

RUGOSIDADE DO FUNDO DEVIDO A DUNAS E SUA INFLUÊNCIA NOS  
NÍVEIS D'ÁGUA DO RIO AMAZONAS

Felipe Augusto Melo de Oliveira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:

---

Prof.a. Susana Beatriz Vinzón, D.Sc.

---

Prof. Paulo César Colonna Rosman, Ph.D.

---

Prof. Benoit Le Guennec, Ph.D.

---

Prof.a. Josefa Varela Guerra, Ph.D.

RIO DE JANEIRO – RJ, BRASIL  
AGOSTO DE 2007

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

OLIVEIRA, FELIPE AUGUSTO MELO DE

Comparação do efeito da inundação e da variação da rugosidade do fundo devido a dunas nos níveis d'água no Amazonas [Rio de Janeiro] 2007

XI, 129 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Oceânica, 2007)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Rio Amazonas
2. Formas de fundo
3. Dunas
4. Inundação
5. Modelagem hidrodinâmica

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo.*  
Peter Drucker

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha Orientadora, Susana Vinzón, pelas oportunidades, incentivos e lições que nortearam a minha vida acadêmica desde a graduação, à época valiosa de aluno de Iniciação Científica, cujas experiências extrapolam o limite possível desta dedicatória.

Agradeço ao Professor e amigo Benoit Le Guennec, pelos conselhos, orientações, incentivos de coragem e reflexões que tanto me estimularam no transcórre desta fase da vida. Sua acessibilidade, carinho na leitura dos textos e entusiasmo admirável nos momentos difíceis o tornaram um personagem cativante e indispensável à realização deste trabalho.

Agradeço também ao corpo de professores da Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica (AECO) da COPPE. Dedico especial atenção ao Prof. Paulo Rosman, quem me orientou no Projeto de Conclusão do Curso de Engenharia Civil e me inspirou com suas sábias palavras de conforto diante das incertezas e dificuldades.

Agradeço ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

Agradeço ao colega Maximilliano Strasser e a todos os pesquisadores do LDSC/COPPE pelas colaborações durante a confecção da tese. Também agradeço aos colegas de turma, em especial aos amigos Vladimir, Chaves, Cris, Gabi e Mauro, pelos momentos de eterna descontração.

Agradeço às secretárias Marise e Glace, pelo carinho e atenção.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais e irmão, pelos esforços, conselhos e valores que me servirão de norte por toda a vida.

Agradeço à Isabela, minha “Bebel”, pelo apoio incondicional, carinho e companheirismo.

Por fim, agradeço a Deus por sempre iluminar os meus caminhos e destino, em especial por ter colocado a mulher maravilhosa supracitada em minha vida.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

RUGOSIDADE DO FUNDO DEVIDO A DUNAS E SUA INFLUÊNCIA NOS  
NÍVEIS D'ÁGUA DO RIO AMAZONAS

Felipe Augusto Melo de Oliveira

Agosto / 2007

Orientadora: Susana Beatriz Vinzón

Programa: Engenharia Oceânica

Estudos pretéritos atribuem a redução verificada do coeficiente de atrito em épocas de cheia à exportação de águas para as várzeas. Porém, incertezas das cotas das margens, geometria da calha fluvial e das áreas inundadas e uma não abordagem específica do papel das dunas conferem um caráter um pouco especulativo acerca dos resultados. O presente trabalho analisa a variação da rugosidade do fundo devido a dunas e seus efeitos impostos à resistência ao escoamento, com repercussões diretas nos níveis d'água observados. Diferentes metodologias de avaliação do coeficiente de resistência devido à rugosidade do grão ( $f''$ ) e a dunas ( $f'''$ ) são utilizadas para estimar o coeficiente de resistência global ( $f$ ) para o Rio Amazonas, utilizando-se como dados perfis longitudinais medidos com ADCP num trecho fluvial de 722 km, compreendido entre os municípios de Óbidos e Manacapuru. Os resultados permitem caracterizar os coeficientes de resistência típicos de cada estação fluviométrica analisada e os seus principais parâmetros de influência. Os efeitos das dunas e a sua influência na redução da resistência em épocas de cheia são comparados aos resultados da modelagem hidrodinâmica realizada por LE GUENNEC *et al.* (2006) utilizando o modelo SIC, fato que permitiu evidenciar o papel destas formas de fundo e não apenas o relativo à inundação nas variações de níveis d'água no trecho em estudo, podendo os resultados ser extrapolados a todo o rio Amazonas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

BED RUGOSITY DUE TO DUNES AND ITS INFLUENCE ON THE WATER  
LEVELS IN AMAZON RIVER

Felipe Augusto Melo de Oliveira

August / 2007

Advisor: Susana Beatriz Vinzón

Department: Ocean Engineering

Previous studies display that the verified reduction of the resistance coefficient in flood periods is due to the waters flowing to the flooding areas. However uncertainties about margin height, bottom geometry and flood surface followed by a specific approach about the role played by the dunes provide a speculative nature to the results. The present paper aims at analyzing the variation in bottom rugosity due to the presence of dunes and its effects imposed on the flow resistance, with direct influence on the measured water level. Different evaluation methodologies of the resistance coefficient due to the skin resistance ( $f''$ ) and the form resistance ( $f'''$ ) are used to estimate the total resistance coefficient ( $f$ ) for Amazon River, making use of longitudinal profiles measured by ADCP in a 722km fluvial segment, included between the cities of Óbidos and Manacapuru. The achieved results allow the characterization of the resistance coefficient representative of each analyzed fluvimetric station and its main influence parameters. Effects of dunes and its influence on the reduction of the resistance in flood periods are compared to the results from the hydrodynamic modeling accomplished by LE GUENNEC *et al.* (2006) using the SIC model. This comparison made the role played by these bed forms evident, and not only the one related to the flood periods, on the water level variation at this study segment, and even allowing the results to be extrapolated to the entire Amazon River.

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ASPECTO DO AMAZONAS DURANTE A INTENSA ESTIAGEM OCORRIDA EM OUTUBRO DE 2005. ....	2
FIGURA 2: REGISTRO DE UM TÍPICO TRANSPORTE DE BOVINOS DURANTE EVENTOS EXTREMOS (OUTUBRO DE 2005).....	3
FIGURA 3: ÁREA DE ESTUDO . ....	9
FIGURA 4: LINHAS D'ÁGUA NO PERÍODO DE 1998-1999 ENTRE OS MUNICÍPIOS DE MANACAPURU E SANTARÉM .....	10
FIGURA 5: PERFIL BATIMÉTRICO LONGITUDINAL E DIFERENTES FASES DO REGIME HIDROLÓGICO PARA O TRECHO EM ESTUDO.....	11
FIGURA 6: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS EM PARINTINS, RIO AMAZONAS.....	12
FIGURA 7: (I) RECORTES DO MOSAICO GRFM REFERENTE AO MÊS DE OUTUBRO DE 1995, PERÍODO DE VAZANTE E (II) RECORTES REFERENTES AO MÊS DE MAIO DE 1996, PERÍODO DE CHEIA.. .....	14
FIGURA 8: VISTA TÍPICA DAS MARGENS QUE DELIMITAM O TRECHO FLUVIAL EM ESTUDO. ....	15
FIGURA 9: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SEDIMENTOS NO RIO AMAZONAS . ....	17
FIGURA 10: COMPONENTES DA TENSÃO TOTAL DE CISALHAMENTO. ....	27
FIGURA 11: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA DUNA . ....	37
FIGURA 12: ARRANJOS ESQUEMÁTICOS IDEALIZADOS DA DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES AO LONGO DE UMA DUNA . ....	38
FIGURA 13: ILUSTRAÇÃO DA EXPANSÃO E SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO AO LONGO DA FACE DE JUSANTE DE UMA DUNA . ....	39
FIGURA 14: RELAÇÃO FUNCIONAL $\phi(D_c / \lambda)$ OBTIDA NUMERICAMENTE POR HAQUE E MAHMOOD (1983).....	44
FIGURA 15: RELAÇÃO UNIVERSAL DE EUGELUND (1966) ENTRE AS TENSÕES NORMALIZADAS $\tau_*$ E $\tau_*'$ .	47
FIGURA 16: VISTA DA EMBARCAÇÃO UTILIZADA NA CAMPANHA DE MEDIÇÕES REFERENTE A MARÇO DE 2005. ....	56
FIGURA 17: COORDENADAS DOS PERFIS LONGITUDINAIS LEVANTADOS E CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO E DAS DUNAS OBSERVADAS NAS PROXIMIDADES DA CIDADE DE ÓBIDOS (MARÇO DE 2005).....	57
FIGURA 18: ILUSTRAÇÃO TÍPICA DE ARQUIVOS COM MEDIÇÕES DE PERFIS LONGITUDINAIS E BATIMETRIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL, ONDE SE PERCEBE MEDIANTE APLICAÇÃO DA ESCALA DE CORES CONTIDA NA LEGENDA, AS MAGNITUDES DAS VELOCIDADES OBSERVADAS (JATUARANA, 2001). ....	58
FIGURA 19: ASPECTO DA INTERFACE DO WINRIVER.....	59
FIGURA 20: ASPECTO DO SUPORTE DE FIXAÇÃO DO ADCP À EMBARCAÇÃO. ....	60
FIGURA 22: DIFERENTES PERFIS LONGITUDINAIS LEVANTADOS NAS PROXIMIDADES DE MANACAPURU ...	65
FIGURA 23: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE MANACAPURU EM AGOSTO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 24,5 m ; Q~117.000M3/s).....	66
FIGURA 24: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE MANACAPURU EM NOVEMBRO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 16,9 m ; Q~63.000M3/s).....	68

FIGURA 25: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE JATUARANA EM MAIO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 41,5 m ; Q~156.000M3/s).....	70
FIGURA 26: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE JATUARANA EM AGOSTO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 41,83 m ; Q~140.000M3/s).....	72
FIGURA 27: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE JATUARANA EM NOVEMBRO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 28,1 m ; Q~72.000M3/s).....	74
FIGURA 28: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE GRANDE EVA EM JULHO DE 2002 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 45,9 m ; Q~189.000M3/s).....	76
FIGURA 29: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE GRANDE EVA EM NOVEMBRO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 33,7 m ; Q~72.000M3/s).....	78
FIGURA 30: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE IRACEMA EM AGOSTO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 49,9 m ; Q~158.000M3/s).....	80
FIGURA 31: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE IRACEMA EM DEZEMBRO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 37,5 m ; Q~77.000M3/s).....	82
FIGURA 32: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE PARINTINS EM AGOSTO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 59,1 m ; Q~175.000M3/s).....	84
FIGURA 33: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE ITACOATIARA EM AGOSTO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 43,0 m ; Q~180.000M3/s).....	86
FIGURA 34: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE ÓBIDOS EM MARÇO DE 2005 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 36,5 m ; Q~164.000M3/s).....	88
FIGURA 35: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE ÓBIDOS EM AGOSTO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 38,0 m ; Q~194.000M3/s).....	90
FIGURA 36: PERFIS LONGITUDINAIS MEDIDOS NA ESTAÇÃO DE ÓBIDOS EM DEZEMBRO DE 2001 (PROFUNDIDADE MÉDIA = 31,7 m ; Q~96.000M3/s).....	92
FIGURA 37: ILUSTRAÇÃO DO VALOR MÉDIO DO COMPRIMENTO DA ZONA DE RECIRCULAÇÃO RESULTANTE DA APLICAÇÃO DIRETA DA METODOLOGIA PROPOSTA POR WILBERS (2004) EM UM TRECHO DE DUNAS LEVANTADO NA ESTAÇÃO DE MANACAPURU (NOV /2001). ....	104
FIGURA 38: RELAÇÃO ENTRE A ESBELTEZ ( $\Delta / \lambda$ ) E A RUGOSIDADE RELATIVA ( $\Delta / D_c$ ) EM DIFERENTES ESTAÇÕES AO LONGO DO CICLO HIDROLÓGICO. ....	106
FIGURA 39: REDE HIDROGRÁFICA MODELADA .....	113
FIGURA 40: COMPARAÇÃO ENTRE A DESCRIÇÃO GEOMÉTRICA DO TALVEGUE UTILIZADA POR LE GUENNEC <i>ET AL.</i> (2006) E AQUELA UTILIZADA RIBEIRO NETO, (2001). ....	114
FIGURA 41: RESULTADOS DE <i>N</i> AO LONGO DO TRECHO MANACAPURU-ÓBIDOS. ....	116
FIGURA 42: EXEMPLO ILUSTRATIVO DE UMA SEÇÃO TRANSVERSAL TÍPICA DO RIO AMAZONAS, ONDE O LEITOS MENOR, MÉDIO E MAIOR SÃO ESTIMADOS EM 3, 6,1 E 33 KM, RESPECTIVAMENTE . ....	117
FIGURA 43: MOSAICOS DAS IMAGENS DO SATÉLITE JERS1 ,EM ÉPOCAS DE SECA E ESTIAGEM.....	117

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA I: DESCRIÇÃO DAS FORMAS DE FUNDO MAIS COMUNS EM RIOS ALUVIONARES .....	33
TABELA II: RESUMO DO PERÍODO E TRECHO COMPREENDIDO PARA CADA CAMPANHA DE MEDIÇÃO.....	55
TABELA III: COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO COM CAMPOS DE DUNAS SELECIONADOS PARA ANÁLISE.....	61
TABELA IV: QUANTITATIVO DE DUNAS AVALIADO NAS DIFERENTES ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO.....	62
TABELA V: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM MANACAPURU (AGO-2001).....	67
TABELA VI: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM MANACAPURU (NOV-2001).....	69
TABELA VII: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM JATUARANA (MAIO-2001).....	71
TABELA VIII: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM JATUARANA (AGO-2001).....	73
TABELA IX: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM JATUARANA (NOV-2001).....	75
TABELA X: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM GRANDE EVA (JULHO-2002).....	77
TABELA XI: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM GRANDE EVA (NOV-2001).....	79
TABELA XII: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM IRACEMA (AGO-2001).....	81
TABELA XIII: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM IRACEMA (DEZ-2001).....	83
TABELA XIV: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM PARINTINS (AGO-2001).....	85
TABELA XV: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM ITACOATIARA (AGO-2001).....	87
TABELA XVI: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM ITACOATIARA (MARÇO -2005).....	89
TABELA XVII: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM ÓBIDOS (AGO-2001).....	91
TABELA XVIII: PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E VALORES MÉDIOS CARACTERÍSTICOS EM ÓBIDOS (DEZ-2001).....	93
TABELA XIX: SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA CALCULADOS EM MANACAPURU, CONSIDERANDO OS MESES DE AGOSTO E NOVEMBRO DE 2001 .....	96
TABELA XX: SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA CALCULADOS EM JATUARANA, CONSIDERANDO OS MESES DE MAIO, AGOSTO NOVEMBRO DE 2001.....	97

TABELA XXI: SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA CALCULADOS EM GRANDE EVA, CONSIDERANDO OS MESES DE JULHO DE 2002 E NOVEMBRO DE 2001 .....	98
TABELA XXII: SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA CALCULADOS EM IRACEMA, CONSIDERANDO OS MESES DE AGOSTO E DEZEMBRO DE 2001.....	99
TABELA XXIII: SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA CALCULADOS EM PARINTINS, CONSIDERANDO O MÊS DE AGOSTO DE 2001 .....	100
TABELA XXIV: SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA CALCULADOS EM ITACOATIARA, CONSIDERANDO O MÊS DE AGOSTO DE 2001 .....	101
TABELA XXV: SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA CALCULADOS EM ÓBIDOS, CONSIDERANDO OS MESES DE AGOSTO E NOVEMBRO DE 2001 E MARÇO DE 2005.....	102
TABELA XXVI: FAIXAS DE VARIAÇÃO DO COEFICIENTE $f'$ PARA AS ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO ANALISADAS. ....	103
TABELA XXVII: VALORES DE $n$ UTILIZANDO DIFERENTES DETALHAMENTOS BATIMÉTRICOS.....	114
TABELA XXVIII: VALORES MÉDIOS DE $n$ AO LONGO DO TRECHO MANACAPURU-ÓBIDOS .....	116
TABELA XXIX: VALORES DE $n$ OBTIDOS SEM E COM A INCORPORAÇÃO DO LEITO MÉDIO.....	118

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS.....	6
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>9</b>
<b>2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>9</b>
2.1. CARACTERIZAÇÃO SEDIMENTOLÓGICA.....	16
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>18</b>
<b>3. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM LEITOS ALUVIONARES</b> .....	<b>18</b>
3.1. INTRODUÇÃO.....	18
3.2. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO.....	22
3.3. EFEITOS DO GRÃO E DAS FORMAS DE FUNDO NA RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO.....	30
3.4. RESISTÊNCIA POR FORMA: O CASO PARTICULAR DAS DUNAS.....	36
3.4.1. Coeficiente de resistência por forma: $f''$ .....	37
3.4.2. Metodologias de avaliação de $f''$ .....	41
3.5. RESISTÊNCIA DEVIDO À RUGOSIDADE DO GRÃO: $f'$ .....	48
3.6. DISCUSSÃO SOBRE AS DIFERENTES METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA.....	50
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>54</b>
<b>4. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO NO RIO AMAZONAS</b> .....	<b>54</b>
4.1. INTRODUÇÃO.....	54
4.2. DADOS DISPONÍVEIS.....	54
4.3. ANÁLISE DOS PERFIS LONGITUDINAIS.....	62
4.4. RESULTADOS.....	94
4.5. ANÁLISES E DISCUSSÕES.....	103
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>109</b>
<b>5. DISCUSSÃO SOBRE OS EFEITOS DAS DUNAS E DA INUNDAÇÃO NA VARIAÇÃO DE NÍVEIS D'ÁGUA NO AMAZONAS</b> .....	<b>109</b>
5.1. INTRODUÇÃO.....	109
5.2. DESCRIÇÃO DA MODELAGEM UTILIZADA.....	109
5.2.1. O modelo SIC.....	109
5.2.2. O sistema modelado.....	112
5.3. O PAPEL DAS DUNAS E DA INUNDAÇÃO.....	115
5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	118
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>120</b>

# Capítulo 1

## 1. INTRODUÇÃO

As peculiaridades e a escala particular do Rio Amazonas o fazem tema de recorrentes estudos e discussões entre pesquisadores da comunidade mundial. Sua importância sócio-econômica, com destaque no transporte aquaviário ao longo de suas vias navegáveis e tributários, e a riqueza expressiva em recursos naturais e biodiversidade justificam os esforços contínuos no sentido de aprimorar os conhecimentos existentes sobre as áreas contempladas por suas águas e as ferramentas de gerenciamento de seus inerentes fenômenos naturais.

Assim como em outros notórios gigantes fluviais, a melhoria do conhecimento dos níveis d'água sazonais mostra-se fundamental à continuidade do desenvolvimento econômico da população que vive em suas margens, cujas atividades dependem significativamente do funcionamento do rio. Nesse âmbito, o desenvolvimento de ferramentas e metodologias que permitam uma melhor compreensão dos agentes relevantes na elevação e no rebaixamento do nível d'água e que, conseqüentemente possibilitem previsões de níveis mais acuradas e precisas, assume uma vital importância ao planejamento estratégico de regiões dependentes dos cursos d'água e que carecem de infra-estrutura, principalmente em períodos críticos de cheia e estiagem.

Para o caso específico do Rio Amazonas, onde se constata a existência de diversas habitações flutuantes às margens do rio, a intensidade da sinergia da população ribeirinha com as condições fluviais pode ser evidenciada claramente durante as épocas de estiagem prolongada, como a que foi amplamente documentada pela mídia em outubro de 2005 e considerada por estudiosos como a seca mais severa dos últimos 60 anos. Estima-se que cerca de 200 mil pessoas foram afetadas neste período, perfazendo um quantitativo de 214 comunidades. Em ocasiões como estas, conforme ilustra as Figura 1 a seguir, apenas alguns filetes de água correm em meio aos bancos de areia presentes no leito do rio, ameaçando inclusive as diversas comunidades indígenas que habitam as proximidades das margens. Nessas circunstâncias, as dificuldades de acesso se mostram como verdadeiros empecilhos à garantia de alimentos, água potável e

medicamentos, especialmente às comunidades mais isoladas dos pontos de comercialização. Além disso, a situação é usualmente agravada pela mortandade característica de peixes durante o ápice da seca, quando as águas dos lagos da região também se encontram contaminadas.



Figura 1: Aspecto do Amazonas durante a intensa estiagem ocorrida em outubro de 2005.

Em estudos relativos à determinação dos níveis d'água do Amazonas, cuja sazonalidade alterna períodos de acentuada cheia e estiagem, marcados preponderantemente pelos períodos de maio a julho e outubro a dezembro respectivamente, deve-se atentar para os efeitos da resistência ao escoamento devido às formas de fundo sobre o nível d'água, em especial às dunas, presentes em diversos trechos ao longo de sua via navegável, por onde transitam barcos, barcaças e navios de grande porte. Estas configurações do leito são influenciadas e influenciam diretamente a hidrodinâmica do curso d'água, contribuindo para a sobrelevação do nível d'água e conseqüentemente transbordamento e alagamento das margens em ocasiões de grandes vazões.

As regiões tipicamente afetadas durante eventos de grandes vazões configuram as áreas alagáveis que margeiam o Rio Amazonas. São caracterizadas como ecossistemas naturais de grande fertilidade e berços de uma grande variedade de espécies, cuja riqueza biológica evidencia-se pela multiplicidade de cadeias alimentares. Essas regiões representam cerca de 5% da bacia Amazônica, perfazendo aproximadamente uma área de 300.000 km<sup>2</sup> e são responsáveis pela atenuação do hidrograma do Amazonas.

Sob o ponto de vista econômico, a pecuária é uma das atividades mais afetadas pelo alagamento das terras ocupadas por bovinos, quando se observa o transporte de animais em barcos e barcaças a locais mais protegidos da ação das águas. Esses eventos requerem uma significativa logística por parte dos criadores e resultam em consideráveis perdas quando os mesmos não são previstos com a devida antecedência, fato que poderia ser amenizado pela utilização de ferramentas mais confiáveis de delimitação segura de níveis das superfícies alagáveis. A mesma problemática de migração é observada em eventos de seca prolongada, quando rotas alternativas de transporte são criadas para garantir a sobrevivência de animais, conforme ilustra a Figura 2 a seguir.



Figura 2: Registro de um típico transporte de bovinos durante eventos extremos (Outubro de 2005).

Outro aspecto que ratifica a importância dos níveis d'água do Amazonas refere-se à saúde da população ribeirinha e dos cultivos existentes. Sabe-se que diferentes espécies nocivas à saúde humana abrigam as regiões das várzeas, o que faz com que o conhecimento de seus limites e do respectivo nível fluvial seja identificado com maior acurácia.

Recentemente, RIBEIRO NETO (2001) propôs para a área de estudo da presente dissertação a utilização conjunta de modelagem hidrodinâmica e imagens de satélite para estimativa das planícies de inundação, apresentando diferentes coeficientes de resistência para situações de cheia e estiagem. STRASSER (2002) avalia as principais propriedades geométricas das formas de fundo presentes em um trecho do leito, apresentando diferentes metodologias de

previsão existentes. VINZON *et al.* (2002) levanta a hipótese da variação do coeficiente de rugosidade poder ser explicada, em parte, pela presença de dunas no leito médio do Amazonas. BELAUD *et al.* (2006) revela a importância da geometria da calha fluvial e da discretização espacial na calibração do coeficiente de resistência adotado na modelagem computacional do Amazonas, mediante a utilização do modelo SIC (Simulation of Irrigation Canal), produzido pelo Cemagref (Centre de Recherche pour l'Ingénierie de l'Agriculture et de l'Environnement), instituto de pesquisa vinculado ao Ministério da Agricultura da França.

Porém, em nenhum dos estudos citados anteriormente foi constatada uma abordagem específica sobre o papel desempenhado pelas formas de fundo nas variações de níveis d'água observadas, nem tão pouco um paralelo com os efeitos propiciados pela inundação das várzeas, o que possibilitaria avaliar a responsabilidade de cada um destes fatores na mudança do coeficiente de atrito e conseqüente dissipação de energia ao longo do escoamento.

Em face ao exposto, o presente trabalho pretende contribuir para a melhoria da compreensão dos principais agentes relevantes na variação dos níveis d'água do rio Amazonas, conferindo atenção particular aos efeitos das formas de fundo e do alagamento/secamento das várzeas na mudança do coeficiente de resistência ao escoamento.

Com vistas ao atendimento do propósito supramencionado, diferentes metodologias de análise da influência das típicas formas de fundo existentes no leito serão abordadas, mediante quantificações do coeficiente de resistência devido à rugosidade do grão  $f'$  e por forma  $f''$ , calcados através de formulações já consagradas na literatura, que subsidiaram a estimativa do coeficiente de resistência total característico para o rio Amazonas, simbolizado neste estudo pelo trecho compreendido entre os municípios de Óbidos e Manacapuru, cujo comprimento perfaz uma distância de aproximadamente 722 km. Os cálculos realizados na determinação destes coeficientes foram balizados em parâmetros geométricos obtidos de diferentes registros de perfis longitudinais ao longo do leito, medidos com equipamentos adequados às peculiaridades do

trecho analisado, utilizando-se o banco de dados do Projeto Hibam <sup>1</sup> (Hidrologia e Geoquímica da Bacia Amazônica), cuja participação do autor foi concedida em março de 2005 com intuito de realizar levantamentos de campos de dunas nas proximidades da cidade de Óbidos.

A ferramenta computacional utilizada na análise do efeito da variação da rugosidade do fundo devido às dunas bem como da inundação nos níveis d'água foi o modelo unidimensional SIC, cujo módulo hidrodinâmico para os cenários de cheia e estiagem representa um incremento daquele utilizado por RIBEIRO NETO (2001), mediante a incorporação de um adequado refinamento da discretização espacial, com espaçamentos de 10km, e considerando os efeitos das formas de fundo sobre a tensão superficial e dissipação de energia, em termos de amplitude e fase da onda. Comparações de linhas d'água calibradas para períodos de águas altas e baixas permitiram avaliar os efeitos das dunas na resistência ao escoamento, assim como a incorporação do leito médio possibilitou avaliar qualitativamente a influência das regiões periodicamente alagáveis.

Com isso, o presente trabalho possibilitou significativas contribuições no entendimento da variação sazonal do coeficiente de atrito entre as cheias e estiagens fluviais, tendo em vista que a mesma era, a princípio, especificamente atribuída ao armazenamento de água nas regiões inundáveis. O enfoque do estudo evidencia principalmente os efeitos das formas de fundo e suas conseqüentes contribuições na redução dos níveis d'água para a variação do referido coeficiente de resistência.

Sendo assim, o mesmo também poderá contribuir para o planejamento estratégico das comunidades ribeirinhas e de autoridades competentes em épocas de duradoura estiagem e em períodos de cheia prolongada, tendo em vista que os resultados contribuem ao desenvolvimento de ferramentas de previsão mais adequadas às particularidades do Amazonas mediante a inclusão dos efeitos gerados pelas dunas à modelagem computacional. Portanto, cenários mais realistas

---

<sup>1</sup> Trata-se de uma cooperação técnico-científica entre o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), *Institut de Recherche Pour le Développement* (IRD-França) e diversas instituições brasileiras, como a Agência Nacional de Águas (ANA), Universidade Federal Fluminense (UFF), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Universidade de Brasília (UnB), Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e outras.

poderão ser previstos para as diferentes vazões observadas, contribuindo para uma maior racionalização da dinâmica das populações afetadas e das atividades econômicas associadas.

A natureza colaborativa do presente trabalho, vinculado ao Fundo Setorial CT-HIDRO, o posiciona em um contexto amplo de estudos associados à hidrodinâmica de grandes rios, haja vista a ampla integração entre os dois importantes grupos de pesquisa envolvidos, simbolizados pela Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica (AECO) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE – UFRJ) e o *Institut de Recherche Pour le Développement* (IRD-França).

### 1.1. OBJETIVOS

Com vistas à melhoria do conhecimento dos níveis d'água do rio Amazonas e conseqüentemente ao desenvolvimento de ferramentas mais confiáveis de previsão, que incorporem as características observadas na natureza, a presente dissertação se propõe a atender o seguinte objetivo geral:

- Estudar o papel das formas de fundo sobre a tensão tangencial e dissipação de energia em escoamentos naturais, especificamente no rio Amazonas, simbolizado neste trabalho pelo trecho fluvial compreendido entre os municípios de Óbidos e Manacapuru.

Numericamente, a determinação do papel desempenhado pelas dunas no trecho analisado foi subsidiada por modelagem computacional através do modelo hidrodinâmico unidimensional SIC, mediante a comparação linhas d'água obtidas com e sem os efeitos das formas de fundo, em períodos de cheia e estiagem.

Especificamente, o estudo desenvolvido neste trabalho visa elucidar possíveis particularidades no curso d'água que justificam os níveis observados. Sendo assim, serão desenvolvidas análises específicas do efeito da inundação e da variação da rugosidade do fundo

devido à presença de dunas no leito do rio. Com esse intuito, pretende-se focar nos seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a aplicabilidade de diferentes metodologias de previsão do coeficiente de resistência por forma  $f''$ , associado diretamente à resistência imposta ao escoamento pelas formas de fundo, sendo o mesmo obtido a partir de medições em diferentes campos de dunas existentes no trecho Manacapuru-Óbidos;
- Adoção de coeficientes de resistência devido à rugosidade do grão  $f'$  e à forma  $f''$  compatíveis com os observados na área de estudo, cuja soma possibilite estimar um coeficiente de resistência global que será comparado com o obtido mediante a aplicação da modelagem computacional;
- Avaliar qualitativamente a responsabilidade do fenômeno da inundação e da presença de dunas na variação de níveis observada, mediante a incorporação das regiões alagáveis e dos efeitos desencadeados pela geometria presente no leito ao modelo hidrodinâmico adotado;
- Contribuir ao aprimoramento de ferramentas de previsão de níveis d'água e de gestão mais realistas, mediante à incorporação dos efeitos das dunas, em termos de amplitude e fase da onda.

De forma a se alcançar o propósito principal assim como todos os objetivos supramencionados, a presente dissertação se encontra disposta sistematicamente na forma de núcleos temáticos, retratados em capítulos. No presente capítulo, faz-se uma exposição da motivação do autor em termos sócio-econômicos e técnico-científicos ao decidir pela condução do tema em estudo com foco no Rio Amazonas, cuja imponência e escala justificam sua importância mundial em estudos relativos à Hidráulica Fluvial.

No Capítulo 2 é feita uma caracterização geral da área de estudo, sendo apresentadas as principais informações hidráulicas, sedimentológicas e batimétricas que nortearam o escopo dos trabalhos. Neste momento, optou-se por uma caracterização geral da geometria das dunas, obtida através de trabalhos de campo pretéritos e já publicados na literatura recente, os quais subsidiaram uma análise consciente das feições naturais existentes no trecho fluvial escolhido. Paralelamente, são mencionadas as áreas alagáveis presentes no mesmo trecho, doravante denominadas várzeas, cujas áreas superficiais são de suma importância no balanço hídrico, além de serem constantemente monitoradas mediante técnicas de sensoriamento remoto.

O Capítulo 3 aborda o estado-da-arte da resistência ao escoamento em leitos aluvionares. Procede-se uma explicação detalhada da resistência imposta pelas formas de fundo com enfoque nas dunas, configurações do leito típicas do curso médio do Amazonas. Diferentes metodologias de previsão do coeficiente de resistência por forma são analisadas e posteriormente avaliadas as que possivelmente melhor representam fisicamente o trecho compreendido entre Manacapuru e Óbidos.

No Capítulo 4 são apresentados os dados disponíveis que possibilitaram a avaliação da resistência ao escoamento no Rio Amazonas, tomando por base o trecho fluvial Manacapuru-Óbidos. Nesta ocasião, é apresentada a metodologia de obtenção dos principais parâmetros originários dos perfis longitudinais medidos com o ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) juntamente com os respectivos resultados da aplicação dos mesmos nas expressões matemáticas que avaliaram separadamente a resistência das dunas e àquela proporcionada pela rugosidade do grão. Ao fim deste capítulo, são feitas análises e discussões acerca dos resultados encontrados ao longo das estações de medição selecionadas.

Finalmente o Capítulo 5 proporciona uma discussão sumária sobre os efeitos das dunas e da inundação na variação dos níveis d'água no rio Amazonas. Nesse momento, utiliza-se como ferramenta de análise os resultados da modelagem hidrodinâmica realizada por LE GUENNEC *et al.* (2006) para o trecho fluvial em estudo, quando são avaliados comparativamente os papéis desempenhados pelas dunas e o relativo ao fenômeno de inundação das margens, fato que promove observações conclusivas sobre tema e os objetivos principais da presente dissertação.

## Capítulo 2

### 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo da presente dissertação (Figura 3) situa-se no trecho médio do rio Amazonas, especificamente entre as localidades de Manacapuru e Óbidos, que simbolizam os limites a montante e a jusante do domínio analisado. No trecho fluvial, compreendido entre as latitudes de 1°54'36,00''S e 3°17'24,00''S e as longitudes de 55°31'12,00''W e 60°37'11,99''W, que perfaz um comprimento de cerca de 722 km, constata-se a existência de diversos campos de dunas, outrora analisados em trabalhos pretéritos (NORDIN *et al.*, 1979; MERTES e MEADE, 1985; STRASSER, 2002).

