

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS QUE CARACTERIZAM O ESCOAMENTO EM CANAL ABERTO

Data de aceite: 01/02/2024

Hélio Augusto Goulart Diniz

Docente e Bolsista do Programa de
Pesquisa Produtividade do Centro
Universitário Estácio de Belo Horizonte
<http://lattes.cnpq.br/5689299775816152>

Aniel de Melo Dias

Docente do Centro Universitário Estácio
de Belo Horizonte
<http://lattes.cnpq.br/7872565673695086>

Liliane Cruz Gomes de Souza Santos

Docente do Centro Universitário Estácio
de Belo Horizonte
<http://lattes.cnpq.br/4130177031958155>

RESUMO: escoamentos em canais abertos são caracterizados por apresentar uma superfície livre submetida à pressão atmosférica, tendo um grande número de aplicações práticas na engenharia. A caracterização do escoamento em um canal depende de diversos fatores, a citar: fluido operado, área de escoamento, vazão, profundidade do escoamento, declividade de fundo e rugosidade do material que compõe o canal. Este trabalho baseia-se no estudo experimental de uma seção de testes de canal hidráulico aberto de seção transversal retangular operada com água como fluido

de trabalho. Os parâmetros supracitados são analisados de forma extensiva a partir da realização de testes experimentais. De forma geral, observou-se que o escoamento foi praticamente turbulento e supercrítico durante o período de ensaio. A camada de água diminuiu à medida que a declividade do canal aumentava. O coeficiente médio de Manning e de Chézy foram, respectivamente, 0,00784 e 59,1.

PALAVRAS-CHAVE: Canal aberto, estudo experimental, escoamento de água, coeficiente de Manning, coeficiente de Chézy.

ABSTRACT: Flows in open channels are characterized by the presence of a free surface subjected to atmospheric pressure, with numerous practical applications in engineering. The characterization of flow in a channel depends on various factors, including the operated fluid, flow area, discharge, flow depth, bed slope, and material roughness composing the channel. This study is based on the experimental investigation of an open rectangular cross-section hydraulic channel test section operated with water as the working fluid. The aforementioned parameters are extensively analyzed through the conduct

of experimental tests. In general, it was observed that the flow was predominantly turbulent and supercritical during the testing period. The water layer decreased as the channel slope increased. The average Manning and Chézy coefficients were 0.00784 and 59.1, respectively. **KEYWORDS:** Open channel, experimental study, water flow, Manning coefficient, Chézy coefficient.

1 | INTRODUÇÃO

Canais de água são projetados para proporcionar um escoamento com características bem conhecidas e controladas no interior da seção de testes. Uma vez construído, o aparato deste tipo deve ser criteriosamente avaliado, mediante a realização de testes para que as características do escoamento sejam investigadas (Mega, 2009).

Escoamentos em canais abertos são caracterizados por apresentar uma superfície livre submetida à pressão atmosférica, tendo um grande número de aplicações práticas na engenharia (Fox, Mcdonald e Pritchard, 2010). Sua complexidade reside na ampla combinação de fatores que definem o canal, uma vez que a superfície livre pode variar no espaço e no tempo, e, como consequência, a profundidade do escoamento, a vazão, a declividade de fundo e a do espelho líquido são grandezas interdependentes (Porto, 2006).

Este trabalho baseia-se no estudo experimental de uma seção de testes de canal hidráulico aberto de seção transversal retangular operada com água como fluido de trabalho. O escoamento foi analisado quanto ao seu tipo (subcrítico ou supercrítico), determinando-se o número de Froude (Fr) para diversos pontos. Além disso, analisou-se o tipo de regime do escoamento (turbulento ou laminar), determinando-se o número de Reynolds (Re) para os mesmos pontos coletados.

2 | METODOLOGIA

Apresentam-se a seguir a descrição da bancada de ensaios, os procedimentos experimentais e a modelagem matemática para a avaliação dos principais parâmetros envolvidos no escoamento de água pelo canal aberto.

