

FATOR DE ENCOBRIMENTO E SELETIVIDADE NO TRANSPORTE: ANÁLISE DO FENÔMENO E ESTUDO EXPERIMENTAL

Lúcio Flávio Ferreira Moreira

Departamento de Engenharia Civil/CT/UFRN
59000-000 Campus Universitário Natal-RN
lucio@ct.ufrn.br

Eduardo Martínez Marin

Depto. de Engenharia Civil: Hidráulica e Energética
E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos/Universidad Politécnica de Madrid
28040 Ciudad Universitaria - Madrid, Espanha - Tel.: 715.0247

RESUMO

Estudou-se o grau de seletividade no transporte de misturas de sedimento arenoso mediante a realização de ensaios utilizando um canal equipado com um sistema de alimentação de sedimentos. Para isso, foram utilizadas 4 diferentes misturas, com diâmetros que variam entre 0,59 mm e 1,91 mm. O método do transporte de referência idealizado por Parker et al. (1982) foi adotado para determinar a tensão crítica do início do transporte. No desenvolvimento do estudo, as misturas M1 e M2, com granulometria aproximadamente uniforme, foram representadas pelos seus diâmetros medianos D_{50} e submetidas a uma análise geral do transporte da mistura. As misturas M3 e M4, por sua vez, apresentaram uma granulometria com distribuição logarítmica e foram submetidas à análise do transporte das frações que compõem a mistura. Além disso, M2 e M4 têm o mesmo diâmetro mediano. Os valores obtidos dos parâmetros da função de encobrimento refletem uma condição de igualdade no transporte das frações. As tensões de cisalhamento críticas obtidas para M2 e M4 confirmam o parâmetro D_{50} como representativo da mistura. Os resultados obtidos permitem concluir que a tensão crítica (τ_{c50}) determinada a partir da análise geral do transporte, pode ser suficiente para expressar o valor médio de tensão crítica que atua em cada fração da mistura.

INTRODUÇÃO

Muitos cursos fluviais apresentam sinais que refletem a ocorrência de efeitos da seletividade no movimento das partículas. Esse fenômeno pode ser responsável, por exemplo, pela redução no diâmetro do material transportado à medida que o rio vai alcançando zonas mais planas e de menor amplitude do relevo. Com efeito, alguns estudos apontam para a importância do efeito do grau de seletividade na granulometria e volume do material transportado (Shih e Komar, 1990, Wathen *et al.*, 1995).

Nos últimos anos, o grau de seletividade no transporte de misturas tem sido objeto de ampla investigação (Parker *et al.*, 1982, Parker e Klingeman, 1982, Wilcock, 1987, Wilcock, 1993). Os estudos em geral apontam para a possibilidade de se alcançar situações de igualdade no movimento das frações em diferentes condições hidráulicas (Andrews, 1984, Wiberg e Smith, 1987, Wilcock e Southard, 1988).

Se consideramos um canal submetido a uma condição hidráulica suficiente para que o sedimento do leito permaneça em repouso, o início da erosão pode ser relacionado com o menor incremento da tensão de cisalhamento atuante (τ_0) suficiente apenas para vencer a inércia provocada pelo peso do grão, o que produz como resultado o movimento de uma certa quantidade de partículas.

Uma análise geral dos estudos já realizados permite verificar que a própria definição do estado crítico do início da erosão reflete, em muitos casos, um problema de natureza conceitual, o que pode justificar as

diferentes formulações com o objetivo de definir o fenômeno.

Os estudos de Einstein (1950) e Stelczer (1987), entre outros, focalizaram o caráter estocástico do movimento da partícula, resultado dos efeitos de flutuação da velocidade e da variação temporal e espacial da distribuição do sedimento no leito. Segundo Stelczer, o deslocamento da partícula obedece a sucessivos períodos de movimento-reposo. A turbulência provocada pelo fluxo dá origem à ação de forças que atuam no nível da partícula presente no leito.

Wiberg e Smith (1987, 1989), por sua vez, obtiveram uma relação entre o início da erosão e uma força, dirigida para cima, com intensidade suficiente para provocar o deslocamento do grão inicialmente em repouso. A resistência ao movimento inicial está relacionada com o grau de proteção ou confinamento da partícula, sua área de exposição ao fluxo, tamanho, densidade, declividade da superfície do leito do curso fluvial, etc.

O parâmetro de Shields (1936) constitui um padrão de referência para muitos trabalhos posteriores. Utilizando um método indireto, Shields associou o transporte com um valor de tensão adimensional. Trabalhou com sedimentos de diferentes tamanhos e densidades, com granulometria uniforme. A análise dimensional permitiu obter uma relação entre as forças do fluxo responsáveis pelo movimento e o peso da partícula, ou seja,

$$\frac{F_{\text{fluxo}}}{F_{\text{peso}}} = \frac{\rho u_*^2 D^2}{(\gamma_s - \gamma) D^3} = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) D} = \phi \left(\frac{u_* D}{\nu} \right) \quad (1)$$

O primeiro termo é definido como a tensão adimensional de Shields (τ^*). O segundo termo expressa o grau de turbulência do fluxo nas zonas mais próximas da superfície do leito, sendo denominado de número de Reynolds da partícula (Re^*). Nele, o comprimento característico é definido pelo diâmetro da partícula (D).

O parâmetro de Shields serve para medir as condições de resistência ao movimento da partícula no leito fluvial, caracterizando o seu grau de estabilidade para

uma determinada condição hidráulica. Como resultado do seu estudo, Shields obteve um gráfico que expressa a relação funcional entre os parâmetros τ^* e Re^* . O início do movimento da partícula é, assim, resultado da ação de fatores relacionados entre si: propriedades do sedimento, da água e nível de turbulência do fluxo.

