

Análise das Distribuições Verticais de Velocidades e Concentrações de Sedimentos em uma Seção do Rio Solimões

Rui Carlos Vieira da Silva

COPPE/UFRJ - Centro de Tecnologia - Bloco B, sala 100 - Ilha do Fundão
21945-970 Rio de Janeiro, RJ - Fone: (21) 560-8993 - rui@pec.coppe.ufrj.br

José Otavio Goulart Peçly

COPPE/UFRJ - Centro de Tecnologia - Bloco B, sala 101 - Ilha do Fundão - Caixa Postal 68506
21945-970 Rio de Janeiro, RJ - Fone: (21) 270-4799 - otavio@acd.ufrj.br

Recebido: 29/05/00 - revisão: 08/08/00 - aceito: 16/05/01

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o de definir e analisar distribuições verticais de velocidades e concentrações em uma seção do rio, comparando os valores medidos com valores calculados a partir das equações universais conhecidas. Foi também analisado o comportamento de alguns coeficientes e parâmetros da turbulência intervenientes nestas equações. Foram utilizados neste ajuste dados obtidos com a ajuda de um Correntômetro Acústico por Efeito Doppler (ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler), na seção de Manacapuru, no rio Solimões pelas equipes do Institut de Recherche pour le Developpement (IRD) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os resultados dos ajustes, as características dos perfis observados e os parâmetros correspondentes de turbulência e resistência de fundo são apresentados e analisados à luz da teoria dos escoamentos turbulentos em rios e canais.

Palavras-chave: sedimentos; velocidade; Amazonas.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A partir da aplicação da teoria da turbulência a escoamentos em rios e canais, diversos autores estabeleceram equações universais para a distribuição vertical de velocidades e concentrações de sedimentos em uma seção. Neste trabalho utilizou-se para as velocidades, a relação recomendada para escoamentos totalmente turbulentos sobre leitos rugosos:

$$V(y) = \frac{V^*}{k} \ln \left(\frac{y}{k_s} \right) \quad (1)$$

onde $V(y)$ é a velocidade a uma distância y do leito; V^* a velocidade de atrito; k_s o parâmetro de rugosidade (igual ao diâmetro D_{65} da curva granulométrica para leitos de areia planos) e; k a constante universal de Von Karmán.

Assumindo a validade desta equação até a superfície livre onde teoricamente ocorre a velocidade máxima, teremos:

$$\frac{V_{\max}}{V^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{h}{k_s} \quad (2)$$

Subtraindo membro a membro as Equações (1) e (2), obtém-se a equação universal de distribuição de velocidades:

$$\frac{V(y) - V_{\max}}{V^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{h} \quad (3)$$

A equação acima não depende de parâmetros locais, o que garante o seu caráter universal.

Para as distribuições verticais de concentrações de sedimentos utilizou-se a teoria da difusão turbulenta e seu papel no transporte de sedimentos em suspensão. A partir desta teoria, foram desenvolvidas várias equações de distribuição entre as quais selecionamos a equação de Rouse-O'Brien (Rouse, 1937), por ser uma das que tem apresentado melhores resultados em grandes rios (Nordin e Dempster Jr., 1963):

$$C(y) = C(a) \left[\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right]^{w_s/kV^*} \quad (4)$$

onde $C(y)$ é a concentração a uma distância y do leito; $C(a)$ a concentração a uma distância "a" do

leito, usualmente a espessura da camada de arrasto; h a profundidade da vertical; w_s a velocidade de queda do grão e; k a constante de von Karmán, tomada geralmente igual a 0,4 para águas sem sedimentos.

DESCRIÇÃO DOS DADOS DE CAMPO

Os experimentos realizados pelo IRD e pela ANEEL na seção de Manacapuru consistiram na medição pontual de velocidades e concentrações de sedimentos em suspensão em 300 verticais, com o auxílio de equipamento ADCP, tendo o número de pontos em cada vertical variado entre 7 e 14. Uma descrição compreensiva destas experiências pode ser encontrada em Guyot e Filizola (1997), conforme referência anexa.