2.1 Descrição da bancada de ensaios

A bancada de testes consiste em um modelo físico de canal aberto construído em acrílico que possui um mecanismo para elevação da declividade do canal. A Figura 1 apresenta a bancada de ensaios.

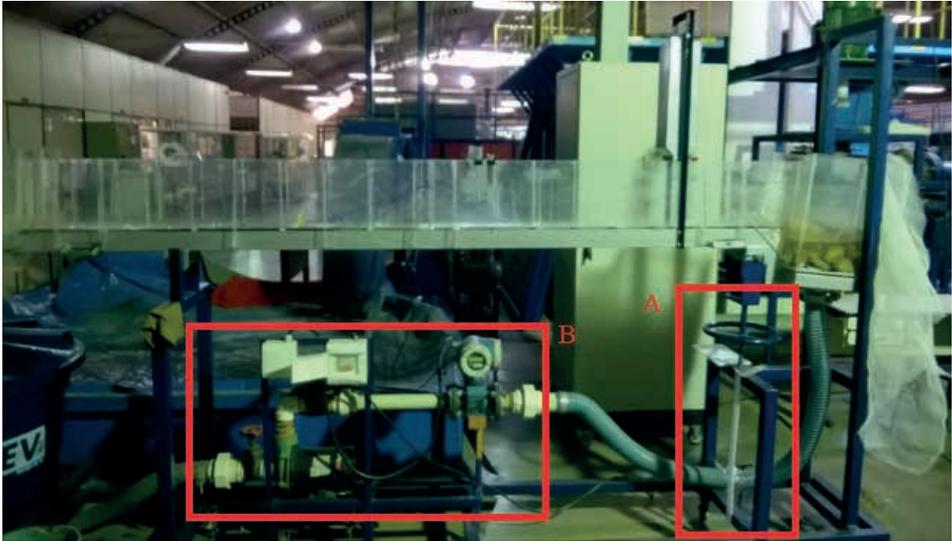


Figura 1. Bancada de ensaios de escoamento em canal aberto. (A): Mecanismo para mudança de declividade do canal. (B): Medidor de vazão volumétrica da água.

Um suporte graduado de uma das extremidades de sustentação do canal permite realizar a variação controlada da declividade do canal (Figura 1 - A). Para cada alteração de declividade é possível determinar a altura da camada de água com uma régua graduada. A vazão de água fornecida pelo conjunto motobomba pode ser fixada e determinada por um medidor de vazão (Figura 1 - B).

2.2 Procedimentos experimentais e modelagem matemática

Os testes consistiram-se em medir a altura da camada de água para 10 declividades diferentes, mantendo-se a vazão de água constante. Com os dados coletados é possível determinar a velocidade média de escoamento da água, o número de Reynolds e número de Froude. O Re e Fr são utilizados geralmente como parâmetros adimensionais de problemas físicos relacionados à condutos forçados e abertos, respectivamente (Baptista et al., 2013).

A velocidade média de escoamento pode ser determinada pela Eq.(1), o número de Reynolds pela Eq.(2) e o número de Froude pela Eq.(3) (Çengel, 2007). As equações levam em consideração que o canal tem seção retangular constante.

$$V = \frac{Q}{By} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho V L_{caract}}{\mu} \quad (2)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (3)$$

Em que ρ é a densidade do fluido ($997,0 \text{ kg/m}^3$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$), V é dado em m/s , L_{caract} é o comprimento característico do canal (m), μ é a viscosidade dinâmica da água ($0,00103 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$), g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), B é a largura do canal ($0,135 \text{ m}$), Q é a vazão de água ($0,00085 \text{ m}^3/\text{s}$) e y é a altura da camada de água. O L_{caract} é dado pela Eq.(4).

