são tanques de concreto equipados com um mecanismo de raspagem, para carrear o material sedimentado até o ponto de retirada, e corresponde ao maior custo do equipamento. Os braços raspadores são acoplados à estrutura de sustentação do tubo central de alimentação da suspensão e devem ser projetados baseados no torque aplicado ao motor. Devem também ter flexibilidade para suportar diferentes volumes e tipos de cargas impostas (FRANÇA e MASSARANI, 2002).

O espessador contínuo convencional consiste em um tanque provido de um sistema de alimentação de suspensão e um de retirada do espessado (raspadores), dispositivos para descarga do *overflow* e do *underflo,* como ilustra a Figura 2.1. No espessador a alimentação

da suspensão é feita pela parte superior do equipamento. As partículas sólidas sedimentarão livremente e formarão no fundo do equipamento a região de compactação ou de espessado.

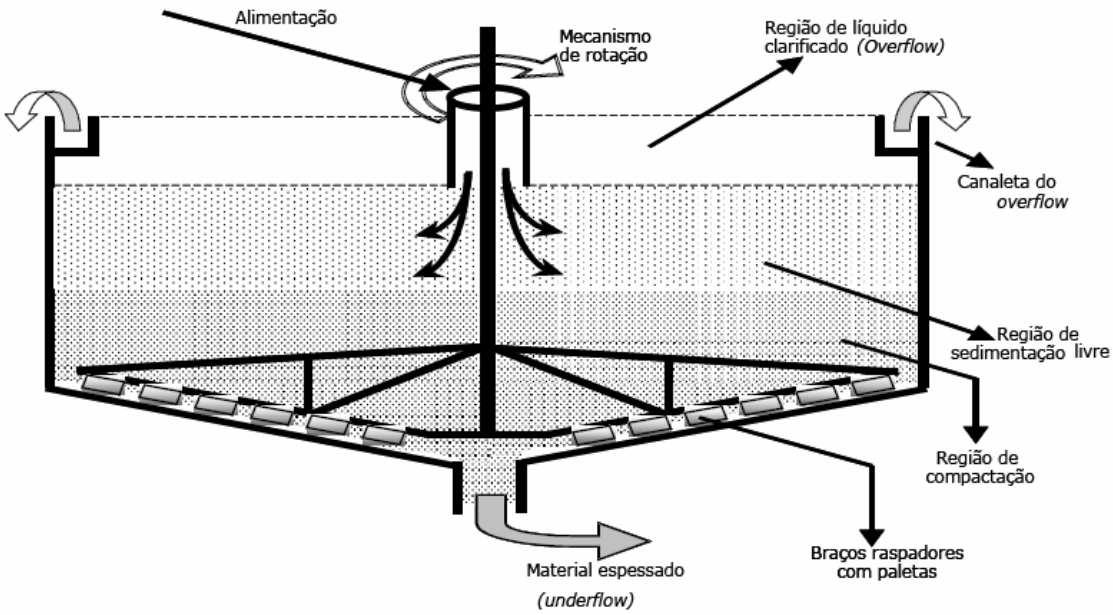


Figura 2.1 – Diagrama ilustrativo de um espessador contínuo convencional, tipo Dorr-Oliver (FRANÇA e MASSARANI, 2002).

O espessador de alta capacidade é bastante semelhante ao contínuo convencional, porém com alguma modificação estrutural de projeto - seja por meio da inserção de lamelas ou modificação no posicionamento da alimentação da suspensão, entre outras – que promove o aumento da capacidade do equipamento.

O espessador de lamelas, que também é um espessador de alta capacidade, consiste numa série de placas inclinadas (lamelas), dispostas lado a lado, formando canais. Nesses espessadores, a suspensão pode ser introduzida diretamente no compartimento de alimentação ou numa câmara de mistura e floculação. Os sólidos sedimentam sobre as lamelas e deslizam até o fundo do equipamento, formando o espessado. Devido ao tempo de residência e à baixa vibração mecânica no fundo do sedimentador, o material sedimentado sofre um adensamento e é, em seguida, bombeado.

No espessador com alimentação submersa a alimentação da suspensão é feita em um ponto interior da região de compactação. Isso elimina a necessidade da sedimentação livre das partículas sólidas, pois essas já são alimentadas num leito de lama já existente, que aprisiona

as partículas sólidas, enquanto o líquido percola o leito ascencionalmente, em direção à região de líquido clarificado (FRANÇA e MASSARANI, 2002).

2.2 – Conceitos sobre coagulação/floculação

A floculação é um processo físico que promove a aglutinação das partículas já coaguladas, em função das forças de Van Der Waals, facilitando o choque entre as mesmas devido à agitação lenta imposta ao escoamento da água. A formação dos flocos pode ocorrer de maneira espontânea, apenas pelos sucessivos choques entre as várias partículas presentes, desde que o sistema possua energia disponível para tal, decorrente da agitação dele. No entanto, uma agitação muito intensa pode fazer com que os flocos formados se desagreguem espontaneamente (PAULA, 2004). A floculação facilita a remoção por sedimentação sob ação da gravidade, flotação ou filtração.

Substâncias coagulantes são adicionadas na água com a finalidade de reduzir as forças eletrostáticas de repulsão, que mantém separadas as partículas em suspensão, as coloidais e parcela das dissolvidas. Desta forma, eliminando-se ou reduzindo-se a "barreira de energia" que impede a aproximação entre as diversas partículas presentes, criam-se condições para aglomerar as impurezas que se encontram em suspensões finais (ou em estado coloidal) e algumas que se encontram dissolvidas, em partículas maiores que possam ser removidas por decantação ou filtração (PAVANELLI, 2001).

De forma geral, a coagulação do material finamente dividido disperso em suspensões naturais é afetada por propriedades da água, tais como temperatura, alcalinidade, COT (carbono orgânico total) e pH, por parâmetros operacionais que afetam as condições hidrodinâmicas do meio, e pela presença e natureza do agente coagulante e sua dosagem. As partículas desestabilizadas pela ação do coagulante podem se agregar em flocos, por meio de mecanismos de transporte, tais como o movimento Browniano, a força da gravidade ou a convecção forçada do fluido (GUEDES, 2004).

2.3 – Fundamentos teóricos

A *Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo* tem sido utilizada com sucesso na descrição de sistemas particulados, tais como o processo de sedimentação. Tal teoria pressupõe que cada partícula de fluido numa dada região do espaço é ocupada

simultaneamente por todos os constituintes da mistura. Nela a partícula sólida perde sua identidade, comportando-se como um fluido hipotético.

Com essa teoria podemos chegar às equações que descrevem o comportamento de misturas sólido–fluido. A Equação (2.1) é a equação da conservação da massa, para um componente *i* qualquer da mistura (DAMASCENO, 1992).

$$\frac{\partial \rho_i \varepsilon_i}{\partial t} + \nabla . \rho_i \varepsilon_i \underline{v_i} = 0 \tag{2.1}$$

sendo que ρ_i é a densidade do componente i, ε_i a concentração volumétrica do constituinte i e $\underline{v_i}$ o vetor velocidade do componente *i* da mistura.

Para que exista uma modificação da quantidade de movimento é preciso que ocorra um desbalanceamento entre as forças. Desse modo a Equação (2.2) é a equação da conservação da quantidade de movimento para o componente *i* da mistura, ou simplesmente equação do movimento para o componente *i* da mistura.

$$\rho_i \varepsilon_i \left[\frac{\partial \underline{\mathrm{v}}_i}{\partial t} + \underline{\mathrm{v}}_i \cdot \nabla \underline{\mathrm{v}}_i \right] = \rho_i \varepsilon_i \underline{b} - \nabla \cdot \underline{\underline{\mathrm{T}}}_i + \rho_i \varepsilon_i \underline{l_i} \tag{2.2}$$

sendo que $\underline{b}$ o vetor intensidade do campo, $\underline{\underline{\mathrm{T}}}_i$ o tensor tensão no constituinte *i e* $\underline{l_i}$ o vetor campo de interação.

As equações citadas anteriormente podem ser utilizadas para descrever o comportamento de misturas sólido–fluido. Abaixo temos a equação da continuidade para o fluido e para o sólido, respectivamente Equações (2.3) e (2.4).

$$\frac{\partial \rho_f \varepsilon_f}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_f \varepsilon_f \underline{\mathrm{v}}_f = 0 \tag{2.3}$$

$$\frac{\partial \rho_s \varepsilon_s}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_s \varepsilon_s \underline{\mathrm{v}}_s = 0 \tag{2.4}$$

em que os subscritos *f* e *s* referem-se ao fluido e sólido, respectivamente.

Para completar a análise do sistema sólido - líquido temos as equações do movimento para os componentes fluido e sólido, Equações (2.5) e (2.6), respectivamente.

$$\rho_f \varepsilon_f \left[\frac{\partial \underline{\mathrm{v}}_f}{\partial t} + \underline{\mathrm{v}}_f \cdot \nabla \underline{\mathrm{v}}_f \right] = \rho_f \varepsilon_f \underline{b} - \nabla \cdot \underline{\underline{\mathrm{T}}}_f + \rho_f \varepsilon_f \underline{l_f} \tag{2.5}$$

$$\rho_s \varepsilon_s \left[\frac{\partial \underline{\mathrm{v}}_s}{\partial t} + \underline{\mathrm{v}}_s \cdot \nabla \underline{\mathrm{v}}_s \right] = \rho_s \varepsilon_s \underline{b} - \nabla \cdot \underline{\underline{\mathrm{T}}}_s + \rho_s \varepsilon_s \underline{l_s} \tag{2.6}$$

Para o caso de sistemas sólido-líquido é comum desdobrar-se a força de interação em duas parcelas:

$$\rho_f \varepsilon_f \underline{l_f} = -\left[\underline{m} - \rho_l (1-\varepsilon_l)\underline{b}\right] \tag{2.7}$$

sendo que $\underline{m}$ é a força resistiva, que representa a força exercida pelo fluido sobre o sólido (matriz porosa) a menos da força de empuxo. Assim, uma vez que a soma das forças de interação sólido-fluido e fluido-sólido deve ser nula,

$$\sum_i \rho_i \varepsilon_i \underline{l_i} = \rho_s \varepsilon_s \underline{l_s} + \rho_f \varepsilon_f \underline{l_f} = 0 \tag{2.8}$$

chega-se às equações do movimento em suas formas mais usuais:

$$\rho_f \varepsilon_f \left[\frac{\partial \underline{v}_f}{\partial t} + \underline{v}_f \cdot \nabla \underline{v}_f\right] = \rho_f \varepsilon_f \underline{b} - \nabla \cdot \underline{\underline{T}}_f + \rho_f \varepsilon_f \underline{l_f} \tag{2.9}$$

$$\rho_s \varepsilon_s \left[\frac{\partial \underline{v}_s}{\partial t} + \underline{v}_s \cdot \nabla \underline{v}_s\right] = -\nabla \cdot \underline{\underline{T}}_s + \underline{m} + \left(\rho_s - \rho_f\right)\varepsilon_s \underline{b} \tag{2.10}$$

sendo T_f e T_s representam os tensores tensão no fluido e no sólido. A força resistiva m pode ser dada pela Equação de Darcy (MASSARANI, 1989) para a sedimentação de partículas pequenas:

$$\underline{m} = \frac{\mu \varepsilon_f}{k(\varepsilon_f)}(\underline{v}_f - \underline{v}_s) \tag{2.11}$$

sendo μ a viscosidade do fluido e k a permeabilidade do meio poroso.

Os tensores tensão podem ser escritos na seguinte forma (D'ÁVILA e SAMPAIO, 1976):

$$\underline{\underline{T}}_i = P_i \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{T}}' i \tag{2.12}$$

sendo que a parcela $P_i \underline{\underline{I}}$ representa a parcela estática do tensor tensão e o tensor $\underline{\underline{T_i}}'$ representa a sua parte dinâmica.

Se a tensão extra no constituinte da mistura depende apenas da porosidade do meio, então o tensor tensão total possui apenas componentes normais à superfície de contato, que dependem apenas da porosidade, isto é:

$$\underline{\underline{T}}_i\left(\varepsilon_f\right) = P_i\left(\varepsilon_f\right)\underline{\underline{I}}; \tag{2.13}$$

em que ε_f é a concentração volumétrica de fluido ou porosidade.

Considerando um meio poroso, P_s representa o peso a menos das forças de empuxo e resistiva de uma camada superior de sólidos sobre uma camada imediatamente inferior.

A expressão matemática para P_s fornece informações úteis relativas à compressibilidade do sedimento.

A modelagem de sistemas sólido-fluido pode ser efetuada formulando hipóteses constitutivas para a permeabilidade e para a pressão nos sólidos e resolvendo simultaneamente as equações da continuidade e do movimento para os componentes sólido e fluido.

2.3.1 – Modelagem do espessamento contínuo

Utilizando equações da conservação da massa e do movimento, para um componente qualquer da mistura é possível obter modelos matemáticos de espessadores contínuos operando em estado estacionário. Nesta seção serão apresentados dois modelos matemáticos para a sedimentação contínua.

Os espessadores utilizados nas indústrias a base do equipamento é cônica para facilitar a retirada da lama. No entanto, para fins de modelagem, aqui o espessador apresenta fundo chato, como mostra a Figura 2.2.

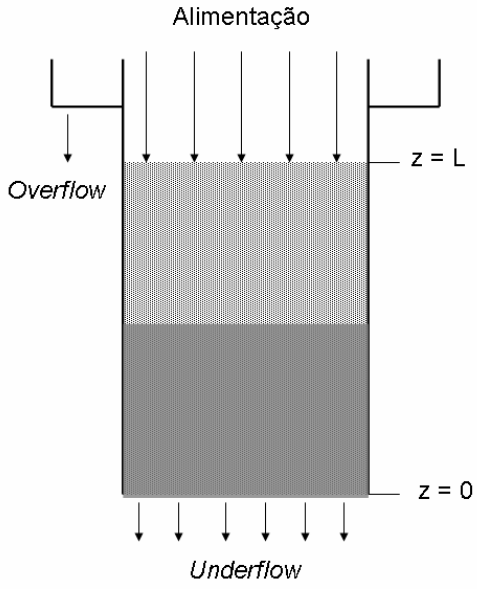


Figura 2.2 – Vista esquemática de um sedimentador convencional.

2.3.1.1 – O modelo de Tiller e Chen (1988)

No modelo de Tiller e Chen (1988) as características do sedimento foram levadas em consideração no projeto de sedimentadores que operam com suspensões floculentas e que produzem depósitos compressíveis. Tiller e Chen (1988) propuseram um modelo físico para descrever a sedimentação contínua baseados na teoria simplificada da filtração e nas seguintes hipóteses:

- A operação é unidimensional e estacionária;
- Os constituintes da mistura são incompressíveis;
- Os tensores tensões são função apenas da porosidade local;
- O escoamento através do sedimento ocorre em regime de Darcy;
- Na retirada da lama tem-se $v_f = v_s$;
- Os termos de aceleração são desprezíveis nas equações do movimento.

Consideradas as hipóteses adotadas, pode-se escrever as equações que descrevem o processo:

$$\frac{d\left(\varepsilon_f v_f\right)}{dz} = 0, q_f = \varepsilon_f v_f = cte_1 \tag{2.14}$$

$$\frac{d\left(1-\varepsilon_f\right) v_s}{dz} = 0, q_s = 1-\varepsilon_f = cte2 \tag{2.15}$$

$$-\frac{dP_f}{dz} - \frac{\mu\varepsilon_f}{k\left(\varepsilon_f\right)}\left(v_f - v_s\right) + \rho_f g = 0 \tag{2.16}$$

$$-\frac{dP_s}{dz} + \frac{\mu\varepsilon_f}{k\left(\varepsilon_f\right)}\left(v_f - v_s\right) + \left(\rho_s - \rho f\right)\left(1-\varepsilon_f\right) g = 0 \tag{2.17}$$

Para determinar os perfis de velocidades e a distribuição de porosidade na região de compressão é necessário resolver um sistema constituído pelas Equações de (2.14) a (2.17) considerando as devidas hipóteses constitutivas para a pressão e permeabilidade.

A substituição das Equações (2.14) e (2.15) na Equação (2.17) leva a:

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{\mu\varepsilon_f}{k\left(\varepsilon_f\right)}\left(\frac{q_f}{\varepsilon_f} - \frac{q_s}{\left(1-\varepsilon_f\right)}\right) + \left(\rho_s - \rho f\right)\left(1-\varepsilon_f\right) g \tag{2.18}$$

Devido a hipótese que $v_f = v_s$, pode-se escrever:

$$\left(\frac{q_f}{q_s}\right)_U = \left(\frac{\varepsilon_f}{1-\varepsilon_f}\right)_U \tag{2.19}$$

como em regime estacionário q_f e q_s são constantes, pode-se generalizar a equação anterior de modo a obter:

$$\frac{q_f}{q_s} = \left(\frac{\varepsilon_f}{1-\varepsilon_f}\right)_u = \frac{\varepsilon_{fu}}{1-\varepsilon_{fu}} \tag{2.20}$$

A substituição da Equação (2.20) na (2.18) produz finalmente a equação diferencial que descreve o fenômeno da compressão do sedimento:

$$\frac{dP_s}{dz} = (\rho_s - \rho f)\varepsilon_s g - \frac{\mu q_s}{k(\varepsilon_s)}\left(\frac{1}{\varepsilon_s} - \frac{1}{\varepsilon_{su}}\right) \tag{2.21}$$

As condições iniciais necessárias para resolução do problema são:

$\varepsilon_s\ (z = L) = \varepsilon_{s0}$

$\varepsilon_s\ (z = 0) = \varepsilon_{sU}$

sendo ε_{s0} a concentração de sólidos na superfície livre do sedimento e ε_{sU} a concentração na base do sedimentador, ou seja, concentração de sólidos na lama.

Deve-se formular hipóteses constitutivas para Ps e k para se resolver a Equação (2.21). Tiller e Chen (1988) admitiram que tanto a permeabilidade quanto a pressão nos sólidos são função da concentração local. Assim a Equação (2.21) se reduz a:

$$\frac{dz}{d\varepsilon_s} = \frac{\dfrac{dP_s}{d\varepsilon_s}}{\left((\rho_s - \rho_f)\varepsilon_s g - \dfrac{\mu q_s}{k(\varepsilon_s)}\left(\dfrac{1}{\varepsilon_s} - \dfrac{1}{\varepsilon_{sU}}\right)\right)} \tag{2.22}$$

sendo P_s a pressão dos sólidos, μ a viscosidade do fluido, k a permeabilidade do meio poroso, ε_s a concentração volumétrica de sólidos, g a aceleração da gravidade, ρ_s e ρ_f são as densidades do sólido e fluido e q_s o fluxo volumétrico de sólido.

Com alguns dados operacionais como a concentração da lama e vazão de alimentação e retirada da lama é possível calcular a altura da região de compactação utilizando a equação:

$$L = \int_0^{P_{sU}} \frac{dP_s}{(\rho_s - \rho_f)\varepsilon_s g - \frac{\mu q_s}{k}\left(\frac{1}{\varepsilon_s} - \frac{1}{\varepsilon_{su}}\right)} \tag{2.23}$$

deve-se formular hipóteses constitutivas para pressão nos sólidos e permeabilidade e integrar de ε_s a ε_{su} para fornecer a altura do sedimento (L).

Quando se plota a altura do sedimento (L) com o fluxo de sólidos (q_s), como mostra a Figura 2.3, percebe-se a existência de duas assíntotas: uma horizontal, para baixos valores de fluxo, e uma vertical que ocorre quando o fluxo atinge o seu valor máximo.

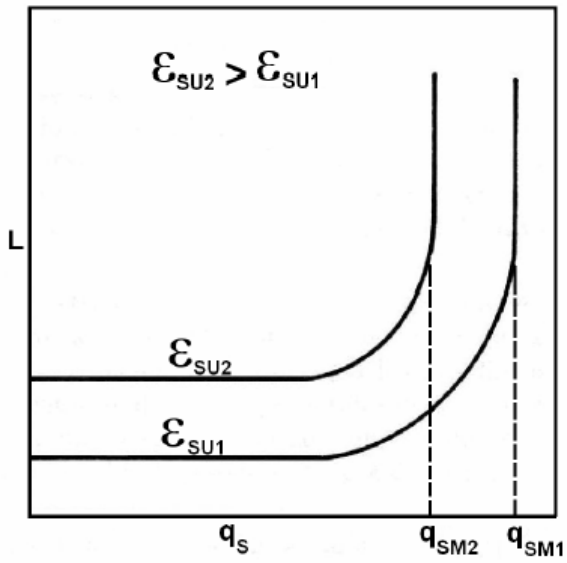


Figura 2.3 – Altura do sedimento em função do fluxo de sólidos em um espessador contínuo.

O sedimentador pode operar em regime permanente apenas em uma faixa de fluxo de sólidos menor que q_{SM}, que é o fluxo que exigiria uma altura de sedimento infinita para alcançar a concentração de lama desejada.

2.3.1.2 – Modelo Matemático de Arouca (2007) para o caso da Sedimentação Contínua

Azevedo (2009) adaptou o modelo matemático alternativo para a sedimentação em batelada proposto por Arouca (2007) de modo a ser aplicado ao fenômeno da sedimentação contínua.

O desenvolvimento de tal modelo parte das equações da continuidade para os constituintes sólido e líquido e do movimento para o constituinte sólido, através da Teoria da Mecânica do Contínuo, as equações são:

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_s v_s}{\partial z} = 0 \tag{2.24}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_f}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_f v_f}{\partial z} = 0 \tag{2.25}$$

$$\rho_s \varepsilon_s \left(\frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P_s}{\partial z} + \frac{\mu(1-\varepsilon_s)}{k}\left(v_f - v_s\right) - \Delta\rho \varepsilon_s g \tag{2.26}$$

Este modelo era sujeito às seguintes hipóteses simplificadoras durante o desenvolvimento do equacionamento:

- O escoamento em meio poroso é lento e o constituinte sólido descreve um movimento de compressão unidimensional;
- Não ocorre transferência de massa entre os constituintes da mistura;
- Os tensores tensões nos constituintes sólido e líquido são funções exclusivas da porosidade do meio;
- Os efeitos de parede são desprezíveis;
- O único campo de forças atuante no sistema é o campo de força gravitacional.