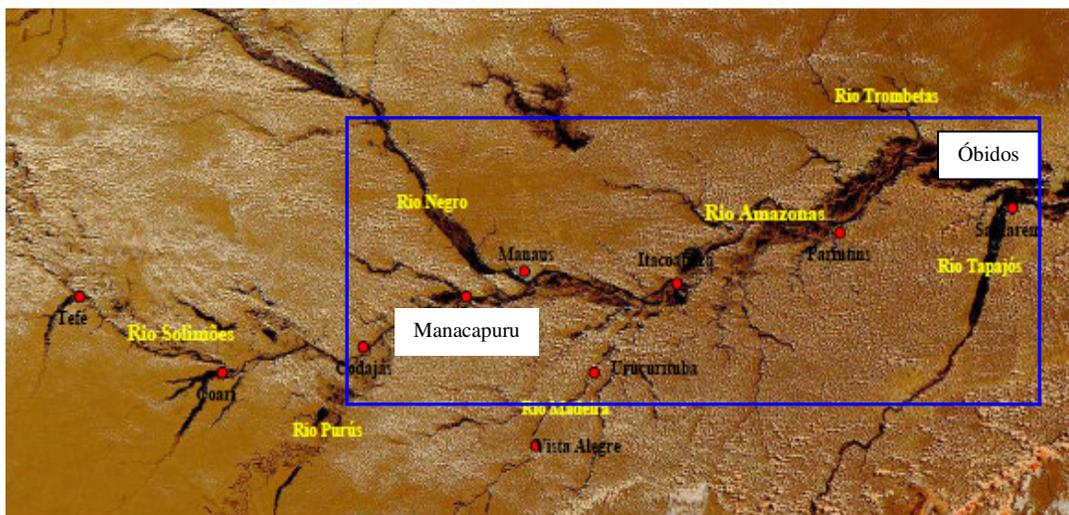


Figura 3: Área de estudo (modificado de NASA, 2004).

Especificamente ao que tange os efeitos práticos da propagação da maré no estuário do Amazonas, considera-se o limite à jusante do trecho em estudo, situado cerca de 900 km da desembocadura, como o marco final de sua influência (DEFANT, 1960; KOSUTH *et al.*, 1999). Nessa localidade, uma das principais estações de referência hidráulico-sedimentológica do rio Amazonas, a vazão líquida média, obtida concomitantemente a partir de registros diários de níveis e curvas-chave ajustadas, é de aproximadamente 166.000 m<sup>3</sup>/s (ANA, 2006). A descarga

líquida mínima anual se aproxima de 90.000 m<sup>3</sup>/s, enquanto a máxima pode atingir o valor de 250.000 m<sup>3</sup>/s.

O ciclo hidrológico anual do rio Amazonas apresenta um período caracterizado por águas altas, marcado, preponderantemente, pelos meses de maio a julho, e um de águas baixas, tipicamente entre os meses de outubro e dezembro. A declividade média da linha d'água para o trecho estudado é de 1,50 cm/km, sendo que esta varia em função do regime hidrológico, apresentando o valor de 2,10 cm/km e 1,00 cm/km para o período de águas altas e baixas, respectivamente (STRASSER, 2002). As Figuras 4 e 5 a seguir revelam as linhas d'água ao longo do trecho Manacapuru-Óbidos, obtidas para o período 1998-1999 e um exemplo típico do perfil longitudinal ao longo do rio que permite ilustrar as diferentes fases do regime hidrológico do Amazonas.

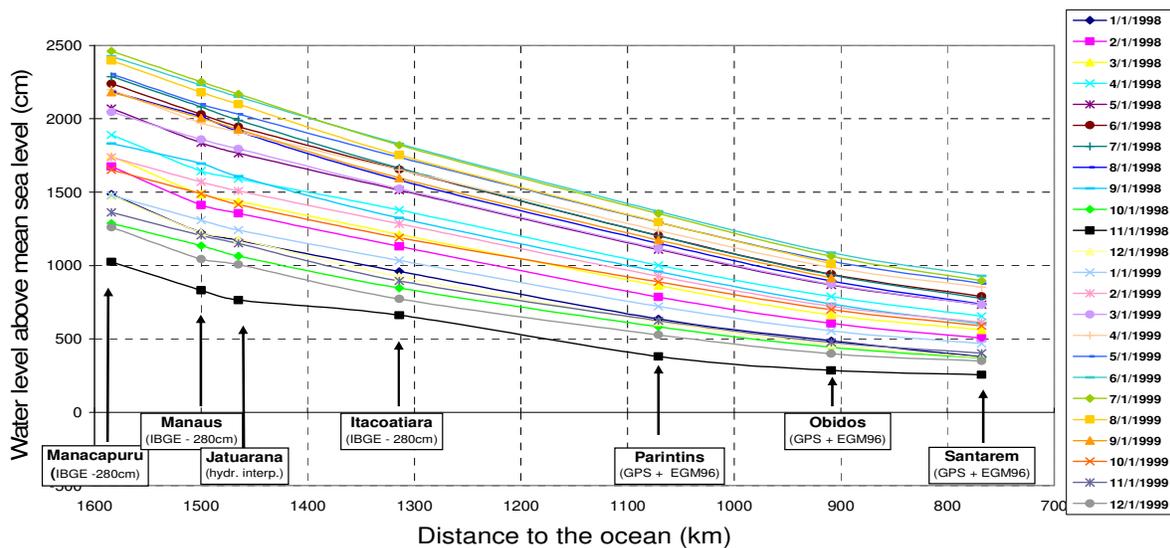


Figura 4: Linhas d'água no período de 1998-1999 entre os municípios de Manacapuru e Santarém (Modificada de KOSUTH *et al.*, 1999).

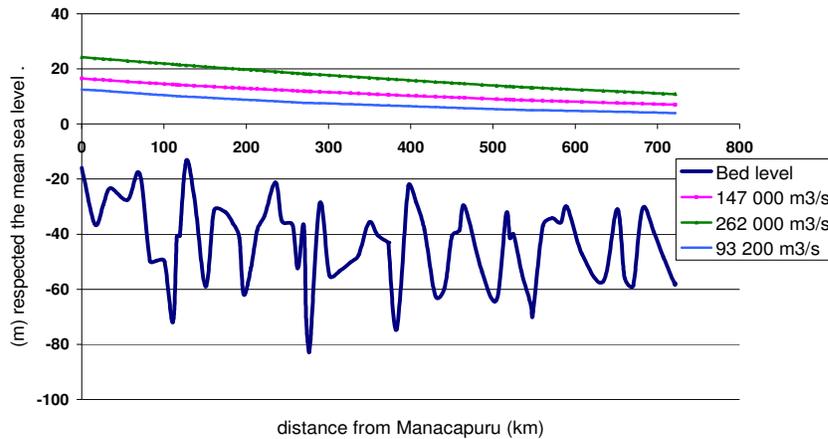


Figura 5: Perfil batimétrico longitudinal e diferentes fases do regime hidrológico para o trecho em estudo (Fornecida por LE GUENNEC, contato pessoal).

Assim como em outros ambientes caracterizados por escoamentos em regime subcríticos ( $Froude \ll 1$ ) de elevada energia, em todo o trecho em estudo manifesta-se a existência de diversos campos de dunas, cujas características não variam significativamente em função do período hidrológico observado (STRASSER, 2002). Em geral, as configurações de fundo observadas apresentam um comprimento médio em torno de 160 m e alturas que variam desde aproximadamente 1,5 m até cerca de 12 m, como se observa nas proximidades da cidade de Óbidos. A seguir, A Figura 6 mostra um mesmo campo de dunas observado em diferentes ocasiões nas proximidades do município de Parintins, onde não se constata modificações significativas na geometria e pode-se perceber a migração das configurações no sentido de jusante.

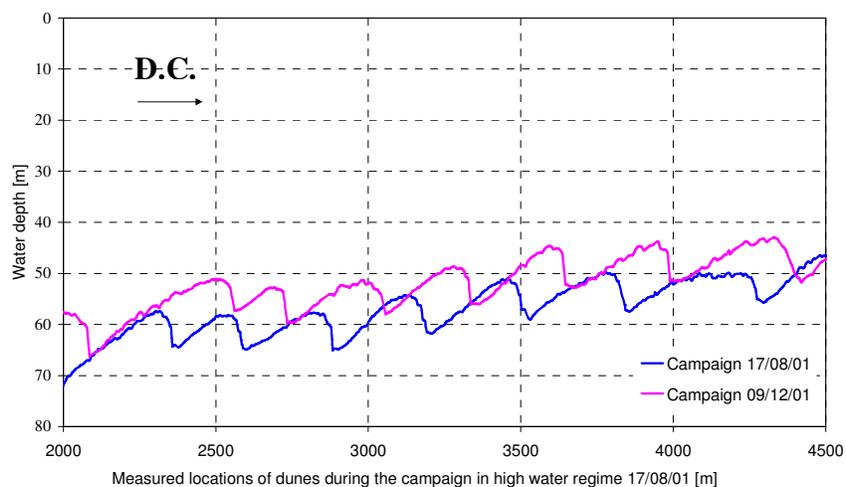


Figura 6: Perfis longitudinais medidos em Parintins, Rio Amazonas (Fornecida por LE GUENNEC e modificado de STRASSER, 2002).

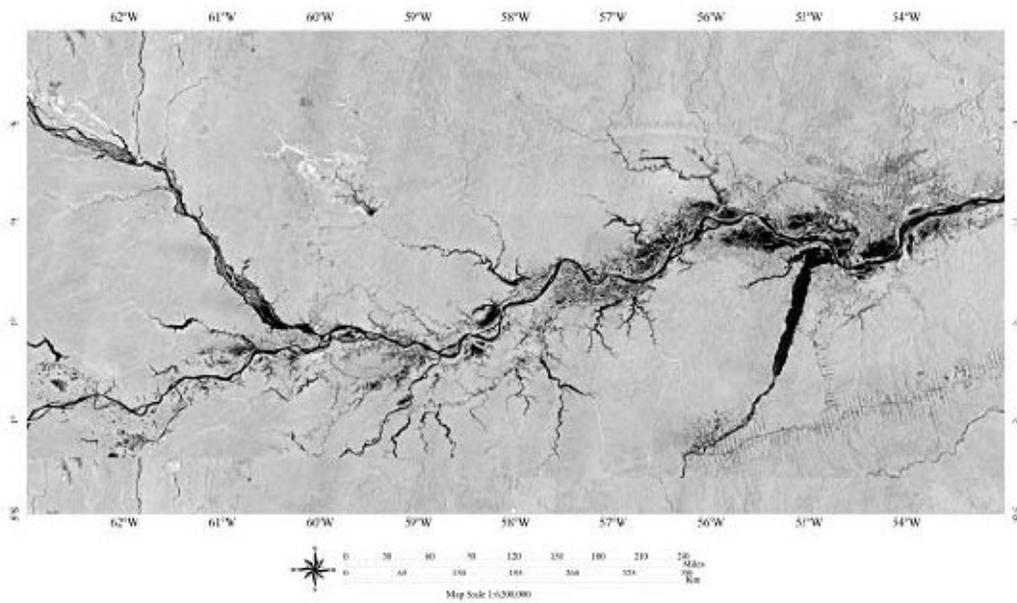
As características morfológicas do trecho observadas em planta variam bastante, alternando trechos estreitos com grandes profundidades, como as observadas na seção de Itacoatiara, situada na desembocadura do rio Madeira, e outros razoavelmente largos, associados em geral a reduções significativas da lâmina d'água. Na primeira, registros batimétricos evidenciam profundidades de até 120 metros. As características morfológicas associadas à calha fluvial evidenciam modificações não significativas ao longo do ano, sendo sua largura média estimada em 4 km. Essa constância morfológica permite rápida identificação da profundidade média do escoamento em períodos de cheia e estiagem. Os limites de montante e jusante se caracterizam por larguras transversais características de 3050 e 2400 metros e profundidades que variam de 22-30 e 50-60 metros, respectivamente.

Assim como em grande parte do rio Solimões-Amazonas, acredita-se que as áreas de inundação observadas ao longo da área de estudo desempenham papel relevante na atenuação do hidrograma característico do regime hidrológico, dada a enorme capacidade de armazenamento temporário das planícies inundadas, que configuram a região conhecida como leito maior. Acredita-se que esse armazenamento é um dos responsáveis pelo fato da vazão máxima equivaler

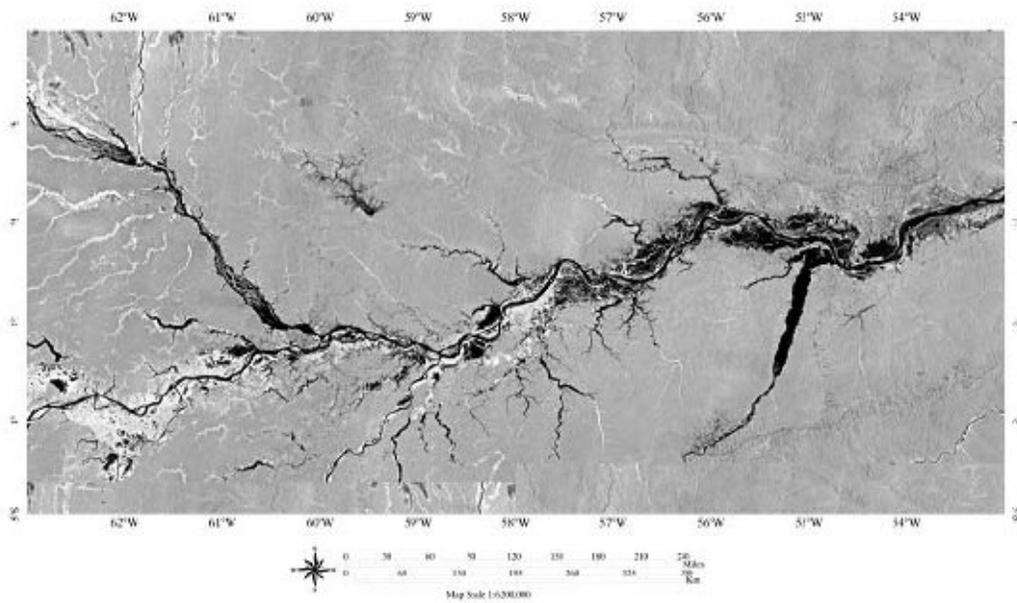
a apenas quatro vezes a vazão mínima, sendo as mesmas de cerca de 280.000 m<sup>3</sup>/s e 70.000 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Esse armazenamento das águas nas zonas periodicamente alagáveis justifica, em parte, o fato das variações de nível do rio superarem em valores médios os 9m, enquanto a vazão oscila apenas em um fator 2 ou 3. Se considerarmos ainda uma variação diária, as oscilações podem chegar aos 12 metros. Uma outra razão que corrobora este fato reside na defasagem existente entre os picos de vazão dos tributários da margem direita do trecho inferior (rios Madeira, Tapajós e Xingu) e os observados no curso principal (MEADE *et al.*, 1991).

Segundo JUNK (1997), as várzeas da região Amazônica correspondem a uma área equivalente a 5% da superfície da bacia, sendo esta última detentora de 6,1 x 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> de superfície de drenagem, com 63% de território situado em domínio brasileiro. As áreas alagáveis do trecho fluvial em estudo, assim como muitas outras que margeiam grandes rios, são ecossistemas caracterizados por grande fertilidade, sendo alvo comum da ocupação humana (JUNK, 1989). A seguir, a Figura 7 ilustra o detalhe da área de estudo em épocas do ciclo hidrológico referentes à cheia e estiagem do ano de 1995. Nestas imagens, as áreas de tonalidade mais clara representam a resposta espectral da área úmida.



(I)



(II)

Figura 7: (I) Recortes do mosaico GRFM referente ao mês de outubro de 1995, período de vazante e (II) recortes referentes ao mês de maio de 1996, período de cheia. (Fonte: GRFM, 2004 cedido por LE GUENNEC, contato pessoal).

Estimativas das áreas de inundação no curso médio do Amazonas, especificamente para o trecho fluvial entre Manacapuru e Óbidos, obtidas através da utilização de modelagem hidrodinâmica e imagens de satélite<sup>2</sup>, revelaram superfícies alagáveis correspondentes a 29.700 km<sup>2</sup> e 17.639 km<sup>2</sup>, respectivamente.

A seguir, a Figura 8 mostra o aspecto típico das margens existentes ao longo da área de estudo.



Figura 8: Vista típica das margens que delimitam o trecho fluvial em estudo (Projeto HiBAm, Campanha Março de 2005).

<sup>2</sup> Imagens provenientes do Satélite japonês JERS-1 (*Japan Earth Resources Satellite 1*), utilizado no Projeto de Mapeamento global da floresta tropical – GRFM (*Global Rain Forest Mapping*)

## 2.1. CARACTERIZAÇÃO SEDIMENTOLÓGICA

Segundo GIBBS (1967), a geoquímica do rio Amazonas encontra-se controlada principalmente pelos aportes dos ambientes de montanha (> 500 m), particularmente da Cordilheira dos Andes no Peru e na Bolívia (nascente dos rios Solimões e Madeira, respectivamente). Considerando o total erodido de material sólido em suspensão, estima-se que cerca de 84% dos sedimentos em suspensão são originados naqueles ambientes, que correspondem a 12% da área total da bacia amazônica.

Os principais componentes minerais sólidos em suspensão presentes ao longo do Amazonas são quartzo, feldspato, montmorillonita, caolinita e mica, fato que também foi verificado por VINZON (1998) nos sedimentos da plataforma continental. MEADE *et al.* (1979b e 1985) e MEADE (1994), utilizando maior rede de pontos de coleta e amostras não apenas em superfície, determinaram que a fonte de sedimentos difere da fonte das vazões. Resultados revelam que os Andes Peruanos são responsáveis pelo aporte de, aproximadamente, 60% do sedimento em suspensão e apenas 30-40% da descarga líquida, enquanto os Andes Bolivianos, contribuem com, aproximadamente, 30% do sedimento em suspensão e 15-20% da vazão líquida.

Em Óbidos, a concentração média de sedimentos em suspensão varia de acordo com época do ano, mas geralmente com valores maiores a 150 mg/l. Informações coletadas por CURTIS *et al.* (1979), MEADE *et al.* (1985) e as campanhas realizadas pelo projeto HiBAm permitem constatar que as areias se distribuem de forma não uniforme na vertical sendo mais concentradas perto do fundo, enquanto que a fração de finos, apesar das condições de alta turbulência da corrente, também não apresentam homogeneidade da concentração na coluna d'água.

Estimativas do transporte de sedimentos em suspensão do Amazonas revelam valores que variam entre  $500 \times 10^6$  e  $1300 \times 10^6$  t/ano. Especificamente à localidade de Óbidos, estima-se em  $600 \times 10^6$  t a taxa anual de transporte em suspensão. Devido às dificuldades em obter informações mais completas, nenhuma das estimativas anteriores considera o transporte de

sedimentos do leito por arraste no rio Amazonas, e só existem alguns critérios muito díspares a respeito.

Em leitos fluviais, geralmente se processa uma gradativa redução do tamanho do sedimento em direção a jusante, porém a distribuição granulométrica do sedimento do leito do Amazonas não apresenta mudanças significativas entre Iquitos (Peru) e a desembocadura no Oceano Atlântico (NORDIN *et al.*, 1980). As amostras coletadas durante as diferentes campanhas (NORDIN *et al.*, 1977, NORDIN *et al.*, 1979, MERTES e MEADE, 1985) mostraram que a composição do material de fundo apresenta areias finas e médias, com diâmetro médio de 0,25 mm. A Figura 9 a seguir apresenta a distribuição granulométrica do leito do rio Amazonas.

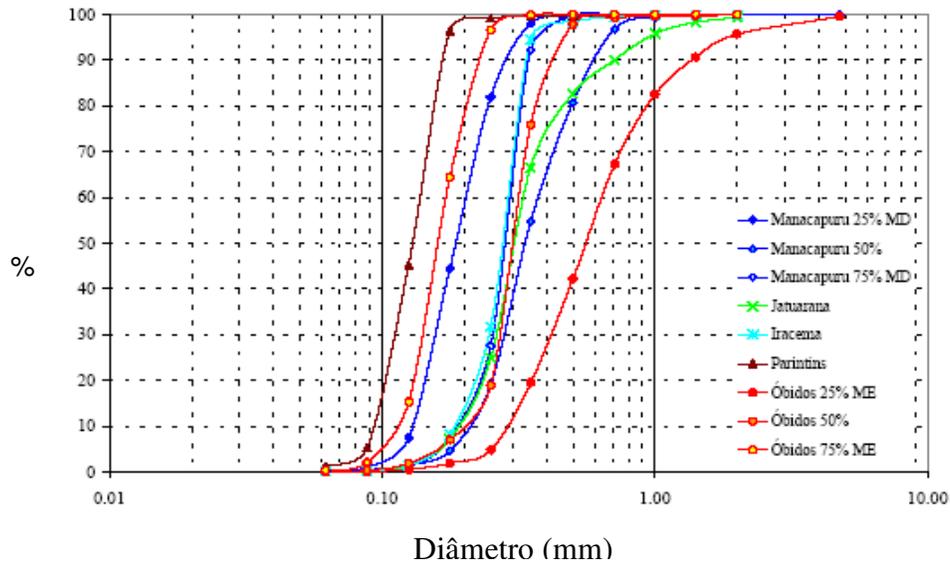


Figura 9: Distribuição granulométrica dos sedimentos no rio Amazonas (Obtida de STRASSER, 2002).

## Capítulo 3

### 3. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO EM LEITOS ALUVIONARES

#### 3.1. INTRODUÇÃO

O transporte de sedimentos e o surgimento de formas de fundo em rios e canais naturais permanecem ainda como intrigantes fenômenos que desafiam engenheiros e pesquisadores envolvidos na gama diversificada de problemas associados à Hidráulica Fluvial.

A descrição da resistência ao escoamento em função das características do leito e do próprio escoamento é um problema de difícil solução em Engenharia Hidráulica, devido a grande complexidade e multiplicidade de fatores envolvidos. De forma geral, pode-se constatar que existem diversas variáveis relacionadas à resistência ao escoamento. Segundo SIMONS e SENTÜRK (1992), as principais variáveis envolvidas no processo são consideradas na seguinte fórmula geral:

$$\phi = (U, h, I, \rho, \mu, g, d, \sigma, \rho_s, S_p, S_r, S_c, f_s) = 0 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

U= velocidade

h= profundidade

I= declividade da linha de energia

$\rho$ =densidade da água

$\mu$ =viscosidade dinâmica da água

g= aceleração da gravidade

d= diâmetro representativo do grão

$\sigma$ = desvio padrão da distribuição

$\rho_s$  = densidade do sedimento

$S_p$  = fator de forma das partículas

$S_r$ = fator de forma do canal

$S_c$  = fator de forma da seção transversal do canal

$f_s$  = força sobre o leito e bancos do canal

As influências de muitos destes fatores apesar de notoriamente reconhecidas, são difíceis de serem consideradas devido às complexas interações com outras variáveis, tornando o tema um alvo fascinante de pesquisas que se encontram abertas a discussões.

Com base no que fora observado por CHOW (1959), dentre os principais fatores que afetam a resistência ao escoamento, pode-se destacar:

- **Rugosidade superficial:** Trata-se do fator mais característico no processo de perda de carga, sendo geralmente representada por um parâmetro denominado “altura de rugosidade”. Em calhas naturais, este parâmetro ou coeficiente apresenta valores menores para leitos aluvionares compostos de uma mistura de silte, areia e argila, aumentando em direção às cabeceiras, cujos leitos são predominantemente compostos por sedimentos mais grosseiros, como seixos e cascalhos.
- **Vegetação:** Sua caracterização, mediante a definição do tipo, densidade, dimensões, distribuição e variação sazonal, faz-se importante em casos de quantitativos relevantes, tanto em regiões marginais quanto dentro da calha fluvial, já que a mesma pode ser considerada uma superfície rugosa, sendo, portanto, um fator relevante nos processos associados à perda de carga.
- **Irregularidades do canal:** Irregularidades do canal principal, como curvas e meandros, desencadeiam modificações na circulação e nas velocidades transversais, propiciando pequenas perdas de carga.
- **Erosão/Assoreamento:** A alternância entre estes dois processos mostra-se como o principal responsável pelo aparecimento, dimensões e dinâmica das formas de fundo.

- **Formas de fundo:** Estas irregularidades naturais propiciam uma significativa perda de parte da energia do escoamento, conforme será analisado posteriormente.
- **Profundidade e largura da seção molhada:** Em escoamentos onde a altura da coluna d'água mostra-se menor, constata-se uma maior influência das tensões cisalhantes, evidenciando maiores taxas de perda de energia. No tocante à largura, quanto maior a dimensão menor será a influencia da resistência do material e do efeito das margens. Experimentos e trabalhos de campo evidenciam um decaimento exponencial no valor do fator de resistência com o aumento da profundidade.
- **Expansões e contrações da calha fluvial:** A diminuição e o aumento da calha fluvial, mesmo que de forma gradual, influencia a resistência imposta ao escoamento.
- **Vazão fluvial:** Observações calcadas em levantamentos de campo, que podem ser ratificadas mediante simulações utilizando modelagem computacional, demonstram que leitos compostos basicamente de areia tendem a se tornar mais planos em épocas de águas altas, quando maiores valores de vazão são observados, atenuando a geometria das formas de fundo e conseqüentemente reduzindo o coeficiente de Manning. Como exemplo, SIMONS e RICHARDSON (1966) constataram que em um canal composto basicamente por areia com diâmetro variando entre 0,01-0,04 mm manifestou variação no Coeficiente de Manning de 0,05 a 0,012 em situações de águas baixas e altas, respectivamente.

Especificamente, tem-se como a rugosidade natural de um corpo d'água fluvial aquela caracterizada principalmente por sedimentos presentes no leito, formas de fundo e vegetação. Muitos dos fatores acima citados são bastante difíceis de serem quantificados, sendo que não é prudente generalizar quais deles são os mais importantes, dado que dependem especificamente do objeto de estudo em análise. Os processos físicos dominantes que determinam a resistência ao escoamento podem variar significativamente em virtude das particularidades verificadas em cada curso d'água.

Sabe-se que a dissipação de energia em um escoamento é governada por fatores internos e externos. Internamente, manifestam-se a viscosidade e ação dos vórtices como principais agentes, sendo o primeiro uma característica de escoamentos laminares e o último de escoamentos turbulentos. Externamente, a dissipação de energia deve-se ao atrito com as paredes ou contornos.

Tratando-se especificamente da dissipação externa de energia, devem ser consideradas as diferenças existentes entre leitos aluvionares e não-aluvionares quanto à resistência oferecida ao escoamento e conseqüentemente, os processos relativos à perda de carga.

Leitos aluvionares como se observa no Rio Amazonas são caracterizados por serem móveis e não planos, sendo compostos basicamente por silte, areia e argila, apresentando significativa facilidade de erosão e transporte pela ação do escoamento. Em geral, nos trechos de maior declividade, principalmente nas cabeceiras, o material do leito se mostra em geral composto basicamente de cascalho e a infiltração pode provocar um escoamento sub-superficial tão importante quanto o superficial. Os fatores governantes do escoamento em rios e canais com estas características são numerosos e complexos, com interações que ainda carecem de muita investigação. Os leitos não-aluvionares são rígidos, sendo a sua resistência considerada constante. Assim como os leitos aluvionares possibilitam a infiltração da água.

Uma das características marcantes do escoamento sobre leitos aluvionares reside no fato da resistência variar diretamente com as propriedades do escoamento, como a vazão, profundidade e declividade e, somente indiretamente, com o tamanho e a distribuição do grão do sedimento que compõe o leito.

A forma como se processa a resistência imposta pelo leito está intimamente ligada às características deste e sua interação com o escoamento, sendo, portanto, condicionantes dos processos associados à perda de carga, cujas formulações se desenvolveram desde as primeiras tentativas de canalização e aproveitamento dos rios, tomando grande impulso na segunda metade do século XVIII, através de pesquisas conduzidas principalmente pelo engenheiro francês Antoine Chézy (1718-1798).

A resistência ao escoamento foi inicialmente definida como aquela correspondente a uma superfície plana em calha retilínea e se referia apenas à granulometria do material que constitui o leito do rio. Porém, atualmente é de notório saber que outros fatores criam resistências adicionais que influenciam o processo de perda de energia por parte do escoamento, como é o caso das formas de fundo, que serão abordadas especificamente neste capítulo.

### 3.2. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

Usualmente, a resistência ao escoamento é simbolizada através de um coeficiente de rugosidade, denominado rugosidade hidráulica. Esta representa o fator mais importante no processo de resistência de atrito e é fruto da influência de qualquer elemento cuja saliência represente um obstáculo ao escoamento, gerando tensões cisalhantes e turbulências.

De forma geral, a rugosidade hidráulica característica de um leito fluvial é um dos parâmetros de entrada de modelos numéricos mais difíceis de estimar, principalmente quando o mesmo é constituído de uma gama variada de feições de fundo, de diferentes formas e tamanhos. Entretanto, é sabido que o referido parâmetro possui intrínseca relação com a previsão da hidrodinâmica do escoamento, principalmente no que tange à calibração de níveis d'água, o que torna o seu conhecimento imprescindível à confiabilidade dos resultados.

Conceitualmente, a rugosidade hidráulica representa uma medida que descreve a resistência imposta por um obstáculo ao escoamento, devido ao atrito gerado quando o fluxo transpassa o objeto responsável pelo dispêndio de energia (WILBERS, 2004). Geralmente, esta resistência é expressa de forma matemática através de um coeficiente, como os consagrados coeficientes de Darcy-Weibach ( $f$ ), Chézy ( $C$ ) e Manning ( $n$ ):

$$U = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{RI} = C \sqrt{RI} = \left(\frac{1}{n}\right) R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

sendo  $U$  a velocidade média do escoamento [ $\text{ms}^{-1}$ ],  $g$  a aceleração da gravidade [ $\text{ms}^{-2}$ ],  $R$  o Raio Hidráulico [m] e  $I$  o Gradiente de Energia [-].

O parâmetro  $f$  foi inicialmente utilizado para descrever a perda de energia do escoamento no interior de tubulações, postulando que:

$$h_f = f \frac{L U^2}{D 2g} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde  $h_f$  é a perda de carga localizada,  $L$  é o comprimento da tubulação,  $D$  é o diâmetro do conduto,  $U$  é a velocidade média do escoamento e  $g$  é a aceleração da gravidade.

Como

$$D = 4R \quad (\text{Eq. 3.4})$$

$$I = \frac{h_f}{L} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

a equação pode ser reescrita como

$$f = \frac{8gRI}{U^2} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

O parâmetro  $C$ , obtido pelo engenheiro francês Antonie Chézy em 1769, utiliza a hipótese básica da proporcionalidade entre a tensão tangencial e o quadrado da velocidade média.

$$\tau = kU^2 \quad (\text{Eq. 3.7})$$

matematicamente conjugada com a equação de resistência ao escoamento, dada por:

$$\tau = \rho g R I \quad (\text{Eq. 3.8})$$

onde  $R$  é o raio hidráulico (área molhada dividida pelo perímetro molhado) e  $I$  é a declividade da linha de energia.

Com base na lei da resistência expressa através do perfil logarítmico de velocidades, a fórmula universalmente conhecida como Fórmula de Manning pode ser reescrita com base no respectivo coeficiente de resistência, que segundo SIMONS e SENTÜRK (1992) se mostra bastante eficiente em casos de gradientes da linha de energia próximos de zero e em leitos compostos de areia:

$$n = \frac{h^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{g} 5,75 \log\left(\frac{12h}{k_s}\right)} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

onde  $h$  é a profundidade média da coluna d'água e  $k_s$  é a amplitude da rugosidade equivalente do fundo.

Igualando os valores da velocidade nas equações de resistência, pode-se facilmente observar que os coeficientes  $f$ ,  $C$  e  $n$  se encontram relacionados da seguinte forma:

$$f = \frac{8g}{C^2} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

e

$$C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Todas as equações anteriormente descritas (Darcy-Weibach, Chézy e Manning) foram concebidas e, portanto aplicáveis a rios e canais com fronteiras rígidas, o que é equivalente a um

rio de largura bastante elevada e leito plano, sendo, portanto, a força de arrasto devido à forma considerada igual a zero, ou inexistente. Além disso, todos os coeficientes de rugosidade bem como as fórmulas de perda de carga apresentadas são funções basicamente da velocidade média do escoamento e do raio hidráulico, sendo, portanto, aplicáveis e calculadas para uma determinada seção.

Porém, a resistência ao escoamento deve ser considerada como distribuída em um trecho, onde as propriedades do leito podem variar continuamente, estando, portanto, a aplicação destas formulações condicionada à escolha de trechos homogêneos do curso d'água que se deseja estudar, onde as conformações geométricas tendem a se repetir. Deste modo, no processo de resistência devem ser consideradas tanto as perdas de carga distribuídas como as localizadas no processo de estimativa do coeficiente de resistência.

Como perda de carga distribuída, tem-se a rugosidade do material do leito como o fator mais característico, sendo usualmente representado por uma dimensão característica do material que forma o perímetro molhado da seção transversal. Particularmente, no Rio Amazonas, deve-se necessariamente considerar a participação das formas de fundo no processo de perda de carga, de modo a quantificar de forma mais realista a resistência total imposta ao escoamento.

Substituindo a eq.3.2 na expressão que quantifica as tensões cisalhantes desencadeadas no leito, sendo esta representada pela eq. 3.8, obtém-se a seguinte relação entre a tensão cisalhante e a rugosidade hidráulica do leito:

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho U^2 = \frac{g}{C^2} \rho U^2 = \frac{n^2}{R^{\frac{1}{3}}} g \rho U^2 \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Em escoamentos sobre leitos caracterizados pela ocorrência de dunas e sedimentos sendo transportados em suspensão na coluna d'água, como se constata no Amazonas, a tensão total de cisalhamento acima pode ser estimada através da soma das seguintes componentes:

$$\tau = \tau' + \tau'' + \tau''' + \tau'''' \quad (\text{Eq. 3.13})$$

sendo:

$\tau'$  a componente da tensão associada à perda de energia por atrito exercido pelo grão do sedimento (*skin friction*);

$\tau''$  a componente da tensão associada à resistência por forma (*form drag*);

$\tau'''$  a componente da tensão associada à energia gasta para manter as partículas de sedimento em suspensão;

$\tau''''$  a componente de tensão associada à morfologia do rio, representando a energia associada a expansões e contrações da calha, meandros, curvas e demais modificações em planta e seção transversal da calha do rio.

Das quatro componentes supracitadas, considera-se que apenas a primeira, correspondente à rugosidade do grão, é responsável pelo arrasto superficial e conseqüentemente pelo movimento e transporte de partículas pertencentes ao leito do rio, sendo conhecida como a tensão de atrito “real” (YALIN, 1977). Sua magnitude tem sido comumente associada a processos relacionados à origem, evolução e deslocamento das formas de fundo.

