

Resistência ao Fluxo em Canais Íngremes com Leito de Cascalho

Andréa Carla L. Rodrigues, Vajapeyam S. Srinivasan

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande

Rua Aprígio Veloso, 882, 58109-970 Campina Grande – PB – acarlalima@yahoo.com.br; vajapeya@dec.ufpb.br

Celso Augusto Guimarães Santos

Departamento de Tecnologia da Construção Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campus Universitário, 58059-900, João Pessoa – PB – celso@ct.ufpb.br

Koichi Suzuki

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Ehime, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-77, Japão – ksuzuki@dpc.ehime-u.ac.jp

Recebido: 27/01/01 – revisão: 28/03/03 – aceito: 10/07/03

RESUMO

Neste trabalho procurou-se quantificar os fluxos subsuperficial e superficial em um canal de alta declividade com uma camada de cascalho no leito, com a finalidade de relacionar as vazões com as características hidráulicas do canal. Nos cursos naturais de água com alta declividade, o leito é formado de uma grossa camada de cascalho e duas condições de escoamento podem ser observadas. A primeira, a condição mais comum, quando o fluxo fica confinado na camada de cascalho e a segunda, na ocorrência de cheia, quando a superfície da água fica bem acima da camada de cascalho. O comportamento hidráulico do leito de cascalho foi investigado experimentalmente e os resultados mostraram que para o escoamento através da camada de cascalho, a lei de Darcy precisa ser modificada para este tipo de meio poroso e a relação proposta por Stephenson parece ser bastante satisfatória. Para a segunda condição de escoamento, foi analisada a variação da resistência do leito de cascalho. A equação desenvolvida por Ugarte e Madrid, para o cálculo da resistência ao fluxo através da modificação do coeficiente n de Manning, e as equações de Hey e de Ba-thurst, para o coeficiente f de Darcy-Weisbach, foram avaliadas e essas equações mostraram-se ser satisfatórias em certas condições associadas ao tamanho do material e da declividade do leito.

Palavras-chave: leito de cascalho; alta declividade; escoamentos subsuperficial e superficial.

INTRODUÇÃO

Os cursos naturais de água com altas declividades apresentam no seu leito uma camada de cascalho que é transportada apenas por grandes vazões de enchentes. Frequentemente, na época de estiagem, o escoamento fica confinado dentro da camada de cascalho no meio poroso (Figura 1a). Com o aumento da vazão, o nível fica acima do leito e o escoamento será, então, composto por uma parte ocorrendo no meio poroso e a outra parte na superfície (Figura 1b). As características hidráulicas destes fluxos são bem distintas.

Em contraste ao fluxo subsuperficial de leito arenoso, o fluxo dentro da camada de cascalho se torna significativo e, portanto, é necessário conhecer as relações hidráulicas que correspondem a esta situação. A maioria das relações encontradas na literatura referentes à perda de carga em um meio poroso está estruturada sobre bases empíricas, a exemplo dos trabalhos feitos por Ahmed e Sunada (1969), Cedergreen (1967), Soni *et al.* (1978) e Volker (1969). Muitas das equações resultantes deste tipo de análise são dimensionais e, portanto, têm aplicabilidade bastante limitada. Pesquisas sobre o escoamento através do

cascalho têm sido conduzidas para números de Reynolds inferiores aos que normalmente ocorrem na prática. Percebe-se que a hidrodinâmica básica do escoamento através de um meio granular grosso, tal como rochas, tem recebido pouca atenção. Um importante trabalho nessa área é o de Stephenson (1979), no qual foi investigada uma correlação entre a vazão e a perda de carga para o escoamento em meio granular poroso sujeito a uma larga variação do número de Reynolds (10^4 a 10^4). Stephenson também conduziu testes com números de Reynolds superiores a 10^4 e estes testes revelaram que a perda de carga era proporcional ao quadrado da velocidade do escoamento. Em pesquisas onde o número de Reynolds era inferior a 10^4 , observou-se que a perda de carga era proporcional à uma potência da velocidade com expoente de aproximadamente 1,85. Estes fatos distinguem o escoamento no cascalho de um escoamento num meio poroso homogêneo onde a Lei de Darcy é aplicável.

Com relação ao fluxo superficial, várias relações (tais como as equações de Manning, Chézy e Darcy-Weisbach) têm sido usadas por um século ou mais (*American Society of Civil Engineers*, 1963) para quantificar o escoamento, todas se caracterizando através de um coeficiente

de resistência. O problema central, entretanto, está na avaliação deste coeficiente. Tradicionalmente, tem sido uma questão simples, porém empírica, obter um valor do coeficiente de resistência a partir de experiências e observações passadas (Chow, 1959; Barnes, 1967). Contudo, este método tende a resultar num coeficiente que se relaciona principalmente com o tamanho do material do leito, enquanto outros importantes fatores, tais como a não uniformidade do perfil do leito e a profundidade do escoamento, são freqüentemente ignorados. Em particular, o coeficiente é assumido ser constante em um dado local à medida que a vazão varia, apesar de existirem consideráveis evidências de que a resistência do escoamento é maior em baixas vazões do que em altas (Sargent, 1979).

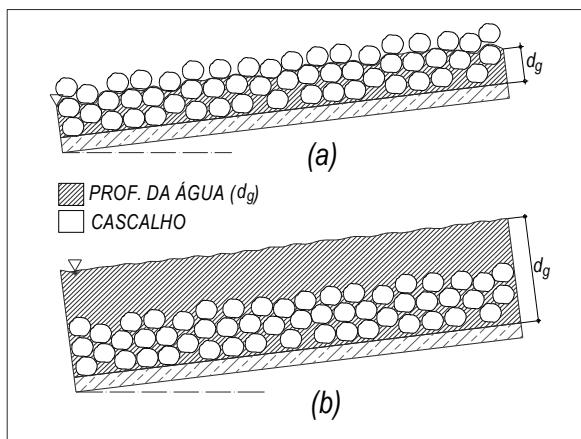


Figura 1. Fluxo (a) subsuperficial e (b) superficial.

Assim, para produzir resultados mais satisfatórios, é imprescindível fazer mais estudos teóricos baseados nos princípios da mecânica dos fluidos, tais como da teoria da camada limite e dos processos de resistência ao fluxo. Muitas tentativas têm sido feitas nesta linha (*American Society of Civil Engineers*, 1963; Keulegan, 1938) e bons progressos têm sido observados para escoamentos uniformes e permanentes (Hey, 1979). Contudo, até o momento, nenhuma equação de aplicação geral foi desenvolvida para a resistência ao escoamento nos rios de alta declividade, provavelmente porque tal equação tem sido considerada impraticável devido ao seu alto grau de complexidade e a necessidade de dados de campo, e por causa do mau entendimento sobre as aplicações da teoria da camada limite para rios, particularmente onde outros fatores de resistência, como o tamanho do material do leito, são importantes. O desenvolvimento de uma equação, no entanto, é necessário não só para estudos científicos dos processos de fluxo, como para identificação de erros resultantes da aplicação de equações práticas designadas para fluxo uniforme, em condições típicas de rios com fluxo não uniformes (Bathurst, 1987).

ESCOAMENTO SUBSUPERFICIAL NUM LEITO DE CASCALHO

Para um bom entendimento do escoamento através da camada de cascalho e das equações de perdas de carga para esse caso, faz-se necessário uma análise do escoamento em um meio poroso. Muitos pesquisadores têm procurado uma relação entre as características do meio poroso, a velocidade e a perda de carga. Sabe-se que o gradiente de energia S através de aquíferos com poros finos é linearmente proporcional à velocidade aparente V_a , expressa pela equação de Darcy:

$$V_a = K_s S \quad (1)$$

onde K_s é a condutividade hidráulica do meio poroso saturado (m/s).

Uma analogia pode ser feita entre o escoamento através de tubos estreitos e o escoamento através de poros de um aquífero. O gradiente da energia S através de um tubo de diâmetro D (m), de acordo com a lei de Darcy-Weisbach (Streeter e Wylie, 1980), é dado por:

$$S = \frac{fV^2}{2Dg} \quad (2)$$

onde

$$f = \frac{64}{R_e} = \frac{64\psi}{VD} \quad (3)$$

para escoamento laminar, onde V é a velocidade média do fluxo (m/s); g é a aceleração da gravidade (m/s²); R_e é o número de Reynolds; e ψ é a viscosidade cinemática do fluido (m²/s).

Logo, substituindo a Equação (3) em (2), tem-se:

$$S = \frac{32\psi V}{D^2 g} \quad (4)$$

Similarmente para o escoamento laminar através do meio poroso, o perímetro molhado é uma função do tamanho das partículas. Logo, pode-se rescrever a Equação (4) como:

$$S = \frac{C_1 \psi V}{D_m^2 g n_p} \quad (5)$$

onde D_m é o tamanho representativo da partícula (m); C_1 é a constante adimensional; e n_p é a porosidade do meio.

Nota-se que V é a velocidade dada por Q/A e que a velocidade real do fluxo aproxima-se da relação V/n_p . De fato, a velocidade real também dependerá do tamanho, da forma e da área da superfície molhada do meio por unidade de volume total.

Bakmetoff e Feodoroff (1937) expressaram a velo-

cidade do fluxo nos vazios V_v como:

$$V_v = \frac{V}{n_p^{2/3}} \quad (6)$$

O fator 2/3 foi justificado utilizando uma estrutura cúbica do solo. Os vazios são assumidos como ocupando um cubo de volume n_p por unidade total de volume. Esse cubo tem uma área da face de $n_p^{2/3}$ (Figura 2a) e não existe continuidade entre cubos e vazios. Um modelo contínuo, semelhante a Figura 2b, foi criado assumindo que o vazio tem o comprimento da matriz, com área da seção transversal igual a n_p . De fato, os vazios são interligados, mas não em linha reta e, portanto, a área exposta é algo entre n_p e $n_p^{2/3}$ (Figura 2c).