Damasceno (1992) mostrou através de seu trabalho, que os termos inerciais da equação do movimento, Equação (2.26), podem ser desprezados, ou seja:

$$\frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial z} \approx 0 \tag{2.27}$$

Portanto, a Equação (2.26) pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = \frac{\mu(1-\varepsilon_s)}{k}\left(v_f - v_s\right) - \Delta\rho \varepsilon_s g \tag{2.28}$$

Somando-se as Equações (2.24) e (2.25) tem-se:

$$\frac{\partial\left(\varepsilon_s + \varepsilon_f\right)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\varepsilon_s v_s + \varepsilon_f v_f\right)}{\partial z} = 0 \tag{2.29}$$

Sabendo-se que por definição:

$$q = \varepsilon_s v_s + \varepsilon_f v_f \tag{2.31}$$

e que a relação entre as frações volumétricas é dada pela Equação (2.32):

$$\varepsilon_s + \varepsilon_f = 1 \tag{2.32}$$

Substituindo-se a Equação (2.32) na Equação (2.31) obtém-se:

$$q = \varepsilon_s v_s + (1 - \varepsilon_s) v_f \tag{2.33}$$

Isolando-se v_f na equação acima:

$$v_f = \frac{q}{(1-\varepsilon_s)} - \frac{\varepsilon_s v_s}{(1-\varepsilon_s)} \tag{2.34}$$

Subtraindo-se v_s de v_f na Equação (2.34) e substituindo na Equação (2.28) e realizando-se as devidas manipulações,

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = \frac{\mu(1-\varepsilon_s)}{k}\left(\frac{q - v_s}{(1-\varepsilon_s)}\right) - \Delta\rho\varepsilon_s g \tag{2.35}$$

Portanto:

$$\left[\frac{\partial P_s}{\partial z} + \Delta\rho\varepsilon_s g\right] = \frac{\mu}{k}(q - v_s) \tag{2.36}$$

A Equação (2.36) pode ser reescrita, isolando-se a velocidade intersticial dos sólidos, na seguinte forma:

$$v_s = q - \frac{\Delta\rho\varepsilon_s g k}{\mu}\left[1 + \frac{1}{\Delta\rho\varepsilon_s g}\frac{\partial P_s}{\partial z}\right] \tag{2.37}$$

Pela regra da cadeia é correto escrever que:

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = \frac{dP_s}{d\varepsilon_s}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} = P_s^{'}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \tag{2.38}$$

que, ao ser substituída na Equação (2.37) produz:

$$v_s = q - \frac{\Delta\rho\varepsilon_s g k}{\mu}\left[1 + \frac{P_s^{'}}{\Delta\rho\varepsilon_s g}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z}\right] \tag{2.39}$$

Multiplicando-se ambos os membros da Equação (2.39) pela variável ε_s, que ao ser substituída na Equação da Continuidade para o constituinte sólido, Equação (2.24), e fazendo-se as devidas manipulações algébricas resulta:

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\left[q\varepsilon_s - \frac{\Delta\rho g k {\varepsilon_s}^2}{\mu}\left(1 + \frac{P_s^{'}}{\Delta\rho g \varepsilon_s}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z}\right)\right] = 0 \tag{2.40}$$

ou ainda, fazendo-se a adimensionalização da variável espacial, $x = z/L$, e rearranjando-se os termos da Equação (2.40):

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \frac{1}{L}\frac{\partial}{\partial x}\left[q\varepsilon_s - \frac{\Delta\rho g k {\varepsilon_s}^2}{\mu} - \frac{k P_s^{'} \varepsilon_s}{L\mu}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x}\right] = 0 \tag{2.41}$$

Introduzindo-se a função $\Gamma(\varepsilon_s)$ dada pela Equação (2.42):

$$\Gamma(\varepsilon_s) = \frac{\Delta\rho g k {\varepsilon_s}^2}{\mu} \tag{2.42}$$

e definindo-se o coeficiente de difusão $D(\varepsilon_s)$ como sendo:

$$D(\varepsilon_s) = \frac{k P_s^{'} \varepsilon_s}{\mu} \tag{2.43}$$

Introduzindo-se a função $A(\varepsilon_s)$ como sendo:

$$A(\varepsilon_s) = q\varepsilon_s - \Gamma(\varepsilon_s) = \varepsilon_s q - \frac{\Delta\rho g k {\varepsilon_s}^2}{\mu} \tag{2.44}$$

Pela regra da cadeia é correto escrever que:

$$\frac{\partial A(\varepsilon_s)}{\partial x} = \frac{dA}{d\varepsilon_s}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} = A^{'}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} \tag{2.45}$$

$$\frac{\partial D(\varepsilon_s)}{\partial x} = \frac{dD}{d\varepsilon_s}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} = D^{'}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} \tag{2.46}$$

Então o modelo matemático para a sedimentação contínua proposto no trabalho de Azevedo (2009) resulta na seguinte equação:

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + A^{'}\frac{1}{L}\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} - \frac{1}{L^2}\left[D(\varepsilon_s)\frac{\partial^2 \varepsilon_s}{\partial x^2} + D^{'}\left(\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x}\right)^2\right] = 0 \tag{2.47}$$

A Equação (2.47) é válida no domínio $0 \le t \le T$ e $0 \le x \le 1$, no qual $x = z/L$, com L representando a altura da coluna da mistura e T o tempo final de sedimentação. Sendo assim, para que tal expressão possa ser resolvida para todo o domínio do problema, basta-se especificar equações constitutivas para a pressão nos sólidos, $P_s = P_s(\varepsilon_s)$, e a permeabilidade do meio poroso, $k_s = k_s(\varepsilon_s)$, em cada região específica do fenômeno.

Para a resolução do problema faz-se uso da seguinte condição inicial:

$$\varepsilon_s(x,t=0) = \varepsilon_{so}(x) \tag{2.48}$$

e condições de contorno, em $x = 0$, resultando em:

$$\left.\frac{\partial P_s}{\partial x}\right|_{x=0} = \frac{\mu L}{k}(q - v_s) - L\Delta\rho g\varepsilon_s \tag{2.49}$$

$$\left.\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x}\right|_{x=0} = \frac{\mu L}{P_s' k}(q - v_s) - \frac{L\Delta\rho g\varepsilon_s}{P_s'} \tag{2.50}$$

Na condição de contorno $x = 1 (z = L)$:

$$\varepsilon_s(x=1) = \varepsilon_{sF}(t) \tag{2.51}$$

A fim de simplificar a representação das variáveis nas equações utilizou-se a variável computacional u para denotar a concentração volumétrica dos sólidos ε_s, sendo $u = \varepsilon_s (xL,t)$.

As funções $A(u)$ e $D(u)$ são expressas por:

$$A(u) = qu - \Gamma(u) = uq - \frac{\Delta\rho g k u^2}{\mu} \tag{2.52}$$

$$D(u) = \frac{kP_s' u}{\mu} \tag{2.53}$$

e definindo:

$$C(u) = \int_0^u D(s)dS \tag{2.54}$$

Adimensionalizando $\tau = t/T$ tem-se que:

$$\frac{1}{T}\frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{1}{L}\frac{\partial}{\partial x}A(u) - \frac{1}{L^2}\frac{\partial^2 C(u)}{\partial x^2} = 0 \tag{2.55}$$

2.3.1.3 – Simulação numérica do modelo de Arouca (2007) proposto para a sedimentação contínua no estado estacionário

Considera-se que o sedimentador é alimentado com uma suspensão de concentração constante tal que a densidade de fluxo de sólido na alimentação é $A_F(t) = qu_F(t)+\Gamma(u_F(t))$ e que a concentração de descarte pretendida u_D é conhecida à priori, de tal modo que a densidade de fluxo de sólido na descarga é $A_D = qu_D$. Sabe-se que no estado estacionário o fluxo de descarga tem que ser igual ao o fluxo de alimentação, $A_F = A_D$, que conduz a uma equação a partir da qual a concentração u_F para $z = L$ pode ser calculada:

$$qu_F + \Gamma(u_F) = qu_D \tag{2.56}$$

A condição para a existência do estado estacionário pode ser obtida considerando a solução da Equação (2.55) independente do tempo, isto é, da equação diferencial ordinária:

$$\frac{1}{L}\left[q\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \Gamma(u)}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial x}\right] = \frac{1}{L^2}\frac{\partial^2 C(u)}{\partial x^2} \tag{2.57}$$

Uma vez que a concentração de descarte pretendida u_D é dada na condição de contorno em $z = 0$, verifica-se que a constante de integração é igual à $c = qu_D$. O perfil de concentração na região de compressão resulta na solução do problema de valor inicial:

$$\frac{du}{dx} = L\left[\frac{qu(x) + \Gamma(u(x)) - qu_D}{D(u(x))}\right], x>0 \tag{2.58}$$

$$u(0) = u_D \tag{2.59}$$

A Equação é integrada até a concentração crítica, u_c, ou seja, até alcançar a altura, z_c, denotando o nível do sedimento.

Para ocorrer à sedimentação, $\frac{\partial u}{\partial x} \leq 0$ e a condição:

$$qu_F + \Gamma(u_F) \leq qu_D \tag{2.60}$$

devem ser satisfeitas, de modo que o lado direito da Equação (2.60) seja não positivo. Se a função fluxo possui um máximo local em $u = u_M$, então a condição $u_c < u_D < u_{Dmáx}$ sendo $u_{Dmáx}$ obtido por:

$$qu_M + \Gamma(u_M) = qu_{Dmáx} \tag{2.61}$$

deve ser satisfeita. No caso de uma função densidade de fluxo monotonicamente decrescente, $u_{Dmáx}$ é dada por:

$$qu_c + \Gamma(u_c) = qu_{Dmáx} \tag{2.62}$$

O valor em $z = L$, na alimentação, é obtido pela resolução da equação:

$$qu_F + \Gamma(u_F) = qu_{Dmáx}\text{ , } u_L < u_M \tag{2.63}$$

para u_L.

2.4 – Trabalhos relevantes na área

A sedimentação vem sendo citada por vários autores com intuito de aperfeiçoar as técnicas utilizadas para os cálculos da capacidade do sedimentadores e tornar o processo mais eficiente. Neste tópico serão apresentados os trabalhos que mostram a evolução da sedimentação ao longo dos anos e que contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

Um dos trabalhos pioneiros na área de sedimentação foi o de Coe e Clevenger (1916), citado por Silva (2004), que propuseram uma metodologia para o projeto de sedimentadores baseada em ensaios em batelada para diversas concentrações iniciais variando entre as concentrações da alimentação e da lama. Para cada ponto (ε_s, v_s) obtidos na curva de sedimentação calculava-se a capacidade do sedimentador através da Equação (2.64):

$$q_S = \frac{v_{so}}{\frac{1}{\varepsilon_s} - \frac{1}{\varepsilon_{su}}} \tag{2.64}$$

sendo q_S o fluxo de sólidos no sedimentador, v_{so} é a velocidade de sedimentação num ensaio em batelada em concentração ε_s e ε_{su} é a concentração de lama desejada. A capacidade do projeto era o menor valor dentre os encontrados para todas as concentrações testadas.

Somente em 1952, Kynch desenvolveu uma teoria simplificada para descrever o fenômeno da sedimentação em batelada. Ele propôs um modelo matemático para a sedimentação em batelada, com base na equação da continuidade para o sólido, o que reduziu para um o número de ensaios em proveta necessários para o projeto de sedimentadores. A sua utilização para o projeto de sedimentadores que operem com suspensões que produzem sedimento com pequenos graus de compressibilidade produz resultados aceitáveis.

A teoria de Kynch admite as seguintes hipóteses: a sedimentação é unidimensional, a concentração aumenta no fundo do recipiente, a velocidade de sedimentação tende a zero quando a concentração tende a um valor máximo, a velocidade de sedimentação depende apenas da concentração de sólidos e os efeitos de parede não são considerados.

O modelo de Kynch baseia-se na equação da continuidade em sua forma unidimensional. Sua teoria prevê a propagação de ondas de concentração, denominadas características, do fundo do recipiente até a interface superior. A velocidade de propagação dessas ondas de concentração só depende da concentração local. Kynch mostrou através do estudo da estabilidade de descontinuidades da concentração que a velocidade de propagação diminui com o aumento da concentração do sólido.

A teoria de Kynch indica a existência de quatros regiões distintas durante o processo de sedimentação. Elas são mostradas na Figura 2.4, que representa o andamento do processo de sedimentação em provetas e a curva de sedimentação, para as seguintes regiões:

1- Região clarificada, sendo $\varepsilon_s = 0$;

2 - Região em que a velocidade de sedimentação é constante e $\varepsilon_s = \varepsilon_{so}$;

3 - Região onde a velocidade de sedimentação é decrescente e a concentração varia de ε_{so} a ε_{sm} ;

4 - Região do sedimento incompressível, onde a velocidade de sedimentação é nula e a concentração é constante igual a ε_{sm}.

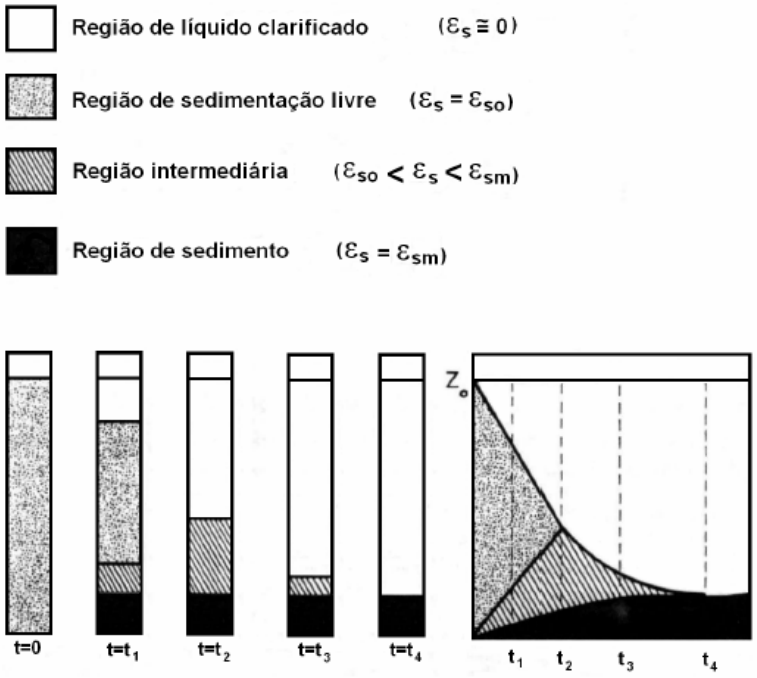


Figura 2.4 - O processo de sedimentação segundo a teoria de Kynch (DAMASCENO, 1992).

Apesar do trabalho de Kynch tratar apenas da sedimentação em batelada, pôde-se utilizar seus resultados para o projeto de sedimentadores contínuos uma vez que nele foi proposto uma forma de calcular a concentração da interface superior em função do tempo de ensaio.

Para o cálculo da concentração total de sólido na interface superior utiliza-se a Equação (2.65):

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{so} z_o}{z_i} \tag{2.65}$$

sendo z_i a interseção da tangente à curva de sedimentação, no tempo em questão, com a reta *t=0*.

A velocidade de sedimentação dos sólidos localizados na interface superior pode ser determinada através da equação:

$$v_s = -\frac{d_z}{dt} = \frac{z_i - z}{t} \tag{2.66}$$

A Figura 2.5 mostra a interpretação gráfica dos resultados obtidos por Kynch.

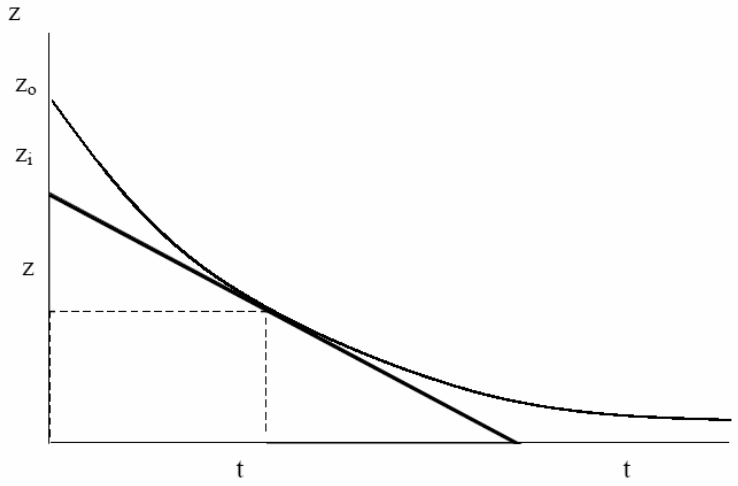


Figura 2.5 – Determinação gráfica da concentração e da velocidade de sedimentação através da teoria de Kynch.

Para cada ponto (ε_s, v_s) obtidos na curva de sedimentação calcula-se a capacidade do sedimentador através de uma expressão semelhante à Equação (2.64) e adota-se o menor valor como sendo a capacidade do projeto.

Para o cálculo da densidade e diâmetro médio do floco (ρ_{fl}, d_{fl}), Michaels e Bolger (1962) apresentaram uma metodologia, baseada em ensaios de sedimentação em batelada a diferentes concentrações. A partir desses ensaios são obtidos os pares de concentração inicial da suspensão e velocidade de sedimentação dos flocos (C, v_s), para obtenção dos parâmetros grau de floculação k_f e velocidade terminal da partícula isolada no regime de Stokes $v_{t\infty}$ que melhor se ajustam à Equação (2.67):

$$v_s = v_{t\infty}(1 - k_f C)^n \tag{2.67}$$

O valor do coeficiente n na Equação (2.67) é dado em função do número de Reynolds, Equação (2.68), pelos valores da Tabela 2.1.

$$\mathrm{Re}_\infty = \frac{\rho v_{t\infty} d_{fl}}{\mu} \tag{2.68}$$

Tabela 2.1 – Correção do expoente *n* em função do número de Reynolds.

Re_∞	$Re_\infty < 0,2$	$0,2 < Re_\infty < 1$	$1 < Re_\infty < 500$	$Re_\infty > 500$
n	4,65	$4,35\ Re_\infty^{-0,03}$	$4,45\ Re_\infty^{-0,1}$	2,39

A densidade e o diâmetro médio do floco são obtidos pelas Equações (2.69) e (2.70):

$$\rho_{fl} - \rho = \frac{\rho_s - \rho}{k_f \rho_s} \tag{2.69}$$

$$v_{t\infty} = \frac{{d_{fl}}^2 (\rho_{fl} - \rho) g}{18\mu} \tag{2.70}$$

sendo que ρ_s a densidade do sólido seco, ρ a densidade do fluido, μ a viscosidade do fluido e g a aceleração da gravidade. Esta metodologia pode ser aplicada para suspensões diluídas, cuja concentração varie entre 0,006 e 0,05 g sólido/cm^3 da suspensão (SCOTT, 1968).

No caso de operações com suspensões que levam à formação de sedimentos compressíveis Adorján (1975, 1976) mostrou que o sedimentador podia ser melhor projetado com o auxílio de ensaios de adensamento em célula de compressão e permeabilidade. Esta metodologia incluiu na equação da conservação da quantidade de movimento as forças de "resistência compressível" e "resistência específica" associadas, respectivamente, à tensão nos sólidos e à força resistiva sólido-fluido da *Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo.* Adorján foi o primeiro a demonstrar, através de seu modelo, a influência da altura do sedimento sobre o projeto, indicando que existe uma faixa limitada de capacidades na qual o sedimentador pode operar, o que o levou a definir um fator de carga.

Em 1980, Tiller e Leu propuseram equações constitutivas para pressão nos sólidos e para permeabilidade, e apresentaram uma metodologia gráfica simples para a determinação dos parâmetros envolvidos nas equações sugeridas. Indicaram, ainda, uma maneira de determinar os parâmetros das equações constitutivas a partir de dados de porosidade e permeabilidade médias.

Já em 1988, Tiller e Chen propuseram um modelo matemático para a sedimentação continua em estado estacionário que prevê a existência de uma faixa operacional para a capacidade do sedimentador, citada por Adorján (1976). A resolução numérica desse modelo

confirmou as conclusões de Adorján, com relação à existência de uma faixa operacional para a capacidade de sedimentadores.

Damasceno e Massarani (1990) efetuaram um estudo experimental sobre o projeto de sedimentadores pelo método de Kynch (1952). Tomando por base ensaios de sedimentação em proveta com diversas alturas de coluna de suspensão, calcularam o diâmetro de sedimentadores para produzir diversas concentrações de lama. Seus resultados demonstraram que o valor calculado para o diâmetro depende da altura da coluna de suspensão, principalmente para os casos de alta concentração de lama. Estes autores presumiram que tal fato ocorre devido a não consideração da região de sedimento pela teoria de Kynch e inferiram que o uso do método de Kynch (1952) só deve ser indicado ao projeto de sedimentadores que devem produzir lamas muito diluídas, para as quais o sedimento não está presente, como no caso de clarificadores. Além disso, verificaram que, para o projeto de sedimentadores utilizando este método, deve-se realizar um ensaio de sedimentação em proveta, cuja altura da coluna de suspensão seja igual à altura do sedimentador.

Em 1991, Damasceno *et al.* modelaram a operação não estacionária de espessadores considerando, ao contrário de Tiller e Chen (1988), os termos de aceleração da equação de movimento para sólidos. Na modelagem de espessadores, no estado estacionário, foram consideradas as seguintes hipóteses: a operação é isotérmica, unidimensional em estado estacionário, prevalece o regime de escoamento de Darcy, a viscosidade do fluido e as densidades dos componentes fluido e sólido são constantes e a tensão no sólido é função apenas da porosidade local. Nessas condições foi possível chegar a Equação (2.71), para o cálculo da altura de compactação do sedimento (L):

$$L = \int_0^{P_{sU}} \frac{\left[1 - \rho_s \left(\frac{q_s}{\varepsilon_s}\right)^2 \frac{d\varepsilon_s}{dP_s}\right] dP_s}{\left(\rho_s - \rho_f\right)\varepsilon_s g - \frac{\mu q_s}{k}\left(\frac{1}{\varepsilon_s} - \frac{1}{\varepsilon_{su}}\right)} \tag{2.71}$$

sendo $P_{sU} = P_s(\varepsilon_{sU})$, P_s a pressão dos sólidos, μ a viscosidade do fluido, k a permeabilidade do meio poroso, ε_s a concentração volumétrica de sólidos, g a aceleração da gravidade, ρ_s e ρ_f são as densidades do sólido e fluido e q_s o fluxo volumétrico de sólido.

A resolução desta equação para diversos valores de q_s e ε_s permite estabelecer a relação entre estas variáveis e a altura de compactação do sólido (L), na operação de

sedimentação de espessadores em regime permanente. Para isto é necessário também conhecer o perfil de pressão nos sólidos e da permeabilidade do sedimento.

Assim foram simuladas a entrada em operação e a mudança entre estados estacionários. Os resultados deste trabalho mostraram que os efeitos inerciais sobre os sólidos são absolutamente desprezíveis, no caso de espessamento, havendo pequenas flutuações entre os resultados para os quais foram considerados ou não termos inerciais.

Já em 1992, Damasceno desenvolveu um modelo matemático baseado na Teoria da Mecânica do Contínuo, para equacionar o problema do espessamento contínuo. Propôs uma metodologia para a caracterização de sedimentos, com base na utilização da técnica de atenuação de raios gama e desenvolveu equações constitutivas para a tensão nos sólidos e permeabilidade do sedimento para algumas suspensões, admitindo que essas variáveis dependiam apenas da porosidade local. Obtidas as equações constitutivas, foram efetuadas simulações das operações de espessadores em regimes permanente e transiente, que demonstraram que esses equipamentos apresentam um grande tempo de resposta a alterações nas condições operacionais. Verificou-se que ciclos operacionais não estacionários podem ser idealizados para os espessadores considerando alterações periódicas de carga.

França *et al.* (1995) desenvolveram uma metodologia experimental simples para estimar os parâmetros de equações constitutivas de pressão nos sólidos necessárias a modelagem de sedimentadores contínuos. Ensaios tradicionais de proveta forneceram as alturas finais de sedimentos partindo de diferentes concentrações iniciais de sólido. A resolução da equação do movimento para a fase sólida permitiu obter a distribuição de concentrações do sólido. A integração dessa distribuição forneceu o valor médio da concentração do sólido, que foi confrontado, de forma iterativa, com os dados obtidos experimentalmente permitindo assim avaliar os melhores valores dos parâmetros da equação constitutiva utilizada.

