

FENÓMENOS DE SEDIMENTAÇÃO E TRANSPORTE - NOVAS PERSPECTIVAS DE ANÁLISE Sedimentation and Transport Phenomena - New Perspectives of Analysis

E. CARVALHO ⁽¹⁾, R. MAIA ⁽²⁾ e M. F. PROENÇA ⁽³⁾

⁽¹⁾ Estudante de Doutoramento, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, elsac@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, rmaia@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor auxiliar, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, fproenca@fe.up.pt

Resumo

Os escoamentos sobre leitos rugosos são importantes em muitas das aplicações da Mecânica dos Fluidos. A complexidade do leito conduz, no entanto, a dificuldades suplementares na definição de alguns dos parâmetros relevantes para a interacção escoamento-leito, em particular a tensão de arrastamento. A medição, para diferentes leitos definidos por uma curva granulométrica característica, de perfis de velocidade e valores da tensão de arrastamento, permitirá verificar as hipóteses existentes para a influência da rugosidade no perfil de velocidades, para além de possibilitarem a obtenção de valores do coeficiente de resistência. Neste artigo apresentam-se as medições da tensão de arrastamento feitas com recurso a diferentes técnicas, nomeadamente as decorrentes da medição de perfis de velocidade com Anemometria Laser por efeito Doppler e a medição directa por meio de uma sonda óptica adequada ao efeito. Estas medições permitem a comparação dos valores dos coeficientes de resistência obtidos por diferentes métodos, os quais são também comparados com os resultados existentes na literatura.

Palavras-chave: sonda óptica, tensão de arrastamento, coeficiente de resistência, leitos rugosos.

Abstract

The flow over rough channel beds is important in many applications of Fluid Mechanics. The complexity of the bed leads to additional difficulties on the definition of some relevant parameters for the bed-flow interaction, namely the shear stress. Velocity profiles and shear stress measurements, for different bed roughness conditions allowed the verification of different hypothesis concerning the roughness influence and also to obtain friction factors for each channel bed. This article presents some experimental results of friction coefficients measured with different techniques, such as Laser Doppler Anemometry and shear stress probe. These measurements allowed the comparison between the existing methods for evaluating the friction coefficients. The obtained results were also compared with the ones of the literature.

Keywords: shear stress probe, shear stress, friction factor, rough beds.

1. Introdução

O estudo das condições de início do movimento é importante, não só para o estudo do transporte de sedimentos, mas também para o dimensionamento de canais estáveis.

O presente estudo, que se insere no desenvolvimento dos trabalhos referentes à Tese de Doutoramento "Fenómenos de Sedimentação e Transporte - Novas Perspectivas de Análise" tem como objectivo final estudar o início do movimento dos sedimentos, analisando os critérios existentes e investigando uma nova aproximação teórica, tendo em especial consideração a influência das flutuações turbulentas no mecanismo do início do movimento.

Para tal serão realizados ensaios experimentais, recorrendo a técnicas correntemente utilizadas, como Anemometria Laser Doppler, designada por LDA, e mais recentes, como o caso da sonda óptica, para medição directa da tensão de corte.

2. Critério de Shields

Os critérios existentes para estabelecer as condições de início do movimento, designadas como condições críticas, podem envolver a tensão crítica de arrastamento, τ_c , ou a velocidade média crítica, U_{cr} . O critério de Shields é um dos critérios baseados na tensão crítica de arrastamento (Cardoso, 1998).

De acordo com este critério, as principais variáveis de que depende o início do movimento podem ser agrupadas em dois parâmetros adimensionais: o parâmetro de Shields, Y_{cr} [1], e o número de Reynolds de atrito, Re^* [2] (Cardoso, 1998):

$$Y_{cr} = \frac{u_{*c}^2}{(s-1)gd}, \quad [1]$$

em que $u_{*c} = \sqrt{\tau_c / \rho}$ representa a velocidade de atrito crítica, sendo τ_c a tensão de arrastamento crítica, $s = \rho_s / \rho$, em que ρ_s é a massa volúmica dos sedimentos, ρ a massa volúmica da água, g a aceleração da gravidade, d o diâmetro típico dos sedimentos e Re^* o número de Reynolds, dado pela expressão,

$$Re^* = \frac{u_{*c}d}{\nu}, \quad [2]$$

em que ν representa a viscosidade cinemática.

