

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

SOBRE OS SEDIMENTOS DA CAMADA MÓVEL DO LEITO DOS ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE

Ademilton Luiz Rodrigues de Souza¹ & Geraldo Wilson Júnior²

Resumo.- Nos escoamentos com superfície livre ocorrem interações contínuas entre a fase líquida, regida pelas leis da Mecânica dos Fluidos, e a sólida, composta de sedimentos que se movimentam por arraste em contato com o leito, ou em suspensão no meio da corrente turbulenta. Este fenômeno se manifesta na camada superior das calhas dos escoamentos, denominada camada ativa ou móvel, onde processos sedimentológicos e morfológicos se iniciam - com o movimento incipiente dos grãos sólidos-, e também se encerram - com a deposição desses grãos. A descrição quantitativa do movimento sedimentar é função do conhecimento qualitativo dos processos físicos deste movimento. Por exemplo, é necessário distinguir os sedimentos originários do leito do escoamento daqueles produzidos na bacia hidrográfica, pois os primeiros relacionam-se com as variáveis hidrodinâmicas, enquanto os outros dependem da disponibilidade de sedimentos, do uso e perda de solo na bacia hidrográfica. Neste artigo são analisados o movimento incipiente dos sedimentos, e as evoluções temporal e longitudinal das características granulométricas da camada móvel de cursos d'água brasileiros. Conclui-se que o diagnóstico hidrossedimentológico dos escoamentos, nos trechos fluvial e estuarino, pode ser realizado, precisamente, com base em estudos não-dispendiosos, Euleriano e Lagrangeano, das características dos sedimentos da camada ativa do leito.

Abstract – The liquid and solid phases interact continuously in open channel flows. While the liquid phase is controlled by the laws of Fluid Mechanics, the solid phase consists of sediment particles which move on the bed surface or in suspension carried by turbulent flows. The interaction begins in the bed active upper layer of the watercourse, referred as bed movable layer, where sedimentological and morphological processes initiate with the sediment particle motion and terminate upon particle deposition. A quantitative description of sediment movement depends on the qualitative understanding of the physical processes of the movement per se. For example, it is necessary to distinguish the sediment originated in the channel bed from that of the drainage basin since the former depends on the hydrodynamic variables while the other on the availability of material, soil usage, and soil loss from the drainage basin. Temporal and longitudinal evolutions of the granulometric characteristics of the active layer of some Brazilian streams were analyzed in this work. In summary, the hydrosedimentological diagnostic of either fluvial or estuarine flow stretches can be ascertained with precision based on inexpensive Eulerian-Lagrangean characterization of the active bed sediment properties.

Palavras-Chave – Movimento de Sedimentos; Morfologia Fluvial; Camada Móvel do Leito.

¹ Mestre em Ciências em Engenharia Oceânica do PENO/COPPE/UFRJ. ademilton@peno.coppe.ufrj.br

² Professor Adjunto do PENO/COPPE/UFRJ. gwj@predialnet.com.br; jrwilson@gmail.com

PENO/COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da UFRJ. Centro de Tecnologia, Bloco C, Sala 209. CEP 21.945-970 Rio de Janeiro, RJ. Fones: (55) (21) 2562.8741 - 8755

I. INTRODUÇÃO

Uma série importante de problemas de Engenharia Civil e Ambiental está diretamente associada ao comportamento dos sedimentos nos escoamentos com superfície livre. Os sedimentos são ao mesmo tempo: (i) arquivos preciosos graças aos quais os especialistas lêem parte da História do nosso globo, (ii) materiais básicos para a construção civil, (iii) constituintes móveis, sob a ação das correntes líquidas, ondas e ventos, dos quais o Homem deve proteger as zonas costeiras e as obras fluviais, marítimas e portuárias, (iv) agentes de retenção e fixação de certos poluentes, minerais ou orgânicos, de origens industrial, agrícola e/ou nuclear. As dispersões transversais e longitudinais, às quais as partículas estão sujeitas numa corrente turbulenta, podem reduzir a concentração das substâncias tóxicas fixadas nos grãos finos de sedimentos, mas, sob certas condições hidrodinâmicas, podem ocorrer deposições de sedimentos e reconcentrações de material tóxico, nocivas ao Homem e ao Ecossistema.

Deste modo, a estimativa do movimento de partículas sólidas nos escoamentos com superfície livre constitui um fator essencial para a solução de problemas relacionados com: (i) a exploração de bacias fluviais, (ii) projetos de estruturas hidráulicas e portuárias, (iii) operação e manutenção de vias de navegação e de reservatórios de usinas hidrelétricas e de abastecimento d'água, (iv) rejeitos industriais de toda espécie, (v) extração de areia e agregados dos fundos dos rios, estuários e mares.

I.1. Origens e Tipos de Movimento de Sedimentos em Escoamentos Fluviais e Estuarinos

Como apresentado na **Figura 1**, a seguir, os sedimentos são colocados em movimento ou têm seus movimentos alterados nas bacias hidrográficas: pela **ação dos elementos naturais**, tais como chuvas, correntes líquidas, ação dos ventos, das ondas, vagas e marés nos estuários e mares, e pela **intervenção do Homem**, no leito do rio e na bacia hidrográfica, através de ações que se somam aos eventos naturais, como: operações de dragagens, atividades de mineração e agrícolas, construção de barragens e outras estruturas hidráulicas, desmatamentos, rejeitos domésticos e industriais, atividades esportivas e turísticas, entre várias outras. Em outras palavras, os sedimentos são colocados em movimento ou têm seus movimentos alterados, sempre que ocorrem alterações no leito do rio ou na bacia hidrográfica.

Tem-se, então, dois tipos básicos de movimento de material sólido nos escoamentos fluviais, incluindo sua região estuarina: (1) sedimentos originários do leito do escoamento, provenientes do rio e do mar, os quais podem ser transportados por arraste e/ou em suspensão; (2) sedimentos oriundos da lavagem da bacia, pela ação das chuvas, gerando o movimento do tipo carga de lavagem ou “*wash-load*”.

Estes últimos são mais finos que os sedimentos do leito, podendo ser transportados, em suspensão, ao longo do rio, por grandes distâncias. Esta distinção é muito importante, pois medições de campo, fórmulas, modelos e estimativas do movimento sólido que não distinguem a origem do sedimento, conduzem a resultados imprecisos. Infelizmente, já fazem inúmeras décadas que a Sedimentologia tem sido considerada uma ciência imprecisa, enquanto, na realidade, são as descrições quantitativas do movimento de sedimentos que tem sido baseadas em descrições qualitativas imprecisas.



Figura 1. Movimentos Sedimentares em Escoamentos Fluviais (WILSON-JR, 2009)

I.2. Relações analíticas hidrossedimentométricas

Dependendo do caso estudado e das campanhas de medições realizadas, é possível que exista uma relação não-linear, entre a descarga sólida dos **sedimentos do leito**, por unidade de largura q_B , expressa em unidades de $[ML^{-1}T^{-1}]$ ou $[FL^{-1}T^{-1}]$ e a vazão líquida linear ou por unidade de largura do rio, q , expressa, normalmente, em $[L^2T^{-1}]$, do tipo:

$$q_B = a q^b \quad (1)$$

onde **a** e **b** são constantes que dependem das características hidrossedimentométricas do trecho do escoamento.

A **Equação (1)** é conhecida, internacionalmente, como **Curva ou Equação do Transporte de Sedimentos**, e, nacionalmente, como **Curva Chave de Sedimentos**. Cabe salientar que, ao contrário de várias aplicações realizadas no país, esta equação só tem significado físico para os sedimentos originários do leito do escoamento, sujeito às suas forças hidrodinâmicas.

Por outro lado, as descargas de sedimentos do tipo *wash-load* são, em geral, independentes da vazão líquida do rio. Este movimento consiste da resposta mais rápida do rio às interferências antrópicas que estão ocorrendo na bacia hidrográfica, e relaciona-se diretamente com o estoque de sedimentos e a perda de solo na superfície drenada da bacia hidrográfica.

I.3. Funções da Camada Móvel do Leito do escoamento

Para partículas de sedimentos de mesmas características físico-químicas, ou seja, mesma composição mineralógica, massa específica, dimensão e forma, é de se esperar que as variáveis que intervêm nos modelos de transporte e dispersão de sedimentos, por arraste e em suspensão, sejam relacionadas entre elas, pelo menos, no nível de sua fronteira comum: o leito do escoamento. Por isto, a camada móvel superior do fundo do escoamento tem um papel muito importante no curso d'água, pois ela pode ser: (i) fonte de alimentação de grãos de sedimentos que se deslocam por arraste e/ou em suspensão, (ii) barreira de reflexão dos sedimentos em suspensão que a tocam, devido às ações do escoamento turbulento e da aceleração da gravidade, e (iii) barreira de absorção dos sedimentos em suspensão. Neste caso, os grãos que atingem o fundo do escoamento são absorvidos, criando-se depósitos dos sedimentos originalmente em suspensão.

Sob certas condições hidrossedimentométricas naturais, todos estes casos podem ocorrer simultaneamente, num trecho de escoamento com superfície livre. Certamente, eles ocorrem ao longo do rio ou durante os ciclos lunares e hidrológicos.

I.4. Migração do Leito do escoamento

O movimento sólido está intimamente relacionado com a migração das configurações de fundo, e ambos resultam do movimento das partículas isoladas do leito do escoamento. Supõe-se que uma partícula tenha se deslocado de sua posição inicial e depositado, no instante t , na posição x . As situações do leito e da partícula, neste momento, estão representadas na **Figura 2.A**, a seguir. O grão imóvel poderá ser coberto (**Figura 2.B**) ou não, por outras partículas de sedimento. Caso o grão permaneça na superfície do leito, ele estará propenso a novo deslocamento. Caso seja enterrado, ele permanecerá em repouso e só irá se deslocar depois de re-exposto, com o afastamento das partículas que o cobriram. Em outras palavras, somente após um certo tempo T , necessário para a migração do leito, poderá ocorrer novo deslocamento da partícula (**Figura 2.C**). A partícula encontrar-se-á novamente na superfície e em condições de se deslocar para uma nova posição $x+X$. A figura ilustra também, a nova situação do leito no instante $t+T$.