A seção de Manacapuru faz parte permanente da rede fluviométrica da bacia amazônica e suas características hidrológicas básicas estão bem definidas e conhecidas. A Figura 1 mostra uma foto da localização dessa seção a partir de uma imagem obtida pelo satélite LANDSAT V em 02/08/89, com tratamento digital executado pelo INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Vieira da Silva, Novo e Peçly, 1999).

Na Figura 2 encontra-se um esquema da seção de Manacapuru. Das 300 verticais amostradas apenas 12 foram selecionadas para este trabalho em

função, principalmente, da distribuição transversal das irregularidades do leito. Como as medições com ADCP não apresentam boa resolução numa faixa próxima às paredes, ao leito e à superfície livre, as curvas teóricas resultantes do ajuste das velocidades e concentrações foram prolongadas para dentro das regiões não amostradas, visando principalmente estimar os parâmetros de turbulência do leito.



Figura 1. Vista da seção de Manacapuru (indicada pela cruz) a partir de imagem LANDSAT.

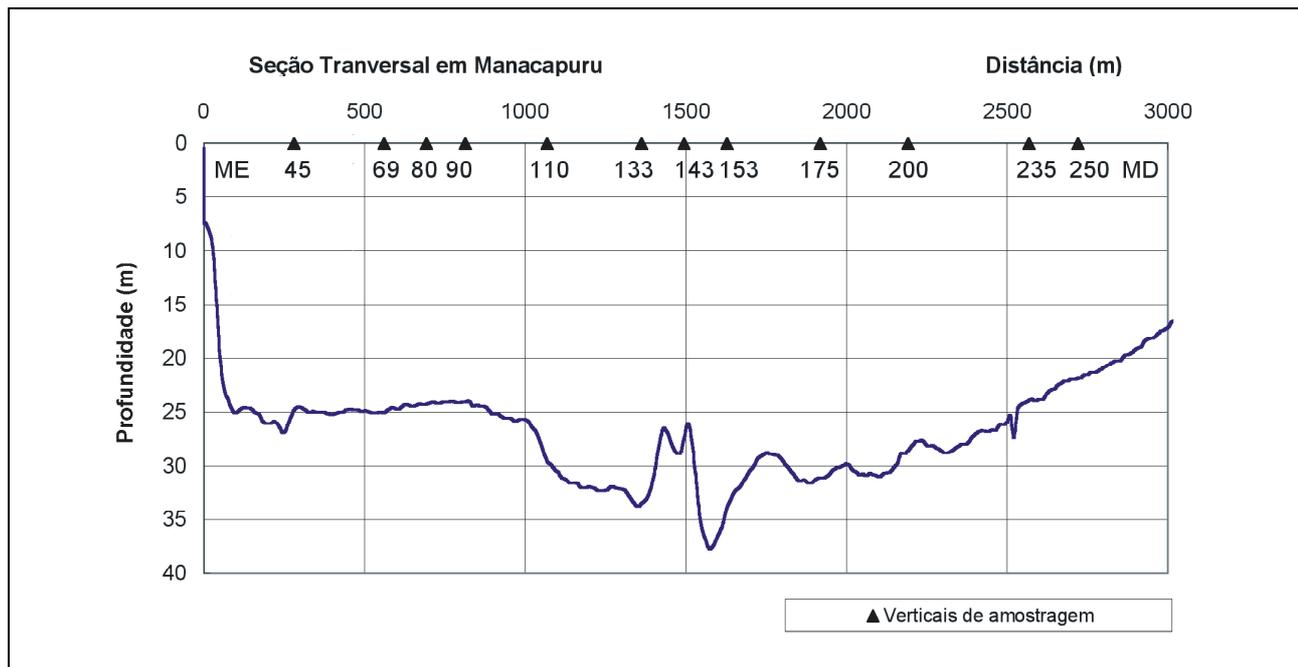


Figura 2. Seção transversal do rio Solimões em Manacapuru.

Com o objetivo de verificar a existência de possíveis singularidades (remoinhos ou correntes de segunda ordem, por exemplo) nas distribuições transversais, foram traçadas as isolinhas de distribuição de velocidades e concentrações pontuais medidas na seção de Manacapuru. Estas distribuições estão apresentadas respectivamente nas Figuras 3 (velocidades) e 4 (concentrações).