Portanto, a verdadeira velocidade nos vazios fica entre V/n_p e $V/n_p^{2/3}$, mas esta velocidade não acompanha a direção geral do escoamento. O caminho percorrido pelo escoamento é sinuoso e consequentemente a perda de carga é mais elevada do que a indicada por uma velocidade de $V/n_p^{2/3}$. Logo, a perda de carga é melhor representada quando utiliza-se a velocidade V/n_p . Na prática, no entanto, é difícil obter uma relação para calcular a velocidade devido às variadas formas encontradas nas rochas. Stephenson (1979) adotou o valor de V/n_p como representativo da velocidade efetiva nos vazios. Porém, para material grosso, a relação do escoamento laminar é inválida e a perda de carga é proporcional a uma potência da velocidade com o expoente sendo maior que um.

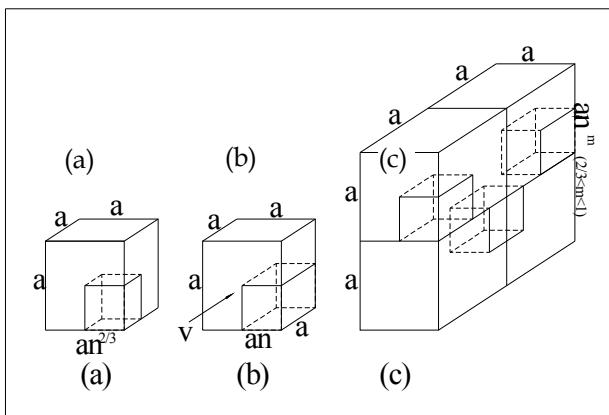


Figura 2 – Modelos de porosidade média com vazios (Bakmetoff e Feodoroff, 1937).

Equações de perda de carga

Embora muitos pesquisadores, como por exemplo, Dudgeon (1966), Johnson (1971), Leps (1973), Parkin *et al.* (1966), Soni *et al.* (1978), Volker (1969) e Wilkins (1956), têm utilizado para materiais grossos uma relação do tipo:

$$V = b_1 S^{b_2} \quad (7)$$

onde b_1 e b_2 são constantes que dependem das unidades usadas e das características do meio. Sabe-se que o expoente b_2 é unitário para escoamento laminar em um meio granular fino, e que este expoente depende do número de Reynolds. O valor máximo deste expoente é de aproximadamente 1,85.

Por analogia com escoamento em canais, parece lógico considerar que esse valor aproxime-se de 2 para o fluxo totalmente turbulento. Porém, as tentativas para correlacionar a perda de carga com V^2 têm encontrado sucesso limitado (Ahmed e Sunada, 1969 e Dudgeon, 1966) e são poucas as tentativas para correlacionar a perda de carga com a velocidade “real” V/n_p . Por analogia com o fluxo em condutos, a perda de carga num fluxo turbulento na forma de gradiente de energia seria:

$$S \propto \frac{(V/n_p)^2}{gR_m} \quad (8)$$

No entanto, o raio hidráulico médio, R_m , é proporcional ao tamanho da rocha (Leps, 1973) e, assim, o gradiente de energia pode ser escrito como:

$$S = \frac{K'(V/n_p)^2}{gD} \quad (9)$$

onde K' = fator de atrito e é uma função do número de Reynolds e da forma do cascalho.

Para o fluxo laminar com um número de Reynolds abaixo de 10^4 , Stephenson (1979) assume que K' é expresso como:

$$K' = \frac{800}{Re} = 800 \frac{n_p V}{VD} \quad (10)$$

Substituindo a Equação (10) em (9) e comparando as Equações (5) e (9), conclui-se que a constante de proporcionalidade C_1 na Equação (5) seria igual a 800, para escoamento laminar.

Para um número de Reynolds entre 10^4 e 10^4 , K' é expresso como:

$$K' = \frac{800}{Re} + K \quad (11)$$

onde K' depende da forma dos cascalhos indicado por K e Re .

Foi concluído que K' torna-se independente de Re para valores superiores a 10^4 e que o valor de K' aproximava-se de 1 para mármores esféricos e lisos, de 2 para cascalhos semi-arredondados e de 4 para pedras esmagadas. Para o escoamento laminar, $K = 0$.

Para um fluxo turbulento onde o número de

Reynolds é da ordem de 10^4 , tem-se $K = K$. Logo, a velocidade média do escoamento através de uma camada de cascalho, pela Equação (9), torna-se:

$$V_a = n_p \left(\frac{SgD_m}{K} \right)^{1/2} \quad (12)$$

Abt *et al.* (1987) indicaram que os valores de n_p deveriam variar entre 0,44 e 0,46 e Stephenson (1979) assumiu $n_p = 0,45$ para rochas soltas em declividades íngremes.

Codell *et al.* (1990) utilizaram as Equações (9) e (11) para calcular a vazão através da camada de revestimento (“riprap”) feito em pedras e cascalho com tamanhos médios variando entre 26 mm e 157 mm, sobre barrancos com declividades variando entre 1% e 20%. No uso das equações de Stephenson (1979), eles utilizaram valores inteiros de K de acordo com a origem e a forma geométrica das pedras. Foi concluído que a velocidade média indicada pela Equação (12) não seria constante para uma dada declividade e material do leito, mas seria uma função da profundidade do fluxo dentro da camada de cascalho.

ESCOAMENTO SUPERFICIAL NUM LEITO DE CASCALHO

Nota-se, na literatura, duas formas de análise da resistência ao fluxo acima da camada de cascalho nos rios íngremes. A primeira utiliza relações baseadas no coeficiente de rugosidade n de Manning e a segunda, no coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach. As duas formas de análise serão discutidas a seguir.

Equações empíricas baseadas no coeficiente de rugosidade de Manning

A resistência ao fluxo sobre a camada de cascalho pode ser analisada a partir do cálculo do coeficiente de Manning. Para canais de grande largura, este pode ser expresso na forma:

$$n = \frac{d^{5/3} S_f^{1/2}}{q_s} \quad (13)$$

em que d é a profundidade do fluxo acima do leito, q_s a vazão por unidade de largura do canal ou curso e S_f é a declividade da linha de energia.

Anderson *et al.* (1970), usando dados de canais de laboratório e de rios naturais com pedras arredondadas e angulares de diâmetro variando de 0,015 cm até próximo de 30 cm e canais com declividades menores que 0,01, propuseram a seguinte relação para determinação do coeficiente de Manning:

$$n = 0,0395(D_{50})^{1/6} \quad (14)$$

onde D_{50} (diâmetro do qual 50% do material é mais fino) em (ft) era independente da declividade e da profundidade do escoamento.

Jarret (1984) propôs a Equação (15) a partir de dados de 77 medições em 21 rios observados com grande declividade (0,002 – 0,039) e tamanho do material do leito D_{84} (84% do material do rio com diâmetro inferior a este) variando de 0,3 até 2,6 ft (9,1 – 80 cm). Os dados indicaram que n variava inversamente com o raio hidráulico ou profundidade e diretamente com a declividade, na forma:

$$n = 0,039 S_f^{0,38} R_h^{-0,16} \quad (15)$$

onde R_h é o raio hidráulico em ft.

A equação é aplicada para canais naturais com o leito estável. Foi observado que o uso da Equação (15) fora da faixa da declividade de 0,002 a 0,039 e fora da faixa do raio hidráulico de 15 a 210 cm deve ser feito com cautela, e que ela não pode ter aplicabilidade para canais artificiais.

Abt *et al.* (1987, 1988) relataram sobre testes em canais artificiais para determinar a resistência ao fluxo em canais íngremes com pedras de forma angular. O experimento, com um resumo dos dados, foi apresentado por Codell *et al.* (1990). Testes foram conduzidos usando escoamento permanente em canais com largura de 240 cm e 360 cm e declividades variando de 0,01 a 0,02. Abt *et al.* (1987) determinaram os coeficientes de Manning e de Darcy-Weisbach. A relação obtida para o coeficiente de Manning é:

$$n = 0,0456(D_{50} S_f)^{0,159} \quad (16)$$

onde D_{50} foi expresso em polegadas (in).

Codell *et al.* (1990) concluíram que o escoamento através da camada de cascalho era aproximadamente proporcional à porosidade da camada, ao quadrado da declividade e ao diâmetro médio do cascalho. Mostraram que a resistência diminuía com um aumento considerável de transporte quando o nível do rio superava a camada de cascalho.

Ugarte e Madrid (1994) desenvolveram também uma expressão de n para o escoamento com rugosidade de grande escala ($R_h/D_{84} > 1$) usando os dados de Bathurst (1985) e de Jarret (1984) em que as declividades variaram de 0,005 a 0,100. A equação de n , proposta por Ugarte e Madrid, é:

$$n = 0,183 + \ln \left(\frac{1,7462 S_f^{0,1581}}{F_r^{0,2631}} \right) \left(\frac{D_{84}^{1/6}}{\sqrt{g}} \right) \quad (17)$$

onde F_r é o número de Froude e D_{84} é o diâmetro representativo do leito em m.

Equações empíricas baseadas no fator de atrito de Darcy-Weisbach

A equação de Darcy-Weisbach, originalmente desenvolvida para condutos, tem sido utilizada também para uso no escoamento em canais abertos. O fator de atrito de Darcy-Weisbach, f , é definido como:

$$f = 8 \left(\frac{V_*}{V} \right)^2 = \frac{(8gR_h S)}{V^2} \quad (18)$$

onde V_* é a velocidade de atrito.

O fator de atrito pode ser obtido a partir da lei logarítmica da velocidade para o fluxo uniforme sobre canais com leito rugoso (Chow, 1959):

$$\left(\frac{V}{V_*} \right) = \sqrt{\frac{8}{f}} = 5,75 \log(R_h / k) + 6,25 \quad (19)$$

onde k é a altura média dos elementos da rugosidade do leito.

A Equação (19) é obtida a partir da equação de Keulegan (1938) para velocidade média do fluxo turbulento e uniforme em canais não erodíveis. Portanto, em termos gerais, a Equação (19) torna-se:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = c \log \left(\frac{a_1 R_h}{D_m} \right) \quad (20)$$

onde a_1 e c são constantes.

