Hoek

Lista de Exercícios Resolvidos 2

Hidráulica de Condutos Livres

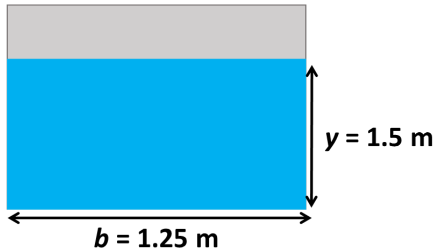
Lucas Monteiro Nogueira

Problemas

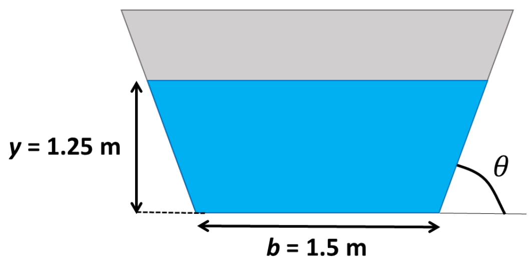
■ Problema 1 **(Análise da Criticalidade de Escoamentos)**

Determine se o escoamento nos canais 1 a 3 é subcrítico, crítico ou supercrítico.

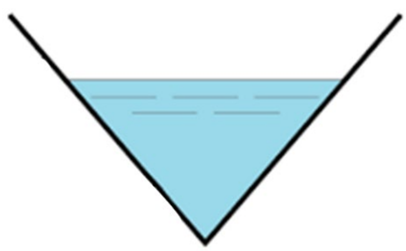
Canal 1: Retângulo com base b = 1.25 m e profundidade de escoamento y = 1.5 m. Vazão Q = 15.0 m^3/s.



Canal 2: Trapézio com base b = 1.6 m, talude $m = cot(\theta)$ = 1.5 e profundidade de escoamento y = 1.25 m. Vazão Q = 8.0 m^3/s.



Canal 3: Triângulo com talude $m = cot(\theta)$ = 2.0 e profundidade de escoamento y = 0.75 m. Vazão Q = 2.5 m^3/s.



■ Problema 2 **(Cálculo de Vazões com a Fórmula de Manning)**

Encontre a vazão nos seguintes canais sabendo que a declividade do leito é 6×10^{-3} e o coeficiente de rugosidade de Manning é n = 0.016.

Canal 1: Canal retangular; base b = 3.0 m e profundidade normal y_0 = 1.20 m.

Canal 2: Canal trapezoidal; base b = 3.0 m, talude m = 1.5 e profundidade normal y_0 = 1.10 m.

Canal 3: Canal triangular; talude m = 1.5 e profundidade normal y_0 = 1.50 m.

■ Problema 3 **(Cálculo da Profundidade Normal de um Canal Trapezoidal)**

Um canal trapezoidal revestido de material com rugosidade de Manning n = 0.015 tem 8 m de largura da base e talude 2 H : 1 V. A declividade longitudinal é 0.006. Sabendo que o canal transporta uma vazão de 40 m^3/s, calcule a profundidade normal y_0.

■ Problema 4 **(Cálculo da Profundidade Normal de um Conduto Circular)**

Um conduto circular de 2.5 m de diâmetro transporta uma vazão permanente de 20.0 m^3/s. O conduto é feito de concreto (n = 0.011) e possui declividade longitudinal igual a 1:200. Encontre a profundidade normal y_0.

■ Problema 5 **(Escoamento Normal I)**

Um canal retangular transporta uma vazão unitária de 2.0 $m^3/s/m$ sob número de Froude igual a 0.40. Sendo a rugosidade de Manning n igual a 0.014, encontre **(a)** a profundidade normal; e **(b)** a declividade longitudinal do canal.

■ Problema 6 **(Escoamento Normal II)**

Uma equipe de hidraulicistas estuda um canal retangular de 5.0 m de largura e declividade longitudinal igual a 0.001. O canal escoa uma vazão de 18.0 m^3 por segundo e tem profundidade normal igual a 2.0 m. Qual é o valor da rugosidade de Manning n?

■ Problema 7 **(Escoamento Normal III)**

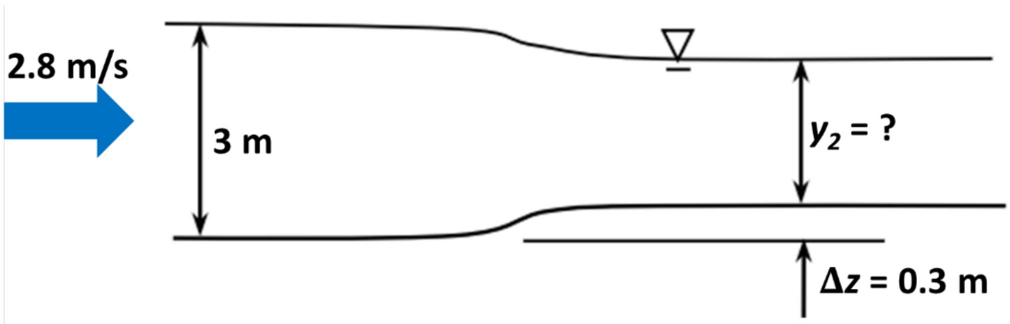
Um canal trapezoidal de base igual a 3.0 m e talude 1.5 H : 1 V carrega uma vazão de 10 m^3/s. A profundidade de escoamento observada é de 1.50 m. **(a)** Qual seria a vazão se a profundidade fosse reduzida pela metade (isto é, de 1.50 m para 0.75 m)? **(b)** Qual seria a profundidade se a vazão fosse reduzida pela metade (isto é, de 10 m^3/s para 5 m^3/s)?

■ Problema 8 **(Escoamento Normal IV)**

Um canal trapezoidal apresenta base de 3 m de largura e talude 1 horizontal : 1 vertical. Quando a vazão transportada é de 2.5 m^3/s, observa-se que a profundidade normal é igual a 0.85 m. Sabendo disso, encontre a vazão obtida quando a profundidade normal é de 1.20 m.

■ Problema 9 **(Escoamento com Transição I)**

Um canal retangular sustenta um escoamento de profundidade de 3 m e velocidade igual a 2.8 m/s. A largura do canal é constante e igual a 3.2 m ao longo de todo o curso d'água.. Encontre a profundidade a jusante e a variação na profundidade d'água após o escoamento atravessar um declive ascendente de elevação Δz = 30 cm, como ilustra a figura a seguir.



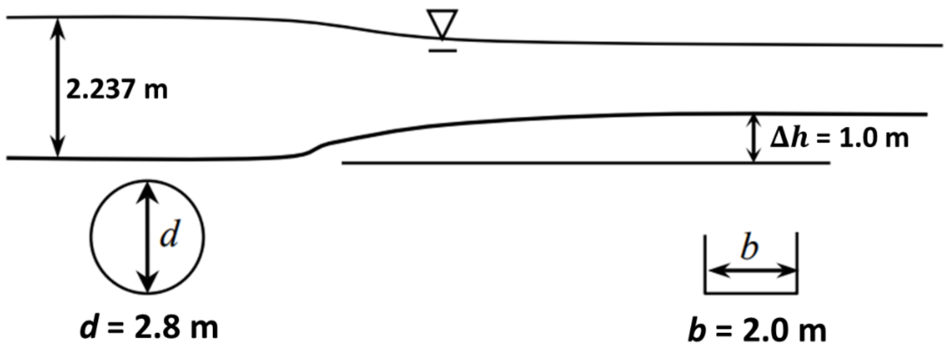
■ Problema 10 **(Escoamento com Transição II)**

Reconsidere o problema anterior, sabendo agora que há uma contração suave na *largura* do canal retangular, a qual cai de 3.2 m para 2.9 m como ilustra a figura a seguir. Ao contrário do que ocorre no problema anterior, aqui a declividade do leito é a mesma ao longo da contração – isto é, o canal é invariavelmente horizontal. Encontre a profundidade de escoamento e a variação no nível da superfície d'água após a contração. Qual é a maior contração de largura possível para que *não* ocorra estrangulamento?

(Vista superior)

Problema 11 **(Escoamento com Transição III)**

O conduto composto ilustrado a seguir consiste de dois segmentos. No segmento inicial, tem-se uma seção circular de diâmetro d = 2.8 m. Após uma elevação gradual Δh = 1 m no nível do leito, tem-se um segmento de seção retangular com largura b = 2.0 m. Sabendo que o conduto transporta 7.5 m^3/s e que a profundidade de escoamento na região circular é de 2.237 m, encontre a profundidade na seção retangular ao fim da transição Δh. Despreze quaisquer perdas de carga.



Problema 12 **(Ressalto I)**

Em um canal retangular e horizontal, busca-se obter um ressalto hidráulico no qual a perda de carga seja 6 vezes maior que a profundidade supercrítica observada imediatamente a montante do ressalto. Calcule o número de Froude do escoamento a montante do ressalto que deve garantir tal dimensionamento.

Problema 13 **(Ressalto II)**

Um ressalto hidráulico ocorre em um canal trapezoidal com talude 2 : 1 e largura da base 6.1 m. A profundidade a montante é 0.381 m e a vazão transportada é Q = 28.3 m^3/s. Encontre a profundidade a jusante e a perda de carga no ressalto. Compare seus resultados com a razão de profundidades conjugadas e a perda de carga obtidos para um canal retangular de mesma largura da base e mesmo número de Froude a montante.

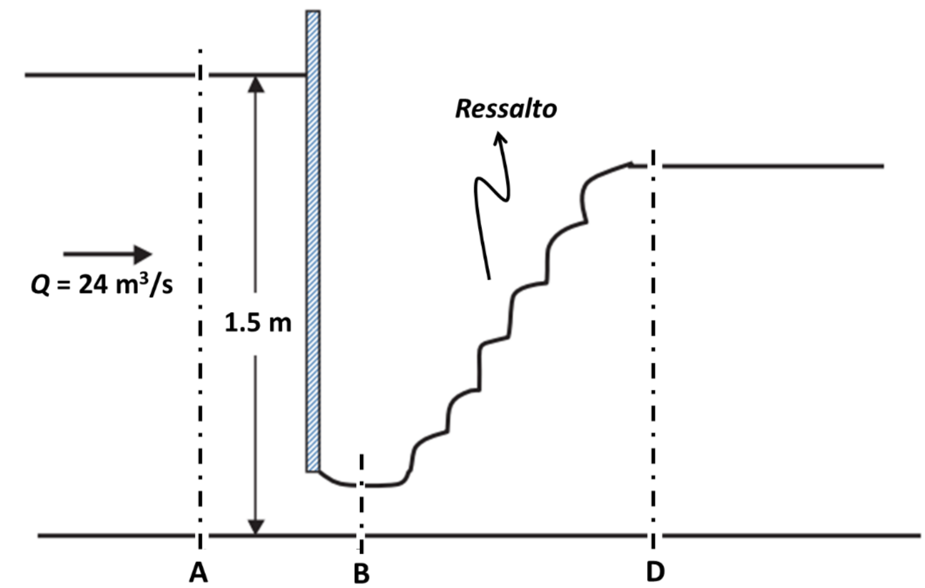
Problema 14 **(Ressalto III)**

Determine a profundidade conjugada de um ressalto hidráulico em um conduto circular de 2.0 m de diâmetro transportando uma vazão de 0.8 m^3/s se a profundidade a montante observada é igual a 0.25 m.

