
**INÍCIO DE EROSÃO EM UM PEQUENO
CANAL DE LABORATÓRIO**

Péricles Alves Medeiros

PÉRICLES ALVES MEDEIROS

Depto. de Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
CEP 87020-900 - Maringá - PR

RESUMO

Foi testada a adequabilidade de um pequeno canal de laboratório para ensaios confiáveis de início de erosão. Foram utilizados 10 sedimentos não coesivos de diâmetro constante. O critério de identificação visual do início de erosão normalmente utilizado foi adaptado ao caso presente. A instrumentação usada foi a de praxe no sentido de manter o custo baixo. A determinação da tensão de cisalhamento crítica não é adequada devido a inconsistência dos resultados ocasionada por várias suposições e dificuldades. Ao contrário, a velocidade média crítica demonstrou-se plenamente satisfatória e consistente. Uma nova equação para esse parâmetro é apresentada incluindo também a influência da lâmina de água.

Palavras - chave : Hidráulica Fluvial / Transporte de sedimentos/Erosão e sedimentação.

OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são :

- a) Verificar se um canal de dimensões muito reduzidas pode ser utilizado para ensaios confiáveis de início de erosão em fundos com sedimento não coesivo de diâmetro constante. No caso presente, serão utilizados regimes fluviais e a instrumentação será a de praxe constando de: pontas linimétricas, tubo de Pitot ou Prandtl, molinetes, vertedor, medidor diafragma e piezômetros.
- b) Verificar, para o referido canal, qual a extensão máxima possível da faixa de

diâmetros de sedimento utilizável neste tipo de ensaios.

- c) Analisar a consistência dos resultados e compará-los com outros da literatura.

CANAIS DE LABORATÓRIO

Os laboratórios de hidráulica em geral dispõem de canais de pequeno porte devido ao aumento exponencial do custo dos ensaios com relação ao crescimento da vazão líquida. Como **pequenos canais** considera-se aqui aqueles em que os remansos e o atrito do líquido com as paredes tem papel central na definição do escoamento. Dessa forma, o movimento permanente uniforme nunca é atingido e a distribuição das velocidades é muito afetada pela presença das paredes. Na tentativa de uma melhor ilustração, poderíamos dizer que, canais com dimensões inferiores a 10 m de extensão e 0,80 m de largura, já são claramente marcados por aquelas características. No caso presente, as dimensões são 0,20; 0,40 e 4,00m, respectivamente largura, altura das paredes e extensão.

PARÂMETROS BÁSICOS

Na Hidráulica Fluvial, os critérios adotados para a caracterização do início de erosão em sedimentos não coesivos tem sido objeto de muito estudo. Tanto a quantidade de grãos que iniciam o movimento quanto os números adimensionais mais adequados para estudo analítico, podem ser objeto de discussão. Os parâmetros básicos mais utilizados para compor

os adimensionais que representam a ação do líquido sobre o grão são :

- a) A **velocidade** média do escoamento ou a atuante sobre o fundo.
- b) A **tensão de cisalhamento** no fundo.

Embora na natureza o fenômeno físico seja resultado de uma conjunção de fatores e independentemente de qualquer análise humana, o estabelecimento de uma expressão matemática que represente o início de erosão geralmente tem seguido apenas uma das duas abordagens acima. A primeira, tenta explicar o fenômeno pela energia cinética do líquido atuando sobre a partícula e, a segunda, pela força que o peso da coluna de líquido desperta no sentido do movimento.

Velocidade

Com relação a esse parâmetro, a análise deve basear-se, em princípio, no exato perfil longitudinal em uma determinada vertical. Um ponto no meio da massa líquida tem sua velocidade medida sem grandes dificuldades com um tubo de Pitot ou molinete. Se tal ponto estiver muito próximo ao fundo, a tarefa passa a ser bem mais difícil pois, naquela região, o perfil sendo fortemente afetado pelo atrito do fundo, tem maior curvatura exigindo maior número de medições e instrumentação de maior precisão. A velocidade média, apesar de não oferecer informações sobre a distribuição das velocidades, tem uma vantagem inquestionável por ser de fácil, rápida e barata obtenção.

Tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento no fundo em pequenos canais pode ser determinada por

medição direta com cuidadosa instrumentação eletromecânica sensível à pressão colocada embutida no fundo. O presente trabalho não contempla essa linha de trabalho. Outra forma de obter a referida tensão é seu cálculo analítico com a seguinte expressão:

$$\tau_o = k \cdot \gamma \cdot R_b \cdot J \quad (1)$$

onde:

- τ_o = tensão de cisalhamento no fundo
- $k \leq 1$ (devido distrib. de τ_o no perímetro molhado)
- γ = peso específico do líquido
- R_b = raio hidráulico de uma parcela da vazão atuante sobre o fundo
- J = dedividade da linha de energia representativa no ponto de observação.

Em pequenos canais de laboratório o cálculo de τ_o pode ser feito seguindo a rotina descrita em Medeiros et al. (1994) aqui detalhada:

- 1º Considera-se que a vazão total na secção transversal seja composta por uma vazão atuante sobre as paredes e uma vazão atuante sobre o fundo. Esta última seria a responsável pelo movimento das partículas.
- 2º Considera-se que velocidade média seja constante em todas as referidas parcelas de vazão.
- 3º Utilizar a equação de Prandtl-Von Kármán para escoamento turbulento liso (já que as paredes são de vidro) substituindo R_w/f_w por R/f . Dessa forma, calcula-se por iterações o fator de atrito da parede f_w .
- 4º Considera-se os fatores de atrito das parcelas de vazão como proporcionais a seus respectivos perímetros molhados ou seja: $f_b = f + (f - f_w) (2 h / b)$. Assim,

o fator de atrito da parcela de vazão atuante sobre o fundo é calculado (f_b).

5º Já que $8g R/f = 8g R_b/f_b$ calcular o raio hidráulico da vazão atuante sobre o fundo (R_b).

6º Com o auxílio de várias pontas linimétricas determinar a curva da linha de energia. Utilizar o valor de J referente ao ponto de observação.

7º Verificar ou arbitrar a distribuição de τ_o no perímetro molhado escolhendo um valor de k representativo.

sendo:

R , R_w , R_b = número de Reynolds para o escoamento total, de parede e de fundo.

f , f_w , f_b = fator de atrito de Darcy/Weisbach para escoamento total, de parede e de fundo.

h = altura da lâmina de água

g = aceleração da gravidade

R , R_b = raio hidráulico de toda a secção e da vazão de fundo.

J = declividade da linha de energia.

b = largura do canal = 0,20 m.

