

Efeito do Sedimento em Suspensão no Perfil de Velocidade para Escoamento de Lâmina de Pouca Espessura

Jorge Luis Zegarra Tarqui

Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais

jltarqui@yahoo.com.br

Ana Luiza de Oliveira Borges

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal de Rio Grande do Sul

Alborges@iph.ufrgs.br

Recebido: 22/02/11 - revisado: 26/10/11 - aceito: 20/08/12

RESUMO

Nas bacias hidrográficas a erosão e o transporte de sedimento em suspensão devem-se em parte ao escoamento superficial de lâmina de pouca espessura denominada de erosão hídrica laminar. Neste escoamento o sedimento em suspensão afeta o perfil de velocidade modificando a tensão cisalhante do fluxo, fator importante na estimativa da taxa de transporte de sedimentos. Para avaliar o efeito do sedimento em suspensão no perfil de velocidade foram realizadas experiências com três tipos de sedimentos provenientes dos solos: Chernossolo (Ch), Nitossolo Vermelho (Nv) e Vertissolo (V). Também, foi construído um canal de declividade variável com um sistema de medição de velocidade composto por uma sonda de Pitot e um piezômetro inclinado. O sistema permitiu determinar o coeficiente de Von Kármán (k), valor que caracteriza e avalia o perfil de velocidade de forma direta, tanto em água limpa como no escoamento com sedimento em suspensão. Ao avaliar o perfil de velocidades para escoamentos com sedimento arenoso-siltoso (Ch) em suspensão, observou-se que o coeficiente k decresce com o aumento da concentração, no caso dos sedimentos argilosos (Nv e V), o coeficiente k aumenta conforme aumenta a concentração. Na análise mineralógica, o sedimento argiloso esmectítico (V) apresenta valores de k com maior susceptibilidade ao aumento da concentração em comparação aos valores de k para sedimento argiloso caulinitico (Nv).

Palavras-chaves: perfil de velocidade, transporte de sedimento, coeficiente de Von Kármán.

INTRODUÇÃO

O processo de erosão de solos acontece em toda a bacia. Nas vertentes o desprendimento e transporte de sedimentos em suspensão deve-se, em parte, ao escoamento superficial de pouca espessura responsável pela erosão hídrica denominada laminar. A exata informação do perfil de velocidade é importante, não só para o conhecimento da interação fluido e partícula, mas para o cálculo da tensão cisalhante do escoamento, fator importante na estimativa da taxa de transporte de sedimentos do escoamento.

No presente trabalho pretende-se estudar o efeito do sedimento fino e/ou médio nos perfis de velocidades em escoamentos de pouca espessura, procurando, na medida do possível, reproduzir as mesmas condições naturais de fluxo superficial observadas nas vertentes das áreas de origem dos solos em estudo. Além de desenvolver equipamentos de

medição de velocidade de baixo custo que permitam estudar este tipo de escoamento.

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Perfil de Velocidade Turbulento em Canal Aberto

O fluxo turbulento totalmente desenvolvido dentro de um canal aberto consiste de uma região interna (“inner”) ou região da parede e outra região externa (“outer”). Na região interna, as velocidades médias pontuais são geralmente controladas pela tensão cisalhante junto à parede, rugosidade da parede, distância à parede, massa específica e viscosidade do fluido. Na região externa, estas são controladas pelos efeitos da superfície livre.

A região interna consiste de duas partes distintas denominadas: subcamada viscosa e camada totalmente turbulenta, existindo uma região de transição entre ambas, denominada de “tampão”.

Na parte da região interna com turbulência desenvolvida, a equação de distribuição logarítmica de Von Kármán-Prandtl é universalmente reconhecida para expressar o perfil de velocidades (lei da parede). A equação tem a seguinte forma:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{u^* y}{\nu} + B \quad (1)$$

onde u^* é a velocidade cisalhante, ν é o coeficiente cinemático de viscosidade do fluido, k é a constante universal de Von Kármán, a qual é independente da natureza da parede (lisa ou rugosa) e B é a constante dependente da natureza da superfície da parede (SCHLICHTING, 1968). Dados experimentais de Nezu e Nakagawa (1993) e Kirkgöz (1989) mostraram que a equação 1 se ajusta aproximadamente ao perfil de velocidades até um número de Reynolds de 40000.

Efeito da Presença de Sedimentos sobre o Perfil de Velocidades

Os primeiros estudos experimentais dos efeitos do sedimento (grosso) em suspensão sobre o perfil da velocidade foram realizados por Vanoni (1946), Einstein e Chien (1955), Laursen (1958) apud Garde e Ranga Raju (1978) e Elata e Ippen (1961). Os resultados destes pesquisadores sugeriram que o coeficiente k de Von Kármán diminui com o incremento da concentração do sedimento. Estes resultados aparecem em muitos livros clássicos de transporte de sedimento tais como Graf (1971), Yalin (1972) e Raudkivi (1967).

Wang e Larsen (1994) estudam, em uma parte dos seus experimentos, o efeito do material fino em suspensão no escoamento, mostrando que k apresenta valores levemente inferiores ao k para água limpa. Em outro estudo do efeito do sedimento fino no perfil de velocidade, Wang e Plate (1996) estabelecem que a concentração do material fino gera uma faixa de transição, de laminar para turbulento, variando com número de Reynolds entre 2000 e 10000. Ambos experimentos foram restritos a lâminas de escoamento maiores de 1,7 cm.

Na literatura existe uma falta de estudos do efeito do sedimento para lâminas de pouca espessura, devido a limitações de medição dos equipamentos.