De um modo geral, para configurações do leito semelhantes às da **Figura 2**, do tipo dunas e rugas, o grão de sedimento inicia seu movimento na região de inclinação positiva (**trecho AB**) e deposita-se na região de inclinação negativa (**trecho BC**).

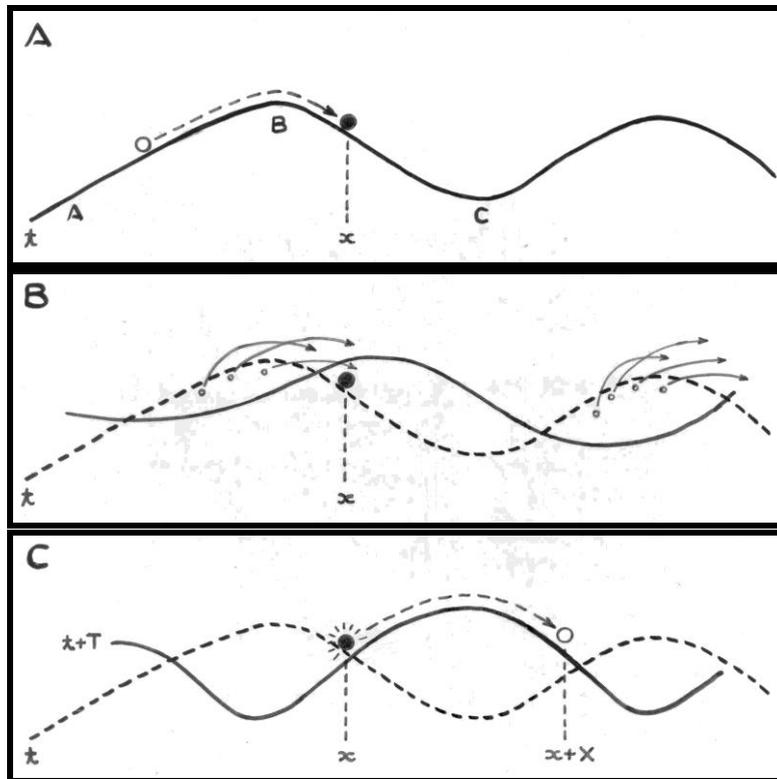


Figura 2. Movimentos do Grão de Sedimento e Migração do Leito (WILSON-JR, 1972,)

O **transporte** dos sedimentos está intimamente relacionado com a migração da configuração do leito, e, ambos resultam do movimento alternado - de deslocamentos e períodos de repouso - das partículas isoladas. Como estas partículas depositam-se em lugares diferentes do leito, os períodos de repouso são também diferentes. Além disto, como os comprimentos dos deslocamentos não são os mesmos, as velocidades de transporte dos grãos são também diferentes. A **dispersão** dos sedimentos deve-se às diferentes velocidade de transporte das partículas isoladas.

I.5. Descrições do Movimento de Sedimentos

Determinações quantitativas do movimento de sedimentos, tão necessárias nos projetos de Engenharia Civil e Ambiental, só poderão ser realizadas com precisão, quando forem baseadas no conhecimento qualitativo do movimento sólido do trecho do escoamento com superfície livre. Para isto, são necessárias medições de campo das características do leito do escoamento, que podem ser realizadas segundo os dois métodos de descrição da Mecânica Clássica: (i) Descrição de Euler ou Euleriana, (ii) Descrição de Lagrange ou Lagrangeana.

No primeiro método, a atenção está voltada para uma seção particular do escoamento e as evoluções temporais das características hidrossedimentológicas são descritas através desta seção. No segundo método, a atenção focaliza-se numa partícula isolada ou grupo de partículas, acompanhando-se suas evoluções espaciais, no tempo.

Como o fundo móvel dos escoamentos com superfície livre reproduz as evoluções temporais e espaciais do movimento de sedimentos, são nas camadas móveis ou ativas dos leitos dos rios que se encontram as maiores informações qualitativas e quantitativas sobre a dinâmica dos processos sedimentológicos e morfológicos vigentes nos corpos d'água.

II. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste artigo é o estudo das evoluções, temporal e longitudinal, das características granulométricas dos sedimentos da camada móvel do leito de escoamentos com superfície livre, durante regimes hidrodinâmicos conhecidos, em ambientes fluvial e estuarino.

Três casos são considerados: (i) Estudo Lagrangeano dos sedimentos dos leitos dos rios da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu, Estado do Rio de Janeiro; (ii) Estudo Euleriano do sedimento do leito do rio Ivai, na seção de Novo Porto Taquara, durante um ciclo hidrológico; e (iii) Estudo Euleriano do sedimento do leito do Rio Iguaçu no trecho estuarino da Avenida Presidente Kennedy, Estado do Rio de Janeiro, durante um ciclo de marés.

III. ESTUDOS DO MOVIMENTO INCIPIENTE DO SEDIMENTO DO LEITO MÓVEL

O final do **Século XX** e início do **Século XXI** foram caracterizados por revisões e aplicações sobre o movimento incipiente de sedimentos em escoamentos com superfície livre. Autores como Chien e Wan (1983); Paphitis (2001); Hager e Oliveto (2002); Cheng (2004); Sheppard e Renna (2005); Wu e Wang (2006); Cao et al. (2006); Van Rijn (2007); Luckner e Zanke (2007); Beheshti e Ataie-Ashtiani (2008), mostraram que: (i) o tema movimento incipiente continua atual; (ii) o Diagrama de Shields (1936) continua sendo a referência universal das pesquisas, e (iii) que métodos alternativos tem sido propostos para o movimento incipiente em leitos naturais não uniformes (SOUZA e WILSON-JR, 2009).

Sendo assim, para a caracterização do movimento de sedimentos, foi considerado neste trabalho, o diagrama clássico de Shields (1936), apresentado na **Figura 3**, a seguir, e outros estudos mais modernos, como o de Paphitis (2001), e Beheshti e Ataie-Ashtiani (2008) (**Figura 4**), os quais foram abordados nas publicações de Souza e Wilson-Jr (2009) e Souza (2010). As condições de mobilidade ou de instabilidade da camada ativa do leito dos escoamentos naturais foram analisadas em função do tempo e da distância longitudinal, utilizando esses diagramas.

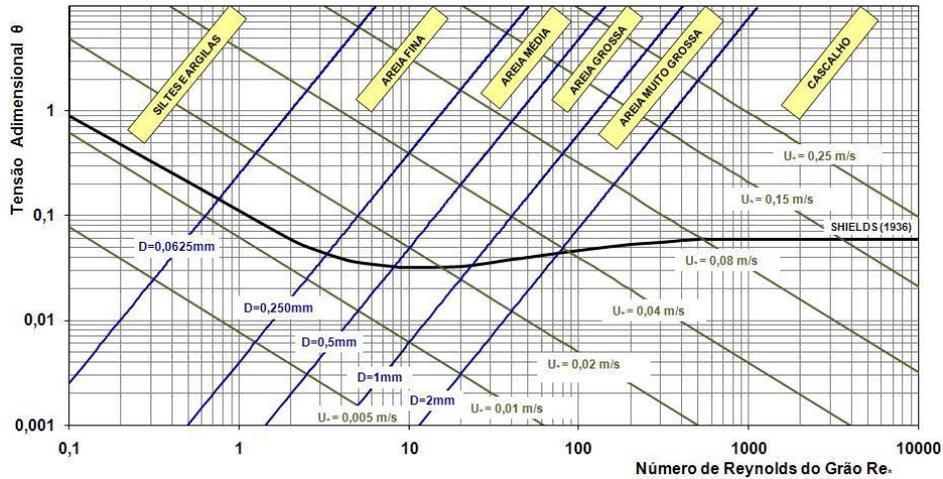


Figura 3. Diagrama de Shields (1936)

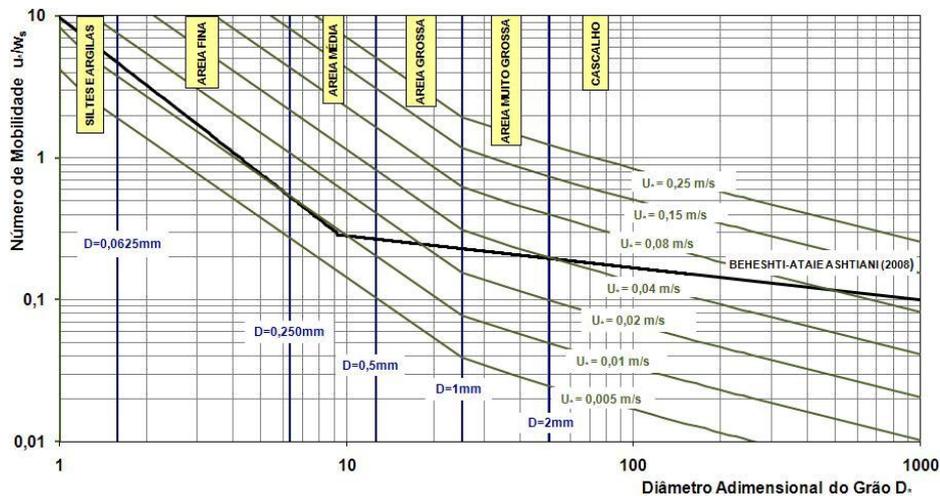


Figura 4. Diagrama de Beheshti e Ataie-Ashtiani (2008)

O Diagrama de Shields pode ser obtido de diferentes desenvolvimentos teóricos, um dos quais foi apresentado em Souza e Wilson-Jr (2009). A curva clássica de Shields resulta do ajuste aos dados disponíveis na época, ou seja, anteriores a 1936, relativos ao início do movimento dos grãos da camada ativa do leito. Foram relacionados os seguintes parâmetros adimensionais:

$$\theta = \frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma)D} \quad (2)$$

$$Re_* = \frac{u_* D}{\nu} \quad (3)$$

O diagrama mostra que a razão adimensional, θ , entre a força hidrodinâmica do escoamento e de resistência do grão submerso, por unidade de área do leito, denominada **tensão normalizada** ou **de atrito adimensional**, não é constante. Ela é função da grandeza adimensional denominada

número de Reynolds do grão, Re_* . Portanto, depende das forças inerciais do escoamento junto a calha do rio, da viscosidade do líquido e do diâmetro característico do sedimento do leito.