Cabe ao pesquisador ter a sensibilidade e experiência para julgar até que ponto esse somatório de procedimentos não acaba comprometendo a confiabilidade do resultado obtido. No caso presente, o canal de ensaios apresentou, por suas dimensões, grande dificuldade na determinação confiável da tensão de cisalhamento pela referida expressão (1) devido excesso de suposições. A repetição de ensaios nem sempre apresentou resultados convergentes.

Outra maneira de calcular τ_o é a utilização da clássica fórmula de Newton da viscosidade:

$$\tau_o = \mu \, dv/dy \quad (2)$$

sendo:

τ_o = tensão de cisalhamento em um ponto qualquer.

μ = viscosidade absoluta.

dv = variação de velocidade entre dois filetes líquidos.

dy = variação de altura entre os dois filetes.

Neste caso, para o cálculo da tensão de cisalhamento em um ponto qualquer, é necessário o conhecimento de dv/dy e portanto do perfil completo de velocidades com o procedimento e cuidados já comentados anteriormente.

Considerando os primeiros ensaios realizados e o acima comentado para a velocidade média e tensão de cisalhamento, acabou ficando claro que, para o caso em questão, o primeiro parâmetro é o mais recomendado.

ALGUNS TRABALHOS EXISTENTES

Hjulström (1935) apresenta um trabalho sobre movimento de grãos individuais sobre fundo móvel sem formas de fundo. Duas velocidades médias são apresentadas: uma relativa ao início de erosão de uma partícula previamente assentada e outra para a qual uma partícula já em movimento deposita-se. O pesquisador sentiu-se inclinado a usar a velocidade média do escoamento devido a pouca disponibilidade de velocidades de fundo confiáveis. Nessa linha clássica de abordagem os referidos parâmetros são função apenas do diâmetro (considerando os grãos com densidade aproximadamente igual a 2,6). A seguir, na Figura 1, o gráfico correspondente:

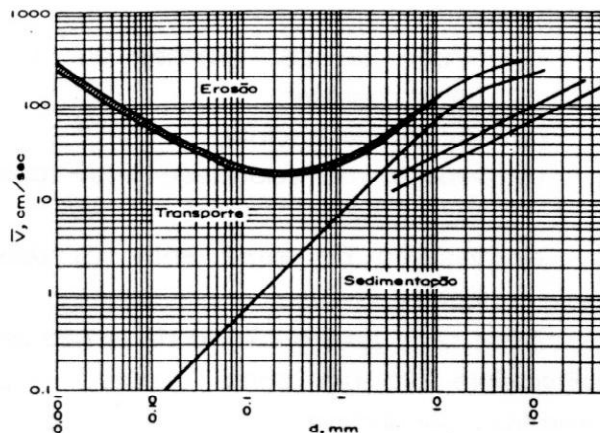


GRÁFICO DE HJULSTRÖM

Figura 1

Lane (1955) muito colaborou no projeto de canais estáveis abordando também a questão do início de erosão pelos critérios da velocidade crítica e, sobretudo, da tensão de cisalhamento crítica. Entre outras informações, o autor apresenta o conhecido gráfico da "critical tractive force" em função do diâmetro do sedimento.

Muitos pesquisadores trabalharam no que se chama "método da máxima velocidade permissível" para a análise da estabilidade de fundo. O principal mérito do método reside na sua simplicidade já que a maioria das fórmulas práticas utiliza a velocidade média de fácil obtenção. Com relação àquelas que utilizam a velocidade de fundo, a principal crítica é justamente a falta de sua adequada definição já que o perfil de velocidades naquela região é de difícil determinação. A relação entre as duas velocidades citadas também não é de fácil generalização para poder ser utilizada nos problemas usuais da engenharia.

Fortier et al. (1926) fornecem uma tabela com velocidades máximas permissíveis. Essa tabela ao caracterizar o material de fundo, não fornece claramente os diâmetros, mas sim faixas de diâmetro. Os autores consideram que a velocidade máxima permissível a rigor não é só função do diâmetro e massa específica do

sedimento mas também das dimensões do canal. A importância da sensibilidade do técnico ao analisar casos individuais também é salientada.

Uma publicação do "Bureau of the Methodology of the Hydro-Energy Plan" (1936) apresenta uma tabela com fatores de correção da velocidade permissível em função da profundidade. Os referidos fatores estão discretizados para os seguintes valores de profundidade: 0,30; 0,60; 1,00; 1,50; 2,00; 2,50; e 3,00 m.

Mavis et al. (1937) apresentaram a seguinte equação utilizando a velocidade de fundo:

$$(U_b)_{cr} = \frac{1}{2} d^{4/9} \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho} - 1} \quad (3)$$

onde :

$(U_b)_c$ = velocidade de competência no fundo

d = diâmetro da partícula

ρ_s = massa específica do sedimento

ρ = massa específica do líquido

Neill (1967) estudou a velocidade média como critério para início de erosão ensaiando cascalhos e seixos de diâmetro constante entre 6 e 30 mm. Após uma análise dimensional das variáveis envolvidas, propõe a seguinte relação:

$$\frac{\rho V_{mc}^2}{g(\rho_s - \rho)d} = f\left(\frac{V_{mc} d}{\nu}, \frac{d}{h}\right) \quad (4)$$

Segundo esse autor, o número de Reynolds da partícula $V_{mc} d / \nu$ é irrelevante para grãos de densidade normal ($\rho \approx 2,6$) com diâmetros superiores a 3 mm. Dessa forma, a função acima proposta fica no seu 2º membro apenas com a relação diâmetro/altura de água. Assim, a velocidade crítica poderia ser expressa

em função da lâmina de água. Finalmente, o referido pesquisador apresenta a equação final :

$$\frac{\rho V_{mc}^2}{(g(\rho_s - \rho))d} = 2,50 \left(\frac{d}{h}\right)^{-0,20} \quad (5)$$

onde (para as duas equações acima):

V_{mc} = velocidade média de competência

para movimento de grãos isolados.

g = aceleração da gravidade

d = diâmetro médio do sedimento

h = altura da lâmina de água

ρ_s = massa específica do sedimento

ρ = massa específica do líquido

Bogardi (1968) realizou estudo similar a Neill (1967) utilizando dados de diversos pesquisadores. Também preferiu a velocidade média por ser de fácil obtenção. Após alguma elaboração, sugere a seguinte função adimensional :

$$\frac{V_c}{\sqrt{gh\rho'}} = F\left(\frac{d g^{1/3}}{v^{2/3}}, \frac{h}{d}\right) \quad (6)$$

Dessa forma, também considerou que a velocidade média crítica é função também do fator h/d . A seguir, o autor apresenta duas equações considerando separadamente a influência de cada um dos números adimensionais do 2º membro da relação (6):

$$\frac{V_c}{\sqrt{gd\rho'}} = 1,7 \left(\frac{h}{d}\right)^{-0,405} \quad (7)$$

$$\frac{V_c}{\sqrt{gh\rho'}} = 0,085 \left(\frac{d g^{1/3}}{v^{2/3}}\right)^{0,34} \quad (8)$$

O autor finalmente apresenta uma outra fórmula em função da velocidade de cisalhamento:

$$\frac{V_c}{U_*} = 0,000044 \left(\frac{d g^{1/3}}{v^{2/3}}\right)^{1,8} \left(\frac{h}{d}\right)^{1,6} \quad (9)$$

sendo (para as 4 eq. anteriores):

$U_* = (g h J)^{0,5}$; (Velocidade de cisalhamento).