Por exemplo, Abrahams e Li (1998) realizaram um estudo do perfil de velocidade com alturas

de escoamento variando de 0,4cm a 0,8cm com sedimento grosso em suspensão (diâmetro médio de 0,74 mm), pois sedimento fino gera erros de leitura e danificaria o equipamento utilizado (anemômetro a filme quente).

O presente estudo pretende explorar este campo a fim de subsidiar futuras pesquisas.

EQUIPAMENTOS

Projetou-se um canal de acrílico, figura 1, composto por uma seção retangular com 15 cm de altura, 12 cm de largura, e um comprimento de 3 metros. O canal se sustenta em dois tripés, os quais permitem mudar a declividade na faixa de 0° a 10°.

Um sistema de circulação fechada, alimentado por uma bomba de 1/2 HP para água limpa e vazão máxima de 1,2 l/s, permite manter o escoamento dentro do canal. O abastecimento de água é feito a partir de uma linha de sucção conectada a um reservatório com capacidade de 250 l. Da bomba saem duas tubulações de 3/4" de diâmetro, uma conectada à entrada do canal e a outra de retorno ao reservatório. Cada tubulação conta com registro para regulagem da vazão.

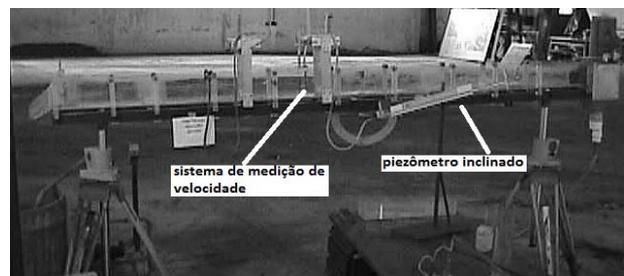


Figura 1 - Vista do canal.

Após a entrada do canal, foi colocado um sistema de tranquilização que antecede a seção retangular do canal. No fim do canal foi instalado um pequeno vertedor para facilitar a medição da vazão pelo método volumétrico. Detalhes do processo construtivo do equipamento podem ser encontrados em Tarqui (2001).

Sistema de medição de velocidade

O sistema de medição de velocidades é composto por: uma sonda de Pitot, uma ponta limnométrica, um paquímetro, uma estrutura de suporte de alumínio, um piezômetro inclinado e um tanque

para a calibração estática da leitura da sonda de Pitot. Ver figuras 1 e 3.

A concepção teórica do equipamento parte da adaptação de uma sonda tipo Pitot pressurizada construída por Wang e Ren (1995). Parte-se do princípio que a altura total do escoamento com sedimento num ponto qualquer determinará uma altura equivalente em água limpa (figura 2). O significado dos símbolos será apresentado mais adiante.

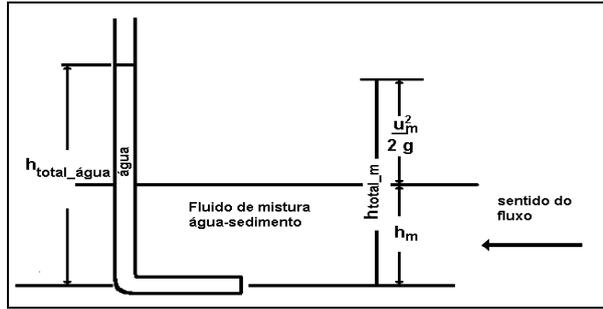


Figura 2 - Sonda tipo Pitot concepção teórica.

Supõe-se que a única forma de transferência de sedimentos entre a sonda Pitot, preenchida com água limpa, e o escoamento com sedimento é via difusão molecular, forma de transferência de massa pouco rápida, podendo-se considerar que os dois fluidos sejam imiscíveis.

A partir da figura 2 é possível estabelecer as relações de carga (altura de água limpa e altura do escoamento com sedimento) e chegar a uma equação que permita calcular a velocidade do escoamento com sedimento:

$$\rho_m = \rho + (\rho_s - \rho)Cv \quad (2)$$

$$\rho_m h_m + \rho_m \frac{u_m^2}{2g} = \rho_m h_{total_m} \quad (3)$$

$$\rho_m h_{total_m} = \rho h_{total_água} \quad (4)$$

$$\rho_m h_m + \rho_m \frac{u_m^2}{2g} = \rho h_{total_água} \quad (5)$$

$$u_m^2 = 2g\left(\frac{\rho}{\rho_m} h_{total_água} - h_m\right) \quad (6)$$

$$u_m = \sqrt{2g\left(\frac{\rho}{\rho_m} h_{total_água} - h_m\right)} \quad (7)$$

Onde ρ e ρ_m são as massas específicas da água e da mistura, respectivamente, Cv é a concentração volumétrica de sedimento na água, h_{total_m} e h_m , são respectivamente, a altura total e altura estática do escoamento com sedimento, $h_{total_água}$ é a altura total da água equivalente à altura total do escoamento com sedimento e u_m é a velocidade do escoamento com sedimento.

A sonda de Pitot foi confeccionada em aço inox com 1,5mm de diâmetro externo e 1mm de diâmetro interno.

Na figura 3, observa-se a ponta linimétrica (com um erro de medição de 0.01mm) e sonda Pitot conectada a um piezômetro inclinado (com 0,5 mm de erro de medição) com uma coluna indicadora das pressões estática e dinâmica.