A **curva de Shields** representa uma condição de equilíbrio. O **valor crítico θ_c** sobre a curva é o valor a ser superado pelo escoamento para que haja **movimento do grão**. Acima da curva tem-se movimento de sedimentos, abaixo da curva o sedimento encontra-se em repouso.

Como a velocidade de atrito u_* aparece em ambos os eixos do gráfico de Shields, a determinação de seu valor crítico u_{*c} , requer um processo iterativo para a determinação de u_{*c} . Para evitar a iteração, facilitar o tratamento numérico computacional, e, principalmente, para a interpretação dos resultados, alguns autores propuseram parâmetros alternativos aos de Shields.

Surgiram os parâmetros: **diâmetro adimensional do grão, D_*** , definido pela **Equação (4)** e o **número de mobilidade do grão, u_*/w_s** , onde w_s é a sua **velocidade de queda**.

$$D_* = \left[\frac{Re_*^2}{\theta_c} \right]^{1/3} = \left[\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho v^2} \right]^{1/3} D \quad (4)$$

D , ρ_s , ρ , v e u_* representam, respectivamente, um diâmetro característico do leito do escoamento, as massas específicas do sedimento e da água, a viscosidade do líquido e a velocidade crítica do escoamento junto ao fundo.

Várias combinações entre estes parâmetros adimensionais são possíveis. Assim, novas curvas críticas foram ajustadas a conjuntos maiores e mais recentes de dados, a exemplo da curva de Beheshti e Ataie-Ashtiani (2008), apresentada na **Figura 4**, anterior.

IV. APLICAÇÕES

Três casos de estudos da camada móvel do leito de escoamentos com superfície livre foram considerados (Souza e Wilson-Jr, 2009; Souza, 2010). Dois deles se referem ao leito do Rio Iguaçu, no Estado do Rio de Janeiro e o outro ao leito do Rio Ivai, no Estado do Paraná.

IV.1. Sedimentos dos Leitoss dos Rios da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu.

Trata-se de um estudo Lagrangeano das características dos sedimentos dos leitoss dos contribuintes da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu, efetuado num período de águas baixas, de abril a julho de 1994. Este estudo fez parte do diagnóstico hidrossedimentológico da bacia, apresentado em Wilson-Jr, (1996, 1997), e resumidamente, em Souza e Wilson-Jr, (2009) e Souza (2010).

O Rio Iguaçu, cuja bacia hidrográfica (**Figura 5**) situa-se no Estado do Rio de Janeiro, possui um comprimento de 40,4 km e drena uma superfície de 726 km², a qual abrange regiões urbanas e rurais, e ambientes fluviais e estuarinos. O Rio Iguaçu sofre interferências naturais e antrópicas. As

naturais ocorrem no encontro das águas com seus afluentes, devido às características hidrossedimentológicas distintas dos dois escoamentos, enquanto os problemas relacionados com as interferências antrópicas são diversos e distribuídos na bacia, devidos principalmente: (i) à extração intensiva de material sólido para a construção civil, que é uma prática clandestina de subsistência na região; (ii) ao lançamento de esgotos *in-natura* nos cursos d'água; e (iii) aos depósitos de resíduos sólidos urbanos nas calhas e margens dos escoamentos.

O resultado destas interferências, são leitos compostos de material de granulometria variada, cujos movimentos dependem do estado de gradação e ocupação da região próxima da seção transversal amostrada. Em vista disto, os perfis granulométricos longitudinais dos escoamentos da bacia do Rio Iguaçu (Wilson-Jr, 1996, 1997) apresentaram um comportamento geral esperado, no qual os valores do **Diâmetro Mediano D₅₀** decrescem de montante para jusante (**Figura 6**), mas com variações consideráveis nos locais das interferências. Também, nesses locais, os sedimentos de fundo apresentaram distribuições granulométricas não uniformes, e, portanto, maiores valores do **Coefficiente de Gradação, σ₁**, definido pela **Equação 5**:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right\} \quad (5)$$

onde **D_i** (**i = 16, 50 e 84**) corresponde ao diâmetro do grão de sedimento de porcentagem **i** na curva granulométrica acumulada do material da camada ativa do leito.

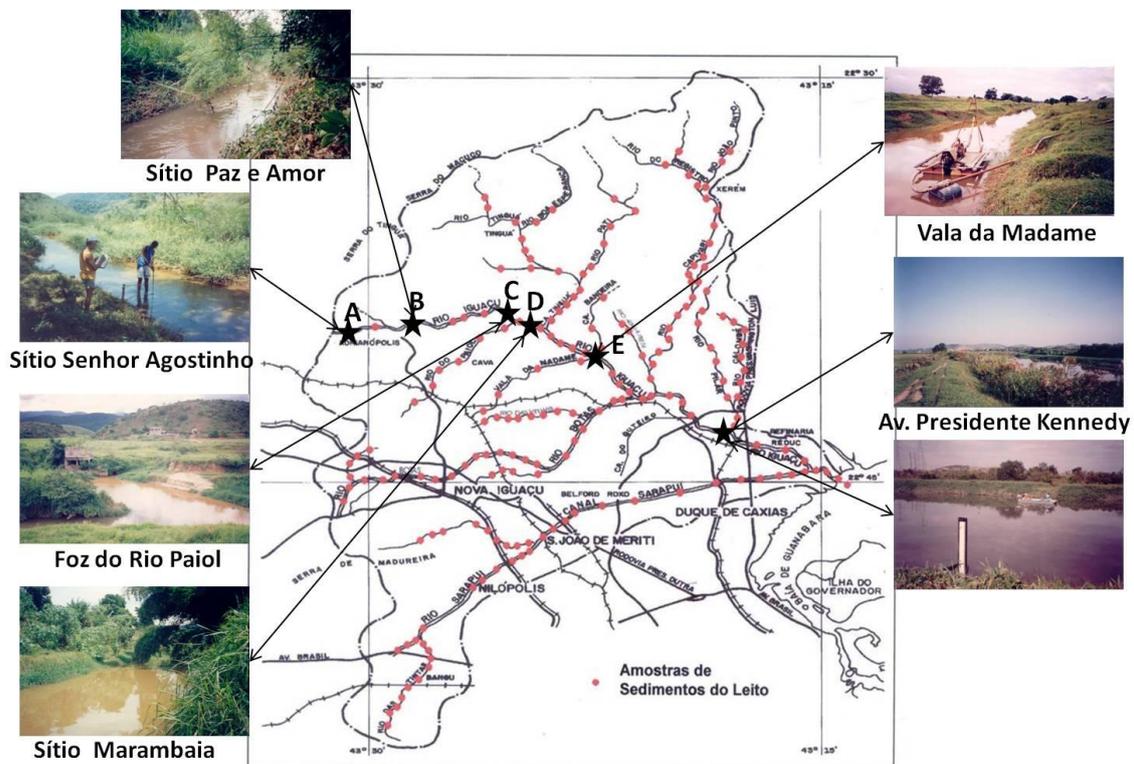


Figura 5. Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu (Wilson-Jr, 1996)

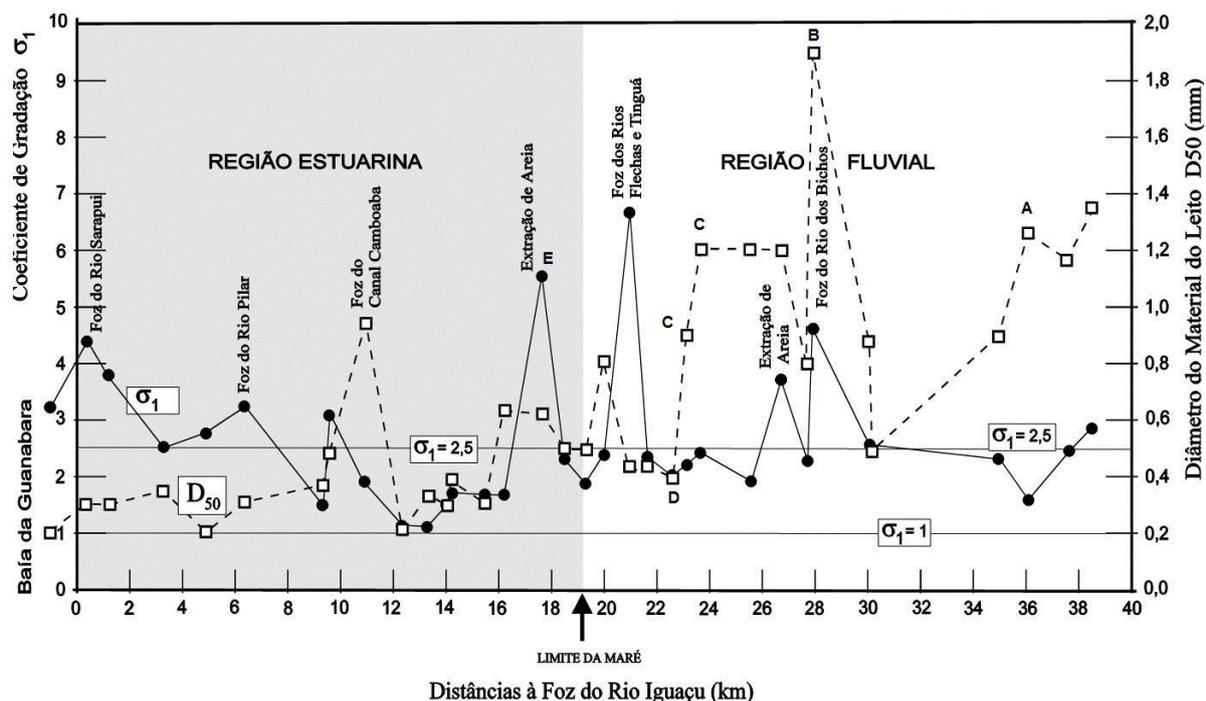


Figura 6. Perfis Longitudinais Granulométrico e de Gradação do Rio Iguaçú, RJ (Wilson-Jr, 1996)

Nas **Figuras 7 e 8**, a seguir, estão apresentados os resultados dos valores da tensão tangencial adimensional θ , obtidos em cinco estações localizadas nos cursos superior e médio do Rio Iguaçú, em função do número de Reynolds Re_* e do diâmetro adimensional do grão, D_* , respectivamente. Estas estações foram mostradas na **Figura 5** e se denominam: (A) Sítio Senhor Agostinho, (B) Sítio Paz e Amor, (C) Foz do Rio Paiol, (D) Sítio Marambaia, (E) Montante da Vala da Madame. As coletas de sedimentos nestas estações foram realizadas num período de uma semana, de modo que os levantamentos podem ser considerados Lagrangeanos e relativos ao mesmo tempo, pois neste período não se constatou mudanças sedimentológicas e morfológicas significativas no leito do Rio Iguaçú. Essas cinco estações também estão destacadas na **Figura 6**.