J = declividade da linha de energia.

d = diâmetro da partícula.

h = altura de água.

g = aceleração da gravidade.

v = viscosidade cinemática.

V_c = velocidade crítica de início de erosão.

ρ_s = massa específica do sedimento.

ρ = massa específica do líquido.

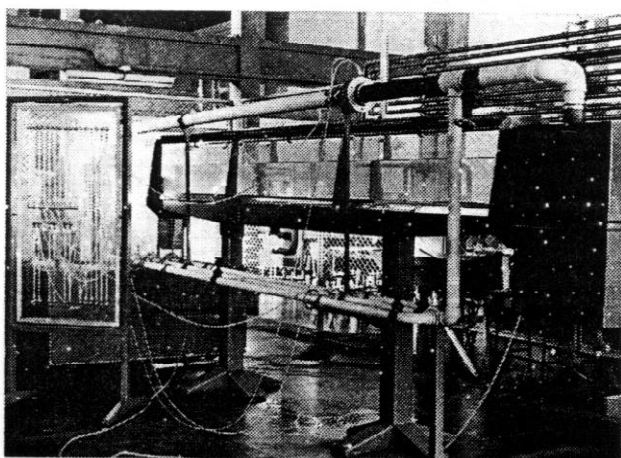
$\rho' = (\rho_s - \rho) / \rho$

Infelizmente os coeficientes de correlação não são apresentados pelo autor dificultando uma análise mais criteriosa do ajuste do pontos experimentais. Dessa forma , por exemplo, a avaliação da real influência do fator h/d na velocidade crítica fica um pouco prejudicada.

CANAL DE ENSAIOS E METODOLOGIA

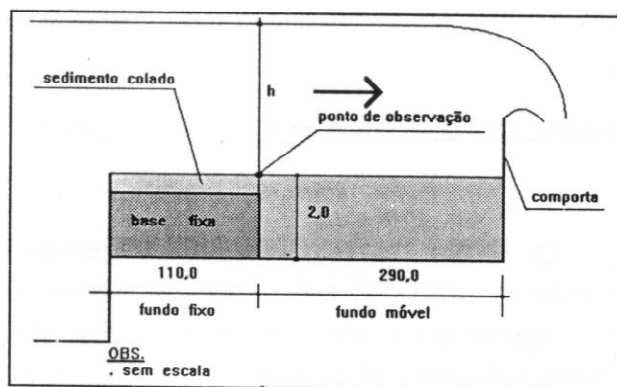
Os ensaios foram realizados no primeiro semestre de 1995, no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá. As dimensões do canal utilizado são: 0,20 x 0,40 x 4,00 m respectivamente, largura, altura das paredes e extensão. As paredes sendo totalmente de vidro permitem ampla visualização do movimento do sedimento. Através de uma bomba centrífuga de

5 CV a água escoar em circuito fechado sendo a vazão medida por um diafragma conectado com piezômetros de mercúrio situado à montante do canal. A máxima vazão permitida neste canal é de 20 l/s. A declividade de fundo é facilmente ajustada por uma manivela situada à jusante. Dessa forma, o canal é praticamente uma viga que pode girar em torno de uma rótula à montante. Uma ponta linimétrica mede as alturas de água no ponto de observação da erosão. As Figuras 2 e 3 a seguir mostram, respectivamente, uma fotografia das instalações e um corte longitudinal da montagem do fundo do canal.



FOTOGRAFIA DAS INSTALAÇÕES

Figura 2

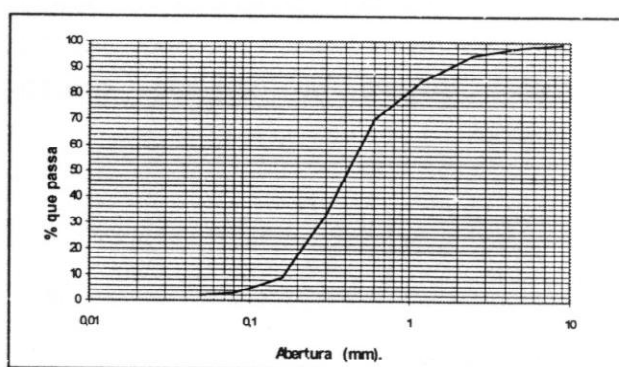


CORTE LONGITUDINAL ESQUEMÁTICO DO FUNDO

Figura 3

O sedimento original provém do noroeste do Paraná, próximo à Maringá, cuja curva

granulométrica original está sintetizada na Figura 4. Do material adquirido foram extraídas por peneiramento 10 amostras de diâmetro praticamente constante. As curvas granulométricas de cada amostra são próximas às retas verticais já que cada sedimento classificado está situado entre duas peneiras contíguas da série ABNT. Em cada uma das 10 amostras, o diâmetro médio utilizado é a média aritmética das aberturas das referidas peneiras. O peso específico medido em laboratório foi de 2 645 kgf/m³. Um estudo rigoroso da forma dos grãos não foi objetivo central deste trabalho mas, de qualquer forma, a análise visual com uma lente indica que, segundo Pettijohn (1957), o grau de arredondamento é "subarredondado" (de 0,25 a 0,40). A Tabela 1 a seguir apresenta o material já selecionado para os ensaios:



CURVA GRANULOMÉTRICA DO SEDIMENTO ORIGINAL.