AJUSTE DAS EQUAÇÕES TEÓRICAS

Para proceder ao ajuste dos dados obtidos pelo ADCP, escolheu-se a fórmula proposta por

Keulegan (1938) para a equação logarítmica de velocidades:

$$\frac{V(y)}{V^*} = \frac{2,3}{k} \log\left(\frac{30,2 y}{k_s}\right) \quad (5)$$

Os gráficos da Figura 5 (tendo para as concentrações uma legenda em formato de quadrado e para as velocidades um formato de losango) mostram as distribuições de velocidades medidas com ADCP nas verticais selecionadas e as curvas correspondentes ajustadas através da lei logarítmica definida pela Equação (5). Nos mesmos gráficos

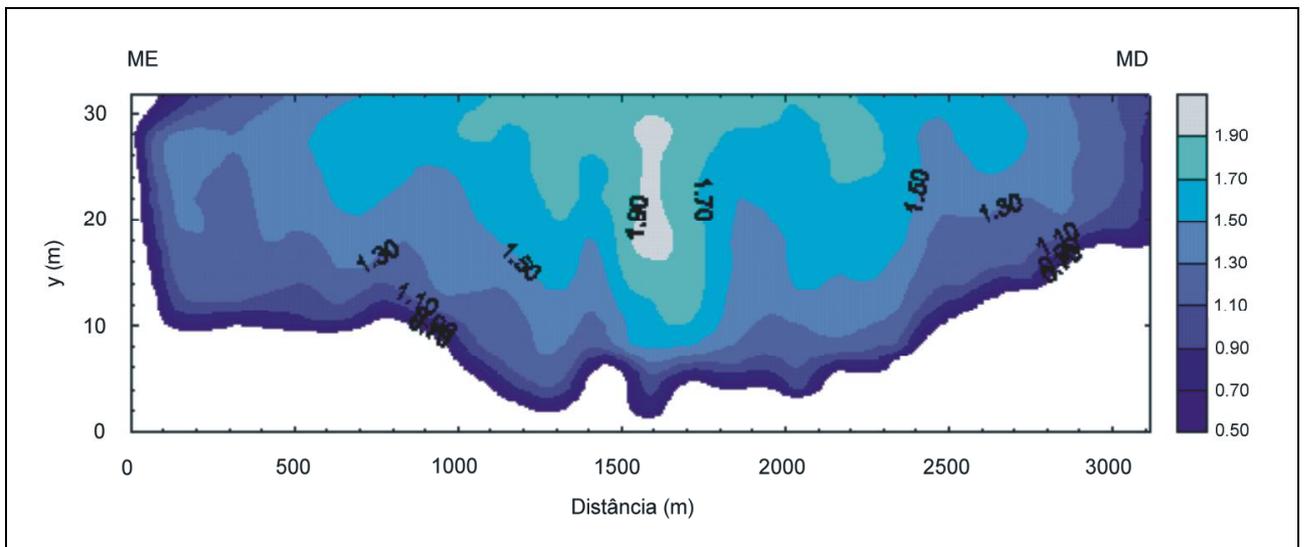


Figura 3. Isolinhas de velocidades na seção de Manacapuru.