O sistema de medição de velocidades foi colocado sobre o canal numa distância de 1,80m à jusante do coletor de entrada e a sonda de Pitot foi posicionada no meio da seção transversal do canal. Detalhes do funcionamento do sistema podem ser encontrados em Tarqui (2001).

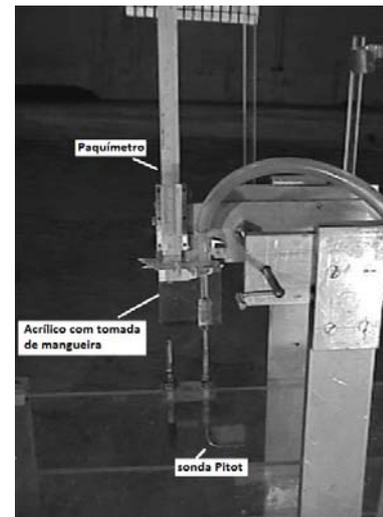


Figura 3 - Sistema de medição de velocidade: estrutura de suporte, paquímetro para medição, acrílico com tomada de mangueira e sonda de Pitot.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os primeiros testes foram com água limpa e serviram para definir os parâmetros de operação do canal e aferir o sistema de medição de velocidades, bem como para definir o procedimento de cálculo da velocidade. As lâminas de escoamento estiveram na faixa de 8 mm a 5,5 mm.

Para o estudo comparativo do perfil de velocidade de escoamentos de mistura de água-sedimento (com diferentes concentrações volumétricas) foram realizadas experiências com os três tipos de sedimentos, compostos por areia fina, areia muito fina, silte e argila. Os sedimentos foram provenientes dos solos: Chernossolo (Ch), Nitossolo Vermelho (Nv) e Vertissolo (V), segundo Embrapa (2006). As características granulométricas dos sedimentos são apresentadas na tabela 1, conforme Targui (2001).

Os sedimentos apresentaram os seguintes minerais dominantes no material fino (silte+argila): quartzo, esmectita, mica e caulinita para Ch; caulinita para Nv e esmectita para V.

Tabela 1 - Características granulométricas dos sedimentos Ch, Nv e V

Tipo de sedimentos	Ch	Nv	V
% do peso de Areia Fina e Areia Muito Fina	64.13	12.12	10.03
% do peso de material fino	35.87	87.88	89.97
% de silte no material fino	63,22	25,94	41,78
% de argila no material fino	36,78	74,06	58,22
Massa específica (g/cm ³) para areia fina + areia muito fina	±2,65	>2,65	<2,65
Massa específica (g/cm ³) para silte+argila	<2,65	±2,65	<2,65

As lâminas de escoamento estiveram na faixa de 8,95 mm a 6,35 mm, a variação da altura das lâminas deve-se a fatores como carga de sedimento, declividade do canal e tipo de solo.

A sonda Pitot foi posicionada em vários pontos do perfil, desde quando a sonda encosta no fundo do canal até a parte superior do escoamento. Partindo do fundo, as medições verticais foram feitas com uma variação de um milímetro. As medições permitiram avaliar a sensibilidade do equipamento na medição da variação da velocidade com a profundidade, conforme mostraram os resultados dos perfis com água limpa e com sedimentos em suspensão.

ANÁLISES E RESULTADOS

Resultados do perfil de velocidade para água limpa

A tabela 2 mostra os coeficientes de Von Kármán (k) calculados pela equação da lei da parede, a partir de dez testes nas seguintes condições: água limpa, duas declividades de canal, diferentes temperaturas de fluido e na condição de vazão máxima fornecida pela bomba.

Os valores médios de $k=0,407$ e $B=5,587$ (tabela 2) são próximos aos obtidos por Nikuradse (1933), $k=0,4$ e $B=5,5$; Kirkgoz (1989), $k=0,41$ e $B=5,5$; e por Nezu e Rodi (1986), $k=0,412$ e $B=5,29$.

Tabela 2 - Comparação do valor do coeficiente de Von-Kármán calculado pelas equações da lei da parede.

Coeficientes	k	B
Para declividade de 5%	0,390	5,28
Para declividade de 8,7%	0,431	6,05
Média	0,407	5,58

Resultados do perfil de velocidade para um fluxo com sedimentos em suspensão

Para observar o efeito da concentração no perfil de velocidades, decidiu-se adimensionalizar as velocidades médias e a profundidade de medição. Como primeira opção de adimensionalização, trabalhou-se com os valores de u/u^* e yu^*/ν , com a finalidade de avaliar o efeito do sedimento no coeficiente de Von-Kármán (k) do perfil de velocidade expressa pela lei da parede, ver equação 1.

Uma segunda opção de adimensionalização com os valores u/u^* e y/h segundo Wang e Plate (1996). Esse último tipo de adimensionalização permite avaliar o efeito da concentração no perfil de velocidade sem levar em conta as propriedades reológicas do fluido, tal como o coeficiente cinemático da viscosidade.

A velocidade cisalhante u^* depende diretamente da declividade do fundo do canal (no caso de escoamento uniforme) e da altura total da lâmina do escoamento, valores esses obtidos de maneira direta no experimento. O coeficiente cinemático de viscosidade (ν) foi calculado a partir dos dados da massa específica do fluido de mistura e do coeficiente de viscosidade dinâmica (μ), calculados pelo modelo teórico Chu Junda (WAN e WANG, 1994).