Figura 4

SEDIMENTOS UNIFORMES

Tabela 1

UTILIZADOS/CRITÉRIO DE ROUSE (1950)

Sedimento	Identificação	Diâmetro (mm)
Cascalho fino	A	4,53
Cascalho muito fino	B	3,90
Cascalho muito fino	C	2,93
Cascalho muito fino	D	2,18
Areia muito grossa	E	1,84
Areia muito grossa	F	1,43
Areia muito grossa	G	1,01
Areia grossa	H	0,71
Areia média	I	0,50

A metodologia dos ensaios está resumida a seguir:

- a) Escolhe-se um sedimento estendendo-o completamente plano sobre o fundo (ver Figura 3).
- b) Levanta-se a comporta de jusante (um vertedor retangular) à uma altura de aproximadamente 20 cm.
- c) Coloca-se o canal na posição horizontal.
- d) Impõe-se uma vazão de ensaio que não deverá erodir o leito móvel devido a baixa velocidade ocasionada pela ação da comporta de jusante.
- e) Inclina-se o canal até uma declividade escolhida.
- f) Lentamente a comporta é baixada aumentando gradualmente a velocidade da água.
- g) No **ponto de observação** verifica-se se o sedimento iniciou algum movimento.
- h) Repete-se os itens (f) e (g), até a identificação da situação crítica de início de erosão registrando-se então todos os parâmetros hidráulicos correspondentes à essa situação.
- i) Esvazia-se o canal refazendo-se o fundo plano.
- j) Alterando-se vazão líquida, declividade e tipo de sedimento compõe-se ordenadamente um quadro de dados observados sempre em condições críticas.

OBS.: Identificação do 'início de erosão': Uma situação exata de início de erosão não

é de fácil determinação e pode ser objeto de críticas. Com o crescimento gradual da velocidade média, o número de grãos que inicia o movimento é crescente até um estágio posterior de transporte de sedimentos generalizado. No caso presente, embora não muito perceptível visualmente, foi detectada em praticamente todo o canal uma curva de remanso do tipo M1 segundo Chow (1959). Na extremidade de jusante, devido ao vertedor, aparece com extensão muito reduzida, a curva M2 já de pouco interesse. Em função disso, o **ponto de observação** (ver Figura 3) sempre tem a menor altura e a máxima velocidade do trecho de fundo móvel que é o de interesse. Assim, a erosão sempre inicia no referido ponto de observação e progride para jusante com o crescimento da velocidade média. Nos primeiros ensaios, tal fato passou despercebido e, após sua identificação, tornou-se muito útil para o estabelecimento de um **critério** fixo e objetivo para identificação do início de erosão que é simplesmente o seguinte:

"Uma situação hidráulica de início de erosão é identificada quando os grãos situados exatamente no ponto de observação começam seu movimento".

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste trabalho, em cada ensaio, foram observados, **sempre em situação crítica de início de erosão**, os seguintes parâmetros no ponto de observação: diâmetro médio do

sedimento (d), declividade do fundo (I), vazão líquida total na secção transversal (Q), temperatura da água (T), altura da lâmina de água (h) e, principalmente, movimento das partículas no fundo. Com esses dados observados, calcularam-se para cada sedimento, velocidades médias críticas de início de erosão (V_c) para 3 declividades e várias vazões líquidas. Além disso, também foram calculados : números de Froude (F), números de Reynolds (R), relações h/d e valores dos adimensionais: $d \cdot g^{1/3} / \nu^{2/3}$ e $V_c / [(g h \rho')^{1/2}]$, sendo $\rho' = (\rho_s - \rho) / \rho$. Os símbolos estão logo a seguir explicados junto com as fórmulas.

Inicialmente foram previstos 30 ensaios para cada sedimento assim distribuídos: 10 vazões líquidas para cada uma das 3 declividades de fundo. Devido a problemas de transbordamento, início de formas de fundo, não concretização da condição crítica por limitações do equipamento, etc., o número de vazões líquidas mencionadas nem sempre foi cumprido.

A Tabela 2 mostra apenas os valores críticos máximos e mínimos de h , Q , F e R ensaiados fornecendo assim uma idéia geral sobre as faixas de alcance de cada parâmetro no presente trabalho. A totalidade dos dados não é fornecida numericamente pois ocuparia um espaço razoável. De qualquer forma, todos os pontos referentes aos ensaios, podem ser contemplados graficamente nas figuras 5, 6, 7, 8 e 9. Como já foi mencionado anteriormente, também na referida Tabela 2, qualquer valor (tanto máximo como mínimo) corresponde sempre a uma situação crítica de início de erosão.

RESUMO DOS PRINCIPAIS**Tabela 2****PARÂMETROS MÁXIMOS E MÍNIMOS**

Sedimento	h (cm)	Q (l/s)	Nº de Froude (F)	Nº de Reynolds (R)
A	18,66	19,3	0,4	33670
d = 4,53 mm	3,42	3,2	1,1	12578
B	19,00	19,3	0,4	33276
d = 3,90 mm	5,50	2,5	1,0	9984
C	25,20	19,3	0,2	27415
d = 2,93 mm	3,82	2,0	0,7	7855
D	28,36	19,3	0,2	25156
d = 2,18 mm	3,40	2,5	0,6	9328
E	27,94	19,3	0,2	25435
d = 1,84 mm	2,91	2,0	0,6	7746
F	30,10	19,3	0,2	24065
d = 1,43 mm	3,60	2,5	0,6	9191
G	33,92	17,1	0,1	19939
d = 1,01 mm	3,90	2,0	0,4	7246
H	32,08	15,3	0,1	18523
d = 0,71 mm	4,15	2,0	0,4	7138
I	33,52	15,3	0,1	17578
d = 0,50 mm	5,00	2,5	0,3	8333
J	33,52	15,3	0,1	17586
d = 0,36 mm	4,31	2,0	0,3	6988

Os números de Froude sendo quase sempre inferiores à unidade, indicaram regimes lentos. Os números de Reynolds (aqui $R = VR / \nu$, sendo R o raio hidráulico) mostram que os escoamentos foram turbulentos já que são superiores a 500. O mais baixo valor observado desse último parâmetro foi de 6988 (com o sedimento "J"). A temperatura média da água na época dos ensaios foi de aproximadamente 19° C e a correspondente viscosidade cinemática média (ν) utilizada foi de $0,000001 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