Seja uma mistura sólido-fluida submetida a testes em proveta, a equação do movimento para o sólido, adotando como referencial o sentido positivo do eixo z do topo à base do sedimento e desprezando-se os efeitos inerciais, é neste caso dada por:

$$0 = -\nabla(P_s) + \frac{\mu\varepsilon_f}{k}(v_f - v_s) + (1-\varepsilon_f)(\rho_s - \rho_f)g \tag{2.72}$$

Ao final do teste em proveta, quando o sedimento está completamente formado, a velocidade relativa fluído-partícula é nula e considerando que a pressão no sólido e a porosidade variam apenas ao longo da altura do sedimento, a Equação (2.72) assume a forma:

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \varepsilon_s(z)(\rho_s - \rho_f)g \tag{2.73}$$

que resulta através de integração em z de 0 a L, em

$$P_s(L) = (\rho_s - \rho_f)g\int_0^L \varepsilon_s(z)dz \tag{2.74}$$

Identificando na integral anterior valor médio da fração volumétrica de sólidos:

$\overline{\varepsilon_s} = \frac{1}{L}\int_0^L \varepsilon_s(z)dz$, tem se:

$$P_s(L) = (\rho_s - \rho_f)g\overline{\varepsilon_s}L \tag{2.75}$$

A fração volumétrica média de sólidos pode ser calculada através de:

$$\overline{\varepsilon_s} = \frac{\left(\frac{M_s}{\rho_s}\right)}{V_{sed}} \tag{2.76}$$

traduzindo desta forma uma relação direta entre a pressão no sólido na base do sedimento e o volume total do sólido na proveta.

Coelho e Massarani (1996) propuseram correlações para a fluidodinâmica da partícula, mais simples que as existentes e com precisão equivalente, apresentadas nas Equações de (2.77) a (2.80).

$$\mathrm{Re} = \left[\left(\frac{24}{k_1\left(\frac{C_D}{\mathrm{Re}}\right)}\right)^{0,65} + \left(\frac{k_2}{\left(\frac{C_D}{\mathrm{Re}}\right)}\right)^{1,30}\right]^{\frac{1}{1,30}} \tag{2.77}$$

sendo:

$$\frac{C_D}{\mathrm{Re}} = \frac{4\left(\rho_{fl} - \rho\right)\mu g}{3\rho^2 {v_{t\infty}}^3} \tag{2.78}$$

$$k_1 = 0,843\log\left(\frac{\phi}{0,065}\right) \tag{2.79}$$

$$k_2 = 5,31 - 4,88\phi \tag{2.80}$$

sendo C_D o coeficiente de arraste, Re o número de Reynolds e ϕ a esfericidade da partícula.

Ainda em 1996, França *et al.* propuseram uma nova abordagem na caracterização de suspensões floculentas, baseada na metodologia proposta por Michaels e Bolger (1962), podendo ser aplicada fora do regime de Stokes. Neste artigo os autores utilizaram as Equações (2.69) e (2.70) para o cálculo de k_f (grau de floculação) e ρ_{fl} (densidade do floco). O diâmetro médio dos flocos foi calculado a partir da $v_{t\infty}$ através do ajuste da Equação (2.67) à curva de concentração inicial da suspensão por velocidade de sedimentação dos flocos ou através das Equações (2.77) a (2.80).

Carvalho (1998) estudou a utilização do sedimentador lamelado na separação de suspensões floculentas visando definir um procedimento experimental para este tipo de equipamento. Com este objetivo a autora utilizou uma suspensão de cal floculada com sulfato de alumínio. Também realizou ensaios de sedimentação em batelada em provetas de diferentes diâmetros, utilizando a metodologia de Kynch (1952) para determinação da taxa máxima de sedimentação. A influência da altura inicial da suspensão e do diâmetro da proveta na determinação da densidade e diâmetro médio do floco, utilizando o procedimento proposto por França et. al. (1996), também foram investigados. Concluindo que as alturas e diâmetros das provetas influenciam no cálculo da taxa de sedimentação, assim como a forma de homogeneização. O diâmetro e densidade dos flocos também se mostraram influenciados pelas provetas nas quais foram realizados os ensaios.

Ruiz (2000) efetuou o acompanhamento do fenômeno da sedimentação em batelada para suspensões aquosas de carbonato de cálcio e caulim, com concentrações volumétricas baixas na faixa de 2 a 3 %. Este acompanhamento foi realizado usando a técnica de atenuação de raios gamas. Resolvendo as equações do movimento e da continuidade para o sólido, foi possível determinar a velocidade de sedimentação e a pressão nos sólidos. Seus resultados demonstraram que a velocidade de sedimentação é uma função única da concentração de sólidos para sedimentos pouco compressíveis.

Di Bernardo e Di Bernardo (2000) observaram a potencialidade do uso de amidos como auxiliares de floculação. Realizaram ensaios de coagulação (com sulfato de alumínio), floculação e sedimentação em jarteste, com o objetivo de verificar a influência do gradiente de velocidade e do tempo de agitação na floculação após a adição de amido de mandioca catiônico. Concluíram que o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação não proporcionou uma melhora na qualidade da água decantada. Os melhores resultados foram obtidos com a aplicação do amido 6 e 12 min após o início da floculação. Os resultados indicaram que o amido de mandioca catiônico pode ser um substituto em potencial dos

polímeros sintéticos no tratamento de águas de abastecimento, quando utilizado como auxiliar de floculação.

Também em 2000, Pádua e Di Bernardo propuseram uma técnica indireta de comparação do tamanho dos flocos resultantes da coagulação com cloreto férrico e com sulfato de alumínio, seguido da floculação. O tamanho e o número de partículas presentes na água bruta são parâmetros que influem na eficiência de processos e operações unitárias do tratamento de água. A existência de partículas grandes na água filtrada, por exemplo, dificulta o processo de desinfecção; a presença de pouca matéria em suspensão pode afetar negativamente a eficiência da coagulação e da floculação; na decantação o tamanho das partículas está associado à velocidade de sedimentação, sendo desejado partículas com maior dimensão; na filtração tem-se observado que para uma mesma concentração de partículas a perda de carga desenvolvida é maior quando se tem suspensão com partículas de menor tamanho. Os ensaios foram realizados em jarteste passando-se as amostras de água decantada em mantas sintéticas não-tecidas com tamanho médio dos poros conhecido. Os resultados obtidos foram indicativos de que os flocos formados na coagulação da água de estudo com cloreto férrico possuíam maior tamanho do que quando foi utilizado sulfato de alumínio, o que, sob este aspecto, tornaria mais vantajoso o emprego de cloreto férrico caso se previsse o emprego da tecnologia de filtração direta precedida de floculação.

Bürger *et al.* (2000) mostraram a teoria fenomenológica da sedimentação unidimensional sendo prevista o comportamento da sedimentação de uma suspensão floculada em uma dependência de duas funções constitutivas que descrevem seu comportamento material, da densidade de fluxo dos sólidos e da tensão efetiva nos sólidos. Foi suposto que as funções constitutivas dependiam somente da concentração volumétrica local dos sólidos. Foram analisados diversos estudos teóricos e experimentais da sedimentação em batelada. Foi realizada uma análise da teoria empregada para interpretar as medidas experimentais e então foi aplicado o modelo fenomenológico aos dados disponíveis. As duas funções constitutivas envolvidas foram determinadas a partir da concentração, da permeabilidade e dos dados da tensão efetiva nos sólidos. O modelo matemático foi resolvido numericamente usando estas funções. As predições resultantes do comportamento da sedimentação das suspensões foram comparadas com os resultados experimentais. Concluíram que para todos os estudos envolvidos, a teoria fenomenológica predizia corretamente o comportamento experimental de diversas suspensões floculentas.

White e Verdone (2000) realizaram cálculos para o fluxo limite, considerando a teoria para o projeto de decantadores. Utilizaram um modelo numérico diferente para fazer os

cálculos e as equações foram colocadas em um formato adimensional. O modelo para um decantador cilíndrico foi estendido para o caso de uma geometria cônica, mostrando que a geometria cônica tem um leque mais amplo de carga de sólidos. Por fim, foram apresentados os cálculos para estimar as características dos testes de batelada na geometria cônica e os resultados foram comparados com dados experimentais. Chegaram à conclusão que o modelo utilizado previu melhor os resultados com uma alimentação mais diluída.

Pavanelli (2001) utilizou quatros coagulantes, sulfato de alumínio, cloreto férrico, hidroxicloreto de alumínio e sulfato férrico, para construir diagramas de coagulação e assinalar as regiões de maior ou menor eficiência da remoção de turbidez ou cor da água. Com base nos resultados o autor conclui que a água a ser tratada deve ser analisada através de diagramas de coagulação, visando à otimização de parâmetros como pH e dosagem de coagulante, buscando sempre o menor custo.

Freitas (2002) estudou as curvas de capacidade para os sedimentadores filtrantes e convencionais, ambos operando em estado estacionário e contínuo. Os ensaios foram realizados em protótipos com suspensão aquosa de sulfato de bário, utilizando como meios filtrantes placas de bronze sinterizado com resistências filtrantes diferentes. Os resultados mostraram que as curvas de capacidade dos sedimentadores filtrante e convencional apresentam o comportamento mostrado por Tiller e Chen (1988). A escolha adequada da resistência do meio filtrante pode aumentar sua capacidade. Por último a autora conclui que a metodologia criada por Kynch (1952) é adequada para o cálculo da capacidade destes sedimentadores.

Arouca (2003) determinou equações constitutivas com o intuito de resolver as equações escalares que modelam o fenômeno da sedimentação, que são importantes na avaliação de desempenho de filtros ou espessadores contínuos. Para este estudo foram utilizadas suspensões aquosas de caulim. O monitoramento da concentração volumétrica de caulim nos testes de sedimentação utilizou uma técnica não destrutiva baseada na atenuação de raios gama. Assim os resultados indicaram que a pressão no sólido e a permeabilidade do meio são funções exclusivas da concentração local do sólido.

Chu et al. (2003) investigaram o comportamento da sedimentação do lodo usando técnicas não destrutivas, em vários pontos da proveta, com distâncias variadas do fundo, com o material com e sem floculante. Pois consideraram que as características da sedimentação do lodo floculado não tinham sido satisfatoriamente exploradas parcialmente devido ao baixo teor de sólido (cerca de 1-2%) comumente observado nos sedimentos biológicos. Foram utilizadas amostras de caulim, como comparação. O lodo ativado possuía uma característica

distinta da sedimentação das suspensões de caulim. Os resíduos de lodo ativado sedimentaram mais lentamente e produziram uma fração de sólidos no sedimento final mais baixa. A floculação aumentava o nível de sedimentação de ambas as lamas. Os autores usaram ainda dois modelos diferentes para interpretar os resultados: o modelo de Buscall e Branco interpretou os dados da sedimentação enquanto o modelo de Tiller e Leu descreveu o sedimento final. Concluíram que a sedimentação é facilitada pela floculação produzindo lamas mais concentradas. Esses dados são valiosos para o desenvolvimento de teorias para o projeto e operação de clarificadores.

Bürger *et al.* (2004) desenvolveram um modelo matemático utilizando a teoria fenomenológica do espessador contínuo com suspensões floculentas em um espessador cilíndrico ideal estendida para sedimentadores com variação de seção transversal, incluindo divergentes ou convergentes. Para suspensões ideais (não floculadas), que não formam sedimentos compressíveis, o modelo matemático reduz à abordagem cinemática por Anestis (1981), que desenvolveu um método de construção de soluções exatas pelo método das características. A dificuldade encontrava-se no fato de que as características das linhas da mesma concentração, ao contrário do modelo convencional de Kynch para sedimentadores cilíndricos, não coincidirem, e se teve que recorrer aos métodos numéricos para simular o processo da sedimentação. Um algoritmo numérico foi apresentado e empregado para simulações de sedimentação contínua. As implicações do modelo matemático são demonstradas igualmente pelos cálculos de estado estacionário, que conduzem às possibilidades novas no projeto do espessador.

Silva (2004) efetuou um estudo em protótipos com duas configurações: divergente e convencional. Seus resultados experimentais revelaram que a capacidade dos clarificadores foi mais influenciada pela variação da área da seção transversal do que os espessadores, e que os mecanismos envolvidos na operação de clarificadores e espessadores são muito distintos. Um modelo matemático foi desenvolvido com base na *Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo* para simular numericamente a operação de espessadores contínuos convencionais e divergentes em estado estacionário. Os resultados obtidos nas simulações dos espessadores não concordaram com os obtidos experimentalmente.

Guedes *et al.* (2004) avaliaram o coagulante sulfato de alumínio como redutor de turbidez de suspensões ricas em óxidos de ferro, assim como uma investigação dos fenômenos de superfície associados à coagulação/floculação destas suspensões. Utilizaram suspensões sintéticas formadas por associação de minerais puros, vistas como um modelo para estudo de suspensões naturais, com o objetivo de estabelecer as condições ótimas de

clarificação. Foi proposto um modelo matemático baseado na resposta e nos parâmetros operacionais do sistema. Os autores concluíram que as melhores condições de coagulação da suspensão sintética de óxidos de ferro, utilizando o sulfato de alumínio como coagulante, na ausência de agente alcalinizante, ocorre em valores de pH em torno de 4,0 e uma dosagem de coagulante de aproximadamente 100 mg/L.

Usher e Scales (2005) desenvolveram um algoritmo para prever a operação de estado estacionário de um espessador a partir de propriedades materiais fundamentais, esclarecendo a compressão da estrutura de rede da suspensão dentro do sedimento. As propriedades materiais incluíam o esforço de rendimento compressivo, PY (φ), e a função de estabelecimento impedida, R (φ). O PY (φ) reflete a força da rede da suspensão em função da fração de volume dos sólidos, quando R(φ) for relacionado inversamente com a permeabilidade. As entradas exigidas ao modelo incluíam ajustes da curva do PY (φ) e do R (φ), diâmetro do espessador em função da altura, densidade dos sólidos, densidade do líquido e fração de volume dos sólidos da alimentação. O resultado do modelo foi a transferência de sólidos ou fluxo de sólidos como uma função de concentração de sólidos no *underflow*, para um intervalo de alturas do leito de suspensão. O tempo de residência de sólidos em suspensão no leito também pôde ser determinado. O algoritmo envolveu a predição da produção dos sólidos contra a concentração dos sólidos da corrente de fundo em duas porções; estabelecimento livre e compressão dentro do leito de suspensão. A predição de estabelecimento livre utiliza uma adaptação do método simples de Coe e Clevenger, quando a predição da compressão no leito foi conseguida com a integração de uma equação diferencial desenvolvida da teoria de secagem de Buscall e White. O fluxo de sólidos no estado estacionário foi o mínimo dos dois valores previstos para cada concentração dos sólidos da corrente de fundo e altura do leito. Para a operação de estado estacionário do espessador, as saídas revelam três modalidades gerais da operação estável; a permeabilidade limitada quando o fluxo de sólidos é alto, compressibilidade e permeabilidade dependentes em fluxos intermediários e compressibilidade dos sólidos limitada em fluxo de sólidos muito baixos. O conhecimento das circunstâncias sob que cada uma destas modalidades é aplicável e permite aos operadores do processo compreender o efeito das variações podendo ajudar na otimização do processo.

Arouca (2007) realizou um estudo teórico e experimental da sedimentação em batelada, empregando a técnica de radiações de alta energia. Concomitantemente ao desenvolvimento do trabalho experimental, modelos matemáticos da literatura foram analisados e utilizados para o desenvolvimento de um modelo fenomenológico alternativo para a descrição teórica da sedimentação. O modelo encontrado pelo autor tem caráter misto

hiperbólico-parabólico e baseia-se nos princípios da Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo e em trabalhos inter-relacionados de diferentes autores. A solução numérica do problema consiste da resolução de um conjunto de equações algébrico-diferencial que emprega métodos numéricos acoplados, tais como Diferenças Finitas e *Moving Mesh* juntamente com o algoritmo de aproximação espacial MUSCL de segunda ordem. Este modelo matemático proposto para a sedimentação foi validado tomando como base os resultados experimentais de sedimentação em batelada. Os resultados das simulações numéricas mostraram que o modelo misto hiperbólico-parabólico apresentado descreve adequadamente o fenômeno físico em todo seu domínio sem que haja a necessidade do uso de condições de salto nas fronteiras móveis.

Ainda em 2007, Bürger e Narváez estudaram um modelo espacial de uma dimensão para o comportamento de suspensões floculentas nos clarificadores. Este modelo combinava uma teoria de processos da sedimentação de suspensões floculadas, que conduzia a uma equação fortemente degenerada da difusão, com o fluxo descontínuo que aparece no clarificador. Esta configuração inclui tanto as zonas de clarificação e espessamento das unidades do clarificador, enquanto o modelo de espessador ideal foi usado somente na zona de espessamento. A construção das distribuições de concentração do estado estacionário de um clarificador operando continuamente na primeira configuração foi descrita. Foram apresentados os exemplos numéricos de perfis no estado estacionário e de suas aplicações para o controle da altura do sedimento através da seleção do fluxo da alimentação no clarificador e para cálculos da capacidade. Um exemplo ilustrou o uso de um método numérico para que o modelo fosse comparado e pudesse possibilitar o uso de varias estratégias, podendo assim contribuir para o projeto desses equipamentos.

Nunes (2008) estudou as variáveis que afetam o desempenho de sedimentadores convencionais operando com suspensões previamente floculadas, tais como o pH e a massa de material floculante e apresentou um procedimento para sedimentação contínua com floculação utilizando o sedimentador convencional. Concluiu que ensaios de proveta foram muito eficientes apesar da simplicidade, pois obteve um bom ajuste dos dados experimentais pelas equações constitutivas de Tiller e Leu (1980) para pressão e permeabilidade; houve uma influência da área da seção transversal na velocidade de sedimentação, as provetas de maior diâmetro proporcionaram uma maior velocidade, indicando que há um efeito de parede no processo; calculando a capacidade do sedimentador pelo método de Kynch (1952) obteve um melhor desempenho utilizando-se o processo de floculação, mostrando assim a importância de se utilizar este processo nos casos de sedimentação de partículas muito finas.

Azevedo (2009) adaptou o modelo matemático desenvolvido por Arouca (2007) para o fenômeno da sedimentação contínua, empregando métodos de resolução numérica que simplificaram consideravelmente a complexidade do problema, eliminando a necessidade da resolução por regiões de fronteiras móveis e condições de salto. A resolução dos modelos matemáticos de sedimentação contínua em regime transiente foi realizada com o *Software Scilab*®. Para a resolução dos modelos no estado estacionário os perfis de concentração resultam na solução de um problema de valor inicial. Os resultados das simulações numéricas mostraram que o modelo misto hiperbólico-parabólico apresentado descreve qualitativamente o fenômeno físico em todo o seu domínio.

Os trabalhos citados neste capítulo mostram um histórico da sedimentação, no entanto há poucos trabalhos que comparam a velocidade de sedimentação de partículas com pequenos diâmetros submetidas ou não à floculação. Este trabalho faz um estudo de como melhorar a velocidade de sedimentação usando sulfato de alumínio com agente de floculação. Além disso, propõe experimentos para obter equações constitutivas para a sedimentação contínua, usando experimentos em batelada, equações estas que podem ser utilizadas na simulação da operação de sedimentadores contínuos.

Capítulo 3
Materiais e Métodos

Neste Capítulo são apresentados os equipamentos e materiais utilizados, bem como a metodologia experimental aplicada.

3.1 – Materiais utilizados

O sólido utilizado neste trabalho para formar as suspensões para os testes de sedimentação em batelada e contínuos foi o caulim, ($Al_2Si_sO_5(OH)$), adquirido da empresa Brasclay, com representação em Campinas, SP. Sua densidade foi determinada por picnometria a Hélio resultando no valor de (2,400 ± 0,005) g/cm^3.

A análise granulométrica do material sólido foi conduzida em um granulômetro da marca MasterSizer® MicroPlus modelo MAF 5001. O resultado da análise granulométrica é apresentado na Figura 3.1.

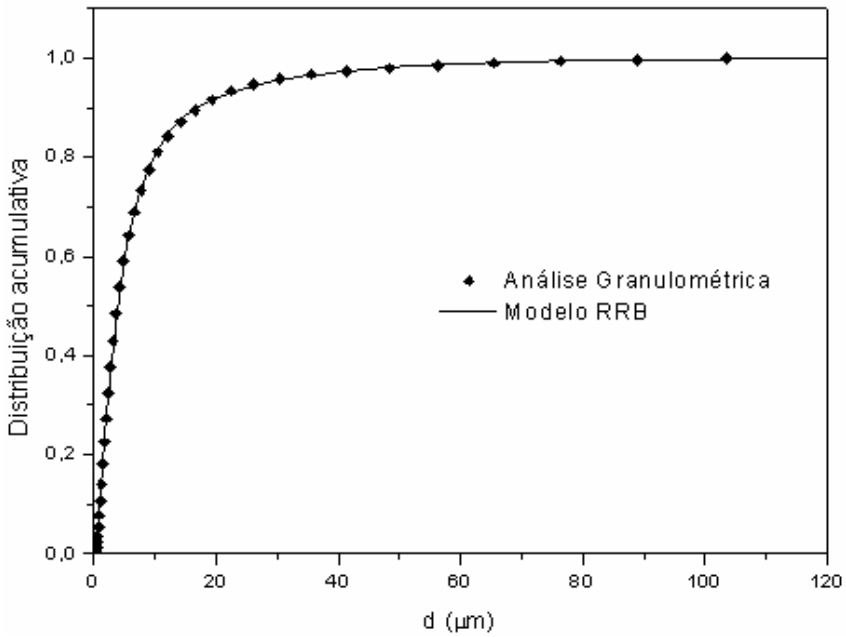


Figura 3.1 – Gráfico da distribuição granulométrica para o caulim.

A distribuição granulométrica do caulim ajustou-se ao modelo de Rosin-Rammler-Bennet (RRB) representado pela Equação 3.1.

$$Y = 1 - \exp\left(-\left(\frac{d}{D'}\right)^{n}\right) \tag{3.1}$$

Os parâmetros do modelo RRB para a distribuição granulométrica do caulim são apresentados na Tabela 3.1, com o coeficiente de ajuste de 0,99.

Tabela 3.1 – Parâmetros do modelo RRB.

Parâmetros	Valores
D'	5,980
n	1,076

O agente floculante utilizado foi o sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3.nH_2O$, devido a sua grande utilização comercial. Para auxiliar na formação do flocos foi utilizado um polieletrólito Magnafloc® LT27®, um poliacrilamida aniônico, como fonte de cargas.