De acordo com o diagrama de Shields, o valor de τ^* relacionado com condições de turbulência totalmente desenvolvida (característica do comportamento dos cursos aluviais) é 0,06. Por sua vez, o estudo de Meyer-Peter e Müller (1948) relaciona o transporte inicial, para as mesmas condições de turbulência, com um valor de τ^* igual a 0,047. Tratando desse tema, Andrews (1994) realizou alguns estudos de campo num rio da Califórnia. Seus resultados revelaram que aproximadamente 95% do volume de material sólido era transportado sob uma faixa de tensão adimensional (τ^*) variando entre 0,02 e 0,06. Com efeito, esses estudos servem para demonstrar que o parâmetro de Shields pode assumir valores diferentes dependendo das condições de funcionamento do curso fluvial.

Os estudos de seletividade no transporte refletem uma preocupação básica comum: a capacidade de movimento de cada fração que compõe a mistura pode variar como resultado das condições do fluxo e da granulometria. Ou seja, os efeitos do encobrimento e exposição das partículas produzem uma relação fluxo-transporte que normalmente foge às concepções utilizadas nas fórmulas de transporte tradicionais.

Do ponto de vista microscópico, as frações mais grossas servem de proteção às mais finas. Além disso, a área de exposição dos grãos maiores aumenta a probabilidade deles serem deslocados pelo fluxo. Paralelamente aos efeitos do encobrimento, considera-se também a influência de fatores tais como a disponibilidade de material sólido para o transporte, a geometria e declividade do leito, entre outros.

O estudo de Parker *et al.* (1982) focaliza os efeitos da seletividade para diferentes condições de transporte. Para isso, analisou-se uma série de medições de transporte de um rio de montanha (Oak

Creek), cujo leito apresentava um sedimento com granulometria grossa, abrangendo um intervalo de tamanhos entre 0,6 mm e 102 mm. Partindo-se do princípio de que o próprio leito atua como um regulador do transporte, verificou-se uma tendência à igualdade plena no transporte das frações a partir de uma determinada condição de fluxo.

Num trabalho posterior, Shih e Komar (1990) utilizaram os dados originais de Parker para demonstrar a ocorrência de uma variação sistemática na granulometria do material transportado como resultado do aumento das condições de fluxo, o que foi denominado de seletividade no transporte. Utilizou-se uma função probabilística de distribuição de frequência com o objetivo de simular a variação da granulometria. Os resultados obtidos revelaram a ocorrência de transporte simultâneo somente a partir de um certo valor de τ_0 , situação em que a granulometria do material transportado se assemelha à da superfície do leito.

A concepção original do método do transporte de referência foi aperfeiçoada por Parker (1990), levando-se em conta o fato de que o grau de seletividade está relacionado com o material da superfície do leito que está diretamente disponível à ação do fluxo. O método permite determinar um valor crítico de tensão adimensional (τ_{ci}^*) associado com um valor adimensional do transporte, constante e de pequeno valor, aplicado a todas as frações da mistura. Utiliza os dados de transporte medidos de uma série de situações de fluxo próximas ao início do transporte. Assim, o valor do transporte normalizado de Einstein, W_i^* , de referência, é igual a 0,002. Utilizam-se as relações descritas a seguir, aplicadas a cada fração individual,

$$\tau_i^* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)D_i} \quad (2)$$

$$W_i^* = \frac{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)q_s}{f_i \left(\frac{\tau_0}{\rho}\right)^{3/2}} \quad (3)$$

Além disso, $q_s = p_i \cdot q_b$; p_i representa o valor percentual de cada fração no transporte, q_b é a vazão sólida por unidade de largura do canal, f_i é o percentual de cada fração presente na superfície do leito e disponível para o transporte. Assim, a relação p_i/f_i expressa o movimento relativo de cada fração com relação à superfície do leito. Ela tende a valores muito próximos de 1 quando todas as frações apresentam a mesma taxa de transporte.

Os valores críticos da tensão adimensional (τ_{ci}^*) são o resultado do ajuste dos pontos $W_i^* - \tau_i^*$ em escala logarítmica para cada fração. Subseqüentemente, os parâmetros da função de encobrimento são obtidos mediante o ajuste dos pontos $\tau_{ci}^* - D_i/D_{50}$ em escala logarítmica, definindo a seguinte relação,

$$\tau_{ci}^* = \alpha \left(\frac{D_i}{D_{50}} \right)^\beta \quad (4)$$

O expoente β é um parâmetro que expressa o grau de simultaneidade no transporte das frações da mistura. Assim, nos casos onde β assume valores muito próximos de -1, o transporte apresenta uma condição de quase perfeita simultaneidade, ou seja, todas as frações são movimentadas ao mesmo tempo, sob um valor constante de τ_{ci} . No entanto, quando β assume valores diferentes de -1, o transporte pode ser caracterizado pela seletividade. Nesse caso, as frações da mistura apresentam um comportamento diferenciado no que se refere à sua capacidade de transporte. Vale salientar o fato de que β pode variar como resultado das condições hidráulicas. Por outro lado, α representa o parâmetro de Shields associado com o diâmetro mediano da mistura, τ_{c50}^* .