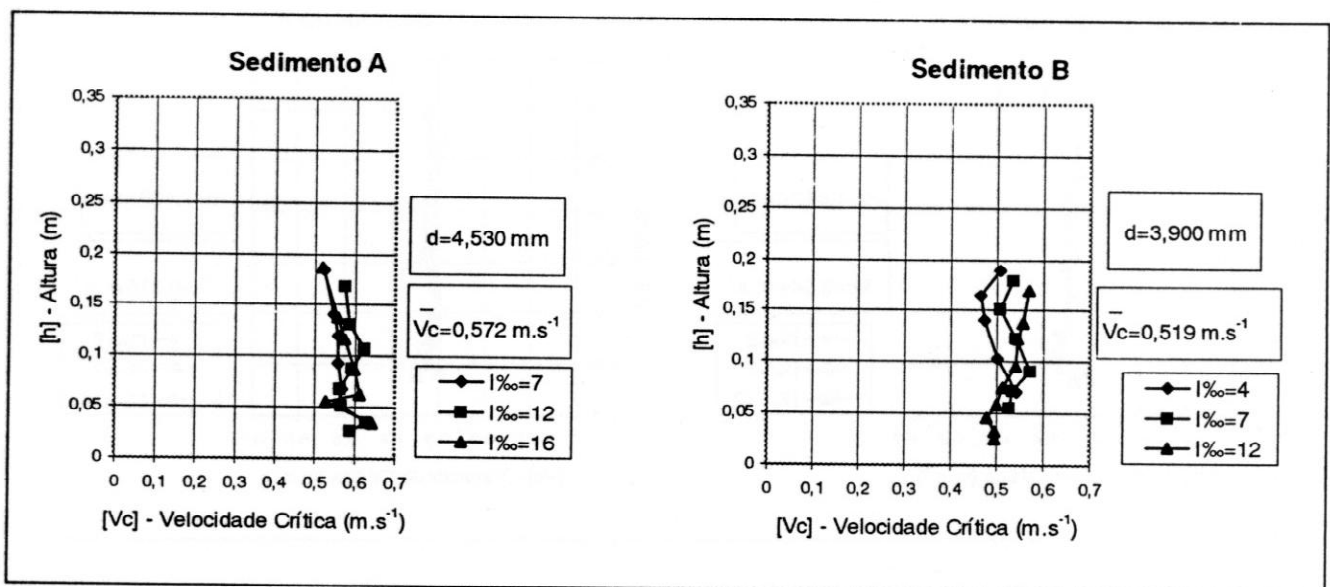
As figuras 5, 6, 7, 8, e 9 apresentam as velocidades críticas de início de erosão (V_c) e alturas de água (h) para todos os ensaios em

todas as declividades. Com essas figuras nota-se que a velocidade crítica não varia muito em relação às distintas alturas e declividades de fundo ensaiadas. Em outras palavras, os pontos plotados neste tipo de gráfico, não permitem evidenciar de maneira clara alguma tendência ou inclinação. Por essa razão, nesses mesmos gráficos somente estão calculados e apresentados em destaque a média das velocidades médias críticas de início de erosão para cada sedimento.

A Figura 10 mostra os valores mínimos possíveis da relação h/d neste tipo de ensaios. Abaixo de tais valores o ensaio não tem validade pois o escoamento em pouquíssimo tempo perde a estabilidade criando formas de fundo e ondulações na superfície. Nesses

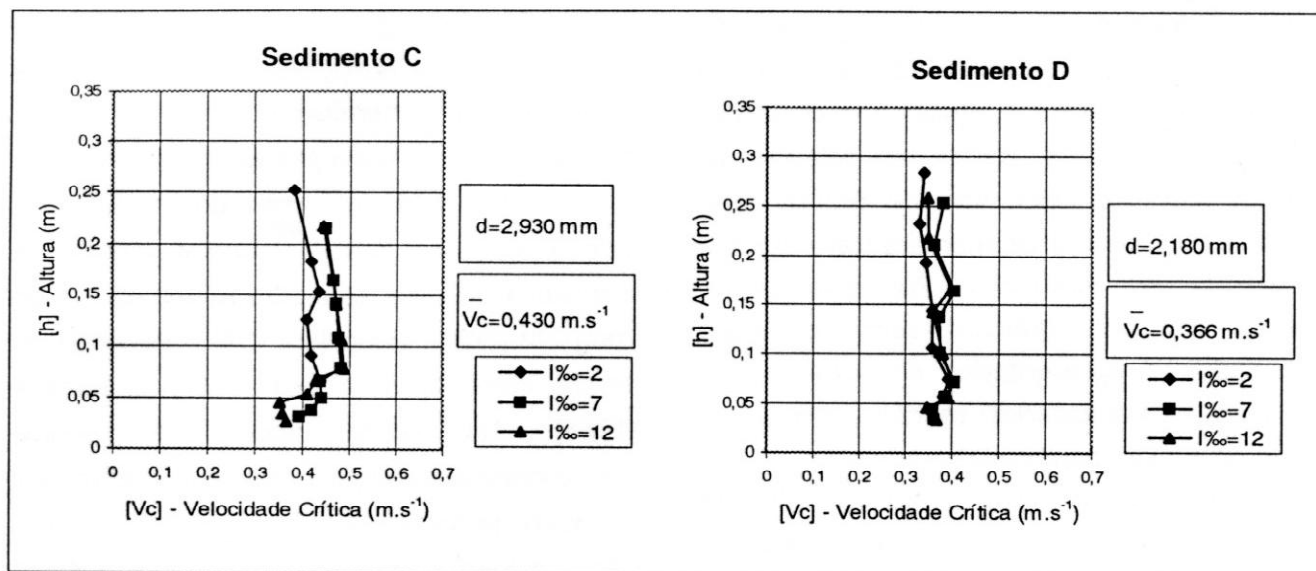
casos, o início de erosão não pode ser determinado por confundir-se com transporte de sedimentos generalizado.

A Figura 11 apresenta a plotagem, em abcissas, da relação h/d e, em ordenadas, do adimensional: $V_c / (g h \rho')^{1/2}$. O que se pretende é a busca de uma expressão matemática mais completa para a velocidade crítica de início de erosão como fizeram Neill (1967) e Bogardi (1968). Na citada figura, os pontos correspondentes a alguns sedimentos de menor diâmetro (propiciando valores de $h/d > 100$), não seguiram a mesma tendência dos maiores grãos. Percebe-se assim que a extremidade direita do referido gráfico está um pouco mais elevada não permitindo um bom ajuste.