$$L_{\text{caract}} = 4R_h = 4\left(\frac{By}{2y+B}\right) \quad (4)$$

O L_{caract} representa 4 vezes o raio hidráulico R_h do canal, que por sua vez é a relação entre a área de seção de escoamento pelo perímetro molhado. É possível escrever uma relação da altura da camada crítica para um canal com a geometria definida. Isto é, a altura de lâmina d'água na qual o regime de escoamento é crítico y_{crit} e está em iminente mudança ($Fr = 1$). A Eq. (5) apresenta esta relação.

$$y_{\text{crit}} = \left(\frac{Q}{\sqrt{g}B}\right)^{2/3} \quad (5)$$

Analisando-se as forças atuantes sobre um volume de controle de água escoando pelo canal, percebe-se que há um equilíbrio entre a força superficial (arrasto), contrária ao movimento de escoamento do fluido e a força gravitacional, a favor do escoamento. Sendo assim, é possível chegar nas Eq.(6) e Eq.(7) que representam, respectivamente, o coeficiente de Chézy C e o coeficiente de Manning n , isto é, são adimensionais correlatos ao efeito de atrito presente entre o fluido e as paredes do canal.

$$C = \frac{V}{R_h^{1/2} I^{1/2}} \quad (6)$$

$$n = \frac{R_h^{2/3}}{C} \quad (7)$$

Em que I é a inclinação do canal (m/m) para pequenos ângulos, dada pela Eq.(8). A velocidade do escoamento pode ser escrita conforme a Eq. (9).

$$I = \frac{\Delta z}{L} \quad (8)$$

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} I^{1/2} \quad (9)$$

Em que Δz (m) é a declividade imposta manualmente via mecanismo de inclinação do canal e L é o comprimento total do canal ($2,22 \text{ m}$).

A energia específica do escoamento E é determinada em função da energia piezométrica y (m), chamada de E_1 e da energia cinética ($V^2/2g$), chamada de E_2 conforme a Eq. (10).

$$E = E_1 + E_2 = y + \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

3 | RESULTADOS

A Tabela 1 reúne os dados experimentais coletados e os parâmetros calculados para análise do tipo de regime de escoamento. A Figura 2 apresenta a relação entre os dois adimensionais relativos à caracterização do escoamento.

Δz (m)	y (m)	Velocidade (m/s)	Re	Regime	Fr	Regime
0	0,017	0,370	19998	Turbulento	0,907	Subcrítico
0,005	0,015	0,420	20483	Turbulento	1,094	Supercrítico
0,01	0,012	0,525	21256	Turbulento	1,529	Supercrítico
0,02	0,0115	0,548	21390	Turbulento	1,630	Supercrítico
0,03	0,01	0,630	21804	Turbulento	2,010	Supercrítico
0,04	0,0095	0,663	21946	Turbulento	2,171	Supercrítico
0,05	0,009	0,700	22089	Turbulento	2,354	Supercrítico
0,065	0,0085	0,741	22235	Turbulento	2,565	Supercrítico
0,08	0,008	0,787	22382	Turbulento	2,809	Supercrítico
0,1	0,007	0,899	22682	Turbulento	3,432	Supercrítico

Tabela 1. Dados coletados e parâmetros calculados para análise do escoamento.