O início do movimento é, de acordo com este critério, caracterizável pela função $Y_{cr} = f(Re^*)$. Esta função corresponde às condições críticas do início do movimento e é traduzida graficamente pela curva apresentada no diagrama de Shields (Figura 1). Os pontos localizados acima desta curva correspondem a condições de escoamentos em que há movimento das partículas do leito, enquanto que os pontos localizados abaixo da curva correspondem a escoamentos em que não se verifica movimento das partículas do leito.

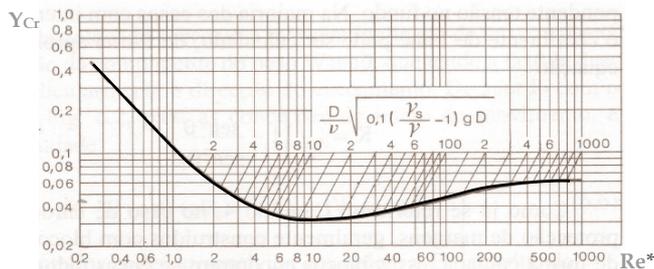


Figura 1. Diagrama de Shields.

3. Determinação da Tensão de Arrastamento

3.1. Introdução

A aplicação do Critério de Shields tem por base a determinação da tensão de arrastamento para as condições críticas do escoamento. É possível utilizar diferentes métodos para a sua determinação, que podem ser agrupados em dois tipos: os métodos indirectos e os métodos directos (ASCE Task Force, 1963).

Por definição, a tensão de arrastamento na parede, τ , é proporcional ao gradiente de velocidade na parede e dada pela expressão:

$$\tau = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{\text{parede}}, \quad [3]$$

em que μ é o coeficiente de viscosidade dinâmico, u a velocidade média pontual e y a correspondente distância à parede.

O gradiente de velocidade nem sempre é fácil de determinar. Assim sendo, utilizam-se, em alternativa, os designados métodos indirectos, baseados no conhecimento do perfil de velocidades e no ajuste de diferentes leis a diferentes zonas desse mesmo perfil (Figura 2). Estas leis são também função da tensão de arrastamento e possibilitam, assim, a determinação desta grandeza, ainda que de forma indirecta.

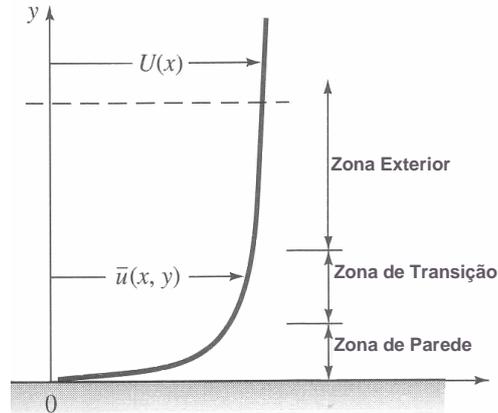


Figura 2. Perfil típico de velocidades sobre uma placa plana, no qual se identificam as diferentes zonas.

Utilizando a velocidade de atrito como escala, é possível representar o perfil de velocidades sob a forma adimensional, representada na Figura 3.

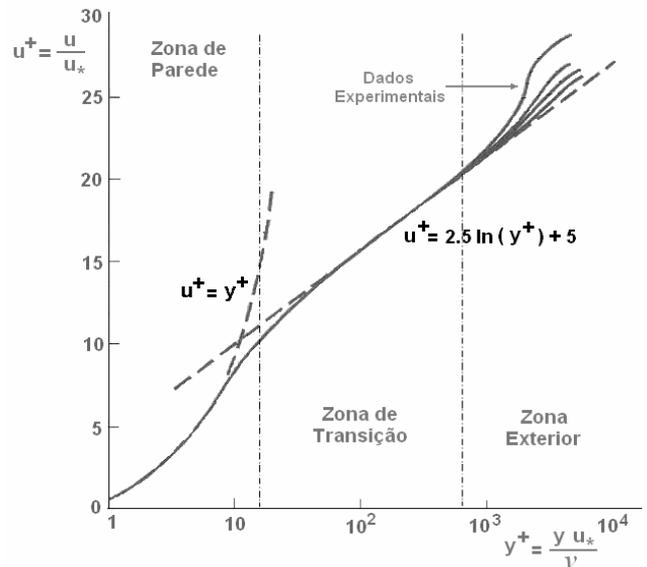


Figura 3. Perfil de velocidades representado em coordenadas de parede, u^+ e y^+ .