A **Figura 9** mostra o gráfico do número de mobilidade u_*'/w_s em função do número adimensional do grão, D_* . Os símbolos nas curvas contínuas de cada estação das **Figuras 7, 8 e 9**, correspondem aos diâmetros característicos do material do leito, ou seja, a D_{90} , D_{84} , D_{65} , D_{60} , D_{50} , D_{35} , D_{16} e D_{10} . Desta forma, pode-se: (i) conhecer, em cada estação, as porcentagens e os diâmetros dos sedimentos que estão se movimentando, e (ii) comparar os movimentos de sedimentos de mesmo diâmetro ao longo do escoamento.

Estudos semelhantes aos apresentados nas **Figuras 5 a 9** foram realizados, na mesma época, nos principais afluentes do Rio Iguaçú, ou seja, nos Rios Sarapuí, Pilar, Capivari, Botas, Paiol e Tinguá. Perfis longitudinais posteriores poderão mostrar as evoluções das interferências constatadas nesses escoamentos. É de se esperar que os picos relativos às interferências naturais persistam com

o tempo, enquanto que a evolução dos picos das interferências antrópicas poderá mostrar uma atenuação, caso a bacia hidrográfica seja restaurada, ou um aumento, caso as ações nocivas ao meio ambiente continuem. Mas, novos picos antrópicos poderão surgir no espectro longitudinal do rio.

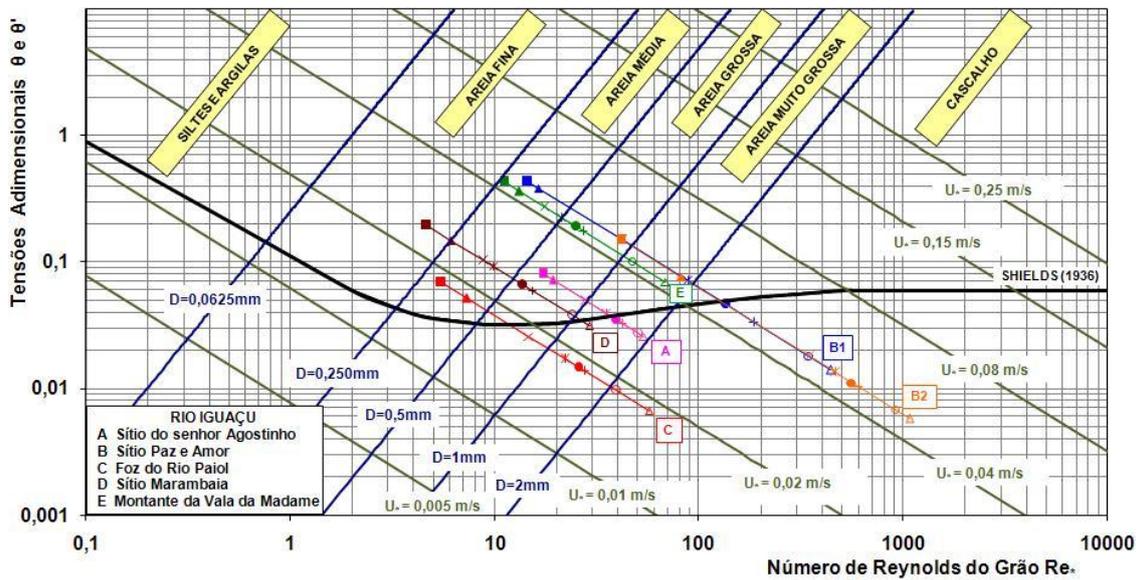


Figura 7. Tensão Tangencial Adimensional θ , em Função do Número de Reynolds do Grão Re_* , ao Longo do Rio Iguaçu, RJ (Souza e Wilson-Jr, 2009; Souza, 2010)

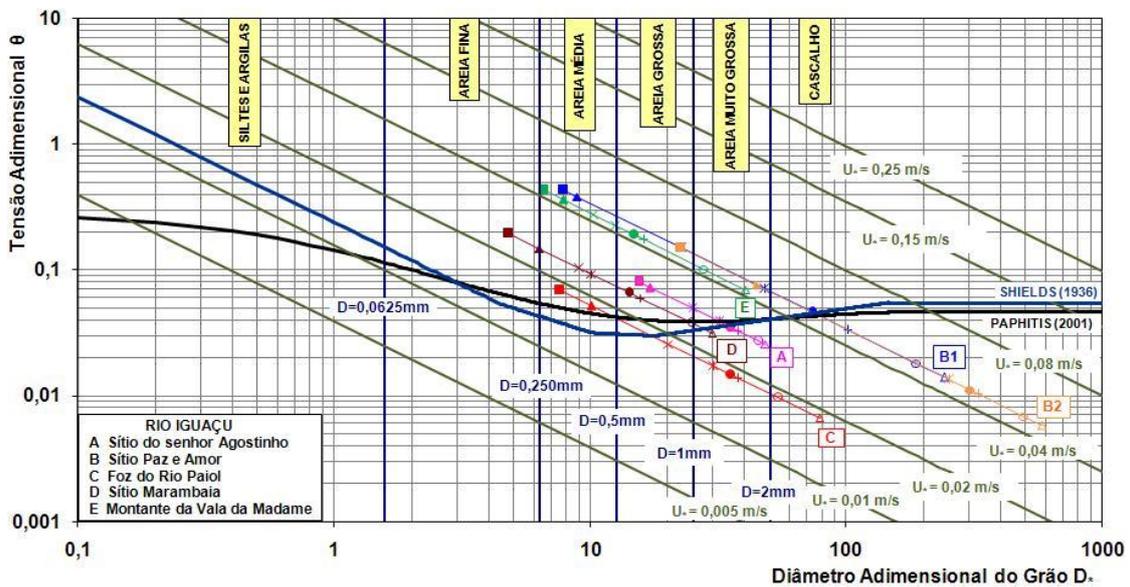


Figura 8. Tensão tangencial adimensional θ , em função do Diâmetro Adimensional do Grão D_* , ao longo do Rio Iguaçu, RJ (Souza e Wilson-Jr, 2009; Souza, 2010)

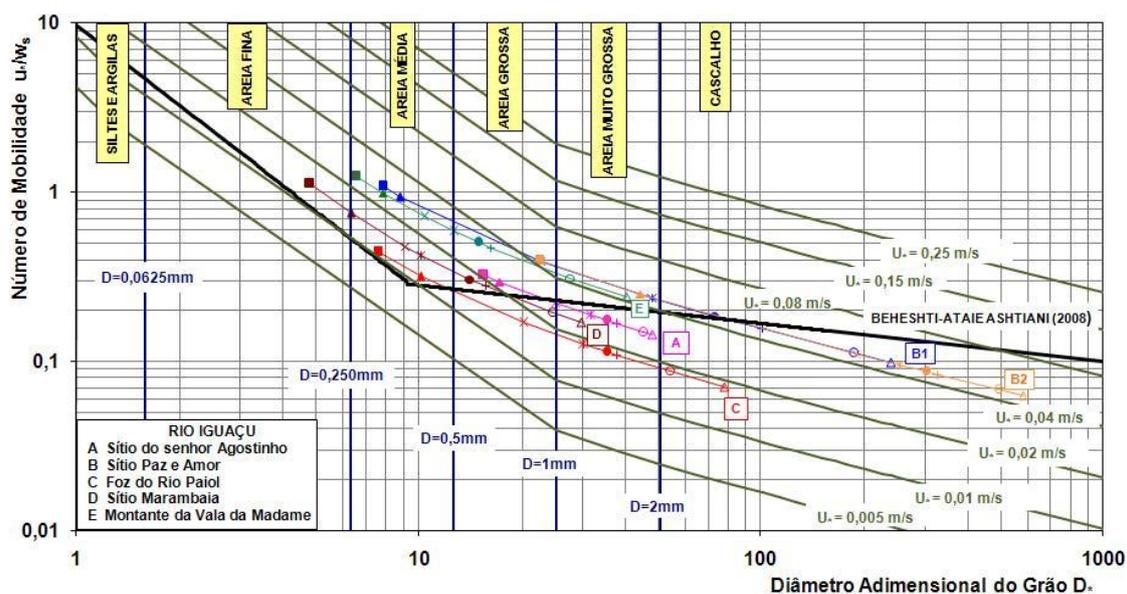


Figura 9. Número de Mobilidade u^*/w_s , em função do Diâmetro Adimensional do Grão D^* , ao longo do Rio Iguaçu, RJ (Souza e Wilson-Jr, 2009; Souza, 2010)

IV.2. Sedimentos do Leito do Rio Ivai, no Trecho de Novo Taquara, Estado do Paraná

Este estudo constou da **análise temporal**, num trecho do Rio Ivai no Noroeste do Estado do Paraná, conhecido como Novo Porto Taquara, durante o ciclo hidrológico de 1974-1975, do comportamento dos sedimentos do leito móvel. Nesta época, a região Noroeste do Paraná sofreu um intenso processo erosivo, com parte significativa da produção de sedimentos sendo carregada pelo Rio Ivai até o Rio Paraná. Devido à grande alimentação sólida vinda da bacia hidrográfica, houve acúmulo de material no fundo do rio, com formação de dunas, rugas e depósitos de areias de granulometrias média e fina (Wilson-Jr et al., 1980).