A tabela 3 apresenta o resumo das condições hidráulicas do conjunto de testes para os sedi-

Tabela 3 - Resumo dos testes realizados para solos Ch, Nv e V

Teste	S [%]	Cv [%]	Q [l/s]	h [mm]	u* [m/s]	U [m/s]	v 10 ⁻⁶ [m ² /s]	R _{cm}	T [°C]
Ch1	5,0	0,34	1,06	8,55	0,0606	1,0346	0,83	37500	29
Ch2	5,0	1,09	1,07	8,95	0,0618	1,0019	0,84	37250	29
Ch3	8,7	0,51	1,04	6,80	0,0721	1,2734	0,88	35163	26
Ch4	8,7	1,35	1,06	7,05	0,0733	1,2528	0,90	35151	26
Nv1	5,0	1,23	0,925	7,75	0,0580	0,9950	0,86	31871	28
Nv2	5,0	1,23	0,925	7,75	0,0580	0,9950	0,82	33269	30
Nv3	5,0	2,89	0,897	7,55	0,0574	0,9904	0,80	33364	33
Nv4	5,0	5,96	0,973	8,30	0,0598	0,9768	0,94	30165	28
Nv5	8,7	1,33	1,000	6,60	0,0711	1,2625	0,82	36503	30
Nv6	8,7	1,33	1,000	6,60	0,0711	1,2625	0,79	38050	32
Nv7	8,7	2,82	0,915	6,35	0,0699	1,2011	0,92	29879	26
Nv8	8,7	5,97	1,012	6,70	0,0716	1,2589	0,90	33539	30
V1	5,0	1,56	0,861	7,15	0,0560	1,0030	0,87	29533	28
V2	5,0	1,56	0,861	7,15	0,0560	1,0030	0,85	30178	29
V3	5,0	1,56	0,861	7,15	0,0560	1,0030	0,83	30828	30
V4	5,0	1,56	0,861	7,15	0,0560	1,0030	0,81	31484	31
V5	5,0	4,25	1,027	8,25	0,0596	1,0369	0,92	32522	28
V6	5,0	4,25	1,027	8,25	0,0596	1,0369	0,91	33233	29
V7	5,0	4,25	1,027	8,25	0,0596	1,0369	0,89	33950	30
V8	5,0	7,22	0,792	7,20	0,0562	0,9167	0,96	24637	30
V9	5,0	7,22	0,792	7,20	0,0562	0,9167	0,92	25685	32
V10	8,7	1,72	0,863	6,05	0,0684	1,1887	0,89	29351	27
V11	8,7	1,72	0,863	6,05	0,0684	1,1887	0,87	30000	28
V12	8,7	1,72	0,863	6,05	0,0684	1,1887	0,83	31316	30
V13	8,7	4,1	0,901	6,25	0,0694	1,2019	0,94	28890	27
V14	8,7	4,1	0,901	6,25	0,0694	1,2019	0,92	29530	28
V15	8,7	4,1	0,901	6,25	0,0694	1,2019	0,88	30826	30
V16	8,7	4,1	0,932	6,50	0,0706	1,1947	0,88	31747	30
V17	8,7	4,1	0,932	6,50	0,0706	1,1947	0,86	32423	31
V18	8,7	6,86	0,885	6,15	0,0689	1,1997	0,95	28251	30
V19	8,7	6,86	0,885	6,15	0,0689	1,1997	0,93	28852	31

mentos tipo Ch, Nv e V. A primeira coluna define a codificação do teste. Após, são mostradas a declividade do canal (S), a vazão (Q) calculada pelo método volumétrico, a altura do escoamento (h), a velocidade cisalhante u*. A velocidade média (U) é obtida a partir da área transversal do escoamento e da vazão. Tem-se também, o coeficiente cinemático de viscosidade, o número de Reynolds (R_m) e a temperatura. O número de Reynolds é definido como R_m = R_hU/v, onde R_h é o raio hidráulico referente ao escoamento no canal.

Esperava-se que as concentrações dos pares de testes (Ch1 e Ch3) e (Ch2 e Ch4) fossem apro-

ximados. No entanto, foram observadas diferenças entre eles. A explicação para esse comportamento é a grande porcentagem de material grosso nesse tipo de solo, o que causa deposição de parte do sedimento em suspensão no fundo do reservatório do canal.

A seguir são apresentados (figura 4.a) os perfis de velocidade para um escoamento com declividade 5%, para os valores u/u* e yu*/v, onde o eixo das ordenadas está em escala logarítmica neperiana. Observa-se que as curvas correspondentes a escoamentos com maior concentração volumétrica tendem a ficar no lado esquerdo das curvas de menor concentração. No gráfico foram plotados o per-

fil de velocidade para água limpa, para declividade de 5% (tabela 2) e o perfil de velocidade calculado de forma teórica aplicando a equação da lei da parede para as mesmas condições do teste utilizando os dados de Nezu e Rodi. Estas curvas representam os perfis de velocidade para concentração volumétrica $C_v=0$ e servem como base comparativa com os outros perfis onde a concentração volumétrica é superior a zero.

Os perfis de velocidade para água limpa, obtidos de forma experimental e teórica (lei da parede), serão mostrados em adiante em todos os gráficos de visualização de perfis de velocidade.