3.1.1 - Unidade Experimental

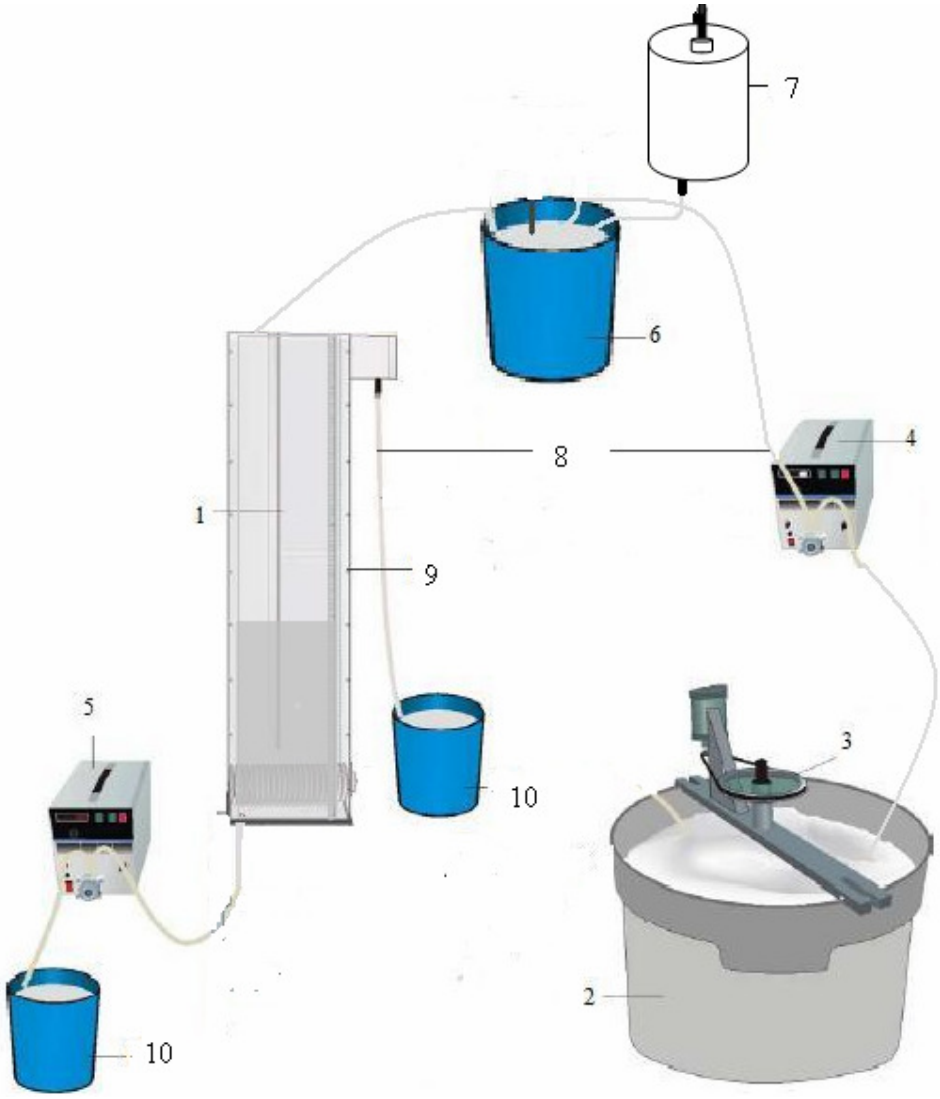
O equipamento utilizado para realizar os testes de sedimentação contínua foi um sedimentador convencional. O protótipo (1) foi construído em acrílico, com seção transversal retangular de 100 cm^2 e altura de 50 cm. Na parte superior, havia um vertedouro por onde era recolhido o líquido clarificado (*overflow*). A base, o equipamento era dotada de um orifício por onde era feita a remoção de sólido depositado utilizando uma bomba peristáltica. O tubo de alimentação era preso ao topo de tal forma que podia ser removido quando necessário. A unidade experimental completa pode ser vista na Figura 3.2.

O tanque onde era armazenada a suspensão era um reservatório de 20 L, mantido sob constante agitação por meio de um agitador da marca IKA® RW 20.DZM®.

A alimentação da suspensão ao sedimentador era feita por uma bomba peristáltica da marca Masterflex® L/S Digi-Staltic®, modelo 7526-00. Já a corrente de *underflow* era succionada por uma bomba peristáltica da marca Masterflex® L/S Digi-Staltic®, modelo 7526-05. Também havia um tanque de floculação onde era adicionado o sulfato de alumínio junto com a suspensão. O sulfato de alumínio era adicionado usando um frasco de Mariotti.

Eram utilizadas mangueiras de silicone para o transporte das correntes de alimentação, *overflow* e *underflow* para os seus respectivos recipientes de coleta.

O sedimentador era dotado de pontos de amostragens laterais, constituídos por tubos de acrílico.



1-Sedimentador	6-Recipiente de floculação
2-Tanque de Alimentação	7-Frasco de Mariotti
3-Agitador	8-Mangueiras de silicone
4-Bomba de alimentação	9-Pontos de amostragem
5-Bomba de sucção	10- Recipientes de coleta

Figura 3.2 – A unidade experimental para experimentos de sedimentação contínua.

3.2 – Metodologia

3.2.1 - Testes para determinação da melhor faixa de pH e agente floculante

A velocidade de sedimentação depende, entre outras coisas, do diâmetro da partícula. As partículas mais finas têm uma velocidade de sedimentação menor do que partículas de mesma densidade e maior diâmetro. Uma forma de aumentar a velocidade é promover a formação de flocos. A formação dos flocos, em princípio, vai depender da quantidade de agente floculante e do pH da suspensão. Baseado nos diagramas de coagulação para o sulfato de alumínio (PAVANELLI 2001) foi feito um planejamento experimental composto central para se tentar otimizar a concentração de agente floculante e o pH e assim obter uma maior velocidade de sedimentação. Foi utilizado um fatorial completo 2^2, incluindo 4 pontos axiais e 4 pontos centrais para avaliação do erro puro.

A Tabela 3.2 apresenta o planejamento com os 12 ensaios realizados, com os valores originais e codificados. Os ensaios foram realizados em provetas de um litro utilizando uma concentração volumétrica de sólidos de 1%.

Tabela 3.2 – Planejamento Experimental.

Ensaios	Concentração de agente floculante	pH	Concentração de agente floculante (mg/L de suspensão)	pH
1	-1	-1	5	6
2	1	-1	15	6
3	-1	1	5	7
4	1	1	15	7
5	-1,41	0	3	6,5
6	1,41	0	17	6,5
7	0	-1,41	10	5,8
8	0	1,41	10	7,2
9	0	0	10	6,5
10	0	0	10	6,5
11	0	0	10	6,5
12	0	0	10	6,5

Além da adição do agente floculante foram utilizadas soluções de NaOH a 2M para o ajuste do pH e um polieletrólito, um poliacrilamida aniônico. A dosagem requerida do auxiliar de coagulação foi fixada em todos os ensaios no valor de 0,25mg/L de suspensão. O polieletrólito foi utilizado para produzir cargas induzidas e promover uma floculação satisfatória, com significativa redução das dosagens de sulfato de alumínio.

3.2.2 – Caracterização de suspensões floculentas

A caracterização de uma suspensão consiste na determinação de parâmetros como a densidade e diâmetro médio das partículas. No caso de um sistema com suspensão floculenta não se tem mais uma partícula isolada e sim um aglomerado de partículas e de partículas de água, unidas por forças de superfícies, ou seja, os flocos.

Desta forma, a fase sólida sofre modificações não apenas estruturais, mas também de comportamento, sendo necessárias modificações nas metodologias e técnicas de determinação das propriedades físicas destes sistemas.

A caracterização dos flocos pode ser feita utilizando diferentes abordagens experimentais citadas na literatura. Uma das metodologias mais utilizadas para a determinação do diâmetro e densidade do floco é a de Michaels e Bolger (1962), que baseia na sedimentação em batelada e a correlação proposta por Coelho e Massarani (1996), para o cálculo do diâmetro do floco.

Com o objetivo de calcular a densidade e o diâmetro do floco foram realizados ensaios de sedimentação em batelada para obtenção de concentração inicial da suspensão e velocidade inicial de sedimentação (C, v), todos com a dosagem de sulfato de alumínio de 0,2 mg/g de sólido.

A partir destes dados, utilizando o pacote computacional *Statistica*®, foram estimados os parâmetros grau de floculação k_f, e velocidade terminal $v_{t\infty}$ que melhor se ajustam à Equação (3.2):

$$v_s = v_{t\infty}(1 - k_f C)^n \tag{3.2}$$

e a densidade e o diâmetro médio do floco foram calculados utilizando as Equações (3.3) e (3.4).

$$\rho_{fl} - \rho = \frac{\rho_s - \rho}{k_f \rho_s} \tag{3.3}$$

$$v_{t\infty} = \frac{d_{fl}{}^2 (\rho_{fl} - \rho) g}{18\mu} \tag{3.4}$$

3.2.3 - Testes para a determinação dos parâmetros da equação constitutiva para pressão nos sólidos para sedimentos de caulim

Geralmente, as equações constitutivas propostas na literatura apresentam a pressão no sólido como função exclusiva da concentração de sólidos local, sendo necessário, portanto, o conhecimento da distribuição de concentrações ao longo do sedimento formado. Para os testes de determinação de pressão dos sólidos foi utilizada a metodologia desenvolvida por França (1995), que simplificou a determinação dos parâmetros das equações, pois propôs uma técnica experimental que evita a medida da distribuição de concentração ao longo do sedimento, adotando seu valor médio para diferentes valores da altura total de sedimento na proveta.

A praticidade do método é bem observada na experimentação, pois não há a necessidade de medidas da concentração de sólidos na base do sedimento, possibilitando o uso de pequenas amostras, o que fornece sedimentos de alturas reduzidas, permitindo a estimação dos parâmetros para baixas pressões.

Utilizando a equação do movimento para a fase sólida, quando o sentimento está completamente formado, integrando de z igual a zero até L (altura total do sedimento) temos:

$$P_s(L) = (\rho_s - \rho_f) g L \bar{\varepsilon}_s \tag{3.5}$$

A concentração volumétrica média de sólidos, $\bar{\varepsilon}_s$, pode ser calculada diretamente através de:

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{\left(m_s \middle/ \rho_s \right)}{V_{sed}} \tag{3.6}$$

em que m_s = massa de sólidos no sedimento;

V_{sed} = volume do sedimento.

Dessa forma encontra-se uma relação direta entre a pressão no sólido na base do sedimento e o volume do sedimento formado na base da proveta.

Foram realizados vários testes de proveta para suspensões aquosas de caulim, com diferentes massas de sólido. Estes testes eram realizados em quatro provetas com diâmetros diferentes.

As massas de caulim variavam de 3 a 85 g e os diâmetros das provetas eram 3,90, 3,03, 1,96 e 1,30 cm.

As diferentes suspensões de caulim eram preparadas, colocadas nas provetas, homogeneizadas e deixadas em repouso até a sedimentação completa. Após esse período media-se a altura do sedimento.

Para suspensões de caulim com o uso de sulfato de alumínio, o sulfato era adicionado em uma concentração de 0,2 mg de sulfato de alumínio/g de sólido. Então essa suspensão era homogeneizada e colocada em repouso. Após a sedimentação completa media-se a altura do sedimento.

As variáveis medidas a cada teste eram m_s e , a partir das quais se calculou o volume de sedimento. As variáveis $\overline{\varepsilon}_s$ e $P_s(L)$ foram calculadas posteriormente por meio das Equações (3.5) e (3.6), respectivamente.

Para a determinação dos parâmetros constitutivos para a pressão no sólido, foi utilizada a equação proposta por Tiller e Leu (1980):

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{sc}\left(1+\frac{P_s}{P_a}\right)^{\beta} \tag{3.7}$$

De posse dos dados experimentais aplica-se técnicas de regressão não-linear para encontrar os parâmetros P_a, β e ε_{sc}.

3.2.4 - Testes para a determinação dos parâmetros da equação constitutiva para permeabilidade para sedimentos de caulim

Para determinar a permeabilidade do meio, a interface descendente do sólido era monitorada com o tempo, na região de sedimentação livre. Em um teste de sedimentação em proveta com concentração inicial menor que a concentração crítica, observa-se que nos primeiros instantes a interface superior apresenta velocidade de queda constante.

Tendo em vista que na região de sedimentação livre não há efeito de pressão nos sólidos e a velocidade de queda da interface superior é a velocidade de queda dos sólidos nela

contidos, que é constante, chegamos a Equação (3.8), que deriva da equação do movimento para os sólidos, após as devidas simplificações:

$$k = \frac{\mu \mathrm{v}_s}{\left(\rho_s - \rho_f\right)\varepsilon_s g} \tag{3.8}$$

Considerando a Equação (3.8), e utilizando a equação constitutiva de Tiller e Leu (1980) para a permeabilidade, chega-se a equação abaixo:

$$k = k_o \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sc}}\right)^{-\eta} \tag{3.9}$$

Foram feitos vários testes em proveta com o objetivo de determinar os pares k e ε_s necessários para a estimativa dos parâmetros da Equação (3.9).

Os testes foram realizados em provetas de 1L dotada de uma escala previamente afixada. A suspensão com concentração volumétrica de sólidos conhecida era inicialmente homogeneizada no interior da proveta. Após cessar a homogeneização um cronômetro digital era acionado e em seguida eram feitas leituras da interface superior e do tempo correspondente. Ao final do teste os dados da posição *versus* tempo eram colocados em um gráfico. Por meio da inclinação da reta na região linear do gráfico era determinada a velocidade de sedimentação, conforme a Figura 3.3.

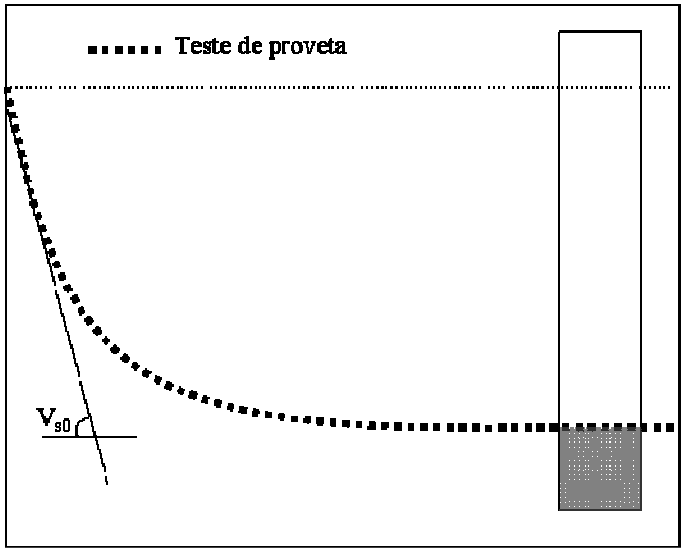


Figura 3.3 – Teste de sedimentação em proveta para determinação da permeabilidade.

Com os valores de v_s e ε_s conhecidos era calculada a permeabilidade *k*, através da Equação (3.8).

Para os testes com sulfato de alumínio a suspensão era homogeneizada inicialmente em um béquer de 2 L e era adicionado o sulfato de alumínio na concentração de 0,2 mg/g de sólido. Essa suspensão era homogeneizada e colocada na proveta onde era novamente homogeneizada. Após esse procedimento eram feitas as leituras da interface superior com o tempo correspondente.

Os dados foram obtidos para concentrações volumétricas de sólidos entre 1% e 5%, com intervalos de 0,5%, sendo esta faixa utilizada para suspensões com e sem o uso do sulfato de alumínio.

3.3 - Testes para determinação da taxa de sedimentação utilizando a metodologia de Kynch – Influência da altura inicial da coluna de suspensão.

A principal contribuição do modelo de Kynch ao projeto se sedimentadores é o fato dele possibilitar a determinação da relação funcional entre a velocidade de sedimentação e a concentração volumétrica a partir de um único ensaio de proveta.

Para o cálculo da concentração total de sólido na interface superior e a velocidade de sedimentação dos sólidos utilizou-se as Equações (3.10) e (3.11) citadas no Capítulo 2:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{so} z_o}{z_i} \tag{3.10}$$

$$v_s = \frac{z_i - z}{t} \tag{3.11}$$

sendo z_i a interseção da tangente á curva de sedimentação, num instante t qualquer, com o eixo z.

A determinação do fluxo de sólidos mínimos foi dada pela equação:

$$\left(q_s\right)_{op} = \frac{\varepsilon_{so} z_o}{t^*} \tag{3.12}$$

sendo t^* é o tempo transcorrido no ensaio em proveta para que a posição da interface clarificada seja dada por

$$z^* = \frac{\varepsilon_{so} z_o}{\varepsilon_{su}} \tag{3.13}$$

sendo ε_{su} a concentração da lama.

A área da seção transversal do sedimentador foi obtida através da equação,

$$A = \frac{Q_F}{\beta} \tag{3.14}$$

e a altura do sedimento pôde ser estimada através da equação de Orr (1966),

$$L = \frac{4}{3} \varepsilon_{so} t_R \beta \left[\frac{\rho_s - \rho}{\rho_u - \rho} \right] \tag{3.15}$$

sendo ρ_s , ρ e ρ_u, respectivamente, as densidades do sólido, do liquido e da lama, t_R o tempo de residência dos sólidos no sedimento e $\beta = z_o/t^*$.

Com o objetivo de estudar o efeito da altura da coluna de suspensão no ensaio em proveta sobre o projeto de sedimentadores, foram realizados testes com três diferentes alturas de suspensão, 30, 45 e 60 cm, para concentrações volumétricas de sólidos na alimentação que de 1, 2 e 3%.

3.4 - Descrição da operação do sedimentador contínuo

No experimento de sedimentação contínua foi utilizada uma suspensão de caulim, com concentração volumétrica de 1%. Foram realizados testes com e sem a adição de sulfato de alumínio.

Antes do início do ensaio experimental, o agitador do tanque de alimentação foi acionado e, durante aproximadamente cinco minutos, deixou-se a suspensão do tanque sob agitação para garantir completa homogeneização. O sistema de agitação permaneceu em funcionamento durante todo o ensaio. Do tanque de alimentação a suspensão é bombeada para o sedimentador.

Para os testes com sulfato de alumínio a suspensão do tanque de alimentação foi bombeada para o tanque de floculação onde será acrescentado o sulfato de alumínio vindo do frasco de Mariotti. A quantidade de sulfato de alumínio era de aproximadamente 0,2 mg de sulfato de alumínio/g de sólido, para isso a vazão do frasco de Mariotti foi controlada. Assim a suspensão saiu do tanque de floculação para o sedimentador.

Quando sedimentador estava completamente cheio foi acionada a bomba de *underflow*. As vazões das bombas foram ajustadas de tal forma que a relação entre a vazão de

alimentação e de *underflow* fosse aproximadamente igual à relação entre a concentração volumétrica de sólidos no *underflow*, desejada, e a concentração de sólidos na alimentação. Ou seja, do balanço de massa para o sólido no estado estacionário, leva a:

$$\varepsilon_{sF} Q_F = \varepsilon_{so} Q_o + \varepsilon_{su} Q_u, \tag{3.16}$$

sendo que ε_{sF}, ε_{so} e ε_{su} as concentrações volumétricas de sólidos na alimentação, *overflow* e *underflow*, respectivamente; Q_F, Q_o e Q_u as vazões volumétricas da alimentação, *overflow* e *underflow*, respectivamente.

Como o sedimentador foi operado de modo a fornecer um *overflow* isento de sólidos, a Equação (3.16) pode ser colocada na forma:

$$\frac{Q_F}{Q_u} = \frac{\varepsilon_{su}}{\varepsilon_{sF}} \tag{3.17}$$

Logo, mantendo-se a relação $\frac{Q_F}{Q_u}$ e ε_{sF} constantes, o sedimentador foi operado de forma a obter em todos os ensaios a mesma concentração de sólidos no *underflow,* ε_{su}.

Considera-se que o estado estacionário foi alcançado quando a altura do leito poroso expandido e a concentração de sólidos no *underflow* permaneceram constantes. O monitoramento da concentração de sólidos na corrente de *underflow* foi feito por meio de amostragens.

Para determinação da distribuição de concentrações no sedimentador, foram retiradas alíquotas de cerca de 20 mL dos pontos de amostragem laterais, começando pelos pontos próximo à base seguindo em direção ao topo do sedimentador. Essa estratégia teve como objetivo minimizar a perturbação causada no sistema. A concentração das amostras é determinada por análise gravimétrica.

A concentração volumétrica de sólidos, ε_s foi calculada através da Equação (3.18).

$$\varepsilon_s = \frac{m_s / \rho_s}{V_T} \tag{3.18}$$

sendo que m_s e ρ_s são a massa e a densidade do sólido, V_T é o volume total.

Com os procedimentos adotados, podem ser obtidos os dados de altura de sedimento, vazão e concentração volumétrica de sólidos, necessários para o estudo do sedimentador convencional.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste Capítulo são apresentados os principais resultados experimentais e cálculos para a capacidade do sedimentador utilizando diferentes modelos.

4.1 – Efeito do pH e da concentração de agente floculante sobre a velocidade de sedimentação

Os resultados da velocidade de sedimentação obtidos no planejamento experimental apresentado no capítulo anterior, relacionando concentração de floculante e pH com a velocidade de sedimentação são apresentados na Tabela 4.1. Observa-se nesta tabela, que as velocidades de sedimentação variaram de 5,37 a 8,92 cm/min. Verifica-se também que o melhores resultados foram obtidos para um pH igual a 7 e concentração de floculante de 5 mg/ L de suspensão.

Tabela 4.1: Planejamento fatorial, valores codificados, valores originais e velocidade de sedimentação.

Ensaios	pH	Concentração de floculante	pH	Concentração de floculante (mg/L de suspensão)	Velocidade de Sedimentação (cm/min)
1	-1	-1	6	5	6,36
2	1	-1	7	5	8,92
3	-1	1	6	15	5,37
4	1	1	7	15	8,53
5	-1,41	0	5,8	10	6,62
6	1,41	0	7,2	10	8,76
7	0	-1,41	6,5	3	8,22
8	0	1,41	6,5	17	6,02
9	0	0	6,5	10	8,34
10	0	0	6,5	10	8,36
11	0	0	6,5	10	8,29
12	0	0	6,5	10	8,00

Com os resultados obtidos na Tabela 4.1 foi possível analisar estatisticamente o comportamento da velocidade de sedimentação. Para isto, determinaram-se os coeficientes de regressão após a realização da regressão múltipla no programa *Statistic*®. Os resultados

obtidos desta análise estão apresentados na Tabela 4.2 e na Equação 4.1, nos quais são mostrados os parâmetros significativos e não significativos, bem como os valores dos níveis de significância relacionados aos mesmos.

Tabela 4.2 – Resultados da regressão múltipla para a velocidade de sedimentação, com todas as variáveis e seus respectivos parâmetros e níveis de significância.

Variáveis e interações	Coeficiente de regressão	Nível de significância (p)
Termo independente	8,25	0,0000
X_1 (pH)	1,09	0,0006
$(X_1)^2$ (pH)	-0,31	0,1582
X_2 (Concentração de floculante)	-0,56	0,0162
$(X_2)^2$ (Concentração de floculante)	-0,59	0,0206
X_1 X_2 (pH/ Concentração de floculante)	0,15	0,5549
$r^2 = 0,91$		

$$\mathbf{v_s} = 8,25 + 1,09X_1 - 0,31X_1^2 - 0,56\ X_2 - 0,59\ X_2^2 - 0,15X_1\ X_2 \quad (4.1)$$

Após a eliminação dos parâmetros não significativos com $p > 0,05$, foi obtida as seguintes relações apresentadas na Tabela 4.3. E a equação resultante deste ajuste está apresentada pela Equação 4.2.

Tabela 4.3 – Resultados da regressão múltipla para a velocidade de sedimentação, apresentando apenas as variáveis significantes com seus respectivos parâmetros e níveis de significância.

Variáveis e interações	Coeficiente de regressão	Nível de significância (p)
Termo independente	8,00	0,0000
X_1 (pH)	1,09	0,0003
X_2 (Concentração de floculante)	-0,56	0,0142
$(X_2)^2$ (Concentração de floculante)	-0,53	0,0273
$r^2 = 0,87$		

$$\mathbf{v_s} = 8,00 + 1,09X_1 - 0,56\ X_2 - 0,53\ X_2^2 \quad (4.2)$$

Verifica-se que o aumento no pH, mantendo fixas as concentrações de floculante proporcionou um aumento na velocidade, o sinal positivo da variável X_1, indica que o aumento na resposta remoção está diretamente relacionado ao aumento desta variável. Isto pode ser verificado e conferido pela comparação dos resultados obtidos nos experimentos 1 e 2. Através destes experimentos observa-se, que o aumento no pH, mantendo fixa a concentração de floculante de 5 mg/L de suspensão, proporcionaram um aumento significativo e positivo na velocidade de sedimentação de 6,36 para 8,92 cm/min.

Ao contrário deste comportamento, o sinal negativo da variável X_2, indica que o aumento na resposta velocidade de sedimentação está diretamente relacionado à diminuição desta variável. Isto pode ser verificado e conferido pela comparação dos resultados obtidos nos experimentos 7 e 8.