Problema 15 **(Ressalto IV)**

O canal retangular ilustrado a seguir é aproximadamente horizontal e escoa com vazão Q = 24 m^3/s. A profundidade a montante da comporta é de 1.5 m. Um ressalto hidráulico ocorre imediatamente a jusante da comporta**.** Julgue os itens seguintes.

1.( ) A profundidade de escoamento na seção *B* é maior que 0.6 m.
2.( ) A profundidade de escoamento na seção *D* é maior que 2.4 m.
3.( ) A perda de carga associada ao ressalto que ocorre após a comporta é maior que 3.5 m.



Problema 16 **(Ressalto V: Seções Triangulares e Parabólicas)**

Derive uma expressão que relaciona a razão de profundidades conjugadas y_2/y_1 e o número de Froude a montante Fr_1 para um ressalto em um conduto triangular. Repita para uma seção parabólica.

Problema 17 **(Ressalto VI: Seção Triangular)**

Uma calha de seção triangular transporta 0.30 m^3/s com profundidade de escoamento igual a 0.15 m. A calha tem inclinação lateral de 2:1. Um ressalto se forma em um ponto do curso d'água. Qual é a profundidade conjugada obtida a jusante do ressalto?

Problema 18 **(Ressalto VII: Seção Parabólica)**

Um canal parabólico, quando cheio, possui profundidade de escoamento igual a 2.0 m e largura da superfície 10.0 m. Se a profundidade a jusante de um ressalto hidráulico nesse canal é 1.5 m transportando uma vazão de 8.5 m^3/s, encontre a profundidade conjugada a montante do ressalto.

Problema 19 **(Dimensionando Canais com o Método das Vel. Permissíveis)**

Um canal trapezoidal não-revestido será excavado em solo pedregoso grosso subjacente a uma camada de grama Bermuda. O canal tem declividade longitudinal 0.001 e a vazão de projeto é 125 m^3/s. Em termos de sinuosidade, o canal é suposto reto. Dimensione o canal usando o método das velocidades permissíveis.

Problema 20 **(Dimensionando Canais com o Método das Tensões de Arraste)**

Usando o método das tensões de arraste, dimensione um canal trapezoidal levemente sinuoso em cascalho fino para uma vazão de projeto igual a 65 m^3/s. A declividade longitudinal é 0.0002 e as partículas de solo são levemente arredondadas com tamanho 7.5 mm.

Informações Adicionais

Tabela 1. *Valores do coeficiente de forma K_1 para canais circulares.*

y_o/D	K_1	y_o/D	K_1	y_o/D	K_1
0,01	0,024	0,34	0,383	0,67	0,591
0,02	0,042	0,35	0,391	0,68	0,596
0,03	0,058	0,36	0,399	0,69	0,600
0,04	0,073	0,37	0,407	0,7	0,604
0,05	0,087	0,38	0,415	0,71	0,608
0,06	0,101	0,39	0,422	0,72	0,612
0,07	0,114	0,4	0,430	0,73	0,616
0,08	0,127	0,41	0,437	0,74	0,620
0,09	0,139	0,42	0,444	0,75	0,624
0,1	0,151	0,43	0,451	0,76	0,627
0,11	0,163	0,44	0,458	0,77	0,631
0,12	0,175	0,45	0,465	0,78	0,634
0,13	0,186	0,46	0,472	0,79	0,637
0,14	0,197	0,47	0,479	0,8	0,640
0,15	0,208	0,48	0,485	0,81	0,643
0,16	0,218	0,49	0,492	0,82	0,646
0,17	0,229	0,5	0,498	0,83	0,649
0,18	0,239	0,51	0,504	0,84	0,651
0,19	0,249	0,52	0,511	0,85	0,653
0,2	0,259	0,53	0,517	0,86	0,655
0,21	0,269	0,54	0,523	0,87	0,657
0,22	0,279	0,55	0,528	0,88	0,659
0,23	0,288	0,56	0,534	0,89	0,660
0,24	0,297	0,57	0,540	0,9	0,661
0,25	0,306	0,58	0,546	0,91	0,662
0,26	0,316	0,59	0,551	0,92	0,663
0,27	0,324	0,6	0,556	0,93	0,664
0,28	0,333	0,61	0,562	0,94	0,664
0,29	0,342	0,62	0,567	0,95	0,664
0,3	0,350	0,63	0,572	0,96	0,663
0,31	0,359	0,64	0,577	0,97	0,661
0,32	0,367	0,65	0,582	0,98	0,659
0,33	0,375	0,66	0,586	0,99	0,656

Tabela 2. *Cálculo da profundidade normal de condutos trapezoidais. Valores de $K_2 = nQ/b^{8/3}S_0^{1/2}$. Note que Z = inclinação lateral.*

y_n/b	Z = 0,0	Z = 1,0	Z = 1,5	Z = 2,0	Z = 2,5	Z = 3,0	Z = 3,5	Z = 4,0
0,02	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
0,04	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
0,06	0,009	0,009	0,009	0,009	0,010	0,010	0,010	0,010
0,08	0,013	0,015	0,015	0,016	0,016	0,016	0,017	0,017
0,1	0,019	0,021	0,022	0,023	0,023	0,024	0,025	0,025
0,12	0,025	0,029	0,030	0,031	0,032	0,033	0,034	0,035
0,14	0,032	0,038	0,039	0,041	0,043	0,044	0,046	0,047
0,16	0,039	0,047	0,050	0,052	0,055	0,057	0,059	0,061
0,18	0,047	0,057	0,061	0,065	0,068	0,071	0,074	0,077
0,2	0,055	0,069	0,074	0,078	0,083	0,087	0,091	0,095
0,22	0,063	0,081	0,087	0,093	0,099	0,104	0,110	0,115
0,24	0,071	0,094	0,102	0,110	0,117	0,124	0,131	0,137
0,26	0,080	0,108	0,118	0,127	0,136	0,145	0,153	0,162
0,28	0,089	0,123	0,135	0,146	0,157	0,168	0,178	0,189
0,3	0,098	0,138	0,153	0,167	0,180	0,193	0,205	0,218
0,32	0,108	0,155	0,173	0,189	0,204	0,220	0,235	0,250
0,34	0,117	0,172	0,193	0,212	0,231	0,249	0,267	0,284
0,36	0,127	0,190	0,215	0,237	0,259	0,280	0,301	0,321
0,38	0,137	0,210	0,238	0,264	0,289	0,313	0,337	0,361
0,4	0,147	0,230	0,262	0,292	0,321	0,349	0,376	0,404
0,42	0,157	0,251	0,288	0,322	0,354	0,386	0,418	0,449
0,44	0,167	0,273	0,314	0,353	0,390	0,426	0,462	0,498
0,46	0,177	0,296	0,342	0,386	0,428	0,469	0,509	0,549
0,48	0,188	0,319	0,372	0,421	0,468	0,513	0,559	0,604
0,5	0,198	0,344	0,403	0,457	0,509	0,561	0,611	0,661
0,52	0,209	0,370	0,435	0,495	0,553	0,610	0,666	0,722
0,54	0,220	0,396	0,468	0,535	0,600	0,663	0,725	0,787
0,56	0,231	0,424	0,503	0,577	0,648	0,717	0,786	0,854
0,58	0,241	0,453	0,540	0,621	0,698	0,775	0,850	0,925
0,6	0,252	0,482	0,577	0,666	0,751	0,835	0,918	1,000
0,62	0,263	0,513	0,617	0,713	0,807	0,898	0,988	1,078
0,64	0,274	0,544	0,657	0,763	0,864	0,964	1,062	1,159
0,66	0,285	0,577	0,699	0,814	0,924	1,032	1,139	1,245
0,68	0,297	0,611	0,743	0,867	0,986	1,103	1,219	1,334
0,7	0,308	0,645	0,788	0,922	1,051	1,178	1,303	1,427
0,72	0,319	0,681	0,835	0,979	1,119	1,255	1,390	1,523
0,74	0,330	0,718	0,884	1,039	1,189	1,335	1,480	1,624
0,76	0,342	0,756	0,933	1,100	1,261	1,419	1,574	1,729
0,78	0,353	0,795	0,985	1,164	1,336	1,505	1,672	1,838
0,8	0,365	0,835	1,038	1,229	1,414	1,595	1,773	1,950
0,82	0,376	0,876	1,093	1,297	1,494	1,687	1,878	2,068
0,84	0,388	0,918	1,150	1,367	1,577	1,783	1,987	2,189
0,86	0,399	0,962	1,208	1,439	1,663	1,883	2,099	2,314
0,88	0,411	1,006	1,268	1,514	1,752	1,985	2,216	2,444
0,9	0,422	1,052	1,329	1,591	1,843	2,091	2,336	2,579
0,92	0,434	1,098	1,393	1,670	1,938	2,200	2,460	2,718
0,94	0,446	1,146	1,458	1,751	2,035	2,313	2,588	2,861
0,96	0,457	1,196	1,524	1,835	2,135	2,429	2,720	3,009
0,98	0,469	1,246	1,593	1,921	2,238	2,549	2,856	3,161
1	0,481	1,297	1,664	2,010	2,344	2,672	2,997	3,319
1,02	0,493	1,350	1,736	2,101	2,453	2,799	3,141	3,481
1,04	0,504	1,404	1,810	2,194	2,566	2,930	3,290	3,648
1,06	0,516	1,459	1,886	2,290	2,681	3,064	3,443	3,819
1,08	0,528	1,515	1,964	2,388	2,799	3,202	3,601	3,996
1,1	0,540	1,573	2,044	2,489	2,921	3,344	3,762	4,178
1,12	0,552	1,632	2,125	2,593	3,045	3,490	3,929	4,364
1,14	0,564	1,692	2,209	2,699	3,173	3,639	4,099	4,556
1,16	0,576	1,753	2,294	2,807	3,305	3,792	4,274	4,753
1,18	0,587	1,816	2,382	2,919	3,439	3,950	4,454	4,955
1,2	0,599	1,880	2,471	3,033	3,577	4,111	4,639	5,162
1,22	0,611	1,945	2,563	3,149	3,718	4,276	4,828	5,375
1,24	0,623	2,011	2,656	3,269	3,862	4,445	5,021	5,593
1,26	0,635	2,079	2,752	3,391	4,010	4,619	5,220	5,816
1,28	0,647	2,148	2,849	3,516	4,162	4,796	5,423	6,045
1,3	0,659	2,219	2,949	3,643	4,317	4,978	5,631	6,280
1,32	0,671	2,291	3,051	3,774	4,475	5,163	5,844	6,520
1,34	0,683	2,364	3,155	3,907	4,637	5,353	6,062	6,765