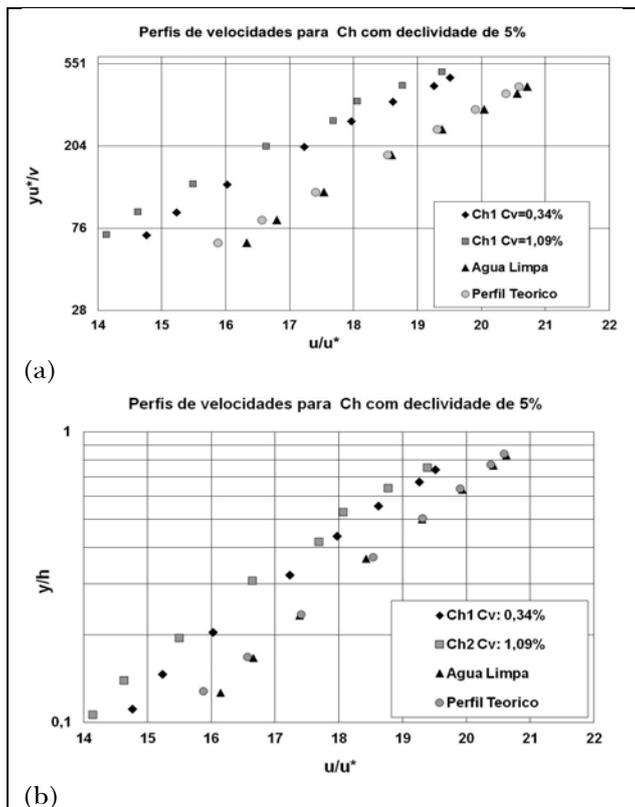


Figura 4 - Perfis de velocidades adimensionais: Perfil teórico (lei da parede), água limpa, Ch1 com $C_v=0,34\%$ e Ch2 com $C_v=1,09\%$ para sedimento Ch com declividade 5%.

A figura 4.b mostra os perfis de velocidades para sedimento Ch com declividade de 5%, adimensionalizados de tal forma que não considere os efeitos de mudança da viscosidade cinemática (para os valores de u/u^* e y/h), onde o eixo das ordenadas esta em escala logarítmica base dez.

Observa-se o deslocamento do grupo dos perfis de velocidade com sedimento em suspensão

para o lado esquerdo dos perfis teórico e experimental para água limpa. Na tabela 4, a comparação entre as colunas dos coeficientes k , B , e a coluna da concentração volumétrica mostra que com o aumento da concentração existe uma diminuição dos valores desses coeficientes.

Do ponto de vista físico, as diminuições dos valores do coeficiente de Von Kármán k (calculados pela equação da parede) com o aumento da concentração representam uma diminuição das declividades das curvas (figura 4.a). As mudanças dos valores B são produzidas pelas mudanças das declividades das retas, isto é, uma mudança do ponto de intercepção.

Tabela 4 - Resumo dos coeficientes calculados pela equação da lei da parede

Tipo de Solo	S [%]	C_v [%]	k Lei da parede	B
Ch	5,0	0,34	0,37	2,892
Ch	5,0	1,09	0,35	1,697
Ch	8,7	0,51	0,34	1,860
Ch	8,7	1,35	0,33	0,931

Analisando na tabela 3 (no fim do texto) as colunas de vazão e altura de escoamento para os testes Ch1 e Ch2, observa-se que para Ch1 a vazão foi $Q= 1,061$ l/s e a altura do escoamento $h=8,55$ mm e para o teste Ch2 temos $Q= 1,076$ l/s e $h=8,95$ mm, obtendo-se 1,5% de diferença entre as duas vazões e 5% para as alturas de escoamento, aproximadamente. Isto significa que o aumento da concentração de sedimento não modificou de maneira significativa a vazão do escoamento o que permite manter a carga para estudo comparativo, mas representou um aumento da altura do escoamento e, conseqüentemente, uma diminuição da velocidade média. Então, no momento de realizar uma comparação do perfil de velocidade entre um escoamento com água limpa e outro com sedimento em suspensão, os valores u/u^* para um mesmo ponto y/h tenderão a ser maiores nos escoamentos com água limpa do que escoamentos com sedimento em suspensão, pelo fato que o valor da velocidade cisalhante u^* na água limpa é menor que no escoamento com sedimento, devido à variação da altura de escoamento com o incremento do sedimento em suspensão (figura 4.b).

As figuras 5.a e 6.a mostram os perfis de velocidades adimensionalizados (para os valores u/u^* e yu^*/v) para os sedimentos Nv e V, com declividade de 5%.

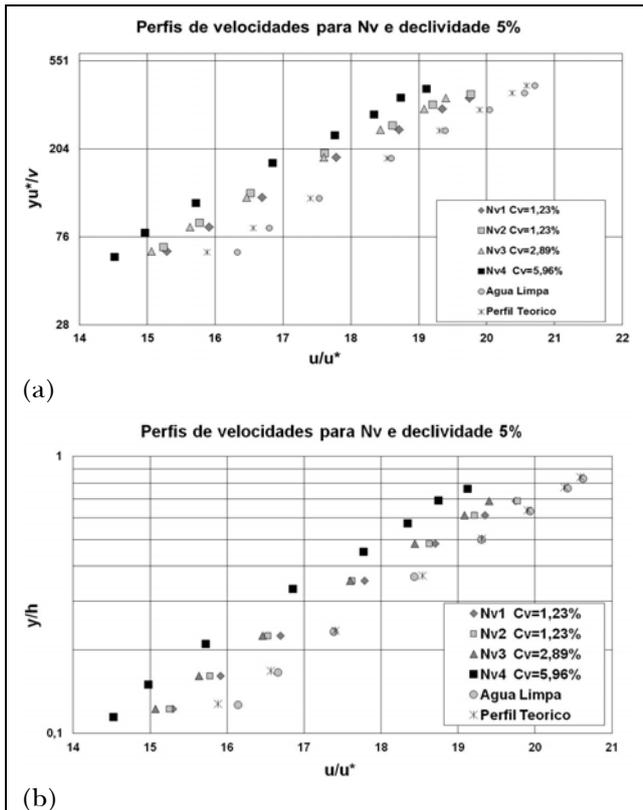


Figura 5 - Perfis de velocidades adimensionais: Perfil teórico (lei da parede), água limpa, Nv1 com Cv=1,23%, Nv2 com Cv=1,23%, Nv3 com Cv=2,89% e Nv4 com Cv=5,96% para sedimento Nv com declividade 5%