Durante os períodos de menor velocidade, o excesso de material sólido se depositou no fundo do escoamento, alimentando as rugas e dunas. Dois conjuntos de curvas foram então considerados: o primeiro, formado pelas curvas de diâmetro D_{35} , D_{50} e D_{65} , onde as perdas de energia devido às formas de fundo não foram consideradas; e o segundo conjunto, formado unicamente pela curva de D_{65} , para a qual foram considerados os valores reduzidos das tensões hidrodinâmicas responsáveis pelo movimento dos sedimentos.

Nas **Figuras 10 e 11**, a seguir, apresentam-se os resultados dos valores das tensões tangenciais adimensionais, θ e θ' , total e reduzida, em função do número de Reynolds do grão, Re^* e do diâmetro adimensional do grão, D^* , respectivamente. A **Figura 12** seguinte mostra o gráfico dos números de mobilidade, **normal e reduzido**, u^*/w_s e u'^*/w_s , em função de D^* .

As **Figuras 10, 11 e 12** mostram que os sedimentos do Rio Ivai, no trecho de Novo Porto Taquara, eram arenosos e móveis. Com o acúmulo de material no fundo do rio, devido à grande alimentação sólida vinda da bacia hidrográfica, formaram-se rugas e dunas, que dissiparam parte da energia do escoamento, com geração de calor e turbulência. Desta forma, com a diminuição do transporte sólido durante os períodos de menor velocidade, uma pequena fração do material, mesmo composta de areias, média e fina, depositou-se e formou o novo leito móvel do Rio Ivai.

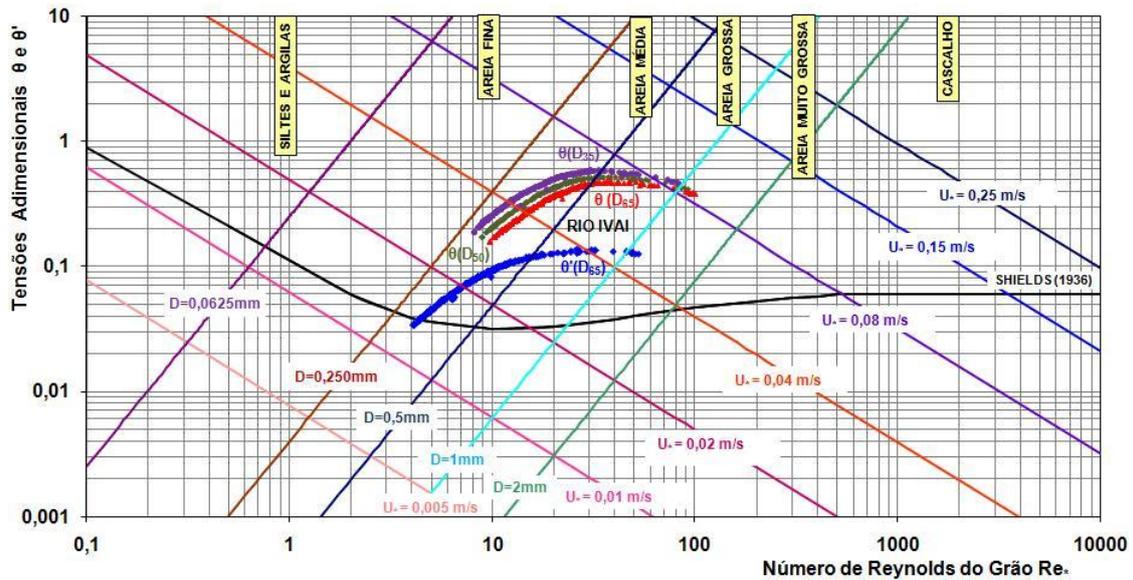


Figura 10. Tensões Tangenciais Adimensionais θ e θ' em Função do Número de Reynolds do Grão Re_* . Rio Ivai, Novo Porto Taquara. PR. (Souza e Wilson-Jr, 2009; Souza, 2010)

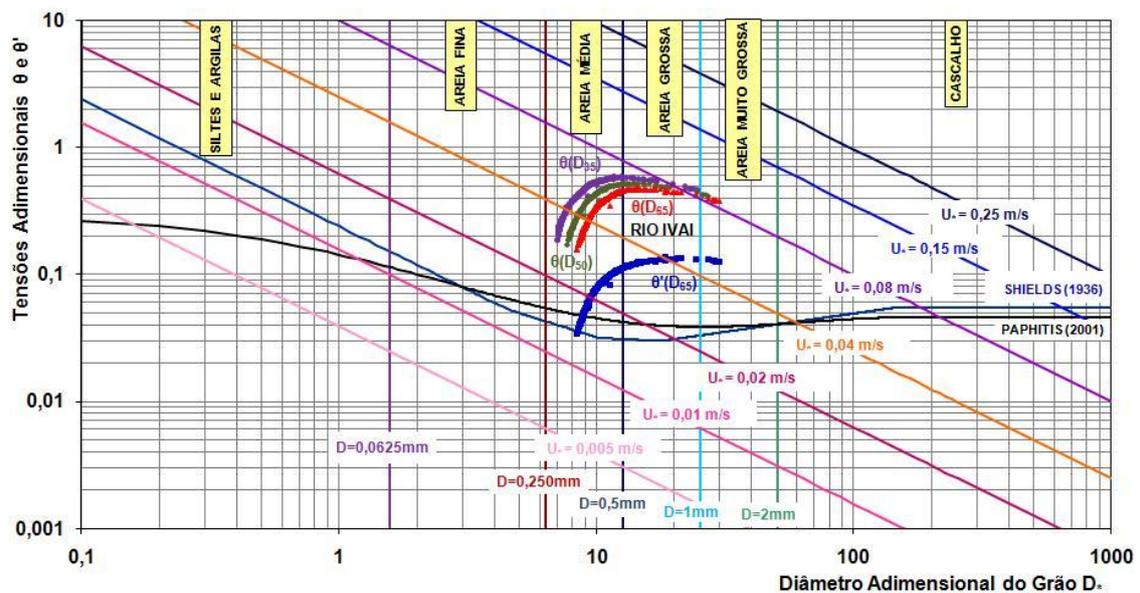


Figura 11. Tensões Tangenciais Adimensionais θ e θ' em Função do Diâmetro Adimensional do Grão D_* . Rio Ivai, Novo Porto Taquara. PR. (Souza e Wilson-Jr, 2009; Souza, 2010)

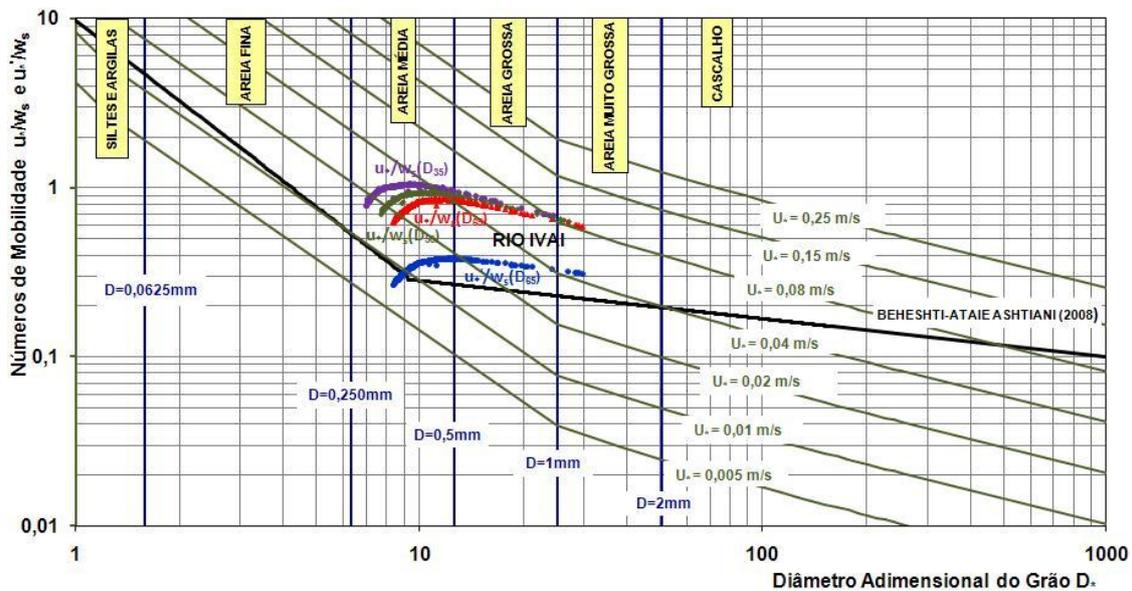


Figura 12. Números de Mobilidade Totais e Reduzidos u^*/w_s e u'^*/w_s em Função do Diâmetro Adimensional do Grão D^* . Rio Ivaí, Novo Porto Taquara. PR. (Souza e Wilson-Jr, 2009; Souza, 2010)

IV.3. Sedimentos do Leito numa Seção Estuarina do Rio Iguaçu Durante um Ciclo de Marés

Trata-se de um estudo Euleriano das características dos sedimentos do leito de uma seção transversal do Rio Iguaçu, situada nas proximidades da Avenida Presidente Kennedy, como mostrado na **Figura 5**, precedente. Analogamente ao caso do Rio Ivaí, os dados do Rio Iguaçu foram plotados nos diagramas de Shields (1936), Van Rijn (1984), Paphitis (2001) e Beheshti e Ataie-Ashtiani (2008), para caracterizar o movimento incipiente dos sedimentos.