A segunda componente acima mencionada refere-se à tensão de arrasto devido à forma, originária das condições hidrodinâmicas geradas pela geometria das formas de fundo, em especial por sua esbeltez e rugosidade relativa, como será visto posteriormente.

Assim como a componente de tensão devido a forma, as demais componentes da tensão cisalhante, representadas por  $\tau'''$  e  $\tau''''$  são consideradas como tensões aparentes, uma vez que atuam sobre obstáculos submersos na corrente. Especificamente no que se refere à importância da quarta componente, BELAUD *et al.* (2006) evidencia os melhoramentos de um adequado refinamento da geometria do leito menor-médio e de uma discretização espacial adequada na

calibração de níveis d'água, feito através de modelagem computacional para do mesmo trecho fluvial do presente estudo.

A representação esquemática de todas as componentes acima descritas se encontra na Figura 10, a seguir.

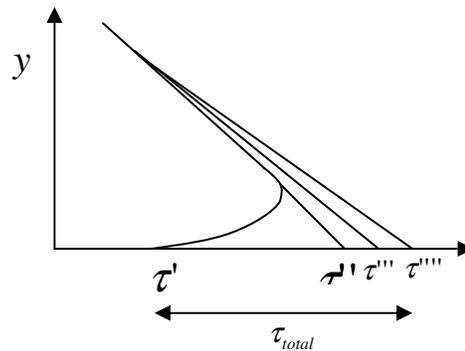


Figura 10: Componentes da tensão total de cisalhamento.

No presente trabalho, adotar-se-á as duas primeiras componentes como as principais condicionantes na estimativa do valor da tensão de cisalhamento total atuante sobre o leito fluvial, em conformidade com o que fora constatado em outros trabalhos (EINSTEIN, 1950; RAUDKIVI, 1963; VANONI e HWANG, 1967; ALAM e KENNEDY, 1969; HAQUE e MAHMOOD, 1983; SHEN *et al.*, 1990; WILBERS, 2004). Desta forma, admitir-se-á que a força total de arrasto atuante sobre o leito de rios é constituída de duas parcelas distintas:

- Uma correspondente ao arrasto superficial, associada à rugosidade do grão;
- Uma componente de arrasto associada à forma, resultante da atuação das forças hidrodinâmicas geradas pela geometria das formas de fundo.

Esta constatação, obtida com base em resultados de estudos executados paralelamente em campo e em laboratório, revelam que na existência de formas de fundo, uma componente de tensão devido à forma deve ser somada à tensão superficial, também conhecida como tensão de

pele (*skin friction*), estando esta última vinculada à rugosidade do grão. Portanto, como uma energia adicional do escoamento é consumida, superando o valor da resistência dado exclusivamente pela resistência de pele ou superficial, tem-se maiores valores de tensão de cisalhamento crítica em leitos cobertos por configurações de fundo. Esta parcela adicional de energia está comprovadamente associada à geometria das formas de fundo, sendo notoriamente conhecida como resistência por forma.

Embora a tensão cisalhante total e, conseqüentemente, a resistência ao escoamento sejam compostas de duas parcelas, uma devido à forma, determinada pela não uniformidade das pressões acima dos perfis das dunas, e a outra devido ao grão do sedimento que compõe o leito, apenas esta última atua no transporte de sedimentos. Isto significa dizer que quando comparados leitos lisos e rugosos, a tensão de cisalhamento crítica mostra-se maior para leitos com a presença de formas de fundo (EINSTEIN e BARBAROSSA, 1952).

Portanto, tem-se que a tensão cisalhante pode ser subdividida satisfatoriamente em duas tensões, reduzindo a eq. 3.13 a:

$$\tau = \tau' + \tau'' \quad (\text{Eq. 3.14})$$

sendo  $\tau'$  e  $\tau''$  [ $\text{Nm}^{-2}$ ] as tensões cisalhantes relacionadas à rugosidade hidráulica e à geometria das formas de fundo, respectivamente.

A superposição linear verificada na equação acima se baseia no fato de funções distintas de diferentes seqüências de números adimensionais poderem ser reconhecidas e calculadas de acordo com a natureza da resistência que caracteriza cada uma das componentes. Faz-se importante ressaltar que como as escalas de turbulência associadas a cada fonte de dissipação de energia de cada componente envolvida na equação anterior são bastante diferentes, sendo a fonte maior associada à componente associada à forma de fundo, pode-se desconsiderar e desprezar as interações não lineares existentes entre as duas, sendo possível tratá-las de forma independente. Além disso, como cada componente é afetada por diferentes regiões do leito, as discrepâncias

devido a não-linearidade podem ser consideradas como absorvidas pelo primeiro termo da equação anterior.

No tocante à rugosidade hidráulica representada pelo coeficiente de Darcy-Weisbach ( $f$ ), pode-se adotar um raciocínio análogo, permitindo o desmembramento do coeficiente  $f$  em duas componentes independentes. Portanto, assume-se que:

$$f = f' + f'' \quad (\text{Eq. 3.15})$$

sendo

$f'$  a parcela da resistência total devido à rugosidade do grão;

$f''$  a parcela da resistência imposta ao escoamento devido a presença de formas de fundo.

Vale ressaltar que a superposição linear exposta na eq. 3.15 não pode ser aplicada instantaneamente para os demais coeficientes de resistência, em virtude da não-linearidade entre os diversos fatores envolvidos. Como exemplo, pode-se citar uma das metodologias existentes na literatura, que propõe uma estimativa do coeficiente de Manning devido às dunas, estipulando a seguinte relação com a rugosidade devido unicamente à rugosidade do fundo (CHOLLET *et al.*, 1980 *apud* RAMETTE, 1981):

$$\frac{n}{n_{dunas}} = 1,34 \left( \frac{0,06 + 0,16(RI/d)^2}{(RI/d)} \right)^{\frac{5}{8}} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

sendo  $d$  o diâmetro dos sedimentos do leito ( $d_{85}$ ).

### 3.3. EFEITOS DO GRÃO E DAS FORMAS DE FUNDO NA RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

A sinergia entre o leito sujeito à erosão e o escoamento são os verdadeiros responsáveis pela determinação da rugosidade do leito de um rio, sendo o conhecimento desta uma importante premissa nos processos que conduzem a avaliações realistas dos processos de resistência por atrito e, conseqüentemente, perda de energia de escoamentos naturais.

A estimativa da rugosidade do leito de um rio sujeito a uma corrente capaz de transportar sedimentos é feita a partir do conhecimento da resistência imposta pelos grãos dos sedimentos presentes no fundo e, fundamentalmente, pela resistência por forma devido ao tipo e geometria das formas de fundo, dado que ambos os fatores constituem obstáculos ao escoamento natural.

A rugosidade hidráulica associada ao grão do sedimento foi extensivamente estudada no passado por inúmeros estudiosos. Um dos primeiros a estimar valores para a rugosidade hidráulica foi NIKURADSE (1933), quem estudou a rugosidade hidráulica de tubulações revestidas internamente por grãos de diferentes dimensões e atribuiu ao seu valor uma dimensão correspondente a uma altura de rugosidade  $k_s$  [m]. De acordo com COLEBROOK e WHITE (1937),  $k_s$  se relaciona com o coeficiente de Chézy através da seguinte relação:

$$C = 18 \log \left( \frac{12R}{k_s} \right) \quad (\text{Eq. 3.17})$$

Diversos pesquisadores da comunidade científica internacional investigaram possíveis relações entre o tamanho do sedimento e a rugosidade hidráulica  $k_s$ , como mostra a relação obtida por VAN RIJN (1984), expressa para leitos planos compostos basicamente por areia:

$$k_s = 3d_{90} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

sendo  $d_{90}$  corresponde ao diâmetro do grão equivalente a 90% da distribuição granulométrica da amostra de sedimentos retirada do leito.

A literatura disponível revela uma vasta variedade de valores existentes para a rugosidade hidráulica total e aquela devido ao grão, mesmo quando o mesmo leito é avaliado, fato justificado pelo fato de muitos considerarem uma mesma formulação tanto para leitos planos quanto para leitos compostos por formas de fundo. Porém, estudos mais específicos desenvolvidos por YALIN (1964) e posteriormente por OGINK (1989) comprovaram com êxito a impossibilidade de se considerar uma mesma formulação na determinação da rugosidade do grão quando se deseja estudar leitos lisos e àqueles compostos, por exemplo, por dunas. Nestes últimos, apenas no topo das formas de fundo a tensão de cisalhamento atinge um valor próximo ao encontrado em leitos planos.

Em leitos de rios compostos basicamente por dunas, a rugosidade atribuída ao grão do sedimento representa uma parcela percentual reduzida da rugosidade hidráulica total. As dunas, cujas geometrias são caracterizadas basicamente pela altura e pelo comprimento, representam a parcela maior e, portanto mais significativa deste importante parâmetro que define a resistência ao escoamento, sendo um balizador da hidrodinâmica característica de corpos d'água.

A grande gama de formulações existentes que caracterizam matematicamente a rugosidade hidráulica associada a formas de fundo comprova as dificuldades práticas de se estimá-la com a precisão requerida pelos modelos matemáticos, o que a coloca em um patamar que requer maiores esforços dos pesquisadores quando comparada à determinação daquela associada exclusivamente à rugosidade do grão. Nesse sentido, diversos estudos revelaram sucessos variados e progressivos (YALIN, 1964; VANONI e HWANG, 1967; VITTAL *et al.*, 1977; ENGELUNG, 1977; WHITE *et al.*, 1979; BROWNLIE, 1981; VAN RIJN, 1984, entre outros).

A ocorrência de formas de fundo é uma das principais características observadas em leitos aluvionares. Estas feições se desenvolvem na interface existente entre o escoamento e o leito do rio, podendo ocorrer tanto na direção longitudinal como na transversal ao escoamento. Os

escoamentos em superfície livre sobre estes leitos podem gerar uma grande gama de formas e configurações de fundo, estando o tipo e as dimensões destas diretamente relacionadas às propriedades do escoamento, do fluido e do material que constitui o leito. As formas mais conhecidas destas configurações são os bancos de areia, barras, rugas, anti-dunas e dunas, cujas descrições e condições gerais de ocorrência são mostradas na Tabela 1.

Experiências conduzidas em laboratório, mediante a utilização de canal prismático e retangular, comprovam o aparecimento e evolução graduais das configurações de fundo, constatados através de aumento controlado da velocidade do escoamento (SIMONS e RICHARDSON, 1960). Trabalhos de campo com suporte de pesquisas de laboratório revelam estreita relação entre as magnitudes hidráulicas do escoamento e o surgimento destas configurações, que se associam também ao tamanho do sedimento e influenciam diretamente a forma como se processa o transporte de sedimentos ao longo do rio. (YALIN, 1977; VANONI e HWANG, 1967; RIFAI e SMITH, 1969; VITTAL *et al.*, 1977; ENGEL e LAU, 1980; WANG, 1983; FEHLMAN, 1985).

Nestes e em outros estudos similares percebe-se que com o aumento da velocidade os primeiros grãos iniciam o movimento desprendendo-se e deslocando-se uns sobre os outros, configurando o transporte sólido conhecido como por arrasto, dando origem as configurações conhecidas como rugas, estando as mesmas situadas na faixa de variação do *Número de Froude* entre  $0,15 < F_r < 0,30$ . Sob estas condições, os deslocamentos predominantes são por rolamento e deslizamento.

O aumento progressivo controlado das velocidades do escoamento conduz ao surgimento de irregularidades periódicas no leito, inicialmente se apresentado com pequenas rugas superpostas, sendo estas posteriormente incorporadas às formas mais acentuadas, conhecidas como dunas, onde se manifesta o aumento do transporte em suspensão, com a ocorrência de saltos dos grãos, estando o *Número de Froude* na faixa entre  $0,30 < F_r < 0,60$ .

Tabela I: Descrição das formas de fundo mais comuns em rios aluvionares

<b>Configuração de Fundo</b>	<b>Dimensões</b>	<b>Características Geométricas</b>	<b>Comportamento e ocorrência</b>
Rugas	Comprimento de onda e altura menores do que aproximadamente 31 cm	Perfil aproximadamente triangular, com suave declividade na face de montante, ligeiramente convexa em relação ao fluido e inclinação da face de jusante bem próxima ao ângulo de repouso do material do fundo	Tendência de deslocamento no sentido de jusante, com velocidades bem menores que a do escoamento. Geralmente, não se desenvolvem em sedimentos maiores do que 0,6 mm
Barras	Comprimentos comparáveis à largura do canal onde estão dispostas	Perfil semelhante ao das rugas. Sua disposição em planta mostra-se bastante variável	Quatro formas são verificadas: (1) Pontuais; (2) Alternadas; (3) Transversais; e (4) Tributárias. Dunas podem se desenvolver na face de montante
Dunas	Comprimento e altura maiores do que as rugas, mas menores do que as observadas nas barras	Similares às rugas	A face de montante pode se apresentar repleta de rugas. Migram para jusante de forma análoga às rugas
Anti-dunas	Comprimento de onda de aproximadamente $2\pi V^2/g$ . A altura é dependente da profundidade e velocidade do escoamento	Perfil aproximadamente senoidal. Comprimento da crista comparável ao comprimento de onda.	Em fase, apresentando forte interação com ondas de gravidade. Podem se mover para jusante, montante ou mesmo permanecerem estacionárias, dependendo das propriedades do escoamento e dos sedimentos
Adaptado de ASCE (1966) Task Force on Bed Forms			

Especificamente, dunas são exemplos de formas de fundo irregulares muito comuns em córregos e ribeirões brasileiros compostos por leitos arenosos, sendo, como quaisquer outras configurações morfológicas, dependentes fortemente, dentre outros fatores, do diâmetro do grão dos sedimentos. São caracterizadas como formas de fundo triangulares com tendência à manifestação de rugas ou mesmo pequenas dunas superpostas em sua face de montante, considerando-se baixos valores de velocidade de corrente.

De forma geral, se manifestam em leitos formados por areias grossas ( $0,50\text{mm} < D < 0,250\text{mm}$ ), ao passo que as rugas são mais frequentemente observadas em leitos de areias finas ( $0,065\text{mm} < D < 0,250\text{mm}$ ). Em escoamentos naturais, como é o caso do Rio Amazonas, onde os maiores valores de velocidade são registrados no canal principal, comumente no centro do escoamento, desenvolvem-se apreciáveis campos de dunas, que muito influenciam nos processos de resistência ao escoamento.

O surgimento e a evolução destas irregularidades periódicas são resultados de processos morfodinâmicos caracterizados por uma complexa interação mútua entre o escoamento e o leito, que determinam a rugosidade do leito do rio e conseqüentemente influenciam a hidrodinâmica do escoamento. O tipo e as dimensões destas configurações de fundo são dependentes das propriedades do escoamento, tais como a vazão, profundidade e declividade, bem como do tipo e tamanho do material constituinte do fundo (VANONI e HWANG, 1967), sendo responsáveis, conforme mencionado anteriormente, por modificações nas propriedades do fluido, como a tensão tangencial, velocidade crítica, perfil de velocidades e outras. Como exemplo, pode-se citar as dunas de grandes dimensões medidas e analisadas em estudos prévios realizados no curso médio do rio Amazonas, no trecho compreendido entre Manacapuru e Óbidos (STRASSER, 2002), também objeto de estudo deste trabalho.

Os mecanismos responsáveis pela formação das dunas ainda não se encontram totalmente compreendidos. Porém, é possível constatar diversas características gerais comuns associadas ao surgimento e ao comportamento destas configurações (KENNEDY, 1969). Atribui-se basicamente à alternância entre processos de erosão e assoreamento o aparecimento, as dimensões e a própria dinâmica destas formas de fundo. Sob esta ótica, aumentam ou reduzem de

tamanho à medida que o transporte de sedimentos aumenta ou diminui, respectivamente. Além disso, apresentam a capacidade de migrar para jusante devido à erosão na face de montante e conseqüente depósito de material na face de jusante da duna subsequente.

Pode-se dizer que todas as formas de fundo seguem um padrão relativamente ordenado no tocante aos processos de erosão e deposição. O crescimento das mesmas é um resultado da erosão do material sedimentar pertencente à zona da cava ou cavado, seguido de um transporte e depósito na região da crista, sendo este um processo contínuo até que não haja mais fluxo de material erodido da base da cava ou depositado no topo das cristas.

Uma segunda observação geral, não menos importante do que a descrita anteriormente, relaciona-se ao fato destas configurações de fundo serem uma conseqüência direta de fenômenos relativos à instabilidade. Qualquer perturbação realizada sobre um leito inicialmente plano pode afetar, dependendo das condições observadas, o escoamento e conseqüentemente a taxa de transporte de sedimentos original, desencadeando processos de erosão e deposição nas cavas e cristas, respectivamente. À medida que a amplitude destas perturbações sobre o fundo móvel aumenta, todos os processos relativos ao transporte de sedimentos também são intensificados até que o equilíbrio seja estabelecido, sendo este último determinado por outros processos desencadeados pelo crescimento das configurações do fundo. Por estes motivos, todas as formas de fundo possuem suas características geométricas diretamente associadas a parâmetros do escoamento, incluindo o transporte de sedimentos e a tipologia do material de fundo.

A resistência ao escoamento imposta pela existência de formas de fundo é freqüentemente considerada como um agente relevante para a elevação ou pelo rebaixamento do nível d'água em rios, conforme demonstram os experimentos de laboratório realizados por diversos pesquisadores (BROOKS, 1958; VANONI e HWANG, 1967; RAUDKIVI, 1967). Ao avaliar perfis de velocidades instantâneas em diferentes locais ao longo destas formas de fundo, vários estudiosos demonstraram que estas influenciam significativamente a hidrodinâmica do escoamento, com a geração de estruturas turbulentas no seio do escoamento.

Desta forma, a resistência devido às formas de fundo tem sido objeto de estudos extensivos na área de hidráulica fluvial, sendo o seu conhecimento uma importante premissa ao estudo de previsão de cheias e outras aplicações onde a modelagem hidrodinâmica é utilizada, como no caso do monitoramento operacional de hidrovias. No caso particular do Rio Amazonas, acredita-se ser notória a influência das dunas sobre o escoamento, sendo possivelmente um dos fatores determinantes na modificação observada no coeficiente de atrito com a mudança do regime fluvial, conferindo um caráter complementar e não menos importante ao fenômeno de inundação da várzea, já avaliado em trabalhos pretéritos (RIBEIRO NETO, 2001).

A seguir, apresentar-se-á a dinâmica do escoamento e suas peculiaridades quando constatada no leito a presença de formas de fundo, passando-se posteriormente à descrição de diferentes metodologias existentes na literatura de avaliação do coeficiente de resistência por forma,  $f''$ . De acordo com a lógica da prioridade, dado que a área de estudo deste trabalho se mostra constituída de extensos campos de dunas, o coeficiente de resistência devido ao grão será apresentado posteriormente ao coeficiente de resistência devido à forma, especificamente no item 3.5 deste capítulo.

#### 3.4. RESISTÊNCIA POR FORMA: O CASO PARTICULAR DAS DUNAS

A resistência imposta pelas dunas está relacionada diretamente com a turbulência gerada em sua face de jusante, que por sua vez se encontra intimamente ligada ao tamanho e à geometria da forma de fundo. Portanto, de forma a analisar a resistência imposta ao escoamento devido a dunas faz-se necessário o conhecimento prévio das principais características geométricas do campo de dunas que se deseja estudar, assim como a maneira como estas configurações evoluem durante períodos típicos de cheia e estiagem.

De forma a subsidiar análises mais seguras, faz-se prudente o conhecimento prévio da dinâmica do escoamento sobre leitos aluvionares caracterizados pela presença de dunas e das diferentes metodologias existentes na literatura para avaliação específica do coeficiente de resistência por forma, que serão abordadas a seguir.

### 3.4.1. Coeficiente de resistência por forma: $f''$

De forma geral, as dunas apresentam como características geométricas uma suave declividade na face de montante, ligeiramente convexa em direção ao fluido, e uma face de jusante abrupta, com inclinação bem próxima ao ângulo de repouso do material, caracterizando um perfil longitudinal aproximadamente triangular. A Figura 11 ilustra uma representação esquemática das dunas.

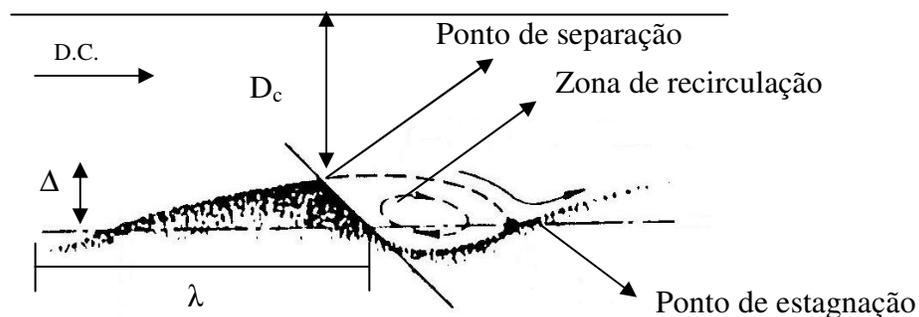


Figura 11: Representação esquemática de uma duna (Modificado de HAQUE e MAHMOOD, 1983).

A resistência devido à presença de formas de fundo é ocasionada pela diferença de pressão entre a face de montante e jusante de uma duna, o que promove uma perda de energia pela separação local do escoamento e a recirculação. A face de jusante destas formas de fundo são regiões de gradiente de pressões bastante adversos, que invariavelmente propiciam a separação ou descolamento do escoamento, conduzindo ao surgimento de pressões bem menores nesta face que as observadas a um mesmo nível na face de montante, conforme ilustra a Figura 12.

O escoamento sobre estruturas deste tipo separa-se da crista da duna (b) e adere-se novamente ao contorno no ponto de estagnação (a'), conforme ilustra a Figura 12. O descolamento do escoamento verificado na crista da duna produz um vórtice no cavado da mesma, sendo este último um dos responsáveis pela redução da pressão em sua face de jusante.

Ao acompanhar o escoamento sobre o perfil longitudinal de uma duna individual, constata-se uma aceleração do escoamento nas regiões próximas a crista. Este fato justifica-se a partir do conhecimento da Lei de Bernoulli, que por sua vez determina uma aceleração do escoamento em detrimento da diminuição da pressão ao longo da linha de corrente. Transpassada a crista, verifica-se um rápido incremento das profundidades e pressões, gerando uma abrupta desaceleração do escoamento. Esse aumento súbito de pressões, verificado na face de jusante da duna, logo após a crista, promove um deslocamento do fluxo no sentido da crista, o que conduz ao outrora mencionado deslocamento do escoamento na região próxima à crista, definida espacialmente como o ponto de separação ou deslocamento.

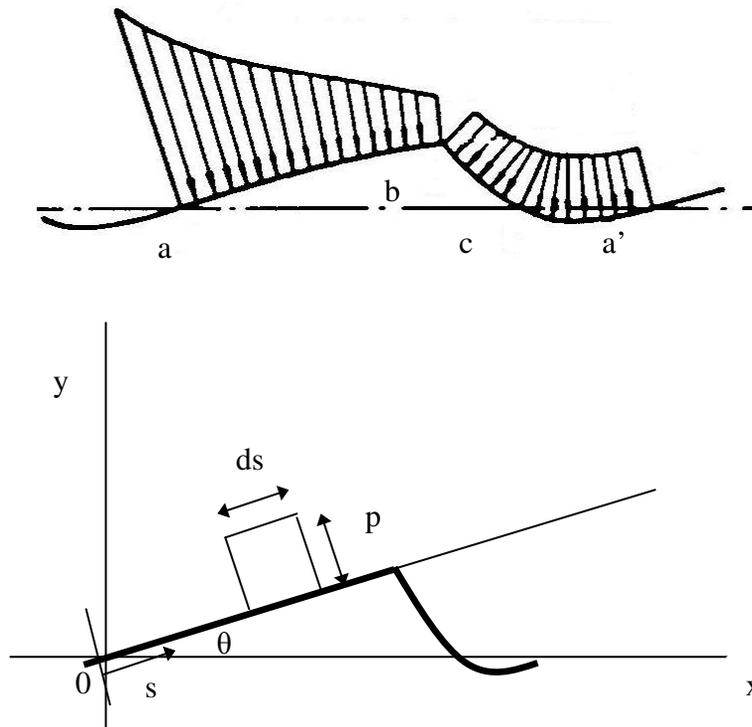


Figura 12: Arranjos esquemáticos idealizados da distribuição de pressões ao longo de uma duna (Modificado de HAQUE e MAHMOOD, 1983). Por tratar-se de modelos idealizados, para fins de cálculo, não se considera o referido aumento súbito de pressão na face de jusante.

A expansão do escoamento gera turbulências quando o mesmo transpassa a crista da configuração de fundo, sendo a face de jusante geralmente detentora de uma inclinação que

impossibilita o ajuste do escoamento ao gradiente desfavorável de pressões, promovendo a separação do escoamento e conseqüente formação da zona recirculação. A forma e o comprimento desta última estão intimamente associados à quantidade de turbulência gerada, que por sua vez define o grau de resistência dado pela rugosidade hidráulica devido a dunas. A seguir, a Figura 13 ilustra a expansão e conseqüente separação do escoamento ao passar pela crista de uma duna.

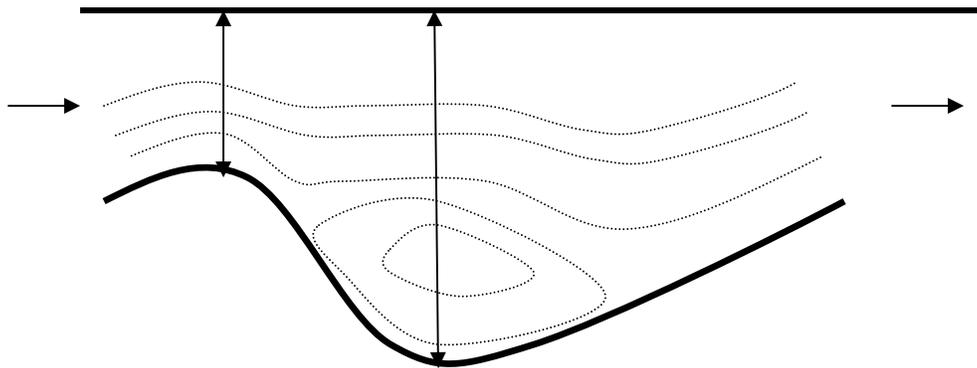


Figura 13: Ilustração da expansão e separação do escoamento ao longo da face de jusante de uma duna (Modificado de WILBERS, 2004).

Na região de recirculação, os vórtices gerados são responsáveis pela dissipação de energia mediante a transferência desta tanto para o leito, que possivelmente responderá pela suspensão de sedimentos, quanto para a coluna d'água, que irá transferir a mesma até a superfície, gerando pequenas perturbações sob a forma de ondas (MULLER e GYR, 1986; KOSTASCHUK e VILLARD, 1996; KADOTA e NEZU, 1999). Estima-se, ao se observar uma duna em particular, um comprimento da zona de recirculação 5,5 vezes superior à altura do ponto de separação (WILBERS, 2004).

É sabido que a rugosidade hidráulica em leitos compostos por dunas está fortemente relacionada à altura das formas de fundo. Estudos laboratoriais específicos revelam estreita ligação entre o aumento da altura da duna e o alargamento da zona de recirculação, que induz uma maior dissipação de energia pelo escoamento. Fisicamente, este alargamento significa uma

geração de vórtices mais largos e maiores turbulências na região (MULLER e GYR, 1986; NELSON *et al.*, 1993; BENNETT e BEST, 1995).

Não apenas o conhecimento da altura é importante na estimativa da rugosidade hidráulica característica de um campo de dunas. Deve-se dispor de outros parâmetros não menos importantes que caracterizem a geometria destas formas de fundo, tais como o seu comprimento médio e a frequência de ocorrência.

No tocante ao transporte de sedimentos, a iminência do movimento ocorre nas proximidades do centro da face de montante da duna (MENARD, 1950). Esta é a região onde o escoamento que foi separado na crista da duna adere-se novamente ao contorno, nas proximidades do ponto de estagnação. Em estudos de laboratório, RAUDKIVI (1967) constatou que apesar da tensão de cisalhamento e velocidade serem pequenas nas proximidades do ponto de estagnação, a intensidade da turbulência longitudinal é muito maior quando comparada com qualquer outro ponto existente sobre o perfil da forma de fundo. Essa intensidade seria a responsável pela iniciação do transporte do grão em leitos repletos de dunas.

Conceitualmente, a força de arraste induzida pela duna, neste trabalho chamada  $F_p$ , é obtida mediante a integração, na direção do escoamento, do campo de pressões que atuam sobre a superfície da estrutura. Portanto, tem-se que:

$$F_p = \int_0^c p \sin \phi_u ds - \int_c^j p \sin \phi_d ds \quad (\text{Eq. 3.19})$$

onde  $p$  é a pressão local atuante na superfície da duna,  $c$  e  $j$  as distâncias ao longo da duna até o ponto da crista e da cava, respectivamente,  $\phi_u$  e  $\phi_d$  os ângulos de montante e jusante em relação à direção longitudinal do perfil. Na formulação descrita anteriormente,  $F_p$  é considerada como positiva no sentido de jusante. Esta força dividida pelo comprimento da duna resulta na tensão de cisalhamento correspondente,  $\tau''$ . O coeficiente de resistência por forma  $f''$  está intimamente associado a esta tensão.

$$\tau'' = \frac{F_p}{\lambda} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

Desta forma, o coeficiente de resistência  $f''$  é obtido através da integração do perfil de pressões ao longo da duna que, de acordo com HAQUE e MAHMOOD (1983), resulta em:

$$f'' = \frac{8}{\rho \lambda U^2} \int_{abca'} p dy \quad (\text{Eq. 3.21})$$

onde  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $\lambda$  o comprimento da duna,  $U$  a velocidade média do escoamento acima da duna, e  $p$  a pressão.

#### 3.4.2. Metodologias de avaliação de $f''$

Diversos estudiosos em Hidráulica Fluvial procuraram, ao longo dos anos, quantificar de forma generalizada o coeficiente de resistência por forma  $f''$ , fato que resultou na documentação de uma grande variabilidade de metodologias e expressões matemáticas. No entanto, devido a grande complexidade e peculiaridades dos cursos d'água, torna-se bastante difícil a obtenção de expressões quantitativas que sejam aplicáveis a qualquer rio. Tais expressões, baseadas em correlações empíricas, apesar de qualitativamente semelhantes podem conduzir a resultados significativamente divergentes, fato que conduz os usuários a uma fiel observância das características dos cursos d'água em que as mesmas foram concebidas. Uma aplicação desprovida de critérios de diferentes leis de resistência poderá possivelmente corresponder a diferentes tipos de formas de fundo.

Em leitos aluvionares caracterizados pela presença de dunas, a determinação da rugosidade hidráulica característica é principalmente atribuída ao conhecimento do tamanho e da geometria das formas de fundo existentes, sendo a altura e o comprimento das mesmas os principais parâmetros que caracterizam sua morfologia. Possivelmente, este seja o motivo para

que os principais fatores que estimam a resistência imposta ao escoamento devido a forma adotem estas dimensões como parâmetros-base da formulação.

A seguir, serão abordadas de forma resumida algumas das principais metodologias que subsidiaram a escolha do critério mais adequado de avaliação de  $f''$  para o caso do Rio Amazonas, especificamente ao trecho compreendido entre Óbidos e Manacapuru, que será abordado a seguir.

### **VAN RIJN (1984)**

VAN RIJN (1984) considerou que a resistência devido às formas de fundo podia ser expressa como uma rugosidade hidráulica,  $k_s''$ ,

$$k_s'' = \varphi\left(\Delta, \frac{\Delta}{\lambda}\right) \quad (\text{Eq. 3.22})$$

sendo  $\varphi$  uma função empírica determinada a partir de dados de laboratório e de campo e  $\Delta$  a altura da duna. A expressão obtida por VAN RIJN para esta função é:

$$k_s'' = 1,1\Delta\left(1 - e^{-25\frac{\Delta}{\lambda}}\right) \quad (\text{Eq. 3.23})$$

Incluindo a rugosidade hidráulica no perfil logarítmico de velocidades obtém-se:

$$f'' = \frac{8g}{\left[18 \log\left(\frac{12h}{k_s''}\right)\right]^2} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

onde  $h$  é a profundidade do escoamento e  $g$  a aceleração da gravidade.

### **HAQUE e MAHMOOD (1983)**

Em estudos realizados em laboratório, HAQUE e MAHMOOD (1983), sob condições controladas, e utilizando como suporte modernas técnicas de modelagem numérica revelam que o fator de resistência por forma pode ser determinado mediante a análise de escoamentos bidimensionais de fluidos incompressíveis, invíscitos e rotacionais, apresentando consideráveis vantagens. Estas são advindas da maior facilidade de resolução numérica da equação de Navier-Stokes, mediante a utilização de uma equação que relaciona a função de corrente com a vorticidade e que trabalha com grandezas escalares, sendo possível a obtenção posterior do campo de velocidades.

Segundo a metodologia desenvolvida por estes pesquisadores, o fator de resistência por forma independe do tamanho absoluto das formas de fundo e da velocidade média do escoamento, sendo preponderantemente dependente de parâmetros geométricos associados à esbeltez ( $\Delta/\lambda$ ) e à rugosidade relativa ( $\Delta/D_c$ ) das dunas.

Utilizando um modelo numérico para resolver um escoamento invíscito e rotacional HAQUE e MAHMOOD (1983), chegaram à seguinte solução:

$$f'' = \phi\left(\frac{D_c}{\lambda}\right)\left(\frac{a}{D_c}\right)^{1.653} \quad (\text{Eq. 3.25})$$

onde  $D_c$  é a profundidade acima da crista e  $a$ , a altura da duna no ponto de separação, considerada como sendo proporcional à altura total da duna,  $a \approx 0,8\Delta$ . A função  $\phi(D_c/\lambda)$  é reproduzida na Figura 14. De acordo com esta análise, o fator de atrito devido à presença das dunas depende da sua esbeltez ( $\Delta/\lambda$ ) e rugosidade relativa ( $\Delta/D_c$ ).