No gráfico da Figura 3 (em escala semi-logarítmica), são representadas duas variáveis adimensionais, denominadas coordenadas de parede, as quais são determinadas pelas expressões:

$$u^+ = \frac{u}{u_*} \quad \text{e} \quad y^+ = \frac{y u_*}{\nu}. \quad [4]$$

3.2. Métodos Indirectos

Na Figura 3 é possível identificar as três zonas do perfil de velocidades, bem como as leis teóricas associadas.

Na zona de parede, ou subcamada viscosa, localizada a distâncias muito pequenas da parede (regra geral da ordem dos micrómetros, correspondendo a $y^+ \leq 5$), é possível ajustar um perfil linear, de acordo com a equação:

$$u^+ = y^+ \quad [5]$$

No entanto, dada a grande proximidade da parede, a obtenção de dados experimentais nesta zona é limitada, dificultando o ajuste desta lei.

Na zona de transição é possível ajustar uma lei logarítmica [6], tal como:

$$u^+ = 2.5 \ln(y^+) + 5 \quad [6]$$

A sua localização relativamente à parede, permite obter mais facilmente dados experimentais, razão pela qual é mais utilizada para o ajuste da lei de parede respectiva. Contudo, existem alguns escoamentos para os quais a zona logarítmica poderá não estar bem definida, dificultando a aplicação deste método.

O método utilizado neste artigo, o método de Clauser, resulta de uma derivação da lei logarítmica da velocidade e será apresentado mais adiante.

As limitações por vezes existentes na utilização dos métodos indirectos, tornam útil a consideração de novos métodos para a determinação da tensão de arrastamento, como os métodos directos.

3.3. Métodos Directos

A sonda óptica é um instrumento que permite medir directamente a tensão de arrastamento. A sonda é instalada no fundo do canal, de forma a não perturbar o escoamento e emite um padrão de franjas que formam o volume de controlo, localizado a uma pequena distância da parede, o qual deverá estar situado na subcamada viscosa.

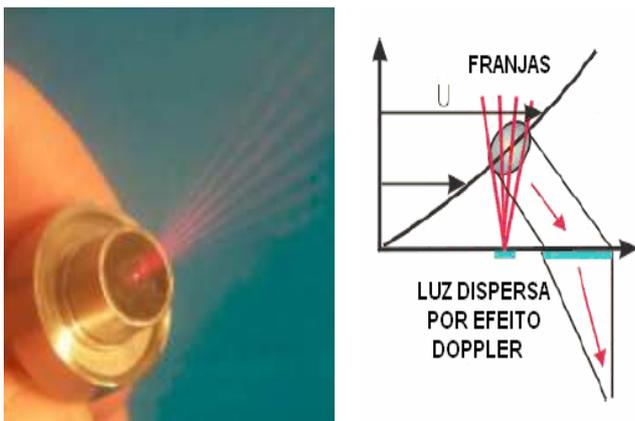


Figura 4. Imagem das franjas divergentes (a) e esquema de funcionamento da sonda óptica (b) (adaptado de Fourguette *et al.*, 2004).

O princípio de funcionamento baseia-se essencialmente no efeito Doppler. As partículas ao atravessarem o volume de controlo emitem luz que é recolhida pelo fotodetector incorporado na sonda (Figura 4). A luz recolhida tem uma frequência própria, designada de frequência Doppler.