Com os resultados obtidos foi possível verificar os comportamentos de resíduos e dos valores preditos em função dos observados graficamente, de acordo com as Figuras 4.1 e 4.2.

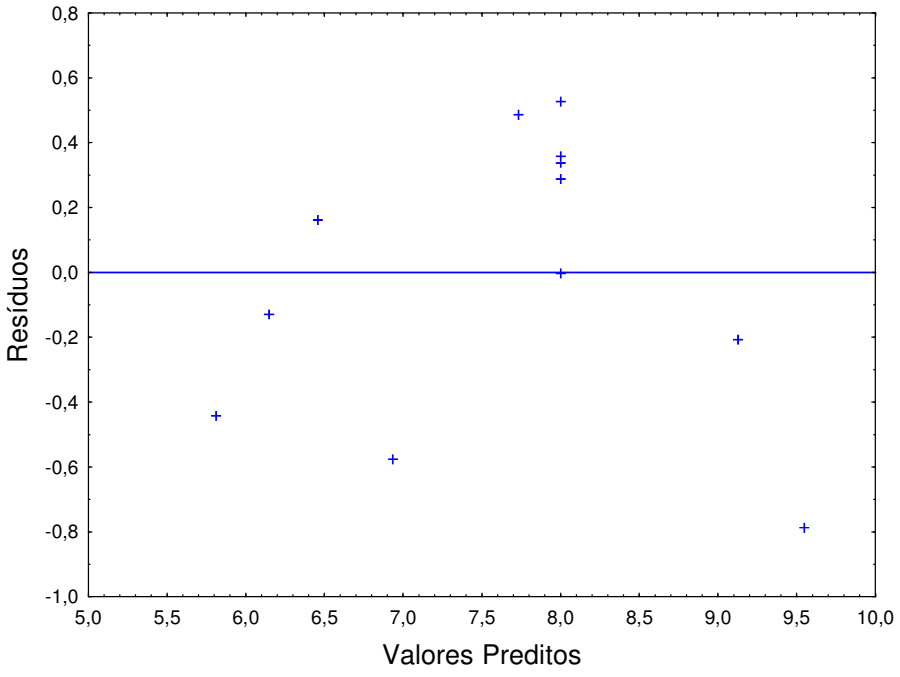


Figura 4.1 – Distribuição dos resíduos relativa à velocidade de sedimentação.

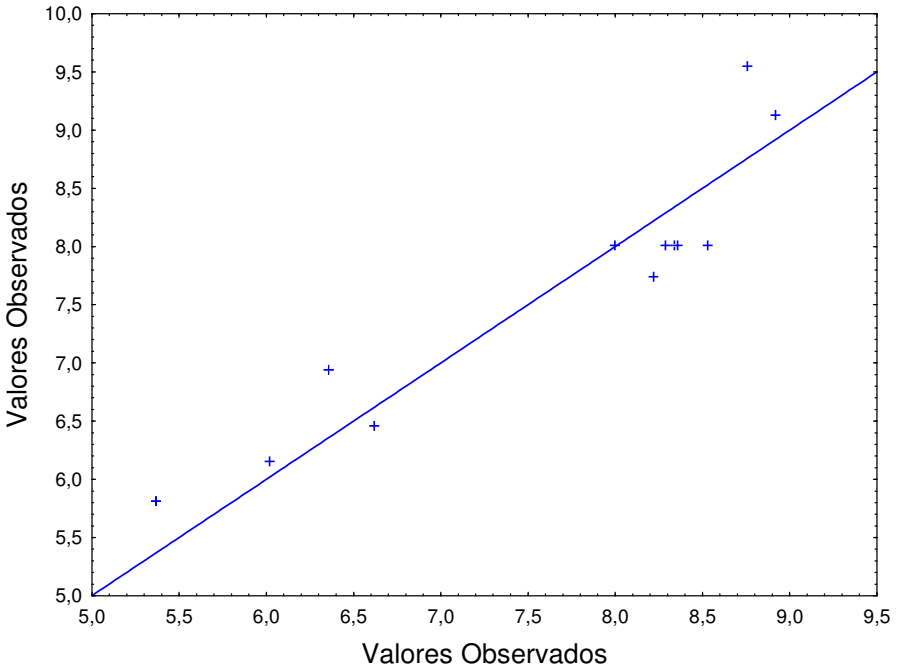


Figura 4.2 – Valores preditos em função dos observados relativos à velocidade de sedimentação.

Observando a Figura 4.1, verifica-se que a distribuição dos resíduos comportou-se aleatoriamente em torno do zero, não apresentando nenhuma tendência.

Por meio da Figura 4.2 nota-se, que os valores dos resultados experimentais para velocidade de sedimentação apresentaram próximos aos valores fornecidos pela equação empírica.

Para ilustrar os efeitos das variáveis na velocidade de sedimentação as superfícies de resposta e as curvas de contorno serão apresentadas na Figuras 4.3. Estas figuras mostram a região de otimização das variáveis em relação à resposta velocidade de sedimentação. Assim é possível notar que a velocidade de sedimentação é maior para menores concentrações de floculante menores que 10 mg/L de suspensão e pH mais próximos de 7.

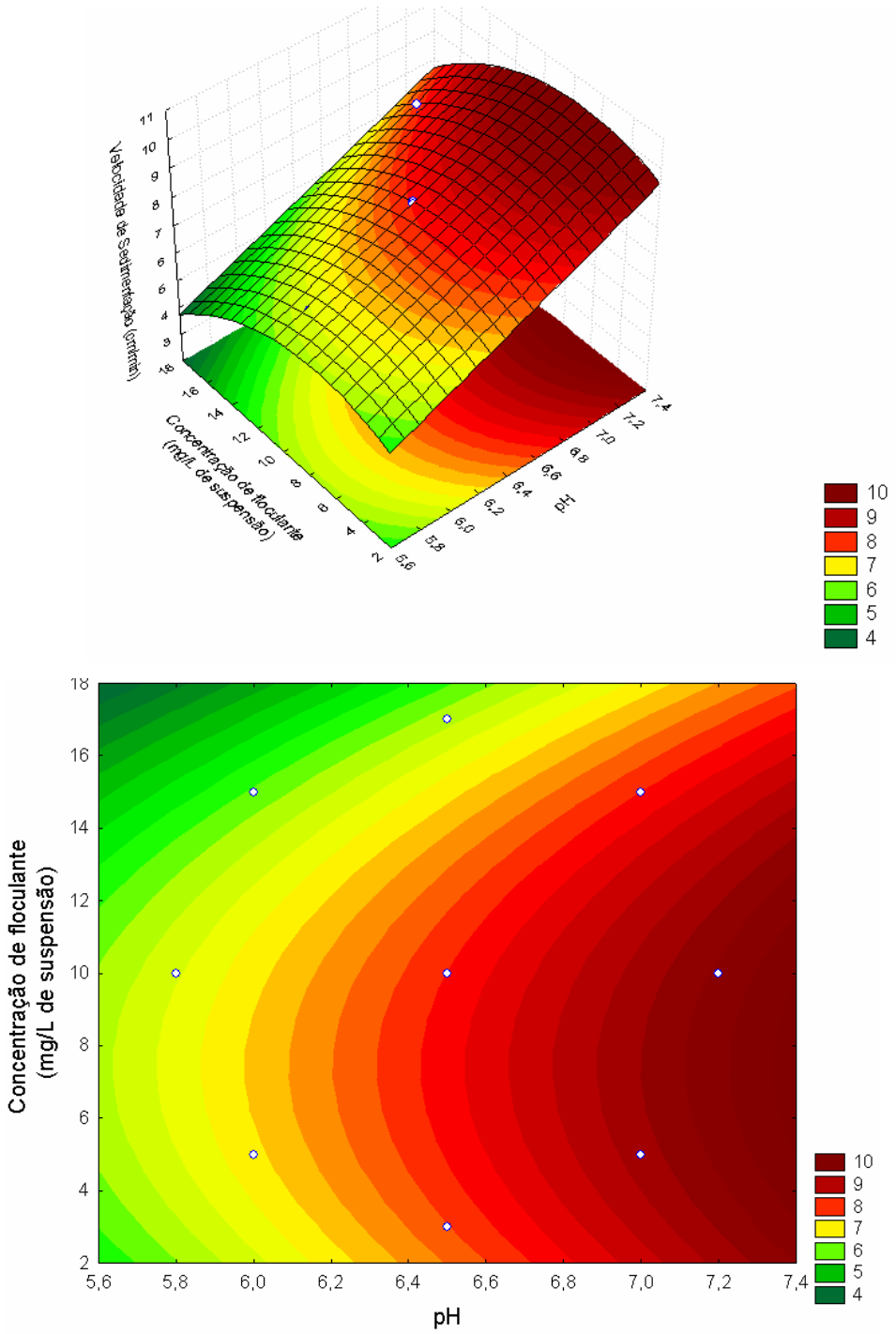


Figura 4.3 – Superfície de resposta e curva de contorno para a resposta velocidade de sedimentação em função do pH (X_1) e concentração de floculante (X_2).

4.1.1 – Comparação entre testes sem e com formação de flocos

Na Figura 4.4 é apresentado uma comparação entre os testes em que não houve a adição de sulfato, polieletrólito e o pH não foi alterado com um teste onde o pH era igual a 7, a concentração de floculante era de 5 mg/L de suspensão e a concentração de polieletrólito era de 0,25 mg/L de suspensão.

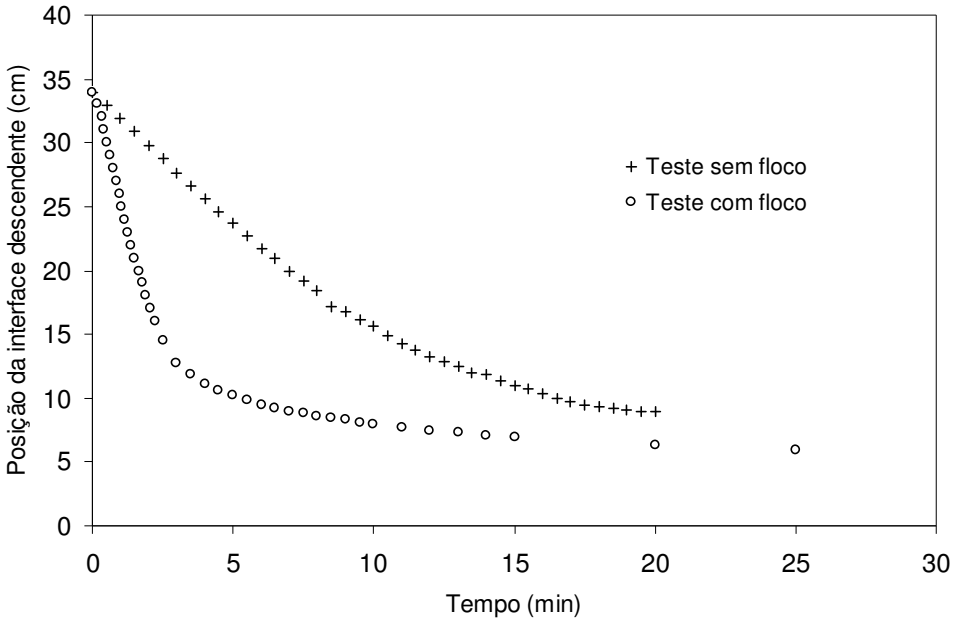


Figura 4.4 - Comparação entre testes sem e com floco.

Na Figura 4.4 pode ser observado que a velocidade de sedimentação, dada pela inclinação da reta na região de sedimentação livre, para o teste onde há a formação do floco é muito maior. Assim pode-se concluir que a formação do floco aumenta consideravelmente a velocidade de sedimentação. Sendo uma forma eficiente de contornar o pequeno diâmetro da partícula.

Na Figura 4.5 é apresentada uma comparação visual em um teste em que não houve a formação do floco com um teste em que o floco foi formado. A visualização do floco permite concluir que seu tamanho era muito maior que o tamanho inicial da partícula de 5 μm.

Figura 4.5 – Fotografias dos ensaios sem e com floco.

4.2 – Testes com sulfato de alumínio

Foram realizados testes com a adição de sulfato de alumínio sem o uso do polieletrólito. Nestes testes não foi observada a formação de flocos. Aparentemente, houve a formação de um aglomerado de partículas, conforme pôde ser constatado posteriormente.

A simples adição de sulfato tornou a velocidade de sedimentação levemente superior. Assim foram realizados testes para encontrar as equações constitutivas para a pressão nos sólidos e a permeabilidade, com e sem o uso de sulfato de alumínio.

4.2.1 - Estimativa da densidade do aglomerado de partículas

A Figura 4.6 apresenta a comparação entre testes com e sem sulfato de alumínio (concentração de 5 mg/L de suspensão) em pH = 6 e com concentração volumétrica inicial de sólidos de 1%.

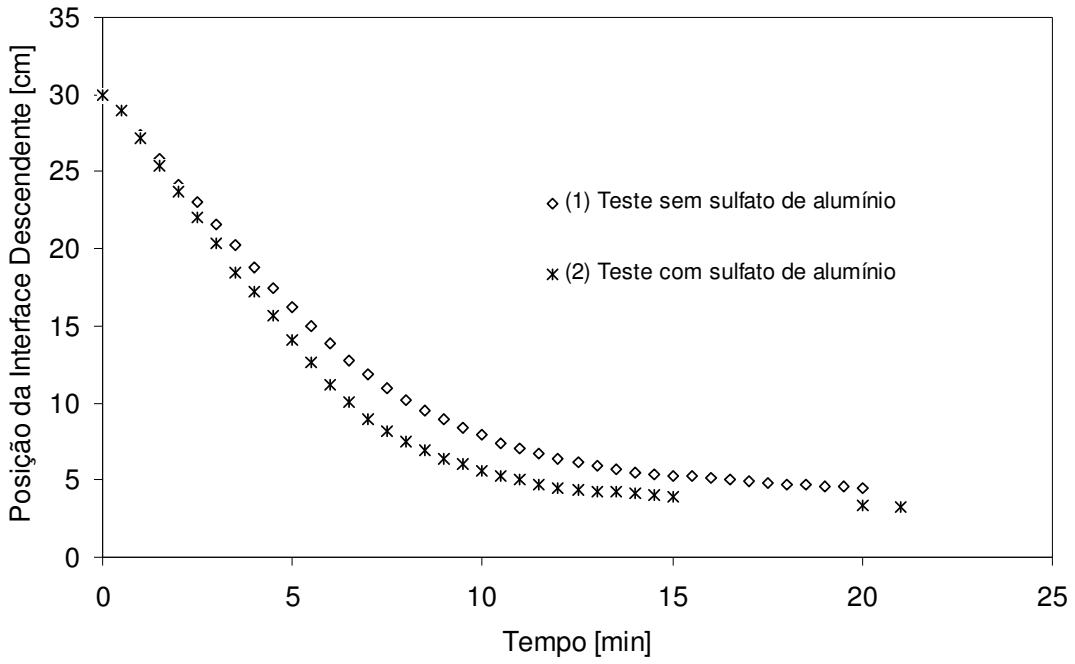


Figura 4.6 - Comparação entre testes com e sem sulfato de alumínio, pH=6 e concentração de sulfato de alumínio de 5 mg/L de suspensão.

Nota-se que nos testes de sedimentação, na região de sedimentação livre, os sólidos nas suspensões com e sem sulfato de alumínio decantam com velocidades muito próximas (inclinações das curvas próximas), ou seja:

$$v_{so1}(\varepsilon_{so1}) \approx v_{so2}(\varepsilon_{so2}) \approx cte \tag{4.3}$$

Considerando que na região de sedimentação livre a velocidade de sedimentação v_s é constante e a pressão nos sólidos *Ps* é aproximadamente nula e sabendo-se que a força resistiva é dada pela equação de Darcy,

$$m = \frac{\mu v_s}{k(\varepsilon_s)} \tag{4.4}$$

pode-se escrever a equação do movimento como:

$$0 = -\frac{\mu v_s}{k(\varepsilon_s)} + (\rho_s - \rho f)\varepsilon_s g \tag{4.5}$$

que, explicitando *k*, chega-se a,

$$k(\varepsilon_s) = \frac{\mu v_s}{(\rho_s - \rho f)\varepsilon_s g} \tag{4.6}$$

Aplicando a equação anterior aos experimentos sem e com sulfato de alumínio, chega-se a:

$$k_{o1}(\varepsilon_{so1}) = \frac{\mu v_{s1}}{(\rho_s - \rho f)\varepsilon_{so1} g} \tag{4.7}$$

$$k_{o2}(\varepsilon_{so2}) = \frac{\mu v_{s2}}{(\rho_p - \rho f)\varepsilon_{so2} g} \tag{4.8}$$

No instante inicial $\varepsilon_{so1} = \varepsilon_{so2} = \varepsilon_{so}$ e sendo as velocidades iniciais muito próximas, tem, portanto, $k_{o1} = k_{o2}$. Após simplificações, chega-se a:

$$\frac{v_{s1}}{\Delta\rho_s} = \frac{v_{s2}}{\Delta\rho_p} \tag{4.9}$$

Como as velocidades de sedimentação para os testes com e sem sulfato de alumínio são muitos próximas, como pode ser notado na Figura 4.6, pode-se considerar a hipótese de que o valor da densidade do aglomerado de partículas é muito próxima do valor da densidade do sólido.

4.2.2 - Caracterização do sistema particulado

Foi utilizada a metodologia de Michaels e Borger (1962) para o cálculo do diâmetro do aglomerado de partículas, sendo o grau de floculação (k_f) equivalente ao volume de flocos pela massa de sólido seco.

Como a densidade do floco pode ser dada por:

$$\rho_{fl} - \rho = \frac{\rho_s - \rho}{k_f \rho_s} \tag{4.10}$$

e $\rho_s = \rho_{fl}$, então

$$k_f \rho_s = 1 \tag{4.11}$$

Como foi considerado para este trabalho que a densidade do aglomerado de partículas é igual a do sólido, ou seja, 2,40 g/cm^3 o valor de k_f é 0,4167 cm^3/g.

Através de testes de proveta com suspensões de caulim e sulfato de alumínio pode-se obter os pares (C, v_s), mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Dados de concentração e velocidade obtidos através de ensaio de sedimentação em batelada, pH=6 e concentração de sulfato de alumínio igual a 0,2mg/g de sólido.

C (g/cm^3)	v_s (cm/min)
0,024	2,700
0,036	1,122
0,048	0,762
0,060	0,666
0,072	0,444
0,084	0,414
0,096	0,402
0,108	0,390
0,120	0,330

A Figura 4.7 mostra o ajuste paramétrico das variáveis *k* e $v_{t\infty}$, Equação (4.12), aos dados da Tabela 4.4, utilizando o pacote computacional *Statistica*®. O coeficiente de ajuste foi de 0,88.

$$v_s = v_{t\infty}(1 - 0{,}4167C)^n \tag{4.12}$$

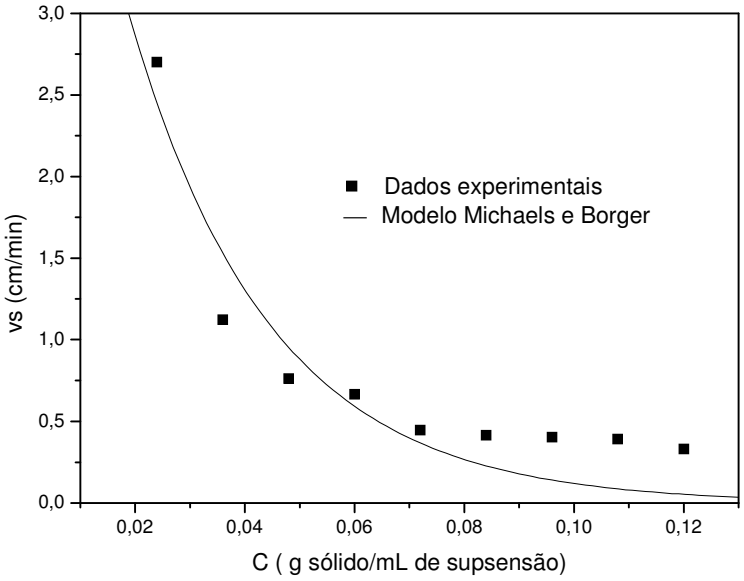


Figura 4.7 - Ajuste paramétrico das variáveis k e $v_{t\infty}$.

Desta forma, pode-se observar os valores dos parâmetros *n* e $v_{t\infty}$ mostrados abaixo na Equação (4.13):

$$v_s = 6{,}2368\left(1 - 0{,}4167C\right)^{92{,}9904} \text{ (cm/min)} \tag{4.13}$$

Assim utilizando a Equação (2.70) é possível encontrar o valor do diâmetro do floco, d_{fl} = 36,9μm. Este resultado indica que a formação de um aglomerado de 5 a 6 partículas e não de um floco propriamente dito, reforçando a hipótese que o valor da densidade do floco é muito próximo do valor da densidade do sólido.

4.3 - Determinação de equações constitutivas para a pressão nos sólidos

As equações constitutivas para a pressão nos sólidos foram encontradas utilizando a metodologia de França (1995), citada neste trabalho. As Tabelas 4.5 e 4.6 mostram os resultados encontrados para as suspensões de caulim com e sem a adição de sulfato de alumínio, respectivamente.

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6 foram utilizados para estimar, através de regressão não-linear, os parâmetros para a equação proposta por Tiller e Leu (1980) apresentados na Equação (4.14):

$$P_s = Pa\left[\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sc}}\right)^{\frac{1}{\beta}} - 1\right] \tag{4.14}$$

Pode-se estimar os parâmetros reescrevendo a equação como:

$$P_s\left(L\right) = P_a\left\{\left[1 + aL\right]^b - 1\right\} \tag{4.15}$$

em que $a = \frac{\left(1-\beta\right)}{P_a}\left(\rho_s - \rho_f\right) g\varepsilon_{sc}$ e $b = \frac{1}{1-\beta}$

Com um pacote computacional apropriado, os parâmetros a, b e P_a (e conseqüentemente β e ε_{sc}) foram estimados, adotando como variável de entrada a altura *L* e como variável medida $P_s\left(L\right)$.

Tabela 4.5 – Pressão dos sólidos para o sedimento de caulim sem adição de sulfato de alumínio.

Massa do sólido (g)	Altura do sedimento (L)	Diâmetro da proveta (cm)	$\bar{\varepsilon}_s = \frac{\left(m_s / \rho_s\right)}{V_{sed}}$	$P_s(L) = \left(\rho_s - \rho_f\right) g L \bar{\varepsilon}_s$ (dyn/cm^2)
10	4,2	3,9	0,083	479,80
15	5,2	3,9	0,101	719,70
20	6,7	3,9	0,104	959,60
25	8,2	3,9	0,106	1199,49
35	10,8	3,9	0,113	1679,29
45	12,9	3,9	0,121	2159,09
55	15,6	3,9	0,123	2638,89
65	17,3	3,9	0,131	3118,69
75	20,8	3,9	0,126	3598,48
85	25,1	3,9	0,118	4078,28
10	6,9	3,03	0,084	794,88
15	9	3,03	0,096	1192,32
20	10	3,03	0,116	1589,76
25	13,6	3,03	0,106	1987,20
35	17,9	3,03	0,113	2782,08
45	22,3	3,03	0,117	3576,96
50	22,8	3,03	0,127	3974,40
55	28,2	3,03	0,113	4371,85
60	30	3,03	0,116	4769,29
70	33,6	3,03	0,120	5564,17
3	8,7	1,3	0,108	1295,45
5	11,1	1,3	0,141	2159,09
7	15,6	1,3	0,141	3022,73
8	21,5	1,3	0,117	3454,54
9	22,2	1,3	0,127	3886,36
10	24,9	1,3	0,126	4318,18
11	26,4	1,3	0,131	4750,00
12	28,9	1,3	0,130	5181,82
9	9,1	1,96	0,137	1709,69
10	10,6	1,96	0,130	1899,66
11	11,7	1,96	0,129	2089,62
12	12,6	1,96	0,132	2279,59
13	13	1,96	0,138	2469,55

Tabela 4.6 – Pressão dos sólidos para o sedimento de caulim com adição de sulfato de alumínio.