Para canais de grande largura o raio hidráulico R_h se torna igual à profundidade do fluxo (d) e a altura média dos elementos da rugosidade do leito k pode ser expressa pelo tamanho médio (D_{50}) do cascalho do leito. Ou seja:

$$\left(\frac{V}{V_*} \right) = \sqrt{\frac{8}{f}} = 5,75 \log(d / D_{50}) + 6,25 \quad (21)$$

Sayre e Albertson (1963) desenvolveram uma equação semilogarítmica para rugosidades artificiais em canais de laboratório. Esta equação tem a forma:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = m_1 \log \left(\frac{d}{a_2} \right) + c \quad (22)$$

onde a_2 é um parâmetro da altura da rugosidade, e m_1 e c são coeficientes numéricos.

A equação pode ser aplicada para rugosidades de grande escala com um razoável grau de ajuste.

Leopold *et al.* (1964), usando dados de Wolman (1954), e Limerinos (1970) desenvolveram equações usadas para definir a resistência ao fluxo em canais com material grosso e não uniformes no leito e suas equações são respectivamente:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2,03 \log \left(\frac{3,11 d}{D_{84}} \right) \quad (23)$$

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2,03 \log \left(\frac{3,72 R_h}{D_{84}} \right) \quad (24)$$

Os valores 3,11 e 3,72 nas Equações (23) e (24) indicam que D_{84} subestima a altura da rugosidade para o cascalho não uniforme, visto que o coeficiente a_1 na Equação (20) deve ficar em torno de 12,2 (Chow, 1959). Admitindo esse valor como médio, as Equações (23) e (24) implicam que a altura da rugosidade do leito de cascalho correspondem a 3,91 e 3,42 vezes a dimensão D_{84} , respectivamente. Daí pode-se concluir que a altura da rugosidade efetiva do leito de cascalho seria aproximadamente 3,5 vezes o tamanho D_{84} . Os estudos de Burkham e Dawdy (1976) confirmam este fato.

Uma conclusão similar sobre o efeito da variação de D_{16} e D_{84} na estimativa de erro padrão da resistência ao fluxo foi apresentada por Burkham e Dawdy (1976) pela extrapolação dos resultados de Limerinos (1970). Contudo, erros associados com a medição são provavelmente grandes e $3,5D_{84}$ deve ser melhor para definir a altura da rugosidade do leito com tamanhos não uniformes de cascalhos.

Observa-se que estudos teóricos e evidências empíricas mostram a possível influência do efeito da forma da seção transversal, da variação da rugosidade do leito e dos bancos, e da não uniformidade dos sedimentos sobre a resistência ao fluxo em rios com leito de cascalhos. Isto sugere que uma forma mais geral da equação de resistência ao fluxo para este tipo de rio deve ser usada e a forma sugerida por Hey (1979) é:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2,03 \log \left(\frac{a R'_h}{3,5 D_{84}} \right) \quad (25)$$

onde $R'_h = A/P'$, P' é a soma do perímetro molhado do leito e dos bancos e R'_h é o raio hidráulico referente a este perímetro.

Entretanto, existem duas limitações práticas para esta equação. A primeira é que a equação não pode ser usada para uma distribuição não uniforme de rugosidades. Ainda, a maioria dos cursos naturais tem a razão da largura/profundidade média do fluxo superior a 15 e, portanto, a suposição de uma altura de rugosidade uniforme baseada no tamanho do material do leito é sujeita a outros efeitos e erros. Conseqüentemente, Hey (1979) definiu a equação de resistência ao fluxo para o escoamento turbulento nos canais retos e rugosos de material uniforme como:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2,03 \log \left(\frac{a_1 R_h}{3,5 D_{84}} \right) \quad (26)$$

A segunda limitação é o problema da escolha do tamanho certo do sedimento visto que a Equação (20) é estritamente aplicável para condições de fluxo uniforme.

Bathurst (1985), usando dados coletados de rios britânicos em montanhas com declividade de 0,004 até 0,04, desenvolveu uma relação para estimar o fator de atrito de Darcy-Weisbach, dada por:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 5,62 \log\left(\frac{d}{D_{84}}\right) + 4 \quad (27)$$

onde d/D_{84} é a profundidade relativa.

Bathurst (1985) notou que diferenças na resistência ao fluxo entre rios em montanhas e em planícies são bastante aparentes. O estudo mostrou que a conhecida relação semilogarítmica da resistência superestima significativamente a resistência para escoamentos em grandes declividades. E concluiu que o desenvolvimento de uma relação geral para a resistência ao fluxo necessitará de uma quantidade considerável de dados sobre a variação da resistência para um dado local.

No estudo da resistência, evidências comprovam que as mais conhecidas e aplicadas equações para canais ainda mostram-se pouco adequadas para o caso de canais ou cursos íngremes com cascalhos no leito. Este fato se dá devido às grandes diferenças existentes neste tipo de rio em comparação com os rios localizados em áreas planas.

Portanto, para caracterização do aspecto de resistência dos canais com leito de cascalho, uma investigação experimental foi realizada num canal de laboratório.

INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Hidráulica da Universidade de Ehime, Matsuyama, Japão com a finalidade de estudar a natureza da resistência ao fluxo em rios com leito de cascalho quando o escoamento dava-se através ou sobre a camada do leito.

Para a realização dos experimentos em laboratório, foi utilizado um canal de 7 metros de comprimento, 30 cm de largura, 30 cm de profundidade e declividade variável partindo da horizontal até uma inclinação máxima de 10% ($S_0 = 1/10$).

O canal é construído em aço e possui laterais de vidro temperado, o que permite uma visualização do perfil do escoamento. Além disso, possui como partes componentes um reservatório de concreto para armazenamento de água, um tanque receptor de sedimentos na saída do canal, sistema de bombeamento para a recirculação da água, um reservatório para armazenamento e descarga manual de sedimentos na região de montante do canal e um sistema computadorizado de controle de vazão e um medidor eletromagnético. A vazão máxima do sistema era 40

l/s . Com o intuito de obter uma maior flexibilidade no controle da vazão, a largura do canal foi reduzida para 15 cm através de placas de acrílico colocadas a 7,5 cm das paredes de vidro.

A profundidade do fluxo no canal era registrada através de réguas milimétricas coladas nas paredes de acrílico em intervalos de 10 cm ao longo de todo o seu comprimento. A estimativa da profundidade representativa do fluxo nos ensaios foi obtida pela média das leituras ao longo do canal.

Com relação ao material do leito, selecionou-se cascalhos com tamanhos médios de aproximadamente 4,5 cm, 3,5 cm, 2,5 cm e 1,5 cm, cujas formas variaram entre arredondadas e angulares.

Os cascalhos foram uniformemente distribuídos ao longo de 6 m de comprimento, partindo do fim do canal, de modo que a espessura da camada atingisse aproximadamente 15 cm de altura.

Para evitar a queda dos cascalhos no tanque receptor de sedimentos, foi instalada uma tela de proteção na saída do canal. A tela feita de arame e madeira assemelhando-se a uma grade, não interferia no escoamento do fluxo.

Com o intuito de ter a maior amplitude possível das declividades na investigação, utilizou-se uma larga faixa de onze declividades suficientemente elevadas para os fins do presente estudo, sendo elas: 1/200, 1/100, 1/90, 1/80, 1/70, 1/60, 1/50, 1/40, 1/30, 1/20 e 1/10.

O controle da vazão no canal foi feito utilizando um sistema computadorizado, que fornecia a vazão desejada. Um motor elétrico de rotação variável, facilitava o ajuste entre a vazão escolhida e a vazão real registrada por um medidor do tipo eletromagnético. Como a vazão mínima possível pelo sistema era de 1 l/s , vazões inferiores a esta puderam ser obtidas pelo ajuste manual da freqüência da rotação do motor e pela medição volumétrica da vazão.

As vazões máximas utilizadas dependiam das declividades e dos tamanhos médios de cascalho do leito e foram limitadas principalmente pela altura das paredes do canal. Em outras palavras, a vazão era gradativamente aumentada até um limite máximo, que nos presentes ensaios foi de 15 cm acima da superfície do leito de cascalho.

A medição da profundidade foi feita através da leitura da superfície do fluxo nas réguas milimétricas na parede lateral. Dos cinqüenta pontos disponíveis para a leitura, apenas vinte deles localizados no trecho central do canal (de 1,9 m) foram utilizados para o cálculo da média da profundidade, para minimizar os efeitos locais de entrada e saída do escoamento no canal.

Procedimento experimental

Inicialmente, os experimentos foram conduzidos a partir de pequenas vazões onde a água movimentava-se

através dos espaços vazios entre os cascalhos. Essas vazões foram gradativamente aumentadas até que atingissem uma profundidade de aproximadamente 15 cm acima do leito de cascalho. Após o fluxo tornar-se estável, eram feitas as medições da profundidade do escoamento ao longo do canal. O procedimento foi repetido para todas as declividades e após a conclusão dos ensaios referentes a um tamanho do cascalho, o mesmo era trocado. Os ensaios foram realizados em condições de temperatura ambiente que era praticamente constante em torno de 25 °C.

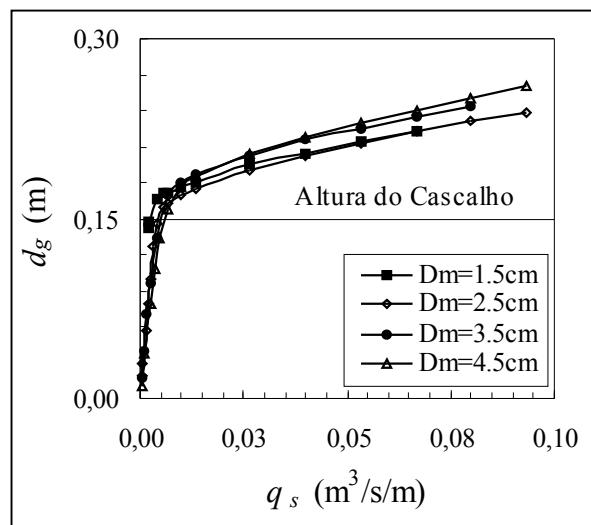


Figura 3. Comportamento gráfico do fluxo dentro e acima da camada de cascalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento da altura do fluxo d_g em m em relação à vazão q_s ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$), para os quatro tamanhos de cascalhos utilizados (4,5, 3,5, 2,5 e 1,5 cm), é mostrado na Figura 3. De acordo com esta Figura, até atingir a altura de 15 cm (reta horizontal correspondente ao limite superior da camada de cascalho), percebe-se uma pequena variação da vazão em relação a produndidade, que se inverte após o fluxo tornar-se superficial. Logo, fica evidente a diferença entre os dois tipos de fluxo e a necessidade de estudá-los separadamente.