Tabela 3. *Valores selecionados do coeficiente de rugosidade de Manning (n).*

Material	*n*
Concreto	0.011 – 0.016
Madeira	0.012
Canais de terra limpa	0.022
Canais de terra – Cascalho firme	0.023
Cascalho grosso	0.025
Alvenaria	0.032

Tabela 4. *Máximas velocidades permissíveis.*

Material		V_{max} **(m/s)**
Cascalho fino		1.5
Cascalho grosso		1.8
Terra	Areia siltosa	0.6
	Argila siltosa	1.1
	Argila	1.8
Revestimento de grama	Grama Bermuda + areia siltosa	1.8
	Grama Bermuda + argila siltosa	2.4
	Grama Kentucky Blue + areia siltosa	1.5
	Grama Kentucky Blue + argila siltosa	2.1
Revestimento rochoso ruim (geralmente sedimentar)	Arenito mole	2.4
	Xisto mole	1.1
Bom revestimento rochoso (geralmente ígneo ou metamórfico)		6.1

Tabela 5. *Redução de velocidades permissíveis para canais sinuosos.*

Tipo de canal	**Redução sobre velocidade máxima permissível**
Levemente sinuoso	– 5%
Moderadamente sinuoso	– 13%
Muito sinuoso	– 22%

Tabela 6. *Freeboard* (folga) *recomendado para diferentes vazões de projeto.*

Vazão (m^3/s)	< 0.75	0.75 – 1.5	1.5 – 85	> 85
Freeboard (m)	0.45	0.60	0.75	0.90

Figura 1. *Ângulos de repouso para materiais granulares.*

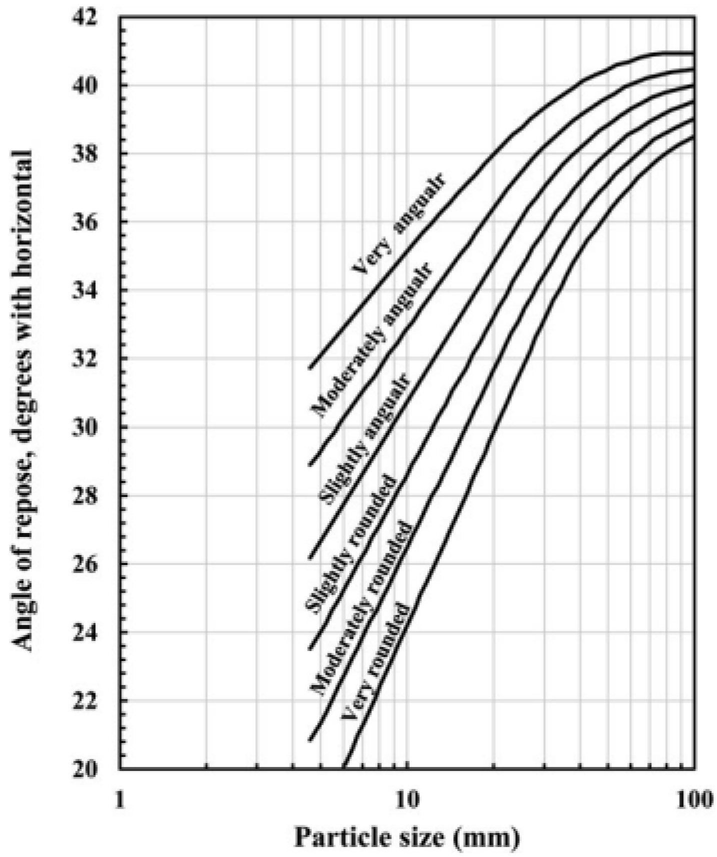


Figura 2. *Máxima tensão de arraste* versus *tamanho de partícula.*

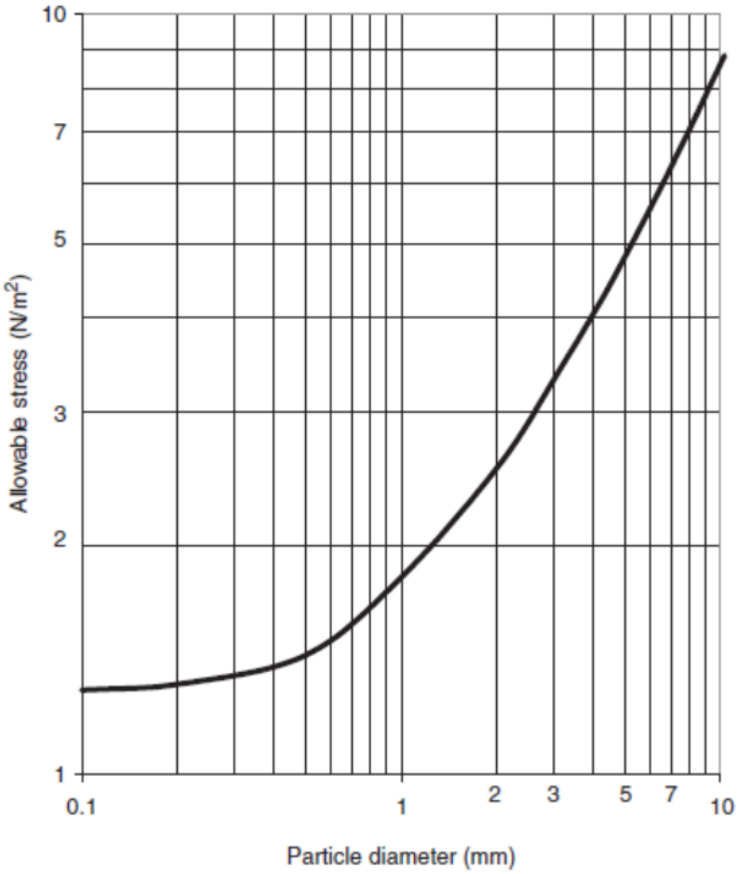


Tabela 7. *Redução de tensões de arraste permissíveis para canais sinuosos.*

Tipo de canal	Redução sobre velocidade máxima permissível
Levemente sinuoso	– 10%
Moderadamente sinuoso	– 25%
Muito sinuoso	– 40%

■ Soluções

■ Prob. 1

Canal 1: A área da seção molhada é dada por $A = by = 1.25 \times 1.5 = 1.88\ \text{m}^2$ e a velocidade de escoamento é $V = Q/A = 15.0/1.88 = 7.98$ m/s. Em seguida, calculamos o número de Froude,

$$\text{Fr} = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{7.98}{\sqrt{9.81 \times 1.5}} = \boxed{2.08}$$

Como $Fr > 1$, o escoamento é **supercrítico**. Convém observar que, em uma abordagem alternativa, é possível calcular a profundidade crítica através da fórmula

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{(15.0/1.25)^2}{9.81}} = 2.45 \text{ m}$$

e, sendo y = 1.5 m menor que y_c, concluímos que o escoamento é supercrítico.

Canal 2: A área de escoamento é dada por

$$A = (b + my)y = (1.6 + 1.5 \times 1.25) \times 1.25 = 4.34 \text{ m}^2$$

A largura da superfície é

$$B = (b + 2my) = 1.6 + 2 \times 1.5 \times 1.25 = 5.35 \text{ m}$$

Por fim, o número de Froude é tal que

$$\text{Fr}^2 = \frac{Q^2 B}{gA^3} \rightarrow \text{Fr} = \sqrt{\frac{Q^2 B}{gA^3}}$$

$$\therefore \text{Fr} = \sqrt{\frac{8.0^2 \times 5.35}{9.81 \times 4.34^3}} = \boxed{0.653}$$

Como $Fr < 1$, o escoamento é **subcrítico**.

Canal 3: A área de escoamento é dada por

$$A = my^2 = 2.0 \times 0.75^2 = 1.125 \text{ m}^2$$

A largura da superfície é

$$B = 2my = 2 \times 2.0 \times 0.75 = 3.0 \text{ m}$$

Finalmente, o número de Froude é tal que

$$\text{Fr}^2 = \frac{Q^2 B}{gA^3} \rightarrow \text{Fr} = \sqrt{\frac{Q^2 B}{gA^3}}$$

$$\therefore \text{Fr} = \sqrt{\frac{2.5^2 \times 3.0}{9.81 \times 1.125^3}} = \boxed{1.16}$$

Como $Fr > 1$, o escoamento é **supercrítico**.