Os valores dos parâmetros de encobrimento obtidos em alguns trabalhos vêm relacionados na Tabela 1. Pode-se observar que, apesar da ampla variação nos valores de D_{50} e σ_g das misturas, os parâmetros de encobrimento variam dentro de um intervalo bastante pequeno. Os valores de β variam entre -1,01 e -0,81, o que demonstra

Tabela 1. Resumo dos parâmetros de encobrimento obtidos em vários estudos.

| Mistura | Autor | D ₅₀ | σ_s | α | β |
|----------------|---------------------------|-----------------|------------|----------|---------|
| MIT 1/2 ϕ | Wilcock (1987) | 1,83 | 1,41 | 0,0301 | -1,006 |
| MIT 1 ϕ | Wilcock (1987) | 1,83 | 1,99 | 0,0356 | -0,97 |
| MIT FUNI | Wilcock (1987) | 0,67 | 1,2 | 0,0226 | -0,984 |
| MIT CUNI | Wilcock (1987) | 5,28 | 1,13 | 0,0371 | -1,064 |
| DAY A | Day (1980) | 1,82 | 3,41 | 0,0368 | -0,809 |
| DAY B | Day (1980) | 1,57 | 2,73 | 0,0368 | -0,953 |
| MISRI N1 | Misri et al. (1984) | 2,36 | 2,0 | 0,0475 | -0,997 |
| MISRI N2 | Misri et al. (1984) | 3,81 | 2,71 | 0,0415 | -0,953 |
| MISRI N3 | Misri et al. (1984) | 4,0 | 2,27 | 0,0371 | -0,92 |
| Oak Creek | Milhous (1973) | 19,5 | 4,29 | 0,0732 | -0,979 |
| SS | Kuhnle (1993) | 0,476 | 1,67 | 0,035 | -1,028 |
| SG10 | Kuhnle (1993) | 0,476 | 2,0 | 0,0429 | -1,083 |
| SG25 | Kuhnle (1993) | 0,45 | 4,9 | 0,0407 | -1,028 |
| SG45 | Kuhnle (1993) | 1,0 | 4,97 | 0,0447 | -1,041 |
| Goodwin Creek | | ----- | ----- | 0,0796 | -0,813 |
| M3 | Moreira e Martínez (1996) | 0,94 | 1,4 | 0,048 | -1,0 |
| M4 | Moreira e Martínez (1996) | 1,33 | 1,33 | 0,047 | -0,99 |

uma tendência à igualdade no transporte das frações.

No que se refere à ocorrência da seletividade no transporte, Ashworth e Ferguson (1989) e Wathen *et al.* (1995) realizaram estudos de campo em rios da Escócia e Noruega onde a superfície do leito era composta de sedimento com distribuição bimodal (areia+pedregulho), com uma maior presença da fração grossa (92%). Esses trabalhos revelaram que o transporte da fração de areia ocorria numa condição próxima à simultaneidade, enquanto que a fração de pedregulho demonstrava uma sensível variação no nível de seletividade dos grãos com o aumento da tensão de cisalhamento atuante no leito. Ou seja, o transporte é altamente seletivo para tensões de baixa magnitude, com uma tendência à simultaneidade no transporte quando a tensão de cisalhamento supera um certo valor.

Com efeito, a relação $\tau_{ci}^* - D_i/D_{50}$ permite atestar a importância dos efeitos de interação entre os grãos que compõem a mistura e a sua influência no transporte. As frações mais finas, por apresentarem valores de tensão adimensional crítica mais altos, refletem a influência dos efeitos de proteção e exposição ao fluxo, produzindo como resultado a redução (ou até o cancelamento, em alguns casos) da seletividade no transporte.

Este trabalho tem um caráter experimental. Utilizam-se quatro diferentes misturas de material de tipo arenoso construídas artificialmente. O objetivo é analisar a influência de fatores relacionados com a granulometria da mistura nos efeitos de seletividade no transporte para situações próximas ao início da erosão, utilizando para isso o método do transporte de referência de Parker *et al.* (1982).

METODOLOGIA

As séries de ensaios foram realizadas no Laboratório de Hidráulica da E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos/Universidad Politécnica de Madrid. O canal utilizado possibilita carga hidráulica constante e regime permanente de fluxo nos ensaios. Tem inclinação variável e trabalha com um sistema de alimentação de sólidos em circuito aberto. O sistema experimental está representado na Figura 1. A vazão líquida é medida através de um vertedor de parede delgada com seção retangular. O leito do canal é formado por uma camada do sedimento utilizado no ensaio. O sedimento está confinado entre 2 rampas de concreto pré-moldado instaladas dentro do canal.