Escoamento subsuperficial

A diferença básica entre um meio poroso formado por um material fino como areia que apresenta um valor constante de condutividade hidráulica saturada K_s e um meio formado por um material grosso como cascalho pode ser vista na Figura 4. A mesma mostra a variação da condutividade hidráulica K_s calculada pela Equação (1) em função do tamanho D_m e da declividade S_o , o que revela a não aplicabilidade da equação de Darcy para fluxo entre os cascalhos, e que a velocidade aparente não é proporcional

ao gradiente hidráulico.

Codell *et al.* (1990) afirmam que nos ensaios realizados por eles, o escoamento através da camada de cascalho era “aproximadamente proporcional à porosidade da camada de pedras, à raiz quadrada da declividade e ao diâmetro médio do cascalho e fracamente proporcional ao estágio (profundidade) do fluxo”.

A Equação (12), que indica a proporcionalidade da velocidade com a raiz quadrada do tamanho médio do cascalho, difere da conclusão de Codell *et al.* (1990). Devendo a esta discrepância, a vazão observada nos ensaios deles foi menor do que o previsto pela equação de Stephenson (1979). Entretanto, existe uma diferença básica entre os ensaios de Stephenson (1979) e de Codell *et al.* (1990). Enquanto os ensaios de Stephenson (1979) eram apenas com leito de cascalhos ou pedras, os ensaios de Codell *et al.* (1990) consideraram uma camada de filtro composta de material bem mais fino do que o leito de cascalho.

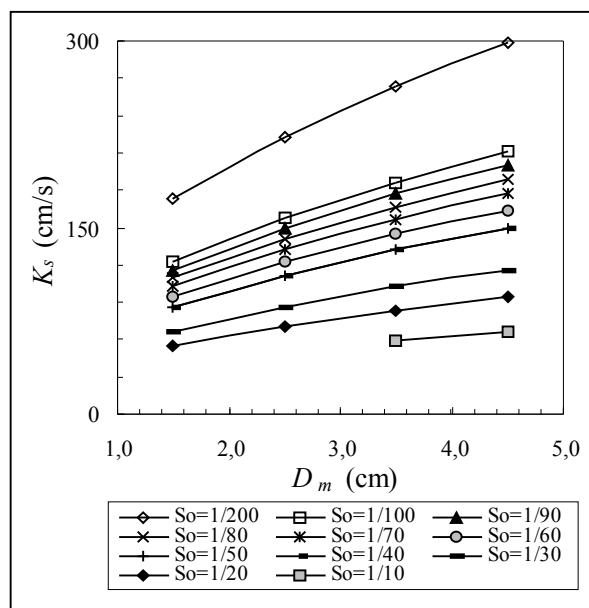


Figura 4. Relação entre a condutividade hidráulica K_s e o diâmetro do material D_m .

No cálculo do fator de atrito adimensional K na Equação (11), Codell *et al.* (1990) utilizaram valores sugeridos por Stephenson (1979) com base na forma ou na origem do cascalho que são sempre valores inteiros. Entretanto, não há razões fortes para que esses valores sejam apenas inteiros. Como os cascalhos geralmente apresentam uma certa heterogeneidade na sua composição, seria razoável assumir que cada lote de cascalho terá um valor representativo. Este valor, não sendo necessariamente um valor inteiro, pode ser determinado através do melhor ajuste à vazão medida e calculada pela Equação (12).

As Figuras 5, 6, 7 e 8 apresentam uma compara-

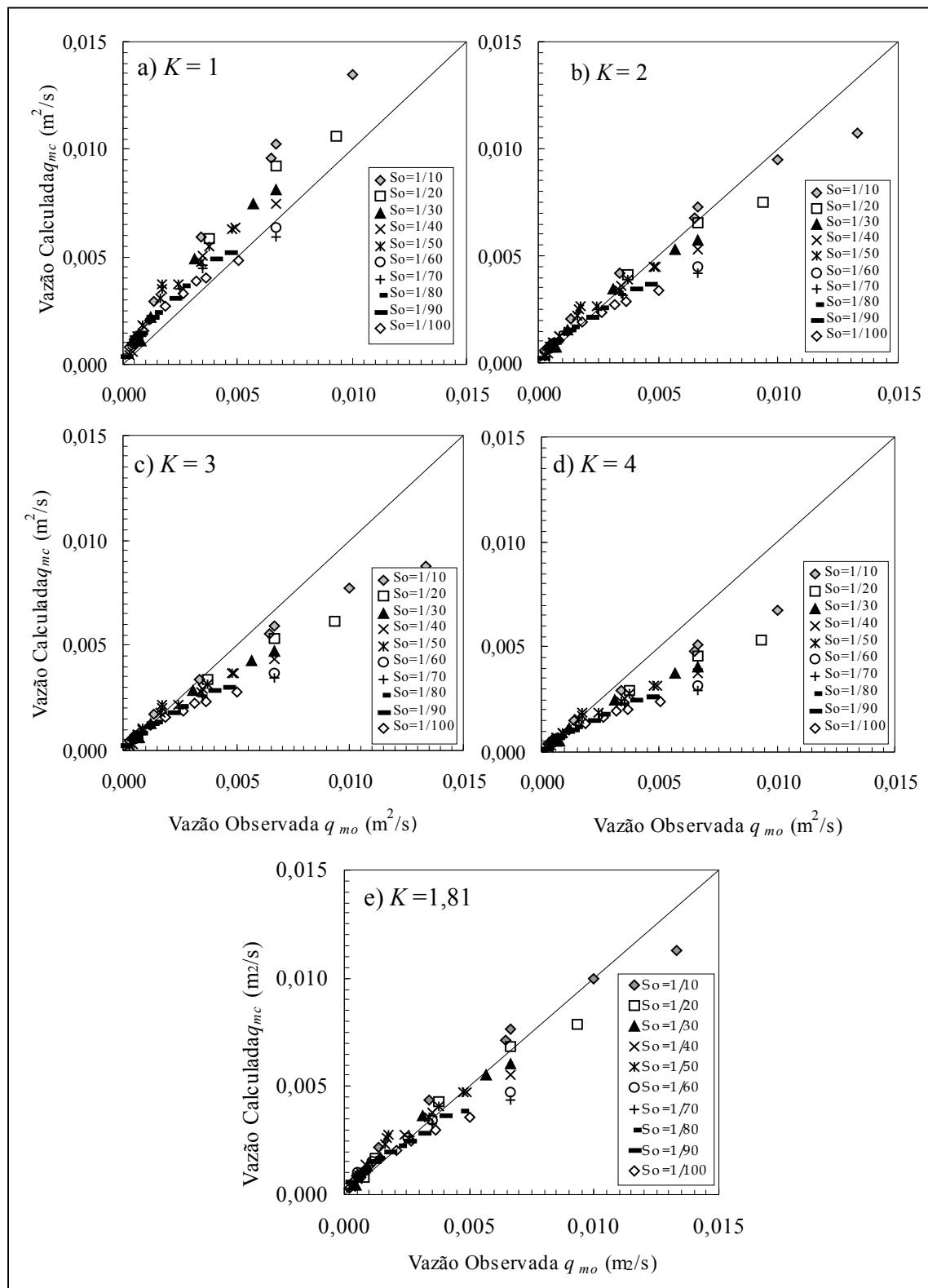


Figura 5. Comparação entre as vazões calculadas e medidas com o fluxo abaixo da camada de cascalho para o diâmetro de 4,5 cm.

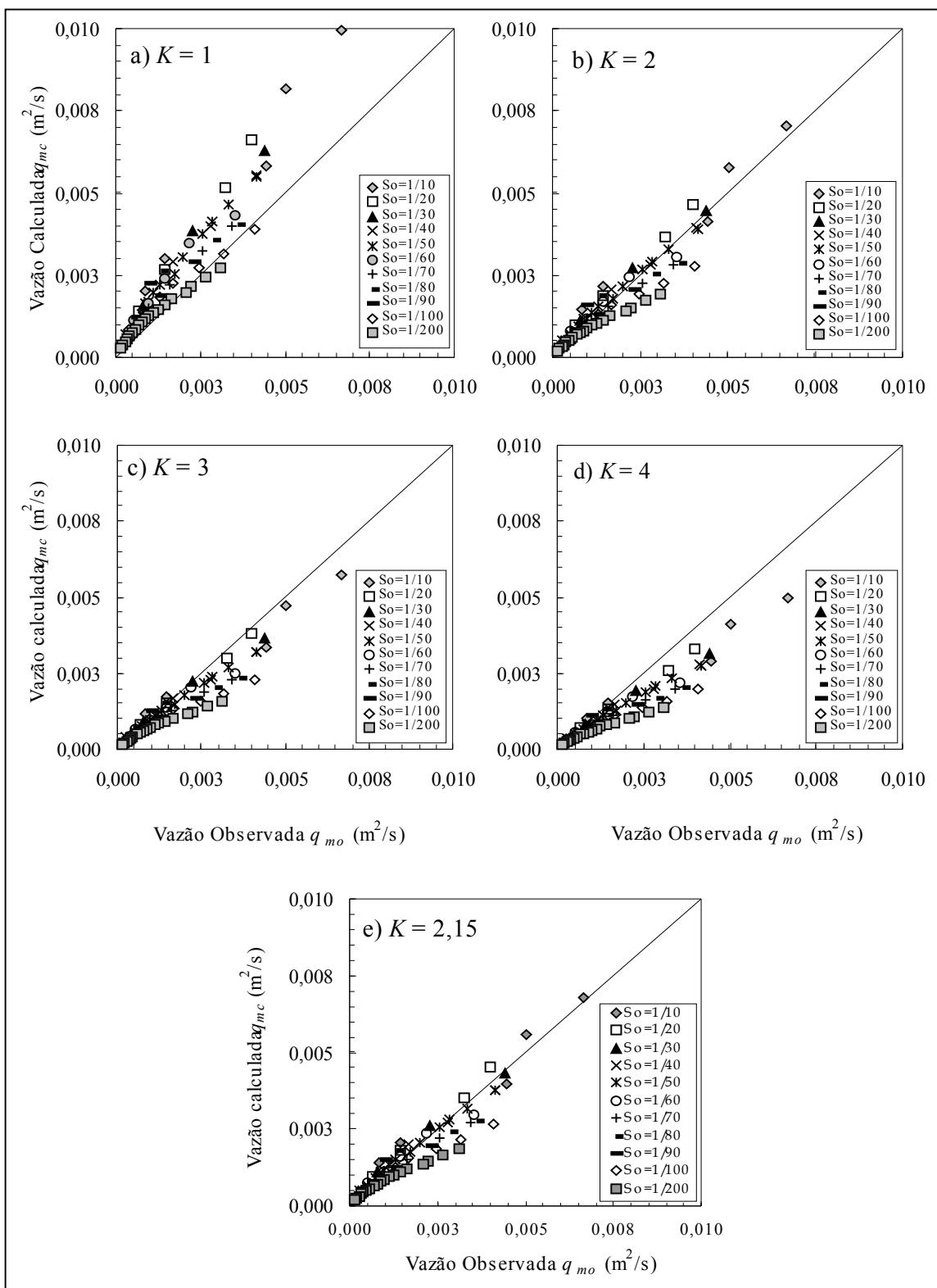


Figura 6. Comparação entre as vazões calculadas e medidas com o fluxo abaixo da camada de cascalho para o diâmetro de 3,5 cm.