Tabela 5 - Resumo dos coeficientes calculados para as equações da lei da parede para sedimentos Nv e V

Tipo de Sedimento	S [%]	Cv [%]	k lei da parede	B
Nv	5,0	1,23	0,36	3,115
Nv	5,0	2,89	0,38	3,756
Nv	5,0	5,96	0,38	3,428
Nv	8,7	1,33	0,36	3,090
Nv	8,7	2,82	0,38	3,783
Nv	8,7	5,97	0,39	4,046
V	5,0	1,56	0,38	4,520
V	5,0	4,25	0,40	4,379
V	5,0	7,22	0,42	4,690
V	8,7	1,72	0,40	4,821
V	8,7	4,10	0,41	4,892
V	8,7	6,86	0,43	5,577

De forma similar ao observado na figura 4.a, as retas correspondentes ao escoamento com maior concentração de sedimentos são localizadas na parte esquerda dos perfis de água limpa (Cv=0), mas as retas de maior concentração dos sedimentos Nv e V se localizam levemente na parte esquerda inferior do perfil água limpa. Este comportamento deve-se ao valor do coeficiente de viscosidade cinemática empregado no termo yu^*/v . Os valores de v calculados (Modelo Chu Junda) para os sedimentos Nv e V são maiores do que os calculados no sedimento Ch devido ao acréscimo da concentração volumétrica. O acréscimo de v origina um deslocamento dos perfis para a parte inferior referente ao perfil de água limpa. Conclui-se, que o cálculo correto da viscosidade cinemática determina um correto cálculo do coeficiente B.

Na tabela 5 pode-se verificar que os valores dos coeficientes k e B aumentam com o acréscimo da concentração volumétrica.

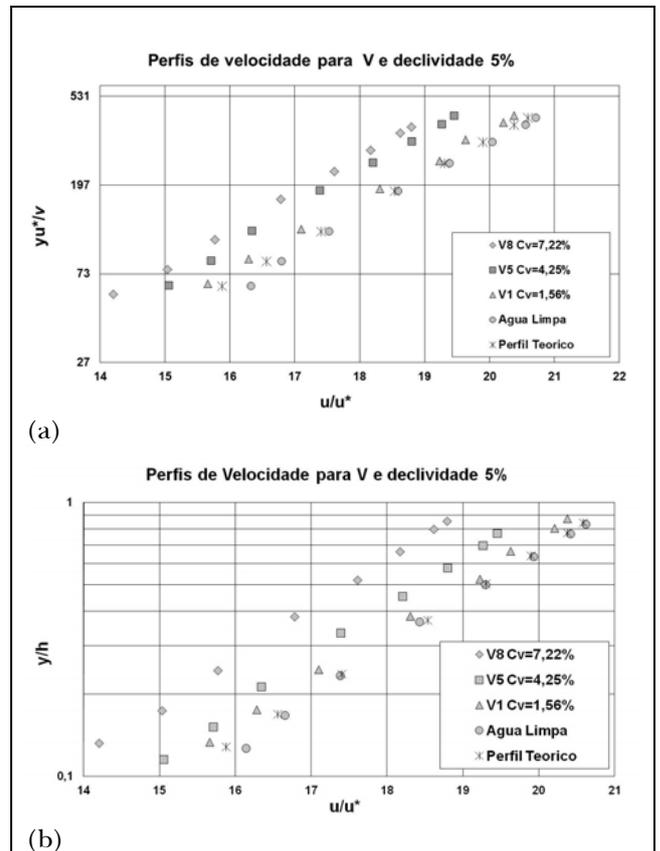


Figura 6 - Perfis de velocidades adimensionais: Perfil teórico (lei da parede), água limpa, V1 com Cv=1,56%, V5 com Cv=4,25% e V8 com Cv=7,22% para sedimento V com declividade 5%.

Do ponto de vista físico, o aumento dos valores do coeficiente de Von Kármán (k) com o aumento da concentração, representa um aumento das declividades das curvas (figuras 5.a e 6.a). O aumento do valor de B é produzido pelas mudanças das declividades das retas, isto é, uma mudança do ponto de intercepção.

As figuras 5b e 6b ilustram os perfis de velocidades adimensionalizados (com os valores u/u^* e y/h) para estes solos. Os resultados demonstram um comportamento similar ao observado no estudo do sedimento Ch: deslocamento dos perfis de velocidade com maior concentração ao lado esquerdo dos perfis da água limpa

Análise em conjunto dos resultados para os três tipos de sedimentos Ch, Nv e V

A figura 7 mostra os diferentes comportamentos de k em função da concentração volumétrica. O sedimento Ch apresenta um k que tende a diminuir com o aumento de C_v . No caso dos sedimentos Nv e V o comportamento é contrário, existindo um aumento de k com o incremento da concentração. Observa-se que os valores de k para o sedimento V são um pouco superiores aos valores de Nv. Um resultado interessante deste gráfico é que todos os valores k para as menores concentrações nos três tipos de sedimentos são menores do que o k calculado para água limpa. Para os sedimentos Nv e V, o incremento C_v permite que os valores de k superem ou se equiparem aos k para água limpa.