■ Prob. 2

Canal 1: Calculamos a área de escoamento A, o perímetro molhado P e o raio hidráulico $R_h = A/P$,

$$A = by = 3.0 \times 1.20 = 3.60 \text{ m}^2$$

$$P = b + 2y = 3 + 2 \times 1.20 = 5.40 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{3.60}{5.40} = 0.667 \text{ m}$$

Em seguida, substituimos na fórmula de Manning para obter a vazão Q,

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S_0^{1/2} = \frac{1}{0.016} \times 3.60 \times 0.667^{2/3} \times 0.0006^{1/2} = \boxed{4.21 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Canal 2: Calculam-se primeiramente a área de escoamento A, o perímetro molhado P e o raio hidráulico $R_h = A/P$,

$$A = (b + my)y = (3.0 + 1.5 \times 1.10) \times 1.10 = 5.12 \text{ m}^2$$

$$P = b + 2y\sqrt{m^2 + 1} = 3.0 + 2 \times 1.10 \times \sqrt{1.5^2 + 1} = 6.97 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{5.12}{6.97} = 0.735 \text{ m}$$

Em seguida, substituimos na fórmula de Manning para obter a vazão solicitada,

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S_0^{1/2} = \frac{1}{0.016} \times 5.12 \times 0.735^{2/3} \times 0.0006^{1/2} = \boxed{6.38 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Canal 3: Inicia-se a solução com o cálculo da área de seção A, perímetro molhado P e raio hidráulico $R_h = A/P$,

$$A = my^2 = 1.5 \times 1.50^2 = 3.38 \text{ m}^2$$

$$P = 2y\sqrt{m^2 + 1} = 2 \times 1.50 \times \sqrt{1.5^2 + 1} = 5.41 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{3.38}{5.41} = 0.625 \text{ m}$$

Em seguida, substituimos na fórmula de Manning para obter a vazão desconhecida,

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S_0^{1/2} = \frac{1}{0.016} \times 3.38 \times 0.625^{2/3} \times 0.0006^{1/2} = \boxed{3.78 \text{ m}^3/\text{s}}$$

■ Prob. 3

O primeiro passo é calcular o coeficiente de forma K_2,

$$K_2 = \frac{nQ}{b^{8/3} S_0^{1/2}} = \frac{0.015 \times 40}{8^{8/3} \times 0.006^{1/2}} = 0.0303$$

Entramos com esse valor na Tabela 2; tomamos como base a coluna referente ao talude Z = 2.0. O valor mais próximo é para K_2 = 0.031, que corresponde a y_0/b = 0.12. Resta computar a profundidade normal solicitada,

$$0.12 = \frac{y_0}{b} \quad \rightarrow \quad y_0 = 0.12b$$

$$\therefore y_0 = 0.12 \times 8 = \boxed{0.96 \text{ m}} = 96.0 \text{ cm}$$

■ Prob. 4

Primeiramente, encontramos o coeficiente dinâmico M,

$$M = \left(\frac{nQ}{\sqrt{S_0}} \right)^{3/8} = \left(\frac{0.011 \times 20}{\sqrt{(1/200)}} \right)^{3/8} = 1.531]$$

Usamos esse resultado para estimar o coeficiente de forma K_1,

$$D = \frac{M}{K_1} \quad \rightarrow \quad K_1 = \frac{M}{D}$$

$$\therefore K_1 = \frac{1.531}{2.5} = 0.612$$

Entrando com esse valor na Tabela 1, lemos a razão y_0/D = 0.72; finalmente, computamos a profundidade normal y_0,

$$K_1 = \frac{y_0}{D} \quad \rightarrow \quad y_0 = K_1 D$$

$$\therefore y_0 = 0.72 \times 2.5 = \boxed{1.80 \text{ m}}$$

■ Prob. 5

Parte (a): A profundidade normal pode ser obtida através da relação que define o número de Froude para canais de seção retangular,

$$\text{Fr} = \frac{V}{\sqrt{gy_0}} = \frac{q}{\sqrt{gy_0^3}}$$

$$\therefore \mathrm{Fr}^2 = \frac{q^2}{g y_0^3}$$

$$\therefore y_0^3 = \frac{q^2}{g \times \mathrm{Fr}^2}$$

$$\therefore y_0 = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g \times \mathrm{Fr}^2}}$$

$$\therefore y_0 = \sqrt[3]{\frac{2.0^2}{9.81 \times 0.40^2}} = \boxed{1.37 \text{ m}}$$

Parte (b): A declividade do leito pode ser obtida através de uma versão simplificada da fórmula de Manning para canais retangulares com vazão unitária *q*,

$$q = \frac{1}{n} y^{5/3} S_0^{1/2} \quad \rightarrow \quad S_0 = \left(\frac{qn}{y^{5/3}} \right)^2$$

$$\therefore S_0 = \left(\frac{2.0 \times 0.014}{1.37^{5/3}} \right)^2 = \boxed{2.75 \times 10^{-4}}$$

■ Prob. 6

Inicia-se a solução com o cálculo das propriedades geométricas do canal,

$$A = by = 5.0 \times 2.0 = 10.0 \text{ m}^2$$

$$P = b + 2y = 5.0 + 2 \times 2.0 = 9.0 \text{ m}$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{10.0}{9.0} = 1.11 \text{ m}$$

Em seguida, isolamos a rugosidade *n* na fórmula de Manning,

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S_0^{1/2} \quad \rightarrow \quad n = \frac{A R_h^{2/3} S_0^{1/2}}{Q}$$

$$\therefore n = \frac{10.0 \times 1.11^{2/3} \times 0.001^{1/2}}{18.0} = \boxed{0.0188}$$

■ Prob. 7

Parte (a): Iniciamos a solução com o cálculo do raio hidráulico da seção trapezoidal em foco,

$$A=(b+my)y=(3.0+1.5\times1.50)\times1.50=7.88\text{ m}^2$$

$$P=b+2y\sqrt{1+m^2}=3.0+2\times1.50\times\sqrt{1+1.5^2}=8.41\text{ m}$$

$$R_h=\frac{A}{P}=\frac{7.88}{8.41}=0.937\text{ m}$$

Em seguida, usamos a fórmula de Manning para obter a razão $\sqrt{S_0}/n$,

$$Q=\frac{1}{n}AR_h^{2/3}S_0^{1/2}\rightarrow\frac{\sqrt{S_0}}{n}=\frac{Q}{AR_h^{2/3}}$$

$$\therefore\frac{\sqrt{S_0}}{n}=\frac{10}{7.88\times0.937^{2/3}}=1.33\quad\textbf{(I)}$$

Supondo agora que a profundidade é reduzida para $y_0/2$ = 1.50/2 = 0.75 m, obtemos os parâmetros geométricos atualizados

$$A=(b+my)y=(3.0+1.5\times0.75)\times0.75=3.09\text{ m}^2$$

$$P=b+2y\sqrt{1+m^2}=3.0+2\times0.75\times\sqrt{1+1.5^2}=5.70\text{ m}$$

$$R_h=\frac{A}{P}=\frac{3.09}{5.70}=0.542\text{ m}$$

A vazão Q pode ser obtida a partir da fórmula de Manning,

$$Q=\frac{1}{n}AR_h^{2/3}S_0^{1/2}$$

Embora a declividade longitudinal S_0 e a rugosidade de Manning n sejam desconhecidos, a relação **(I)** é tudo o que precisamos para prosseguir:

$$Q=\frac{1}{n}AR_h^{2/3}S_0^{1/2}=1.33\times3.09\times0.542^{2/3}=\boxed{2.73\text{ m}^3/\text{s}}$$

Portanto, ao reduzir a profundidade em 50% a vazão cai de 10.0 m^3/s para 2.73 m^3/s, implicando assim uma redução de mais de 70%.

Parte (b): Calculamos o fator de forma K_2 referente a uma vazão modificada Q = 5.0 m^3/s,

$$K_2 = \frac{n}{b^{8/3} S_0^{1/2}} = \frac{Q}{b^{8/3} \times \frac{S_0^{1/2}}{n}} = \frac{5.0}{3.0^{8/3} \times 1.33} = 0.201$$

Entrando com esse valor na coluna Z = 1.5 da Tabela 2, lê-se y_0/b = 0.34; portanto,

$$0.34 = \frac{y_0}{b} \quad \to \quad y_0 = 0.34b$$

$$\therefore y_0 = 0.34 \times 3.0 = \boxed{1.02 \text{ m}}$$

Ao reduzir a vazão em 50% a profundidade cai de 1.50 m para 1.02 m, implicando assim uma redução de aproximadamente 42%.

■ Prob. 8

Ajustando a fórmula de Manning de modo conveniente, podemos escrever

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2} \quad \to \quad \frac{Qn}{S_0^{1/2}} = A R^{2/3}$$

$$\therefore \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)\left(\frac{R_{h1}}{R_{h2}}\right)^{2/3} \quad \textbf{(I)}$$

Quando a profundidade normal é y_1 = 0.85 m, os parâmetros geométricos da seção são tais que

$$A_1 = (b + my)y = (3.0 + 1.0 \times 0.85) \times 0.85 = 3.27 \text{ m}^2$$

$$P_1 = b + 2y\sqrt{1+m^2} = 3.0 + 2 \times 0.85 \times \sqrt{1+1.0^2} = 5.40 \text{ m}$$

$$R_{h1} = \frac{A_1}{P_1} = \frac{3.27}{5.40} = 0.606 \text{ m}$$

De modo similar, os parâmetros geométricos correspondentes à profundidade normal de 1.2 m são

$$A_2 = (b + my)y = (3.0 + 1.0 \times 1.20) \times 1.20 = 5.04 \text{ m}^2$$

$$P_2 = b + 2y\sqrt{1+m^2} = 3.0 + 2 \times 1.20 \times \sqrt{1+1.0^2} = 6.39 \text{ m}$$

$$R_{h2} = \frac{A}{P} = \frac{5.04}{6.39} = 0.789 \text{ m}$$

Substituindo as variáveis pertinentes em **(I)**,

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{3.27}{5.04}\right) \times \left(\frac{0.606}{0.789}\right)^{2/3} = 0.544$$

$$\therefore Q_2 = \frac{Q_1}{0.544} = \frac{2.5}{0.544} = \boxed{4.60 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Portanto, ao aumentar a profundidade normal de 0.85 m para 1.2 m, a vazão transportada cresce de 2.5 m^3/s para 4.6 m^3/s.

■ Prob. 9

A vazão unitária é $q = V_1 y_1 = 2.8 \times 3.0 = 8.4$ m^2/s e a profundidade crítica vale $y_c = (q^2/g)^{1/3} = (8.4^2/9.81)^{1/3} = 1.93$ m. Como 3 m > y_c, o escoamento imediatamente a montante da elevação de leito é subcrítico. A energia específica crítica é calculada a seguir,

$$E_c = \frac{3}{2} y_c = \frac{3}{2} \times 1.93 = 2.895 \text{ m}$$

ao passo que a energia a montante da elevação do leito é

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 3.0 + \frac{2.8^2}{2 \times 9.81} = 3.40 \text{ m}$$

Uma vez que $E_1 - \Delta z > E_c$, não há estrangulamento. Podemos escrever a equação da energia específica entre 1 (a montante da elevação do leito) e 2 (a jusante), obtendo assim

$$E_1 = E_2 \quad \rightarrow \quad E_1 = y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^2} + \Delta z$$

$$\therefore 3.40 = y_2 + \frac{8.4^2}{2 \times 9.81 \times y_2^2} + 0.30$$

Resolvendo com o Mathematica, encontramos y_2 = 2.545 m, que é a profundidade observada após o declive. Tem-se, pois, uma queda de nível da superfície livre igual a 3 – (2.544 + 0.3) = 0.156 m = 15.6 cm.