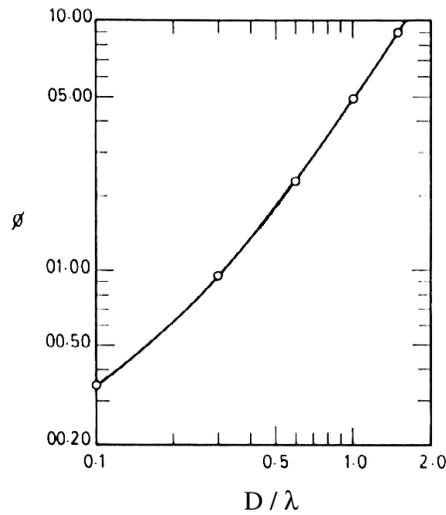


Figura 14: Relação funcional  $\phi(D_c / \lambda)$  obtida numericamente por HAQUE E MAHMOOD (1983).

### **FEDELE (1995)**

FEDELE (1995) inclui também o tamanho dos sedimentos como variável que influencia a resistência por forma. A expressão empírica apresentada por este autor foi ajustada a partir de dados de laboratório e originariamente desenvolvida em termos do coeficiente de Manning,  $n$ . A expressão correspondente de  $f''$  é

$$f'' = (1,504 d_{50}^{0,39} \Delta)^2 \frac{8g}{h} \quad (\text{Eq. 3.26})$$

onde  $d_{50}$  é o diâmetro representativo do sedimento do leito.

### **SHEN *et al.* (1990)**

Experimentos conduzidos em laboratório a partir de medições diretas da distribuição de pressões ao longo de um campo uniforme de dunas permitiram a obtenção da seguinte relação empírica, cujos parâmetros relevantes são também a rugosidade relativa e a esbeltez da duna:

$$f'' = 4C_D \frac{\Delta}{\lambda} \quad (\text{Eq. 3.27})$$

Nesta expressão,  $C_D$  é o coeficiente que caracteriza o campo de pressões atuante sobre as dunas, que para o caso do Amazonas, é dado por:

$$C_D = \frac{4}{9} \left( \frac{\Delta}{D_C} \right)^{\frac{3}{8}}, \text{ considerando } \left( \frac{\Delta}{D_C} \right) \leq 0,35 \quad (\text{Eq. 3.28})$$

Desta forma, tem-se que  $f''$  é dado por:

$$f'' = \frac{16}{9} \left( \frac{\Delta}{D_C} \right)^{\frac{3}{8}} \frac{\Delta}{\lambda} \quad (\text{Eq. 3.29})$$

### **ENGELUND (1977)**

Partindo também do princípio que o gradiente de energia pode ser dado pela soma de duas parcelas,  $S'$  e  $S''$ , sendo a primeira decorrente da rugosidade do grão e a segunda devido às formas de fundo, ENGELUND (1966) propôs uma linha de raciocínio baseada em critérios de similaridade de escoamentos, que deu origem às Leis da Teoria da Semelhança Dinâmica dos Escoamentos, sendo estas diretamente associadas às seguintes variáveis adimensionais:

$$\tau_* = \frac{\tau}{\gamma(s-1)d_s} = \frac{hS}{(s-1)d_s} \quad (\text{Eq. 3.30})$$

$$\tau_*' = \frac{\tau'}{\gamma(s-1)d_s} = \frac{h'S}{(s-1)d_s} \quad (\text{Eq. 3.31})$$

$$\tau_*'' = \frac{F^2}{8} \frac{\alpha \Delta^2}{\gamma(s-1)d_s L} \quad (\text{Eq. 3.32})$$

Nas três equações descritas acima,  $\tau_*$ ,  $\tau_*'$  e  $\tau_*''$  correspondem à tensão tangencial normalizada do escoamento, à tensão tangencial normalizada relativa à rugosidade do grão do leito e à relativa às formas de fundo, respectivamente. O parâmetro  $s$  corresponde ao peso específico do grão,  $F$  ao Número de Froude e  $d_s$  ao diâmetro representativo do sedimento, sendo usualmente representado por  $d_{50}$  ou  $d_{65}$ . O parâmetro  $\alpha$  representa um fator geométrico, a ser calibrado de acordo com o comprimento da duna, sua altura e profundidade da coluna d'água. Experimentos realizados em laboratório acusam que o valor de  $h'$  pode ser obtido satisfatoriamente através da seguinte formulação logarítmica:

$$\frac{U}{\sqrt{gh'I}} = 6 + 2,5 \ln \frac{d'}{(s-1)d_{65}} \quad (\text{Eq. 3.33})$$

onde  $U$  é a velocidade média do escoamento.

A essência da similaridade proposta por ENGELUND (1966) tem suporte nas seguintes premissas:

- (i) Dois escoamentos serão dinamicamente semelhantes quando os valores das respectivas tensões tangenciais normalizadas relativas à rugosidade do grão forem iguais, isto é, quando ambos os escoamentos apresentarem os mesmos valores de  $\tau_*'$ ;
- (ii) Em dois escoamentos dinamicamente semelhantes, as perdas de energia devido à geometria das formas de fundo devem corresponder a mesma parcela ou fração das respectivas perdas totais de energia.

Os resultados das constatações de EUGELUND (1966) podem ser visualizados graficamente através da relação entre as tensões normalizadas  $\tau_*$  e  $\tau_*'$ , considerando-se os tipos diferentes de formas de fundo, conforme ilustra a Figura 15, a seguir.

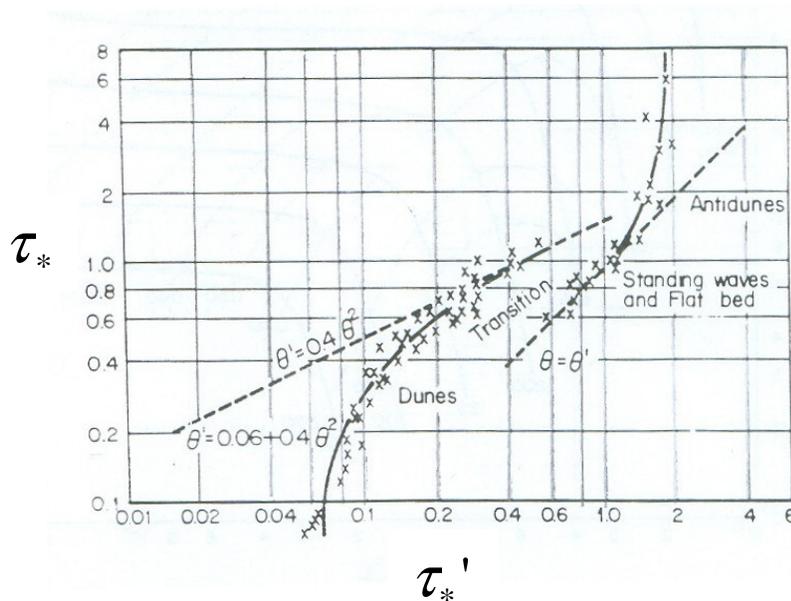


Figura 15: Relação universal de EUGELUND (1966) entre as tensões normalizadas  $\tau_*$  e  $\tau_*'$  (Modificado de CHANG, 1988).

O gráfico anterior permite estimar com relativa segurança os tipos de configuração de fundo observados em escoamentos com superfície livre sobre fundos móveis, sendo, portanto uma ferramenta bastante útil quando se dispõe das características hidráulicas e sedimentológicas do curso d'água.

Especificamente no que se refere ao coeficiente de resistência devido à forma, ENGELUNG (1977) propõe a seguinte formulação:

$$f'' = 10 \frac{\Delta^2}{h\lambda} \exp\left(-2,5 \frac{\Delta}{h}\right) \quad (\text{Eq. 3.34})$$

onde  $h$  é a profundidade média da coluna d'água.

### 3.5. RESISTÊNCIA DEVIDO À RUGOSIDADE DO GRÃO: $f'$

Em casos de escoamentos naturais sobre leitos cuja aproximação permita caracterizá-los como planos se aceita que a resistência ao escoamento pode ser reduzida única e exclusivamente à parcela referente à rugosidade do grão, notoriamente conhecida como resistência de pele (*skin friction*). Sob estas circunstâncias, fica evidente que a resistência total imposta ao escoamento depende fundamentalmente do diâmetro do grão e da profundidade do escoamento, cuja relação é conhecida como rugosidade relativa.

Porém, em leitos comprovadamente não-planos, caracterizados pela distribuição de formas de fundo em diferentes locais de sua extensão, formando grandes campos de dunas como é o caso do Rio Amazonas, faz-se indispensável considerar seus efeitos sobre o escoamento. Essa medida se dá tanto na estimativa do coeficiente de resistência por forma, apresentado nos item anterior, assim como se deve preferencialmente ater-se a metodologias de previsão da resistência devido à rugosidade do grão concebida para leitos caracterizados por tais configurações geométricas.

Neste trabalho, especificamente no tocante à resistência de pele, adotar-se-á basicamente duas diferentes metodologias de previsão. Uma correspondente à formulação clássica, obtida diretamente da simples conjugação das equações 3.17 e 3.18 e expressa em termos de  $f$  e outra proposta por SHEN *et al.* (1990), desenvolvida empiricamente a partir de medições independentes, em situações controladas, de diversos parâmetros do escoamento sobre uma série de formas de fundo triangulares uniformes, lisas e rugosas, bidimensionais, confeccionadas em um canal de laboratório, cujas geometrias e proporções evidenciam os aspectos mais característicos e tipicamente encontrados em grandes rios. A formulação clássica anteriormente mencionada refere-se à seguinte equação:

$$f' = \frac{8g}{\left(18 \log \left( \frac{12R_b}{3d_{90}} \right) \right)^2} \quad (\text{Eq. 3.35})$$

sendo  $R_b$  o raio hidráulico adaptado e  $d_{90}$  o grão correspondente a 90% da distribuição granulométrica da amostra de sedimentos do leito.

Assim como a força de arrasto induzida pela forma de fundo é obtida pela integração do campo de pressões atuantes sob as formas de fundo, a força longitudinal  $F_s$  devido à rugosidade do grão ou atrito superficial, por unidade de largura, é obtida mediante a integração do campo de tensões tangenciais desde o ponto de estagnação até o ponto de separação, localizado na crista da duna. Estes limites espaciais de integração delimitam a sua área de influência e excluem a zona de recirculação do cálculo da resistência de pele. Matematicamente, tem-se que:

$$F_p = \int_j^c \tau_x dx \quad (\text{Eq. 3.36})$$

sendo  $c$  e  $j$  os valores do eixo das abscissas no ponto de separação e estagnação, respectivamente. Esta força dividida pelo comprimento da duna resulta na tensão cisalhante devido a rugosidade do grão,  $\tau'$ :

$$\tau' = \frac{F_s}{\lambda} \quad (\text{Eq. 3.37})$$

Nos experimentos conduzidos por SHEN *et al.* (1990), a equação a seguir possibilitou representar com bastante acurácia os valores medidos para  $f'$ , considerando os diferentes cenários abordados nos experimentos:

$$f' = \left( \frac{0,106h}{D_c} \right) \frac{1}{(R_N)^{1/4}} \quad (\text{Eq. 3.38})$$

Nesta equação,  $R_N$  é o Número de Reynolds, dado pela razão entre a vazão por unidade de largura e a viscosidade cinemática da água ( $R_N = q/\nu$ ).

### 3.6. DISCUSSÃO SOBRE AS DIFERENTES METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA

No que se refere à resistência ao escoamento proporcionada pelas formas de fundo, as diferentes metodologias abordadas no subitem 3.4.2 do presente capítulo incorporam algumas notórias particularidades, apresentando diferenças e similaridades.

Percebe-se que as metodologias propostas por VAN RIJN (1984) e FEDELE (1995) representam expressões empíricas obtidas a partir do ajuste de dados obtidos em laboratório, tendo como principais parâmetros a profundidade local do escoamento e a altura das dunas, enquanto ENGELUNG (1977) pressupõe sua formulação a partir de critérios de similaridade dos escoamentos, também calcada em exames laboratoriais. Já HAQUE e MAHMOOD (1983), assim como SHEN *et al.* (1990) partem de princípios relacionados aos gradientes de pressão atuantes sobre a estrutura com vistas ao cálculo do coeficiente de resistência e suas formulações derivativas, utilizando para tal modernas técnicas de modelagem, sendo os principais parâmetros relevantes na estimativa da resistência a esbeltez ( $\Delta/\lambda$ ) e a rugosidade relativa ( $\Delta/D_c$ ). De fato, metodologias que incorporam estes últimos parâmetros preconizam que o fator de resistência independe do tamanho absoluto das formas de fundo e sim da geometria, caracterizada por ambos os parâmetros.

No tocante às peculiaridades que dificultam estimativas e cálculos mais acurados da rugosidade hidráulica devido às dunas, destaca-se a superposição de outras formas de fundo ao campo principal ou primário, muitas vezes compostas de diferentes tamanhos e geometrias. A maioria dos pesquisadores ao avaliar o efeito das dunas sobre o escoamento desconsidera estas peculiaridades existentes sobre cada duna individual, todavia OGINK (1989) demonstra claramente que quando a referida superposição é evidenciada deve-se prever um maior valor para o parâmetro que define a rugosidade hidráulica devido às dunas e, conseqüentemente, àquela que representa o seu valor na totalidade.

Estudos mais específicos revelam significativa incerteza ao avaliar a influência desta superposição e sua agregação ao parâmetro que simboliza o fator de resistência devido a dunas. Alguns pesquisadores propõem considerar um cálculo específico e similar às dunas principais e adicioná-lo ao fator de resistência total, o que de certa forma resulta em um terceiro fator de resistência. Outros, como OGINK (1989), revelam uma tendência em adicionar um valor percentual devido à superposição das dunas secundárias ao fator de resistência devido à forma, sendo o último calculado para o campo de dunas principal ou primário.

Segundo WILBERS (2004), com a finalidade de melhor se estimar a rugosidade hidráulica de um trecho fluvial composto por formas de fundo, um eficiente fator de resistência deverá levar em consideração os seguintes aspectos:

- (1) A rugosidade do grão, associada ao fator  $f'$ , exerce influência apenas nas regiões fora da zona de separação/recirculação;
- (2) A altura de separação está diretamente vinculada ao fator de resistência devido à forma,  $f''$ ;
- (3) Os efeitos gerados pelas dunas superpostas ao campo de dunas primário devem ser incorporados ao cálculo da rugosidade hidráulica, de acordo com a sua abundância;

Muitos pesquisadores adotam em suas formulações a altura da duna como o ponto onde ocorre o deslocamento do escoamento. Outros, conforme evidencia a metodologia proposta por HAQUE e MARMOOD (1983) no subitem 3.4.2 deste capítulo, adotam uma altura de deslocamento um pouco inferior à distância entre a cava e a crista ( $a = 0,80\Delta$ ).

Similarmente à metodologia acima mencionada, WILBERS (2004) propõe uma altura de descolamento corresponde ao ponto situado na face de jusante da duna onde a declividade se torna superior a  $10^\circ$ , sendo este o ponto a partir do qual ocorre a separação do escoamento. Esta, portanto, seria a região onde ocorre a perda da velocidade crítica e preferencialmente um local de

acúmulo de sedimentos, fato que promove um desmoronamento e conseqüente acumulação de material na base da duna, sob um ângulo próximo ao do repouso do grão constituinte do leito.

A prática das medições de campo estabelece, contudo, certos critérios que devem ser obedecidos de forma a se poder aplicar de forma consciente a altura em que ocorre o descolamento do escoamento e sua aplicação em formulações, tendo em vista que sua determinação se encontra intimamente dependente do grau de resolução dos levantamentos batimétricos do leito.

Na carência de levantamentos batimétricos mais detalhados e que possibilitem a captura de pormenores das feições morfológicas, WILBERS (2004) ainda propõe a seguinte expressão para determinação da altura de descolamento:

$$\frac{H_b}{\Delta} = 0,95 \quad (\text{Eq. 3.39})$$

sendo  $H_b$  a altura correspondente ao local onde ocorre o descolamento do escoamento e  $\Delta$  a altura total da duna, contabilizada da cava até a crista.

Seguindo a mesma metodologia, de forma a estimar o comprimento da zona de separação e conseqüentemente a proporção da resistência devido à rugosidade do grão em relação ao comprimento total da duna, a seguinte expressão é adotada:

$$\lambda_{sep} = \frac{H_b}{\tan(10^\circ)} \quad (\text{Eq. 3.40})$$

sendo a proporção em relação ao comprimento total da duna dada por:

$$\frac{(\lambda - \lambda_{sep})}{\lambda} \quad (\text{Eq. 3.41})$$

A metodologia exposta anteriormente resulta na aplicação de um valor percentual ao fator de resistência devido à rugosidade do grão,  $f'$ , cuja utilização isenta qualquer contribuição do corpo da duna situada na zona de separação, conforme ilustra a seguinte relação, cuja aplicabilidade é dada para leitos compostos basicamente por areia ( $d_{50} \leq 0,002m$ ):

$$f' = \frac{(\lambda - \lambda_{sep})}{\lambda} \frac{8g}{\left(18 \log \left( \frac{12R_b}{3d_{90}} \right) \right)^2} \quad (\text{Eq. 3.42})$$

sendo  $R_b$  o raio hidráulico adaptado e  $d_{90}$  o grão correspondente a 90% da distribuição granulométrica da amostra de sedimentos do leito. Trata-se também de uma equação resultante, claramente, da combinação das equações 3.17 e 3.18, levando-se em consideração a isenção da zona de recirculação, outrora definida como irrelevante no cálculo da resistência devido à rugosidade do grão.

Sendo assim, percebem-se claramente constantes inovações e progressos nas pesquisas no sentido de se aprimorar os parâmetros que servem de balizadores das estimativas de resistência imposta ao escoamento, fato que exalta o ânimo dos adeptos de modelos numéricos cuja calibração depende da sensibilidade e confiabilidade dos dados de entrada. Nesse âmbito, inovações e adaptações em formulações originais existentes também demonstram sucessos, quando comparados dados de campo com àqueles resultantes da aplicação de fatores de resistência melhorados. Como exemplo, pode-se citar a aplicação da metodologia desenvolvida por WILBERS (2004) àquela proposta por ENGELUND (1977):

$$f'' = 10 \frac{H_b^2}{hL} \exp \left( -2,5 \frac{H_b}{h} \right) \quad (\text{Eq. 3.43})$$

## Capítulo 4

### 4. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO NO RIO AMAZONAS

#### 4.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo destina-se a avaliar a resistência ao escoamento no Rio Amazonas mediante a aplicação das diferentes metodologias descritas no capítulo 3 em uma porção fluvial pertencente ao trecho médio, situado especificamente entre os municípios de Manacapuru e Óbidos. Neste trecho, concebido como estudo de caso da presente dissertação, se destacam extensos campos de dunas ao longo de todo o seu comprimento, que perfazem 722 km ao longo do canal principal.

Para o propósito acima exposto, será dado um enfoque particular e mais específico à aplicabilidade das diferentes metodologias de previsão do coeficiente de resistência por forma,  $f''$ , obtidas com base nos levantamentos batimétricos longitudinais do campo de dunas em diferentes estações de medição existentes ao longo do percurso, que subsidiará a posterior estimativa daquela mais adequada ao trecho estudado. Esta irá compor a adoção de um coeficiente de resistência global, que também engloba a resistência de pele, sendo de suma importância como dado de entrada na aplicação de modelos hidrodinâmicos destinados à calibração dos níveis d'água.

#### 4.2. DADOS DISPONÍVEIS

Os dados disponíveis para a área de estudo resultam do banco de dados referente às atividades de campanha de campo desenvolvidas no âmbito do Projeto HiBAm, cujos objetivos principais foram estudar a dinâmica hidrológica (sazonal e interanual) do rio Amazonas e de seus principais tributários, o impacto do clima e de sua variabilidade nas descargas líquidas e sólidas e estabelecer a transferência de matéria com a planície de inundação e importância das várzeas (HiBAM, 2002).

As campanhas de campo acima mencionadas refletem dados relativamente regulares no período 2001-2005, sendo os dados disponibilizados apresentados na Tabela II a seguir.

Tabela II: Resumo do período e trecho compreendido para cada campanha de medição

<b>Período</b>	<b>Período Hidrológico</b>	<b>Registro de medições</b>
Fevereiro / 2001	Águas médias	Manacapuru – Urucurituba – Santarém
Junho / 2001	Águas altas	Manacapuru – Fda. Vista Alegre – Santarém
Agosto / 2001	Águas altas	Manacapuru – Nova Olinda do Norte – Santarém
Dezembro / 2001	Águas baixas	Tabatinga – Nova Olinda do Norte – Santarém
Março / 2002	Águas médias	Manacapuru – Porto Velho – Santarém
Julho / 2002	Águas altas	Tabatinga – Gurupá
Março / 2003	Águas médias	Tabatinga – Santarém
Junho / 2003	Águas altas	Manacapuru – Santarém
Março / 2004	Águas médias	Manacapuru – Santarém
Março / 2005	Águas médias	Óbidos

Os dados apresentados abrangem periodicidades no levantamento de vazões em diferentes épocas do ano, fato que permite caracterizar em determinadas estações cenários de águas altas, médias e baixas. Além disso, dispõe-se de dados referentes à amostragem de água, sedimentos do leito e em suspensão, assim como informações significativas a respeito de perfis longitudinais ao longo do leito e medições de batimetrias transversais. Nessas circunstâncias, assim como as vivenciadas pelo autor durante a sua participação na campanha de medições realizadas em março de 2005, foram utilizados equipamentos que atendem às condições tipicamente observadas no Amazonas, quando se dispunha de uma embarcação de madeira típica da região, assim como pequenas lanchas conhecidas popularmente como voadeiras, conforme ilustra a Figura 16 a seguir.



Figura 16: Vista da embarcação utilizada na campanha de medições referente a Março de 2005.

Especificamente no que tange à campanha realizada em março de 2005, dispõe-se apenas de registros pessoais que abrangem três perfis longitudinais específicos executados nas proximidades do município de Óbidos, em locais onde se evidenciam consideráveis campos de dunas (STRASSER, comunicação pessoal). Dos perfis levantados, dois configuram trechos de pouco mais de 2 km e um representa um longo trecho que perfaz cerca de 8 km de extensão, conforme ilustra a Figura 17.

À luz da abordagem pretendida neste trabalho, as informações necessárias à caracterização geométrica das dunas existentes na área de estudo foram obtidas com base nos referidos levantamentos dos perfis longitudinais obtidos mediante a utilização conjunta de um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 300 kHz e de dois equipamentos do tipo GPS (Global Positioning System), modelo XL12 e II Plus, da Garmin®, sendo o primeiro um correntômetro acústico de efeito doppler<sup>3</sup> e os últimos equipamentos destinados à obtenção de coordenadas através do geoposicionamento por satélite. Em certas medições, as profundidades encontradas revelaram a necessidade da utilização de um ADCP 600 kHz. Informações quanto à vazão da seção transversal típica também foram utilizadas, uma vez que uma das metodologias de cálculo do coeficiente de resistência exploradas no presente trabalho demandava o seu conhecimento.

---

<sup>3</sup> Trata-se da mudança na frequência observada de uma onda, quando a fonte ou o detector se movem relativamente ao meio onde a mesma se propaga. No tocante ao princípio específico do ADCP, trata-se da mudança de frequência do sinal transmitido pelo sonar, causado pelo movimento relativo entre o instrumento e o material em suspensão na água, sob a ação do feixe de ondas sonoras.

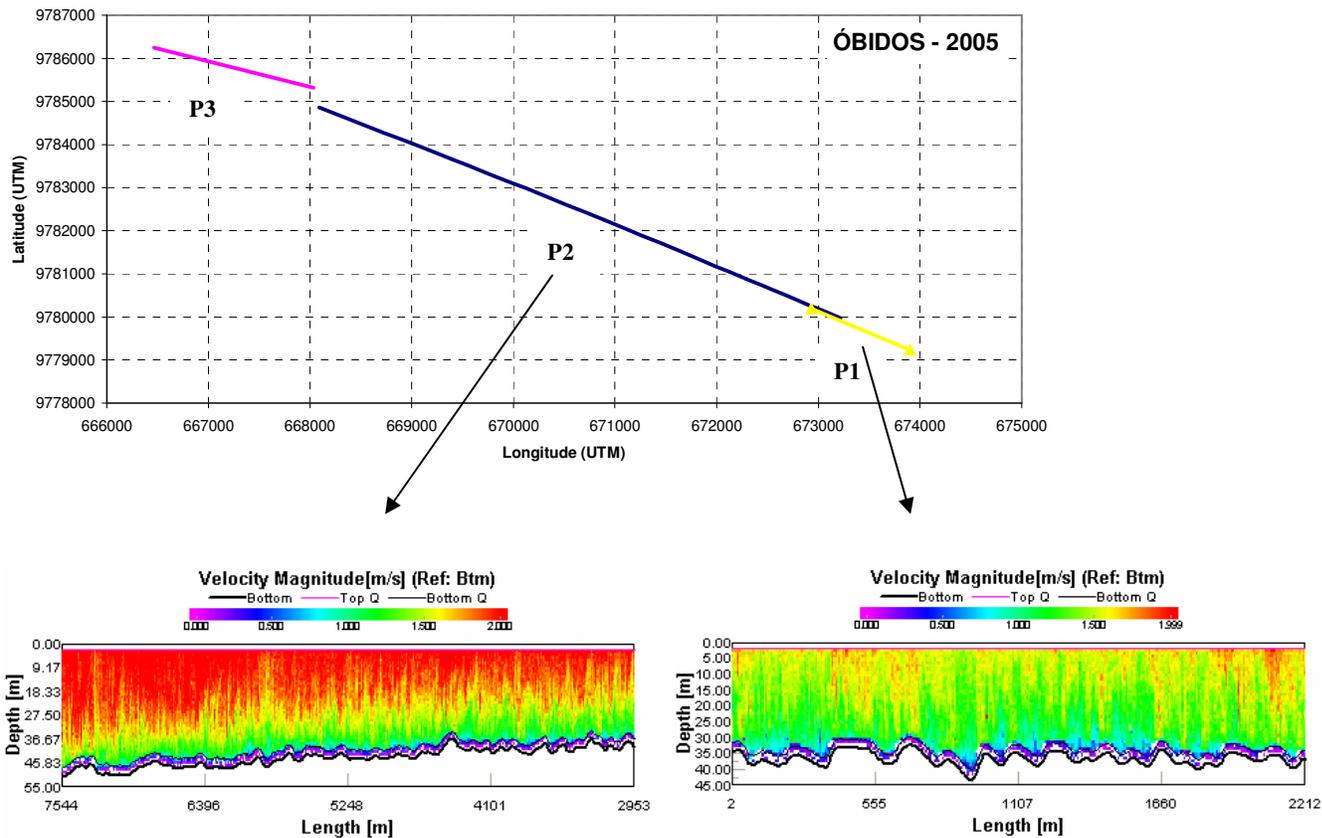


Figura 17: Coordenadas dos perfis longitudinais levantados e características do escoamento e das dunas observadas nas proximidades da cidade de Óbidos (Março de 2005).

A seguir, a Figura 18 ilustra basicamente o tipo de informações colhidas e trabalhadas durante a abordagem dos perfis longitudinais e das seções transversais típicas de cada uma das estações de medição analisadas.

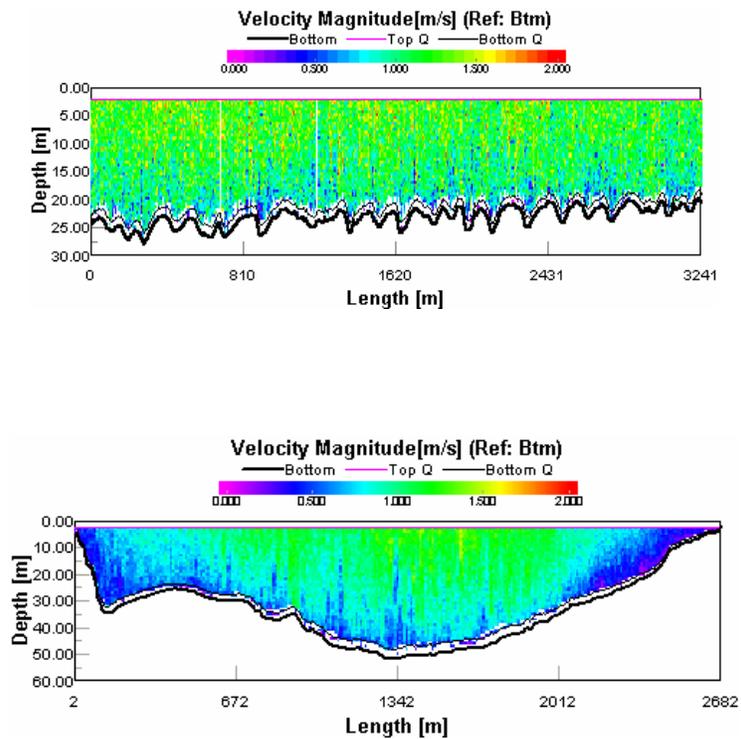


Figura 18: Ilustração típica de arquivos com medições de perfis longitudinais e batimetria da seção transversal, onde se percebe mediante aplicação da escala de cores contida na legenda, as magnitudes das velocidades observadas (Jatuarana, 2001).

No tocante ao uso específico do ADCP para grandes cursos d'água, trata-se de uma eficiente ferramenta que utiliza o efeito doppler para medir a vazão dos rios através do somatório de sucessivos perfis verticais de velocidades instantâneas obtidos em tempo real. O equipamento é constituído de uma sonda, com quatro transdutores e um compartimento onde os sinais são filtrados e transmitidos para um computador, que deve estar interligado ao mesmo durante a execução das medições, fato que permite a medição em tempo real e uma elevada taxa de reprodutibilidade. Secundariamente, o ADCP também pode ser utilizado para captura de informações batimétricas, fato que permitiu a detecção de dunas e outras configurações presentes no leito fluvial.

O software que gerenciou as informações recebidas e configurou a captura das mesmas de acordo com as condições observadas *in-loco* foi o Winriver, sendo o mesmo condicionado pelo

fabricante do equipamento (*RDInstruments*®). A seguir, a Figura 19 mostra a interface do programa supramencionado.

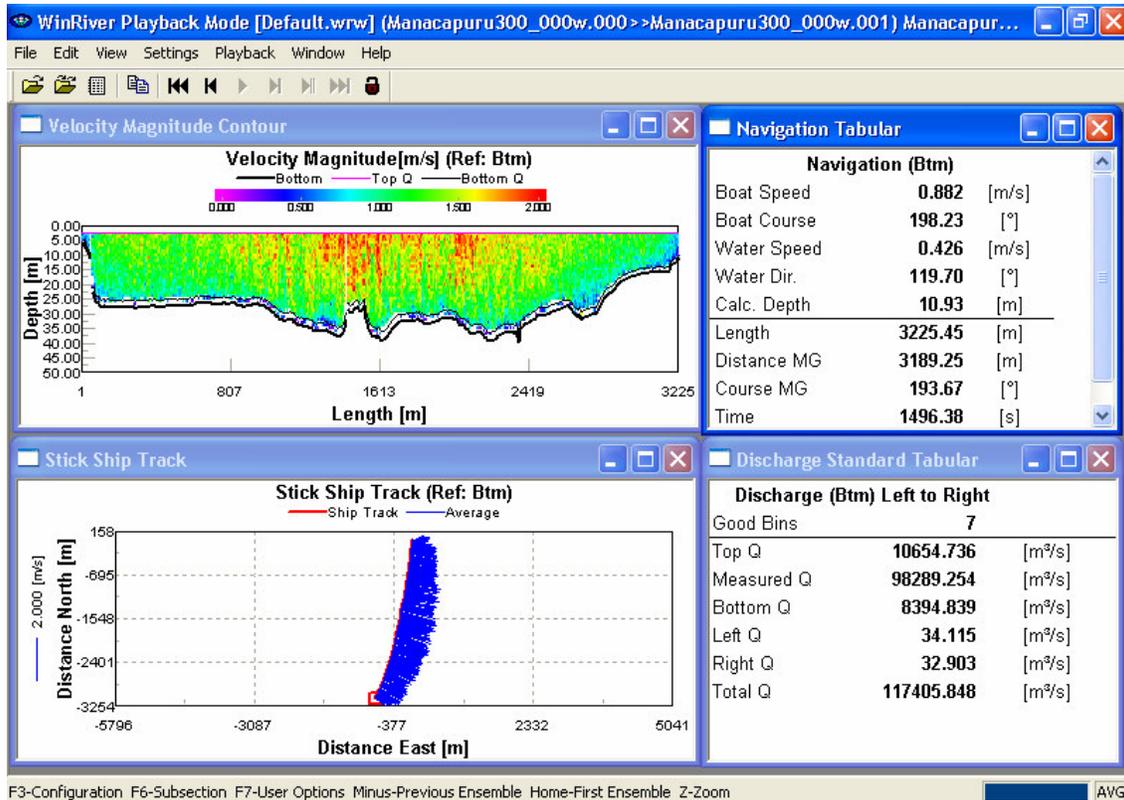


Figura 19: Aspecto da interface do Winriver.

Quanto ao ciclo operacional do ADCP, o mesmo consiste no processamento do sinal refletido pelas partículas em suspensão existentes na coluna d'água, divisão da mesma em um número discreto de células na vertical e na determinação da velocidade e direção do fluxo para cada célula. Vale ressaltar que nem toda a vazão é medida pelo ADCP, uma vez que certa vazão é estimada para a superfície do rio. Ao proceder a medição da vazão para uma dada seção transversal, faz-se necessárias também estimativas das vazões referentes a cada uma das margens, que por sua vez não representam valores significativos em virtude dos reduzidos valores da velocidade nas proximidades dos contornos.

Geralmente, a fixação do ADCP à embarcação se dá mediante a utilização de estruturas de suporte em alumínio, especialmente projetadas para a finalidade e condições que o mesmo é submetido. A seguir, a Figura 20 revela o posicionamento do equipamento durante as medições.