Dado que o volume de controlo se localiza na sub-camada viscosa, para a qual o perfil de velocidades é linear, tem-se:

$$\frac{u}{y} \propto \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{\text{parede}} \quad [5]$$

e pela configuração das franjas divergentes é possível escrever (Fourguette *et al.* (2004)):

$$\delta \propto y. \quad [6]$$

Pela teoria Doppler,

$$f_D = \frac{u}{\delta}, \quad [7]$$

que, com o auxílio das expressões [5] e [6], pode ser reescrito na forma:

$$f_D = k_1 \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{\text{parede}}, \quad [8]$$

onde k_1 é uma constante.

Tendo em atenção a definição da tensão de arrastamento [3], é fácil obter esta grandeza em função da frequência Doppler:

$$\tau = \mu k f_D, \quad [9]$$

em que k é um parâmetro que depende das características ópticas da sonda.

A expressão [9] indica que a tensão de corte é directamente proporcional à frequência Doppler, o que mostra a resposta linear deste tipo de instrumento de medição.

A utilização da sonda óptica permite uma medição expedita e directa da tensão de arrastamento, utilizando a informação do escoamento junto à parede e com um tempo de medição mais reduzido, desde que se utilize um escoamento convenientemente fornecido de partículas.

4. Caracterização da Influência das Rugosidades

Para estudar o início do movimento das partículas em leitos sedimentares é necessário caracterizar previamente a influência da rugosidade no escoamento.

Numa primeira fase definiu-se uma metodologia para aplicação em fundos lisos (Figura 5), recorrendo a diferentes técnicas e métodos para determinação da tensão de arrastamento: a) medição de perfis de velocidade recorrendo à anemometria laser Doppler, para posterior aplicação de métodos indirectos; b) medição directa com a sonda óptica. O conhecimento da tensão de arrastamento permite obter os correspondentes valores do coeficiente de resistência pela expressão [10],

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_o^2}, \quad [10]$$

em que C_f é o coeficiente de resistência, τ_w é a tensão de arrastamento na parede e U_o é a velocidade do escoamento longe da influência da parede.

A aplicação desta metodologia a fundos lisos permite caracterizar o escoamento, bem como validar os resultados da sonda óptica, por comparação com os métodos indirectos, geralmente utilizados. Posteriormente tentar-se-á aplicar a mesma metodologia a fundos rugosos, para avaliar a influência da rugosidade nos perfis de velocidade e nas características do escoamento.

A aplicabilidade dos dois tipos de métodos (directos e indirectos) a superfícies rugosas terá, ainda, que ser verificada, tendo em atenção as condicionantes inerentes a este tipo de superfície, nomeadamente (i) a existência, ou não, de uma zona logarítmica bem definida, que possibilite a aplicação do método de Clauser e (ii) a dificuldade da determinação rigorosa da origem do perfil de velocidades, entre o topo das partículas e o leito de suporte das mesmas (Figura 6), (Koll, 2006 e Pokrajac *et al.*, 2006).

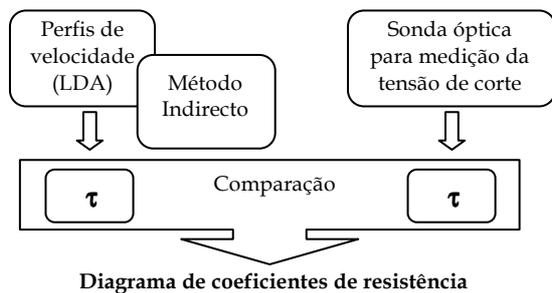


Figura 5. Diagrama da metodologia para avaliação da influência das rugosidades no escoamento. Os valores da tensão de arrastamento determinados pelos dois métodos são comparados e representados graficamente num diagrama de coeficientes de resistência.

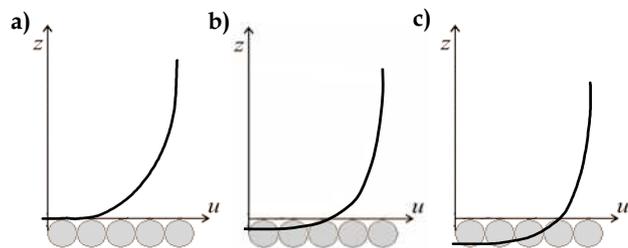


Figura 6. Esquematização de diferentes possibilidades para a origem do perfil de velocidades: a) no topo da partícula, b) à distância do topo y_0 ($= y_{topo} - 0,2d$, sendo d o diâmetro da partícula) e c) no leito de suporte das partículas.