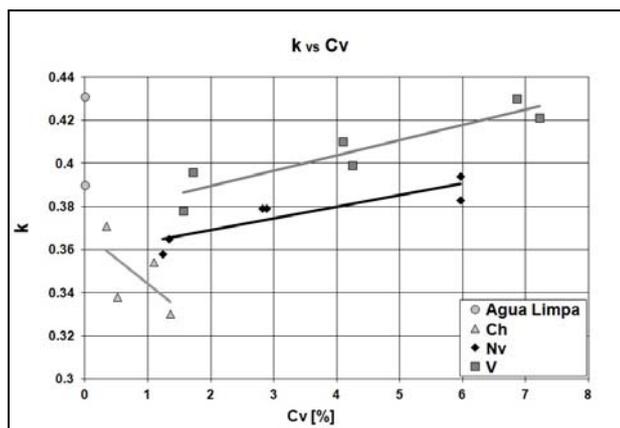


Figura 7 - Variação de k (lei da parede) com respeito à concentração volumétrica C_v para os três tipos de sedimento Ch, Nv e V.

Uma análise do ponto de vista das características do sedimento permite definir dois tipos de comportamento: k diminuindo com o aumento da concentração, para material com características arenoso-siltosa (Ch), então a declividade do perfil de velocidade (expresso em termos de u/u^* e yu^*/v) diminui com a concentração; e k aumentando com o aumento da concentração, para o material com uma grande porcentagem de argila (sedimentos Nv e V), mostrando que a declividade do perfil de velocidade (expresso em termos de u/u^* e yu^*/v) aumenta com o aumento da concentração.

Outra análise, sob o ponto de vista mineralógico, permite constatar que os dois sedimentos argilosos, Nv e V, apresentam comportamentos similares. Porém, o sedimento V (argila esmectítica) apresenta um maior aumento dos valores de k com o aumento da concentração, em comparação com os valores de k obtidos no sedimento Nv (argila caulínica). Em outras palavras, o efeito da concentração sobre o perfil de velocidade (expresso em termos de u/u^* e yu^*/v) representa um maior aumento da declividade do perfil de velocidade no caso do sedimento V que do apresentado no Nv.

Os valores de B apresentam o mesmo comportamento observado na figura 7, que relaciona k com C_v , porém de uma forma mais acentuada. Para o sedimento Ch, os valores de B decrescem com C_v . No sedimento Nv, os primeiros valores B (pontos $C_v=1,23\%$; $1,33\%$; $2,82\%$ e $2,89\%$) são menores do que os valores observados para água limpa. Com o incremento da concentração, o valor de B aumenta até equiparar-se ao valor de k em água limpa. No sedimento V, o primeiro valor B é similar ao da água limpa, com o incremento de C_v o valor de B chega a ser maior que o da água limpa.

Na análise do comportamento do termo B com a concentração, levando em consideração as características do sedimento, observa-se um comportamento similar ao observado nas análises obtidas para o coeficiente de Von Kármán. Isto é, a formação de dois grupos, um com o sedimento arenoso-siltoso Ch e outro com os sedimentos argilosos Nv e V. Em uma análise mineralógica, observa-se que o sedimento V (esmectítico) apresenta valores superiores aos observados no Nv (caulínico). Na realidade, o fator B reflete o ponto de intercepção da curva de ajuste (expresso em termos de u/u^* e yu^*/v) sobre o eixo u/u^* . Então, mudanças na declividade do perfil de velocidade (coeficiente k) refletirão em mudanças no ponto de intercepção (termo B).

CONCLUSÕES

O sistema de medição de velocidade desenvolvido permite avaliar o efeito do sedimento em suspensão no perfil de velocidades de forma satisfatória.

Considerando as características do sedimento, existem dois tipos de comportamento do coeficiente de Von Kármán sob o efeito da concentração. No primeiro tipo, para sedimento arenoso-siltoso (Ch), há uma diminuição do valor do coeficiente k com o aumento da concentração, resultado similar ao observado por Wang e Plate (1994). Isto é, uma diminuição da declividade do perfil de velocidade (eixos u/u^* e yu^*/v) devido a que os sedimentos provenientes de solos arenosos apresentam um perfil de concentração não uniforme na vertical da lâmina do escoamento, tendo a maior concentração do material grosso na região perto do fundo, produzindo uma diminuição da quantidade de movimento nesta região. Pelos princípios de conservação de quantidade de movimento e massa, é constatado que existe um efeito de compensação do escoamento, aumentando a quantidade de movimento na região superior da lâmina do escoamento.

No segundo tipo de comportamento, para sedimentos argilosos Nv e V, o coeficiente k aumenta com o acréscimo da concentração. Isto é, um aumento da declividade do perfil de velocidade (eixos u/u^* e yu^*/v) com o aumento da concentração. Este comportamento deve-se ao material fino em suspensão, o qual tem uma tendência a formar um perfil de concentração com uma distribuição quase homogênea do sedimento na vertical da lâmina do escoamento.