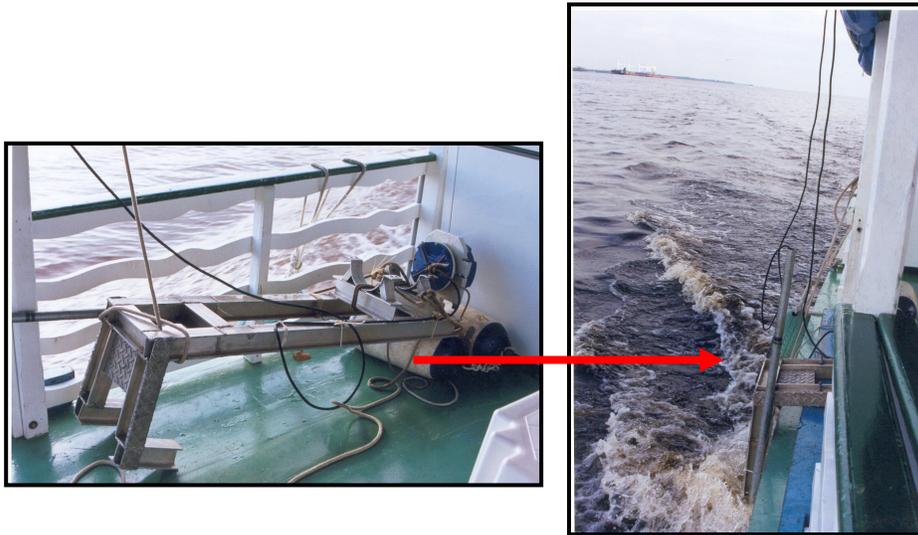


Figura 20: Aspecto do suporte de fixação do ADCP à embarcação.

Dos diversos perfis longitudinais que constam no banco de dados disponibilizado, os estudos aqui abordados se concentraram apenas no trecho Manacapuru-Óbidos, onde foram analisadas especificamente as seguintes estações de medição, contadas no sentido de montante para jusante: Manacapuru, Jatuarana, Grande Eva, Iracema, Parintins, Itacoatiara e Óbidos.

A seguir, tendo como referência o escopo do Projeto HiBAm, são apresentadas as estações de medição e suas respectivas coordenadas em cujas proximidades foram observados campos consideráveis de dunas nos levantamentos batimétricos longitudinais realizados ao longo do trecho médio do Amazonas, conforme indicam a Figura 21 e a Tabela III.

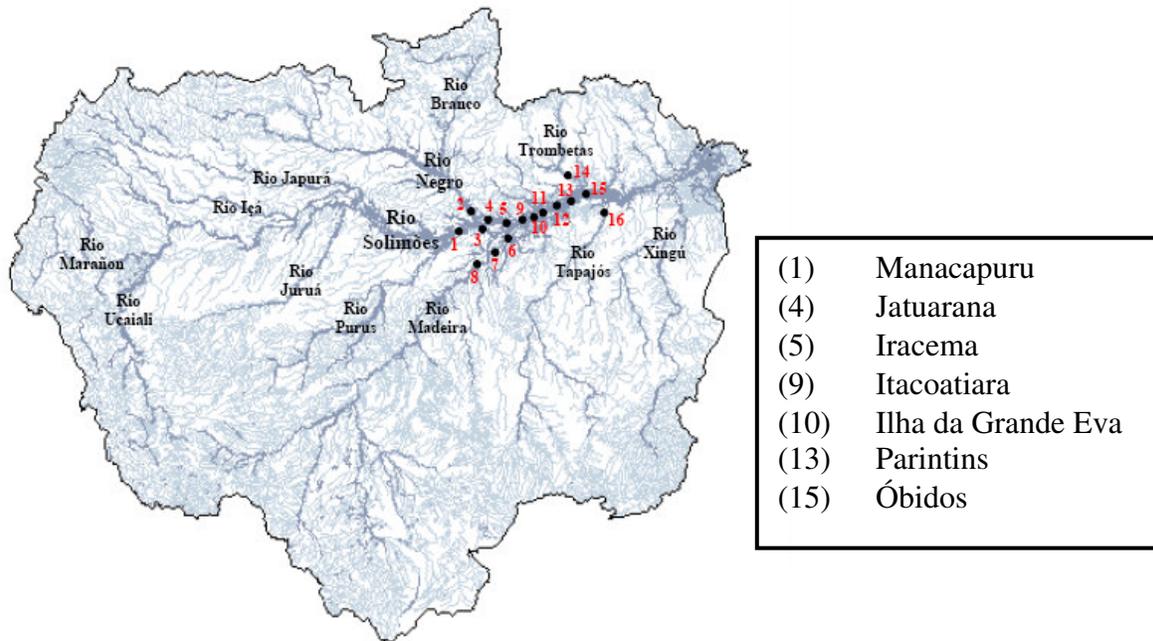


Figura 21: Ilustração da Bacia Hidrográfica Amazônica, com os seus principais tributários e a identificação das estações de medição que tiveram seus campos de dunas avaliados neste trabalho (Modificada de CAMREX, 2000; STRASSER, 2002).

Tabela III: Coordenadas das estações de medição com campos de dunas selecionados para análise

NOME	RIO	COORDENADAS	
		LATITUDE (S)	LONGITUDE (W)
Manacapuru	Solimões	3° 18' 30"	60° 36' 34"
Jatuarana	Amazonas	3° 30' 00"	59° 40' 48"
Grande Eva	Amazonas	*	*
Iracema	Amazonas	5° 49' 00"	38° 19' 00"
Parintins	Amazonas	2° 37' 19"	55° 43' 36"
Itacoatiara	Amazonas	3° 06' 15"	58° 26' 35"
Óbidos	Amazonas	1° 54' 05"	55° 31' 07"

\* Coordenadas não encontradas na listagem geral da ANA (2006) e no site da Hidroweb (ANA).

#### 4.3. ANÁLISE DOS PERFIS LONGITUDINAIS

A escolha das estações fundamentou-se na premissa de se avaliar a aplicabilidade das diferentes metodologias de cálculo da resistência imposta ao escoamento, considerando cenários típicos e característicos de cheia e estiagem. Portanto, primeiramente procedeu-se a uma criteriosa identificação dos cerca de 255 perfis longitudinais presentes na base de dados disponível e posterior seleção daqueles cujas medições possibilitassem configurar diferentes situações do ciclo hidrológico, considerando aproximadamente o mesmo campo de dunas levantado.

Da totalidade dos registros batimétricos escolhidos para análise foram mensurados parâmetros geométricos característicos de 325 dunas, distribuídas ao longo da área de estudo, conforme indica a Tabela IV a seguir.

Tabela IV: Quantitativo de dunas avaliado nas diferentes estações de medição

<b>Estação de medição</b>	<b>Período de medição</b>	<b>Nº de dunas</b>
Manacapuru	Agosto de 2001	16
	Novembro de 2001	23
Jatuarana	Maio de 2001	24
	Agosto de 2001	22
	Novembro de 2001	29
Grande Eva	Julho de 2002	22
	Novembro de 2001	33
Iracema	Agosto de 2001	28
	Dezembro de 2001	22
Parintins	Agosto de 2001	10
Itacoatiara	Agosto de 2001	12
Óbidos	Março de 2005	35
	Agosto de 2001	25
	Dezembro de 2001	24
<b>Total =</b>		<b>325</b>

Os perfis longitudinais foram inicialmente exportados do Winriver para um programa específico de pós-processamento das informações oriundas do ADCP, responsável pelo detalhamento das informações batimétricas ao longo de toda a progressiva levantada, fato que possibilitou a geração de gráficos e planilhas com os principais parâmetros geométricos de cada duna solitária, assim como os valores médios das propriedades geométricas que forneceram o padrão característico de cada estação fluviométrica.

Paralelamente, foram identificados também registros da descarga líquida típica das seções transversais características de cada uma das estações, indispensáveis à abordagem de uma das metodologias referentes à resistência de pele (*skin friction*). Desta forma, foi possível descartar diversos perfis cujas medições não resultariam em dados que poderiam identificar com a requerida precisão as feições de interesse.

No tocante à confiabilidade da elaboração de análises sazonais, foram descartados também àqueles campos de dunas comprovadamente medidos em diferentes porções do canal fluvial, mesmo os levantados dentro dos limites que demarcam as cercanias de cada estação. Isso se fez necessário, pois é sabido, mediante a análise dos relatórios referentes às atividades de pesquisa realizadas no escopo do Projeto Hibam, que muitos dos levantamentos disponíveis foram realizados com o simples intuito de se efetuar um reconhecimento preliminar do leito do rio e identificar os equipamentos e as respectivas configurações mais adequadas à finalidade das medições.

Devido à dificuldade de identificação do mesmo campo de dunas para diferentes épocas do ano, fato ocorrido devido à inconstância na disponibilidade de dados referentes às coordenadas horizontais de cada levantamento, muitas vezes realizados com o GPS desacoplado ao computador de aquisição (gerenciador), adotou-se em muitas ocasiões um procedimento específico de captura do campo desejado a partir da análise visual de suas principais peculiaridades morfológicas. Estas, quando realmente constatadas, serviram de base para a decomposição de todo o trecho em pequenos fragmentos, onde foram medidos os principais parâmetros geométricos das dunas, como comprimento, altura e declividades das faces de

montante e jusante, que possibilitaram uma apuração e um julgamento seguro dos padrões incorporados a cada uma das metodologias desenvolvidas.

Na ocasião do levantamento dos principais parâmetros geométricos, para posterior aplicação das metodologias de análise de resistência, os seguintes procedimentos foram adotados para cada feição em particular:

- Foi considerada como altura da duna ( $\Delta$ ) a distância vertical entre os valores máximos da cava e da crista medidas na face de jusante da mesma, expressos através das profundidades registradas pelo ADCP;
- Foi considerado como comprimento da duna ( $\lambda$ ) a distância horizontal entre os máximos valores das profundidades observados na face de montante e de jusante, sendo o ponto estimado para a última coincidente com àquele que delimita o valor a ser considerado no cálculo da altura da duna;
- O parâmetro  $D_c$ , correspondente à distância entre a crista da duna e o nível d'água na superfície, foi concebido como o comprimento vertical entre o valor máximo da crista e a superfície livre, ambos expressos através das profundidades registradas pelo ADCP;
- Apesar da sabida influência dos efeitos da superposição de dunas à duna principal ou primária, seus efeitos práticos foram desconsiderados nas análises morfológicas que subsidiaram a aplicação das diferentes metodologias de cálculo. Sendo assim, as dunas com este padrão foram eliminadas do campo em estudo ou quando menos proeminentes, as irregularidades foram consideradas como irrelevantes e procedeu-se as estimativas considerando apenas a duna principal. Esta consideração fez-se necessária devido às dificuldades de se avaliar e até mesmo identificar com a devida acurácia estas peculiaridades que se evidenciaram em determinadas dunas.

A seguir, estão apresentadas as características morfológicas predominantes de cada estação de medição nas diferentes circunstâncias hidrológicas avaliadas, sendo ilustrados resultados gráficos obtidos diretamente do Winriver, assim como os posteriores ao pós-processamento que deram origem às planilhas apresentadas (Figuras 23 a 36 e Tabelas V a XVIII).

Faz-se importante ressaltar que é de se esperar variações do campo de dunas na direção transversal, conforme constatado por STRASSER (2002), quando foram evidenciadas diferenças no comprimento médio das dunas e nos respectivos valores de esbeltez. Porém, em virtude da disponibilidade de dados relativos ao mesmo campo de dunas em diferentes situações hidrológicas, serão abordados apenas os perfis comprovadamente levantados em pelo menos uma época típica de águas altas e baixas. A seguir, a Figura 22 ilustra diferentes perfis longitudinais medidos nas proximidades da estação de Manacapuru, onde foram evidenciadas modificações da geometria das formas de fundo ao longo da mesma seção transversal.

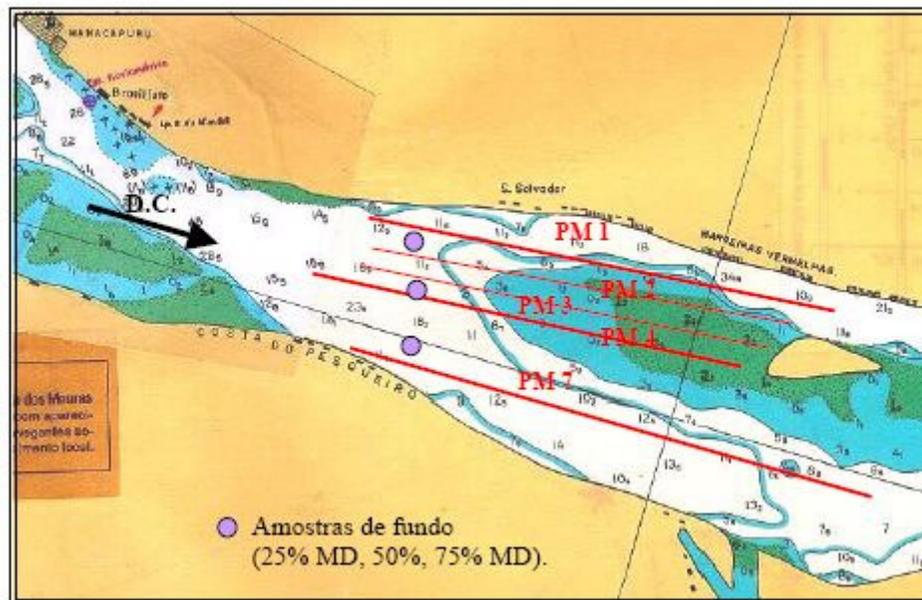


Figura 22: Diferentes perfis longitudinais levantados nas proximidades de Manacapuru (obtido de STRASSER, 2002).

Estação de medição: Manacapuru

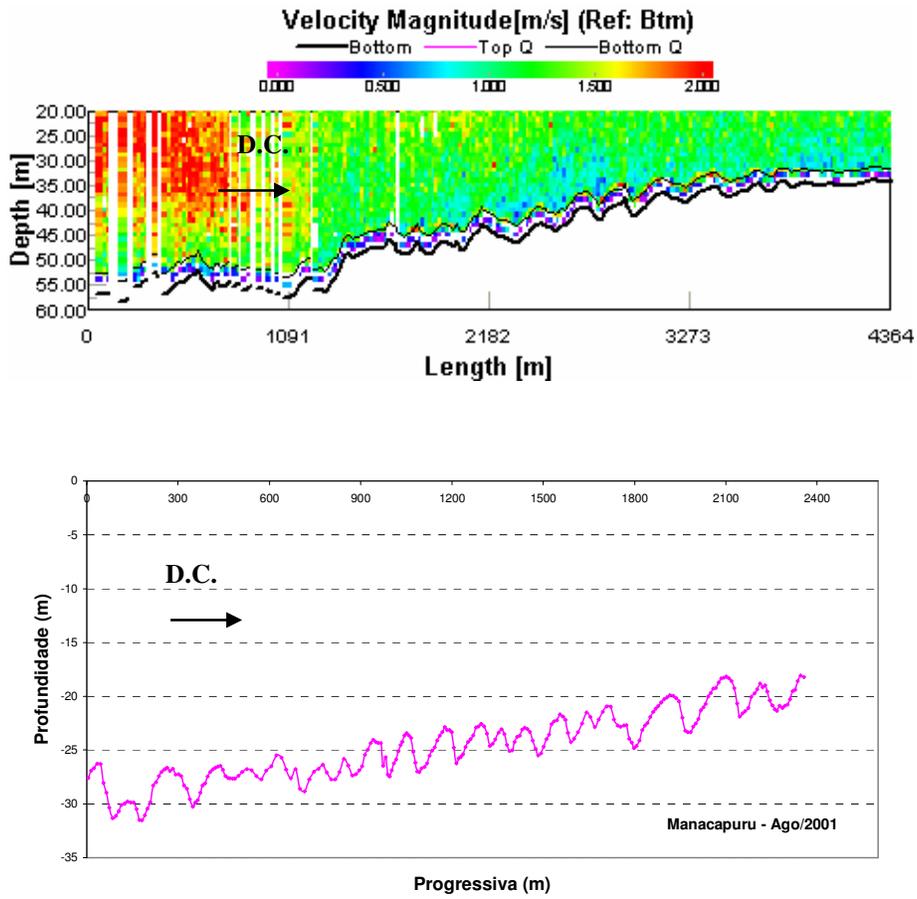


Figura 23: Perfis longitudinais medidos na estação de Manacapuru em Agosto de 2001 (Profundidade média = 24,5 m ;  $Q \sim 117.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Tabela V: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Manacapuru (ago-2001)

$D_c$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_c$	$D_c/\lambda$
29,89	1,63	96,47	0,017	0,055	0,310
26,73	3,50	175,3	0,020	0,131	0,152
26,38	1,33	100,59	0,013	0,050	0,262
25,84	1,52	69,7	0,022	0,059	0,371
24,26	3,20	123,12	0,026	0,132	0,197
23,64	3,39	97,19	0,035	0,143	0,243
22,87	3,35	121,34	0,028	0,146	0,188
22,56	1,84	119,46	0,015	0,082	0,189
23,07	1,96	73,09	0,027	0,085	0,316
23,04	2,45	94,13	0,026	0,106	0,245
21,68	2,57	106,61	0,024	0,119	0,203
21,52	1,33	78,67	0,017	0,062	0,274
20,97	3,84	129,78	0,030	0,183	0,162
19,96	3,36	185,4	0,018	0,168	0,108
18,18	3,72	161,97	0,023	0,205	0,112
18,98	2,38	122,86	0,019	0,125	0,154
23,10	2,59	115,98	0,022	0,116	0,218

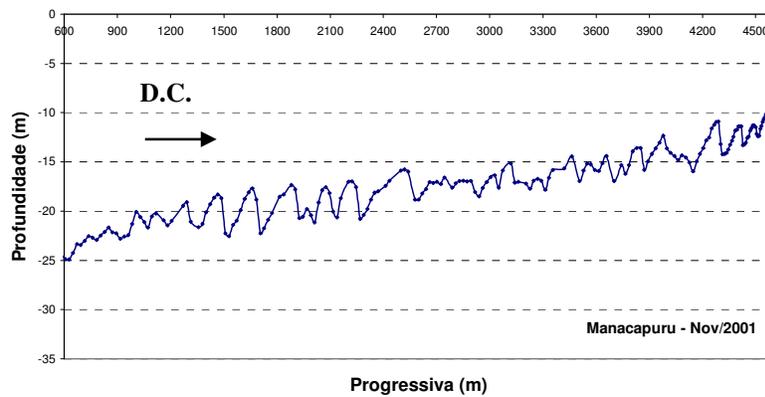
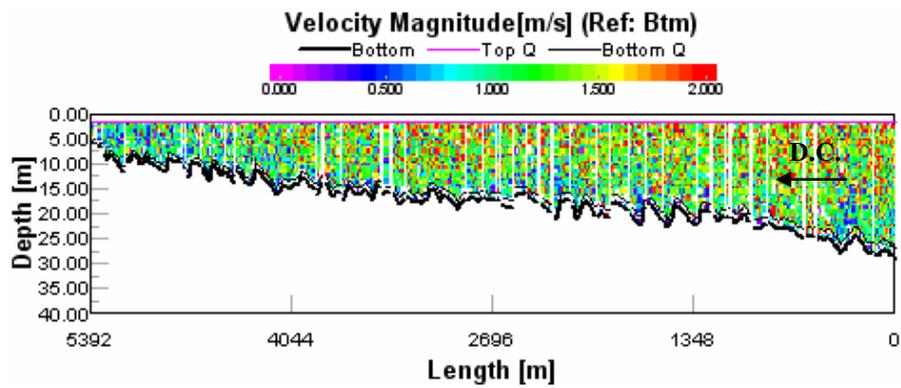


Figura 24: Perfis longitudinais medidos na estação de Manacapuru em Novembro de 2001 (Profundidade média = 16,9 m ;  $Q \sim 63.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Obs: Medição com ADCP realizada no sentido de jusante para montante, ou seja, no sentido oposto ao da corrente.

Tabela VI: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Manacapuru (nov-2001)

$D_c$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_c$	$D_c/\lambda$
24,32	3,57	213,44	0,017	0,147	0,114
20,09	1,59	157,13	0,010	0,079	0,128
20,22	1,23	110,5	0,011	0,061	0,183
19,1	2,52	174	0,014	0,132	0,110
18,31	4,24	173,02	0,025	0,232	0,106
17,68	4,59	196,71	0,023	0,260	0,090
17,35	3,34	219,04	0,015	0,193	0,079
17,59	3,03	126,38	0,024	0,172	0,139
16,98	3,81	129,11	0,030	0,224	0,132
15,78	3,03	311,51	0,010	0,192	0,051
16,36	1,25	110,7	0,011	0,076	0,148
15,14	1,97	89,93	0,022	0,130	0,168
14,46	2,47	194,05	0,013	0,171	0,075
14,42	2,53	193,45	0,013	0,175	0,075
13,58	2,24	171,44	0,013	0,165	0,079
12,35	3,61	174,45	0,021	0,292	0,071
10,89	3,31	177,88	0,019	0,304	0,061
11,39	1,64	120,47	0,014	0,144	0,095
11,46	0,87	82,35	0,011	0,076	0,139
10,2	2,93	80,17	0,037	0,287	0,127
9,46	3,15	127,01	0,025	0,333	0,074
8,57	2,73	157,43	0,017	0,319	0,054
8,57	1,69	142,13	0,012	0,197	0,060
14,97	2,67	157,93	0,018	0,190	0,102

Estação de medição: Jatuarana

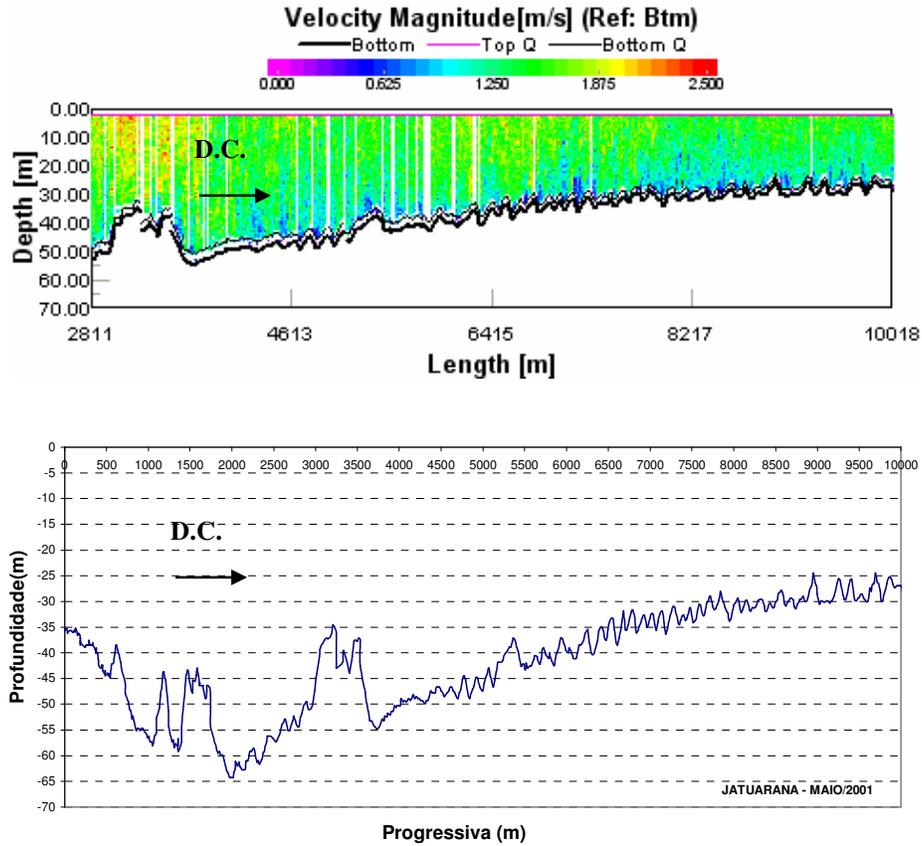


Figura 25: Perfis longitudinais medidos na estação de Jatuarana em Maio de 2001 (Profundidade média = 41,5 m ;  $Q \sim 156.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Tabela VII: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Jatuarana (maio-2001)

$D_C$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_C$	$D_C/\lambda$
33,22	5,22	129,22	0,040	0,157	0,257
31,79	3,69	110,73	0,033	0,116	0,287
31,6	4,48	113,07	0,040	0,142	0,279
32,58	2,41	130,06	0,019	0,074	0,250
32,38	3,23	110,4	0,029	0,100	0,293
31,87	4,41	111,28	0,040	0,138	0,286
30,94	3,57	164,98	0,022	0,115	0,188
32,68	1,02	72,13	0,014	0,031	0,453
31,21	2,88	91,55	0,031	0,092	0,341
30,63	2,21	127,5	0,017	0,072	0,240
28,96	2,69	125,77	0,021	0,093	0,230
27,98	5,81	180,9	0,032	0,208	0,155
29,36	2,78	138,87	0,020	0,095	0,211
29,79	2,07	120,94	0,017	0,069	0,246
29,58	2,19	190,36	0,012	0,074	0,155
30,28	0,82	104,61	0,008	0,027	0,289
27,85	3,02	137,8	0,022	0,108	0,202
29,39	1,99	120,09	0,017	0,068	0,245
28,97	1,01	122,28	0,008	0,035	0,237
24,44	6,09	160,11	0,038	0,249	0,153
25,59	3,95	193,98	0,020	0,154	0,132
25,75	4,19	124,86	0,034	0,163	0,206
28,59	1,53	124,65	0,012	0,054	0,229
24,44	5,50	192,1	0,029	0,225	0,127
29,58	3,20	133,26	0,024	0,111	0,237

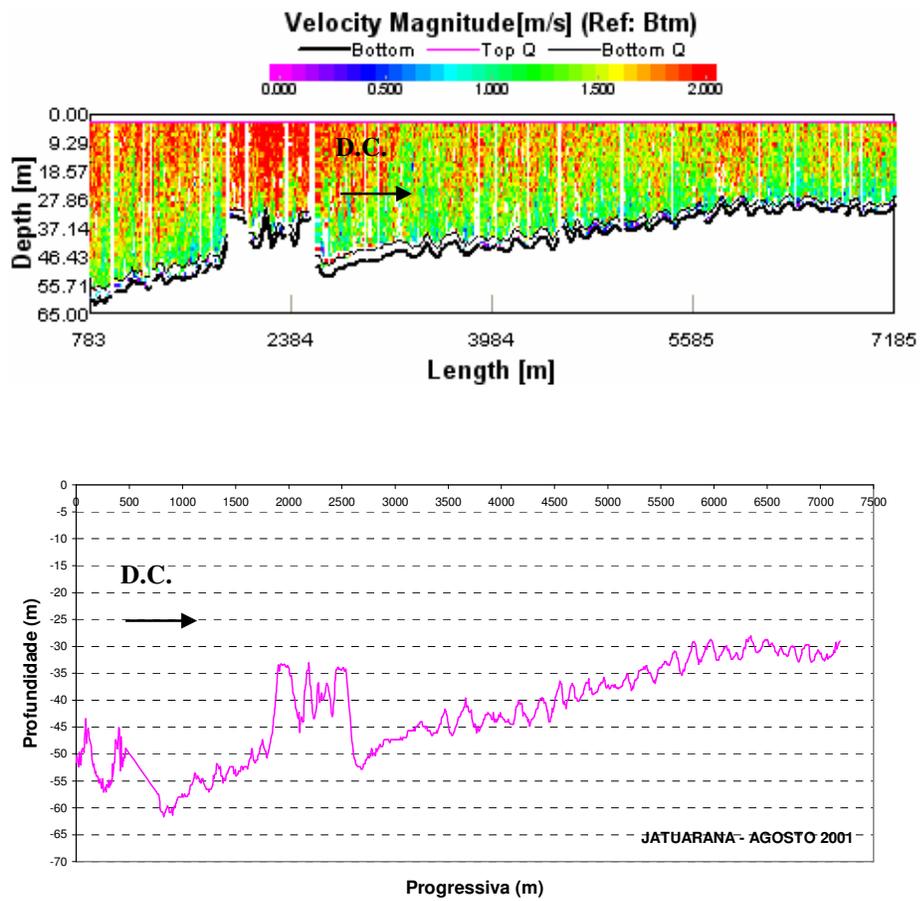


Figura 26: Perfis longitudinais medidos na estação de Jatuarana em Agosto de 2001 (Profundidade média = 41,83 m ;  $Q \sim 140.000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Tabela VIII: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Jatuarana (ago-2001)

$D_c$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_c$	$D_c/\lambda$
44,01	2,52	246,86	0,010	0,057	0,178
41,68	4,85	190,87	0,025	0,116	0,218
39,60	6,09	229,25	0,027	0,154	0,173
40,00	4,85	153,67	0,032	0,121	0,260
39,49	4,52	190,52	0,024	0,114	0,207
36,47	5,06	122,04	0,041	0,139	0,299
36,88	3,28	144,17	0,023	0,089	0,256
36,15	2,85	130,86	0,022	0,079	0,276
35,76	2,12	158	0,013	0,059	0,226
35,13	3,02	123,37	0,024	0,086	0,285
33,58	3,28	223,42	0,015	0,098	0,150
30,95	4,38	255,96	0,017	0,142	0,121
29,12	4,17	154,43	0,027	0,143	0,189
28,75	3,78	180,18	0,021	0,131	0,160
29,90	2,49	140,83	0,018	0,083	0,212
31,22	1,19	68,08	0,017	0,038	0,459
28,05	3,10	167,37	0,019	0,111	0,168
28,70	3,06	188,65	0,016	0,107	0,152
30,28	1,57	88,7	0,018	0,052	0,341
29,94	2,98	105,67	0,028	0,100	0,283
29,71	3,18	120,85	0,026	0,107	0,246
30,67	2,03	121,98	0,017	0,066	0,251
33,91	3,38	159,35	0,022	0,100	0,232

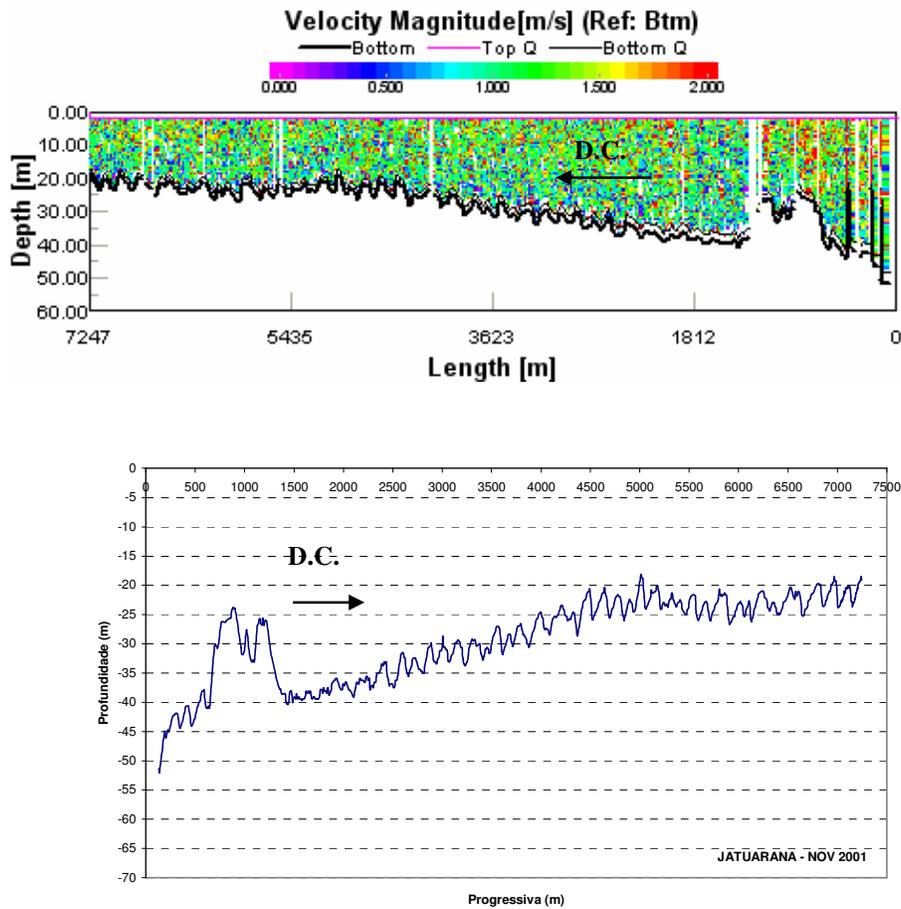


Figura 27: Perfis longitudinais medidos na estação de Jatuarana em Novembro de 2001 (Profundidade média = 28,1 m ;  $Q \sim 72.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Obs: Medição com ADCP realizada no sentido de jusante para montante, ou seja, no sentido oposto ao da corrente.