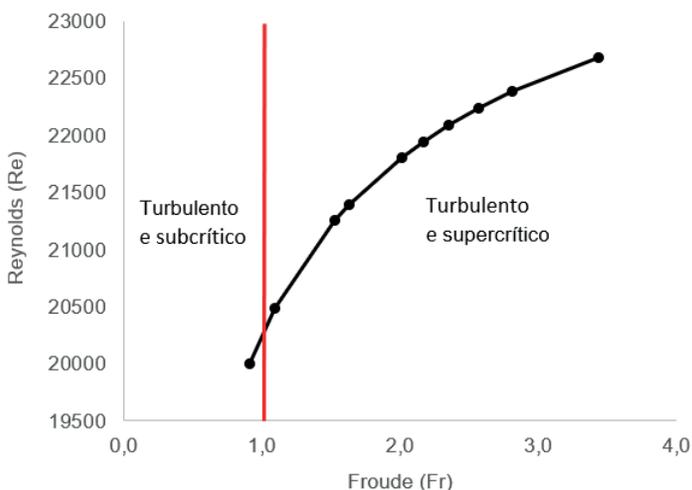


Figura 2. Reynolds x Froude

É possível observar que conforme ocorre o aumento da declividade, há uma redução na altura da camada do fluido, em decorrência do aumento da velocidade, visto que a vazão permanece constante. Para análises em canais abertos, o adimensional de Fr é mais expressivo, portanto, nota-se que para a vazão adotada e a partir de diferença de cotas superiores à 0,017 m o regime tende a ser supercrítico, caracterizado pelo Fr superior a 1. Para valores de Fr inferiores a 1, o escoamento é subcrítico. De forma geral, o escoamento é supercrítico para quase todos os pontos observados.

Com relação ao número de Reynolds, a literatura (Potter, 2004) descreve que para valores superiores a 4000, o escoamento pode ser considerado turbulento. Abaixo de 2300 o escoamento é laminar e entre estes dois valores, o regime é de transição. Observa-se valores acima de 20000, logo o escoamento é turbulento por todos os pontos analisados.

A Tabela 2 reúne os demais parâmetros determinados. A Figura 3 apresenta o comportamento das parcelas da energia do escoamento (piezométrica e cinética).

Δz (mm)	γ (mm)	Velocidade (m/s)	Re	Fr	E_1 (mm)	E_2 (mm)	E (mm)	n	C
0	17,0	0,370	19998	0,907	17,0	7,0	24,0	-	-
5	15,0	0,420	20483	1,094	15,0	9,0	24,0	0,00602	79,8
10	12,0	0,525	21256	1,529	12,0	14,0	26,0	0,00601	77,5
20	11,5	0,548	21390	1,630	11,5	15,3	26,8	0,00795	58,2
30	10,0	0,630	21804	2,010	10,0	20,2	30,2	0,00782	58,0
40	9,5	0,663	21946	2,171	9,5	22,4	31,9	0,00832	54,1
50	9,0	0,700	22089	2,354	9,0	24,9	33,9	0,00854	52,3
65	8,5	0,741	22235	2,565	8,5	28,0	36,5	0,00889	49,8
80	8,0	0,787	22382	2,809	8,0	31,6	39,6	0,00895	49,0
100	7,0	0,899	22682	3,432	7,0	41,2	48,2	0,00808	53,2

Tabela 2. Parâmetros medidos e calculados.

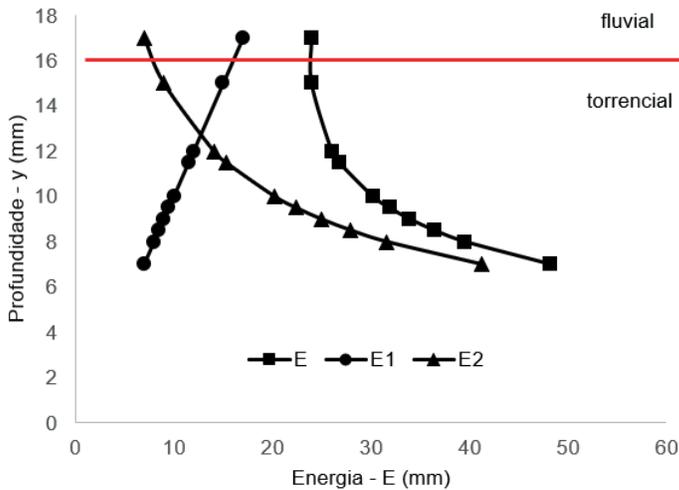


Figura 3. Parcelas de energia do escoamento.