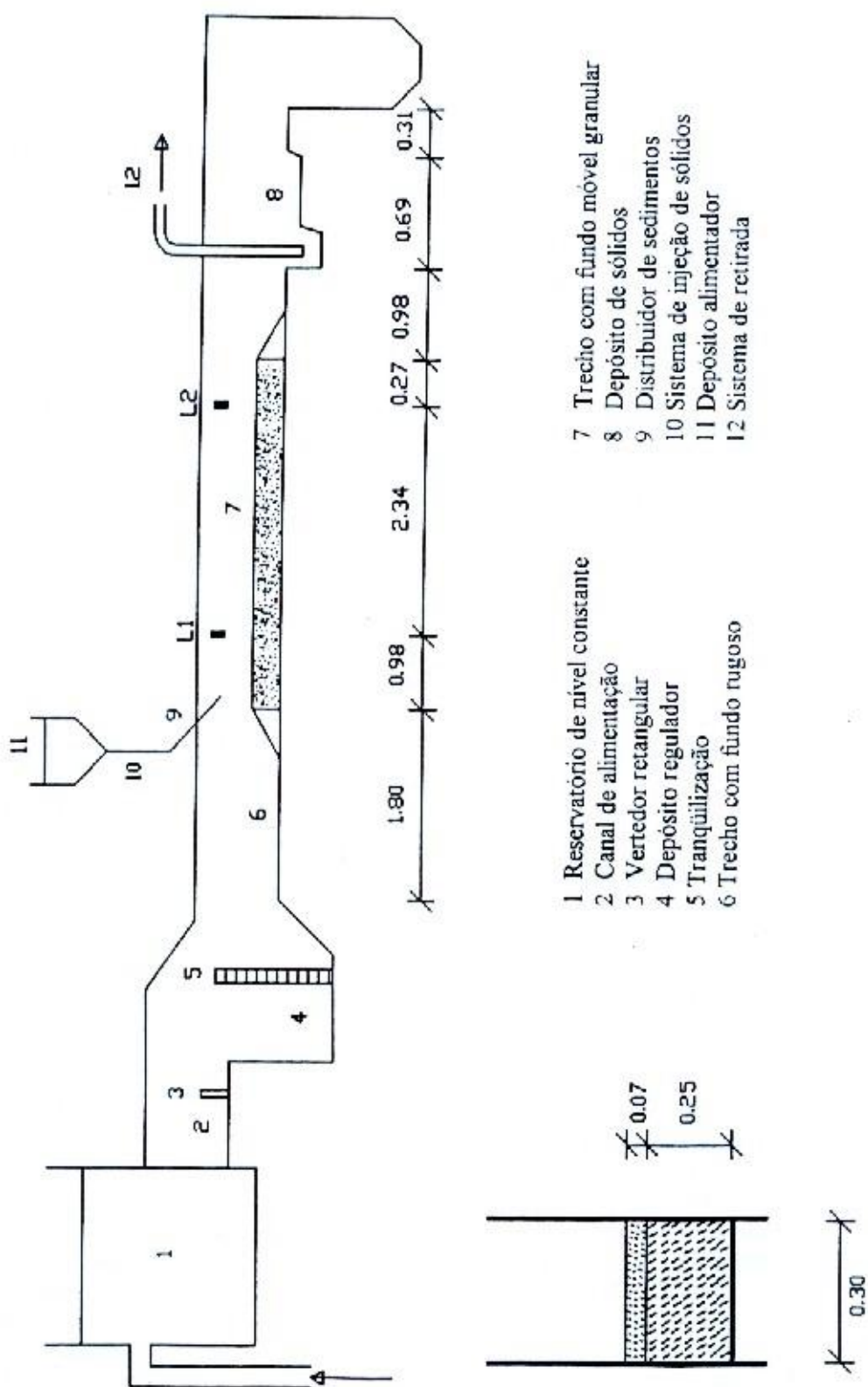


Figura 1. Esquema geral do modelo de ensaio.

O depósito do material transportado ocorre numa estrutura a jusante do trecho de estudo, enquanto que a injeção do sedimento se realiza por gravidade através de um equipamento composto de um reservatório de sedimentos e um sistema de tubulação em PVC. O funcionamento do injetor de sedimentos permite obter condições uniformes para a vazão sólida injetada em função do tempo. O ajuste da injeção se realiza através de uma válvula metálica semi-fixa, instalada no interior da tubulação. Uma mesa repartidora permite a distribuição uniforme do sedimento em toda a largura da seção de entrada do canal.

A coleta do material depositado é feita por sifonamento, utilizando uma mangueira transparente cujo diâmetro permite o fluxo da água com o sedimento. O sifonamento obedece a intervalos de tempo que variam em função do transporte. Sensores eletrônicos, marca Weidmüller, instalados no canal, medem e registram os níveis da lâmina de fluxo em seções fixas do trecho de estudo. Os dados são transmitidos em tempo real a um PC.

As misturas foram preparadas utilizando-se material sólido proveniente do leito do rio Jarama, localizado na Província de Madrid. Trata-se de um sedimento natural com um alto grau de arredondamento dos grãos. Esse material foi submetido a processos de lavagem, secagem e separação dos tamanhos por peneiramento. O peso específico da partícula sólida é de 2620 kg/m^3 .

Foram preparadas artificialmente quatro misturas diferentes (Figura 2), cujos parâmetros granulométricos são descritos na Tabela 2. As misturas M1 e M2 têm distribuição aproximadamente uniforme, enquanto as misturas M3 e M4 têm distribuição log-normal. Além disso, M2 e M4 possuem o mesmo diâmetro mediano D_{50} . Os procedimentos de medição do transporte adotados para as misturas M1 e M2 consideraram a ocorrência do fenômeno abrangendo a totalidade da mistura de maneira uniforme. Ou seja, a tensão crítica de início da erosão (τ_{ci}) está associada à mistura através do seu diâmetro mediano, D_{50} . As misturas M3 e M4, no entanto, foram

submetidas à análise fracionada do transporte, com a possibilidade de obter valores de tensão crítica associados a cada fração individual da mistura.

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Antes de cada ensaio se procede a uniformização do sedimento no canal, com o objetivo de obter um padrão inicial uniforme para todos os ensaios.

O ajuste dos sensores de nível, realizado antes de cada ensaio, é feito tomando como referência um plano fixo dentro do canal. O plano de referência utilizado foi a superfície horizontal da rampa a jusante do trecho de estudo. Esse ajuste tem como objetivo permitir que as medições sejam realizadas com base num nível de referência único para todos os ensaios.

Inicia-se o ensaio com a ativação dos equipamentos de alimentação das vazões líquida e sólida. As medições referentes à lâmina de fluxo são feitas em seções fixas do canal. Os dados medidos são registrados mediante a sua transferência a um PC.

A última amostra do material coletado é submetida a secagem em estufa a 180°C , com peneiramento para análise granulométrica. A duração de cada ensaio depende das condições de transporte, variando de 2 a 10 horas aproximadamente. O tempo de duração do ensaio é determinado com base no seu comportamento hidrodinâmico, ou seja, a partir de um determinado instante do período de ensaio o canal alcança uma condição de equilíbrio hidrodinâmico, situação que se reflete pela não variação no tempo, do transporte sólido e da resistência do canal.