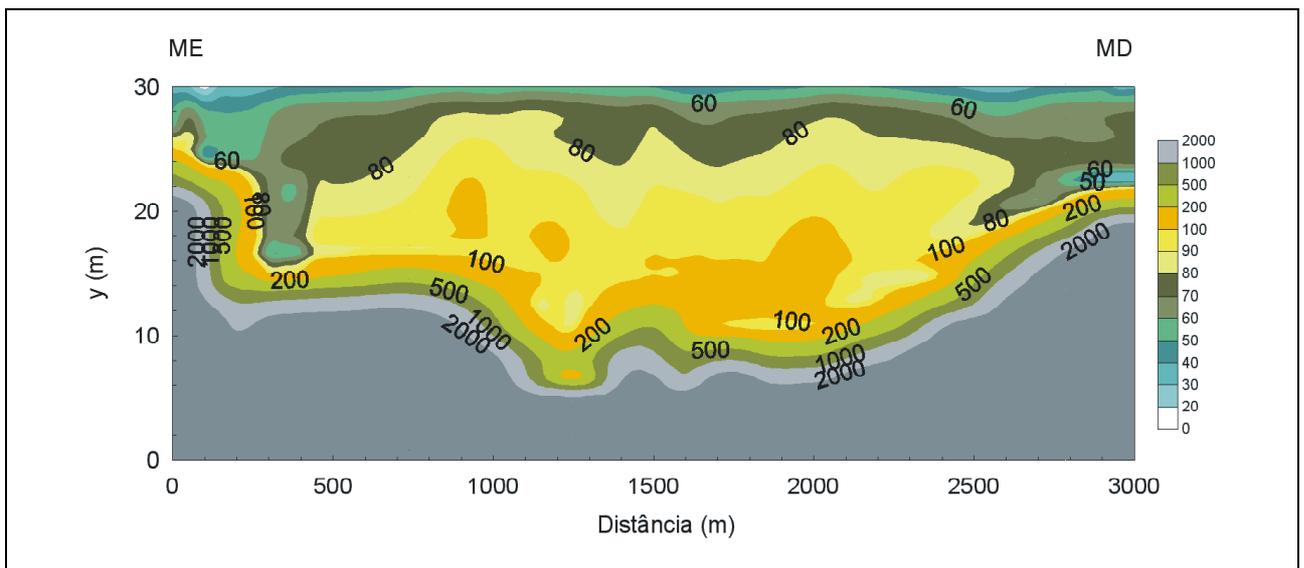


Figura 4. Isolinhas de concentrações na seção de Manacapuru.