Tabela IX: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Jatuarana (nov-2001)

$D_c$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_c$	$D_c/\lambda$
33,09	4,41	236,22	0,019	0,133	0,140
31,53	4,08	148,64	0,027	0,129	0,212
32,46	2,52	159,28	0,016	0,078	0,204
29,87	3,52	126	0,028	0,118	0,237
28,64	4,45	127,98	0,035	0,155	0,224
29,43	4,29	161,72	0,027	0,146	0,182
29,19	3,59	180,57	0,020	0,123	0,162
27,2	4,63	202,25	0,023	0,170	0,134
28,33	1,95	107,05	0,018	0,069	0,265
26,55	4,04	169,72	0,024	0,152	0,156
24,59	3,86	209,07	0,018	0,157	0,118
23,44	5,14	275,42	0,019	0,219	0,085
20,61	5,27	160,97	0,033	0,256	0,128
20,36	5,22	168,84	0,031	0,256	0,121
21,6	4,46	148,56	0,030	0,206	0,145
22,39	2,01	105,36	0,019	0,090	0,213
18,11	5,94	126,36	0,047	0,328	0,143
20,02	3,97	156,26	0,025	0,198	0,128
21,65	4,29	120,73	0,036	0,198	0,179
22,72	3,37	123,06	0,027	0,148	0,185
20,61	6,11	193,21	0,032	0,296	0,107
22,75	2,59	150,56	0,017	0,114	0,151
22,72	3,54	71,77	0,049	0,156	0,317
20,95	3,43	187,42	0,018	0,164	0,112
22,92	2,15	73,33	0,029	0,094	0,313
20,3	4,96	251,3	0,020	0,244	0,081
19,68	3,89	200,15	0,019	0,198	0,098
18,49	5,19	149,69	0,035	0,281	0,124
19,97	3,66	138,53	0,026	0,183	0,144
24,14	4,02	159,66	0,026	0,174	0,166

## Estação de medição: Grande Eva

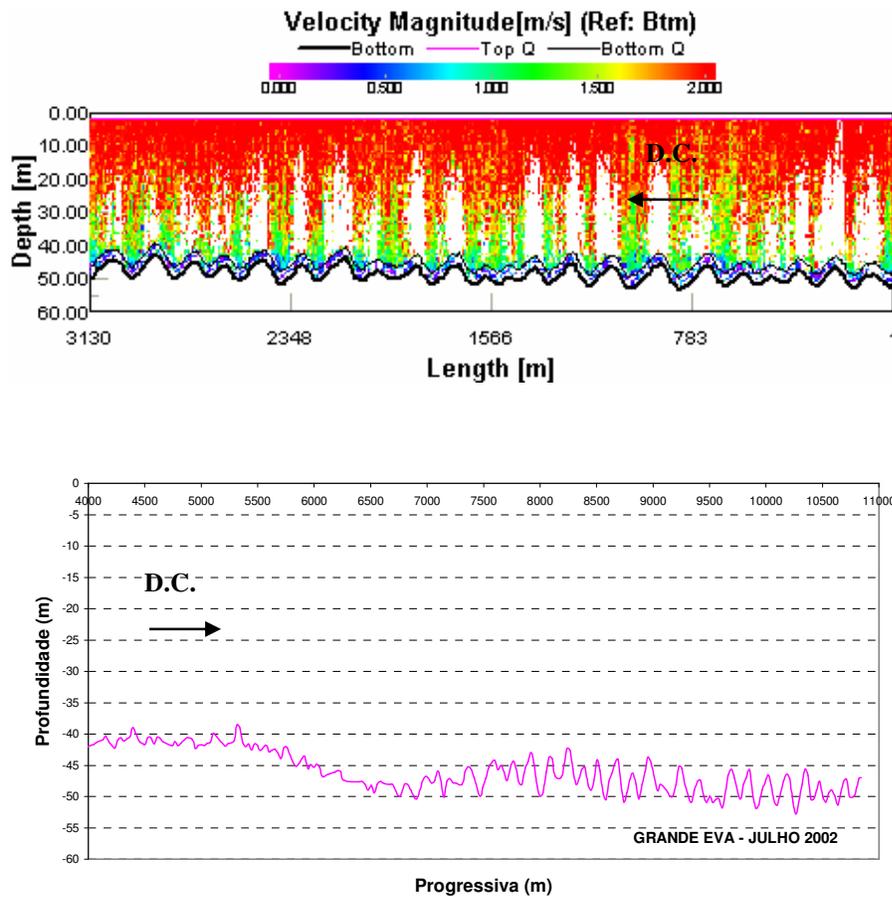


Figura 28: Perfis longitudinais medidos na estação de Grande Eva em Julho de 2002 (Profundidade média = 45,9 m ;  $Q \sim 189.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Obs: Medição com ADCP realizada no sentido de jusante para montante, ou seja, no sentido oposto ao da corrente.

Tabela X: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Grande Eva (julho-2002)

$D_c$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_c$	$D_c/\lambda$
45,24	4,68	158,98	0,029	0,103	0,285
44,23	3,20	239,21	0,013	0,072	0,185
44,36	3,45	106,52	0,032	0,078	0,416
42,95	6,97	160,92	0,043	0,162	0,267
43,70	3,00	133,25	0,023	0,069	0,328
42,32	5,69	132,65	0,043	0,134	0,319
45,39	3,59	132,16	0,027	0,079	0,343
44,19	6,25	132,49	0,047	0,141	0,334
44,09	6,78	157,67	0,043	0,154	0,280
46,23	4,17	133,17	0,031	0,090	0,347
43,69	5,33	163,38	0,033	0,122	0,267
45,14	5,77	162,45	0,036	0,128	0,278
47,42	3,49	137,48	0,025	0,074	0,345
49,96	1,85	136,75	0,014	0,037	0,365
45,69	4,71	161,06	0,029	0,103	0,284
45,71	6,14	136,04	0,045	0,134	0,336
46,62	4,82	164,74	0,029	0,103	0,283
46,39	6,37	163,44	0,039	0,137	0,284
45,60	4,80	133,57	0,036	0,105	0,341
47,56	3,31	130,82	0,025	0,070	0,364
48,98	2,36	101,16	0,023	0,048	0,484
47,24	2,68	102,46	0,026	0,057	0,461
45,58	4,52	144,56	0,031	0,100	0,327

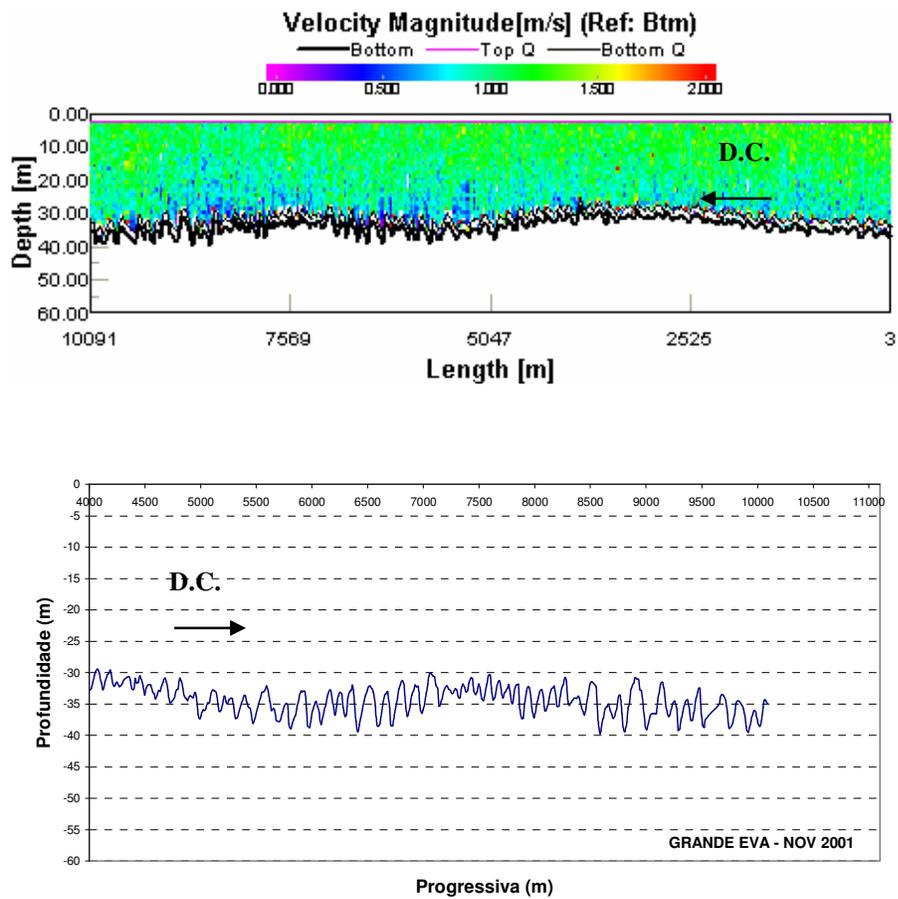


Figura 29: Perfis longitudinais medidos na estação de Grande Eva em Novembro de 2001 (Profundidade média = 33,7 m ;  $Q \sim 72.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Obs: Medição com ADCP realizada no sentido de jusante para montante, ou seja, no sentido oposto ao da corrente.

Tabela XI: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Grande Eva (nov-2001)

$D_C$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_C$	$D_C/\lambda$
33,78	3,52	143,07	0,025	0,104	0,236
33,72	4,39	157,44	0,028	0,130	0,214
32,14	5,69	238,02	0,024	0,177	0,135
34,95	4,00	99,74	0,040	0,114	0,350
32,99	5,79	171,34	0,034	0,176	0,193
34,59	3,68	100,22	0,037	0,106	0,345
32,79	3,99	129,68	0,031	0,122	0,253
33,12	3,85	86,28	0,045	0,116	0,384
32,02	7,38	114,44	0,064	0,230	0,280
32,14	6,44	185,97	0,035	0,200	0,173
33,04	5,33	113,8	0,047	0,161	0,290
31,28	5,67	129,4	0,044	0,181	0,242
31,94	4,53	129,54	0,035	0,142	0,247
30,13	5,19	158,24	0,033	0,172	0,190
31,8	1,28	56,21	0,023	0,040	0,566
30,87	2,58	85,46	0,030	0,084	0,361
31,82	2,62	72,01	0,036	0,082	0,442
30,42	3,92	86,32	0,045	0,129	0,352
31,31	2,74	86,06	0,032	0,088	0,364
31,91	3,06	85,44	0,036	0,096	0,373
31,84	5,46	84,33	0,065	0,171	0,378
32,22	4,96	55,88	0,089	0,154	0,577
32,66	3,48	96,61	0,036	0,107	0,338
32,2	3,16	110,67	0,029	0,098	0,291
30,74	4,45	97,67	0,046	0,145	0,315
33,78	2,98	132,27	0,023	0,088	0,255
31,54	8,19	140,08	0,058	0,260	0,225
30,81	8,29	196,74	0,042	0,269	0,157
34,34	3,25	127,67	0,025	0,095	0,269
32,48	6,25	106,87	0,058	0,192	0,304
33,45	5,42	222,33	0,024	0,162	0,150
34,52	5,03	170,74	0,029	0,146	0,202
36,06	2,55	106,08	0,024	0,071	0,340
32,53	4,52	123,53	0,039	0,140	0,297

Estação de medição: Iracema

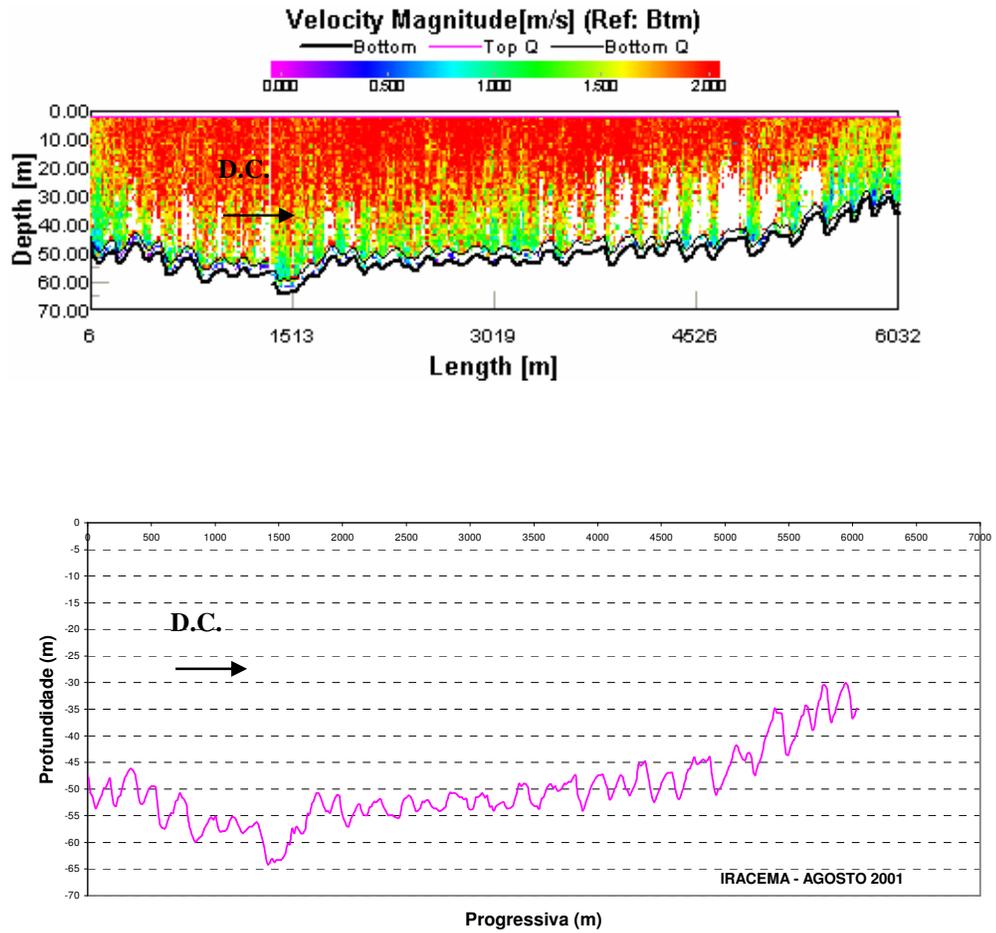


Figura 30: Perfis longitudinais medidos na estação de Iracema em Agosto de 2001 (Profundidade média = 49,9 m ;  $Q \sim 158.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Tabela XII: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Iracema (ago-2001)

$D_c$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_c$	$D_c/\lambda$
47,93	4,89	141,72	0,035	0,102	0,338
46,11	6,71	222,6	0,030	0,146	0,207
49,61	7,83	175,56	0,045	0,158	0,283
50,73	9,20	242,83	0,038	0,181	0,209
55,2	2,80	194,61	0,014	0,051	0,284
55,34	2,94	178,39	0,016	0,053	0,310
56,18	7,98	193,81	0,041	0,142	0,290
50,73	3,77	211,1	0,018	0,074	0,240
51,14	5,88	145,15	0,041	0,115	0,352
52,96	1,94	144,96	0,013	0,037	0,365
51,96	2,94	163,54	0,018	0,057	0,318
51,14	2,94	126,92	0,023	0,057	0,403
51,98	2,10	182,26	0,012	0,040	0,285
50,7	2,96	234,39	0,013	0,058	0,216
50,73	3,35	162,03	0,021	0,066	0,313
52,4	1,26	108,3	0,012	0,024	0,484
49,05	4,61	247,25	0,019	0,094	0,198
47,35	6,71	339,21	0,020	0,142	0,140
47,34	4,62	213,71	0,022	0,098	0,222
47,35	3,80	156,6	0,024	0,080	0,302
44,83	7,55	193,2	0,039	0,168	0,232
46,93	5,03	192,83	0,026	0,107	0,243
43,99	7,13	290,11	0,025	0,162	0,152
41,8	5,55	310,27	0,018	0,133	0,135
34,87	8,70	256,66	0,034	0,249	0,136
34,23	4,64	188,19	0,025	0,136	0,182
30,44	7,04	147,86	0,048	0,231	0,206
30,03	6,59	167,88	0,039	0,219	0,179
47,25	5,05	197,57	0,026	0,114	0,258

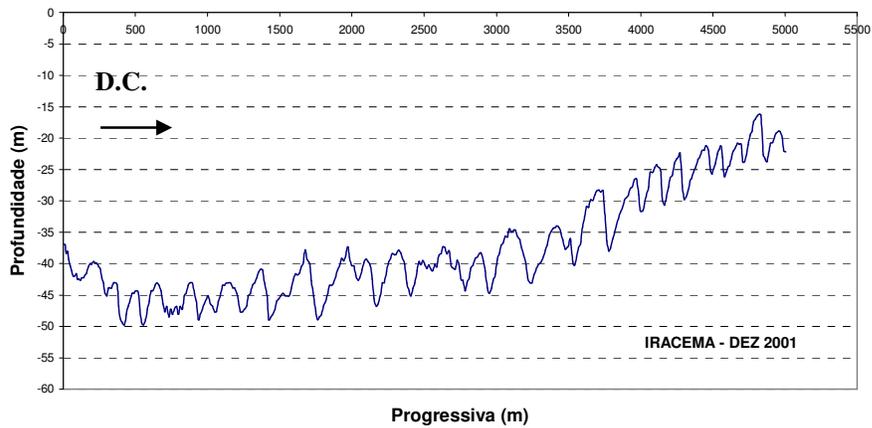
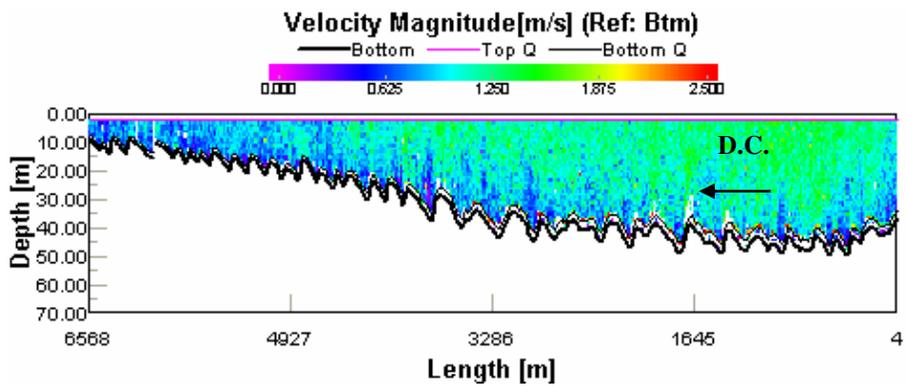


Figura 31: Perfis longitudinais medidos na estação de Iracema em Dezembro de 2001 (Profundidade média = 37,5 m ;  $Q \sim 77.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Obs: Medição com ADCP realizada no sentido de jusante para montante, ou seja, no sentido oposto ao da corrente.

Tabela XIII: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Iracema (dez-2001)

$D_c$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_c$	$D_c/\lambda$
39,64	5,62	182,42	0,031	0,142	0,217
43,06	6,72	121,34	0,055	0,156	0,355
44,32	5,46	174,71	0,031	0,123	0,254
43,06	5,46	174,71	0,031	0,127	0,246
45,16	2,52	111,87	0,023	0,056	0,404
43,06	4,62	166,79	0,028	0,107	0,258
40,89	8,05	196,69	0,041	0,197	0,208
37,8	11,14	337,24	0,033	0,295	0,112
37,36	9,48	406,03	0,023	0,254	0,092
37,88	7,28	240,94	0,030	0,192	0,157
37,5	6,82	375,06	0,018	0,182	0,100
38,41	6,33	167,04	0,038	0,165	0,230
34,47	8,59	296,01	0,029	0,249	0,116
33,97	6,34	295,32	0,021	0,187	0,115
28,25	9,75	236,57	0,041	0,345	0,119
26,49	5,13	233,4	0,022	0,194	0,113
24,2	6,48	152,32	0,043	0,268	0,159
22,36	7,40	136,82	0,054	0,331	0,163
21,24	4,47	192	0,023	0,210	0,111
21,3	4,80	86,11	0,056	0,225	0,247
20,81	2,95	140,92	0,021	0,142	0,148
16,21	7,53	154,08	0,049	0,465	0,105
33,52	6,50	208,11	0,034	0,210	0,183

Estação de medição: Parintins

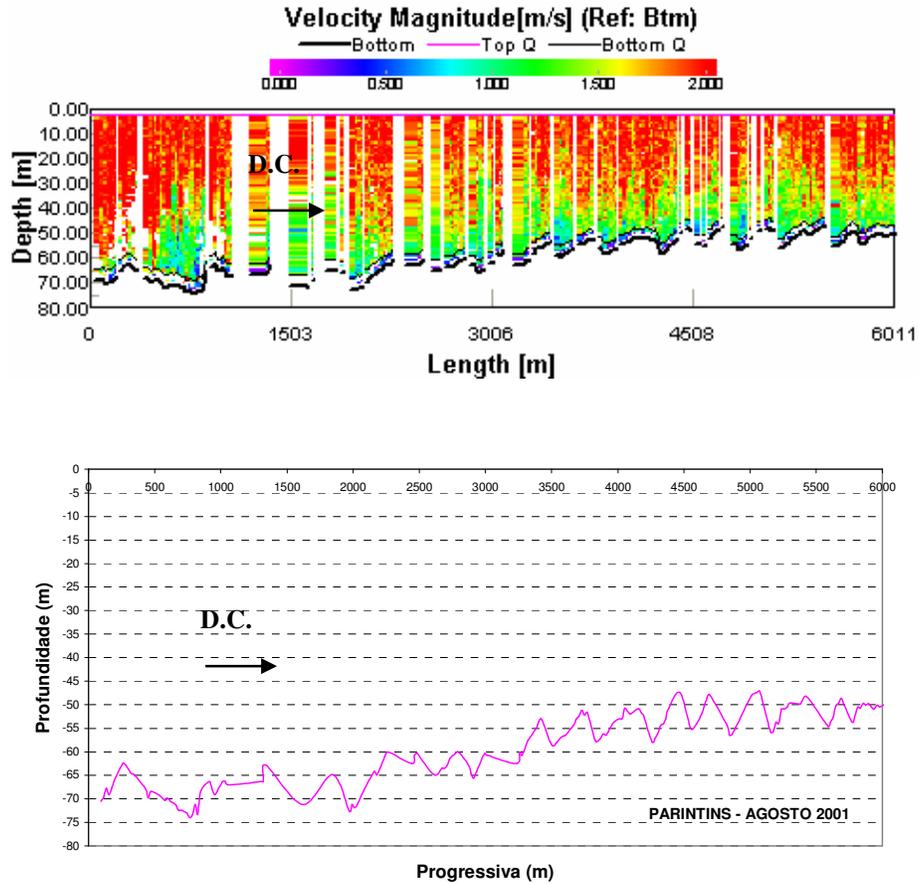


Figura 32: Perfis longitudinais medidos na estação de Parintins em Agosto de 2001 (Profundidade média = 59,1 m ;  $Q \sim 175.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Tabela XIV: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Parintins (ago -2001)

$D_c$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_c$	$D_c/\lambda$
64,93	7,69	374,12	0,021	0,118	0,174
60,02	5,59	322,13	0,017	0,093	0,186
53,03	5,59	267,15	0,021	0,105	0,199
51,16	6,58	327,13	0,020	0,129	0,156
50,72	6,50	450,75	0,014	0,128	0,113
47,4	7,72	292,43	0,026	0,163	0,162
47,93	8,59	292,04	0,029	0,179	0,164
47,18	8,64	330,5	0,026	0,183	0,143
48,3	6,30	411,38	0,015	0,130	0,117
48,64	5,09	184,47	0,028	0,105	0,264
51,93	6,83	325,21	0,022	0,133	0,168

Estação de medição: Itacoatiara

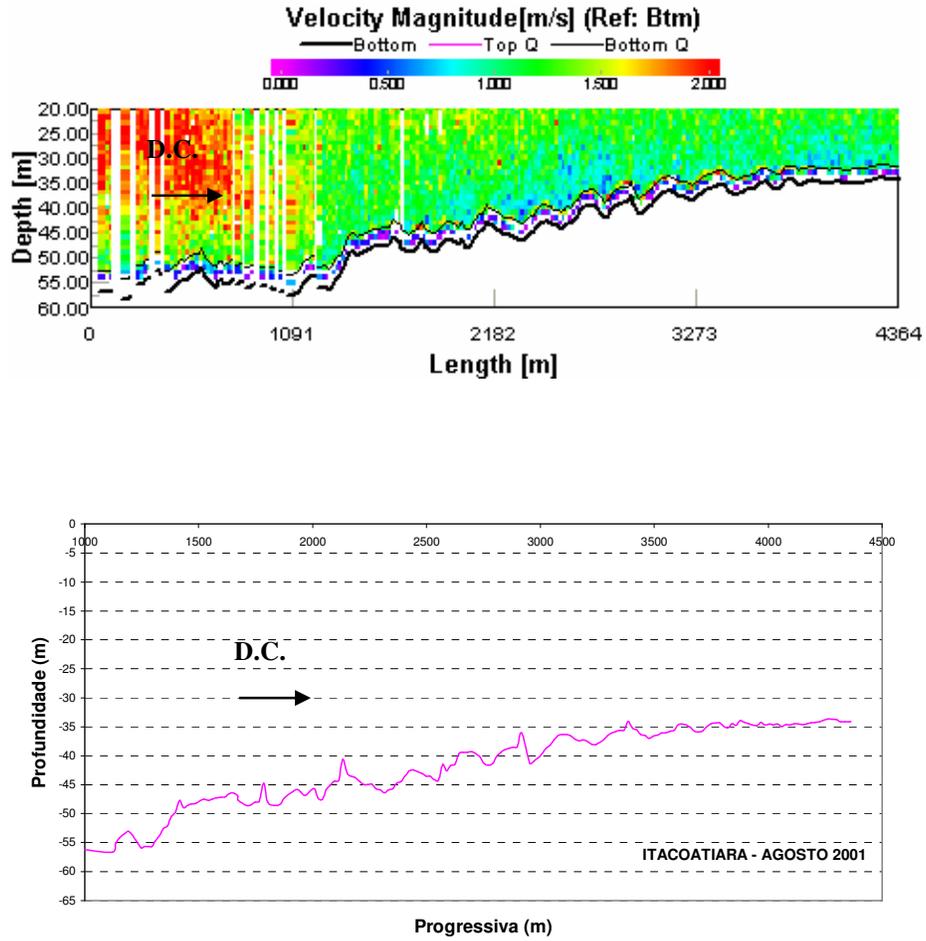


Figura 33: Perfis longitudinais medidos na estação de Itacoatiara em Agosto de 2001 (Profundidade média = 43,0 m ;  $Q \sim 180.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Tabela XV: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Itacoatiara (ago -2001)

$D_c$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_c$	$D_c/\lambda$
52,4	1,70	256,82	0,007	0,032	0,204
52,8	3,03	207,87	0,015	0,057	0,254
53,04	2,79	126,71	0,022	0,053	0,419
44,72	3,87	129,74	0,030	0,087	0,345
40,67	5,74	273,68	0,021	0,141	0,149
42,56	1,67	237,06	0,007	0,039	0,180
39,4	2,19	218,87	0,010	0,056	0,180
36,08	5,16	182,01	0,028	0,143	0,198
36,33	1,72	288,26	0,006	0,047	0,126
34,06	2,96	252,92	0,012	0,087	0,135
34,48	1,39	218,32	0,006	0,040	0,158
34,34	0,86	127,92	0,007	0,025	0,268
41,74	2,76	210,02	0,014	0,067	0,218

## Estação de medição: Óbidos

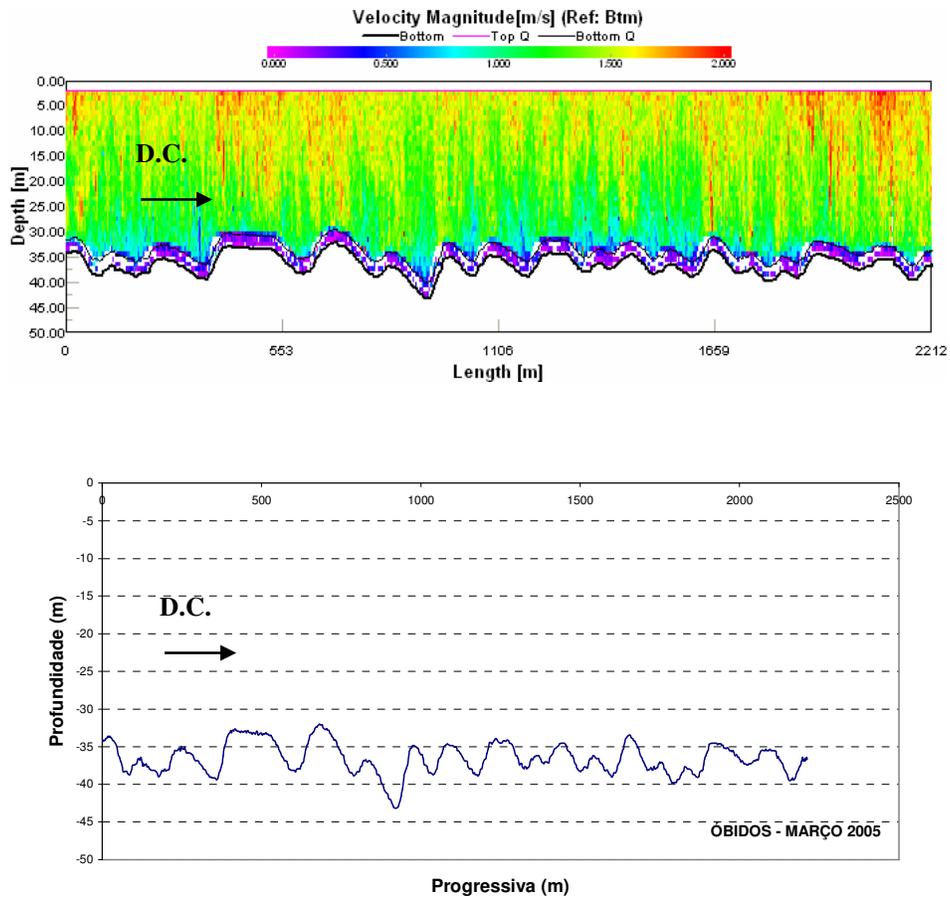


Figura 34: Perfis longitudinais medidos na estação de Óbidos em Março de 2005 (Profundidade média = 36,5 m ;  $Q \sim 164.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Tabela XVI: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Itacoatiara (março - 2005)

$D_c$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_c$	$D_c/\lambda$
36,61	2,21	95,07	0,023	0,060	0,385
34,98	4,23	181,65	0,023	0,121	0,193
32,74	5,42	233,67	0,023	0,166	0,140
32,06	11,04	315,13	0,035	0,344	0,102
34,91	3,71	116,83	0,032	0,106	0,299
34,72	3,96	141,16	0,028	0,114	0,246
34,06	3,83	140,57	0,027	0,112	0,242
36,17	1,06	65,00	0,016	0,029	0,556
34,52	3,63	103,30	0,035	0,105	0,334
36,17	2,85	95,39	0,030	0,079	0,379
33,52	4,57	111,45	0,041	0,136	0,301
37,16	2,65	79,71	0,033	0,071	0,466
37,76	1,12	81,74	0,014	0,030	0,462
34,52	2,77	156,23	0,018	0,080	0,221
35,38	4,10	130,58	0,031	0,116	0,271
35,02	3,81	136,50	0,027	0,111	0,306

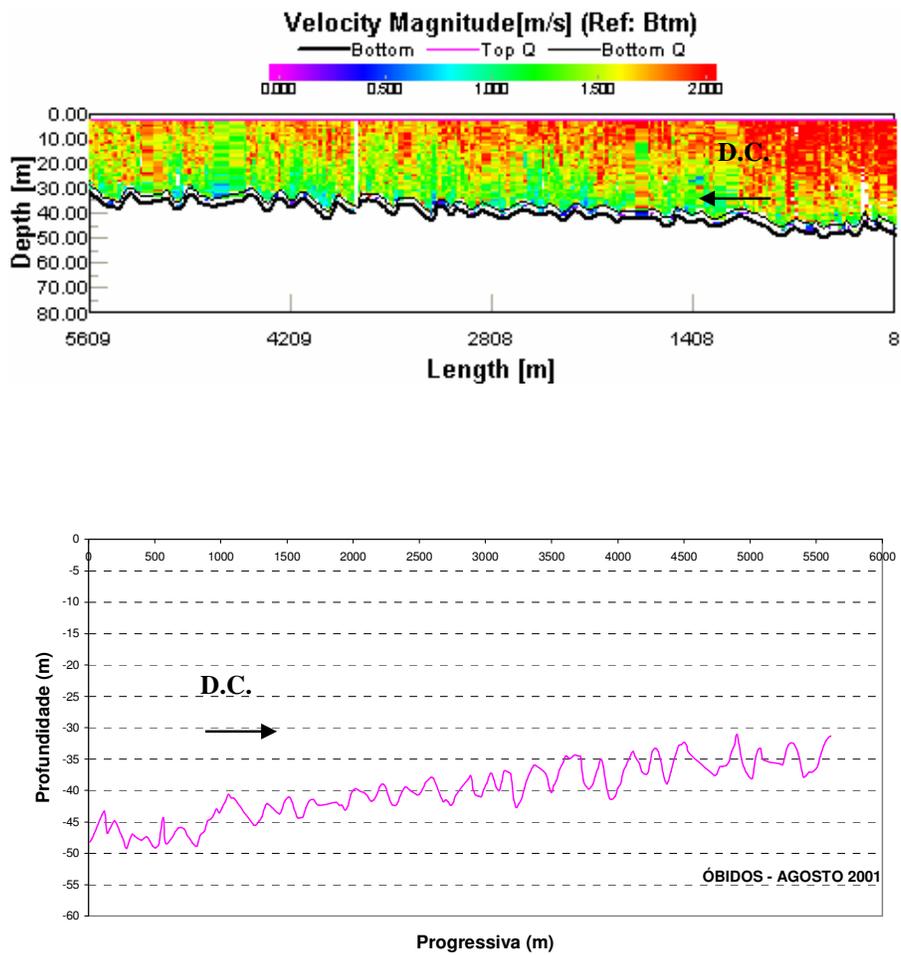


Figura 35: Perfis longitudinais medidos na estação de Óbidos em Agosto de 2001 (Profundidade média = 38,0 m ;  $Q \sim 194.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Obs: Medição com ADCP realizada no sentido de jusante para montante, ou seja, no sentido oposto ao da corrente.