Após o ensaio é feita a coleta do material que se encontra na superfície do leito, com a retirada de três amostras com aproximadamente 2 cm de espessura. Numa fase posterior, incorpora-se ao sedimento restante no canal um volume de material inalterado da mistura correspondente, suficiente para permitir a sua nivelção com as rampas. A partir daí, o sedimento é totalmente misturado, espalhado e nivelado no canal.

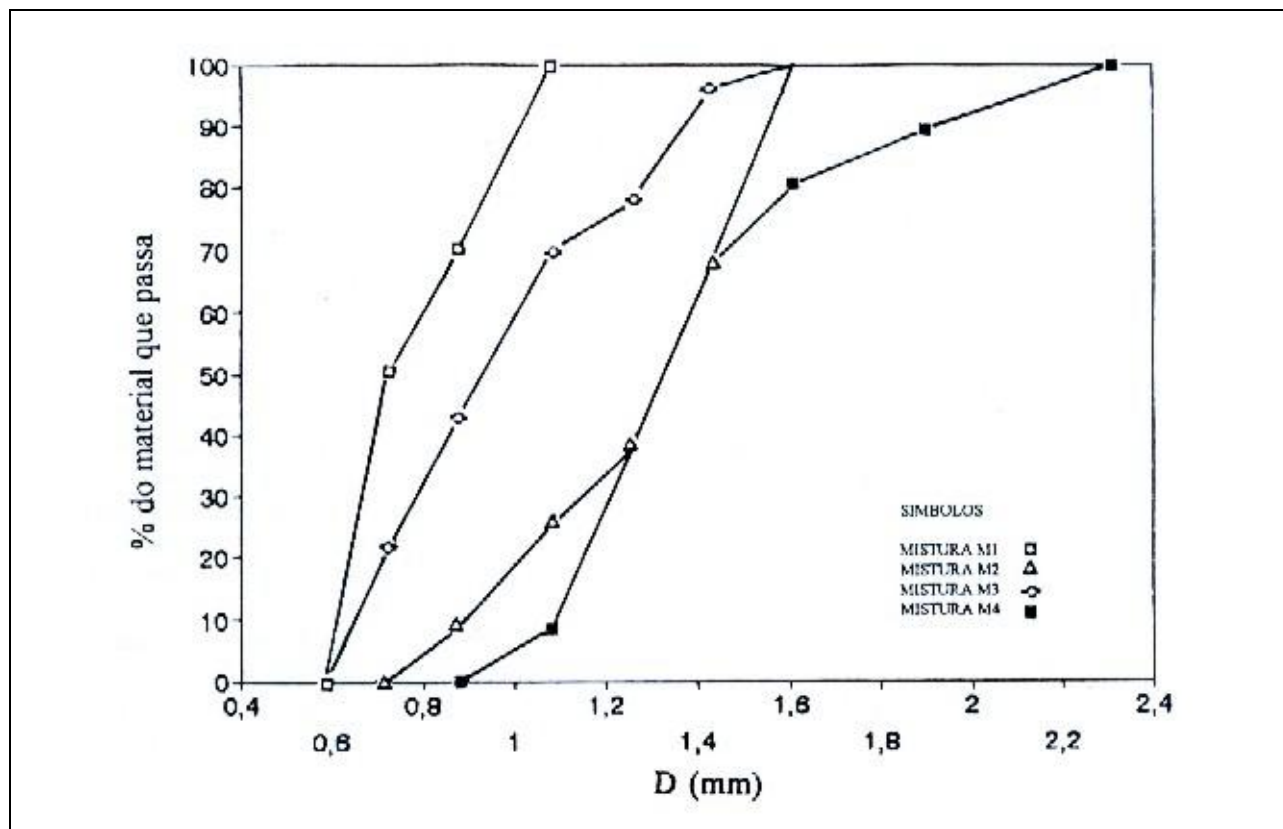


Figura 2. Curvas granulométricas das misturas.

Tabela 2. Parâmetros granulométricos das misturas.

| Mistura | Distribuição | D_{15} | D_{50} | D_{85} | σ_s | γ_{apar} (kgf/m ³) |
|---------|--------------|----------|----------|----------|------------|---------------------------------------|
| M1 | ~ uniforme | 0,63 | 0,71 | 1,00 | 1,26 | 1880 |
| M2 | ~ uniforme | 1,16 | 1,30 | 1,43 | 1,10 | 1940 |
| M3 | log normal | 0,67 | 0,94 | 1,31 | 1,40 | 1880 |
| M4 | log normal | 0,98 | 1,33 | 1,74 | 1,33 | 1940 |

RESULTADOS

O transporte diminui gradualmente no decorrer do ensaio. Seu comportamento reflete o ajuste da superfície do leito às condições de fluxo e transporte impostas, com uma evolução no tempo de caráter assintótico e valores constantes depois de um certo período de ensaio.

O valor de τ_{ci}^* foi determinado aplicando-se o método do transporte sólido de referência de Parker *et al.* (1982). Os

procedimentos de análise do transporte adotados para as misturas M1 e M2 supõem a igualdade no movimento das frações da mistura, ou seja, todas as frações se encontram submetidas à mesma condição de movimento. Nesse caso, τ_{c50} expressa o fato de que o transporte pode ser definido com base no diâmetro representativo da mistura.

Por sua vez, os valores de τ_{ci}^* obtidos para as misturas M3 e M4 refletem condições de transporte próximas ao valor

de referência. As retas ajustadas vão se deslocando para a esquerda com o aumento do tamanho de cada fração. De acordo com Diplas e Parker (1992), a semelhança nas declividades das retas pode justificar a ocorrência da igualdade no movimento.