5. Instalação Experimental

As medições, referentes à primeira fase (superfície lisa), foram realizadas no canal metálico do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Figura 7).

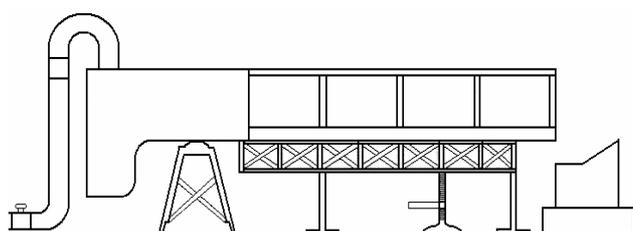


Figura 7. Esquema do canal metálico.

O canal tem 40 cm de largura, 60 cm de altura e 17 m de comprimento e a inclinação, que pode ser regulada, foi considerada nula. O caudal é controlado por uma válvula existente a montante do canal e a comporta existente na secção da extremidade jusante permite variar a altura do escoamento.

As paredes laterais do canal são em vidro, permitindo o acesso óptico (Figura 8) e o fundo do canal, concebido em metal e perspex, está adaptado para a instalação da sonda óptica (Figura 9).



Figura 8. Instalação experimental.

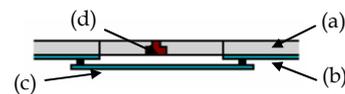


Figura 9. Esquema de instalação da sonda óptica: (a) fundo em perspex, (b) fundo metálico, (c) tampa metálica amovível e (d) sonda óptica.

6. Resultados Obtidos para Fundo Liso

As medições foram realizadas para diferentes condições do escoamento (Quadro 1), nomeadamente caudal, Q , altura da comporta de jusante, h_p , e número de Reynolds, Re , definido por:

$$Re = \frac{U_{med} R}{\nu} \tag{11}$$

em que U_{med} é a velocidade média seccional do escoamento, ν é a viscosidade cinemática da água e R é o raio hidráulico, definido por:

$$R = \frac{S}{P} \tag{12}$$

sendo S a secção do escoamento e P o perímetro molhado.

Quadro 1. Condições de escoamento consideradas.

Ensaio	Q (L/s)	h _p (cm)	Re
Q10hp10	10	10	1.6×10 ⁴
Q20hp10	20	10	2.9×10 ⁴
Q30hp10	30	10	4.1×10 ⁴
Q10hp5	10	5	1.8×10 ⁴
Q20hp5	20	5	3.4×10 ⁴
Q30hp5	30	5	4.7×10 ⁴

A nomenclatura usada para a identificação dos ensaios, Q30hp10 (por exemplo) significa que o caudal imposto, Q, foi de 30 L/s e a altura da comporta de jusante, hp, foi de 10 cm.

Nas Figuras 10 e 11 apresentam-se, respectivamente, os perfis adimensionais da velocidade média pontual e dos desvios quadráticos médios (rms) correspondentes a diferentes condições do escoamento.

Analisando a Figura 11, verifica-se que as intensidades de turbulência atingem um máximo junto à parede, diminuindo para cotas superiores, até atingirem valores sensivelmente constantes. A possível influência das intensidades de turbulência perto da parede no início do movimento das partículas sedimentares é um dos objectivos do estudo em que se insere este trabalho, e será investigada em fase mais avançada do mesmo.