Massa do sólido (g)	Altura do sedimento (L)	Diâmetro da proveta (cm)	$\bar{\varepsilon}_s = \frac{\left(m_s / \rho_{fl} \right)}{V_{sed}}$	$P_s(L) = \left(\rho_{fl} - \rho_f \right) g L \bar{\varepsilon}_s$ (dyn/cm^2)
10	4	3,9	0,087	479,80
15	5,3	3,9	0,099	719,70
20	6	3,9	0,116	959,60
25	8,3	3,9	0,105	1199,49
35	11	3,9	0,111	1679,29
45	12,7	3,9	0,124	2159,09
55	15,5	3,9	0,124	2638,89
65	16,6	3,9	0,137	3118,69
75	18	3,9	0,145	3598,48
10	5,8	3,03	0,099	794,88
15	8,1	3,03	0,107	1192,32
20	8,2	3,03	0,141	1589,76
25	13,3	3,03	0,109	1987,20
35	19	3,03	0,107	2782,08
45	20,8	3,03	0,125	3576,96
50	22,5	3,03	0,128	3974,40
55	26,7	3,03	0,119	4371,85
60	24,6	3,03	0,141	4769,29
3	3	1,96	0,138	569,90
5	4,9	1,96	0,141	949,83
7	7	1,96	0,138	1329,76
9	8,3	1,96	0,149	1709,69
10	9,6	1,96	0,144	1899,66
11	11,7	1,96	0,129	2089,62
12	12,4	1,96	0,133	2279,59
13	12	1,96	0,149	2469,55
14	12,7	1,96	0,152	2659,52
5	13,1	1,3	0,119	2159,09
7	18,5	1,3	0,118	3022,73
8	20,8	1,3	0,1208	3454,54
9	24,6	1,3	0,115	3886,36
10	25,4	1,3	0,124	4318,18
11	24,4	1,3	0,141	4750,00

A equação de ajuste da pressão nos sólidos em função da altura do sedimento, Equação (4.15), assume a forma a seguir:

$$P_s(L) = 0{,}611\left[(1+254{,}14L)^{1{,}0094}+1\right], \text{ (dyn/cm}^2\text{)} \tag{4.16}$$

e a equação constitutiva, Equação (4.14), para qual os parâmetros foram estimados, adquiri a seguinte forma:

$$P_s = 0{,}611\left[\left(\frac{\varepsilon_s}{0{,}114}\right)^{\frac{1}{0{,}0093}}-1\right], \text{ (dyn/cm}^2\text{)} \tag{4.17}$$

Para os experimentos com sulfato de alumínio a equação de ajuste da pressão nos sólidos em função da altura do sedimento, Equação (4.15), torna-se:

$$P_s(L) = 0{,}8985\left[(1+149{,}22L)^{1{,}034}+1\right], \text{ (dyn/cm}^2\text{)} \tag{4.18}$$

Para a equação constitutiva, Equação (4.12), tem-se:

$$P_s = 0{,}8985\left[\left(\frac{\varepsilon_s}{0{,}1067}\right)^{\frac{1}{0{,}033}}-1\right], \text{ (dyn/cm}^2\text{)} \tag{4.19}$$

As Equações (4.16) e (4.18) são representadas pelas Figuras 4.8 e 4.9, respectivamente, e mostram o ajuste dos pontos experimentais a estas equações.

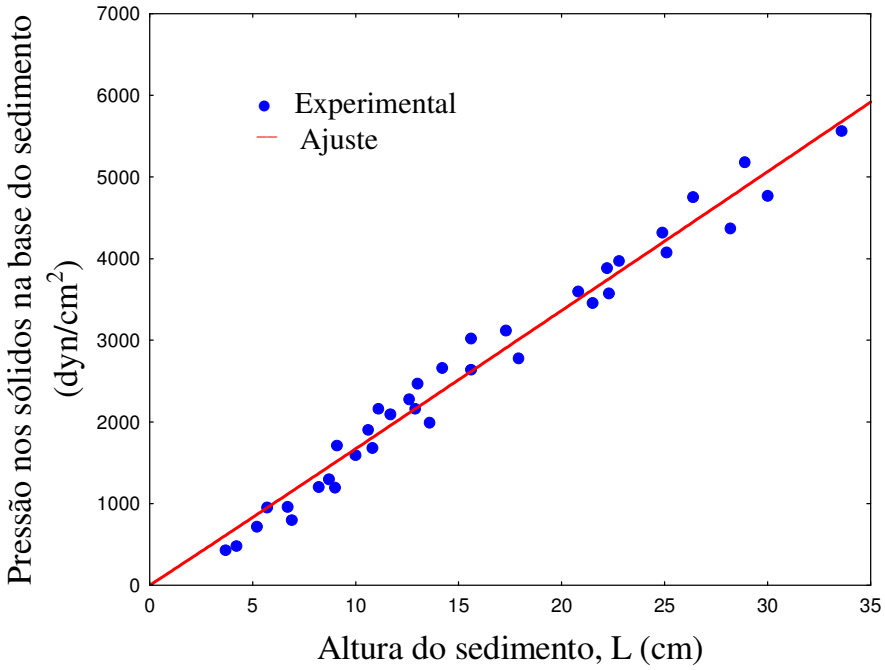


Figura 4.8 – Distribuição de pressão nos sólidos na base do sedimento.

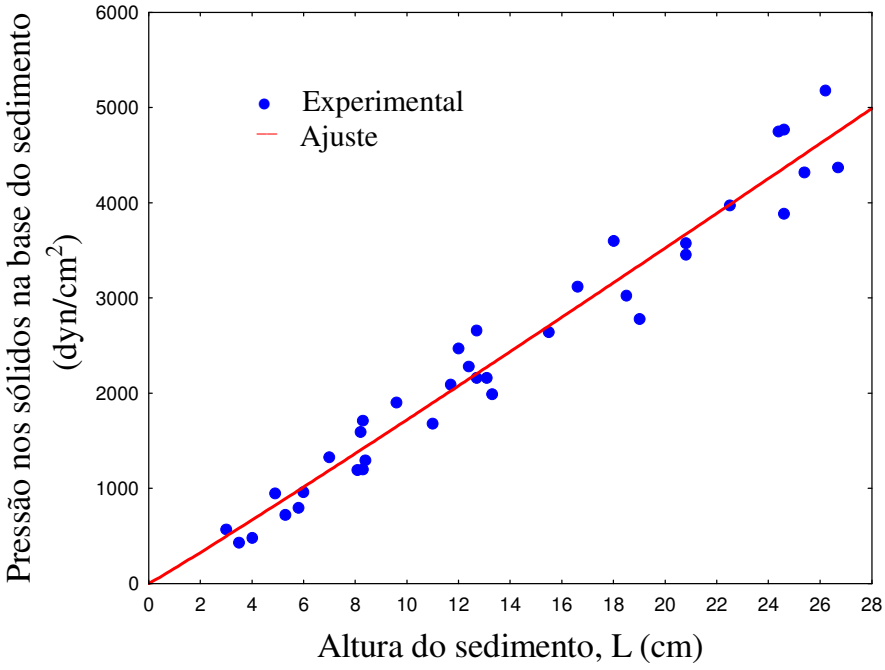


Figura 4.9 – Distribuição de pressão nos sólidos na base do sedimento para suspensões com sulfato de alumínio.

A equação de Tiller e Leu é um dos modelos mais utilizados na literatura, pois este modelo apresenta parâmetros importantes como à concentração crítica ε_{sc}, sendo esta a menor concentração volumétrica onde começa a haver o efeito de pressão nos sólidos, e assim ser possível calcular a pressão crítica P_{sc}. No entanto ele produz uma inconsistência física, pois quando a concentração assume o valor zero a equação não fornece o valor $P_s = 0$ e sim o valor do parâmetro Pa. Isso equivale a dizer que a pressão nos sólidos na região de líquido clarificado não é nula.

Além disso, uma vez que os parâmetros para as equações da pressão no sólido são determinados através de técnicas de regressão não-linear, sabe-se que a estimativa inicial é fundamental para a obtenção de bons resultados. Arouca (2007) mostra que uma boa estimativa inicial aliada a técnica de França et al.(1995) pode conduzir a resultados satisfatórios.

4.3.1 – Análise de um modelo de potências para a pressão nos sólidos

Com o intuito de otimizar os resultados das simulações numéricas e visando minimizar os resíduos entre os valores preditos por equações e observados pela experimentação, Arouca (2007) desenvolveu um modelo para a pressão nos sólidos que pudesse ser uma alternativa ao uso de Tiller e Leu (1980). A equação constitutiva proposta para o ajuste da pressão nos sólidos é apresentada na Equação (4.20):

$$P_S(\varepsilon_S) = a\varepsilon_S{}^b \tag{4.20}$$

na qual a e b são parâmetros ajustáveis do modelo. O ajuste para a pressão nos sólidos, fazendo uso do modelo de potências, é apresentado nas Figuras 4.10 e 4.11 para suspensões com e sem o uso de sulfato de alumínio e os parâmetros da equação são apresentados na Tabela 4.7.

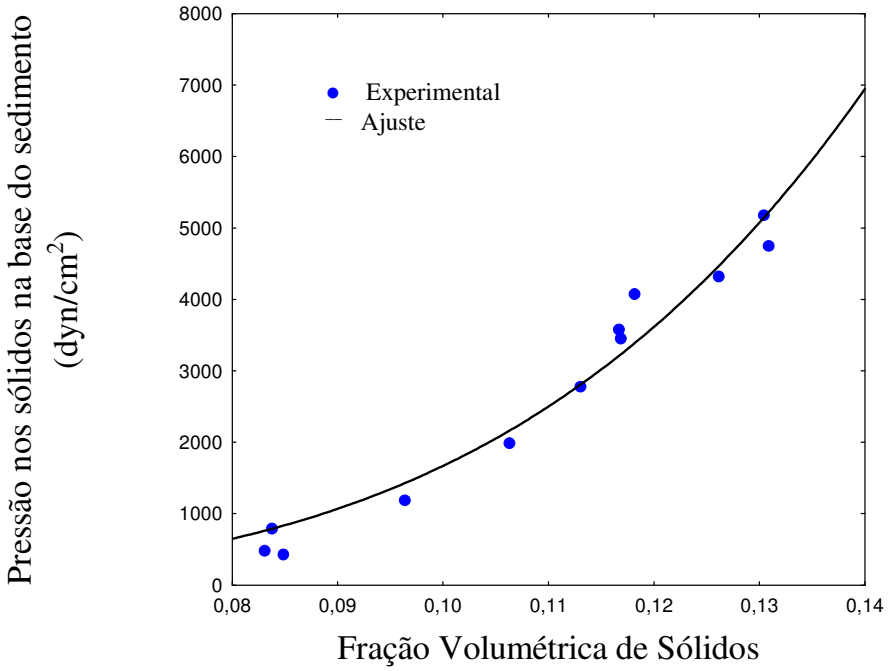


Figura 4.10 - Modelo de potências proposto para a equação constitutiva da pressão nos sólidos.

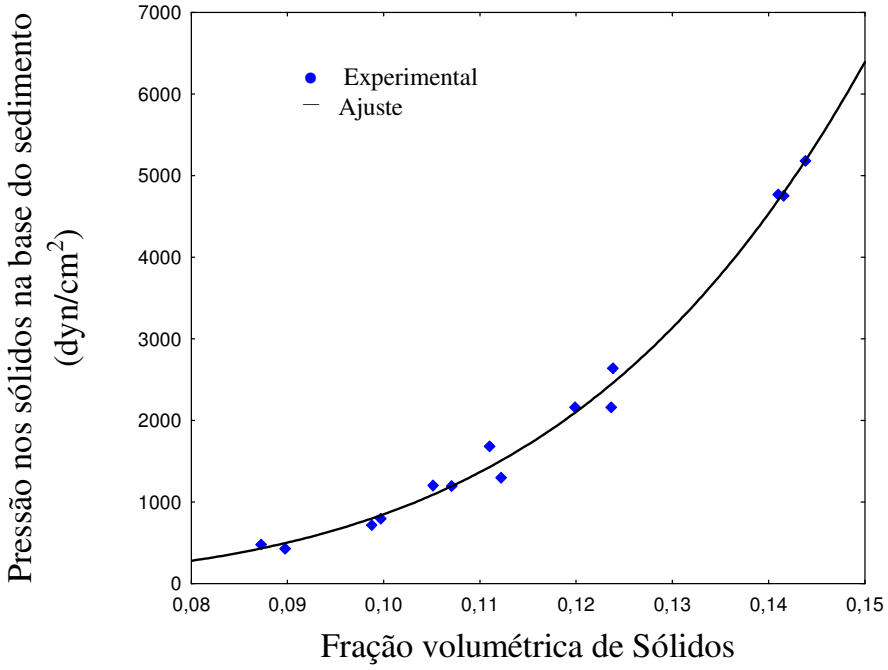


Figura 4.11 - Modelo de potências proposto para a equação constitutiva da pressão nos sólidos com suspensões com sulfato de alumínio.

Tabela 4.7- Parâmetros de ajuste do modelo de potências para a pressão nos sólidos.

	a (dyn/cm^2)	b(-)	r^2
Sem sulfato de alumínio	2,8795 .10^7	4,2366	0,96
Com sulfato de alumínio	8,0781 .10^7	4,9783	0,99

Observando as Figuras 4.10 e 4.11 nota-se que os dados ajudaram bem à Equação (4.12) e que o modelo não fere a restrição física $Ps = 0$ em $\varepsilon_s = 0$, como observado na equação de Tiller e Leu (1980), garantindo a consistência com o fenômeno físico.

4.4 - Determinação da permeabilidade do meio poroso de suspensões aquosas de caulim

A permeabilidade pode ser determinada utilizando uma técnica simples que se baseia em testes de sedimentação em proveta onde a interface superior é monitorada com o tempo para a região de sedimentação livre. Estes testes foram realizados numa faixa de concentrações volumétricas de sólidos iniciais que variavam de 1 a 5% em volume, com intervalo de 0,5%. Os resultados podem ser vistos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resultados experimentais do teste para a determinação da permeabilidade sem sulfato de alumínio

ε_s	v_s (cm/s)	k (cm^2)
0,01	0,0320	2,0714.10^{-5}
0,015	0,0140	6,0416.10^{-6}
0,02	0,0104	3,3661.10^{-6}
0,025	0,0066	1,7089.10^{-6}
0,03	0,0062	1,3378.10^{-6}
0,035	0,0056	1,0357.10^{-6}
0,04	0,0048	7,7678.10^{-7}
0,045	0,0047	6,7609.10^{-7}
0,05	0,0039	5,0491.10^{-7}

Para o cálculo da permeabilidade com suspensões com sulfato de alumínio foi utilizada a mesma metodologia. Estes testes foram realizados na mesma faixa de

concentrações volumétricas de sólidos que variavam de 1 a 5% em volume com intervalo de 0,5%. Os resultados são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resultados experimentais do teste para a determinação da permeabilidade com sulfato de alumínio

ε_s	v_s (cm/s)	k (cm^2)
0,01	0,0450	0,0000291
0,015	0,0187	$8,0699.10^{-6}$
0,02	0,0127	$4,1105.10^{-6}$
0,025	0,0111	$2,8741.10^{-6}$
0,03	0,0074	$1,5967.10^{-6}$
0,035	0,0069	$1,2761.10^{-6}$
0,04	0,0067	$1,0842.10^{-6}$
0,045	0,0065	$9,3502.10^{-7}$
0,05	0,0055	$7,1205.10^{-7}$

Observando as Tabelas 4.8 e 4.9 pode-se notar que a permeabilidade do meio diminui com o aumento da concentração de sólidos. Nota-se também que a permeabilidade da suspensão com sulfato de alumínio neste caso foi maior, pois a adição de sulfato de alumínio torna a velocidade de sedimentação maior.

Os resultados foram ajustados utilizando a equação de Tiller e Leu (1980) para a permeabilidade do meio poroso, Equação (4.21):

$$k = k_o \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sc}} \right)^{-\eta} \tag{4.21}$$

na qual k e ε_s são parâmetros experimentais. A Tabela 4.10 apresenta os valores dos parâmetros da equação de Tiller e Leu. Sendo ε_{sc} já determinada pela equação da pressão nos sólidos.

Tabela 4.10 – Parâmetros estimados para equação constitutiva de permeabilidade.

Parâmetros	Suspensão sem sulfato de alumínio	Suspensão com sulfato de alumínio
k_0	$2{,}427.10^{-8}$	$3{,}393.10^{-8}$
η	2,753	2,860
r^2	0,997	0,996

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram o ajuste dos pontos experimentais à equação de Tiller e Leu.

A equação de Tiller e Leu ajustou bem os dados experimentais, obtendo um coeficiente de ajuste da ordem de 0,99 para os dados de suspensões com e sem o uso de sulfato de alumínio.

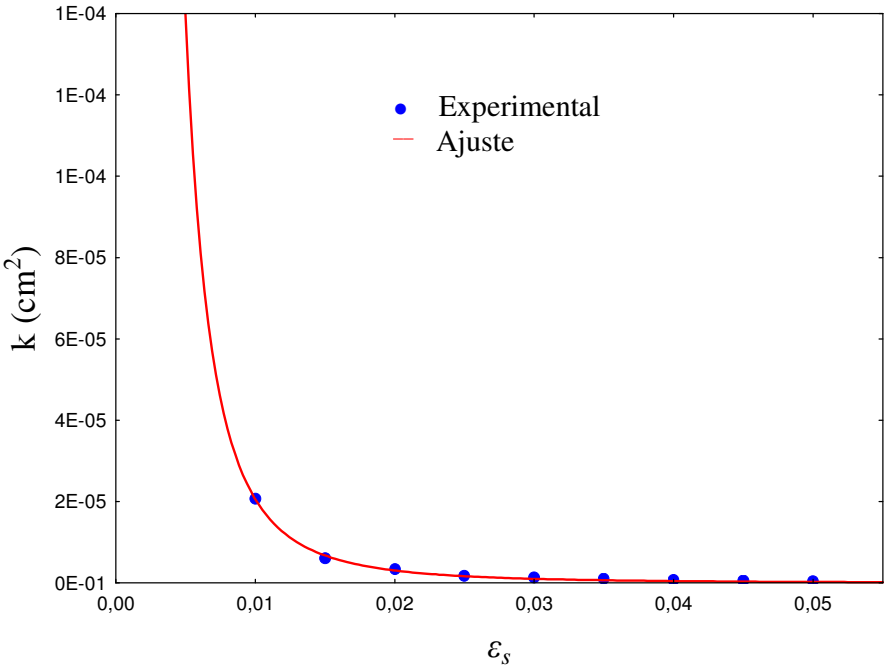


Figura 4.12 – Ajuste dos dados experimentais pela equação de TILLER e LEU (1980).

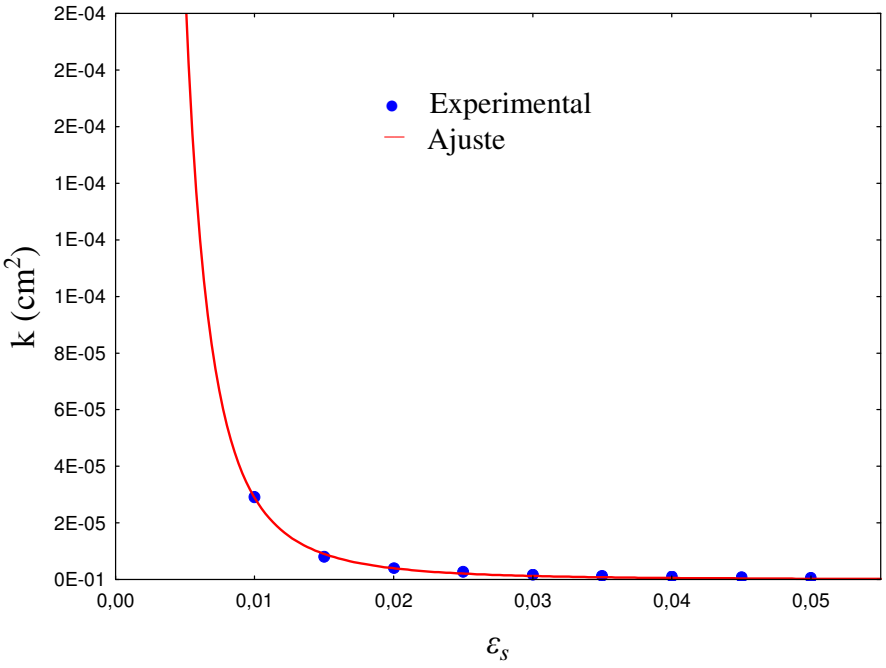


Figura 4.13 – Ajuste dos dados experimentais pela equação de TILLER e LEU (1980) para suspensões com sulfato de alumínio.

4.5 - Resultado do estudo experimental no sedimentador operando continuamente em estado estacionário com suspensões aquosas de caulim

Com o intuito de analisar o desempenho de sedimentadores com suspensões de caulim com e sem a adição de sulfato de alumínio foram determinadas variáveis como a altura da região de compactação, o perfil de porosidade ao longo do sedimentador e as concentrações da lama.

Desse modo foram realizados experimentos com concentrações de caulim a 1% em volume, já que com concentrações maiores a altura da suspensão era muito alta comparada com a altura do sedimentador.

Vários testes foram realizados para um fluxo de sólidos de $7{,}4.10^{-5}$ cm/s e na Tabela 4.11 podem ser vistos os principais resultados encontrados no testes experimentais para as suspensões de caulim sem o uso de sulfato de alumínio.

Tabela 4.11 - Resultados experimentais obtidos no sedimentador contínuo operando com suspensões de caulim.

Q_F (cm^3/s)	Q_u (cm^3/s)	ε_{sF}	ε_{su}	L(cm)
0,74	0,33	0,0099	0,0381	5,0
0,74	0,33	0,0098	0,0386	4,9
0,74	0,33	0,0097	0,0398	5,0

Os principais resultados encontrados no testes experimentais para as suspensões de caulim com o uso de sulfato de alumínio podem ser vistos Tabela 4.12. O pequeno aumento na vazão foi devido ao acréscimo de sulfato de alumínio, pois a vazão de sulfato de alumínio era de 0,01 cm^3/s.

Tabela 4.12 - Resultados experimentais obtidos no sedimentador contínuo operando com suspensões de caulim com sulfato de alumínio.

Q_F (cm^3/s)	Q_o (cm^3/s)	ε_{sF}	ε_{su}	L(cm)
0,75	0,33	0,0103	0,0492	4,3
0,75	0,33	0,0101	0,0490	4,2
0,75	0,33	0,0099	0,0521	4,2

Com o sedimentador operando com as vazões mostradas nas Tabelas 4.11 e 4.12 foi obtido uma corrente de *overflow* praticamente isenta de sólidos tanto para o caso de sedimentador operando com e sem o sulfato de alumínio.

Nota-se que para as mesmas vazões e com a mesma quantidade de sólidos entrando o sedimentador operando com suspensões com sulfato de alumínio obteve uma concentração de underflow maior que o com sem sulfato de alumínio.

