INSTITUTO FEDERAL
Sertão Pernambucano
Campus Petrolina Zona Rural

Aula 20
Movimento permanente variado em canais

Prof. José Sebastião Costa de Sousa
Dr. Engenharia Agrícola
CPZR/IFSertãoPE

Sumário

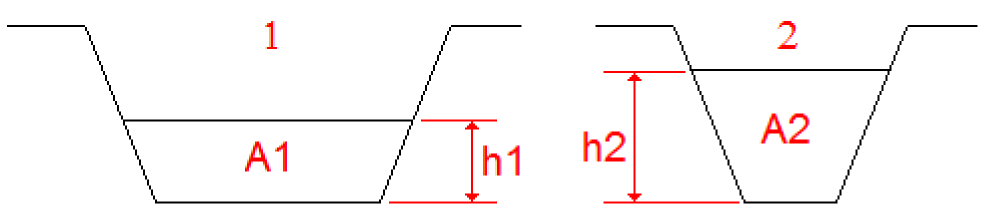
- Profundidade crítica;
- Ressalto hidráulico; e
- Remanso.

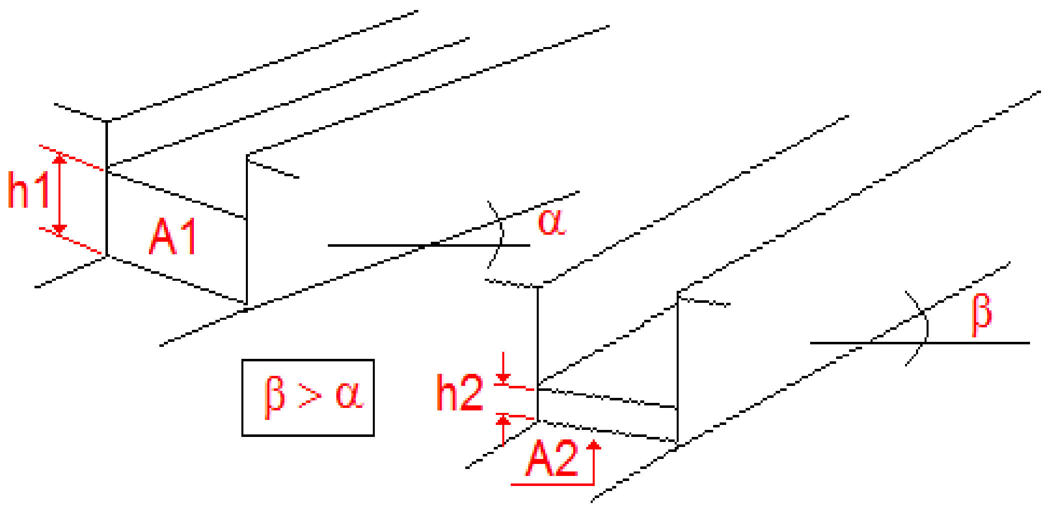
Introdução

- Alterações na carga hidráulica de um canal provoca mudanças na velocidade do fluxo (**<u>movimento permanente variado</u>**). Tal situação ocorre mudando a geometria ou declividade do canal.

Declividade ↑ *Carga hidráulica* ↓

Carga hidráulica ↑ *Área transv.* ↓





- Ocorre também modificação na **<u>carga específica</u>** do fluido:
- $He = Y + V^2/2g$ *Onde: Y = h – carga hidráulica; V – velocidade.*

Ou seja, cada Y gerará uma He diferente !!!