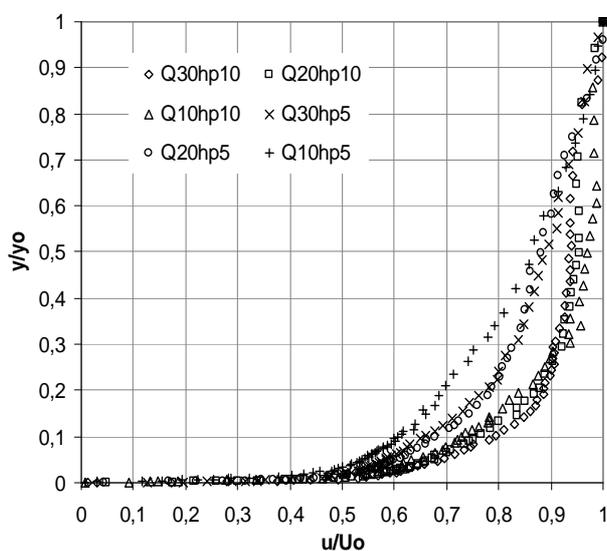


Figura 10. Perfis de velocidade medidos no canal, sobre um leito liso para diferentes condições definidas por um caudal Q (em L/s) e por uma altura da comporta hp (em cm).

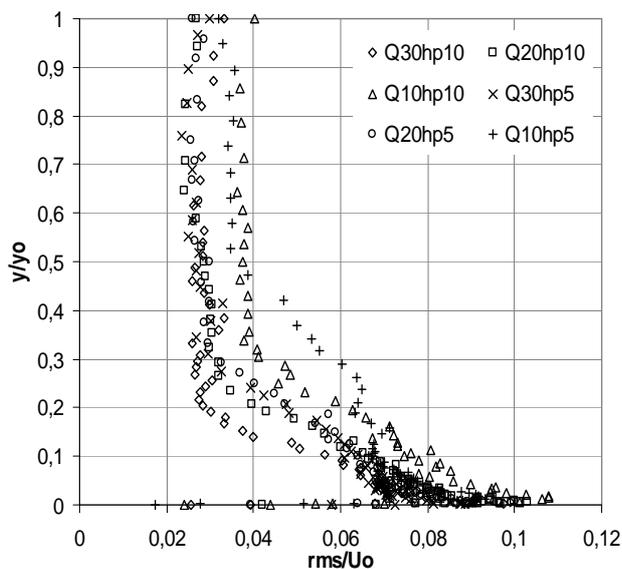


Figura 11. Perfis de valores quadráticos médios (rms) medidos no canal, sobre um leito liso para diferentes condições definidas por um caudal Q (em L/s) e por uma altura da comporta hp (em cm).

O método de Clauser foi aplicado aos perfis de velocidade (valores médios pontuais):

$$\frac{u}{U_o} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \ln\left(\frac{U_o Y}{\nu}\right) + \sqrt{\frac{C_f}{2}} \left(\frac{1}{2k} \ln\left(\frac{C_f}{2}\right) + B\right), \quad [13]$$

em que u representa a velocidade média pontual, U_o a velocidade longe da influência da parede, k a constante de von Kármán (k=0.41), C_f o coeficiente de resistência, Y a distância à parede, ν a viscosidade cinemática e B uma constante.

Este método consiste no traçado de uma família de curvas, em função do coeficiente de resistência, C_f.

A curva que melhor se ajuste aos dados experimentais corresponde ao valor do C_f para o respectivo perfil.

A Figura 12 representa a aplicação do método de Clauser a um dos perfis de velocidade medidos (caudal de 30 L/s e altura da comporta de 5 cm). Analisando a figura, verifica-se que, para o perfil considerado, o valor do coeficiente de resistência é C_f = 0,0022.

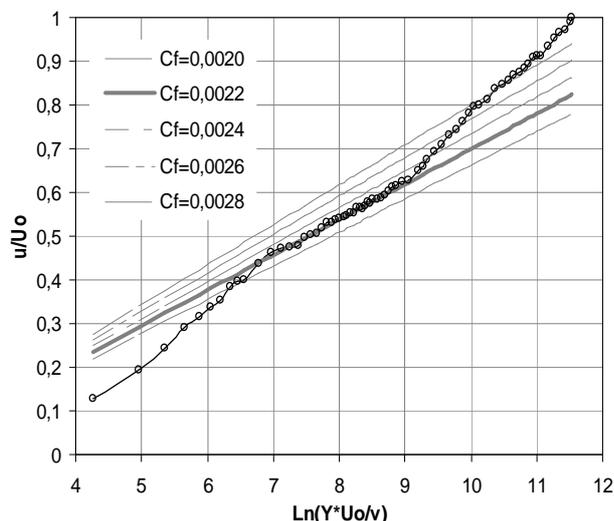


Figura 12. Aplicação do método de Clauser ao perfil referente a Q=30 L/s e hp=5 cm.