As curvas da Figura 3 representam a energia piezométrica e específica em função da altura da camada do líquido. Nota-se que o ponto no qual ocorre uma mudança na curvatura da função de energia total (E) é denominado de ponto crítico e representa a situação de operação na qual o coeficiente Fr corresponde a 1, demarcando a transição do regime subcrítico para o supercrítico. Utilizando a Eq. (5), chega-se ao mesmo valor correspondente ao da Figura 3, isto é, 1,6 cm. Além disso, observa-se que a medida que a camada de fluido se reduz, a energia piezométrica diminui e a energia cinética aumenta, devido ao ganho de velocidade de escoamento. De forma geral, é neste ponto de mudança de curvatura que ocorre a situação de menor energia específica.

A Figura 4 apresenta a curva de declividade do canal I em função da camada y de água. Também apresenta Fr em função de y .

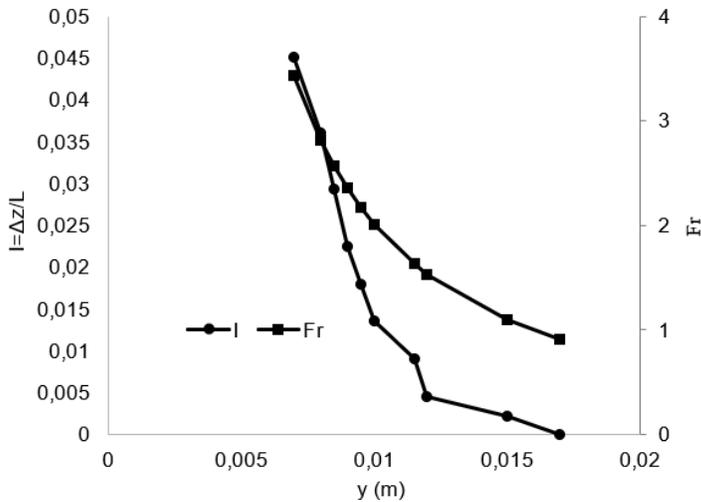


Figura 4. I e Fr em função de y.

Pelas curvas de tendência apresentadas na Figura 4, observa-se a tendência de valores muito altos para Fr e I à medida que a camada de água diminui. Por este comportamento, infere-se que há uma declividade crítica na qual acima dela a camada de água praticamente não se altera. Concomitantemente, Fr assume valores altos, caracterizando o escoamento como torrencial.

A Figura 5 apresenta os coeficientes de Chézy e de Manning para o canal em análise. Como o ensaio consistiu em analisar as variáveis para uma única vazão, as oscilações desses coeficientes ficaram na vertical do gráfico. Os valores obtidos apresentam uma variação expressiva em relação ao demais, podendo ser justificada por erros de paralaxe (movimento da água em relação à régua no instante de medição) e na imprecisão no posicionamento da régua de medição da profundidade da camada de fluido. A média do coeficiente de Manning obtido experimentalmente para o canal em acrílico equivale a 0,00784 e para o coeficiente de Chézy equivale a 59,1.

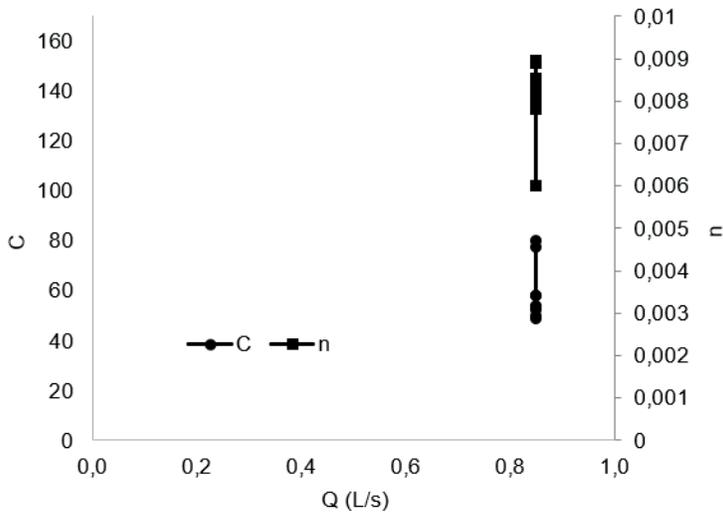


Figura 5. Coeficientes correlatos à rugosidade da parede do canal.