As funções de encobrimento obtidas para as misturas M3 e M4 e para outros estudos encontrados na literatura estão representadas na Figura 3. Observa-se um bom ajuste com os valores obtidos para Oak Creek. Os valores de β obtidos para M3 e M4 (-1,0 e -0,99) refletem igualdade no movimento das frações. A Tabela 4 apresenta os valores de τ_{ci} obtidos para cada mistura, os quais são mais baixos (Figura 4) que os obtidos por Wilcock (1993) e Kuhnle (1993). É possível que essas diferenças sejam devidas ao efeito de interação entre as partículas, considerando o fato de que τ_{ci} reflete não somente características individuais da fração, mas também propriedades granulométricas da mistura. Ou seja, misturas com propriedades diferentes podem apresentar valores

diferentes de tensão crítica para uma mesma fração.

A configuração horizontal dos valores $\tau_{ci}-D_i$ obtidos reflete a ocorrência de igualdade no transporte para condições de início da erosão. Ou seja, observa-se que as frações da mistura estão submetidas ao mesmo valor crítico de tensão no início do movimento. Além disso, seus valores refletem a influência do diâmetro mediano da mistura (D_{50}), o que serve para confirmar a sua importância como parâmetro representativo dos efeitos relacionados com o início da erosão.

Os valores de τ_{ci} obtidos para M2 e M4 expressam, por um lado, a representatividade do D_{50} da mistura; por outro lado, servem para demonstrar, nesse caso, que o desvio-padrão da mistura (σ_s), isoladamente, não é suficiente para expressar possíveis diferenças nos efeitos de interação relacionados com o início do movimento dos grãos. Com efeito, o valor de τ_{c50} , obtido a partir do D_{50} da mistura M2 demonstra ser suficiente para expressar o valor médio da tensão crítica, τ_{ci} , das frações da mistura M4.

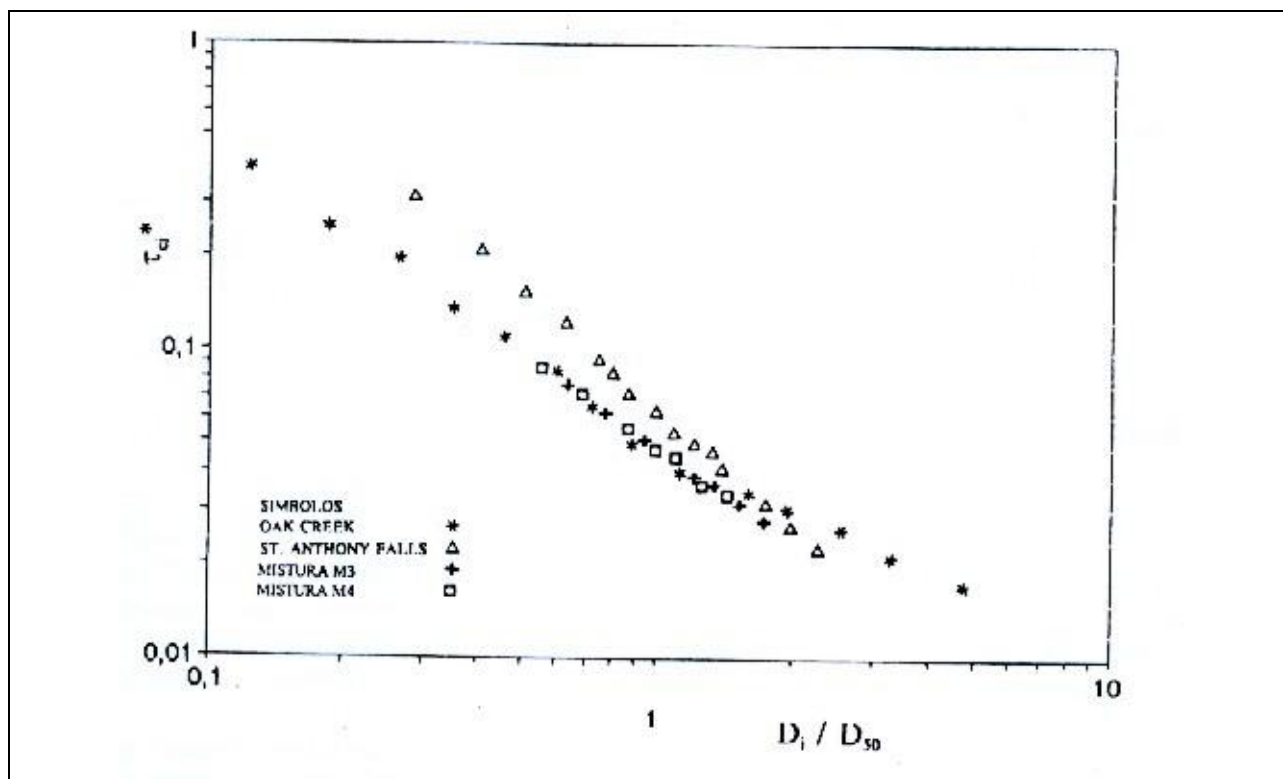


Figura 3. Funções de encobrimento das misturas M3 e M4, comparada com outros trabalhos.