Figura 13. Seção de Medidas no Estuário do Rio Iguaçu, próxima à Avenida Presidente Kennedy (Garcia e Wilson-Jr, 2002)

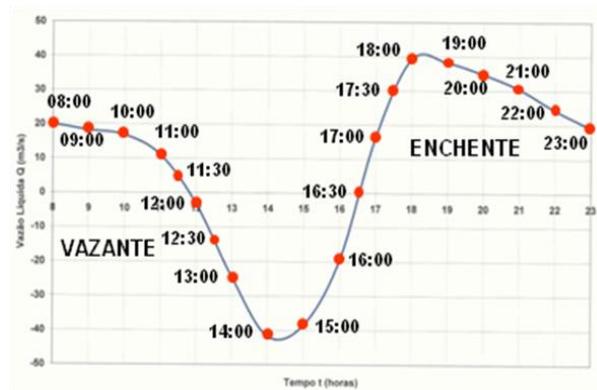


Figura 14. Variação do Nível d'Água durante as medições Hidrossedimentométricas (Garcia e Wilson-Jr, 2002)

A região estuarina da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu possui uma área de 141 km², correspondente a 20% da área de drenagem total. O trecho estuarino estudado situa-se a 12 km da Baía de Guanabara, a montante da avenida Presidente Kennedy. Os valores horários das variáveis

hidrossedimentológicas obtidos durante o período de 08:00 às 23:00 horas do dia 08/07/1994, na vertical central da seção de medidas, estão apresentadas na **Tabela 1**, a seguir.

Tabela 1. Variáveis Hidrossedimentológicas da Vertical do Centro da Seção de Medidas do Estuário do Rio Iguaçu (Wilson-Jr, 1996)

T horas	D ₁₀ mm	D ₁₆ mm	D ₃₅ mm	D ₅₀ mm	D ₆₀ mm	D ₆₅ mm	D ₈₄ mm	D ₉₀ mm	L m	H m	S cm/km	u* (m/s)	t (t/m ²)	u _{0,2} (m/s)	u _{0,8} (m/s)	u _m (m/s)
8	0,16	0,175	0,24	0,3	0,305	0,32	0,36	0,38	28,24	3,10	2,14	0,0309	9,73E-05	0,275	0,345	0,31
9	0,17	0,19	0,26	0,31	0,32	0,34	0,38	0,39	28,04	2,99	-0,1	0,0279	7,93E-05	0,245	0,31	0,278
10	0,178	0,2	0,285	0,32	0,34	0,35	0,39	0,41	27,75	2,89	0,82	0,0254	6,58E-05	0,22	0,27	0,245
11	0,182	0,22	0,315	0,343	0,362	0,372	0,413	0,505	27,61	2,86	-0,72	0,0199	4,04E-05	0,17	0,19	0,18
12	0,173	0,2	0,273	0,302	0,33	0,34	0,385	0,462	28,24	3,02	-4,45	0,0042	1,80E-06	0,03	-0,13	-0,05
13	0,16	0,173	0,216	0,245	0,283	0,298	0,358	0,38	29,18	3,28	-4,24	-0,036	1,32E-04	-0,325	-0,435	-0,38
14	0,155	0,16	0,185	0,205	0,233	0,24	0,29	0,317	29,98	3,68	-2,8	-0,0405	1,67E-04	-0,39	-0,555	-0,473
15	0,16	0,173	0,22	0,258	0,292	0,305	0,388	0,43	30,44	3,93	-0,31	-0,0387	1,53E-04	-0,355	-0,5	-0,428
16	0,208	0,255	0,4	0,565	0,7	0,77	1,21	1,36	30,68	4,11	-0,31	-0,0357	1,30E-04	-0,25	-0,2	-0,225
17	0,207	0,28	0,462	0,68	0,85	0,945	1,53	1,72	30,7	4,00	-2,17	0,0075	5,73E-06	0,05	0,34	0,195
18	0,102	0,165	0,225	0,292	0,34	0,375	0,53	0,58	30,19	3,86	1,71	0,0375	1,43E-04	0,325	0,535	0,43
19	0,095	0,138	0,159	0,195	0,202	0,208	0,24	0,253	29,72	3,63	-0,31	0,0395	1,59E-04	0,395	0,52	0,458
20	0,158	0,165	0,205	0,285	0,312	0,322	0,385	0,418	29,86	3,52	1,24	0,0421	1,81E-04	0,37	0,48	0,425
21	0,165	0,172	0,218	0,282	0,318	0,328	0,398	0,425	29,11	3,44	-0,31	0,0355	1,28E-04	0,315	0,435	0,375
22	0,158	0,17	0,218	0,26	0,29	0,305	0,375	0,395	28,69	3,24	2,91	0,029	8,57E-05	0,265	0,325	0,295
23	0,145	0,15	0,2	0,23	0,265	0,28	0,35	0,37	28,34	3,06	-4,04	0,0224	5,11E-05	0,21	0,16	0,185

Os resultados granulométricos obtidos durante o período foram plotados nos diagramas de Shields (1936), Paphitis (2001), Beheshti e Ataie-Ashtiani (2008) e Van Rijn (1984). Como exemplo, estão apresentados nas **Figuras 15 a 17** os resultados relativos ao diagrama de Shields, e, nas **Figuras 18 a 20**, os do diagrama de Beheshti e Ataie-Ashtiani.

Observam-se nestas figuras que durante os períodos de inversão de maré houve grande deposição de sedimentos, os quais foram recolocados em movimento nos períodos de 10:00 às 11:00 horas, de 15:00 às 16:30 e de 19:00 às 23:00 horas. Devido a inversão de maré de vazante para enchente, a partir das 12:00 horas, e de enchente para vazante a partir das 16:45, houve redução da concentração de sedimentos em suspensão, os quais se depositaram sobre o leito (Sousa, 2010).

O Critério de Shields (1936) aplicado a estes dados representou bem a dinâmica sedimentar estuarina, como mostrado nas **Figuras 15 a 17**. Os sedimentos que estavam em movimento desde 08:00 horas, começaram a se depositar no leito a partir de 11:30, de modo que às 12:00 horas, praticamente não se tinha sedimentos em movimento sobre o leito (**Figura 15**). Às 12:30, já com o aumento das forças hidrodinâmicas de enchente, a camada de sedimentos do tipo areia fina e média, voltou se mover.

Das 13:00 às 16:00 horas, de acordo com a **Figura 16**, os sedimentos do leito ainda permaneceram em movimento. Eles começaram a se decantar por volta das 16:30, quando apenas 35% dos sedimentos ainda se movimentavam. Às 17:00 não houve registro do movimento de sedimentos, mas às 17:30 constatou-se que todo o material da camada móvel do leito podia se movimentar, situação que se prolongou até as 23:00 horas, como se pode ver na **Figura 17**.

Durante o período de 13:00 às 17:00 horas (**Figura 16**), os sedimentos do leito apresentaram uma granulometria mais elevada em movimento, do tipo areia grossa e muito grossa. Com a redução das forças hidrodinâmicas, estes sedimentos mais graúdos imobilizaram-se sobre o leito e foram cobertos pelos sedimentos mais finos (**Figura 17**).

Considerando-se o **Número de Mobilidade** do grão em função do Diâmetro Adimensional, segundo Beheshti e Atai-Ashtiani (2008), foram obtidos resultados semelhantes aos de Shields (1936), Van Rijn (1984) e Paphitis (2001), conforme apresentado nas **Figuras 18 a 20**, a seguir.

Em todos estes diagramas contatou-se que as vazões durante as marés de enchente foram capazes de movimentar os grãos de sedimento mais graúdos, com aumento da concentração de sedimentos finos em suspensão liberados do leito. Durante o período de vazante, as forças hidrodinâmicas somente conseguiram vencer as resistências das areias fina e média.

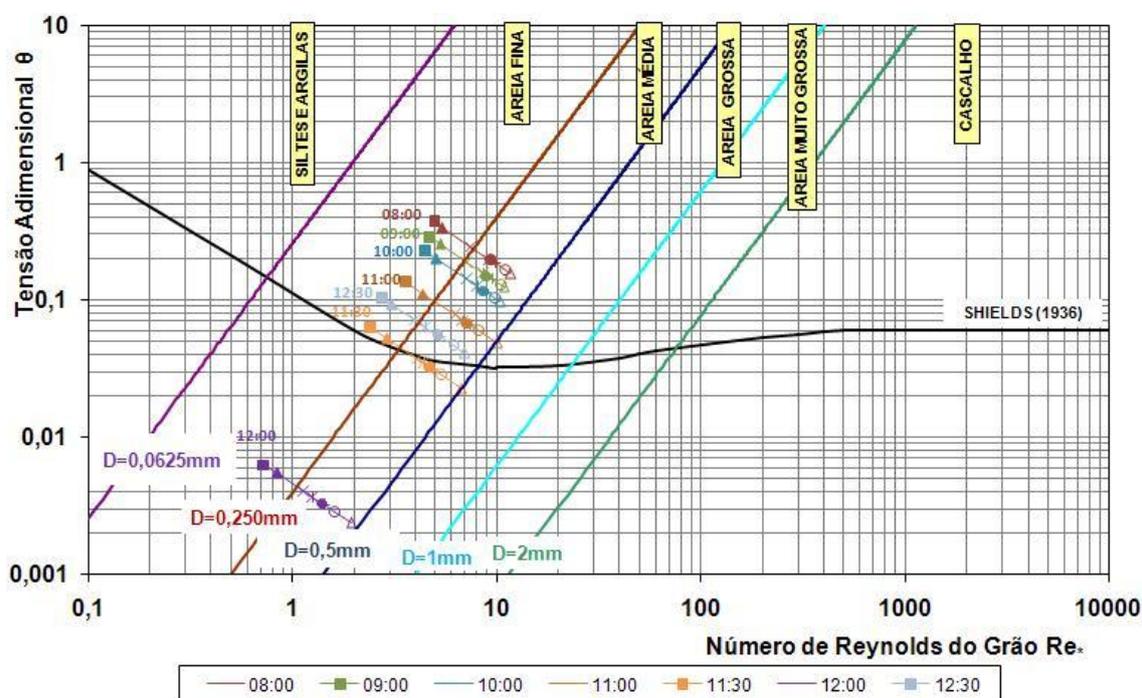


Figura 15. Tensão Tangencial Adimensional θ , em Função do Número de Reynolds do Grão Re_* Durante o Período de 08:00 às 12:30, na Vertical Central da Seção Estuarina (Souza, 2010).