A Figura 6 apresenta a velocidade em função do Reynolds hidráulico e declividade do canal. Percebe-se que a velocidade aumenta à medida em que ocorre o aumento do Reynolds e da declividade.

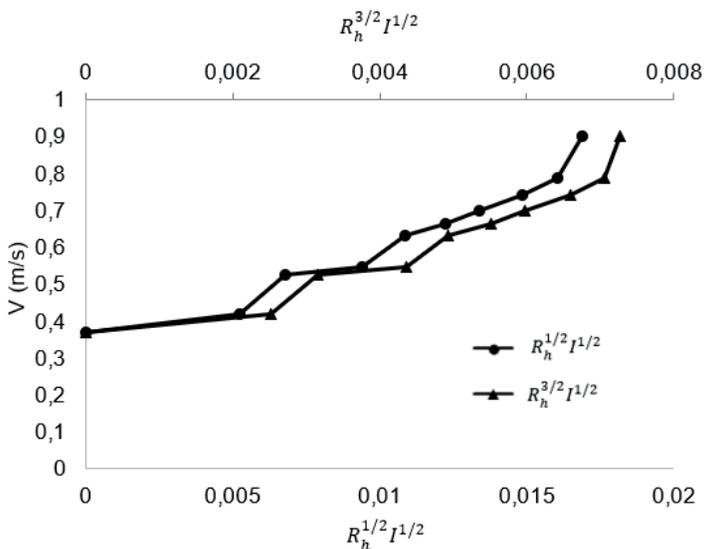


Figura 6. Velocidade em função do número de Reynolds hidráulico e declividade.

4 | CONCLUSÕES

A observação do regime de escoamento de um canal aberto é imprescindível para prever e conhecer o comportamento do sistema analisado, podendo garantir, por exemplo,

segurança para as populações e instalações nas proximidades desses sistemas, ao projetar elementos de dissipação de energia quando se nota regime de escoamento supercrítico.

A análise do número adimensional de Froude auxilia na determinação do regime de escoamento durante a execução de modelos físicos em escala. Na elaboração de modelos físicos, o efeito em decorrência da rugosidade das superfícies do modelo físico e do protótipo deve ser correlacionado, portanto, a análise do coeficiente de Manning é imprescindível.

De forma geral, observou-se que o escoamento foi praticamente turbulento e supercrítico durante todo o período de ensaio para a vazão fixada. A camada de água diminuiu à medida que a declividade do canal aumentava. O coeficiente médio de Manning e de Chézy foram, respectivamente, 0,00784 e 59,1.

REFERÊNCIAS

Çengel, Y.A. **Mecânica dos Fluidos, Fundamentos e Aplicações**, 1º edição, McGrawHill, São Paulo, 2007.

Baptista, M.B.; Coelho, M.M.L.P.; Cirilo, J.A.; Marcarenhas, F.C.B. **Hidráulica Aplicada**, 2º edição, ABRH, Porto Alegre, 2003.

Fox, R.W.; McDonald, A.T.; Pritchard, P.J. **Introduction to fluid mechanics**, 5th edition, John Wiley & Sons, New York, 2010.

Mega, E.A.F. **Estudo experimental do escoamento em cavidades abertas utilizando um canal de superfície livre**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2009.

Porto, R.M. **Hidráulica Básica**, 4ª ed. São Carlos: EESC/USP, 2006.

Potter, M.C.; Wiggert, D.C.; Hondzo, M.; Shih, T.I.P. **Mecânica dos Fluidos**, Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2004.