A altura no sedimentador utilizando o sulfato de alumínio é menor que a do sedimentador com suspensão de caulim sem o uso de sulfato de alumínio. Isso já era esperado, já que o uso de sulfato de alumínio tem o objetivo de fazer as partículas aglomerarem e formarem um sedimento de menor altura.

Com intuito de observar o efeito do sulfato de alumínio foram utilizados pontos de amostragem laterais para levantar a distribuição de concentrações no sedimentador, tornando possível a visualização das diferentes regiões durante a operação do equipamento.

A distribuição de concentrações obtida ao longo do equipamento pode ser vista nas Figuras 4.14 e 4.15. As alturas menores são as mais próximas da base do equipamento.

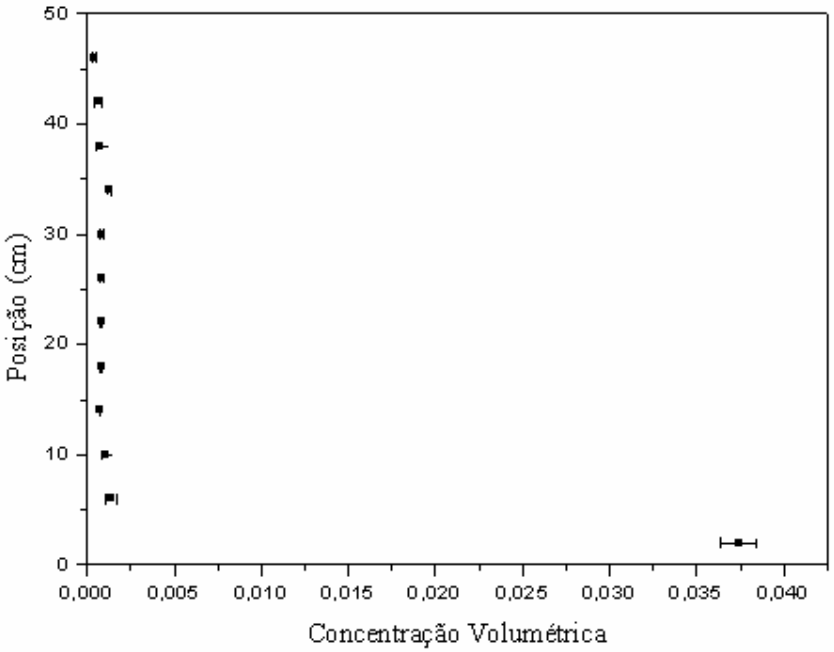


Figura 4.14 - Perfil de concentração do sedimentador convencional com suspensão de caulim sem sulfato de alumínio.

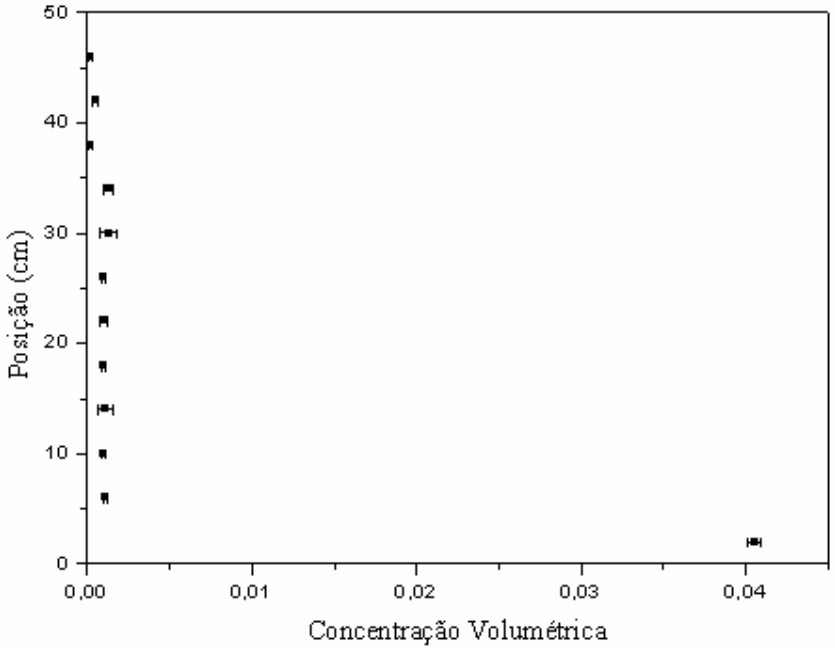


Figura 4.15 - Perfil de concentração do sedimentador convencional com suspensão de caulim com sulfato de alumínio.

Foram observadas duas regiões distintas, uma de líquido clarificado e uma região de leito poroso expandido com concentração menor que a da alimentação e pequena variação com a posição do equipamento.

Nota-se que para o caso do sedimentador com sulfato de alumínio na posição mais próxima da base do equipamento (2 cm) a concentração de sólidos no sedimentador é maior, acima de 4% já para o sedimento sem sulfato de alumínio a concentração está entre 3,5 e 4%.

4.6 - Determinação da capacidade do sedimentador e da altura do sedimento segundo a metodologia de Kynch (1952)

A metodologia de Kynch foi aplicada a ensaios de sedimentação em batelada da suspensão de caulim e caulim/sulfato de alumínio, objetivando estudar o efeito da altura da coluna de suspensão sobre o projeto de sedimentadores. Foi utilizada uma proveta longa que possibilitou três diferentes alturas de coluna de suspensão com três diferentes concentrações.

As Tabelas 4.13 e 4.14 apresentam os resultados obtidos para a capacidade e altura do sedimento, determinados a partir das Equações (3.12) e (3.15), para sedimentadores projetados através do método de Kynch.

Damasceno e Massarani (1990) observaram que o parâmetro β parecia ser independente do z_0 apenas para concentrações ε_{so} muito baixas, para valores de ε_{so} superiores a 1%, β é uma função decrescente de z_0 e ε_{su}. Isto pode ser observado nas Tabelas 4.13 e 4.14 onde o parâmetro β torna-se menor com o aumento de z_0 e ε_{su}.

Pode-se ser ainda observado que tomando como base a Equação (3.10) que a área do sedimentador é tanto menor quanto maior for β, isto é, quanto menores forem z_0 e ε_{su}.

A altura do sedimento depende fortemente do parâmetro β t_R que é crescente com z_0 e ε_{su}, estes resultados também foram observados por Damasceno e Massarani (1990).

Tabela 4.13 – Altura do sedimento e capacidade de sedimentadores operando com suspensões aquosas de caulim

ε_{so}	ε_{su}	z_0 (cm)	β (cm/min)	$\beta\, t_R$ (cm)	q_s (kg/m^{2}h)	H (cm)
0,01	0,02	30	5,45	32,46	78,55	21,6
		45	4,53	45,94	65,13	30,6
		60	4,29	74,73	61,71	49,8
	0,03	30	3,70	20,28	53,33	9,0
		45	2,96	23,32	42,63	10,4
		60	2,78	28,49	40,00	12,7
	0,04	30	2,86	11,59	41,23	3,8
		45	2,27	12,39	32,73	4,1
		60	2,17	29,54	31,30	9,8
0,02	0,03	30	1,91	25,14	38,1	22,3
		45	1,61	32,26	33,1	28,7
		60	1,84	44,17	37,5	39,3
	0,04	30	1,32	17,89	55,0	11,9
		45	1,15	18,18	46,5	12,1
		60	1,30	21,98	53,0	14,7
	0,045	30	1,17	12,64	33,8	7,5
		45	0,98	13,95	28,4	8,3
		60	1,17	17,64	33,6	10,5
0,03	0,04	30	1,38	19,01	59,7	19,0
		45	1,50	27,78	64,8	27,8
		60	1,55	38,66	66,8	38,7
	0,045	30	1,15	13,70	49,8	12,2
		45	1,21	16,98	52,1	15,1
		60	1,24	22,96	53,6	20,4
	0,05	30	1,02	12,80	44,2	10,2
		45	1,06	15,69	45,7	12,5
		60	1,08	19,91	46,5	15,9

Nota-se que a altura da coluna de suspensão tem uma grande influência no ensaio em proveta sobre o projeto de sedimentadores. Assim foi provado mais uma vez que o parâmetro β parece funcionar como um fator de correção no projeto de sedimentadores pelo método de Kynch.

No caso do sedimento de caulim com o uso de sulfato de alumínio a capacidade prevista do sedimentador é maior para o sedimento, com isso a altura do sedimento também é maior. Tem-se um aumento considerável na capacidade enquanto a altura aumenta percentualmente menos.

Tabela 4.14 – Altura do sedimento e capacidade de sedimentadores operando com suspensões aquosas de caulim com sulfato de alumínio

ε_{so}	ε_{su}	z_0 (cm)	β (cm/min)	$\beta\, t_R$ (cm)	q_s (kg/m^{2}h)	H (cm)
0,01	0,03	30	4,62	20,98	66,5	9,3
		45	3,75	29,61	54,0	13,2
		60	3,61	39,43	52,0	17,5
	0,04	30	3,75	19,32	54,0	6,4
		45	2,95	22,00	42,5	7,3
		60	2,84	29,30	40,9	9,8
	0,05	30	3,13	13,26	45,0	3,5
		45	2,50	18,64	36,0	5,0
		60	2,38	23,09	34,3	6,2
0,02	0,03	30	2,52	34,01	72,6	30,2
		45	2,54	45,90	73,2	40,8
		60	2,24	58,15	64,6	51,7
	0,04	30	1,69	16,10	48,7	10,7
		45	1,71	21,12	49,4	14,1
		60	1,54	22,79	44,3	15,2
	0,05	30	1,37	8,72	39,6	4,7
		45	1,42	14,74	40,8	7,9
		60	1,27	22,32	36,5	11,9
0,03	0,04	30	1,67	23,69	72,0	23,7
		45	1,58	36,97	68,5	37,0
		60	1,61	50,40	69,7	50,4
	0,045	30	1,35	15,93	58,5	14,2
		45	1,28	23,44	55,2	20,8
		60	1,30	29,89	56,3	26,6
	0,05	30	1,17	10,89	50,5	8,7
		45	1,11	15,68	47,8	12,5
		60	1,12	18,62	48,3	14,9

Nos resultados experimentais foi encontrada uma concentração volumétrica de aproximadamente 0,04 para suspensões sem sulfato de alumínio, com um fluxo de sólidos de 6,8 kg/m^{2}h, a altura L do sedimento foi em média de 5,0 cm. No método de Kynch foi encontrada uma capacidade maior, no entanto a altura se mostra mais sensível a concentração de lama do que o fluxo de sólidos. Desse modo podemos notar que a altura mais próxima da altura encontrada para o experimental foi para uma altura de suspensão de 45 cm, com uma diferença de 18% da encontrada no experimental, sendo que o sedimentador tinha uma altura de 50 cm.

Para suspensões com sulfato de alumínio a concentração volumétrica na lama era de aproximadamente 0,05, com um mesmo fluxo de sólidos das suspensões sem sulfato de alumínio, a altura H do sedimento foi em média de 4,2 cm. Da mesma forma que

anteriormente a altura mais próxima de 4,2 cm foi para uma altura de suspensão de 45 cm, com uma diferença de 16%. Isto comprova que a altura da suspensão no ensaio de proveta tem que ser igual á altura do sedimentador, para que o método de Kynch seja utilizado e possa obter melhores resultados.

4.7 - Cálculo da altura do sedimento utilizando modelos de Tiller e Chen (1988) e de Arouca (2007)

O cálculo da altura do sedimento frente às condições operacionais utilizadas é responsável por determinar as condições operacionais limite para o equipamento opere satisfatoriamente, promovendo a separação das fases. Para que este cálculo seja realizado é preciso o levantamento de dados experimentais para o estabelecimento de equações constitutivas para a permeabilidade e pressão nos sólidos.

Com a determinação da altura da região de compactação, perfis de porosidade, concentração da lama, dentre outras, é possível a análise do desempenho dos sedimentadores.

Nesta seção serão analisados dois modelos para determinação da capacidade e da altura do sedimento.

4.7.1 - Resultados da simulação do modelo de Tiller e Chen (1988).

Nesta seção, serão apresentados os resultados encontrados na simulação de clarificadores convencionais utilizando o modelo de Tiller e Chen (1988) apresentado no Capítulo 2. Com estes equipamentos operando no estado estacionário utilizando suspensões aquosas de caulim. Para tal foram encontradas as equações constitutivas de pressão e permeabilidade para os sedimentos de caulim, respectivamente mostradas abaixo.

A equação constitutiva proposta para o ajuste da pressão nos sólidos com suspensão sem sulfato de alumínio é:

$$P_s(\varepsilon_s) = 2{,}8795.10^7\,\varepsilon_s{}^{4{,}2366} \quad (\text{dyn/cm}^2) \tag{4.22}$$

e com sulfato de alumínio

$$P_s(\varepsilon_s) = 8{,}0781.10^7\,\varepsilon_s{}^{4{,}9783} \quad (\text{dyn/cm}^2) \tag{4.23}$$

Para permeabilidade a equação constitutiva para sedimentos de caulim sem sulfato de alumínio, foi:

$$k = 2{,}427.10^{-08}\left(\frac{\varepsilon_s}{0{,}114}\right)^{-2{,}7529} \quad (\text{cm}^2) \tag{4.24}$$

e com sulfato de alumínio

$$k = 3{,}393.10^{-08}\left(\frac{\varepsilon_s}{0{,}1067}\right)^{-2{,}8597} \quad (\text{cm}^2) \tag{4.25}$$

Para resolver o modelo, a integral é calculada pelo *Epsilon* algoritmo, com um integrador com subdivisões adaptativas com extrapolação (DONCKER, 1978), disponibilizada no pacote livre QUADPACK, disponível no *Scilab*®.

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram os resultados encontrados para as suspensões de caulim com e sem o uso de sulfato de alumínio.

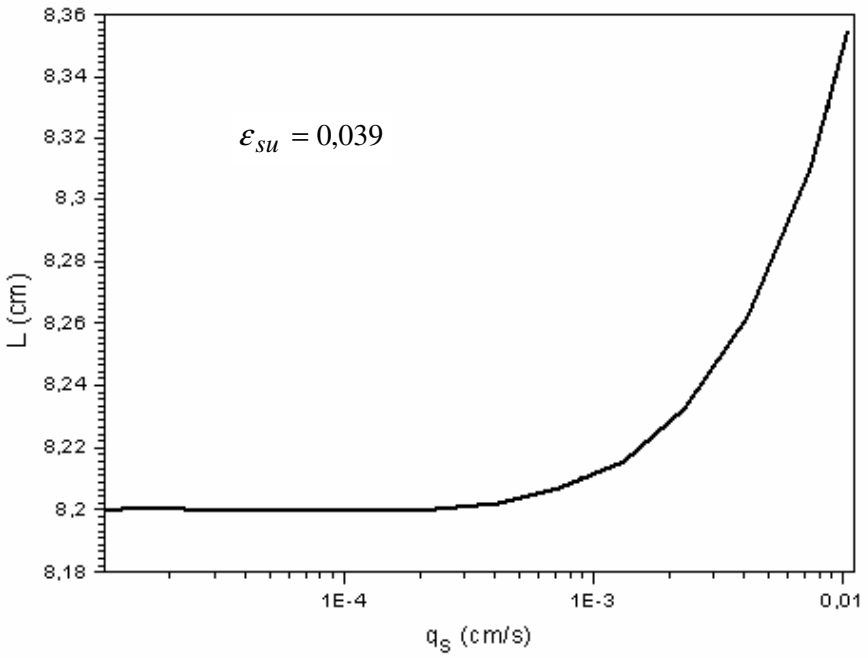


Figura 4.16 – Gráfico da altura do sedimento (L) *versus* fluxo de sólidos (q_s), para suspensões sem sulfato de alumínio.

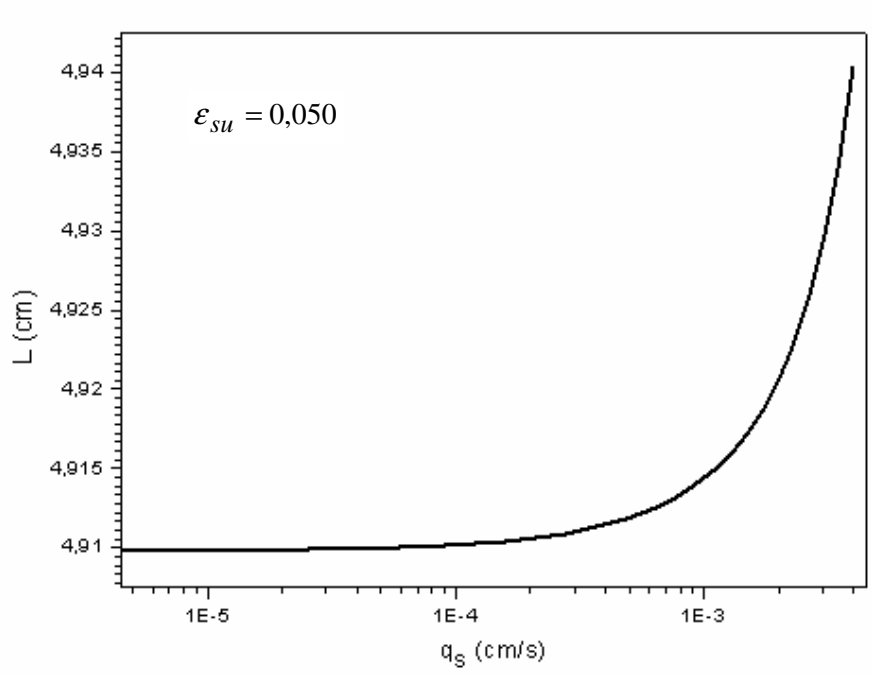


Figura 4.17 – Gráfico da altura do sedimento (L) *versus* fluxo de sólidos (q_s), para suspensões com sulfato de alumínio.

Os dois gráficos mostram um aumento da altura com o aumento do fluxo de sólidos com era esperado. Nota-se também que mesmo para uma concentração de lama maior e com o mesmo fluxo de sólidos o resultado para a suspensão com sulfato de alumínio a altura do sedimento é menor.

Para um fluxo de sólidos de $7{,}4.10^{-5}$ cm/s, para suspensões sem sulfato de alumínio, com concentração de sólidos na lama de 0,039, a altura da lama encontrada experimentalmente foi de aproximadamente 5 cm já na resolução do modelo foi de 8,2 cm. Uma diferença de 39,0%.

Já para o mesmo fluxo de sólidos de $7{,}4.10^{-5}$ cm/s, para suspensões com sulfato de alumínio, com concentração de sólidos na lama de 0,05, a altura da lama encontrada experimentalmente foi de aproximadamente 4,2 cm já na resolução do modelo de Tiller e Chen (1988) foi de 4,9 cm. Uma diferença de 14,3%.

4.7.2 - Resultados da simulação do modelo de Arouca (2007)

Para encontrar os resultados do modelo de Arouca (2007) mostrado no Capítulo 2 foram utilizadas equações constitutivas de pressão e permeabilidade para os sedimentos de caulim com e sem o uso de sulfato de alumínio mostradas na seção 4.8.1.

Com estas equações foi possível encontrar valores para função $\Gamma(\varepsilon_s)$ pela aplicação direta da Equação (2.42). Utilizando $\Delta\rho$ = 1,40g/cm^3, g = 981 cm/s^2, L = 50 cm e μ = 0,01g/cm.s obteve-se os valores de $\Gamma(\varepsilon_s)$, que foram utilizados para determinação da expressão apresentada pela Equações (4.26) e (4.27), para sem e com sulfato de alumínio, respectivamente:

$$\Gamma(\varepsilon_s) = 0{,}7534.\varepsilon_s\left(1+\frac{\varepsilon_s}{0{,}006258}\right)^{-3{,}2027} \tag{4.26}$$

para suspensão sem o uso de sulfato de alumínio e

$$\Gamma(\varepsilon_s) = 0{,}8356.\varepsilon_s\left(1+\frac{\varepsilon_s}{0{,}007953}\right)^{-3{,}4773} \tag{4.27}$$

para suspensão com o uso de sulfato de alumínio, sendo Γ expresso em s^{-1}.

Utilizando estas equações foi possível calcular *L*, para tanto utilizou-se o programa desenvolvido por Azevedo (2009). O modelo foi resolvido com o algoritmo LSODAR pertencente ao pacote ODEPACK (HINDMARSH, 2001), em uma variante que encontra as raízes de um conjunto de funções ao tempo que integra o sistema diferencial. As simulações numéricas foram obtidas utilizando-se o software livre de processamento numérico *Scilab*® .

As Figuras 4.19 e 4.20 mostram os resultados encontrados para as suspensões de caulim com e sem o uso de sulfato de alumínio. Tais resultados são válidos de modo a satisfazer a condição $u_c < u < u_{Dmáx}$, com $u_{Dmáx}$ equivalente à 57,86 % em volume.

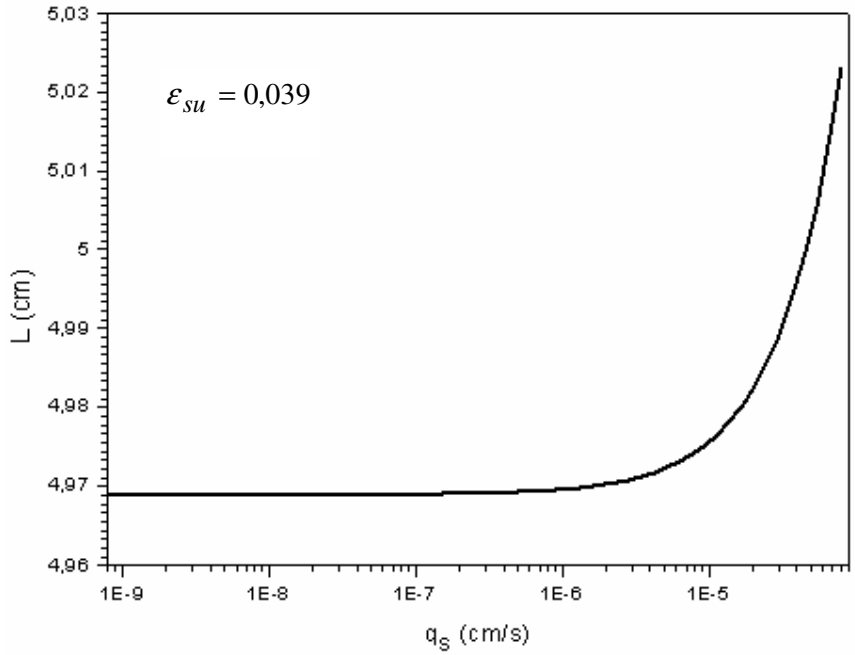


Figura 4.18 – Gráfico da altura do sedimento (L) *versus* fluxo de sólidos (q_s), para suspensões sem sulfato de alumínio, para o modelo Arouca.