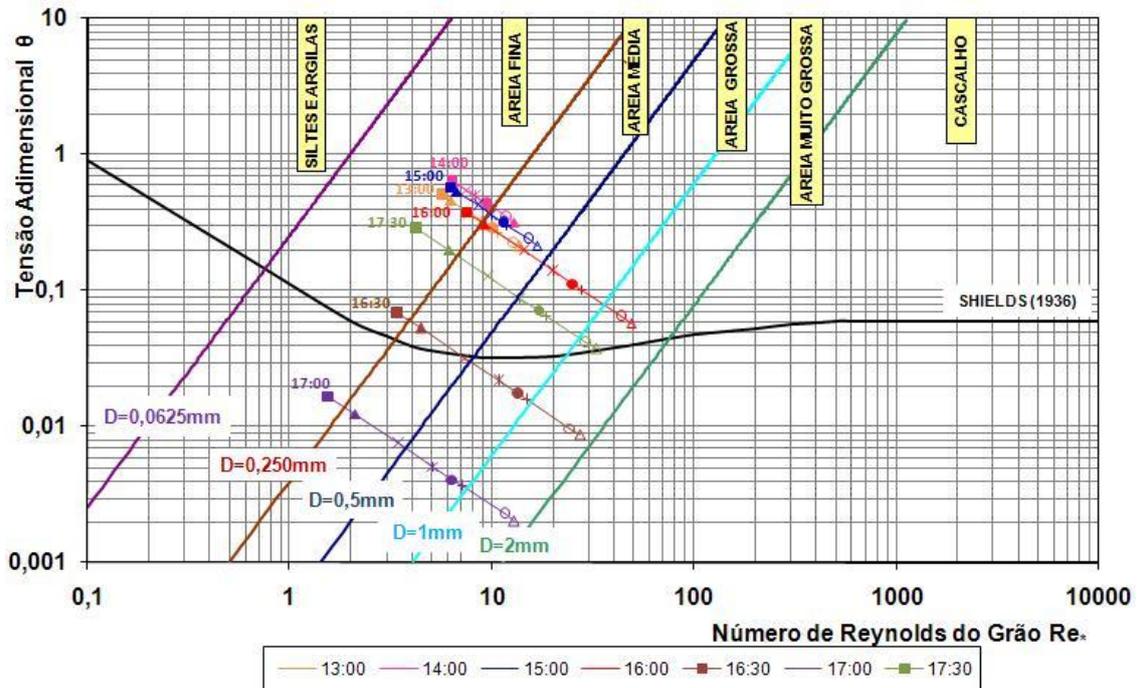


Figura 16. Tensão Tangencial Adimensional θ , em Função do Número de Reynolds do Grão Re_* Durante o Período de 13:00 às 17:30, na Vertical Central da Seção Estuarina (Souza, 2010).

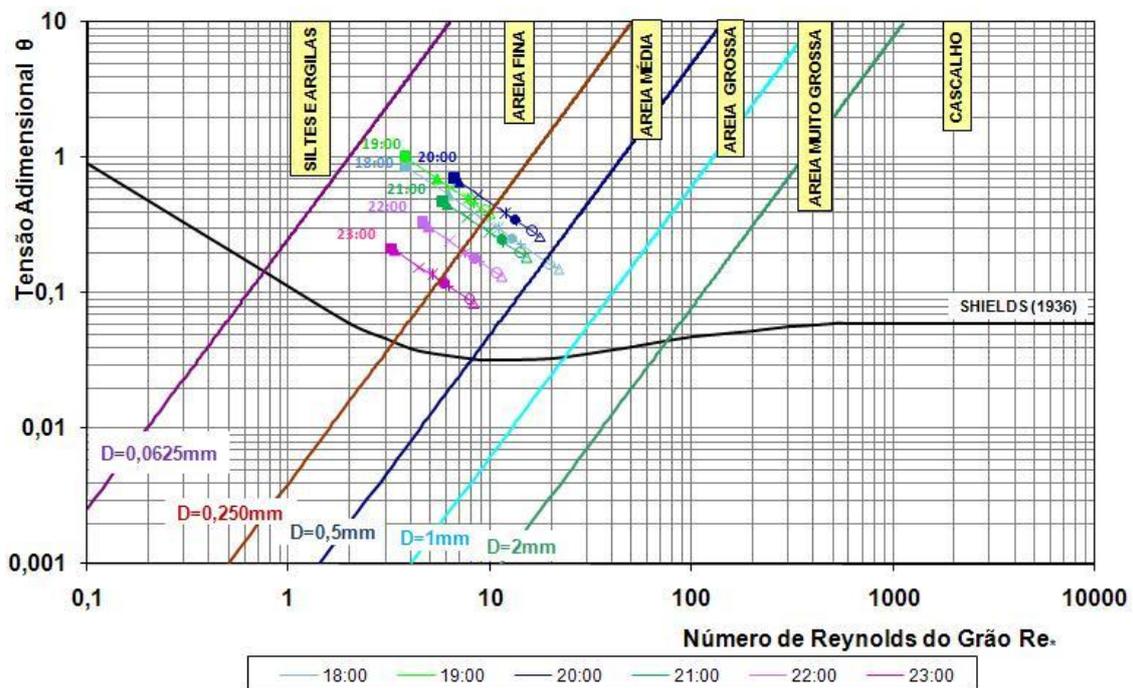


Figura 17. Tensão Tangencial Adimensional θ , em Função do Número de Reynolds do Grão Re_* Durante o Período de 18:00 às 23:00, na Vertical Central da Seção Estuarina (Souza, 2010).

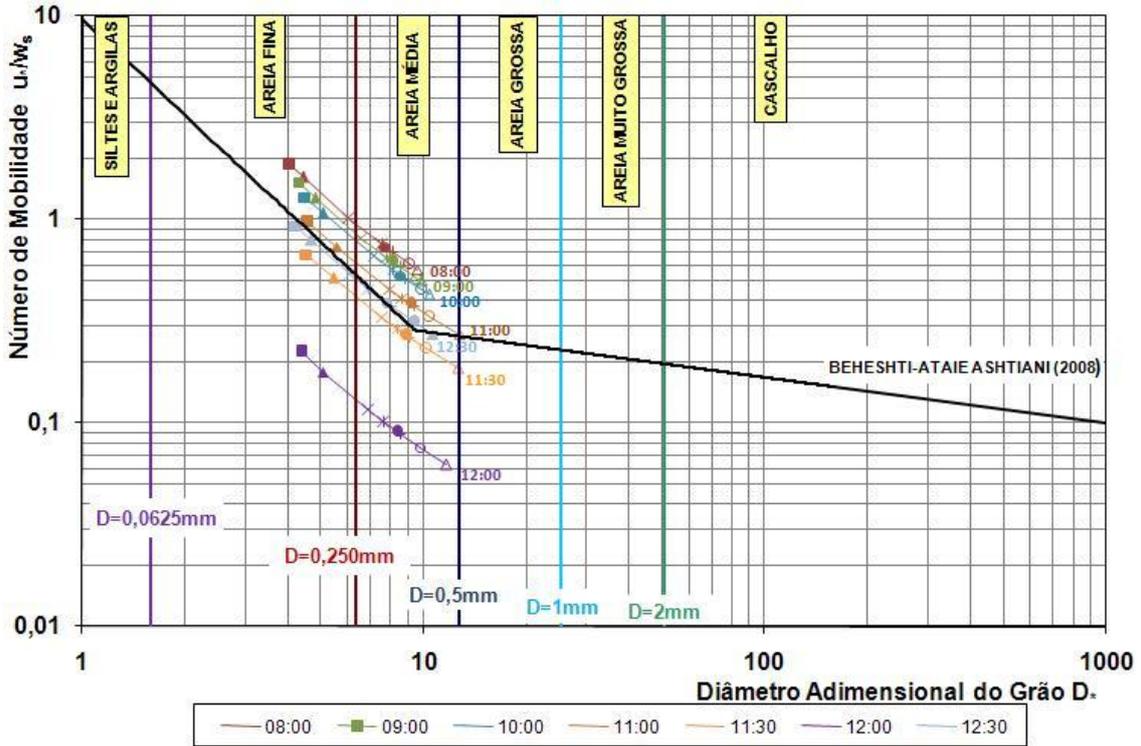


Figura 18. Número de Mobilidade u_*/w_s em Função do Diâmetro Adimensional D_* . Período 08:00 – 12:30 horas. Vertical Central. (Souza, 2010)