Na Figura 13 apresentam-se alguns exemplos dos resultados obtidos com a sonda óptica, através do respectivo programa de aquisição e processamento

A primeira figura corresponde ao histograma de frequências, enquanto que na segunda se apresenta o sinal ("burst", a linha contínua) e a frequência Doppler (pico isolado, a cheio).

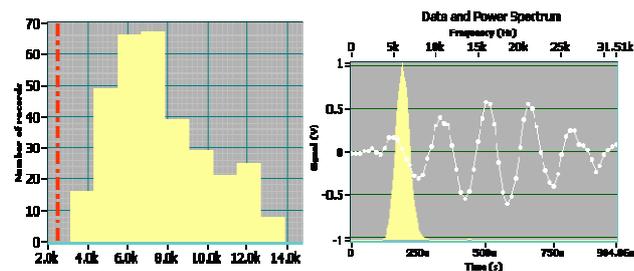


Figura 13. Exemplo do resultado de uma medição com sonda óptica.

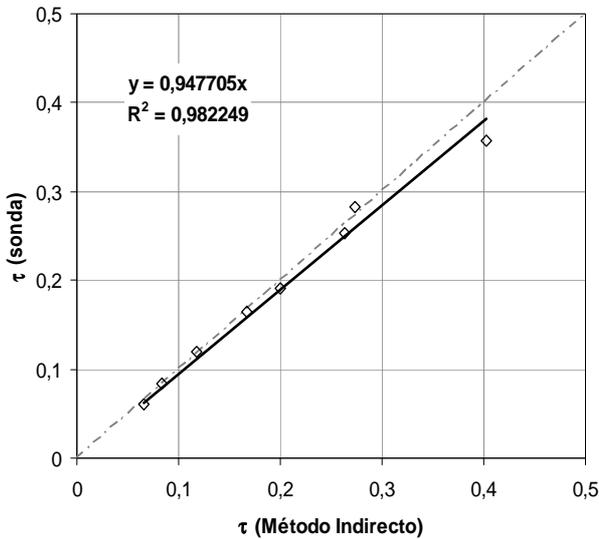


Figura 14. Comparação dos resultados da sonda óptica com os do método de Clauser, para diferentes condições de escoamento.

Na Figura 14 apresenta-se a comparação das medições da tensão de corte obtidos pelos dois métodos: Clauser e sonda óptica. A análise da figura permite verificar que os resultados obtidos pelos dois métodos apresentam uma boa correlação, tendo-se obtido diferenças relativas correntes de 1% a 3%. A partir dos valores da tensão de arrastamento, obtidos pela sonda óptica, foram determinados os valores do coeficiente de resistência, C_f , pela expressão [10]. Estes valores puderam ser comparados com os obtidos pelo método de Clauser e com os existentes na literatura, recorrendo à definição do coeficiente de resistência, λ , dada por Novais-Barbosa (1986):

$$\lambda = 4C_f . \quad [14]$$

A Figura 15 apresenta os resultados experimentais obtidos bem como resultados teóricos e experimentais existentes na literatura (Chow, 1959).

A análise da figura permite constatar que os números de Reynolds das medições realizadas no âmbito deste trabalho são superiores aos dos resultados experimentais encontrados na literatura e que os valores experimentais estão em conformidade com a curva teórica correspondente à expressão de Kármán-Prandtl (Figura 15):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(\text{Re} \sqrt{\lambda}) + 0.4 . \quad [15]$$

7. Conclusões e Trabalho Futuro

A utilização da metodologia apresentada permitiu, para o caso dos fundos lisos, comparar os resultados obtidos pelos dois métodos: o método de Clauser e a sonda óptica. A comparação desses resultados com os obtidos por diferentes autores foi importante para a aferição do comportamento da sonda e da fiabilidade dos seus resultados (em fundos lisos). Verificou-se ainda que os escoamentos simulados no canal apresentam números de Reynolds superiores aos ensaiados na literatura, permitindo assim obter dados para gamas superiores do número de Reynolds que estão de acordo com a expressão de Kármán-Prandtl.