In[352]:= $\text{Solve}\left[3.40 == \text{Y2} + \frac{8.4^2}{2 \times 9.81 \times \text{Y2}^2} + 0.30, \text{Y2}\right]$

Out[352]= {{Y2 → -0.943129}, {Y2 → 1.49856}, $\boxed{\text{\{Y2 → 2.54457\}}}$}

Finalmente, podemos fazer $E_2 = E_c$ e obter a elevação mínima Δz_c necessária para ocasionar estrangulamento,

$$E_2 = E_c + \Delta z_c \quad \to \quad 3.40 = 2.895 + \Delta z_c$$

$$\therefore \Delta z_c = 3.40 - 2.895 = 0.505 \text{ m} = 50.5 \text{ cm}$$

■ Prob. 10

Como no problema anterior, a montante da contração a vazão unitária é q_1 = 8.4 m^2/s, a profundidade crítica é y_{c1} = 1.93 m e a energia específica é E_1 = 3.40 m. Pelo princípio da continuidade, a vazão unitária q_2 a jusante da contração é tal que

$$q_1 b_1 = q_2 b_2 \quad \to \quad q_2 = q_1 \frac{b_1}{b_2}$$

$$\therefore q_2 = 8.4 \times \frac{3.2}{2.9} = 9.27 \text{ m}^2/\text{s}$$

A profundidade crítica a jusante da contração é determinada a seguir,

$$y_{c2} = \left(\frac{q_2^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{9.27^2}{9.81}\right)^{\frac{1}{3}} = 2.06 \text{ m}$$

Escrevendo a conservação de energia específica entre 1 e 2,

$$E_1 = E_2 \quad \to \quad 3.40 = y_2 + \frac{9.27^2}{2 \times 9.81 \times y_2^2}$$

Resolvendo com o Mathematica, obtemos a profundidade $y_2 \approx 2.867$ m. Temos então uma queda no nível da superfície d'água igual a 3 – 2.867 = 0.133 m = 13.3 cm.

```
In[360]:= Solve[3.40 == Y2 + 9.27^2/(2×9.81×Y2^2), Y2]
Out[360]= {{Y2 → -0.997942}, {Y2 → 1.5307}, {Y2 → 2.86724}}
```

Na iminência do estrangulamento, a energia específica a montante E_1 é igual à energia crítica a jusante E_{c2}, ou seja,

$$E_1 = E_2 \quad \to \quad 3.40 = \frac{3}{2} y_{c2}$$

$$\therefore 3.40 = \frac{3}{2} \times \left(\frac{q_2^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\therefore 3.40=\frac{3}{2}\times\left(\frac{q_2^2}{9.81}\right)^{\frac{1}{3}}$$

```
In[363]:= Solve[3.40 == 1.5 * (q2^2/9.81)^(1/3), q2]

Out[363]= {{q2 → -10.6885}, {q2 → 10.6885}}
```

Como indica o código Mathematica, a vazão unitária referente à iminência de estrangulamento é $q_2 \approx 10.69$ m^2/s. Sendo a vazão propriamente dita Q = 3 × 3 × 2.8 = 25.2 m^3/sec, concluimos que, para que não ocorra estrangulamento, a largura b da seção a jusante da contração deve ser maior que $b = Q/q_2$ = 25.2/10.69 = 2.36 m. A contração máxima é Δb = 3.0 – 2.36 = 0.64 m.

■ Prob. 11

Começamos com o cálculo dos parâmetros geométricos da seção circular a montante,

$$\theta=2\arccos\left(1-\frac{2y}{d}\right)=2\arccos\left(1-\frac{2\times 2.237}{2.8}\right)=4.42\text{ rad}$$

$$A=(\theta-\sin\theta)\frac{d^2}{8}=(4.42-\sin 4.42)\times\frac{2.8^2}{8}=5.27\text{ m}^2$$

$$B=d\sin(\theta/2)=2.8\times\sin(4.42/2)=2.25\text{ m}$$

Em seguida, determinamos a energia específica e o número de Froude do escoamento vindouro,

$$E_1=y_1+\frac{Q^2}{2gA^2}=2.237+\frac{7.5^2}{2\times 9.81\times 5.27^2}=2.34\text{ m}$$

$$\text{Fr}_1=\frac{QB^{1/2}}{g^{1/2}A^{3/2}}=\frac{7.5\times 2.0^{1/2}}{9.81^{1/2}\times 5.27^{3/2}}=0.280$$

Vê-se que o escoamento a montante da transição é subcrítico. Recorrendo às equações para escoamento de superfície livre em condutos retangulares, temos, para o segundo segmento,

$$y_{c2} = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{(7.5/2.0)^2}{9.81}\right]^{\frac{1}{3}} = 1.13 \text{ m}$$

$$E_{c2} = \frac{3}{2}y_{c2} = \frac{3}{2} \times 1.13 = 1.70 \text{ m}$$

Note que $E_2 = E_1 - \Delta h = 2.34 - 1.0 = 1.34$ m < E_{c2}. Portanto, haverá estrangulamento com $y_2 = 1.13$ m; devemos recalcular y_1 usando

$$E_1 = E_{c2} + \Delta h = 1.70 + 1.0 = 2.70 \text{ m}$$

$$\therefore y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} = y_1 + \frac{7.5^2}{2 \times 9.81 \times A_1^2} = 2.70$$

$$\therefore y_1 + \frac{2.87}{A_1^2} = 2.70$$

Faz-se necessária uma abordagem algorítmica. Devemos, primeiramente, calcular y_1; em seguida, calcular o ângulo $\theta = 2\,arccos(1 - 2y_1/d)$ e a área de seção circular $A_1 = (\theta - sin\,\theta)d^2/8$; obter a energia específica E_1; e repetir até que $E_1 = 2.70$ m. A solução pode ser facilmente implementada através do seguinte código MATLAB:

```
syms y1

d = 2.8;
teta = 2*acos(1 - 2*y1/d);
A = (teta - sin(teta))*d^2/8;
expr = y1 + 2.87/A^2 == 2.70;
vpasolve(expr, y1)
```

```
ans =

2.62
```

A resposta destacada em negrito é o valor que buscamos, $y_1 \approx 2.62$ m. Outros parâmetros que podem ser extraídos do código são $\theta = 5.26$ rad, $A_1 = 5.99$ m^2 e, como sabemos, $E_1 = 2.70$ m. Concluimos que o estrangulamento faz com que a profundidade a montante cresça em (2.62 – 2.237) = 0.383 m.

■ Prob. 12

Recorrendo à expressão que fornece a perda de carga E_L normalizada pela profundidade a montante, escrevemos

$$\frac{E_L}{y_1} = \frac{(y_2/y_1 - 1)^3}{4(y_2/y_1)}$$

Fazendo y_2/y_1 = 6.0,

$$\frac{(y_2/y_1 - 1)^3}{4(y_2/y_1)} = 6.0$$

$$\frac{(y_2/y_1 - 1)^3}{4(y_2/y_1)} - 6.0 = 0$$

Expandindo a expressão do lado esquerdo com o Mathematica, obtém-se o seguinte:

```
In[268]:= Expand[(y2y1 - 1)^3/(4*y2y1) - 6]

Out[268]= -21/4 - 1/(4 y2y1) - (3 y2y1)/4 + y2y1^2/4
```

Em um mundo ideal, essa equação seria um polinômio de grau 2 na variável *y2y1* e, destarte, poderia ser resolvida com a fórmula de Bhaskara. No entanto, a presença de uma potência negativa de *y2y1* no segundo termo da esquerda para a direita impede-nos de utilizar essa ferramenta. Isso não é problema para o Mathematica, que pode calcular raizes de qualquer expressão não-elementar através dos comandos *Solve* ou *FindRoot*. No presente caso, encontramos y_2/y_1 =6.338:

```
In[270]:= FindRoot[(y2y1 - 1)^3/(4*y2y1) - 6, {y2y1, 10}]

Out[270]= {y2y1 → 6.33816}
```

Resta obter o número de Froude Fr_1 correspondente:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left[\sqrt{1 + 8\mathrm{Fr}_1^2} - 1\right]$$

$$\therefore \frac{1}{2}\left[\sqrt{1 + 8\mathrm{Fr}_1^2} - 1\right] = 6.338$$

$$\therefore \frac{1}{2}\left[\sqrt{1 + 8\mathrm{Fr}_1^2} - 1\right] - 6.338 = 0$$

```
In[271]:= Solve[1/2 * (Sqrt[1 + 8 fr1^2] - 1) - 6.338 == 0, fr1]

Out[271]= {{fr1 -> -4.82225}, {fr1 -> 4.82225}}
```

O número de Froude que buscamos é $Fr_1 \approx 4.82$.

■ Prob. 13

Ao contrário do que ocorre com condutos retangulares, a análise de ressaltos em certas seções especiais (por exemplo, trapezoidal ou circular) envolve equações não-lineares sem soluções explícitas. Um bom passo inicial é estudar a criticalidade do escoamento; para tanto, igualamos o número de Froude a 1 e separamos as variáveis geométricas e dinâmicas:

$$\frac{Q^2 B_c}{g A_c^3} = 1 \quad \rightarrow \quad \frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c}$$

Introduzindo expressões para área molhada A_c e largura da superfície B_c,

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c} \quad \rightarrow \quad \frac{Q^2}{g} = \frac{\left[(b+my)y\right]^3}{(b+2my)}$$

$$\therefore \frac{Q^2}{g} = \frac{\left[(6.1+2\times y_c)y_c\right]^3}{(6.1+2\times 2\times y_c)}$$

$$\therefore \frac{28.3^2}{9.81} = \frac{\left[(6.1+2y_c)y_c\right]^3}{(6.1+4y_c)}$$

$$\therefore \frac{\left[(6.1+2y_c)y_c\right]^3}{(6.1+4y_c)} = 81.64$$

```
In[386]:= Solve[((6.1 + 2 * yC) * yC)^3 / (6.1 + 4 * yC) == 81.64, yC]

Out[386]= {{yC -> -3.76077 - 0.958367 i}, {yC -> -3.76077 + 0.958367 i}, {yC -> -1.80336},
  {yC -> -0.482247 - 1.33375 i}, {yC -> -0.482247 + 1.33375 i}, {yC -> 1.13939}}
```