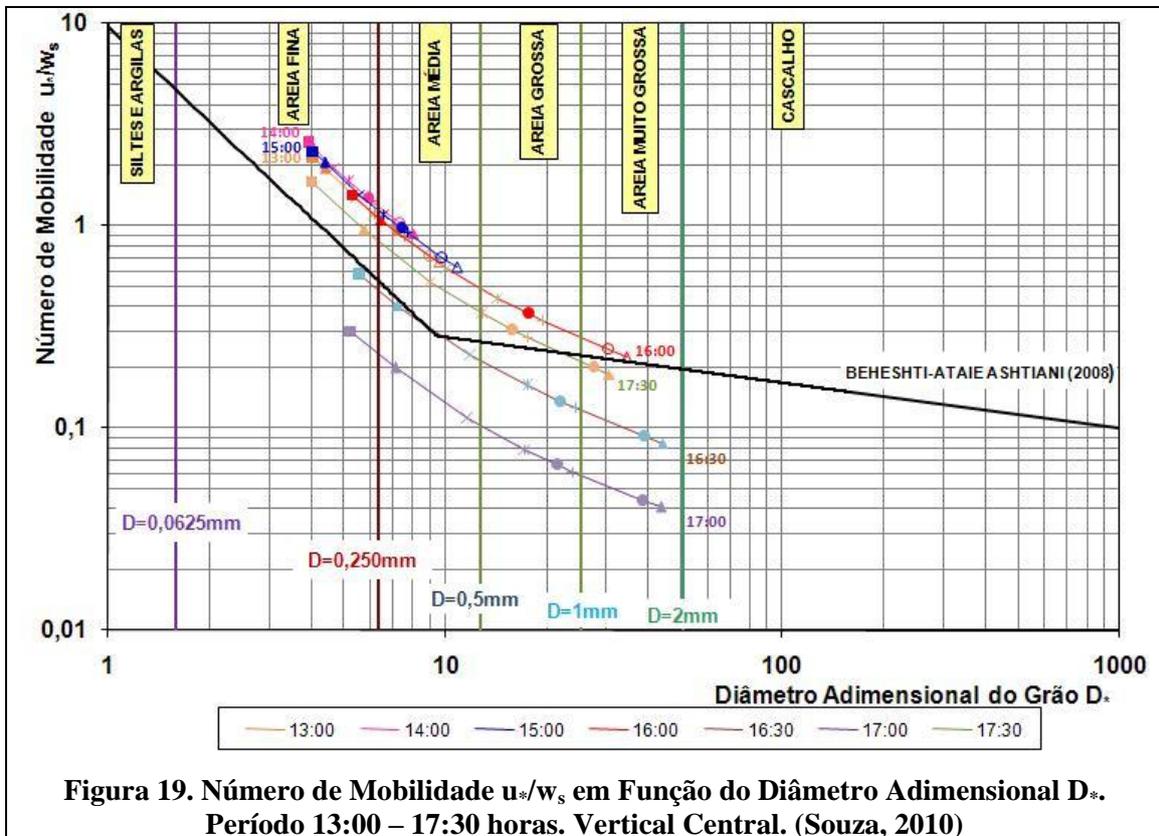
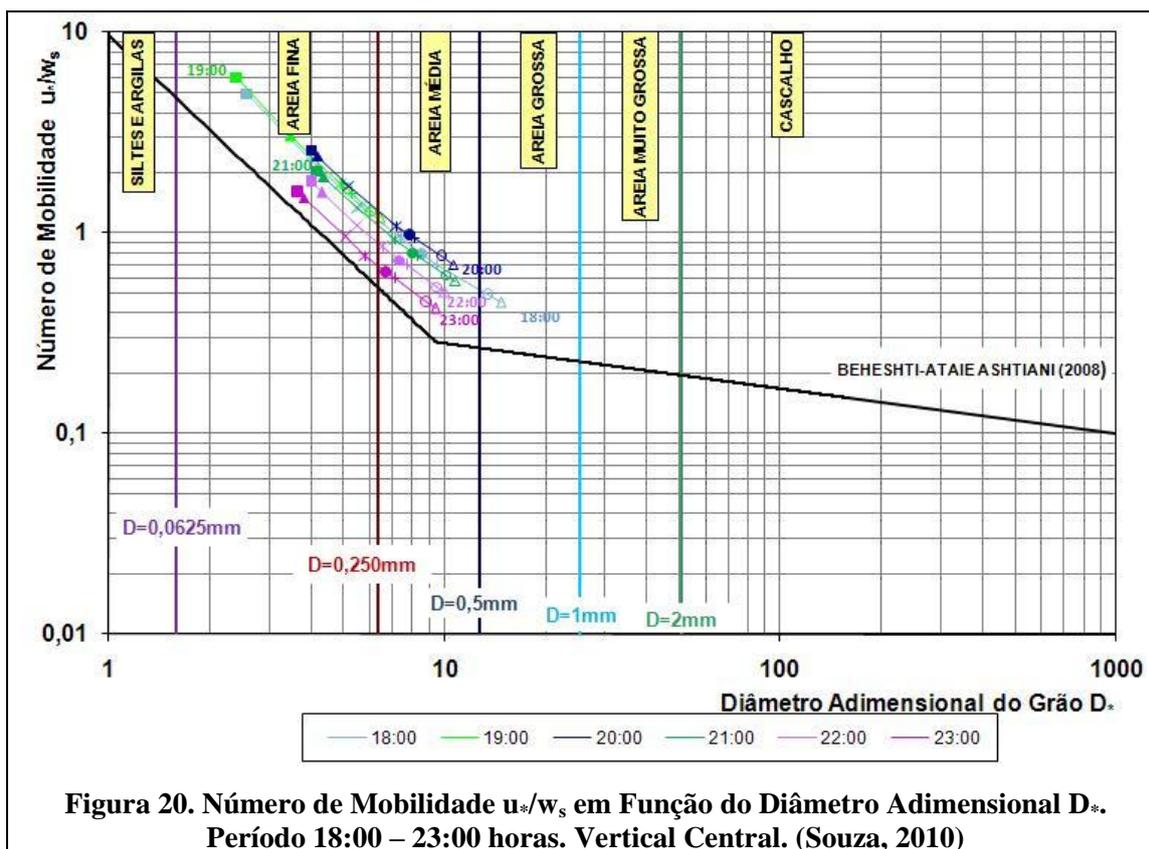


Figura 19. Número de Mobilidade u_*/w_s em Função do Diâmetro Adimensional D_* . Período 13:00 – 17:30 horas. Vertical Central. (Souza, 2010)



V. CONCLUSÕES

A camada móvel ou ativa dos leitos dos escoamentos com superfície livre tem várias funções nos processos sedimentológico e morfológico. Ela pode ser fonte ou origem do movimento de sedimentos, couraça protetora dos sedimentos finos do leito, escultura do escoamento hidrodinâmico, barreira refletora dos sedimentos em suspensão, barreira absorvedora desses sedimentos quando originários dos trechos a montante ou da bacia hidrográfica, enfim, também região de deposição ou etapa final desses processos. A camada chama-se móvel, porque é a representação morfodinâmica do movimento de sedimentos, sendo simultaneamente, processo, pois evolui no tempo e no espaço, e sua condição inicial e/ou de contorno.

Trata-se, portanto, da região a ser conhecida para a descrição qualitativa do movimento de sedimentos, etapa sem a qual não se pode quantificar com precisão o movimento sólido.

Neste trabalho, através da análise de três casos práticos, mostrou-se a importância do acompanhamento Euleriano e Lagrangeano das características granulométricas do leito de escoamentos fluvial e estuarino. Detalhes específicos destes casos podem ser vistos em Souza (2010), Garcia e Wilson-Jr (2002) e em Wilson-Jr et al. (1980). Conclui-se que a história do movimento sólido nos escoamentos com superfície livre encontra-se descrita na camada móvel do

leito, a qual, pode ser analisada através de amostragens e análises temporais e espaciais, não onerosas, dos sedimentos de fundo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, à CAPES e ao CNPq, pelos suportes técnicos e financeiros, fundamentais para a concretização deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

a) Livro

SOUZA, A.L.R. (2010). *Estudo do Movimento Incipiente de Sedimentos Não-Coesivos em Escoamentos com Superfície Livre*. Tese de M. Sc. em Engenharia Oceânica. COPPE/UFRJ, 158 p. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

WILSON-JR, G. (1972). *Transporte e Dispersão de Areia em Canais de Laboratório*. Tese de M. Sc. em Ciências e Técnicas Nucleares. Volumes I e II. 235 p. il. UFMG, Belo Horizonte, MG.

c) Artigo em revista

BEHESHTI A.A.; ATAIE-ASHTIANI B. (2008). "Analysis of threshold and incipient conditions for sediment movement". *Coastal Engineering* 55 (2008) 423-430.

CAO, Z.; PENDER, G.; MENG, J. (2006). "Explicit Formulation of the Shields Diagram for Incipient Motion of Sediment". *J. Hydraulics Eng.* 132 (10), 1097-1099.

HAGER, W.H.; OLIVETO, G. (2002). "Shields' Entrainment Criterion in Bridge Hydraulics". *J. Hydraulics Eng.* 128(5), 538-542

LUCKNER, T.; ZANKE, V. (2007). "An analytical solution for calculating the initiation of sediment motion". *International Journal of Sediment Research*, Vol. 22, nº 22, pp.87-102.

PAPHITIS, D. (2001). "Sediment movement under unidirectional flows: an assessment of empirical threshold curves". *Coastal Engineering* 43 (2001), 227-245.

SHEPPARD, D.M.; RENNA, R. (2005). "Florida Bridge Scour Manual". Florida Department of Transportation, 605 Suwannee Street, Tallahassee, FL 32399-0450.

d) Artigo em anais de congresso ou simpósio

GARCIA, R.S.; WILSON-JR (2002) "Medições Hidrodinâmicas e Sedimentológicas Realizadas no Estuário do Rio Iguaçu, Rio de Janeiro", V ENES, 20 p., São Paulo, SP.

SOUZA, A.L.R.; WILSON-JR (2009) "Movimento Incipiente de Sedimentos Não-Coesivos em Escoamentos com Superfície Livre". XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Campo Grande, MS. Nov. 2009, 20 p.

WILSON-JR, G. (1997). "Perfis sedimentares longitudinais das camadas ativas dos leitos dos rios". XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Vitória. ES. Nov. 1997, pp 1- 8.

e) Nota e relatório técnicos

SHIELDS, A. (1936). *Application of similarity principles, and turbulence research to bed-load movement*. California Institute of Technology, Pasadena (translated from German).

WILSON-JR, G. (1996). *Diagnóstico do movimento sedimentar da bacia hidrográfica do rio Iguaçu*. Fundação COPPETEC, PINUD, Volumes I, II, III, 535 p., 343 fotos, Rio de Janeiro, RJ.

_____ (2009). *Notas de aula da cadeira COV-734: Dinâmica do Movimento de Sedimentos*. Programa de Engenharia Oceânica. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

WILSON-JR, G.; RODRIGUEZ, H. T.; SANTOS, J. S. (1980). *Estudos hidráulico-sedimentológicos realizados no trecho inferior do rio Ivai*. Noroeste do Estado do Paraná. OEA: Projeto Hidrologia. CBTN, ARH, SVOP. Estado do Paraná (1974-1980).