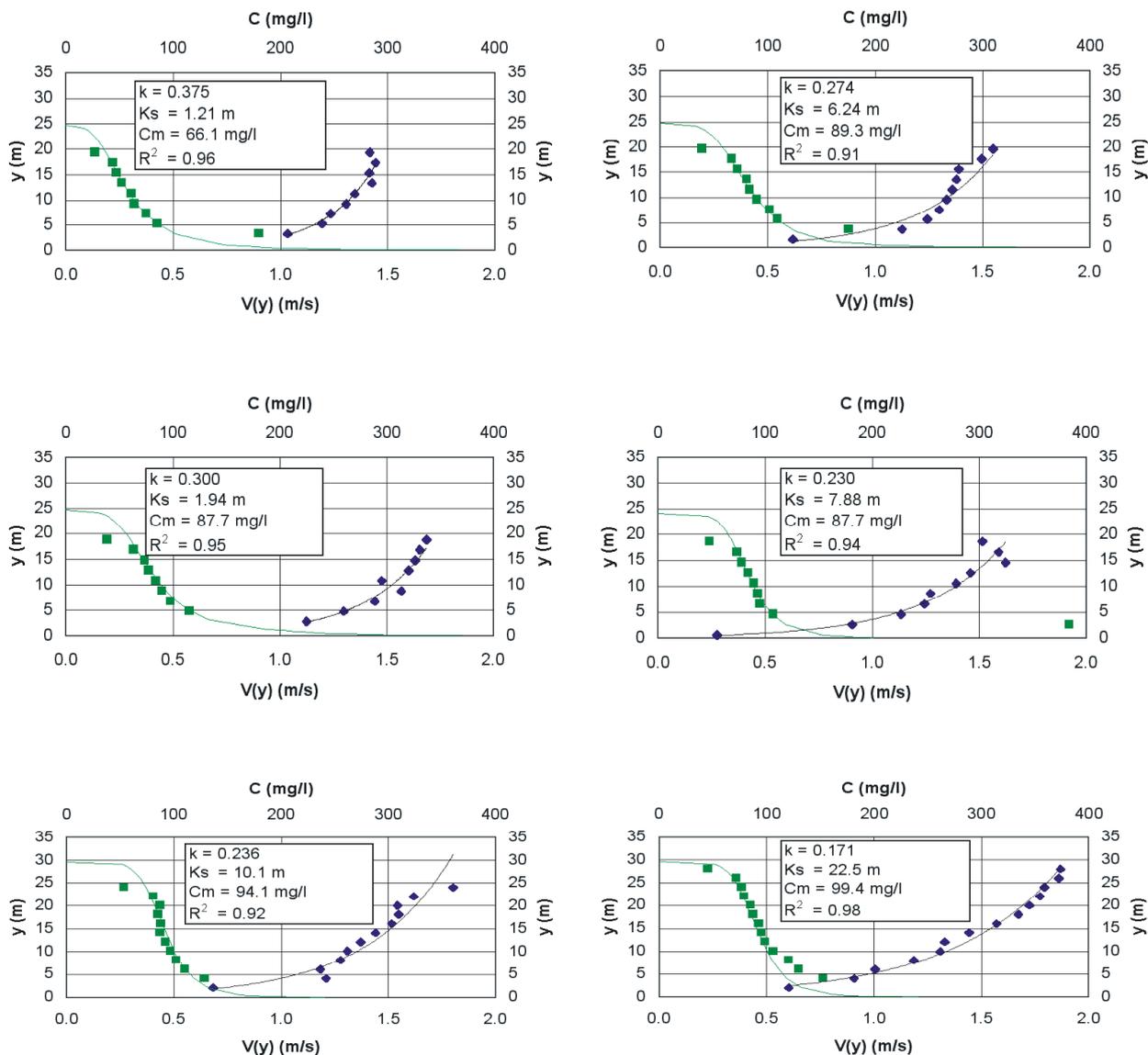


Figura 5. Distribuição de velocidades e concentrações nas verticais. Continua.

apresentam-se ainda as distribuições verticais de concentrações totais (não discriminadas por diâmetro), o valor do coeficiente de determinação R^2 obtido no ajuste e os valores encontrados para a rugosidade equivalente k_s e para a concentração média na vertical C_m . O prolongamento de ambas as curvas no trecho inferior foi feito sem preocupação com os limites reais, sendo que no caso das velocidades eles foram estabelecidos pelo cálculo indireto de V^* , como mostraremos mais adiante e pela leitura direta de k_s na curva ajustada.

No caso da curva de distribuição de concentrações, o desconhecimento da granulometria não permitiu estabelecer o valor da espessura da camada de arrasto "a" pois ela é considerada geralmente como equivalente a duas vezes o diâmetro do grão e a Equação (4) foi ajustada como dissemos para a totalidade da amostra. Isto não impede o ajuste, pelo fato de que a forma da Equação (4) permite sua descrição a partir do conhecimento de um único valor de $C(y)$ em qualquer nível de referência.