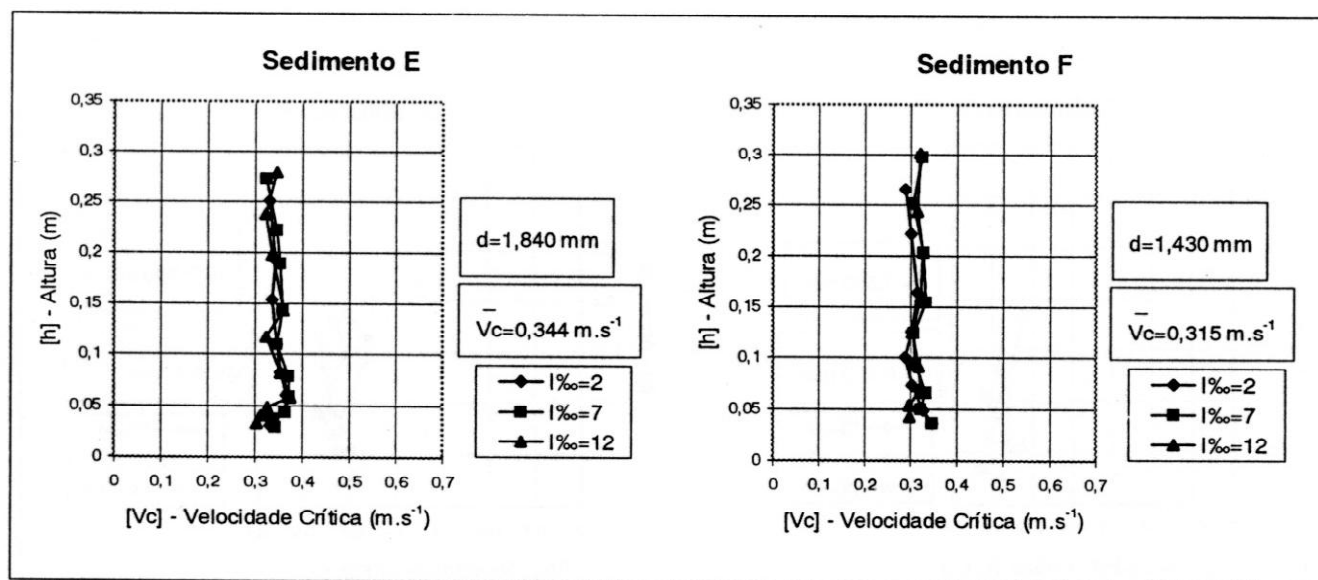
VELOCIDADES CRÍTICAS; SEDIMENTOS A E B

Figura 5



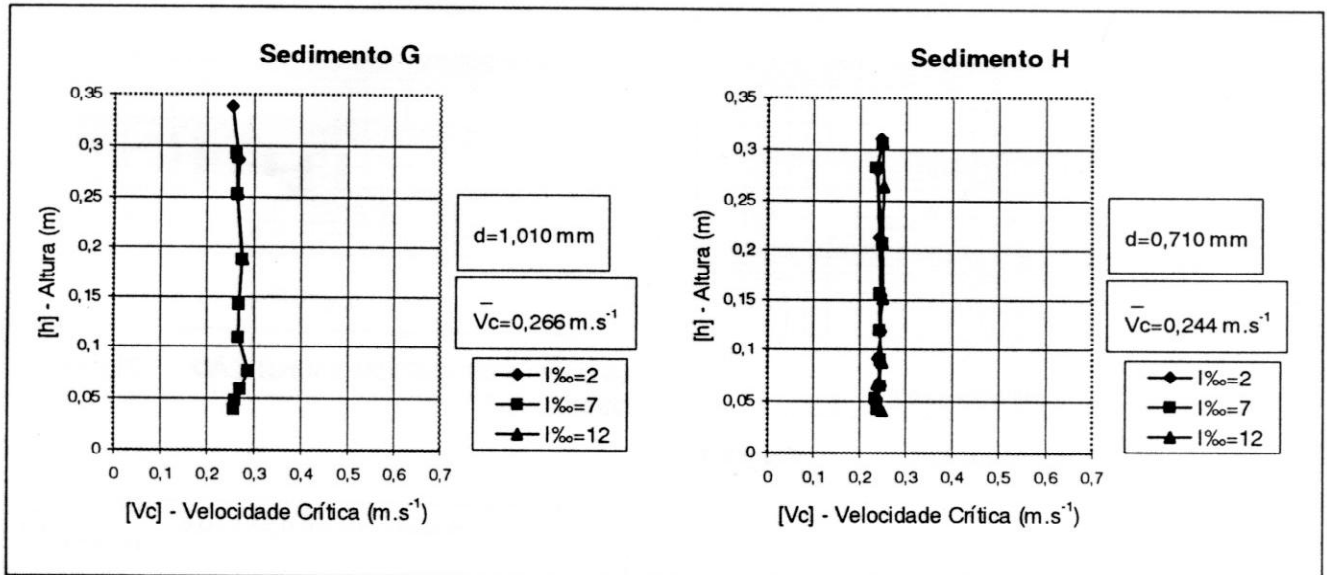
VELOCIDADES CRÍTICAS; SEDIMENTOS C E D

Figura 6



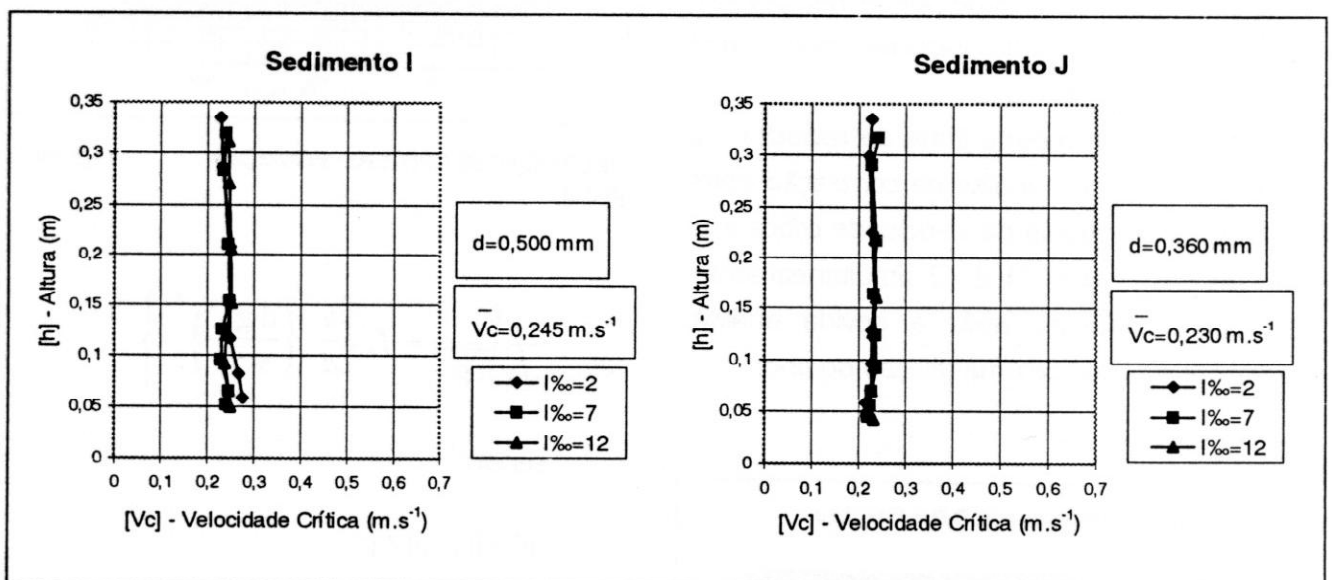
VELOCIDADES CRÍTICAS; SEDIMENTOS E E F

Figura 7



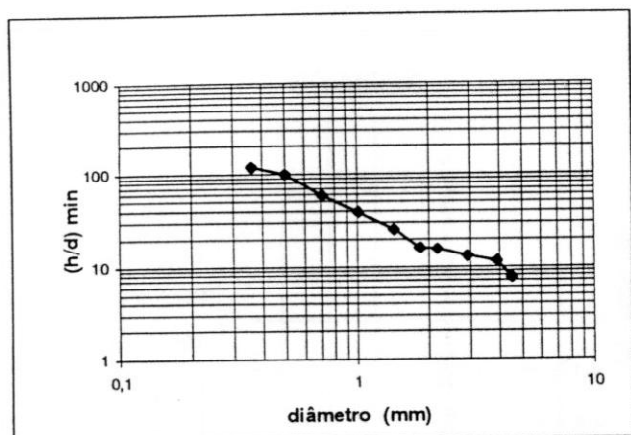
VELOCIDADES CRÍTICAS; SEDIMENTOS G E H

Figura 8



VELOCIDADES CRÍTICAS; SEDIMENTOS I E J

Figura 9

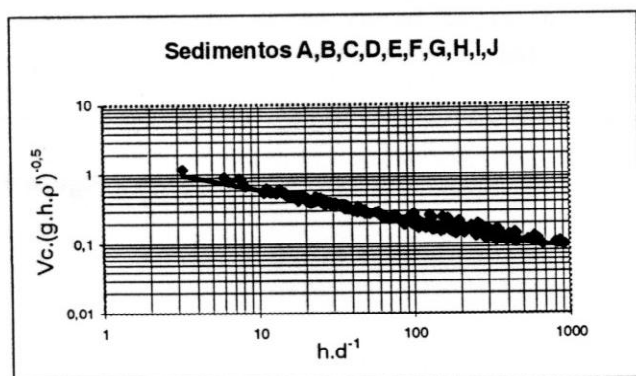


VALORES MÍNIMOS POSSÍVEIS DO FATOR H/D

Figura 10

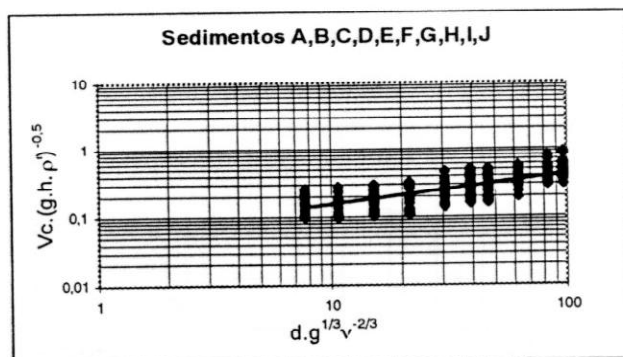
A seguir, na Figura 12, foi realizada a mesma plotagem mas com o adimensional $dg^{1/3}/v^{2/3}$ como abcissa. Nesse caso, como se pode perceber, a nuvem de pontos não permite adequado ajuste tendo inclusive muito mais dispersão que o anterior.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, o próximo passo foi a análise da correlação entre o citado adimensional da velocidade crítica e as abcissas das Figuras 11 e 12 simultaneamente. Em outras palavras, após a devida análise, sugeriu-se a busca de uma relação do tipo:



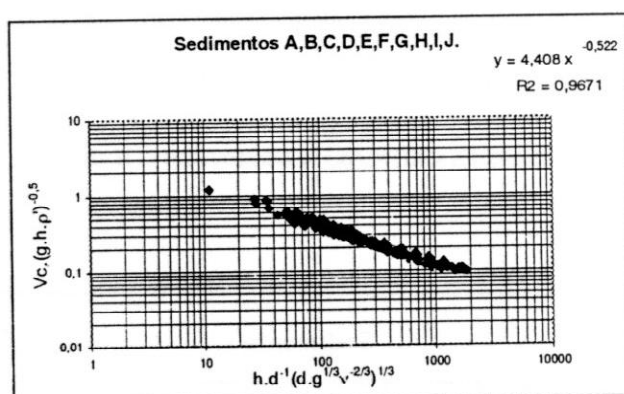
VELOCIDADES CRÍTICAS EM FUNÇÃO DE H/D

Figura 11



VELOCIDADES CRÍTICAS EM FUNÇÃO DE $D G^{1/3} v^{-2/3}$

Figura 12



VELOCIDADES CRÍTICAS: FÓRMULA FINAL

Figura 13

$$\frac{V_c}{\sqrt{g h \rho'}} = f_1 \left\{ \frac{h}{d} \left(\frac{d g^{1/3}}{v^{2/3}} \right)^A \right\} \quad (10)$$

sendo:

$$\rho' = (\rho_s - \rho) / \rho$$

demais símbolos já explicados.

Após várias tentativas, chegou-se ao valor do coeficiente "A" igual a 1/3 sendo o mais adequado para o ajuste em questão. O passo seguinte foi a plotagem dos dois membros da função em um novo gráfico. Dessa forma, é possível conseguir-se a

relação matemática entre os referidos membros já que a Análise Dimensional não possui esse alcance. O ajuste final está então apresentado na Figura 13 acima. A equação final é a seguinte:

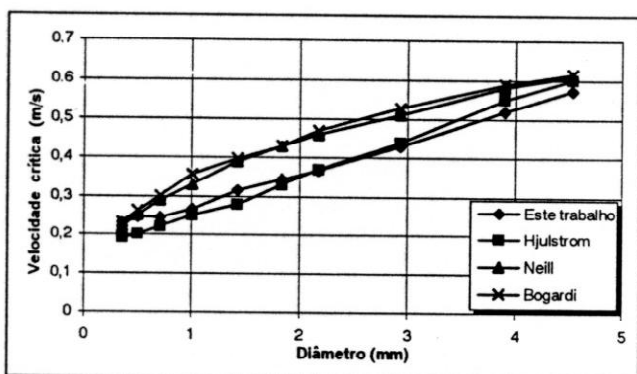
$$\frac{V_c}{\sqrt{g h \rho'}} = 4,408 \left\{ \frac{h}{d} \left(\frac{d g^{1/3}}{v^{2/3}} \right)^{1/3} \right\}^{-0,522} \quad (11)$$

com coeficiente de correlação igual à 0,9671.