O trabalho futuro incidirá sobre a aplicação da metodologia aqui mencionada ao caso dos escoamentos sobre leitos.

A partir dos valores da tensão de arrastamento, obtidos pela sonda óptica, foram determinados os valores do coeficiente de resistência, C_f , pela expressão [10]. Estes valores puderam ser comparados com os obtidos pelo método de Clauser e com os existentes na literatura, permitindo assim obter dados para gamas superiores do número de Reynolds que estão de acordo com a expressão de Kármán-Prandtl.

O trabalho futuro incidirá sobre a aplicação da metodologia aqui mencionada ao caso dos escoamentos sobre leitos rugosos e, posteriormente, à análise das correspondentes condições de início do movimento.

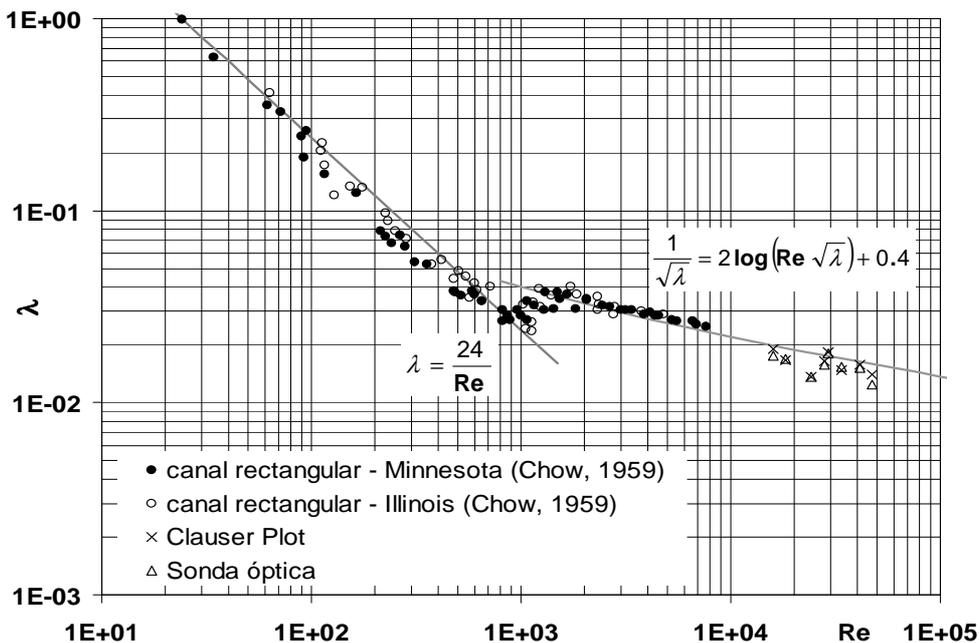


Figura 15. Diagrama de coeficientes de resistência.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o financiamento deste trabalho por meio da bolsa de Doutorado SFRH/BD/19575/2004.

Referências

- ASCE Task Force (1963). *Friction Factors in Open Channel Flows*, Journal of Hydraulic Division, 89, N.2, pp. 97-143.
- Cardoso, A. H. (1998). *Hidráulica Fluvial*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 314. ISBN 927-31-0815-1.
- Chow, V. (1959). *Open-channel hydraulics*, MacGraw-Hill International Editions.
- Fourquette, D., Gonzalez, P., Modarress, D., Arik. E. (2004). *Optical Measurement of Wall Shear Stress With Emphasis on Flows Near Separation*, 24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference.
- Koll, k. (2006). *Parameterisation of the vertical velocity profile in the wall region over rough surfaces*, River Flow 2006, 1, pp. 163-171.
- Novais-Barbosa, J. (1986). *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral*, Porto Editora, Porto, 808.
- Pokrajac, D., Finnigan, J.J., Manes C., McEwan, I., & Nikora, V. (2006). *On the definition of the shear velocity in rough bed open channel flows*, River Flow 2006, Vol. 1, pp. 89-98.