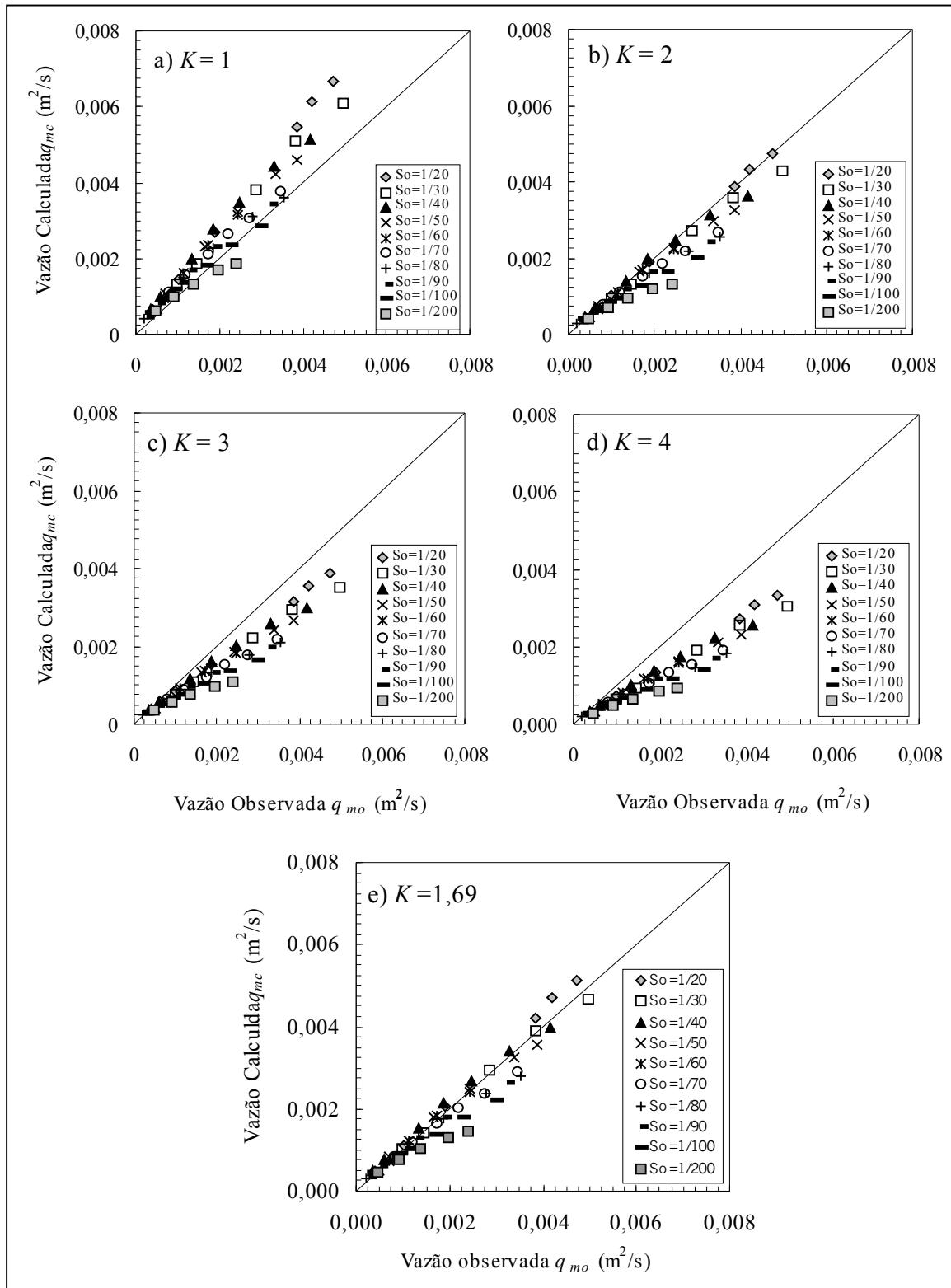


Figura 7. Comparação entre as vazões calculadas e medidas com o fluxo abaixo da camada de cascalho para o diâmetro de 2,5 cm.

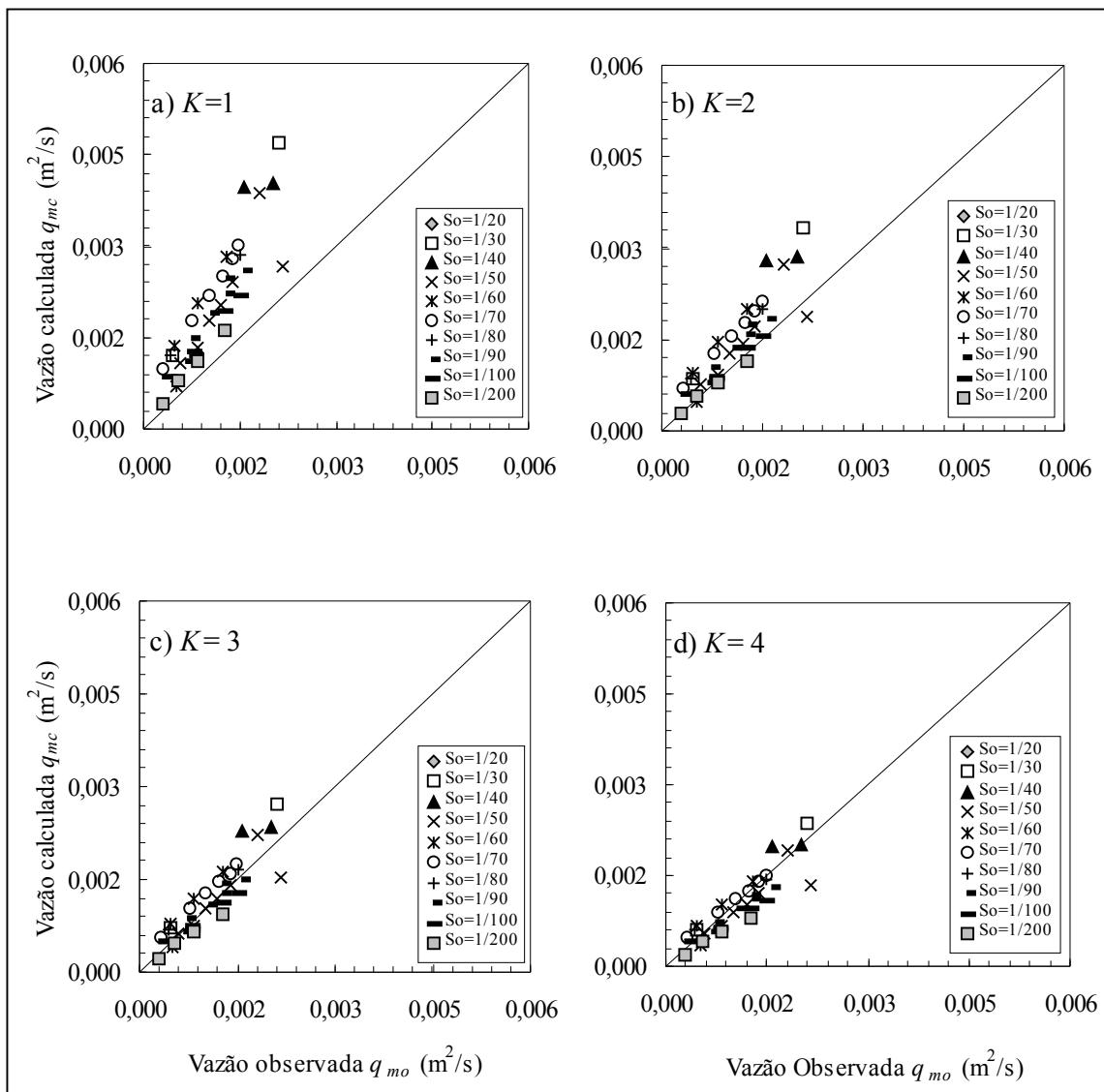


Figura 8. Comparação entre as vazões calculadas e medidas com o fluxo abaixo da camada de cascalho para o diâmetro de 1,5 cm.