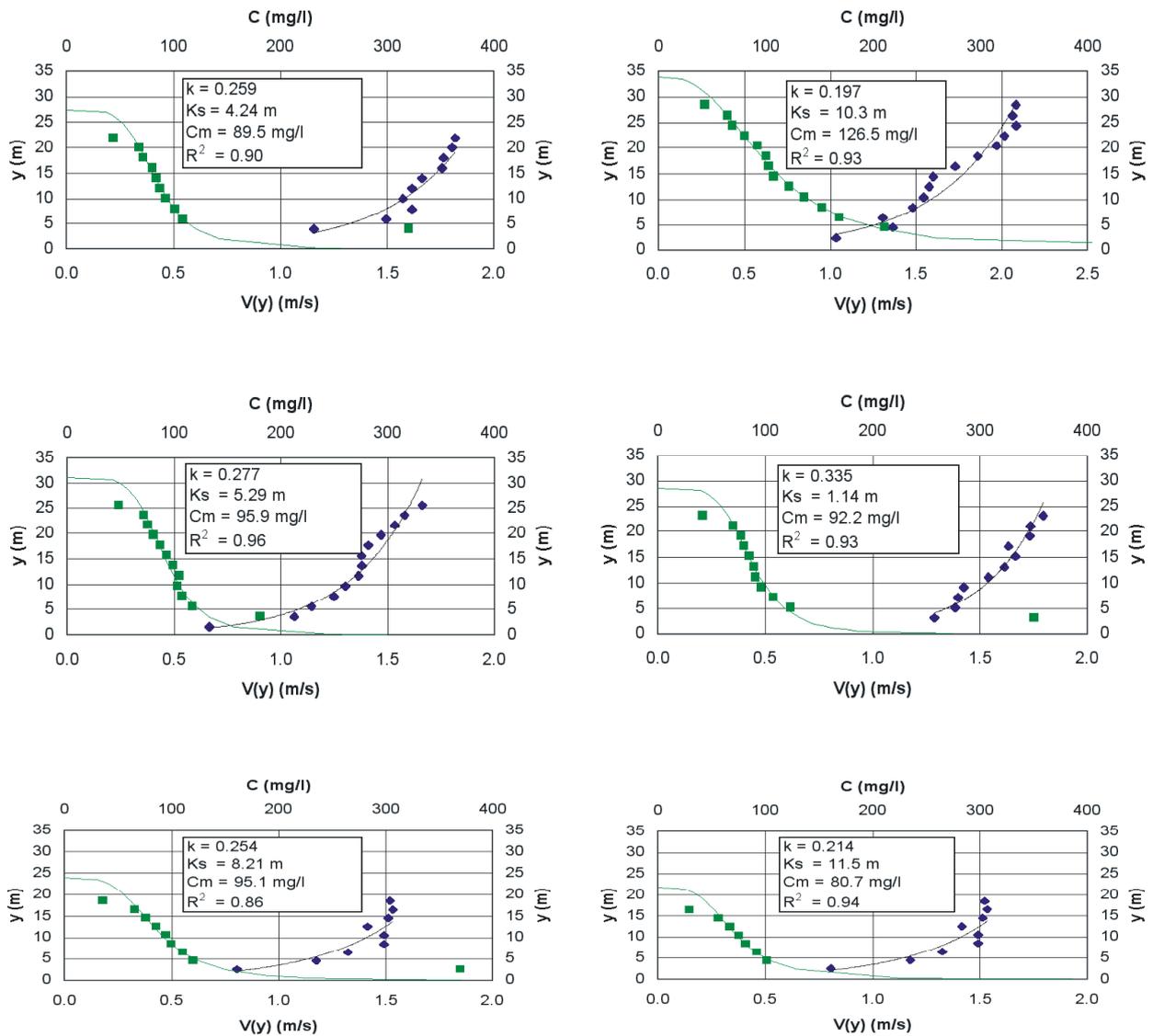


Figura 5. Continuação.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise da Figura 5 indica que as distribuições verticais de velocidades na seção considerada se ajustam com uma boa correlação à Equação (5). As curvas de distribuição de concentrações, também apresentaram um bom ajuste à equação de Rouse-O'Brien. Trata-se porém de um ajuste promediado, uma vez que a Equação (2) foi originalmente deduzida para um único diâmetro, o que significa uma curva específica para cada diâmetro da amostra. Como não dispunhamos das

análises granulométricas do material em suspensão coletado, não foi possível identificar os parâmetros dependentes da granulometria como a velocidade de queda w_s e o limite superior da camada de arrasto "a".

Vanoni e Brooks (1957) sugerem que a presença de sedimentos, pode provocar um amortecimento (*damping*) da turbulência e interferir nos parâmetros e coeficientes da distribuição de velocidades e concentrações, sobretudo no valor da cons-

tante universal k . Essa constante foi estimada em 0,4 de acordo com Schlichting (1955) para água limpa em escoamento sob pressão sobre leito artificialmente revestido com areia.

Para investigar o comportamento desta constante na presença de sedimentos em suspensão, procuramos determinar o valor da velocidade tangencial V^* a partir da fórmula:

$$V^* = \sqrt{g R S} \quad (6)$$

sendo S a declividade da linha de energia. Isto se deve ao fato de que os valores estimados a partir do prolongamento das curvas de distribuição de velocidades na região próxima ao leito apresentam imprecisões decorrentes tanto da pouca acuidade do ADCP próximo às paredes, quanto da complexa estrutura turbulenta dessa camada. Para determinar S utilizaram-se dados medidos por Meade (1985) e calculou-se o coeficiente de Manning n na seção de Manacapuru como 0,035. Com este valor e aproximando-se o raio hidráulico R pela profundidade média na seção, a declividade da linha de energia durante as medições usadas neste trabalho foi calculada a partir da fórmula de perda de carga de Manning:

$$V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad (7)$$

encontrando-se um valor igual a 31×10^{-6} m/m.