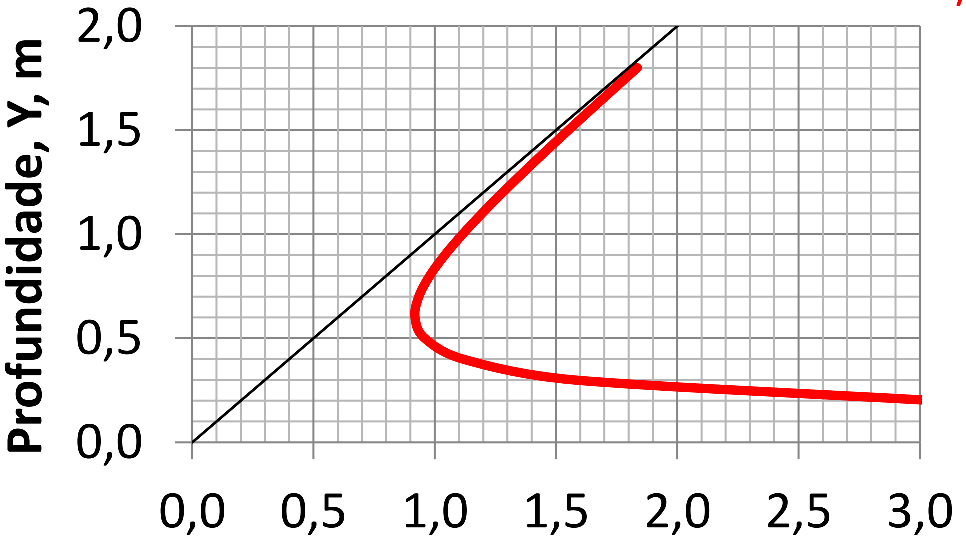
Regime recíproco de escoamento ocorre quando o He é o mesmo para diferentes Y.

Profundidade crítica – Y_c

- **É a que provoca a menor carga específica**. Se h > Y_c (fluxo fluvial) se < Y_c (torrencial).
- Para demonstração considere o exemplo: canal retangular com 3,00 m de largura conduzindo 4,50 m³/s de água limpa. Página 376 do Manual de Hidráulica, 8ª ed.

A = 3,00 x h
V = 4,50 / (3 x h)
He = h + V²/2g

Y = h (m)	V (m/s)	V²/2g (m)	He (mca)
0,2	7,50	2,87	3,07
0,4	3,75	0,72	1,12
0,6	2,50	0,32	0,92
0,8	1,88	0,18	0,98
1,0	1,50	0,11	1,11
1,2	1,25	0,08	1,28
1,4	1,07	0,06	1,46
1,6	0,94	0,04	1,64
1,8	0,83	0,04	1,84



Observe que para Y = 0,4 e Y = 1,0 os valores de He são aproximadamente iguais.
Regime recíproco de escoamento

Profundidade crítica – Y_c

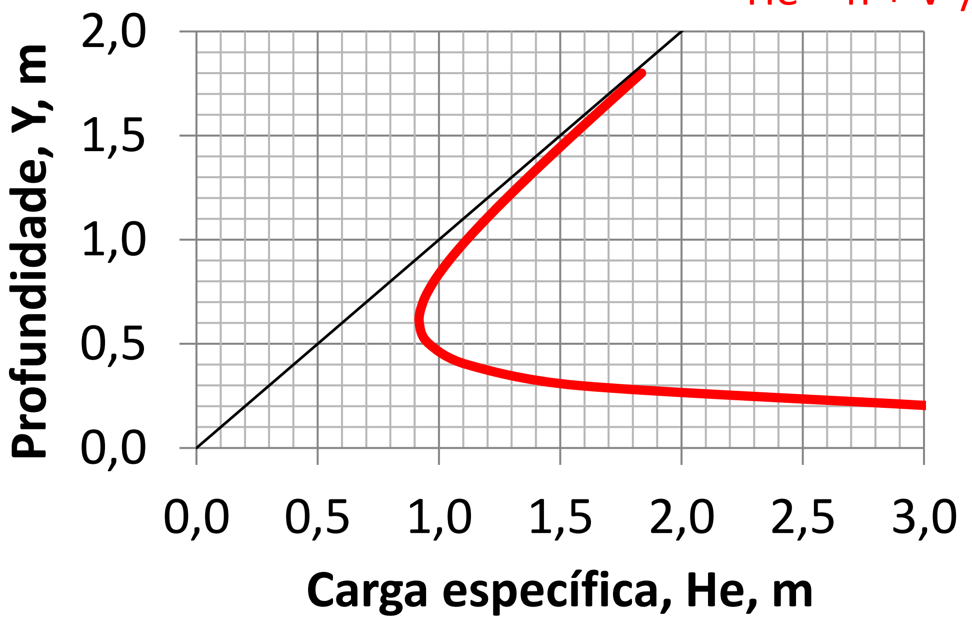
- **É a que provoca a menor carga específica**. Se $h > Y_c$ (fluxo fluvial) se $< Y_c$ (torrencial).
- Para demonstração considere o exemplo: canal retangular com 3,00 m de largura conduzindo 4,50 m^3/s de água limpa. Página 376 do Manual de Hidráulica, 8ª ed.