Sob a análise da composição mineralógica, o sedimento argiloso esmectítico (V) possui valores de k com maior susceptibilidade ao aumento da concentração, em comparação aos resultados de k para sedimento argiloso caulínítico (Nv). É interessante comprovar que este resultado é análogo aos resultados obtidos no estudo dos parâmetros reológicos, onde a propriedade expansiva das argilas esmectíticas determina um coeficiente de viscosidade dinâmico aparente (μ) maior do que o obtido em argilas caulíníticas (BORGES e TARQUI, 1999), permitindo inferir que a composição mineralógica do material em suspensão afetará o padrão de escoamento.

Também, o sedimento argiloso esmectítico (V), apresentou uma massa específica, em média, menor que do sedimento argiloso caulínítico (Nv), ver tabela 1. Menores massas específicas dos sedi-

mentos determinaram uma maior capacidade de transporte em suspensão e uma distribuição da concentração mais homogênea na lâmina vertical do escoamento.

Conclui-se, finalmente, que existe evidência para afirmar que a característica do sedimento (textura e massa específica) e a composição mineralógica afetam o perfil de velocidade.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAMAS, A. D. e LI, G. 1998. Effect salating on flow resistance and bed roughness in overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, n. 23. p. 953-960.
- BORGES, A. L. O. e TARQUI, J. L. Z. Determinação das Propriedades Reológicas de Sedimentos Finos em Suspensão Obtidos de Três Tipos de Solos do Estado do Rio Grande do Sul do Brasil. CD ROM do IV Silusba - Coimbra-Portugal, maio 1999.
- EINSTEIN, H. A. e CHIEN, N. 1955. Effects of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution. MRD Series, Institute of Engineering Research, University of California, Berkeley, serie n.8, 96 p.
- ELATA, C. e IPPEN, A. T. 1961. The dynamics of open channel flow with suspensions of neutrally buoyant particles. Dept. of Civil and Sanitary Engr. Techn., M.I.T., relatório n. 45, 69 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- GARDE, R. J. e RANGA RAJU, K. G. 1978. Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems. New Delhi, Wiley Eastern Limited. 483 p.
- GRAF, W. H. 1971. Hydraulics of sediment transport. New York, MacGraw-Hill Book Co. Inc., 513p.
- KIRKGOZ, M. S. 1989. Turbulent velocity profiles for smooth and rough open channel flow. *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, Novembro, 15 (11): 1543-1561.

LAURSEN, E. M. 1958. Total sediment load of streams. In: GARDE, R. J. e RANGA RAJU, K. G. 1978. Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems. New Delhi, Wiley Eastern Limited. 483 p.

NEZU, I. e RODI, W. 1986. Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer, J. Hydraulic Engineering. ASCE, May, 112 v., n. 5.

NEZU, I. e NAKAGAWA, W. 1993. Turbulence Open-channel flow. ASCE, Nederland May, 112 v., n. 5.

NIKURADSE, J. 1933. Laws of flow in rough pipes. (Tradução em Inglês de: Stroemungsgesetze in rauhen Rohren). Nat. Advisor Council of Aeronautics Techn., Mem. 1292, ano 1950, 61 pp.

RAUDKIVI, A. J. 1967. Loose boundary hydraulics. New York, Pergamon Press Inc., 331 pp.

SHLICHTING, H. 1968. Boundary layer theory. New York, MacGraw-Hill. 647p.

TARQUI, J. L. Z. 2001. Padrões de escoamento de fluido de mistura água-sedimento em lâmina de pouca espessura. Tese de Doutorado, Instituto de pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre 165 p.

VANONI, V. A. 1946. Transportation of suspended sediment by water, Trans. ASCE, 3 (2267): 67-133.

WAN, Z. e WANG, Z. 1994. Hyperconcentrated flow . The Netherlands, IAHR monograph series, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, 290p.

WANG, Y. Z. e REN, Y. M. 1995. Total pressure probe for the measurement of turbulence in sediment-landed flows; Advances in Hydro-Science and Engineering, March 22-27, Beijing, China. II v., p. 1875-1882.

WANG, Z. e LARSEN, P. 1994. Turbulent Structure of Water and Clay Suspensions with Bed Load. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 120(5): 577-600.

WANG, Z. e PLATE, E. J. 1996. A preliminary study on the turbulence structure of flows of non-Newtonian fluid. Journal of Hydraulic Research. IAHR, 34(3): 345-360.

YALIN, M. S. 1972. Mechanics of sediment transport. New York, Pergamon Press Inc., 290p.

Effect of Suspended Sediment on Velocity Profile in Shallow Flow

ABSTRACT

In hydrographic basins the erosion and the transport of suspended sediment are partly due to the surface runoff of shallow flows called sheet erosion. In this flow, the suspended sediment affects the velocity profile and modifies the flow shear stress, an important factor to estimate the rate of sediment transport. To evaluate the effect of suspended sediment on the velocity profile, experiments were performed with three types of sediment from the soils: "Chernossolo" (Ch), "Nitossolo vermelho" (Nv) and "Vertissolo" (V). A variable slope channel was also built with a velocity measurement system, composed of a Pitot probe and an inclined piezometer. The system allowed determining the Von Kármán coefficient (K), a value that characterizes and evaluates the velocity profile directly, both in clean water and in flow with suspended sediment. When evaluating the velocity profile in flows with sandy-silty suspended sediment (Ch), it was observed that the k coefficient decreases as the concentration increases. In the case of clay sediments (Nv and V), the k coefficient increases as the concentration increases. In mineralogical analysis, the smectite clay sediment (V) shows values of k with greater susceptibility to increased concentration compared to the values of k for kaolinitic clay sediment (Nv).

Key-words: *velocity profile, sediment transport, von Kármán coefficient;*