Com o valor de S conhecido foi possível determinar a velocidade de atrito, tendo sido encontrado o valor $V^* = 0,086$ m/s, e desta forma estimar o coeficiente k de Von Karmán pelo seguinte procedimento: tendo em vista a possibilidade de variação espacial dos parâmetros de turbulência, a Equação (5) foi colocada sob a seguinte forma diferencial:

$$\frac{V(y+dy) - V(y)}{\log(y+dy) - \log(y)} = \frac{2,3}{k} V^* = \alpha \quad (8)$$

onde α é a declividade do perfil da reta definida pela Equação (8).

Desse modo, obtém-se $k = 2,3 V^* / \alpha$.

A Figura 6 ilustra essa determinação para duas diferentes verticais. O valor de k em cada vertical foi tomado como a média dos valores obtidos nos diversos sub-trechos correspondentes aos incrementos dy , cujo valor é de dois metros. Esses

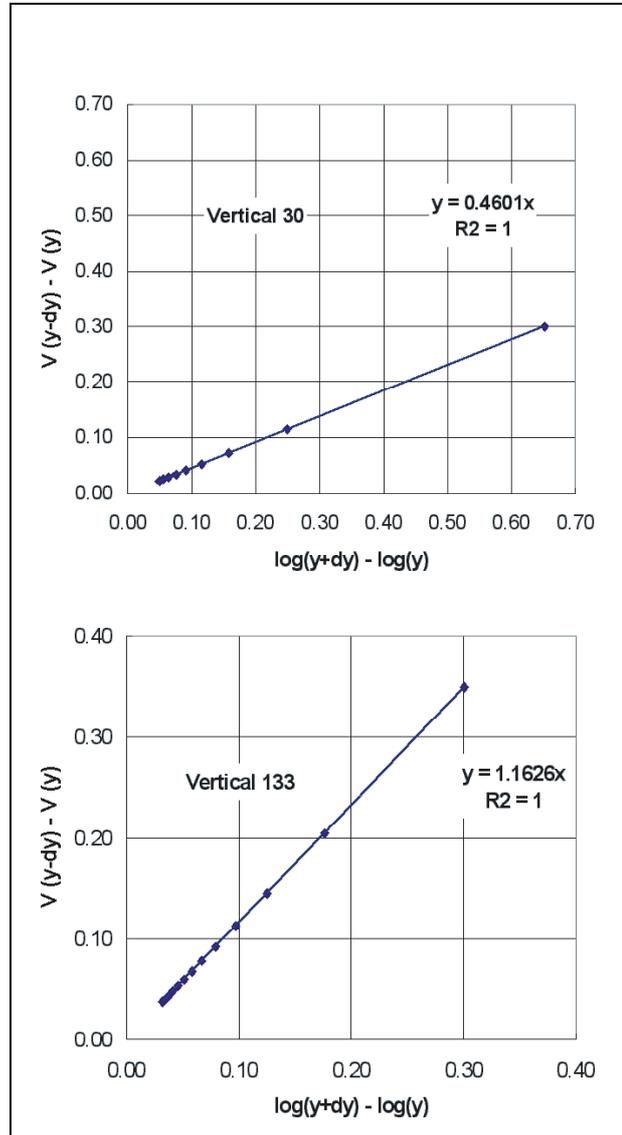


Figura 6. Determinação do coeficiente k nas verticais 30 e 133.

resultados, que se encontram nas caixas de texto da Figura 5, indicaram uma variação de k entre 0,17 e 0,38, o que representa um acentuado desvio em relação ao valor de 0,4 universal em relação ao caso de escoamentos com transporte de sedimentos.

Outro resultado importante obtido da análise dos gráficos de ajuste refere-se a ordem de grandeza do parâmetro k_s . Este parâmetro, quando associado ao coeficiente de rugosidade do leito, pode depender tanto da granulometria do material, sendo neste caso considerado igual ao diâmetro D_{65} da curva granulométrica e é geralmente associado com leitos planos ou com perfis de fundo suaves. Para leitos não planos, ele passa a depender das

formas de fundo do rio. Embora não se disponha da análise granulométrica do material do leito para as medições utilizadas neste trabalho, é evidente que a ordem de grandeza do coeficiente encontrado é muitas vezes superior ao diâmetro equivalente D_{65} (0,0625 mm foi, por exemplo, o valor desse diâmetro obtido nas experiências realizadas por Meade na mesma seção). Isso indica que em Manacapuru as formas de fundo são, de longe, preponderantes sobre a granulometria do material na determinação do coeficiente de resistência do leito e por consequência no valor de k_s .