Uma expressão mais compacta pode ser a seguinte:

$$\frac{V_c}{\sqrt{g h \rho'}} = 4,408 \left(\frac{d^{0,348} v^{0,116}}{g^{0,058} h^{0,522}} \right) \quad (12)$$

O resultado mostra finalmente uma nova equação para a velocidade crítica de início de erosão expressa não só em função do diâmetro e massa específica do sedimento (como na maneira mais clássica e simplificada) como também da relação h/d .



COMPARAÇÃO

Figura 14

COMPARAÇÃO

Uma comparação de velocidades críticas de vários pesquisadores envolve algumas dificuldades visto que as metodologias e objetivos de cada um nem sempre coincidem. Por exemplo: os resultados de Fortier et al. (1926) servem para cálculos aproximados visto que somente apresentam faixas de diâmetros; a equação de Mavis et al. (1937) depende do conhecimento da velocidade de fundo não contemplada no presente trabalho; os fatores de correção da velocidade permissível do "Bureau of the Methodology of the Hydro-Energy Plan" (1936) estão discretizados para os seguintes valores de profundidade: 0,30; 0,60; 1,00; 1,50; 2,00; 2,50 e 3,00 m, portanto fora do alcance do presente trabalho. Dessa forma, a comparação se limitará aos três trabalhos seguintes: Hjulström (1935); Neill (1967) e Bogardi (1968). Para os dois últimos utilizou-se como valor de "h" a média das alturas ensaiadas em cada diâmetro de sedimento e, para Hjulström suas velocidades de erosão para partícula previamente assentada. Os dados correspondentes ao presente trabalho são os valores médios das velocidades médias críticas mostrados nas figuras 5, 6, 7, 8 e 9. A Figura 14 mostra o gráfico correspondente à essa comparação. Em termos médios, as velocidades críticas deste trabalho são bastante próximas das de Hjulström ao passo que Neill e Bogardi, quase coincidentes, apresentam valores sempre um pouco superiores.

CONCLUSÕES

- I. Apesar das reduzidas dimensões do canal de ensaios e suas limitações, foi perfeitamente possível e, sobretudo **confiável**, a determinação de uma equação de velocidades críticas de início de erosão em regimes lentos. O cálculo da tensão de cisalhamento não é recomendado pela inconsistência dos resultados.
O critério para a identificação visual das situações hidráulicas críticas adaptado ao caso presente demonstrou-se plenamente satisfatório.
- II. No canal utilizado, a faixa fisicamente viável de diâmetros de sedimento para ensaios de início de erosão em regimes lentos é de aproximadamente 0,3 a 4,6 mm. Abaixo do limite inferior, seria necessária uma lâmina de água bem maior resultando em transbordamento. Por outro lado, diâmetros acima de 4,6 mm implicariam no caso presente em trabalhar com regimes super críticos e declividades acentuadas.
- III. Os valores mínimos possíveis da relação h/d neste tipo de ensaios são observados fornecendo assim, subsídios para outros trabalhos do gênero. Abaixo de tais valores o ensaio perde o sentido pois o escoamento desestabiliza-se facilmente criando quase que instantaneamente formas de fundo e ondulações na superfície. Nesses casos, o início de erosão não pode ser determinado por confundir-se com transporte generalizado.

RECOMENDAÇÕES

Com as devidas adaptações criativas, **incentiva-se** na Hidráulica Fluvial testes de equipamentos que muitas vezes são considerados a priori inadequados ou insuficientes. Dessa forma, a questão da escala pode receber contribuições importantes.

REFERÊNCIAS

- BOGARDI J L (1968) The critical mean velocity as a criterion for incipient sediment motion., *Proceedings of the Symposium on Current Problems in River Training and Sediment Movement*, Budapest.
- BUREAU OF THE METHODOLOGY OF THE HYDRO-ENERGO PLAN (1936) Standards for Permissible Non-eroding Velocities, *Gidrotekhnicheskoye Stroitel'stvo, Obedinennoe Nauchno-Tekhnicheskoe Izdatel'stvo*, Moscow.
- CARSTENS M R (1966) An analytical and experimental study of bed ripples under wake waves, *Quart. Reports 8 and 9, Georgia Institute of Technology, School of Engineering*, Atlanta.
- CHOW V T (1959) *Open-Channel Hydraulics*, Mc.Graw-Hill Book Company, 680 p., New York.
- FORTIER S e SCOBIE F C (1926) Permissible canal velocities, *Transactions, ASCE*, vol 89, pp 940-956.
- GRAF W H (1971) *Hydraulics of Sediment Transport*, McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, McGraw-Hill Book Company Inc., New York.
- HJULSTRÖM F (1935) The morphological activity of rivers as illustrated by River Firs, *Bulletin of Geological Institute, Uppsala*, Vol. 25, chap. III.
- LANE E W (1955) Design of stable channels, *ASCE, Transactions*, Vol 120, p 1234-1279, New York.
- MAVIS F T ; LIU T e SONECK E (1937) The transportation of detritus by flowing water *University of Iowa Studies in Engineering*, nº 341.
- MEDEIROS P A e MARIN E M (1994) Análise experimental da capacidade de transporte de sedimentos em fundos fixos. *Revista Brasileira de Engenharia / Caderno de Recursos Hídricos*. Vol 12, nº 2 Dez., Porto Alegre.
- NEILL C R (1967) Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed material, *IAHR, 12th Congress*, Fort Collins.
- SIMONS D B e SENTURK F (1977) *Sediment Transport Technology*, Water Resources Publications, 807 p., Fort Collis.

ABSTRACT

Incipient motion in a small laboratory channel

The adequacy of a small laboratory channel for reliable studies on incipient motion was tested. Ten constant diameter cohesionless sediments were used. The visual identification criterion of beginning of motion has been adapted to this case. The instrumentation utilized were the regular and simple devices for keeping low costs. Critical tractive forces computations are not suitable here because the results lack of consistency, due to many assumptions and difficulties. On the other hand, the critical mean velocity appeared to be fully representative. A new equation of this last parameter is presented including as well as the water depth influency.

Key words : *Fluvial Hydraulics / Sediment Transport / Erosion and Sedimentation*