ção entre as vazões calculadas e medidas com o fluxo abaixo da camada de cascalho, para os tamanhos de 4,5, 3,5, 2,5 e 1,5 cm. Pode-se observar que, para valores inteiros de K propostos por Stephenson (1979), a melhor concordância entre os dados observados e calculados acontece para $K = 2$, para tamanhos de 4,5, 3,5 e 2,5 cm. Observa-se também que os valores calculados, em geral, são maiores que os observados para $K = 1$ e menores que os observados para $K = 3$ e 4, com exceção do caso de $D_m = 1,5$ cm, para o qual o valor de $K = 4$ fornece o melhor resultado. Porém, se atribuirmos valores fracionários entre 1 e 4 ao coeficiente K , nota-se que uma melhor concordância entre os valores calculados e medidos se dá quando, $K = 1,81$ para

$D_m = 4,5$ cm, $K = 2,15$ para $D_m = 3,5$ cm e $K = 1,69$ para $D_m = 2,5$ cm. Para $D_m = 1,5$ cm o valor inteiro 4 é o que fornece melhor resultado. Portanto, adotar valores contínuos e não apenas inteiros para o coeficiente K minimiza os erros e aumenta a precisão dos resultados. Entretanto, é importante notar que esses valores foram obtidos tomando $n_p = 0,45$, admitido por Stephenson (1979) e para valores do número de Reynolds grandes. Em situações diferentes, os valores de K terão que ser revistos. Assim, conclui-se que a equação de Stephenson estima de maneira satisfatória a vazão do escoamento quando a superfície da água se situa abaixo da superfície da camada de cascalho, desde que o parâmetro K utilizado tenha o valor apropriado cor-

respondente à forma e tamanho do material existente no leito.

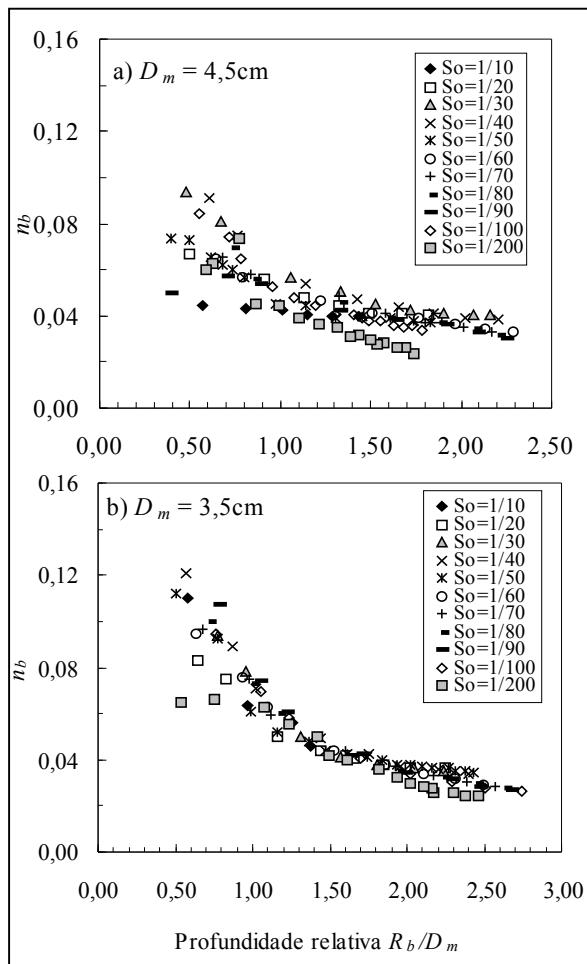


Figura 9. Coeficiente n de Manning versus a profundidade relativa R_b/D_m para os diâmetros de (a) 4,5 e (b) 3,5 cm.

Escoamento superficial

As relações de Manning e Darcy-Weisbach não são aplicáveis para escoamento em cursos de água em montanhas. Os dados coletados no presente estudo foram utilizados para verificar as condições de aplicabilidade das equações empíricas propostas pelos pesquisadores e discutidas anteriormente.

Os dados brutos, porém, necessitaram de correções devido às condições restritas nos experimentos. Tendo o canal paredes laterais de acrílico e leito de cascalho, a rugosidade do canal, como um todo, seria menor que do leito de cascalho. Esta condição deve ser diferenciada de uma situação real em que o canal tem leito e margens erodíveis, ou um canal muito largo em que a influência da rugosidade das margens seria desprezível. Partindo da úl-

tima situação, adotou-se um método de correção recomendado por Vanoni e Brooks (Rêgo, 1981; Srinivasan, 1969). Os parâmetros hidráulicos relacionados ao leito foram obtidos através deste procedimento sendo eles, principalmente, o raio hidráulico do leito e o fator de atrito de Darcy-Weisbach do leito. Maiores detalhes deste procedimento podem ser encontrados em Rodrigues (2001).

As Figuras 9 e 10 apresentam a variação do coeficiente de Manning relativo ao leito (n_b) com a profundidade relativa ao leito (R_b/D_m) para o escoamento acima da camada de cascalho.

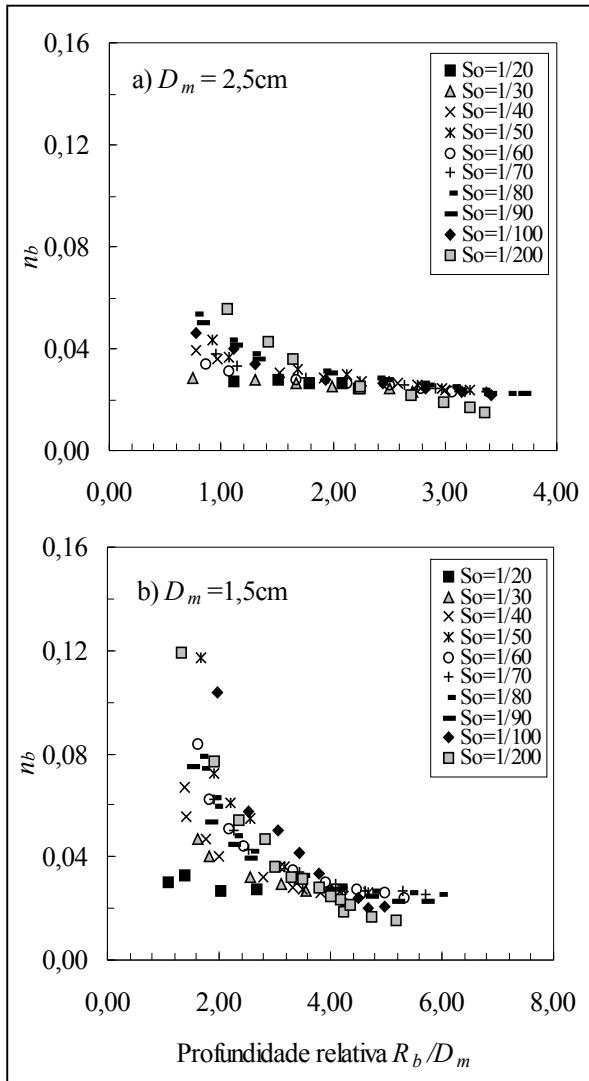


Figura 10. Coeficiente n de Manning versus a profundidade relativa R_b/D_m para os diâmetros de (a) 2,5 e (b) 1,5 cm.

Observa-se (Figuras 9 e 10) que o coeficiente de Manning tem valores iniciais altos e à medida que a profundidade R_b/D_m aumenta esses valores diminuem, tendendo a um valor mínimo e constante. Para profundidades altas, o valor de n_b torna-se constante, ou seja, o efeito da

rugosidade é independente da rugosidade relativa. Para $D_m = 4,5$ cm, os dados correspondentes às declividades de 1/10 e 1/200 apresentam tendências diferentes do restante.

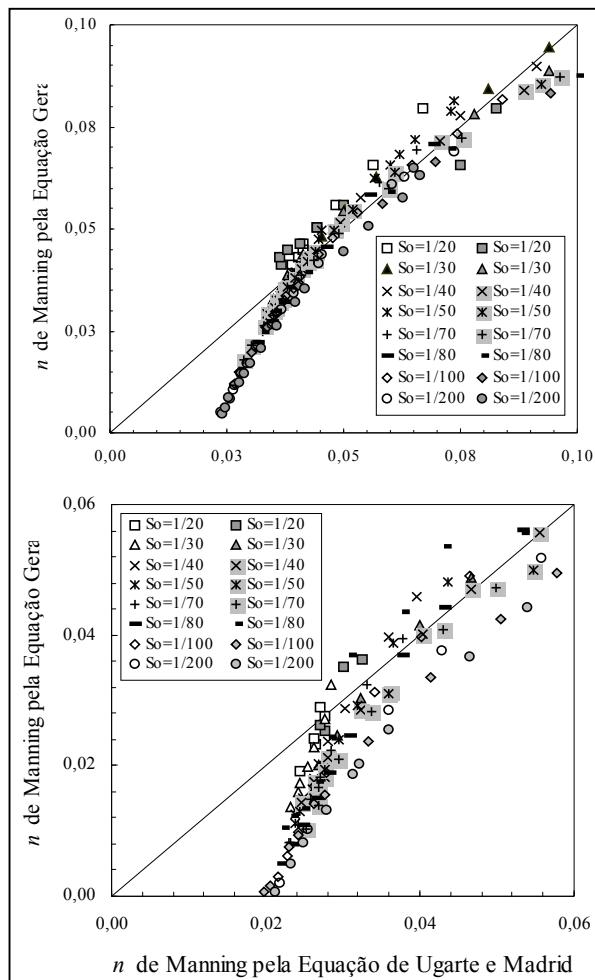


Figura 11 - Comparação entre os coeficientes de Manning para as Equações (13) e (17) para os diâmetros de (a) 4,5 e 3,5 cm e (b) 2,5 e 1,5 cm.

No primeiro caso, o escoamento foi supercrítico e o efeito do número de Froude parece ter uma influência notável no valor de n_b . Não há uma explicação óbvia no caso da menor declividade, precisando assim, ser melhor investigada. A grande dispersão observada com o leito com cascalho de $D_m = 1,5$ cm é, talvez, devido ao efeito da mobilidade do leito e consequente deformação do mesmo, que provocaria uma resistência adicional dependendo da condição do fluxo e o grau de deformação induzida.

A Figura 11 mostra uma comparação entre o valor calculado do coeficiente n de Manning pela Equação Geral (13) utilizando o raio hidráulico do leito e pela Equação (17) de Ugarte e Madrid. Observa-se na Figura 11a que o valor calculado de n a partir da Equação (17) aproxima-se

bem dos valores de n pela Equação (13) para números superiores a 0,04. Nos tamanhos 2,5 e 1,5 cm (Figura 11b) nota-se uma ligeira diferença entre os resultados. Na maioria dos casos os valores do n de Manning, calculados pela Equação (17) de Ugarte e Madrid, prevê resistência maior que os calculados pela Equação (13). Apesar disso, de uma forma geral, a tendência de todos os tamanhos é razoavelmente próxima.