A única solução com significado físico no código Mathematica acima é $y_c \approx 1.14$ m. Como a profundidade a montante é 0.381 m < y_c, confirmamos o que afirma o enunciado, isto é, o escoamento a montante é supercrítico e ter-se-á um ressalto em algum ponto ao longo do curso d'água. Para determinar as profundidades conjugadas, devemos igualar as funções momento do conduto antes (região 1) e depois (região 2) do ressalto. Lembrando que a função momento de um conduto trapezoidal é

$$M(y) = \frac{by^2}{2} + \frac{my^3}{3} + \frac{Q^2}{gy(b+my)}$$

podemos escrever

$$M_1 = M_2 \quad \to \quad \frac{by_1^2}{2} + \frac{my_1^3}{3} + \frac{Q^2}{gy_1(b+my_1)} = \frac{by_2^2}{2} + \frac{my_2^3}{3} + \frac{Q^2}{gy_2(b+my_2)}$$

$$\therefore \frac{6.1\times 0.381^2}{2} + \frac{2\times 0.381^3}{3} + \frac{28.3^2}{9.81\times 0.381\times(6.1+2\times 0.381)} = \frac{6.1\times y_2^2}{2} + \frac{2\times y_2^3}{3} + \frac{28.3^2}{9.81\times y_2\times(6.1+2y_2)}$$

$$\therefore 31.71 = 3.05y_2^2 + 0.667y_2^3 + \frac{81.64}{y_2(6.1+2y_2)}$$

```
In[392]:= Solve[31.71 == 3.05 * y2^2 + 0.667 * y2^3 + 81.64/(y2 * (6.1 + 2 * y2)), y2]

Out[392]= {{y2 → -3.54794}, {y2 → -3.46399 - 2.51308 i},
           {y2 → -3.46399 + 2.51308 i}, {y2 → 0.38096}, {y2 → 2.47224}}
```

Há apenas duas soluções para y_2 dotadas de significado físico: a primeira é $y \approx 0.381$ m, que, como já sabemos, é a profundidade a montante do ressalto; a segunda é $y_2 \approx 2.47$ m, que é a profundidade conjugada que buscamos. Resta determinar a perda de carga produzida pelo ressalto; conforme mencionado acima, a fórmula usual

$$h_L = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$$

não é diretamente aplicável a um conduto trapezoidal; para esta e outras geometrias não elementares, devemos computar a diferença entre as energias específicas antes (região 1) e depois (região 2) do ressalto diretamente:

$$\Delta E = \left(y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2}\right) - \left(y_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}\right)$$

$$\therefore \Delta E = \left\{0.381 + \frac{28.3^2}{2\times 9.81\times\left[0.381\times(2\times 0.381+6.1)\right]^2}\right\} - \left\{2.47 + \frac{28.3^2}{2\times 9.81\times\left[2.47\times(2\times 2.47+6.1)\right]^2}\right\}$$

$$\therefore \boxed{\Delta E = 3.83 \text{ m}}$$

Note que o número de Froude para o segmento supercrítico do escoamento é

$$\mathrm{Fr}_1 = \frac{QB_1^{1/2}}{g^{1/2}A_1^{3/2}} = \frac{28.3\times(6.1+2\times 2\times 0.381)^{1/2}}{9.81^{1/2}\times\left[(6.1+2\times 0.381)\times 0.381\right]^{3/2}} = 5.90$$

Perguntaram-se os resultados correspondentes para um canal retangular de mesma largura da base (b = 6.1 m) e mesmo número de Froude a montante (Fr_1 = 5.90). A profundidade a montante para um canal retangular escoando $q = Q/b$ = 28.3/6.1 = 4.64 m^2/s é dada pela equação usual

$$\mathrm{Fr}_1 = \frac{q}{\sqrt{gy_1^3}} = 5.90 \quad\rightarrow\quad y_1 = 0.398 \text{ m}$$

A profundidade conjugada que buscamos é dada pela equação do ressalto,

$$y_2 = \frac{y_1}{2}\left[\sqrt{1+8\mathrm{Fr}_1^2}-1\right] = \frac{0.398}{2}\times\left[\sqrt{1+8\times 5.90^2}-1\right] = 3.13 \text{ m}$$

e a energia dissipada é

$$\Delta E = \left(y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2}\right) - \left(y_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}\right)$$

$$\therefore \Delta E = \left[0.398 + \frac{28.3^2}{2\times 9.81\times(6.1\times 0.398)^2}\right] - \left[3.13 + \frac{28.3^2}{2\times 9.81\times(6.1\times 3.13)^2}\right]$$

$$\therefore \boxed{\Delta E = 4.08 \text{ m}}$$

Os resultados são comparados na tabela a seguir.

	Canal trapezoidal	**Canal retangular**
y_1	0.381 m	0.398 m
y_2	2.47 m	3.13 m
ΔE	3.83 m	4.08 m

■ Prob. 14

O primeiro passo é igualar o número de Froude a 1 e separar fatores geométricos e dinâmicos,

$$\frac{Q^2 B_c}{g A_c^3} = 1 \rightarrow \frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c}$$

Substituindo os valores pertinentes,

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c} \rightarrow \frac{0.8^2}{9.81} = \frac{\left\{\left[\theta - \sin(\theta)\right] d^2/8\right\}^3}{d\sin(\theta/2)}$$

$$\therefore \frac{0.8^2}{9.81} = \frac{\left\{\left[\theta - \sin(\theta)\right]\times 2.0^2/8\right\}^3}{2.0\times\sin(\theta/2)}$$

$$\therefore \frac{\left\{\left[\theta - \sin(\theta)\right]\times 2.0/8\right\}^3}{2.0\times\sin(\theta/2)} - 0.0652 = 0$$

A função transcendental acima pode ser resolvida para θ usando o Mathematica; o resultado é $\theta \approx 1.894$ rad.

```
In[487]:= FindRoot[(((θ - Sin[θ]) * 2.0^2 / 8)^3 / (2.0 * Sin[θ / 2])) - 0.0652, {θ, 1}]

Out[487]=
{θ → 1.89423}
```

Em seguida, usamos θ para determinar a profundidade crítica y_c,

$$y_c = \frac{d}{2}\left[1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] = \frac{2.0}{2}\times\left[1 - \cos\left(\frac{1.894}{2}\right)\right] = 0.416 \text{ m}$$

Como a profundidade fornecida no enunciado (= 0.25 m) é menor que y_c, o escoamento no conduto de fato é supercrítico e um ressalto hidráulico ocorrerá em algum ponto do curso d'água. Como a equação do ressalto não se aplica a condutos circulares, o cálculo da profundidade conjugada deve ser feito através da equação do momento específico. Para uma seção circular, o momento específico é dado pela expressão (cuja parte trigonométrica, diga-se de passagem, é um pouco assustadora)

$$M(\theta) = \left[3\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sin^3\left(\frac{\theta}{2}\right) - 3\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]\frac{d^3}{24} + \frac{8Q^2}{gd^2\left[\theta - \sin(\theta)\right]} \quad \textbf{(I)}$$

Para uma profundidade y_1 = 0.25 m, o valor do ângulo θ é

$$\theta = 2\arccos\left(1-\frac{2y_1}{d}\right) = 2\times\arccos\left(1-\frac{2\times 0.25}{2.0}\right) = 1.445 \text{ rad}$$

Substituindo em **(I)**, obtemos o momento específico a montante do ressalto,

$$M_1 = \begin{bmatrix} 3\times\sin\left(\frac{1.445}{2}\right)-\sin^3\left(\frac{1.445}{2}\right) \\ -3\times\left(\frac{1.445}{2}\right)\times\cos\left(\frac{1.445}{2}\right) \end{bmatrix}\times\frac{2.0^3}{24}+\frac{8\times 0.8^2}{9.81\times 2.0^2\times\left[1.445-\sin(1.445)\right]}$$

$$\therefore M_1 = 0.311 \text{ m}^3$$

Para obter o ângulo θ referente ao escoamento a jusante do ressalto, escrevemos

$$M_2 = \begin{bmatrix} 3\times\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)-\sin^3\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ -3\times\left(\frac{\theta}{2}\right)\times\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{bmatrix}\times\frac{2.0^3}{24}+\frac{8\times 0.8^2}{9.81\times 2.0^2\times\left[\theta-\sin(\theta)\right]} = 0.311$$

e recorremos ao Mathematica para resolver essa equação transcendental:

```
In[470]:= FindRoot[(3 * Sin[θ / 2] - Sin[θ / 2]^3 - 3 * (θ / 2) * Cos[θ / 2]) * 2^3/24 +
    8 * 0.8^2/(9.81 * 2^2 * (θ - Sin[θ])) - 0.311, {θ, 2}]
Out[470]=
    {θ → 2.42408}
```

A solução obtida é $\theta \approx$ 2.4241 rad. A profundidade y_2 que corresponde a esse ângulo é tal que

$$y_2 = \frac{d}{2}\left[1-\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] = \frac{2.0}{2}\times\left[1-\cos\left(\frac{2.4241}{2}\right)\right] = \boxed{0.649 \text{ m}}$$

Conclui-se que as profundidades de escoamento a montante e a jusante do ressalto são respectivamente iguais a 0.25 m e ≈0.65 m.

■ Prob. 15

1. Falso. Primeiramente, busca-se a profundidade na seção B. Não podemos recorrer à conservação de momento específico porque a comporta aplica uma força não-conservativa oposta ao escoamento a montante. Por outro lado, podemos supor que a conservação de energia é aplicável e recorrer à equação da energia específica,

$$y_A + \frac{q^2}{2gy_A^2} = y_B + \frac{q^2}{2gy_B^2}$$

$$\therefore 6 + \frac{(8/2)^2}{2\times 9.81\times 6^2} = y_B + \frac{(8/2)^2}{2\times 9.81\times y_B^2}$$

$$\therefore 6.0057 = y_B + \frac{(8/1.5)^2}{2\times 9.81\times y_B^2}$$

Resolvendo a equação acima para y_B, obtemos um valor negativo sem significado prático e dois valores de profundidade. O menor valor de profundidade ($y_B \approx 0.381$ m) é a profundidade supercrítica para o valor de energia específica em questão; o maior valor ($y_B \approx 6.0$ m), por sua vez, é a profundidade conjugada subcrítica. Sendo o escoamento em *B* supercrítico (se esse não fosse o caso, não teríamos um ressalto), conclui-se que a profundidade em *B* é 0.381 m.

```
In[311]:= Solve[6 + (8 / 2)/(2 * 9.81 * 6^2) == (8 / 2)^2/(2 * 9.81 * yB^2) + yB, yB]

Out[311]= {{yB → -0.357979}, {yB → 0.380761}, {yB → 5.98288}}
```

2. Verdadeiro. Primeiramente, precisamos do número de Froude imediatamente a montante do ressalto,

$$\mathrm{Fr}_B = \frac{q}{\sqrt{gy^3}} = \frac{(8/2)}{\sqrt{9.81\times 0.381^3}} = 5.43$$