Tabela XVII: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Óbidos (ago -2001)

D	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D$	D/ $\lambda$
43,34	3,44	133,6	0,026	0,079	0,324
44,91	4,31	144,78	0,030	0,096	0,310
47,38	1,78	221,48	0,008	0,038	0,214
44,31	3,78	78,21	0,048	0,085	0,567
46,01	2,82	235,87	0,012	0,061	0,195
40,65	4,83	425,82	0,011	0,119	0,095
42,13	1,56	189,98	0,008	0,037	0,222
41,03	3,30	141,14	0,023	0,080	0,291
41,46	1,65	359,6	0,005	0,040	0,115
39,7	2,05	197,41	0,010	0,052	0,201
38,96	3,35	160,95	0,021	0,086	0,242
39,43	1,27	151,14	0,008	0,032	0,261
37,92	4,47	233,75	0,019	0,118	0,162
37,61	3,40	232,4	0,015	0,090	0,162
37,23	2,75	133,25	0,021	0,074	0,279
36,85	5,84	129,84	0,045	0,158	0,284
35,94	4,39	264,32	0,017	0,122	0,136
34,34	5,41	283,06	0,019	0,158	0,121
35,05	6,29	162,36	0,039	0,179	0,216
33,79	3,53	281,43	0,013	0,104	0,120
33,28	5,68	148,55	0,038	0,171	0,224
32,32	5,28	355,22	0,015	0,163	0,091
31,12	6,91	291,51	0,024	0,222	0,107
33,33	2,56	228,53	0,011	0,077	0,146
32,41	5,43	155,97	0,035	0,168	0,208
38,42	3,84	213,61	0,021	0,104	0,212

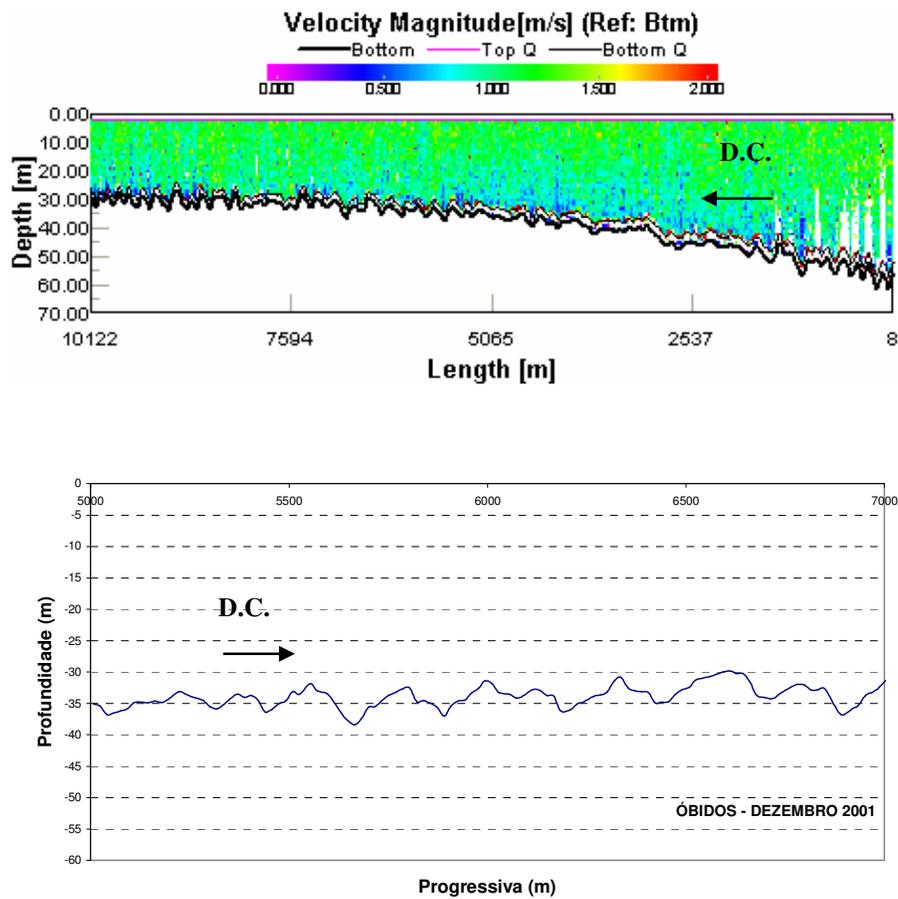


Figura 36: Perfis longitudinais medidos na estação de Óbidos em Dezembro de 2001 (Profundidade média = 31,7 m ;  $Q \sim 96.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Obs: Medição com ADCP realizada no sentido de jusante para montante, ou seja, no sentido oposto ao da corrente.

Tabela XVIII: Propriedades geométricas e valores médios característicos em Óbidos (dez -2001)

$D_C$	$\Delta$	$\lambda$	$\Delta/\lambda$	$\Delta/D_C$	$D_C/\lambda$
33,11	2,78	276,81	0,010	0,084	0,120
33,54	2,82	121,67	0,023	0,084	0,276
31,84	6,57	226,33	0,029	0,206	0,141
32,53	4,54	225,15	0,020	0,140	0,144
31,41	4,80	292,74	0,016	0,153	0,107
30,88	4,05	237,52	0,017	0,131	0,130
29,84	4,38	298,91	0,015	0,147	0,100
31,95	4,88	171,77	0,028	0,153	0,186
29,39	3,35	230,3	0,015	0,114	0,128
29,86	3,00	234,59	0,013	0,100	0,127
27,56	5,42	167,9	0,032	0,197	0,164
31,62	2,01	143,87	0,014	0,064	0,220
29,03	3,09	250,07	0,012	0,106	0,116
29,92	2,85	164,86	0,017	0,095	0,181
30,54	3,80	128,82	0,029	0,124	0,237
27,53	6,14	148,13	0,041	0,223	0,186
28,25	4,73	239,26	0,020	0,167	0,118
26,49	7,13	170,61	0,042	0,269	0,155
30,26	3,13	133,9	0,023	0,103	0,226
26,56	7,06	233,68	0,030	0,266	0,114
28,25	5,15	235,02	0,022	0,182	0,120
27,83	5,10	150,7	0,034	0,183	0,185
27,54	4,37	103,36	0,042	0,159	0,266
27,33	5,08	126,92	0,040	0,186	0,215
29,71	4,43	196,37	0,024	0,152	0,165

#### 4.4. RESULTADOS

A aplicação direta das diferentes metodologias abordadas anteriormente resultou em valores estimados para o coeficiente global de resistência, sendo o mesmo variável em virtude do ciclo hidrológico e espacialmente, conforme constatado nas diferentes estações contempladas na análise dos perfis longitudinais.

O coeficiente de resistência global foi calculado inicialmente pela soma das duas parcelas distintas e independentes,  $f'$  e  $f''$ , procedimento que resultou no coeficiente de Darcy-Weisbach  $f$ . Posteriormente, fez-se a correlação com os coeficientes de Manning  $n$  e Chezy  $C$  através das equações 3.10 e 3.11.

Em todas as metodologias utilizadas foram adotados os parâmetros médios de cada campo de dunas, representados pelas últimas linhas de cada uma das Tabelas V a XVIII, as quais foram consideradas como as propriedades geométricas características de cada estação.

No cálculo dos valores globais de resistência, foram utilizadas diferentes formulações para o coeficiente de resistência de pele. Assim, os resultados de resistência global apresentados para as metodologias de VAN RIJN (1984), HAQUE e MAHMOOD (1983) e ENGELUND (1977) foram obtidos mediante a utilização da formulação clássica de  $f'$ , apresentada na equação 3.35.

A metodologia proposta por WILBERS (2004), adaptada da formulação de ENGELUND (1977), apresenta o  $f'$  de acordo com a equação 3.42, em conformidade com os preceitos defendidos pelo pesquisador e descritos no capítulo 3, sendo os mesmos associados basicamente à área de real atuação da resistência de pele e à adequada consideração do ponto do contorno onde ocorre a separação do escoamento. Na metodologia proposta por SHEN *et al.* (1990) utiliza-se a equação particular desenvolvida pelo pesquisador, sendo a mesma expressa conforme a equação 3.38. Esta, por sua vez demandou o conhecimento prévio da profundidade média do trecho, da vazão típica da seção transversal pertencente a cada estação de medição, assim como a

largura da mesma. As duas primeiras foram obtidas diretamente com base nas medições realizadas com o ADCP e a segunda estimada como 2900m, uma vez que a embarcação usualmente utilizada apresenta restrições de profundidade que inviabiliza o percurso e conseqüentemente a medição de margem a margem. A viscosidade cinemática adotada foi de  $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , sendo a mesma correspondente à temperatura da água a 24°C.

Os resultados mostrados a seguir contemplam as sete estações analisadas, onde constam discriminados os meses dos levantamentos que configuram cenários típicos de cheia, estiagem ou mesmo águas intermediárias em virtude da disponibilidade de dados.

Estação de medição: **Manacapuru**

Comprimento médio dos trechos analisados: **3 km**

Tabela XIX: Síntese dos parâmetros de resistência calculados em Manacapuru, considerando os meses de agosto e novembro de 2001.

<b>MANACAPURU</b>	<b>ÁGUAS ALTAS</b>					<b>ÁGUAS BAIXAS</b>				
<b>Metodologia</b>	<b>f''</b>	<b>f'</b>	<b>f global</b>	<b>C global</b>	<b>n global</b>	<b>f''</b>	<b>f'</b>	<b>f global</b>	<b>C global</b>	<b>n global</b>
VAN RIJN (1984)	0,043	0,0085	0,051	39,141	0,044	0,046	0,0090	0,055	37,660	0,043
HAQUE E MAHMOOD (1983)	0,013	0,0085	0,021	60,461	0,028	0,028	0,0090	0,037	46,054	0,035
SHEN <i>et al.</i> (1990)	0,018	0,0014	0,019	63,912	0,027	0,017	0,0018	0,026	55,135	0,025
ENGELUND (1977)	0,018	0,0085	0,027	54,346	0,031	0,018	0,0090	0,027	53,891	0,030
WILBERS (2004)	0,017	0,0075	0,024	57,177	0,030	0,017	0,0082	0,025	56,287	0,028

Estação de medição: **Jatuarana**

Comprimento médio dos trechos analisados: **4 km**

Tabela XX: Síntese dos parâmetros de resistência calculados em Jatuarana, considerando os meses de maio, agosto e novembro de 2001.

<b>JATUARANA</b>	<b>ÁGUAS ALTAS</b>					<b>ÁGUAS BAIXAS</b>				
<b>Metodologia</b>	<b>f''</b>	<b>f'</b>	<b>f</b> <b>global</b>	<b>C</b> <b>global</b>	<b>n</b> <b>global</b>	<b>f''</b>	<b>f'</b>	<b>f</b> <b>global</b>	<b>C</b> <b>global</b>	<b>n</b> <b>global</b>
VAN RIJN (1984)	0,039	0,0078	0,046	41,146	0,045	0,050	0,0083	0,058	36,648	0,048
HAQUE E MAHMOOD (1983)	0,011	0,0078	0,019	65,109	0,029	0,025	0,0083	0,033	48,551	0,036
SHEN <i>et al.</i> (1990)	0,016	0,0016	0,018	66,209	0,028	0,024	0,0018	0,026	54,740	0,032
ENGELUND (1977)	0,014	0,0078	0,022	59,981	0,031	0,025	0,0083	0,033	48,429	0,036
WILBERS (2004)	0,013	0,0069	0,020	63,142	0,030	0,023	0,0072	0,030	50,900	0,034
	<b>ÁGUAS MÉDIAS</b>									
<b>Metodologia</b>	<b>f''</b>	<b>f'</b>	<b>f</b> <b>global</b>	<b>C</b> <b>global</b>	<b>n</b> <b>global</b>					
VAN RIJN (1984)	0,039	0,0078	0,047	41,012	0,045					
HAQUE E MAHMOOD (1983)	0,012	0,0078	0,020	62,543	0,030					
SHEN <i>et al.</i> (1990)	0,019	0,0017	0,020	62,017	0,030					
ENGELUND (1977)	0,015	0,0078	0,023	58,323	0,032					
WILBERS (2004)	0,014	0,0068	0,021	61,564	0,030					

Estação de medição: **Grande Eva**

Comprimento médio dos trechos analisados: **4 km**

Tabela XXI: Síntese dos parâmetros de resistência calculados em Grande Eva, considerando os meses de julho de 2002 e novembro de 2001.

<b>GRANDE EVA</b>	<b>ÁGUAS ALTAS</b>					<b>ÁGUAS BAIXAS</b>				
<b>Metodologia</b>	<b>f''</b>	<b>f'</b>	<b>f global</b>	<b>C global</b>	<b>n global</b>	<b>f''</b>	<b>f'</b>	<b>f global</b>	<b>C global</b>	<b>n global</b>
VAN RIJN (1984)	0,045	0,0077	0,053	38,417	0,049	0,054	0,0081	0,062	35,576	0,051
HAQUE E MAHMOOD (1983)	0,011	0,0077	0,018	65,476	0,029	0,027	0,0081	0,035	47,568	0,033
SHEN <i>et al.</i> (1990)	0,024	0,0012	0,025	56,241	0,034	0,034	0,0016	0,036	46,793	0,038
ENGELUND (1977)	0,024	0,0077	0,032	49,702	0,038	0,043	0,0081	0,051	39,139	0,042
WILBERS (2004)	0,022	0,0064	0,028	52,572	0,036	0,039	0,0065	0,045	41,686	0,040

Estação de medição: **Iracema**

Comprimento médio dos trechos analisados: **5 km**

Tabela XXII: Síntese dos parâmetros de resistência calculados em Iracema, considerando os meses de agosto e dezembro de 2001.

<b>IRACEMA</b>	<b>ÁGUAS ALTAS</b>					<b>ÁGUAS BAIXAS</b>				
<b>Metodologia</b>	<b>f''</b>	<b>f'</b>	<b>f global</b>	<b>C global</b>	<b>n global</b>	<b>f''</b>	<b>f'</b>	<b>f global</b>	<b>C global</b>	<b>n global</b>
VAN RIJN (1984)	0,044	0,0076	0,051	39,105	0,049	0,058	0,0079	0,066	34,504	0,053
HAQUE E MAHMOOD (1983)	0,012	0,0076	0,020	63,249	0,030	0,032	0,0079	0,040	44,251	0,041
SHEN <i>et al.</i> (1990)	0,020	0,0013	0,022	60,147	0,032	0,033	0,0017	0,035	47,346	0,039
ENGELUND (1977)	0,020	0,0076	0,028	53,222	0,036	0,035	0,0079	0,043	42,721	0,043
WILBERS (2004)	0,018	0,0066	0,025	56,107	0,034	0,032	0,0066	0,039	44,893	0,041

Estação de medição: **Parintins**

Comprimento médio do trecho analisado: **6 km**

Tabela XXIII: Síntese dos parâmetros de resistência calculados em Parintins, considerando o mês de agosto de 2001.

<b>PARINTINS</b>	<b>ÁGUAS ALTAS</b>				
<b>Metodologia</b>	<b>f''</b>	<b>f'</b>	<b>f global</b>	<b>C global</b>	<b>n global</b>
VAN RIJN (1984)	0,044	0,0074	0,051	39,150	0,050
HAQUE E MAHMOOD (1983)	0,017	0,0074	0,024	56,800	0,035
SHEN <i>et al.</i> (1990)	0,018	0,0014	0,020	63,279	0,031
ENGELUND (1977)	0,018	0,0074	0,026	55,402	0,036
WILBERS (2004)	0,017	0,0066	0,023	58,163	0,034

Estação de medição: **Itacoatiara**

Comprimento médio do trecho analisado: **4 km**

Tabela XXIV: Síntese dos parâmetros de resistência calculados em Itacoatiara, considerando o mês de agosto de 2001.

<b>ITACOATIARA</b>	<b>ÁGUAS ALTAS</b>				
<b>Metodologia</b>	<b>f''</b>	<b>f'</b>	<b>f global</b>	<b>C global</b>	<b>n global</b>
VAN RIJN (1984)	0,032	0,0078	0,040	44,471	0,042
HAQUE E MAHMOOD (1983)	0,005	0,0078	0,013	77,118	0,024
SHEN <i>et al.</i> (1990)	0,009	0,0012	0,010	86,887	0,022
ENGELUND (1977)	0,007	0,0078	0,015	72,445	0,026
WILBERS (2004)	0,007	0,0072	0,014	75,533	0,025

Estação de medição: **Óbidos**

Comprimento médio do trecho analisado: **3 km**

Tabela XXV: Síntese dos parâmetros de resistência calculados em Óbidos, considerando os meses de agosto e novembro de 2001 e março de 2005.

ÓBIDOS	ÁGUAS ALTAS					ÁGUAS BAIXAS				
Metodologia	f''	f'	f global	C global	n global	f''	f'	f global	C global	n global
VAN RIJN (1984)	0,041	0,0079	0,048	40,264	0,046	0,049	0,0082	0,057	37,197	0,048
HAQUE E MAHMOOD (1983)	0,011	0,0079	0,019	64,893	0,028	0,021	0,0082	0,029	52,062	0,034
SHEN <i>et al.</i> (1990)	0,016	0,0012	0,017	67,810	0,027	0,021	0,0015	0,023	58,538	0,030
ENGELUND (1977)	0,014	0,0079	0,022	60,376	0,031	0,022	0,0082	0,030	50,860	0,035
WILBERS (2004)	0,012	0,0071	0,020	63,303	0,029	0,020	0,0072	0,028	53,384	0,033
	ÁGUAS MÉDIAS									
Metodologia	f''	f'	f global	C global	n global					
VAN RIJN (1984)	0,045	0,0080	0,053	38,548	0,047					
HAQUE E MAHMOOD (1983)	0,012	0,0080	0,020	62,105	0,029					
SHEN <i>et al.</i> (1990)	0,021	0,0013	0,023	58,895	0,031					
ENGELUND (1977)	0,022	0,0080	0,030	50,789	0,036					
WILBERS (2004)	0,021	0,0068	0,027	53,615	0,034					

#### 4.5. ANÁLISES E DISCUSSÕES

Com base nas Tabelas XIX a XXV pode-se perceber que o coeficiente de resistência de pele se apresenta sempre superior em épocas de estiagem. Em situações demarcadas como cenários de seca e cheia, o  $f'$  proposto por SHEN *et al.* (1990) apresentou uma faixa de variação entre  $0,0015 < f' < 0,0018$  e  $0,0012 < f' < 0,0016$ , respectivamente. Considerando os resultados para a metodologia clássica e a adaptação proposta por WILBERS (2004), a amplitude da variação para estiagem foi de  $0,0081 < f' < 0,0090$  e  $0,0065 < f' < 0,0082$ , enquanto que para cheia foi de  $0,0074 < f' < 0,0085$  e  $0,0064 < f' < 0,0075$ , respectivamente. Percebe-se, pois, que os valores de  $f'$  propostos por SHEN *et al.* (1990) sempre foram os menores apresentados.

O diâmetro do grão utilizado como o correspondente a 90% da distribuição granulométrica da amostra de sedimentos do leito foi de 450 microns. A Tabela XXVI a seguir ilustra resumidamente resultados obtidos.

Tabela XXVI: Faixas de variação do coeficiente  $f'$  para as estações de medição analisadas.

<b>METODOLOGIA</b>	<b>ÁGUAS ALTAS</b>	<b>ÁGUAS BAIXAS</b>
Clássica	0,0074 – 0,0085	0,0081 – 0,0090
WILBERS (2004)	0,0064 - 0,0075	0,0065 - 0,0082
SHEN <i>et al.</i> (1990)	0,0012 - 0,0016	0,0015 - 0,0018

Como se pode perceber nos resultados acima destacados, a amplitude da faixa de variação de  $f'$  é maior quando se aplica as primeiras metodologias. As diferenças observadas entre os resultados obtidos através da formulação clássica e a desenvolvida por SHEN *et al.* (1990) estariam possivelmente associadas à forma como foram concebidas, sendo a primeira idealizada para leitos rígidos e não planos e a segunda obtida empiricamente para leitos móveis compostos por formas de fundo.

As duas últimas metodologias apresentadas na tabela anterior apresentam a mesma filosofia que exclui a zona de recirculação do cálculo da resistência de pele. Na primeira, isso é evidenciado nos limites espaciais de integração do campo de pressões para o cálculo da força longitudinal desencadeada pelos efeitos da rugosidade do grão, delimitados pela posição no eixo das abscissas dos pontos de estagnação e da crista. Na segunda, isso se evidencia mediante a aplicação de uma proporção em relação ao comprimento total da duna, conforme ilustram as equações 3.35 e 3.40.

Especificamente no que se refere à aplicação da metodologia de WILBERS (2004), obteve-se, a partir do levantamento dos perfis batimétricos longitudinais, comprimentos para a zona de recirculação da ordem de 24 metros, considerando um comprimento médio de 180 metros para as dunas medidas. Essa constatação permitiu estimar em média que cerca de 13% do comprimento individual de cada duna corresponde à referida zona onde se processa grande parcela da perda de energia do escoamento ao longo da duna. Como exemplo, se apresenta a Figura 37, referente a um trecho de dunas existente nas proximidades do município de Manacapuru.

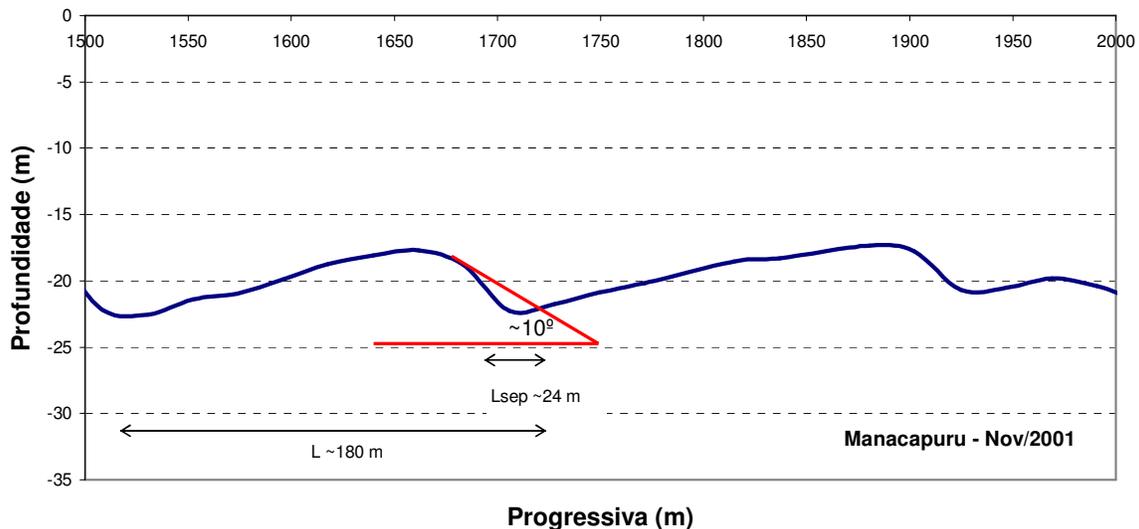


Figura 37: Ilustração do valor médio do comprimento da zona de recirculação resultante da aplicação direta da metodologia proposta por WILBERS (2004) em um trecho de dunas levantado na estação de Manacapuru (Nov /2001).

Dos resultados apresentados na Tabela XXVI, se constatou, após análise mais específica, uma tendência da proporção expressa através da equação 3.41 se apresentar menor em situações de águas baixas. Esta tendência fica clara quando multiplicamos o valor de 0.0081, obtido da metodologia clássica, pela proporção média equivalente ao conjunto de dunas analisadas, dada pelo valor aproximado de 0.8667. O valor obtido é aproximadamente 0,0070, quando o que resulta da observância dos dados é 0,0065. O resultado remete a prováveis modificações na geometria das formas de fundo nos diferentes cenários abordados.

No tocante ao ponto de deslocamento do escoamento, onde ocorre a perda da adesão do fluxo no corpo da duna, este valor foi estimado como 5% inferior à altura média da crista, em consonância com a metodologia proposta. Este, conforme mencionado no capítulo anterior, mostra-se como uma estimativa vinculada principalmente à taxa de aquisição de informações batimétricas do ADCP, cuja limitação evidencia-se na qualidade da resolução utilizada.

Quanto à geometria das dunas, nota-se através das propriedades geométricas levantadas ao longo do ano que são evidenciadas modificações dos parâmetros relativos à altura e ao comprimento nos diferentes campos avaliados. Contudo, não se pode afirmar precisamente a relevância das mesmas na resistência ao escoamento. A Figura 38 a seguir ilustra a significativa variação da rugosidade relativa ( $\Delta / D_c$ ) em função da variabilidade entre os níveis d'água nos períodos de cheia e estiagem, sendo acompanhada de menos acentuadas mudanças na esbeltez ( $\Delta / \lambda$ ).

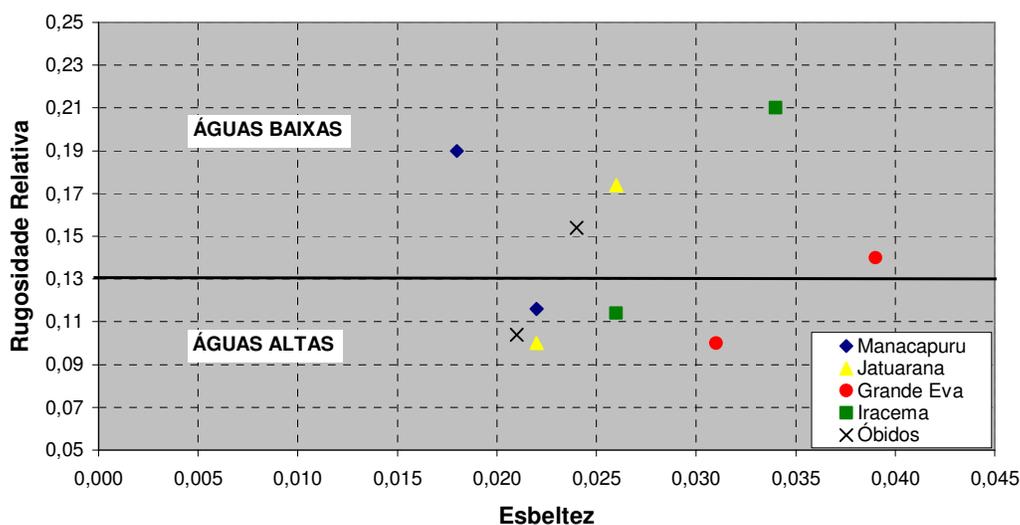


Figura 38: Relação entre a esbeltez ( $\Delta/\lambda$ ) e a rugosidade relativa ( $\Delta/D_C$ ) em diferentes estações ao longo do ciclo hidrológico.

Em consonância com o esperado, mas contrariando o observado por VINZON *et al.* (2002), percebe-se que os resultados referentes à esbeltez demonstram dunas aparentemente mais proeminentes em épocas de estiagem. Trata-se da observância da parcela de influência da vazão na resistência imposta ao escoamento, uma vez que leitos compostos basicamente por areia tendem a se tornar mais planos em épocas de cheia e acabam por atenuar a geometria das formas de fundo assim como o coeficiente de resistência global. Em épocas de cheia, as dunas tendem a ser mais erodidas pela ação das grandes vazões.

Em todas as metodologias de previsão de  $f''$ , a diferença encontrada nos diferentes cenários abordados ratificou a tendência da diminuição dos efeitos do atrito com a elevação dos níveis d'água. Esta percepção é demonstrada claramente nos menores valores encontrados para o referido coeficiente de resistência em épocas de cheia.

Das seis metodologias de cálculo do coeficiente de resistência por forma contidas na fundamentação teórica presente no capítulo 3, cuja abordagem procurou evidenciar o estado-da-arte da resistência ao escoamento em leitos móveis e não planos, percebe-se a isenção de resultados originários da formulação desenvolvida por FEDELE (1995). Esta é justificada pela

comprovada majoração de seus valores e discrepância em relação ao admitido como razoável para leitos caracterizados pela detecção de formas de fundo do tipo dunas.

Como exemplos, têm-se os resultados observados para a estação de Óbidos, cujo desvio em relação à média calculada com as demais metodologias mostrou-se bastante considerável. Nesta estação, se obteve valores para o coeficiente de resistência por forma  $f''$  de 0,118 e 0,196, para situações de águas altas e baixas, respectivamente. Estes, conforme se constata através da Tabela XXVI ilustrada anteriormente, se apresentam respectivamente em cerca de 6,2 e 7,3 vezes superiores a média calculada para o referido coeficiente em ocasiões de cheia e estiagem. Em termos de coeficiente de resistência global, expresso através de  $n$ , a aplicação desta metodologia resultou em valores de 0,072 para cheia e 0,089 para estiagem. O refugo da média neste caso é de 2,5 vezes superior. Além disso, tem-se uma inadequação da faixa de variação de  $n$  usualmente encontrada em leitos compostos por dunas, cujos valores deveriam estar contidos entre  $0,020 < n < 0,040$  (JULIEN e KLAASSEN, 1995).

Foi comprovada também uma inadequação na faixa de variação do coeficiente de resistência global, porém em menor escala, quando se aplicou a metodologia proposta por VAN RIJN (1984). Considerando os padrões do escoamento e as configurações de fundo observadas no trecho Manacapuru-Óbidos, a rugosidade hidráulica atribuída exclusivamente às dunas se apresenta um tanto superestimada, o que faz com que esta metodologia de previsão seja inadequada e comparativamente menos realista que as demais metodologias apresentadas. De todas as metodologias de avaliação de  $f''$ , a proposta por VAN RIJN (1984) foi a que apresentou em todas as estações e cenários os maiores valores. Já a proposta por HAQUE e MAHMOOD (1983) foi a que apresentou, freqüentemente, os menores valores.

Uma das possíveis causas para a inadequação referida anteriormente reside no próprio equívoco intrínseco à formulação proposta pelo pesquisador na estimativa da rugosidade hidráulica total  $k_s$ . Quando o mesmo introduziu o conceito do desmembramento da mesma em duas parcelas distintas, uma devido ao grão e a outra devido a dunas, foi considerada uma

simples soma linear das duas parcelas. Partindo da correta formulação expressa na eq. 3.15, constata-se que a soma correta para as referidas parcelas deveria ser representada por:

$$k_s = \left\{ (k_s')^{1/3} + (k_s'')^{1/3} \right\}^3, \text{ considerando } C = \frac{1}{k_s^{1/6}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Das diferenças entre cenários de cheia e estiagem, as mais significativas se evidenciam para a metodologia desenvolvida por HAQUE e MAHMOOD (1983), conforme demonstram os resultados contidos nas Tabelas XIX – XXV. Acredita-se que grande parte destas amplitudes de variação seja atribuída à notória influência do parâmetro referente à rugosidade relativa ( $\Delta / D_c$ ), cuja variação foi ilustrada anteriormente na Figura 38.

Ambas as metodologias desenvolvidas por HAQUE E MAHMOOD (1983) e SHEN *et al.* (1990) preconizam a não dependência da resistência por forma ao tamanho absoluto das formas de fundo. Segundo as mesmas, esta resistência estaria condicionada principalmente à geometria das formas de fundo, simbolizada especialmente por valores da esbeltez e da rugosidade relativa.

Porém, conforme confirmam os resultados, a formulação desenvolvida por SHEN *et al.* (1990) impõe uma menor influência da rugosidade relativa, representada pelo expoente 3/8 na equação 3.28 do capítulo anterior.

## Capítulo 5

### 5. DISCUSSÃO SOBRE OS EFEITOS DAS DUNAS E DA INUNDAÇÃO NA VARIAÇÃO DE NÍVEIS D'ÁGUA NO AMAZONAS

#### 5.1. INTRODUÇÃO

Na literatura e em trabalhos anteriormente realizados (CHOW, 1959; HENDERSON, 1966; SIMONS e RICHARDSON, 1966; SHEN *et al.*, 1990) foi constatada a diminuição do coeficiente de atrito com o aumento da vazão.

A modelagem numérica considerando as regiões alagáveis permite a reprodução de níveis d'água sem a modificação do coeficiente de atrito, atribuindo a redução verificada do mesmo em épocas de cheia à exportação de águas para as várzeas. Porém, incertezas advindas da falta de informações detalhadas das cotas das margens, geometria da calha principal e das áreas inundadas conferem um caráter ainda especulativo a estes resultados.

Neste capítulo são então discutidos os resultados da modelagem realizada por LE GUENNEC *et al.* (2006), utilizando uma rugosidade de fundo constante e considerando a presença das formas de fundo e os seus efeitos na redução do coeficiente de resistência durante as épocas de cheia fluvial. O modelo computacional utilizado foi o SIC (*Simulation of Irrigation Channel*).

#### 5.2. DESCRIÇÃO DA MODELAGEM UTILIZADA

##### 5.2.1. O modelo SIC

O SIC é um modelo unidimensional capaz de simular escoamentos fluviais em regime permanente ou transitório (BAUME *et al.*, 2005), com possibilidade de se incorporar os leitos médio e maior. Este modelo utiliza dados geométricos das seções transversais, interpolando em

seções igualmente espaçadas. Na modelagem desenvolvida por LE GUENNEC et al (2006), esta interpolação foi realizada para seções a cada 10 km.

Neste modelo a equação de Manning é utilizada para representar a resistência ao escoamento, apresentando as seguintes formulações:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} I^{1/2} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$Q = K I^{1/2} \quad (\text{Eq.5.2})$$

sendo  $Q$  a vazão,  $n$  o coeficiente de Manning,  $A$  a área molhada,  $R$  o raio hidráulico e  $I$  a perda de carga por unidade de comprimento, também denominada declividade da linha de energia. Na equação 5.2, o parâmetro  $K$  representa a condutância hidráulica, dada pela seguinte formulação:

$$K = \frac{1}{n} A R^{2/3} \quad (\text{Eq.5.3})$$

Os escoamentos unidimensionais não permanentes são governados pelas equações de Saint Venant, matematicamente representadas nas equações da continuidade e na relativa à conservação da quantidade de movimento, dadas pelas eqs. 5.4 e 5.5, respectivamente.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (\text{Eq.5.4})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \beta \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + g.A. \frac{\partial Z}{\partial x} + g.A.S_f - \varepsilon.q \frac{Q}{A} = 0 \quad (\text{Eq.5.5})$$

sendo  $Z$  a cota da superfície livre,  $q$  a vazão lateral por unidade de comprimento ( $q > 0$  se entrando,  $q < 0$  se saindo),  $x$  o valor da abscissa longitudinal,  $g$  a aceleração da gravidade,  $\varepsilon$  um

parâmetro igual a 0 se se  $q>0$ , ou 1 se  $q<0$  e  $\beta$  o coeficiente de quantidade de movimento (de Boussinesq).