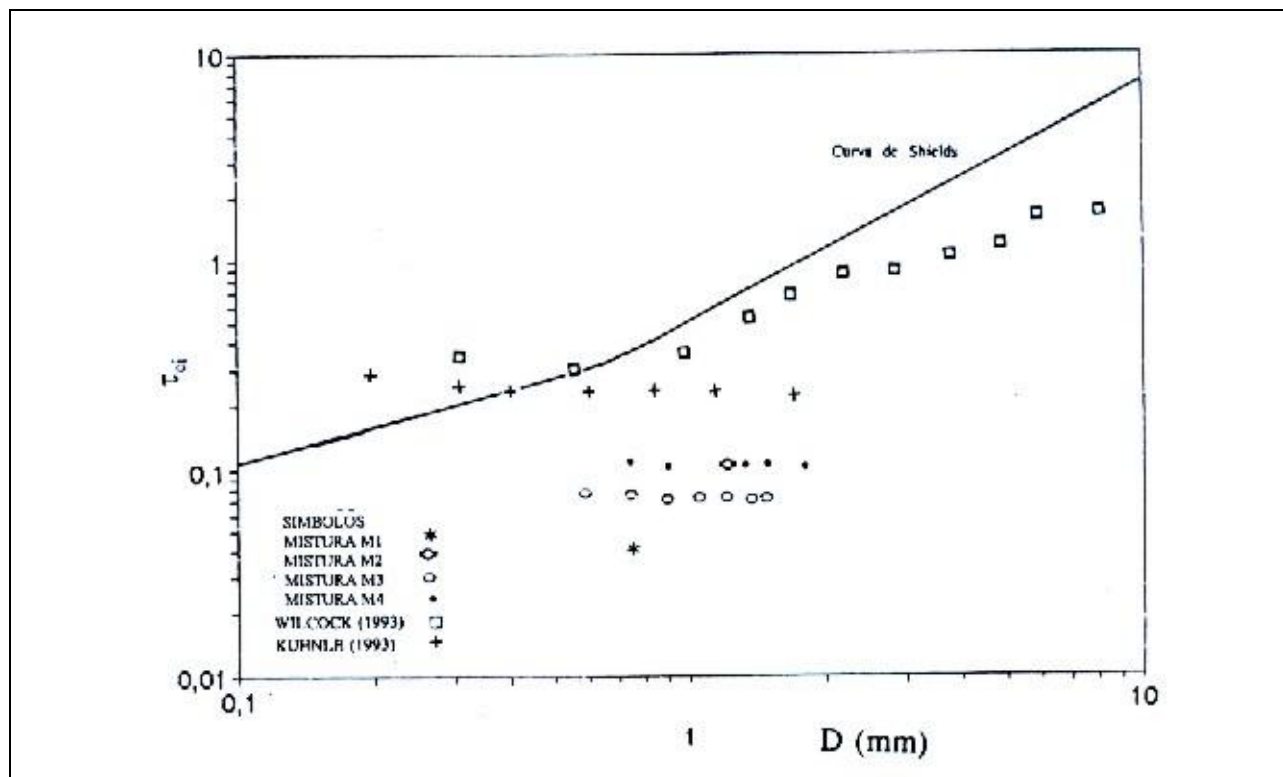


Figura 4. Variação da tensão crítica para cada mistura e outros trabalhos.

Tabela 4. Valores médios de tensão crítica τ_{ci} (kgf/m^2).

| Mistura | M1 | M2 | M3 | M4 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| τ_{ci} | 0,041 | 0,101 | 0,073 | 0,102 |

CONCLUSÕES

Os valores da tensão crítica adimensional (τ_{ci}^*) das misturas M3 e M4 permitiram determinar os parâmetros que definem a função de encobrimento, a qual revela a ocorrência de igualdade no movimento das frações individuais. Além disso, os parâmetros α e β que definem a relação $\tau_{ci}^* = \alpha \cdot (D_i/D_{50})^\beta$ são iguais a 0,048 e -1,0 para M3, 0,047 e -0,99 para M4 respectivamente.

Os valores médios de τ_{ci} obtidos para M3 e M4 expressam o efeito do diâmetro mediano da mistura (D_{50}) e a sua importância como parâmetro suficiente para expressar a resistência ao início do movimento da partícula. As misturas M2 e M4 têm o mesmo diâmetro mediano e desvio-padrão diferentes.

É possível observar que τ_{c50} , determinado com base no diâmetro mediano da mistura (D_{50}) pode ser suficientemente representativo do valor médio de τ_{ci} de cada fração da mistura, com independência do desvio-padrão. Ou seja, os resultados confirmam o diâmetro mediano da mistura como parâmetro representativo dos efeitos relacionados com o início da erosão em misturas de material arenoso.

SÍMBOLOS

B largura do canal (0,3 m);

H profundidade da lâmina de fluxo (m);

g aceleração da gravidade (m/s^2);

Q vazão líquida (m^3/s);

Q_s vazão sólida (kg/s);

q_s vazão sólida unitária (kg/s.m);
 R raio hidráulico (m);
 I_e declividade da linha de energia do fluxo (m/m);
 F número de Froude;
 U velocidade média na seção (m/s);
 u_* velocidade de arrasto da partícula (m/s);
 Re número de Reynolds;
 t tempo transcorrido (minutos);
 γ peso específico da água (kgf/m³);
 γ_s peso específico da partícula sólida seca (kgf/m³);
 γ_{apar} peso específico aparente seco da mistura (kgf/m³);
 γ_s' peso específico submerso da partícula (kgf/m³);
 μ viscosidade dinâmica da água (kgf.s/m²);
 τ_0 tensão de cisalhamento atuante na superfície do leito (kgf/m²);
 τ_{ci}^* tensão adimensional crítica correspondente à fração de ordem i ;
 τ_{ci} tensão de cisalhamento crítica correspondente à fração de ordem i ;
 τ_{c50} tensão de cisalhamento crítica correspondente ao diâmetro mediano;
 τ_i^* tensão adimensional de Shields correspondente à fração de ordem i ;
 D_{50} diâmetro mediano da mistura (mm);
 σ_s desvio-padrão da mistura;
 D/D_{50} diâmetro relativo da fração i com relação ao D_{50} ;
 W_i^* transporte sólido normalizado de Einstein da fração i ;
 W_r^* transporte sólido adimensional de referência (= 0,002);
 α tensão adimensional crítica correspondente à fração D_{50} ;
 β expoente da função de encobrimento.