Em seguida, utilizamos a equação do ressalto para calcular a profundidade na seção *D*,

$$\frac{y_D}{y_B} = \frac{1}{2}\left[\sqrt{1+8\mathrm{Fr}_B^2} - 1\right]$$

$$\therefore \frac{y_D}{y_B} = \frac{1}{2}\times\left(\sqrt{1+8\times 5.43^2} - 1\right) = 7.20$$

$$\therefore y_D = 7.20 y_B = 7.20 \times 0.381 = \boxed{2.74 \text{ m}}$$

3. Falso. Conhecendo a profundidade a montante y_B = 0.381 m e a profundidade a jusante y_D = 2.74 m, calculamos a perda de carga como

$$h_L = \frac{(y_D - y_B)^3}{4 y_D y_B} = \frac{(2.74 - 0.381)^3}{4 \times 2.74 \times 0.381} = \boxed{3.14 \text{ m}}$$

■ Prob. 16

Seção triangular: Começamos com a derivação para um conduto livre triangular. Lembrando que a área *A* de uma seção transversal triangular e a largura da superfície *B* são respectivamente dados por

$$A = my^2$$
$$B = 2my$$

podemos exprimir o número de Froude do escoamento como

$$\text{Fr}^2 = \frac{Q^2 B}{gA^3} = \frac{Q^2 \times 2my}{g \times (my^2)^3} = \frac{2Q^2 my}{gm^3 y^6} = \frac{2Q^2 y}{gm^2 y^5} \quad \textbf{(I)}$$

Ademais, o momento específico para um conduto triangular é dado por

$$M(y) = \frac{my^3}{3} + \frac{Q^2}{gmy^5}$$

Igualamos os momentos M_1 e M_2 antes e após o ressalto, dividimos os dois lados por $my_1^3/3$ e usamos a expressão **(I)** para obter

$$M_1 = M_2 \quad \rightarrow \quad \frac{my_1^3}{3} + \frac{Q^2}{gmy_1^5} = \frac{my_2^3}{3} + \frac{Q^2}{gmy_2^5}$$

$$\therefore \frac{\frac{my_1^3}{3} + \frac{Q^2}{gmy_1^5}}{\frac{my_1^3}{3}} = \frac{\frac{my_2^3}{3} + \frac{Q^2}{gmy_2^5}}{\frac{my_1^3}{3}}$$

$$\therefore 1 + \frac{3Q^2}{gm^2 y_1^5} = \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 + \frac{3Q^2}{gm^2 y_1^5}\left(\frac{y_1}{y_2}\right)^2$$

$$\therefore 1+\frac{3}{2}\mathrm{Fr}_1^2=\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3+\frac{3\mathrm{Fr}_1^2}{2\left(y_2/y_1\right)^2}$$

$$\therefore \frac{3}{2}\mathrm{Fr}_1^2-\frac{3\mathrm{Fr}_1^2}{2\left(y_2/y_1\right)^2}=\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3-1$$

$$\therefore \frac{3}{2}\mathrm{Fr}_1^2\left[1-\frac{1}{\left(y_2/y_1\right)^2}\right]=\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3-1$$

$$\therefore \boxed{\mathrm{Fr}_1^2=\frac{\frac{2}{3}\left[\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3-1\right]}{1-\frac{1}{\left(y_2/y_1\right)^2}}}$$

Como solicitado, a equação acima relaciona o (quadrado do) número de Froude a montante do ressalto e a razão de profundidades conjugadas para um conduto livre de seção triangular.

Seção parabólica: Considerando agora um conduto de seção parabólica, lembramos que a área de seção transversal e a largura da superfície são tais que

$$B=B_0\sqrt{\frac{y}{y_0}}\quad;\quad A=\frac{2}{3}\frac{B_0}{\sqrt{y_0}}y^{3/2}$$

onde B_0 denota a largura de superfície quando a profundidade de escoamento é igual à altura y_0 da seção cheia. O número de Froude do escoamento é

$$\mathrm{Fr}^2=\frac{Q^2B}{gA^3}=\frac{Q^2\times B_0\sqrt{\frac{y}{y_0}}}{g\times\left(\frac{2}{3}\frac{B_0}{\sqrt{y_0}}y^{3/2}\right)^3}=\frac{27}{8}\frac{Q^2}{g\frac{B_0^2}{y_0}y^4}\quad\textbf{(II)}$$

Em seguida, recorremos à função momento para um conduto parabólico,

$$M\left(y\right)=\left(\frac{4}{15}\right)\zeta y^{5/2}+\frac{3Q^2}{2g\zeta y^{3/2}}$$

onde $\zeta = B_0/y_0^{1/2}$. Igualamos os momentos específicos a montante e a jusante do ressalto, dividimos ambos os lados por $(4/15)B_0 y_1^{5/2}/y_0^{1/2}$ e utilizamos **(II)** para obter

$$\frac{4}{15}\frac{B_0}{\sqrt{y_0}}y_1^{5/2}+\frac{3}{2}\frac{Q^2}{g\left(\frac{2}{3}\frac{B_0}{\sqrt{y_0}}y_1^{3/2}\right)^3}=\frac{4}{15}\frac{B_0}{\sqrt{y_0}}y_2^{5/2}+\frac{3}{2}\frac{Q^2}{g\left(\frac{2}{3}\frac{B_0}{\sqrt{y_0}}y_2^{3/2}\right)^3}$$

$$\therefore 1+\frac{45}{8}\frac{Q^2}{g\frac{B_0^2}{y_0}y_1^4}=\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{5/2}+\frac{45}{8}\frac{Q^2}{g\frac{B_0^2}{y_0}y_1^4}\left(\frac{y_1}{y_2}\right)^{3/2}$$

$$\therefore 1+\frac{5}{3}\mathrm{Fr}_1^2=\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{5/2}+\frac{5}{3}\frac{\mathrm{Fr}_1^2}{\left(y_2/y_1\right)^{3/2}}$$

$$\therefore \frac{5}{3}\mathrm{Fr}_1^2-\frac{5}{3}\frac{\mathrm{Fr}_1^2}{\left(y_2/y_1\right)^{3/2}}=\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{5/2}-1$$

$$\therefore \frac{5}{3}\mathrm{Fr}_1^2\left[1-\frac{1}{\left(y_2/y_1\right)^{3/2}}\right]=\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{5/2}-1$$

$$\therefore \boxed{\mathrm{Fr}_1^2=\frac{3}{5}\left[\frac{\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{5/2}-1}{1-\frac{1}{\left(y_2/y_1\right)^{3/2}}}\right]}$$

A expressão acima associa o número de Froude à razão de profundidades em um canal de seção transversal parabólica.

■ Prob. 17

O passo inicial óbvio é computar o número de Froude na entrada do ressalto,

$$\mathrm{Fr}=\sqrt{\frac{Q^2 B}{gA^3}}$$

$$\therefore \mathrm{Fr}=\sqrt{\frac{Q^2\times 2my}{g\times\left(my^2\right)^3}}=\sqrt{\frac{2Q^2}{gm^2y^5}}=\sqrt{\frac{2\times 0.30^2}{9.81\times 2^2\times 0.15^5}}=7.77$$

A profundidade conjugada a jusante do ressalto pode ser obtida igualando as funções momento do escoamento antes e após a transição. Isso não é necessário, no entanto, porque no Problema 16 derivamos uma expressão que relaciona explicitamente as profundidades conjugadas e o número de Froude em uma seção triangular:

$$\mathrm{Fr}_1^2 = \frac{\frac{2}{3}\left[\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 - 1\right]}{1 + \frac{1}{(y_2/y_1)^2}}$$

Substituindo $\mathrm{Fr}_1^2 = 7.77^2 = 60.37$ e resolvendo com o Mathematica, obtém-se $y_2/y_1 = 4.43$. Segue que $y_2/y_1 = 4.430$ e $y_2 = 4.430y_1 = 4.430 \times 0.15 = 0.665$ m. A profundidade conjugada a jusante do ressalto é aproximadamente igual a 67 cm.

```
In[500]:= Solve[7.77^2 == (2/3 * ((y2y1)^3 - 1))/(1 - 1/y2y1^2), y2y1]

Out[500]=
{{y2y1 → -2.2204 - 3.96642 i},
 {y2y1 → -2.2204 + 3.96642 i}, {y2y1 → -0.989307}, {y2y1 → 4.43011}}
```

■ Prob. 18

Primeiramente, igualamos o número de Froude a 1 e resolvemos para obter a profundidade crítica y_c,

$$\mathrm{Fr}_1^2 = \frac{Q^2 B_c}{g A_c^3} = 1.0 \;\rightarrow\; \frac{Q^2 \times B_0\sqrt{\frac{y_c}{y_0}}}{g \times \left(\frac{2}{3}\frac{B_0}{\sqrt{y_0}}y_c^{3/2}\right)^3} = 1.0$$

$$\therefore \frac{27}{8}\frac{Q^2}{g\frac{B_0^2}{y_0}y_c^4} = 1.0$$

$$\therefore y_c = \sqrt[4]{\frac{27 y_0 Q^2}{8 g B_0^2}}$$

$$\therefore y_c = \sqrt[4]{\frac{27\times 2.0\times 8.5^2}{8\times 9.81\times 10^2}} = 0.840 \text{ m}$$

Como a profundidade y_2 = 1.5 m a jusante da transição é maior que y_c, de fato temos um ressalto hidráulico ao longo do curso d'água. Para obter a profundidade conjugada que desconhecemos, primeiramente calculamos o momento específico após a transição,

$$M_2 = \frac{4}{15}\frac{B_0}{\sqrt{y_0}}y_2^{5/2} + \frac{3}{2}\frac{Q^2}{g\dfrac{B_0}{\sqrt{y_0}}y_2^{3/2}}$$

$$\therefore M_2 = \frac{4}{15}\times\frac{10.0}{\sqrt{2.0}}\times 1.5^{5/2} + \frac{3}{2}\times\frac{8.5^2}{9.81\times\dfrac{10}{\sqrt{2.0}}\times 1.5^{3/2}} = 6.047 \text{ m}^3$$

Em seguida, igualamos esse resultado ao momento específico a montante M_1,

$$M_1 = \frac{4}{15}\frac{B_0}{\sqrt{y_0}}y_1^{5/2} + \frac{3}{2}\frac{Q^2}{g\dfrac{B_0}{\sqrt{y_0}}y_1^{3/2}} = 6.047$$

$$\therefore 1.886 y_1^{5/2} + \frac{1.562}{y_1^{3/2}} = 6.047$$

Por fim, resolvemos para y_1 usando o Mathematica:

```
In[508]:= FindRoot[1.886 * y1^2.5 + 1.562/y1^1.5 - 6.047, {y1, 0.5}]

Out[508]=
{y1 → 0.415246}
```

Como mostra o código acima, a profundidade a montante do ressalto é $y_1 \approx$ 0.415 m.