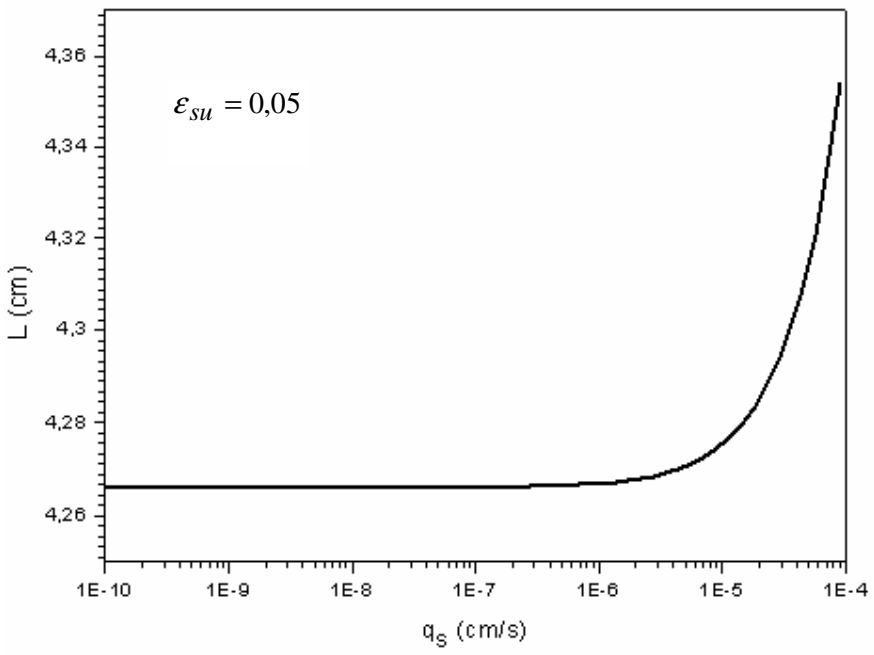


Figura 4.19 – Gráfico da altura do sedimento (L) *versus* fluxo de sólidos (q_s), para suspensões com sulfato de alumínio, para o modelo Arouca.

Assim como o modelo de Tiller e Leu (1988) os dois gráficos mostram um aumento da altura com o aumento do fluxo de sólidos e para uma concentração de lama maior e com o mesmo fluxo de sólidos o resultado para a suspensão com sulfato de alumínio a altura do sedimento é menor.

Quando o valor de fluxo de sólidos é de $7{,}4.10^{-5}$ cm/s, para suspensões sem sulfato de alumínio, com concentração de sólidos na lama de 0,039, a altura da lama encontrada experimentalmente foi de aproximadamente 5 cm já na resolução do modelo de Arouca (2007) foi de 5,02 cm. Este modelo conseguiu prever com eficiência a altura L .

Assim para o mesmo fluxo de sólidos de $7{,}4.10^{-5}$ cm/s, para suspensões com sulfato de alumínio, com concentração de sólidos na lama de 0,05, a altura da lama encontrada experimentalmente foi de aproximadamente 4,2 cm já na resolução do modelo Arouca foi de 4,3 cm.

Os resultados das simulações utilizando o modelo de Arouca (2007) foram mais próximos aos resultados experimentais do que o modelo de Tiller e Chen (1988). Este fato pode ter ocorrido porque o modelo de Tiller e Chen (1988) só leva em consideração o transporte de quantidade de movimento por convecção e o de Arouca (2007) também considera os efeitos difusivos. Para este sistema em que a concentração era alta o efeito da difusão foi relevante, tornando o modelo Arouca (2007) mais preciso.

Capítulo 5
Conclusões e Sugestões

Este Capítulo apresenta as principais conclusões referentes ao estudo da sedimentação com o uso de sulfato de alumínio e propõe sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

5.1 – Conclusões

Levando em consideração os resultados obtidos, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- apenas com a utilização de um polieletrólito torna-se possível a formação do flocos;
- com os resultados do planejamento experimental, pode-se concluir que, para um pH próximo de 7 e concentração de sulfato de alumínio de 5 mg/L, a velocidade de sedimentação foi maior;
- nos experimentos sem adição de polieletrólito pôde-se constatar que as velocidades de sedimentação para os testes com e sem adição de sulfato de alumínio foram muitos próximas. Isso permitiu inferir que a ausência de polieletrólito levou à formação de pequenos aglomerados de partículas e não de flocos, hipótese esta que possibilitou supor que o valor da densidade do aglomerado é muito próxima da densidade do sólido;
- utilizando a metodologia de Michaels e Borger (1962) foi possível obter o valor do diâmetro do aglomerado de 36,9μm. Este resultado indica que a formação de um aglomerado de 5 a 6 partículas e não de um floco propriamente dito. Reforçando a hipótese da densidade do floco ser igual ao do sólido;
- os ensaios propostos por França (1995) se mostraram satisfatórios para a obtenção das equações constitutivas da pressão nos sólidos e da permeabilidade do meio poroso, tanto no caso de sedimentação com e sem adição de sulfato de alumínio, pois promoveram um bom ajuste dos dados experimentais;
- para os experimentos com o sedimentador contínuo operando em estado estacionário foi obtida uma corrente de *overflow* praticamente isenta de sólidos tanto para o caso de

operação com e sem o sulfato de alumínio. Observou-se que a concentração de *underflow* foi maior para suspensões de caulim com sulfato de alumínio;

- para os experimentos objetivando avaliar o efeito da altura inicial da coluna de suspensão sobre a capacidade do sedimentador prevista utilizando o método de Kynch pôde-se concluir que o parâmetro β parece ser independente do z_0 apenas para concentrações iniciais de sólidos (ε_{so}) muito baixas. Para valores de ε_{so} superiores a 1%, β é uma função decrescente de z_0 e ε_{su}. Pode-se ser ainda observado que a área do sedimentador é tanto menor quanto maior for β, isto é, quanto menores forem z_0 e ε_{su}. A altura do sedimento depende fortemente do parâmetro β t_R que é crescente com z_0 e ε_{su}. A altura da coluna de suspensão tem uma grande influência no ensaio em proveta sobre o projeto de sedimentadores. No caso do sedimento de caulim com o uso de sulfato de alumínio a capacidade prevista do sedimentador foi maior, com isso a altura do sedimento também foi maior;
- com a utilização das equações constitutivas obtidas a partir da metodologia proposta por França (1995) pôde-se simular a operação estacionária de sedimentadores a partir dos modelos de Tiller e Chen (1988) e de Arouca (2007). Os resultados das simulações mostraram que as estimações obtidas com o modelo de Arouca levaram a menores desvios quando comparados com os resultados experimentais. Pode-se inferir que isso aconteceu devido ao fato dele considerar o transporte de quantidade de movimento difusivo e convectivo, ao contrário do modelo de Tiller e Chen (1988) que considera apenas o transporte convectivo.

5.2 – Sugestões

De acordo com os resultados obtidos, pode-se efetuar as seguintes sugestões:

- Estudar faixas maiores de concentração de floculante nos testes de sedimentação em batelada;
- quantificar o efeito da adição de polieletrólito na formação de flocos;
- utilizar técnicas não destrutivas para estudar a variação da concentração de sólidos no sedimentador convencional e sedimentadores com outras configurações.
- utilizar o sedimentador como espessador e testar a eficiência do floculante, assim como os modelos utilizados no cálculo da altura do sedimento.

Referências Bibliográficas

ADORJÁN, L. A."A Theory of Sediment Compression", 11th International Mineral Congress, Cagliari, Itália, 1975.

ADORJÁN, L. A. "Determination of Thickener Dimension from Sediment Compression and Permeability Tests Results", *Trans*. *Inst. Min. Met*., 85, 157-163, 1976.

ANESTIS, G. Eine eindimensionale Theorie der Sedimentation in Absetzbeha¨ltern vera¨nderlichen Querschnitts und in Zentrifugen. Doctoral Thesis, Technical University of Vienna, Áustria, 1981.

AROUCA, F.O. "Obtenção experimental das equações constitutivas para o espessamento e filtração utilizando técnica de atenuação de radiações de altas energias". Dissertação de Mestrado. FEQUI/UFU, Uberlândia, Brasil, 2003.

AROUCA, F. O."Uma Contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batelada".Tese de Doutorado, FEQUI/UFU, Uberlândia, Brasil, 2007.

AZEVEDO, C. G. "Simulação da operação de sedimentadores contínuos". Dissertação de Mestrado. FEQUI/UFU, Uberlândia, Brasil, 2009.

BÜRGER, R.; CONCHA, F.; TILLER, F.M. "Applications of the phenomenological theory to several published experimental cases of sedimentation processes". Chemical Engineering Journal , v.80. p.105–117, 2000.

BÜRGER, R.; DAMASCENO, J.J.R.;KARLSEN, K.H. "A mathematical model for batch and continuous thickening of flocculated suspensions in vessels with varying cross- section". International Journal of Mineral Processing, v. 73, p. 183–208,2004.

BÜRGER, R.; NARVÁEZ, A. "Steady-state, control, and capacity calculations for flocculated suspensions in clarifier–thickeners". International Journal of Mineral Processing, v. 84 , p. 274–298, 2007.

CARVALHO, S. H. V. "Projeto e Análise do Desempenho de um Sedimentador Lamelado Piloto para Suspensões Floculentas". Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, 1998.

COE, H. S. & CLEVENGER, G. H." Methods of Determining the Capacities of Slime- Setting Tanks". Am. Inst. Min. Engrs., v.55, p.356-384, 1916.

COELHO, R. M. ; MASSARANI, G. “Fluidodinâmica da partícula sólida isolada”. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Uberlândia, MG, Brasil, pp. 19-23, 1996.

CHU, C.P. ; LEE, D.J.; TAY, J.H. ”Gravitational sedimentation of flocculated waste activated sludge. Water Research”, v. 37, p.155–163, 2003.

DAMASCENO, J. J. R. e MASSARANI, G. “Uma Análise do Método de Kynch para o Projeto de Sedimentadores”. Anais do XVII Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, 283-290, 1990.

DAMASCENO, J. J. R. **“**Uma Contribuição ao Estudo de Espessamento Contínuo”. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1992.

DAMASCENO, J.J.R., HENRIQUE, H. M., MASSARANI, G. “Um Modelo para a Sedimentação Não Estacionária”. XIX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas, Brasil, 1991.

D’AVILA, J. S., SAMPAIO, R. “Equações de Estado para a Pressão no Sólido”. II Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, Brasil, 1976.

DI BERNARDO A., S. e DI BERNARDO L. “Uso de Amido de Mandioca Catiônico como Auxiliar de Floculação”. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

DONCKER E. “An adaptive extrapolation algorithm for automatic integration”. Acm Signum News,13 (2), 12–18, 1978.

FRANÇA, S. C. A., BISCAIA Jr., E. C. e MASSARANI, G. “Estimação de Parâmetros em Equações Constitutivas de Sedimentos”. XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maringá, Brasil, 1995.

FRANÇA, S. C. A.; CARVALHO, S.H.V.; FREIRE, N. O. “Caracterização de suspensões floculentas e de biomassa”. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Uberlândia, MG, Brasil, p. 7-12, 1996.

FRANÇA, S. C. A, Casqueira, R. G. “Ensaios de Sedimentação”. Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais, Parte VI – Desaguamento, cap. 23, pág. 393-408, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

FRANÇA, S. C. A, MASSARANI. G. “Separação sólido-líquido”. Comunicação Técnica elaborada para a 3ª Edição do Livro de Tratamento de Tratamento de Minérios, cap.14, p.571-609, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

FREITAS. K. A. “Efeito da Vazão de Alimentação sobre a altura do leito poroso expandido em um sedimentador filtrante operando em estado estacionário”. Dissertação de Mestrado, FEQUI/UFU, Uberlândia, Brasil, 2002.

GUEDES C. D., PEREIRA J. G., LENA J.C., PAIVA J.F. e LIMA R. M. F. “Coagulação/floculação de suspensões ricas em óxidos de ferro por sulfato de alumínio”. Química Nova, Vol. 27, No. 5, 715-719, 2004.

HINDMARSH, A. C. “Center for Applied Scientific Computing”. Lawrence Livermore National Laboraty, Livermore, U.S.A, 2001.

KYNCH, G. J. “Theory of sedimentation “. Trans. Faraday Soc., cap.48, p. 166-176, 1952.

MASSARANI, G. , “Aspectos da fluidodinâmica em meios porosos”, Revista Brasileira de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 1989.

MICHAELS, A. S.;BOLGER, J.C. “Settling rates and sediment volumes of flocculated kaolin suspensions”. Ind. Engng. Chen. Fundaments, v.1, n.1, p. 24-33,1962.

NUNES, J.F. “Estudo da Sedimentação Gravitacional de Suspensões Floculentas.” Dissertação de Mestrado. FEQUI/UFU, Uberlândia, Brasil, 2008.

ORR, C. “Particulate technology”. The Mac Millan, New York, EUA, 1966.

PÁDUA V. L. e DI BERNARDO L. ”Método comparativo do tamanho dos flocos formados após coagulação com sulfato de alumínio e cloreto férrico.” XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

PAULA, S.L. “Clarificação do extrato aquoso de Stevia Rebaudiana (Bert.) Bertoni, utilizando polímeros naturais.” Dissertação de Mestrado, Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, 2004.

PAVANELLI. G. “Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada”. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, Brasil, 2001.

RUIZ, M. I., “Estudo da Sedimentação em Batelada com o Auxílio da Técnica de Atenuação de Raios Gama”. Dissertação de Mestrado. FEQUI/UFU, Uberlândia, Brasil, 2000.

SCOTT, K. J. “Theory of thickening: Factors affecting settling rate of solids in flocculated pulps”.Trans. Inst. Min. Metall., v.77, pp.87-97, 1968.

SILVA, T. A. **“**Estudo Teórico – Experimental da Operação de Sedimentadores Divergentes”. Tese de Mestrado, PPG-EQ/UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2004.

TILLER , F. M. , LEU, W. “Basic Data Fitting in Filtration”, Chin. Inst. Chem. Engrs, 1, 61-70, 1980.

TILLER, F. M., CHEN, W. "Limiting Operating Condition for Continuous Thickeners". Chem. Engng. Sci, 43(7), 1695-1704, 1988.

USHER, S. P.; SCALES, P. J. "Steady state thickener modelling from the compressive yield stress and hindered settling function. Chemical Engineering Journal, v. 111, p. 253–261, 2005.

WHITE, D. A.; VERDONE, N. "Numerical modelling of sedimentation processes". Chemical Engineering Science, v.55 , p. 2213-2222, 2000.

Apêndice

Gráficos dos testes de sedimentação batelada em proveta do planejamento experimental.

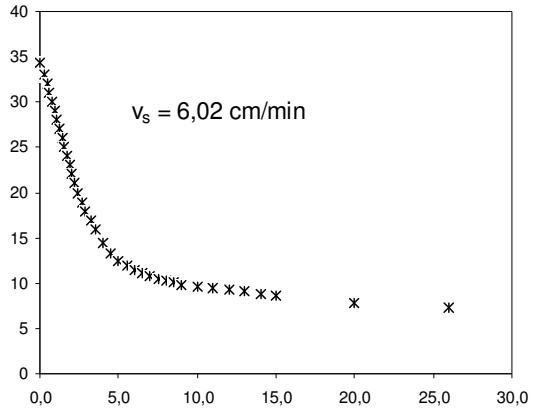


Figura A.1 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 15 mg de floculante/L de suspensão.

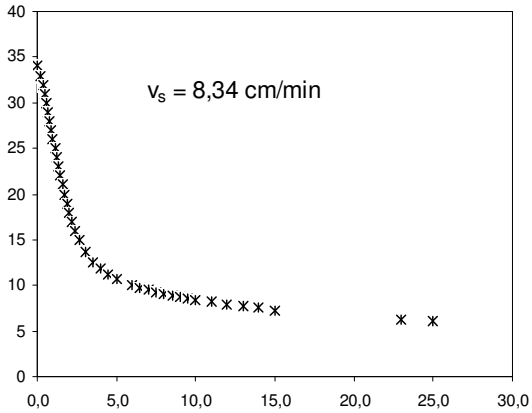


Figura A.3 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 10 mg de floculante/L de suspensão.

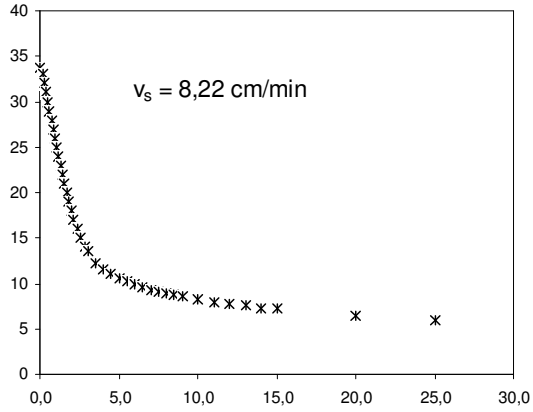


Figura A.2 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 3 mg de floculante/L de suspensão.

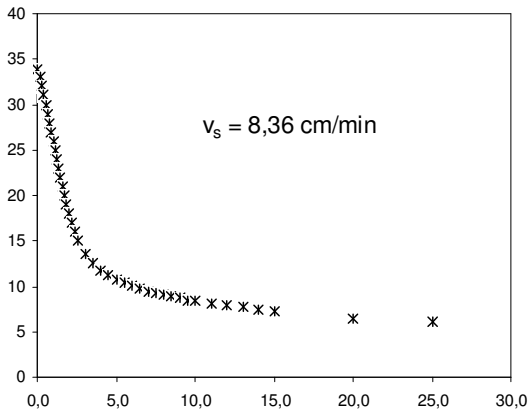


Figura A.4 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 10 mg de floculante/L de suspensão.

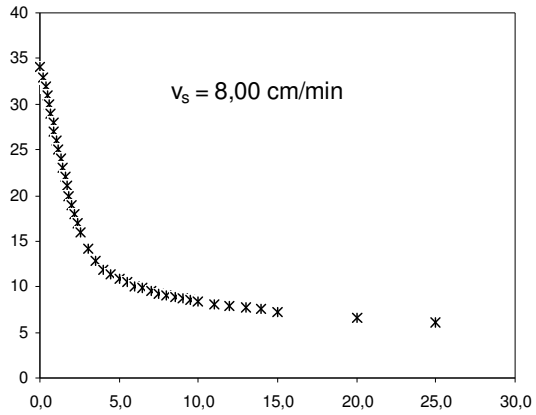


Figura A.5 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 10 mg de floculante/L de suspensão.

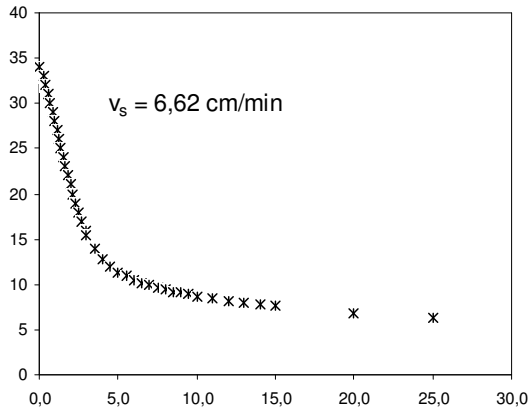


Figura A.7 – Velocidade de sedimentação para pH 5,8 e 10 mg de floculante/L de suspensão.

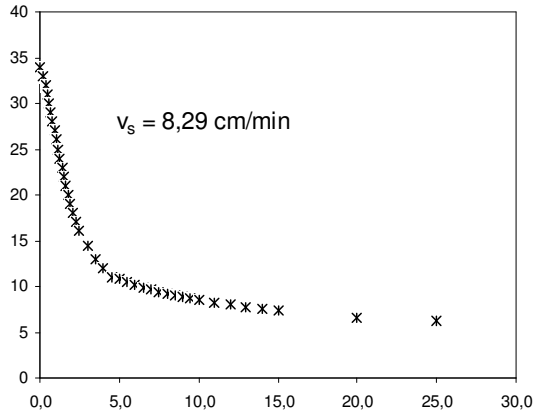


Figura A.6 – Velocidade de sedimentação para pH 6,5 e 10 mg de floculante/L de suspensão.

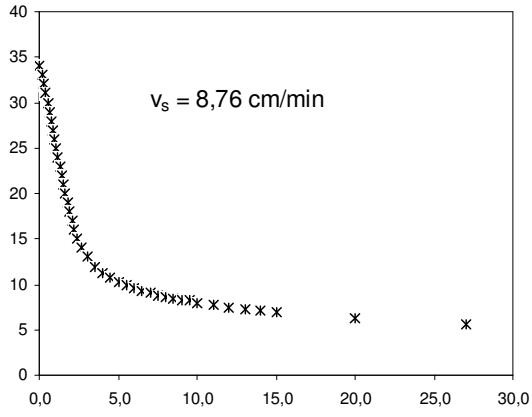


Figura A.8 – Velocidade de sedimentação para pH 7,2 e 10 mg de floculante/L de suspensão.

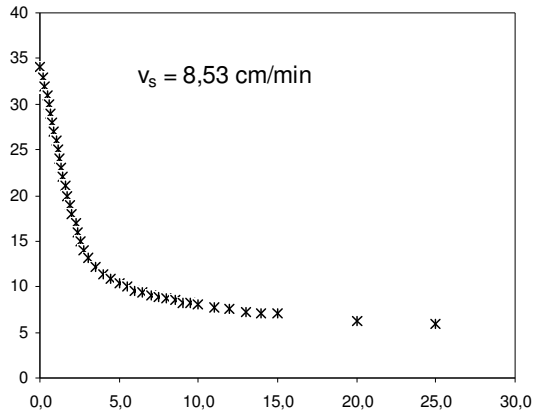


Figura A.9 – Velocidade de sedimentação para pH 7,0 e 15 mg de floculante/L de suspensão.

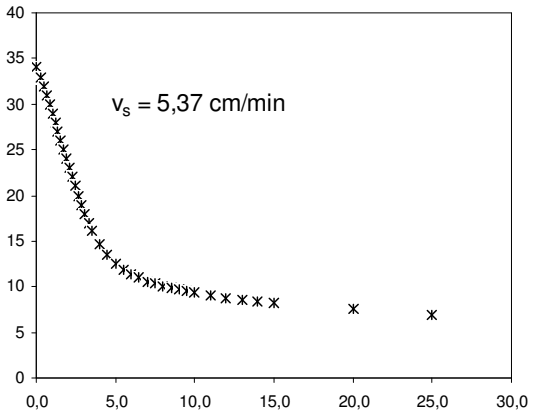


Figura A.11 – Velocidade de sedimentação para pH 6,0 e 15 mg de floculante/L de suspensão.

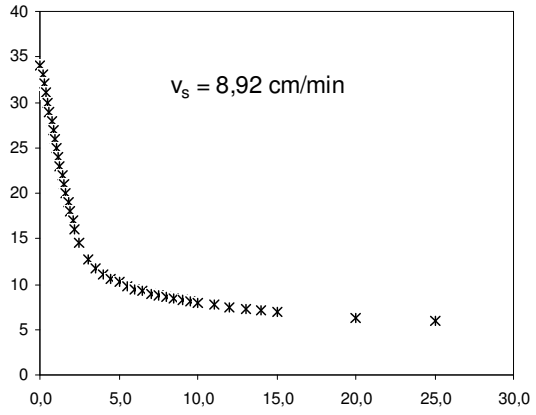


Figura A.10 – Velocidade de sedimentação para pH 7 e 5 mg de floculante/L de suspensão.

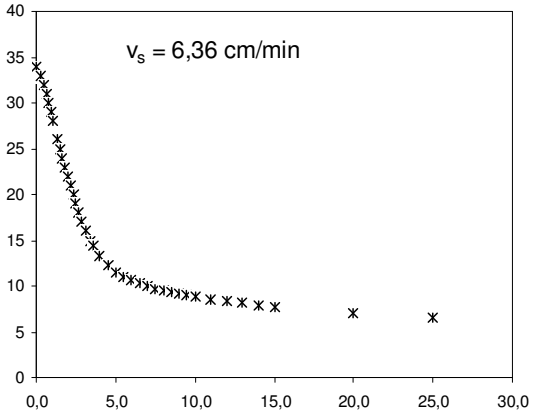


Figura A.12 – Velocidade de sedimentação para pH 6,0 e 5 mg de floculante/L de suspensão.

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