REFERÊNCIAS

- ANDREWS, E. D. (1984). "Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado." *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, pp. 371-378.
- ANDREWS, E. D. (1994). "Marginal Bed load in a gravel bed stream, Sagehen Creek, California." *Water Resources Res.*, 30, 7, pp. 2241-2250.
- ASHWORTH, P. J. and FERGUSON, R. I. (1989). "Size-selective entrainment of bedload in gravel-bed streams." *Water Resources Res.*, 25, 4, pp. 627-634.
- DAY, T. J. (1980). "A study of incipient motion characteristics of particles in graded bed material." Pap. 80-1A, pp. 281-286, *Geol. Surv. of Canada, Ottawa*.
- EINSTEIN, H. A. (1950). "The bed-load function for sediment transport on open channel flows." *Tech. Bull.* 1026, 71 pp., *Soil Conservation Service, U.S. Dept. of Agriculture*.
- DIPLAS, P. and PARKER, G. (1992). "Deposition and removal of fines in gravel-bed streams." *Dynamics of gravel-bed rivers*, John Wiley & Sons, New York.
- KUHNLE, R. A. (1993). "Incipient motion of sand-gravel sediment mixtures." *Journal of Hydr. Eng.*, 119, pp. 1400-1415.
- MEYER-PETER, E. and MÜLLER, R. (1948). "Formulas for bedload transport." Apresentado na 3ª Conferência da Int. Assoc. Hydraul. Res., Estocolmo.
- MILLER, M. C., McCAYE, I. N. and KOMAR, P. D. (1977). "Threshold of sediment motion under unidirectional currents." *Sedimentology*, 24, pp. 507-527.
- MILHOUS, R. T. (1973). "Sediment transport in a gravel-bottomed stream." Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, Oregon State University.
- MISRI, R. L., GARDE, R. J. and RANGA RAJU, K. G. (1984). "Bed load transport of coarse nonuniform sediment." *Journal of Hydr. Eng.*, 110, pp. 312-328.
- PARKER, G. and KLINGEMAN, P. C. (1982). "On why gravel bed streams are paved." *Water Resources Res.*, 18, pp. 1409-1423.
- PARKER, G., KLINGEMAN, P. C. and McLEAN, D. G. (1982). "Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams." *Journal of Hydr. Division ASCE*, 108(4), pp. 544-571.
- PARKER, G. (1990). "Surface-based bedload transport relation for gravel rivers." *Journal of Hydr. Res.*, 28(4), pp. 417-436.
- SHIELDS, A. (1936). "Application of similarity principles and turbulence research to bedload movement." *Hydrodynamic Lab. Rep.* 167, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- SHIH, S. and KOMAR, P. D. (1990). "Equal mobility versus changing bedload grain sizes in gravel-bed streams." *Dynamics of Gravel-bed Rivers*. John Wiley & Sons, New York.
- STELCZER, K. (1981). "Bed-load transport. Theory and practice." *Water Resources Publications*.

- WATHEN, J. S., FERGUSON, R. I. and WERRITTY, A. (1995). "Unequal mobility of gravel and sand in weakly bimodal river sediments." *Water Resources Res.*, 31, pp. 2087-2096.
- WIBERG, P. L. and SMITH, J. D. (1987). "Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments." *Water Resources Res.*, 23, 8, pp. 1471-1480.
- WIBERG, P. L. and SMITH, J. D. (1989). "Model for calculating bed load transport of sediment." *Journal of Hydr. Div. ASCE*, 115, 1, pp. 101-123.
- WILCOCK, P. R. (1987). "Bed-load transport of mixed size sediment." Ph.D. thesis, Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- WILCOCK, P. R. (1992a). "Bedload transport of mixed-size sediment." *Dynamics of gravel-bed rivers*, John Wiley & Sons, New York.
- WILCOCK, P. R. (1992b). "Experimental investigation of the effect of mixture properties on transport dynamics." *Dynamics of gravel-bed rivers*, John Wiley & Sons, New York.
- WILCOCK, P. R. (1993). "Critical shear stress of natural sediments." *Journal of Hydr. Div. ASCE*, 119, 4, pp. 491-505.
- WILCOCK, P. R. and SOUTHARD, J. B. (1988). "Experimental study of incipient motion in mixed-size sediment." *Water Resources Res.*, 24, pp. 1137-1151.

Cover Fact and Selectivity in Transport

ABSTRACT

The degree of size-selectivity in sediment transport of sand mixtures was studied by making experiments using a sediment-feed laboratory channel. Four different mixtures were used, with diameters varying between 0,59 mm and 1,91 mm. The reference-transport method proposed by Parker et al. (1982) was adopted to calculate the critical shear stress for motion. One the development of the studies, M1 and M2 mixtures, with a nearly uniform size distribution, were represented by the median diameters D_{50} and submitted to a general analysis of transport for the whole mixture. On the other hand, M3 and M4 mixtures, with a logarithm type size distribution, were submitted to a fractional analysis of transport. M2 and M4 have the same diameter. The obtained hiding function parameters show a condition of equality for the transport. The critical shear stress rates obtained for M2 and M4 confirm D_{50} as a representative parameter of the mixture. The results lead to conclude that critical shear stress for the median size (τ_{c50}) based on a general analysis of transport can be used to express the average shear stress of each fraction of the mixture.