■ Prob. 19

Primeiramente, selecionamos o *n* de Manning, que, para cascalho grosso, pode ser tomado como 0.025 (Tabela 3). O talude *m* também é arbitrário; inicialmente, podemos escolher, por exemplo, *m* = 2. Recorrendo à Tabela 4, vê-se que a máxima velocidade permissível para um solo pedregoso grosso é 1.8 m/s. Em uma abordagem simplificada do método das velocidades permissíveis, recomenda-se acrescentar 0.15 m/s ao limite supracitado se a profundidade de escoamento do canal for superior a 1.0 m (vide Chaudhry (2008)). Temos um canal com vazão de

projeto relativamente grande (= 125 m^3/s), então parece razoável utilizar essa regra; temos, pois, a velocidade permissível V_{max} = 1.8 + 0.15 = 1.95 m/s.
Como o enunciado indica que o canal é reto, não precisamos empregar as penalidades por sinuosidade listadas na Tabela 5. Podemos prosseguir e utilizar a equação de Manning para estimar o raio hidráulico R_h,

$$R = \left(\frac{nV_{\max}}{S_0^{1/2}}\right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{0.025\times 125}{0.001^{1/2}}\right)^{\frac{3}{2}} = 1.914 \text{ m}$$

Em seguida, utilizamos a definição de vazão para obter a área de escoamento A,

$$Q = VA \quad \rightarrow \quad A = \frac{Q}{V_{\max}}$$

$$\therefore A = \frac{125}{1.95} = 64.10 \text{ m}^2$$

e o perímetro molhado é

$$P = \frac{A}{R} = \frac{64.10}{1.914} = 33.49 \text{ m}$$

Devemos encontrar uma largura de base b e uma profundidade de escoamento y_0 que resultem em área ~64.1 m^2 e perímetro molhado ~33.5 m. Para uma seção trapezoidal, a área é dada por

$$A = (b + my)y$$

$$\therefore (b + 2\times y)y = 64.10 \quad \textbf{(I)}$$

ao passo que o perímetro é

$$P = b + 2y\sqrt{1+m^2}$$

$$\therefore P = b + 2y\sqrt{1+2^2}$$

$$\therefore b + 4.47y = 33.49 \quad \textbf{(II)}$$

Podemos resolver as equações **(I)** e **(II)** simultaneamente usando o Mathematica:

```
In[40]:= Solve[{(b + 2 * y0) * y0 == 64.10, b + 4.47 * y0 == 33.49}, {b, y0}]
Out[40]= {{b → 23.1808, y0 → 2.3063}, {b → -16.8082, y0 → 11.2524}}
```

A solução à direita envolve um número negativo e não tem significado físico no contexto do nosso problema. As soluções que buscamos estão à esquerda: a largura de base é $b \approx 23.2$ m e a profundidade normal é $y_0 \approx 2.31$ m. Observe que a altura d'água obtida de fato é maior que 1.0 m, o que justifica nossa hipótese quando da escolha da velocidade permissível máxima. Resta prescrever um valor de *freeboard* (folga) entre a superfície do canal e a borda superior; de acordo com a Tabela 6, o valor recomendado para vazões > 85 m^3/s é 0.90 m. Portanto, temos um canal com profundidade de escoamento y_0 = 2.31 m e profundidade total h = 2.31 + 0.9 = 3.2 m. A largura da base é $b \approx 23.18$ m. Um último passo 'prudente' é verificar se o número de Froude é inferior a 1, uma vez que o método das velocidades permissíveis foi formulado com escoamentos uniformes e subcríticos em mente. Primeiramente, calculamos a largura da superfície B,

$$B = b + 2my = 23.18 + 2 \times 2 \times 2.31 = 32.42 \text{ m}$$

Em seguida, tem-se

$$\text{Fr} = \sqrt{\frac{Q^2 B}{gA^3}} = \sqrt{\frac{85^2 \times 32.42}{9.81 \times 64.10^3}} = 0.301 < 1$$

Como esperado, o escoamento é subcrítico.

■ Prob. 20

Em um dimensionamento básico, adotamos um coeficiente de rugosidade n = 0.023 e um talude 3 H : 1 V, o que corresponde a um ângulo de inclinação lateral θ tal que

$$\theta = \arctan\left(\frac{1}{3}\right) = 18.4^{\circ}$$

Usando a Figura 1, que fornece o ângulo de repouso em termos do tamanho de partícula do material, entramos com um tamanho de partícula igual a 7.5 mm e, utilizando como referência a curva para partículas levemente arredondadas (= *slightly rounded*), encontramos $\phi \approx 26.5^{\circ}$. Em seguida, determina-se o fator de tensão de arraste K,

$$K = \sqrt{1 - \frac{\sin^2\theta}{\sin^2\phi}} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 18.4^{\circ}}{\sin^2 26.5^{\circ}}} = 0.707$$

Para encontrar a tensão de arraste máxima, recorremos à Figura 2, que fornece a tensão permissível em termos do diâmetro de partícula. Para uma partícula de tamanho 7.5 mm, a tensão permissível é de 6.5 N/m^2. Como o canal é levemente sinuoso, devemos reduzir a tensão permissível em 10% (Tabela 7); o resultado é

$$\tau_p = 0.90 \times 6.5 = 5.85 \text{ N/m}^2$$

A tensão de arraste permissível nas paredes laterais do canal é

$$\tau_{p,s} = K\tau_p = 0.707 \times 5.85 = 4.14 \text{ N/m}^2 \quad \textbf{(I)}$$

A tensão de arraste unitária nas paredes laterais é

$$\tau_s = 0.76\gamma y S_0 = 0.76 \times 9810 \times y \times 0.0002 = 1.491y \quad \textbf{(II)}$$

Igualando **(I)** e **(II)**, tem-se a profundidade de escoamento

$$\tau_s = \tau_{p,s} \quad \rightarrow \quad 1.491y = 4.14$$

$$\therefore y = \frac{4.14}{1.491} = 2.78 \text{ m}$$

A largura da base *b* pode ser obtida através da equação de Manning,

$$Q = \frac{\sqrt{S_0}}{n} \times \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} = \frac{\sqrt{S_0}}{n} \times \frac{\left[(b+my)y\right]^{5/3}}{\left(b+2y\sqrt{1+m^2}\right)^{2/3}}$$

$$\therefore 65 = \frac{\sqrt{2 \times 10^{-4}}}{0.023} \times \frac{\left[(b+3\times 2.78)\times 2.78\right]^{5/3}}{\left(b+2\times 2.78 \times \sqrt{1+3^2}\right)^{2/3}}$$

```
In[48]:= Solve[65 == Sqrt[2*10^-4]/0.023 * ((b + 3*2.78)*2.78)^(5/3)/(b + 2*2.78*Sqrt[1 + 3^2])^(2/3), b]

Out[48]= {{b → 15.5744}}
```

Como mostra o código Mathematica acima, obtemos a largura da base $b \approx 15.57$ m. Resta apenas verificar a estabilidade do leito do canal; para que o dimensionamento seja aceitável, a tensão $\tau_\ell = \gamma y S_0$ no leito não pode exceder $\tau_p = 5.85$ N/m^2; ou seja,

$$\tau_\ell = \gamma y S_0 = 9810 \times 2.78 \times 0.0002 = 5.45 \text{ N/m}^2$$

Como $\tau_\ell < \tau_p$, nosso dimensionamento é estável em termos de erosão do leito. Um dos últimos aspectos do projeto é a prescrição de uma altura de *freeboard;* de acordo com a Tabela 6, a folga sugerida para vazões situadas entre 1.5 e 85 m^3/s é de 0.75 m; assim sendo, temos um canal com profundidade de escoamento y_0 = 2.78 m e profundidade total h = 2.78 + 0.75 = 3.53 m. A largura da base é $b \approx 15.57$ m. Por fim, convém verificar a criticalidade do escoamento; a largura da superfície B e a área de escoamento A são

$$B = b + 2my = 15.57 + 2\times 3\times 2.78 = 32.25\ \text{m}$$

$$A = (b + my)y = (15.57 + 3\times 2.78)\times 2.78 = 66.5\ \text{m}^2$$

e o número de Froude torna-se

$$\text{Fr} = \sqrt{\frac{Q^2 B}{gA^3}} = \sqrt{\frac{65^2 \times 32.25}{9.81\times 66.5^3}} = 0.217 < 1$$

Como esperado, o escoamento é subcrítico.

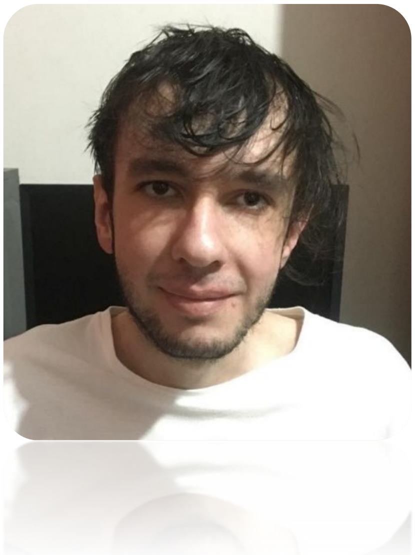
■ Referências (★ → Livro altamente recomendado)

1. AKAN, A.O. **Open Channel Hydraulics**. Butterworth-Heinemann, 2006.
2. CHAUDHRY, M.H. **Open-Channel Flow**. 2ª ed. Springer, 2008.
3. CHOW, V.T. **Open-Channel Hydraulics**. McGraw-Hill, 1959.
4. PORTO, R.M. **Hidráulica Básica**. 4ª ed. EESC/USP, 2006.
5. STURM, T.W. **Open Channel Hydraulics**. 2ª ed. McGraw-Hill, 2009. ★
6. SUBRAMANYA, K. **Flow in Open Channels**. 5ª ed. McGraw-Hill, 2019. ★

➔ Referências de cada problema

Problema	Ref.	Problema	Ref.
1	[1]	11	[5]
2	[1]	12	[6]
3	[5]	13	[6]
4	[5]	14	[5]
5	[6]	15	[1]
6	[6]	16	[5]
7	[6]	17	[5]
8	[6]	18	[5]
9	[5]	19	[2]
10	[5]	20	[2]

■ Sobre mim



Sou aluno de graduação em Engenharia Civil na Universidade de Brasília (UnB). Meus principais interesses são hidrologia, engenharia hidráulica, engenharia ambiental, geotecnia e métodos geofísicos. Tenho proficiência certificada em sete idiomas e busco me posicionar na comunidade brasileira de engenheiros e especialistas em infraestrutura.

WhatsApp: (61) 981247059
Email: lucas_0150@hotmail.com