CONCLUSÕES

Os ajustes efetuados no rio Solimões, em Manacapuru, entre os valores medidos de velocidades e concentrações de sedimentos em suspensão e as equações da teoria dos escoamentos turbulentos com superfície livre, conduziram às seguintes conclusões principais:

1. Apesar das irregularidades do leito e das grandes profundidades, as distribuições verticais de velocidades e concentrações de sedimentos apresentaram boa concordância com as equações universais previstas pela teoria.
2. As isolinhas de velocidades e concentrações em suspensão medidas indicaram não haver singularidades importantes nas distribuições transversais. Isto confirma a adequabilidade da seção de Manacapuru para a medição de vazões sólidas e líquidas.
3. As concentrações médias nas diversas verticais demonstraram ter ordens de grandeza suficientes para provocar anomalias nos parâmetros de turbulência da distribuição de velocidades, sobretudo na constante de Von Karmán, a qual apresentou na maioria das verticais uma gama de valores bem diferentes do valor universal 0,4 obtido em água limpa.
4. O parâmetro de rugosidade k_s apresentou valores muito superiores ao diâmetro equivalente D_{65} , usado como referência. Isto indica que as irregularidades de fundo neste trecho do rio Solimões exercem, sobre a resistência ao escoamento, uma influência maior do que a granulometria do material do leito.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Institut de Recherche pour le Developpement (IRD) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelo fornecimento dos dados básicos utilizados nas pesquisas que conduziram a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- GUYOT, J. L. e FILIZOLA, N. P. (1997). Regime anual do fluxo de sedimentos na Bacia Amazônica, primeiros resultados. In: *Hidrologia e Geoquímica da Bacia Amazônica*, Brasília, Brasil.
- KEULEGAN, G. H. (1938). Laws of turbulent flow in open channels; U.S Natl. Bur. Standards, *Jour. Research*, 21 (6).
- MEADE, R. H. (1985). *Suspended sediment in Amazon River and its tributaries in Brazil during 1982-84*, USGS Open File Report, 85-492.
- NORDIN, C. F. e DEMPSTER JR., G. R. (1963). *Vertical Distribution of velocity and suspended sediment: Middle Rio Grande*, New Mexico, USGS Professional Paper 462-B.
- ROUSE, H. (1937). *Modern conceptions of the mechanisms of fluid turbulence*: Am. Soc. Civil Engineers Trans., paper 1965, vol. 102, p. 463-453.
- SCHLICHTING, H. (1955). *Boundary layer theory*, McGraw-Hill Series in *Mechanical Engineering*, New York.
- VANONI, V. A. e BROOKS, N. H. (1957). *Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams*, California Institute of Technology, Sedimentation Laboratory Report E 68.
- VIEIRA DA SILVA, R. C.; NOVO, E. M. L. e PECLY, J. O. G. (1999). Potencialidades do uso de satélites para o monitoramento da concentração de sedimentos no rio Amazonas. In: *Hydrological and Geochemical Process in Large Scale Rivers Basins*, Manaus, Dezembro.

Analysis of Vertical Profiles of Velocity and Sediment Concentration in a Section of Solimões River

ABSTRACT

Point measured values of velocities and suspended sediment concentrations were used to define vertical profiles in the Manacapuru section of Solimões river, by comparing measured values with those calculated by using universal equations. The behavior of the coefficients and turbulent parameters that affect these equations were also analyzed. The field data used in the adjustments were obtained with an ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), by the teams of the Institut de Recherche pour le Developpement (IRD) and the Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). The results of the adjustments, the observed profiles and the associated turbulent parameters and bottom resistance are presented and analyzed according to the theory of turbulent flows in open channels.

Key-words: sediment; velocity; Amazonas.