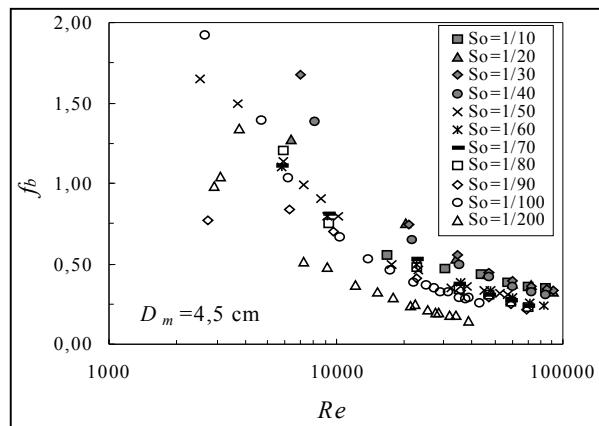


Figura 12. Relação entre o fator de atrito f_b e o número de Reynolds $Re = VR_h/v$ para o diâmetro de 4,5 cm.

A relação obtida entre o fator de atrito f_b e $Re(\ln S)^2$ é mostrada na Figura 13. Na Figura 13a observa-se a variação de f_b para os quatro tamanhos de cascalho com escoamento subcrítico ($Fr < 1$). A variação de f_b no escoamento supercrítico ($Fr > 1$) é mostrada na Figura 13b para $D_m = 4,5, 2,5$ e $1,5$ cm. Para tamanho de 3,5 cm os dados não foram suficientes para definir uma relação aceitável. Pode-se concluir que o valor de f é afetado tanto pela declividade quanto pelo tamanho do cascalho, além do número de Reynolds.

A variação da resistência do leito pode ser expressa na forma do coeficiente de atrito f de Darcy-Weisbach, que tem uma fundamentação teórica melhor do que o fator empírico n de Manning. Várias tentativas foram feitas para estabelecer uma relação satisfatória entre o fator de atrito do leito f_b , o número de Reynolds e outros fatores.

A Figura 12 mostra uma dessas tentativas: a relação entre o fator de atrito f_b e o número de Reynolds Re para o tamanho 4,5 cm. Nota-se uma grande dispersão dos pontos sem uma tendência única. Entretanto, a influência da declividade ficou evidente pela análise dos dados para cada declividade e pela semelhança das condições para os outros tamanhos. Então, procurou-se uma relação entre f_b e Re levando em conta a declividade do canal e uma melhor relação foi obtida quando f_b foi relacionado ao fator $Re(\ln S)^2$, que unificou todos os dados correspondentes aos diversos tamanhos de cascalho.

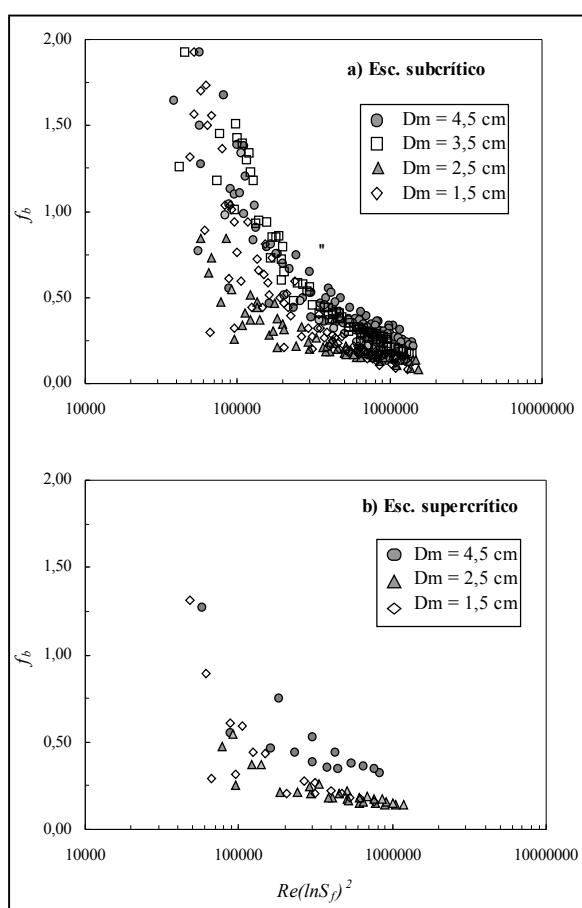


Figura 13 - Relação entre o fator de atrito f_b e a relação $Re(\ln S_f)^2$ para (a) escoamento subcrítico e (b) escoamento supercrítico

Com relação ao fator de atrito ainda na Figura 13a, os valores obtidos para o tamanho do cascalho de 1,5 cm são maiores do que para o tamanho de 2,5 cm. Isto pode ser explicado pelo efeito do movimento fácil do menor tamanho em relação aos demais e, por consequência, produzindo deformação do leito. Essas discretas formas do leito geram uma resistência adicional.

Com o intuito de avaliar a aplicabilidade das diversas equações de resistência, citadas anteriormente, a relação entre o fator de atrito e a profundidade relativa foi analisada e está indicada na Figura 14 que inclue a Equação (19) da lei logarítmica, a Equação (26) de Hey com $a = 11,10$ e $13,46$ e a Equação (27) de Bathurst.

Fazendo uma análise das figuras com relação ao tamanho do cascalho, observa-se que apenas os dados correspondentes aos diâmetros de 4,5 e 3,5 cm encontram-se entre as equações de Hey e Bathurst, diferentemente do observado em relação aos diâmetros de 2,5 e 1,5 cm. Portanto, conclui-se que as Equações (26) e (27) têm limitações da faixa de declividade do leito e do tamanho

do cascalho nas aplicações práticas, as quais precisam ser melhor investigadas.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi investigado o comportamento dos canais de alta declividade com leito de cascalho através da análise da resistência ao fluxo. Baseado nos resultados obtidos, conclui-se que a natureza da resistência ao fluxo dentro do leito de cascalho é consideravelmente diferente da resistência para um escoamento na superfície, e por isso, as duas partes do fluxo devem ser analisadas separadamente.

Apesar de ser um escoamento dentro de um meio poroso, o escoamento dentro da camada de cascalho não obedece à lei de Darcy. Portanto, o mesmo tem um comportamento hidráulico, intermediário entre escoamento com superfície livre e escoamento laminar num meio poroso de material fino.

A equação de Stephenson estima de maneira satisfatória a vazão do escoamento quando a superfície da água está abaixo da superfície da camada de cascalho, desde que o parâmetro de resistência e forma K seja um valor bem representativo do material do leito. Esse fator não é necessariamente um valor inteiro, conforme a recomendação de Stephenson (1979), para tipos padronizados, já que o cascalho pode ser uma mistura de várias formas como arredondadas, alongadas e angulares.

A resistência ao escoamento sobre a camada de cascalho expressa na forma do coeficiente n de Manning ou f de Darcy-Weisbach, apresenta uma grande variabilidade, destacando fortes influências do tamanho do cascalho e da declividade do canal.

A equação desenvolvida por Ugarte e Madrid (1994) para n forneceu bons resultados para os dois maiores tamanhos (3,5 e 4,5 cm) e para valores de n superiores a 0,04. Para tamanhos menores (2,5 e 1,5 cm), há uma subestimação da equação no valor de n .

O coeficiente de atrito do leito f_b é afetado tanto pela declividade quanto pelo tamanho do cascalho, isto é, pela rugosidade relativa e pelo número de Reynolds. Sendo de um modo geral, a influência da declividade mais significativa.

Uma comparação entre as equações de Hey (1979), Bathurst (1987) e Lei Logarítmica para o cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach mostra que a maioria dos valores obtidos, especialmente para os diâmetros de grande tamanho (3,5 e 4,5 cm), encontram-se na faixa compreendida entre as equações de Hey e Bathurst para. Portanto, essas equações podem ser consideradas satisfatórias para condições específicas de tamanho de sedimento e declividade.