O SIC subdivide a seção molhada em duas partes (leito médio e leito menor) onde as velocidades são consideradas uniformes, mas não iguais, conforme as equações 5.6 e 5.7 a seguir, onde o índice  $m$  indica o leito menor e o  $M$  o leito médio. A vazão total da seção é dada pelo somatório da contribuição de cada leito ( $Q = Q_m + Q_M$ ).

$$Q_m = \frac{1}{n_m} A_m R_{hm}^{2/3} I^{1/2} \quad (\text{Eq.5.6})$$

$$Q_M = \frac{1}{n_M} A_M R_{hM}^{2/3} I^{1/2} \quad (\text{Eq.5.7})$$

O coeficiente de quantidade de movimento é estimado por:

$$\beta = \left( \frac{\eta^2}{A_m} + \frac{1}{A_M} \right) \frac{A}{(1 + \eta)^2} \quad (\text{Eq.5.8})$$

sendo  $\eta$  é a repartição das vazões entre os dois leitos:

$$\eta = \frac{Q_m}{Q_M} = \frac{n_M}{n_m} \frac{sA_m}{\sqrt{A_M^2 + A_m A_M (1 - s^2)}} \left( \frac{R_m}{R_M} \right)^{2/3} \quad (\text{Eq.5.9})$$

Para resolução das equações de Saint Venant faz-se necessária a determinação das condições iniciais e das condições de contorno do problema. Neste trabalho, por exemplo, para obtenção dos coeficientes de resistência globais que ajustaram os níveis observados, os hidrogramas nas seções de montante e a curva-chave nas seções de jusante constituíram as condições de contorno, sendo a linha d'água da superfície livre a condição inicial. Nas simulações para águas altas, o modelo foi alimentado com dados referentes às medições

realizadas em julho de 1999, enquanto que foram utilizados os registros de novembro de 1998 para os cenários de águas baixas. Também se fez necessário especificar as vazões laterais ao longo da rede modelada.

O coeficiente de atrito e o coeficiente de quantidade de movimento entre esses dois leitos são estimados através da fórmula de Debord, baseada em métodos experimentais (NICOLLET e UAN, 1979).

$$K = \frac{sA_m R_{hm}^{2/3}}{n_m} + \frac{R_{hM}^{2/3} \sqrt{A_M^2 + A_m A_M (1-s^2)}}{n_M} \quad (\text{Eq.5.10})$$

Na equação anterior, o coeficiente  $s$  expressa a variação da vazão no leito menor devido ao escoamento no leito médio. Para o caso de  $s=1$ , tem-se uma formulação notoriamente conhecida para seções compostas e, quando  $s$  é diferente de 1, são consideradas as interações entre os escoamentos nos leitos médio e menor.

$$r = \frac{R_M}{R_m} > 0.3 ; \quad s = s_0 = 0.9 \left( \frac{n_M}{n_m} \right)^{-1/6} \quad (\text{Eq.5.11})$$

$$0 < r < 0.3 ; \quad s = \frac{1-s_0}{2} \cos\left(\frac{\pi r}{0.3}\right) + \frac{1+s_0}{2} \quad (\text{Eq.5.12})$$

### 5.2.2. O sistema modelado

Os limites do sistema modelado são visualizados na Figura 39 e delimitam as estações fluviométricas de Manacapuru, Moura e Fazenda Vista Alegre, situadas respectivamente no Rio Solimões, Negra e Madeira. A jusante, o limite é representado pela estação de Óbidos, sendo que o sistema total perfaz um comprimento de 1.200 km.

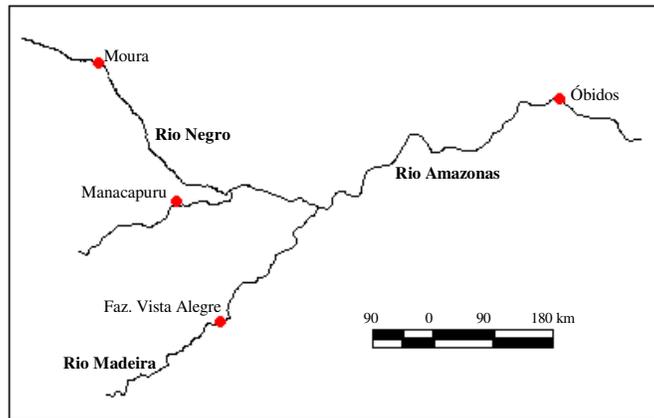


Figura 39: Rede hidrográfica modelada (Obtida de BELAUD *et al.*, 2006).

As informações da altimetria nas diferentes estações fluviométricas foram coletadas de levantamentos realizados por um projeto que envolveu a Universidade de São Paulo (USP), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o IRD (Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento, França). Os resultados são observados na Figura 4, apresentada anteriormente no capítulo 2.

As batimetrias das seções fluviais são as que foram levantadas no âmbito do projeto HiBAm. Ressalta-se, porém, que a modelagem realizada por LE GUENNEC *et al.* (2006) representa um aprimoramento do detalhamento batimétrico utilizado por RIBEIRO NETO, (2001), no qual são utilizados 70 perfis transversais, espaçados a cada 10 km, sobre 722 km de distância. Como consequência, tem-se um melhor detalhamento do talvegue<sup>4</sup>, conforme indica a Figura 40 a seguir.

<sup>4</sup> Linha batimétrica dos pontos mais baixos do curso d'água.

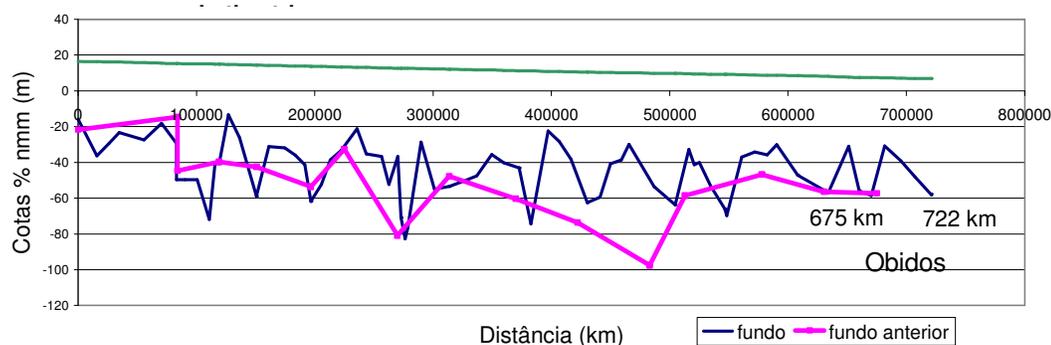


Figura 40: Comparação entre a descrição geométrica do talvegue utilizada por LE GUENNEC *et al.* (2006) e aquela utilizada RIBEIRO NETO, (2001).

Utilizando apenas o leito menor para a calibração dos níveis d'água, sendo este definido como a região da calha por onde se processa o escoamento em períodos de estiagem, percebe-se uma redução das incertezas com o refinamento batimétrico. A utilização de uma geometria mais acurada conduz a uma menor variação do coeficiente de atrito entre águas baixas e altas, passando a 24%. Com uma geometria menos apurada esta variação equivalia a aproximadamente 27%. A seguir, a Tabela XXVII revela os diferentes valores encontrados de  $n$  no trecho Manacapuru-Óbidos em função do maior detalhamento batimétrico, obtidos através de simulações hidrodinâmicas com dados do ano de 1995.

Tabela XXVII: Valores de  $n$  utilizando diferentes detalhamentos batimétricos.

Período Hidrológico	$\Delta X = 51,5 \text{ km}$	$\Delta X = 10,0 \text{ km}$
Junho de 1995 (águas altas)	0,029	0,027
Novembro de 1995 (águas baixas)	0,038	0,034

Um outro exemplo interessante da importância da descrição geométrica ao se interpretar fisicamente as variações de  $n$  pode ser visto do resultado da calibração considerando uma situação de águas médias, condicionada pelas vazões de 76.000 m<sup>3</sup> em Manacapuru e 147.000 m<sup>3</sup> em Óbidos. Com o refinamento, o valor de  $n$  resulta em 0,0286, contrastando com o  $n$  de 0,0336 obtido sem o detalhamento batimétrico.

Conforme já fora mencionado anteriormente, as condições de contorno e iniciais que alimentaram o SIC e posteriormente calcaram as análises dos resultados feitas a seguir são referentes aos meses de julho de 1999 e novembro de 1998, configurando cenários de águas altas e baixas, respectivamente. Na situação de águas altas, as vazões são 159.000 m<sup>3</sup> em Manacapuru e 254.000 m<sup>3</sup> em Óbidos, sendo a cota em Manacapuru de 24,60 m em relação ao nível médio do mar. Na de águas baixas, as vazões são respectivamente de 41.000 m<sup>3</sup> e 74.300 m<sup>3</sup>, sendo a cota em Manacapuru de 10,25 m.

### 5.3. O PAPEL DAS DUNAS E DA INUNDAÇÃO

Conforme esperado, os resultados da modelagem utilizando apenas o leito menor revelam a impossibilidade de se considerar valores semelhantes de  $n$  em diferentes condições hidrológicas do trecho em estudo. Esta constatação ratifica o observado no capítulo 4, mediante a aplicação das diferentes metodologias de previsão da resistência.

Uma possível explicação para o fato anteriormente destacado se encontra relacionado à presença de dunas no leito do rio. Apesar de suas geometrias não apresentarem modificações significativas ao longo do ano, a diminuição do tirante d'água conduz a um significativo incremento da rugosidade relativa, o que promove a aparição de maiores valores para o coeficiente de resistência.

Os resultados obtidos da calibração de níveis através do SIC revelam em média valores de  $n$  iguais a 0,035 e 0,0265 para simulações em águas baixas e altas, respectivamente. Estes resultados apresentam uma boa compatibilidade com a média de  $n$  obtida da aplicação das diferentes metodologias de previsão ao longo do trecho Manacapuru-Óbidos, conforme indica a Tabela XXVIII a seguir.

Tabela XXVIII: Valores médios de  $n$  ao longo do trecho Manacapuru-Óbidos

METODOLOGIA	ÁGUAS ALTAS	ÁGUAS BAIXAS
HAQUE E MAHMOOD (1983)	0,029	0,036
SHEN <i>et al.</i> (1990)	0,029	0,033
ENGELUND (1977)	0,033	0,037
WILBERS (2004)	0,031	0,035

Comparando os resultados da modelagem com a relação entre  $n$  e a vazão ( $n \times Q$ ) apresentada na Figura 41, percebe-se o posicionamento dos mesmos dentro da faixa de variação característica da área de estudo, compreendida entre os limites de  $0,027 < n < 0,037$ . Esta faixa foi obtida com base nas linhas de tendência para cada uma das metodologias de previsão abordadas.

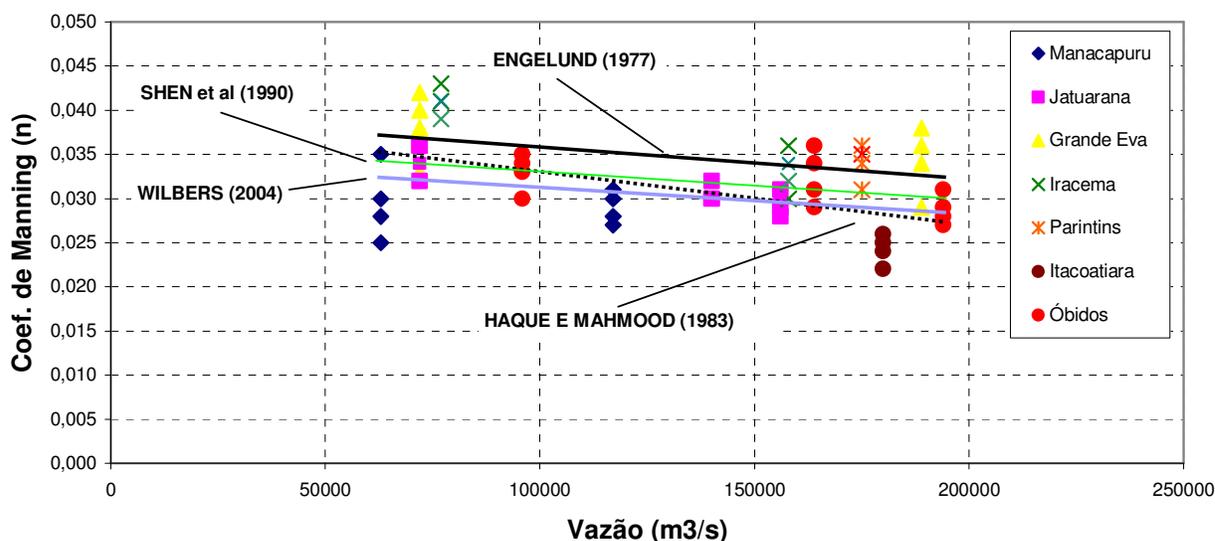


Figura 41: Resultados de  $n$  ao longo do trecho Manacapuru-Óbidos.

Um outro exemplo interessante de ser observado retrata a participação do leito médio, quando o mesmo é utilizado na calibração de níveis com dados do período 1998-1999. Neste trabalho, o leito médio é definido como a área de inundação por onde pode haver escoamento e sua incorporação ao modelo foi subsidiada em imagens de satélite mediante técnicas de sensoriamento remoto. Simulações envolvendo o leito maior, região responsável pelo

armazenamento de águas no período de cheia onde se considera a inexistência do escoamento, não será escopo desta dissertação. As Figuras 42 e 43 a seguir ilustram as regiões mencionadas e os mosaicos de imagens que deram origem a cada uma das dimensões do leito adotadas na modelagem.

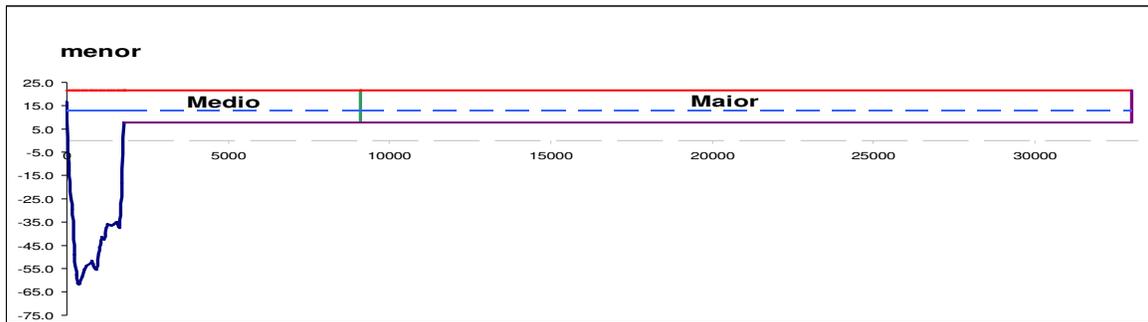


Figura 42: Exemplo ilustrativo de uma seção transversal típica do rio Amazonas, onde o leitos menor, médio e maior são estimados em 3, 6,1 e 33 km, respectivamente (Fornecida por LE GUENNEC, comunicação pessoal).

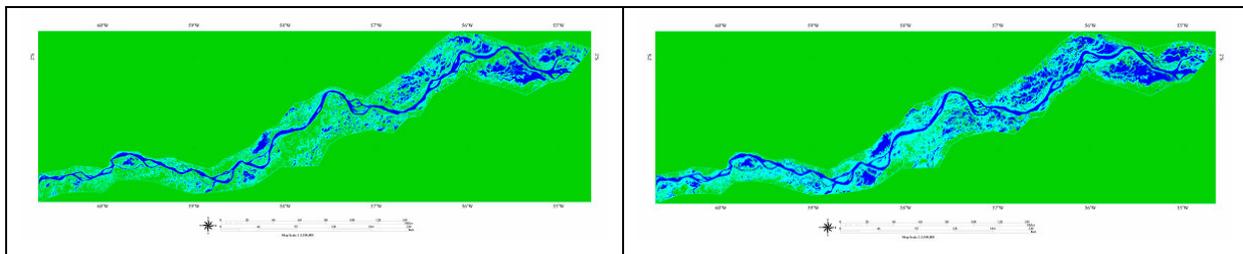


Figura 43: Mosaicos das imagens do satélite JERS1<sup>5</sup>, em épocas de seca e estiagem (Modificada de RIBEIRO NETO, 2001).

Incorporando o leito médio à geometria do leito, se obtém um  $n$  de 0,0332 em regime de águas baixas e 0,0298 em regimes de águas altas. Ressalta-se, porém que, utilizando os mesmos dados e condições de contorno chega-se a coeficientes de 0,035 e 0,0265, considerando simulações envolvendo apenas o leito menor, conforme resume a Tabela XXIX, a seguir.

<sup>5</sup> Satélite japonês (Japan Earth Resources Satellite 1), utilizado no Projeto GFRM (Global Rain Forest Mapping). Na América do Sul, esse projeto teve como principal objetivo realizar a cobertura global da Floresta Amazônica, mediante imagens de satélite.

Tabela XXIX: Valores de  $n$  obtidos sem e com a incorporação do leito médio.

GEOMETRIA	ÁGUAS ALTAS	ÁGUAS BAIXAS
Leito menor	0,0265	0,035
Leito menor + médio	0,0298	0,0332

Poder-se-ia esperar, considerando os dois resultados para águas baixas, valores idênticos de  $n$ , uma vez que o escoamento se processa apenas nos limites da calha delimitados como leito menor. Entretanto, a pequena diferença observada advém do fato da linha d'água calculada ultrapassar a observada, fazendo com que o leito médio interfira um pouco no resultado da calibração.

Na simulação para águas altas, percebe-se um maior valor do coeficiente de resistência ao se incorporar o leito médio. Trata-se de um resultado já esperado, tendo em vista que foi verificado apenas 13% da vazão transitando no leito médio, sendo a seção aumentada em cerca de 31%. O transbordamento gera uma redução das profundidades no leito menor, onde as formas de fundo passarão a exercer maior influência em virtude do aumento da rugosidade relativa. Analisando sobre a ótica da modelagem, há de se esperar um maior valor de  $n$  para alcançar a condição de contorno em Manacapuru.

#### 5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim como fora observado por BELAUD *et al.* (2006), uma parcela significativa da variação do coeficiente de atrito entre águas baixas e altas ocorre devido ao nível de descrição geométrica do rio, sendo este uma importante premissa ao se avaliar as variações da resistência imposta ao escoamento e suas conseqüências.

A partir dos resultados da modelagem com apenas o leito menor desenvolvida por LE GUENNEC *et al.* (2006), poder-se-ia considerar que os efeitos das dunas conseguem por si só explicar a variação de  $n$  com a profundidade, uma vez que a faixa de variação obtida mediante a aplicação das diferentes metodologias contempla consideravelmente os resultados obtidos.

Porém, as simulações com o leito médio revelaram uma parcela da influência do alagamento das várzeas nos resultados da calibração.

O que se pode concluir dos resultados apresentados é que o efeito das dunas e do alagamento das várzeas se encontram interligados. O comportamento do escoamento na presença de um interfere diretamente na participação do outro, fato que dificulta atribuir isoladamente os percentuais de influência de cada um na variação de níveis observada. O incremento do coeficiente de resistência promove a sobrelevação dos níveis d'água, o que fatalmente em épocas de elevadas vazões conduzirá ao transbordo lateral e conseqüente armazenamento de água nas várzeas. Essa constatação torna-se ainda mais evidente na medida em que não se dispõe de dados consistentes da altura das margens, assim como da batimetria e largura do leito médio ao longo do trecho em estudo. Na medida em que o coeficiente de atrito gerencia as cotas da linha d'água, o seu conhecimento também delimita a participação das áreas alagáveis no escoamento.

A aplicação das diferentes metodologias de previsão da resistência, cujas formulações incorporam o papel desempenhado pelas dunas existentes no Amazonas, permitiu estimar os valores característicos em cada estação fluviométrica selecionada. Além disso, possibilitou a obtenção de uma faixa de variação do coeficiente de Manning típica do trecho Manacapuru-Óbidos.

Os resultados evidenciam os efeitos das formas de fundo na variação de  $n$  e não apenas os das várzeas, conforme até então eram especificamente atribuídos. O confronto dos resultados obtidos no capítulo 4 com os referentes às simulações numéricas conferem credibilidade às análises realizadas, corroborando para possíveis extrapolações dos mesmos a todo o Rio Amazonas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAM, A.M.Z., KENNEDY, J.F., 1969. Friction factors for flow in sand bed channels. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, **95**(6): 1973-1992.
- ANA – Agência Nacional de Águas, 2006. Hidroweb, Sistema de Informações Hidrológicas. [online]. Disponível na Internet. URL: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Arquivos consultados em 2006.
- ASCE Task Force on Bed Forms in Alluvial Channels, 1966. Nomenclature for bed forms in alluvial channels. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, **92**(3): 51-64.
- BAUME, J.P., MALATERRE, P.O., BELAUD, G., LE GUENNEC, B. SIC : a 1D hydrodynamic model for river irrigation canal modelling and regulation. In : Métodos numéricos em recursos hídricos, ed. R.C.V. Silva, 116p.
- BELAUD, G., BAUME, J.P., LE GUENNEC, B., MARTINEZ, J.M., CONCHONNEAU, G., 2006. Geometry measurement versus roughness calibration: application to Amazon River. **In: 7<sup>th</sup> International Conference on Hydroinformatics**, Nice, França, Vol. II.
- BENNETT, S.J., BEST, J.L., 1995. Mean flow and turbulence structure over fixed, two-dimensional dunes: implications for sediment transport and bed form stability. *Sedimentology*, **42**: 491-513.
- BROOKS, N.H., 1958. Mechanics of streams with movable beds of fine sand. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **123**: 526-549.
- BROWNLIE, W.R., 1981. **Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels**. Tese de Doutorado. California Institute of Technology, Pasadena, EUA. 423 p.

- CAMREX - Carbon in the Amazon River Experiment [online]. Disponível na Internet. URL: <http://boto.ocean.washington.edu/>. Arquivos consultados em 2006.
- CHANG, H.H., 1988. **Fluvial Processes in River Engineering**. John Wiley & Sons, Nova York. 432 p.
- CHOW, V.T., 1959. **Open Channel Hydraulics**. McGraw-Hill, Nova York. 680p.
- COLEBROOK, C.F., WHITE, C.M., 1937. Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of the Royal Society of London*, **161**: 367-381.
- CURTIS, W.F., MEADE, R.H., NORDIN Jr., C.F, PRICE, N.B., SHOLKOVITZ, E.R., 1979. Non-uniform vertical distribution of fine sediment in the Amazon River. *Nature*, **280**: 381-383.
- DEFANT, A., 1960. **Physical Oceanography**. Vol. II. Pergamon Press, Oxford. 598 p.
- EINSTEIN, H.A., 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channels. *Technical Bulletin*, 1026, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D.C., EUA.
- EINSTEIN, H.A., BARBAROSSA, N.L., 1952. River channel roughness. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **117**: 1121-1146.
- ENGEL, P., LAU, Y. L., 1980. Computation of bed load using bathymetric data. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, **106**(3), 369-380.
- ENGELUND, F., 1966. Hydraulic Resistance of Alluvial Streams. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, **92**(2): 315-326.

- ENGELUND, F., 1977. Hydraulic resistance for flow over dunes. *Progress Report*, 44, Technical University of Denmark, Institute for Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, DK.
- FEDELE, J.J., 1995. Dune velocity in sand bed rivers, **In: XXVI IAHR Congress Hydra 2000**, Londres, UK, v. 5, pp. 37-42.
- FEHLMAN, H. M., 1985. **Resistance components and velocity distributions of open channel flows over bed forms**. Dissertação de Mestrado. Colorado State University, Fort Collins, EUA.
- GIBBS, R.J., 1967. The geochemistry of the Amazon River system: Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geological Society of America Bulletin*, **78**(10): 1203-1232.
- GRFM, 2004. **Global Rain Forest Mapping Project, South America (Amazon Basin)**, v. AM-1, National Space Development Agency of Japan /Earth Observation Research Center (NASDA EORC), Japão.
- HAQUE, M.I., MAHMOOD, K., 1983. Analytical determination of form friction factor. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE **109**(4): 590-610.
- HENDERSON, F.A., 1966. **Open Channel Flow**. Mcmillan Company, Nova York. 522p.
- HYBAM - Hydrologie et Géochimie du bassin Amazonien, Institut de Recherche pour l'ê Développement (IRD) [online]. Disponível na Internet. URL: <http://www.ird.org.br/hydrologie.htm#Objectifs>. Arquivo consultado em 2002.
- JULIEN, P.Y., KLAASSEN, G.J., 1995. Sand-dune geometry of large rivers during floods. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **121**(9): 657-663.

- JUNK, W. J., 1989. The use of Amazonian floodplains under ecological perspective. *Interciencia*, **14**(6): 317-322.
- JUNK W.J., 1997. General aspects of floodplain ecology with special reference to Amazonian Floodplains. **In: The central Amazon floodplain: ecology of a pulsing system**, ed. W.J. Junk. pp: 3–17.
- KADOTA, A., NEZU, I., 1999. Three-dimensional structure of space-time correlation on coherent vortices generated behind dune crest. *Journal of Hydraulic Research*, **37**: 59-80.
- KENNEDY, J. F., 1969. The formation of sediment ripples, dunes and anti-dunes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **1**(1): 147-168.
- KOSTASCHUK, R., VILLARD, P., 1996. Flow and sediment transport over large subaqueous dunes: Fraser River, Canada. *Sedimentology*, **43**(5): 849-863.
- KOSUTH, P., CALLÈDE, J., LARAQUE, A., FILIZOLA, N., GUYOT, J.L., SEYLER, P., FRITSCH, J.M., 1999. Influence de la mare océanique sur le cours aval de l'Amazone. **In: Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins**, Manaus, Brasil.
- LE GUENNEC, B., STRASSER, M., VINZON, S.B., 2006. Papel das formas de fundo na calibração do coeficiente de atrito na modelagem computacional do rio Amazonas. **In: VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, Porto Alegre, Brasil.
- MEADE, R.H., NORDIN Jr., C.F., CURTIS, W.F., RODRIGUES, F.M.C., DO VALE, C.M., EDMOND, J.M., 1979a. Sediment loads in the Amazon River. *Nature*, **278**: 161-163.

- MEADE, R.H., NORDIN Jr., C.F., CURTIS, W.F., 1979b. Suspended-sediment and velocity data, Amazon River and its Tributaries, June-July 1976 and May-June 1977. *Open-File Report 79-515*, U.S. Geological Survey, Denver, EUA.
- MEADE, R.H., DUNNE, T., RICHEY, J.E., SANTOS, U.M., SALATI, E., 1985. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil. *Science*, **228**: 488-490.
- MEADE, R.H., RAYOL, J.M., DA CONCEIÇÃO, S.C., NATIVIDADE, J.R.G., 1991. Backwater effects in the Amazon River basin of Brazil, *Environmental Geology*, **18**(2): 105-114.
- MEADE, R.H., 1994. Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco rivers. *Quaternary International*, **21**: 29-39.
- MERTES, L.A.K., MEADE, R.H., 1985. Particle sizes of sands collected from the bed of the Amazon River and its tributaries in Brazil during 1982-84, *Open-File Report 85-333*, U.S. Geological Survey, Denver, EUA.
- MULLER, A., GYR, A., 1986. On the vortex formation in the mixing layer behind dunes. *Journal of Hydraulic Research*, **24**: 358-375.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration, 2004 [online]. Disponível na Internet. URL: [http://visibleearth.nasa.gov/view\\_set.php?sensorID=6](http://visibleearth.nasa.gov/view_set.php?sensorID=6). Arquivo consultado em 2004.
- NELSON, J.M., McLEAN, S.R., WOLFE, S.R., 1993. Mean flow and turbulence fields over two-dimensional bed forms. *Water Resources Research*, **29**(12): 3935-3954.

- NICOLLET, G., UAN, M., 1979. Ecoulements permanents à surface libre en lits composés. *La Houille Blanche*, n° 1.
- NIKURADSE, J., 1933. Stromungsgesetze in rauhen Rohren. *Forschung auf dem Gebiete de Ingenieurwesens*, 361. Verein Deutscher Ingenieure, Berlin. 62 p.
- NORDIN Jr., C.F., MEADE, R.H., MAHONEY, H.A., DELANEY, B.M., 1977. Particle size of sediments collected from the bed of the Amazon River and its Tributaries in June and July 1976. *Open-File Report 77-400*, U.S. Geological Survey, Denver, EUA.
- NORDIN Jr., C.F., MEADE, R.H., CURTIS, W.F., BÓRIO, N.J., DELANEY, B.M., 1979. Particle size of sediments collected from the bed of the Amazon River and its Tributaries in May and June 1977. *Open-File Report 79-329*, U.S. Geological Survey, Denver, EUA.
- NORDIN Jr., C.F., MEADE, R.H., CURTIS, W.F., BÓRIO, N.J., LANDIM, P.M.B., 1980. Size distribution of Amazon River bed sediment, *Nature*, **286**: 52-53.
- OGINK, H.J.M., 1989. Hydraulic roughness of single and compound bedforms. Part XI. *Report on Model Investigations M 1314 –XI/Q 786*, Delft Hydraulics, Emmerlood, Holanda.
- RAMETTE, M., 1981. **Guide d'hydraulique fluviale**. Laboratoire National d'Hydraulique, Direction des Etudes et Recherches d'Electricité De France, Paris, França.
- RAUDKIVI, A.J., 1963. Study of sediment ripple formation. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, **89**(6): 15-33.
- RAUDKIVI, A.J., 1967. **Loose boundary hydraulics**. Pergamon Press, Oxford. 400p.
- RDI - RD Instruments, Acoustic Doppler Solutions. Winriver User's guide [online]. Disponível na Internet. URL: <http://www.rdinstruments.com>. Arquivo consultado em 2006.

RDI - RD Instruments, Acoustic Doppler Solutions. Principles of operation moving bottom [online]. Disponível na Internet. URL: <http://www.rdinstruments.com>. Arquivo consultado em 2006.

RDI - RD Instruments, Acoustic Doppler Solutions. Application note FSA-007 [online]. Disponível na Internet. URL: <http://www.rdinstruments.com>. Arquivo consultado em 2006.

RIBEIRO NETO, A., 2001. **Modelagem hidrodinâmica da bacia do rio Amazonas**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília. 128 p.

RIBEIRO NETO, A., SILVA, J.S., LE GUENNEC, B., ROTUNNO FILHO, O.C., MARTINEZ, J.M., BAUME, J.P., KOSUTH, P., 2005. Utilização conjunta de modelagem hidrodinâmica e imagens de satélite para estimativa da superfície de planícies de inundação: estudo de caso – curso médio do rio Amazonas. **In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa, Paraíba, v. 1. pp. 1-15.

RIFAI, M.F., SMITH, K.V.H., 1969. Discussion of Pressure Fluctuations in reattaching flow, by R. Narayana and A. J. Reynolds. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, **95**(5), 1747-1750.

SHEN, H.W., FEHLMAN, H.M., MENDOZA, C., 1990. Bed form resistances in open channel flows *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **116**(6): 799-815.

SIC, 1999. **Users Manual SIC – Simulation of Irrigation Canals: version 3.7**. CEMAGREF, Montpellier, França. 158 p.

- SIMONS, D.B., RICHARDSON, E.V., 1960. Resistance to flow in alluvial channels, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, **86** (5): 73-100.
- SIMONS, D.B., RICHARDSON, E.V., 1966. Resistance to flow in alluvial channels. *Professional Paper*, P 422-J, U.S. Geological Survey, Washington, EUA. 61 p.
- SIMONS, D.B., SENTÜRK, F., 1992. **Sediment transport technology: water and sediment dynamics**, Water Resources Publications, Littleton. 897 p.
- STRASSER, M.A., 2002. **Estudo da geometria das formas de fundo no curso médio do rio Amazonas**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 100 p.
- TORRES, A.M., 1997. Sedimentology of the Amazon Mouth: North and South Channels, Brazil. *Berichte Reports*, 82, Geologisch-Paläontologisches Institut und Museum, Cristian-Albrechts-Universität, Kiel, Alemanha.
- VANONI, V.A. & BROOKS, N.H., 1958. Discussion of "Mechanics of sediment-ripple formation" by H. Liu, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, **105** (1): 1558-17/ 1558-22.
- VANONI, V.A., HWANG, L.-S., 1967. Relation between bed forms and friction in streams. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, **93**(3): 121-144.
- VAN RIJN, L.C., 1984a. Sediment transport, part I: bed load transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **110**(10): 1431-1456.
- VAN RIJN, L.C., 1984b. Sediment transport, part II: suspended load transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **110**(11): 1613-1641.

VAN RIJN, L.C., 1984c. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. **110**(12): 1733-1754.

VINZON, S.B., 1998. **A preliminary examination of Amazon shelf sediment dynamics**. Tese de Doutorado. University of Florida, Gainesville, USA.

VINZON, S. B., OLIVEIRA, M. B., STRASSER, M., 2002. Efeito das dunas na resistência ao escoamento no rio Amazonas. **In: ENES V**, São Paulo., v. 1. p. 1-10.

VITAL, H., STATTEGGER, K., POSEWANG, J., THEILEN F., 1998. Lowermost Amazon River: morphology and shallow seismic characteristics, *Marine Geology*, **152**: 277-294.

VITTAL, N., RANGA RAJU, K.G., GARDE, R.J., 1977. Resistance of two dimensional triangular roughness. *Journal of Hydraulic Research*, **15**: 19-36.

WANG, W.C., 1983. **Flow characteristics over alluvial bed forms**. Tese de Doutorado. Colorado State University, Fort Collins, EUA.

WHITE, W.R., PARIS, E., BETTESS, R., 1979. A new general method for predicting the frictional characteristics of alluvial streams. *Relatório IT 187*, Hydraulics Research Station, Wallingford, UK.

WILBERS, A., 2004. The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes. *Netherlands Geographical Studies*, 323. Utrecht University, Utrecht, Holanda. 227 p.

YALIN, M.S., 1964. Geometrical properties of sand waves. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, **90**(5): 105-120.

YALIN, M.S., 1977. **Mechanics of sediment transport**. 2 ed. Pergamon Press, Oxford. 298 p.

# 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](#)