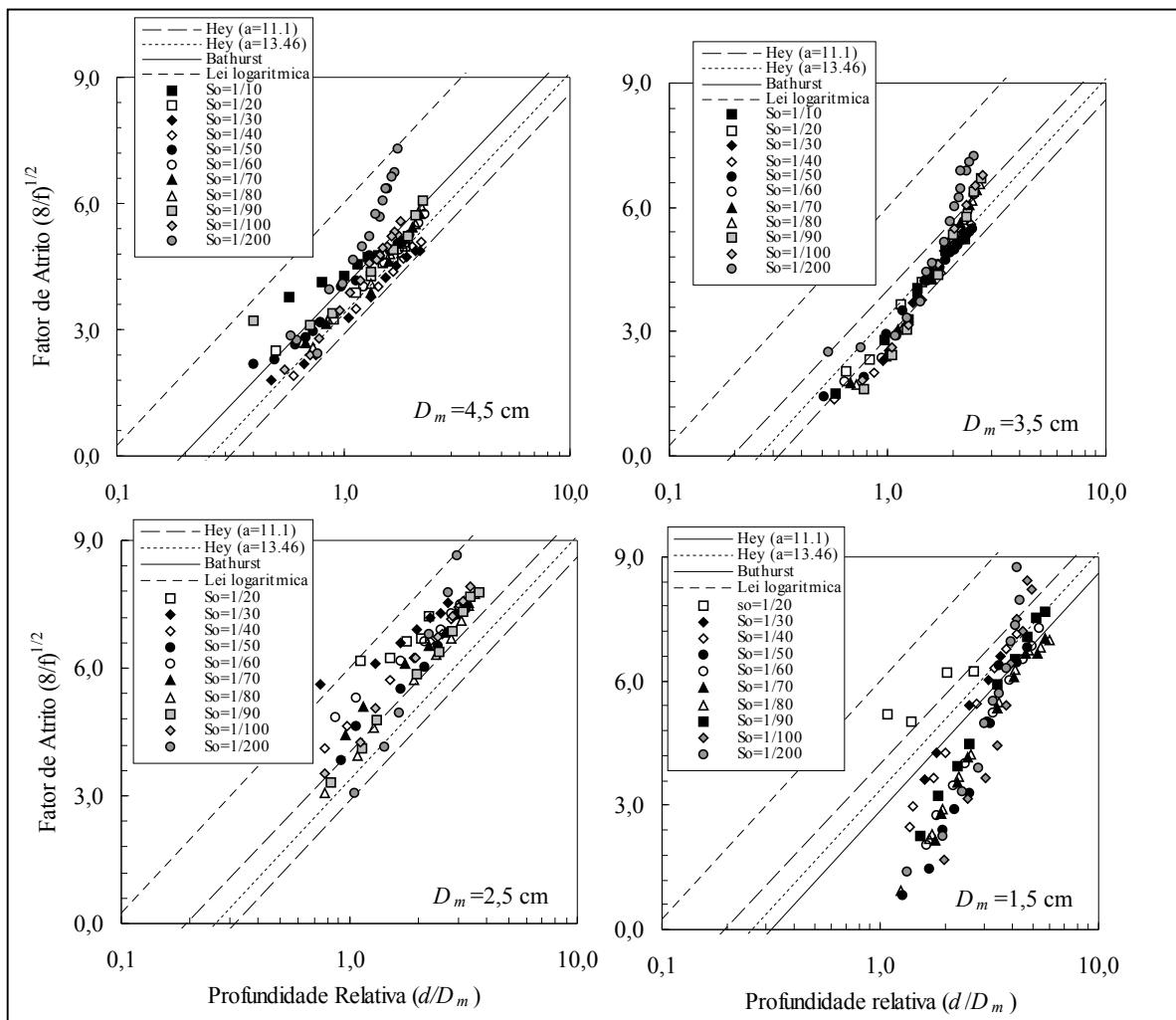


Figura 14 – Comparação entre o fator de atrito de Darcy-Weisbach $(8f)^{1/2}$ com as equações de Hey (1979), Bathurst (1987) e a Lei logarítmica para os diâmetros D_m de 4,5, 3,5, 2,5 e 1,5 cm.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A^* : área molhada
- a_1 : constante
- α_2 : parâmetro da altura da rugosidade
- b_1, b_2 : constantes que dependem das unidades e das características do meio
- c : coeficiente numérico
- C_1 : constante adimensional
- d : profundidade do fluxo acima do leito
- d_g : profundidade do fluxo
- D : diâmetro do cascalho
- D_m : diâmetro médio
- D_{50} : diâmetro do qual 50% do material é mais fino
- D_{84} : diâmetro do qual 84% do material é mais fino
- f : fator de atrito de Darcy-Weisbach

- f_f : fator de atrito relativo ao leito
- F_r : número de Froude
- g : aceleração da gravidade
- K : fator numérico da forma do cascalho
- K' : fator de atrito associado ao cascalho
- K_s : condutividade hidráulica
- k : altura média dos elementos de rugosidade do leito
- m : coeficiente numérico
- n : coeficiente de rugosidade de Manning
- n_b : coeficiente de rugosidade de Manning relativo ao leito
- n_p : porosidade do meio
- P : perímetro molhado
- q_m : vazão por unidade de largura calculada
- q_{mo} : vazão por unidade de largura observada
- q_s : vazão por unidade de largura do canal
- R_b : raio hidráulico relativo ao leito
- Re : número de Reynolds

R_h : raio hidráulico

R_p : raio hidráulico referente ao perímetro molhado do leito e dos bancos.

R_m : raio hidráulico médio

S : gradiente hidráulico

S_f : declividade da linha de energia

S_c : declividade do canal

V : velocidade média do fluxo no esc. superficial

V_a : velocidade aparente no meio poroso

V_p : velocidade do fluxo nos vazios

V_* : velocidade de atrito

ν : viscosidade cinemática do fluido

AGRADECIMENTOS

Ao programa da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Association of International Education, Japan (AIEJ) que forneceu apoio através de bolsa de estudo à primeira autora durante o período da pesquisa na Universidade de Matsuyama, Ehime, Japão.

REFERÊNCIAS

- ABT, S. R. ET AL. (1987). *Development of riprap design criteria by riprap testing in flumes, Phase 1*. NUREG/CR-4651, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington.
- ABT, S. R., WITTLER, R. J., RUFF, J. F. & KHATTAK, M. S. (1988). *Resistance to flow over riprap in step channels*. Water Resource. Bull, 24 (6), pp.1193-1200.
- AHMED, N. & SUNADA, D. K. (1969). *Nonlinear flow in porous media*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, HY6, pp. 1847-1857.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1963). *Fiction factors in open channels*. Progress report of the task force on factors in open channels of the committee of hydromechanics of the hydraulics division (E. Silberman, Chairman). Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 89, No. HY2, pp. 97-143.
- ANDERSON, A. G., PAINTAL, A. S. & DAVENPORT, J. T. (1970). *Tentative design procedure for riprap lined channels*, NCHRP Report. 108, Hwy. Res. Board, Nat. Acad. of Sci Nat. Acad. of Engrg. Washington.
- BAKMETOFF, B. A. & FEODOROFF, N. V. (1937) *Flow through granular media*. Journal of Applied Mechanics. 4A: 97-104.
- BARNES, H. H. (1967). *Roughness characteristics of natural channel*. Water Supply Paper 1949, United geological survey, Washington, DC.
- BATHURST, J. C. (1985). *Flow resistance estimation in mountain rivers*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 111(4), pp. 625-643.
- BATHURST, J. C. (1987). *Critical conditions for bed material movement in steep boulder-bed streams*. Corvallis Symposium Public. No. 165, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, U.K.
- BURKHAM, D. E., & DAWDY, D. R. (1976). *Resistance equation for alluvial channel flow*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 102, No. HY10, pp. 1479-1489.
- CEDERGREEN, H. R. (1967). *Seepage, drainage and flow nets*. Journal Wiley & Sons, NY, 534 p.
- CHOW, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Book 300p.
- CODELL, R. B. , ABT, S. R., JOHNSON, T., & RUFF, J. (1990). *Estimation of flow through and over armored slope*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 116 (10), pp.1252-1269.
- DUDGEON, C. R. (1966). *An experimental study of the flow of water through coarse porous media*. La Houille Blanche, 7: 785-801.
- HEY, R. D., (1979). *Flow resistance in gravel rivers*. Journal of the Hydraulics Division ASCE, Vol. 105, No. HY4, pp. 365-379.
- JARRET, R. D. (1984). *Hydraulics of high-gradient streams*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 110(11), pp. 1519-1539.
- JOHNSON, H. A. (1971), *Flow through rockfill dams*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 97 (SM2), pp.329-340.
- KEULEGAN, G. H. (1938). *Laws of turbulent flow in open channels*. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 21, Research Paper RP 1151, pp. 707-741.
- LEOPOLD, L., WOLMAN, G., MILLER, J. (1964). *Fluvial processes in geomorphology*. W. H. Freeman and Co., San Francisco, California, pp. 520.
- LEPS, T. M. (1973). *Flow through rockfill*. In Hirschfeld, R. C. & Poulos, S. J. (Editors), Embankment Dam Engineering. Journal Wiley & Sons. NY: 87-105.
- LIMERINOS, J. T. (1970). *Determination of the Manning coefficient for Measured Bed Roughness in Natural Channels*, Water Supply 1898. United States geological Survey, Washington, D.C.
- PARKIN, A. K., TROLLOPE, D. H. & LAWSON, J. R. (1966). *Rockfill structures subjected to water flow*. Proc. ASCE, Journal of Soil Mechanics Foundation Engineering Division 92 (SM6) pp. 135-151.
- RÉGO, J.C. (1981). *Relações de resistência e de transporte para canais aluviais*. Dissertação de Mestrado da UFPB, Campina Grande PB.
- RODRIGUES, A. C. L. (2001). *Resistência ao fluxo em canais íngremes e formação de camada resistente*. Dissertação de Mestrado da UFPB, Campina Grande, PB.
- SARGENT, R. J. (1979). *Variation of Manning's n roughness coefficient with flow in open river channels*. Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists, Vol. 33. No. 3, pp. 290-294.
- SAYRE, W. W. & ALBERTSON, M. L. (1963), *Roughness spacing in rigid channels*. Transactions ASCE, Vol. 128, pp. 343-372.
- SONI, J.P., ISLAM, N. & BASAK, P. (1978). *An experimental evaluation of non-Darcian flow in porous media*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 38, 3/4, pp. 231-241.

- SRINIVASAN, V.S. (1969). *Mechanics of flat bed flow and occurrence of bed forms in alluvial channels*. Ph.D Thesis. Department of Civil Engineering. University of Waterloo, Ontario, Canadá.
- STEPHENSON, D. (1979). *Rockfill in hydraulic engineering*. Elsevier, Amsterdam, 215p.
- STREETER, V.L. & WYLIE, E. B. (1980). *Mecânica dos Fluidos*. Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, São Paulo, 585p.
- UGARTE, A. & MADRID, M. (1994). *Roughness coefficient in mountain rivers*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 94, pp. 652-656.
- VOLKER, R. E. (1969). *Non-linear flow in porous media by finite elements*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, HY5, 95, pp. 2093-2114.
- WILKINS, J. K. (1956). *Flow of water through rockfill and its application to the design of dams*. Proceedings, 2nd Australia New Zealand Soils Conference.
- WOLMAN, M. G. (1954). *The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania*. Prof. Paper 271, United States Geological Survey, Washington, D. C.

Flow Resistance in Steep Channels With a Gravel Bed

ABSTRACT

The present study is an experimental investigation of flow resistance in steep channels with a gravel bed. In rivers with steep slopes two types of flow conditions are observed, the first one (the most common condition) occurring when water flows through the gravel layer and the second when the water surface stays well above the gravel layer.

It was found that for flow resistance through the gravel layer, the equation proposed by Stephenson estimates flow satisfactorily, if the friction factor K of the gravel is an appropriate value for the type and form of the bed material.

For the second flow condition, the variation of gravel bed resistance was analyzed. The equation developed by Ugarte and Madrid for the modified value of the Manning coefficient n and the equations of Hey and Bathurst for Darcy-Weisbach coefficient f, were found to be satisfactory under certain specific conditions of the bed material size and slope.

Key-words: gravel bed; steep slope; subsurface and surface flow.