$A = 3{,}00 \times h$

$V = 4{,}50 / (3 \times h)$

$He = h + V^2/2g$

Y = h (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	He (mca)
0,2	7,50	2,87	3,07
0,4	3,75	0,72	1,12
0,6	2,50	0,32	0,92
0,8	1,88	0,18	0,98
1,0	1,50	0,11	1,11
1,2	1,25	0,08	1,28
1,4	1,07	0,06	1,46
1,6	0,94	0,04	1,64
1,8	0,83	0,04	1,84



E qual será a profundidade crítica?

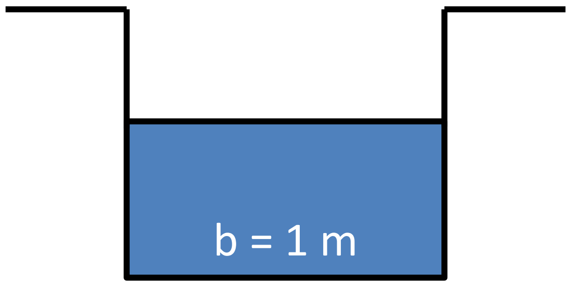
Para determinação analítica:

Profundidade crítica em canais retangulares (pg. 378)

- $Yc = 2/3*He$ – para canais com b = 1 m

- $Yc \approx 0,47*Q^{2/3}$ – para canais com b = 1 m

- **$Yc \approx (0,47*Q^{2/3}) / b^{2/3}$ – para b qualquer.**



Aplicando ao exemplo anterior: canal retangular com 3,00 m de largura conduzindo 4,50 m^3/s de água.

- $Yc = (0,47*4,50^{2/3})/3,00^{2/3} = 0,62$ m;

- $He = 3/2*Yc = 3/2*0,616 = 0,92$ mca.

Para outras formas geométricas de canais, recomenda-se o tratamento gráfico!!!
Segue um exemplo:

Cálculo da profundiade crítica em canais trapezoidais

$A = b*h + m*h^2$ $B = b + 2*h*m$

Q	50	m3/s
m	2	adm.
b	5	m

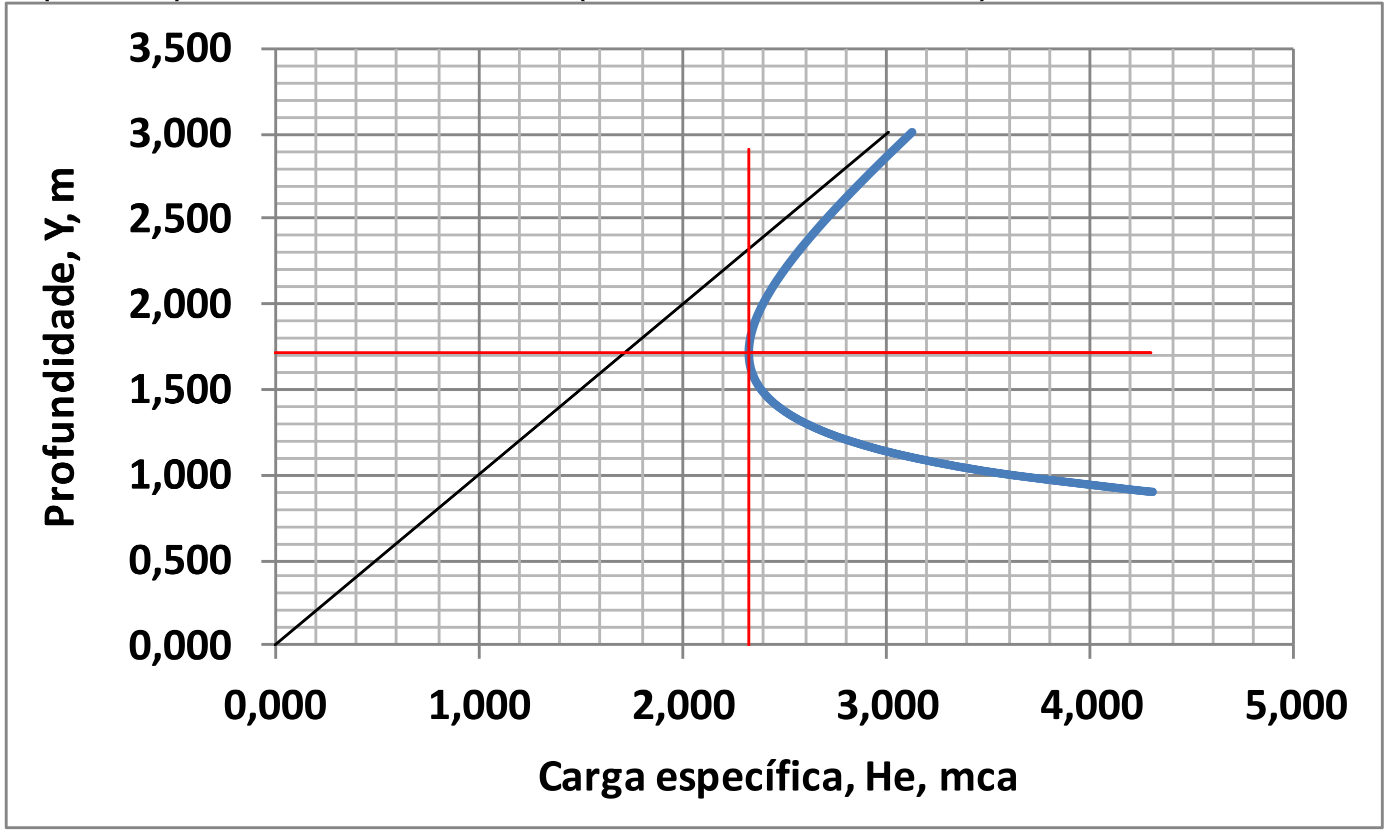
Observações:

Deve-se atribuir valor para o 1º Y até a curva do gráfico apresentar formato de c.

Depois clique em solver e resover. (dados/solver/resolver/ok)

Y(m)	A(m)	V (m/s)	He (m)
0,900	6,120	8,170	4,306
0,910	6,206	8,056	4,222
1,010	7,090	7,052	3,547
1,110	8,014	6,239	3,096
1,210	8,978	5,569	2,792
1,310	9,982	5,009	2,590
1,410	11,026	4,535	2,459
1,510	12,110	4,129	2,380
1,610	13,234	3,778	2,338
1,710	14,398	3,473	2,325
1,810	15,602	3,205	2,334
1,910	16,846	2,968	2,359
2,010	18,130	2,758	2,398
2,110	19,454	2,570	2,447
2,210	20,818	2,402	2,504
2,310	22,222	2,250	2,568
2,410	23,666	2,113	2,638
2,510	25,150	1,988	2,712
2,610	26,674	1,874	2,789
2,710	28,238	1,771	2,870
2,810	29,842	1,675	2,953
2,910	31,486	1,588	3,039
3,010	33,170	1,507	3,126
1,716	14,464	3,457	2,325

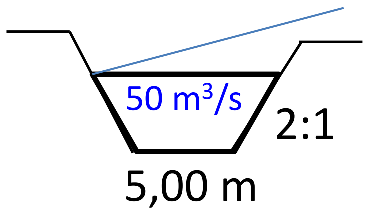
Usando solver.

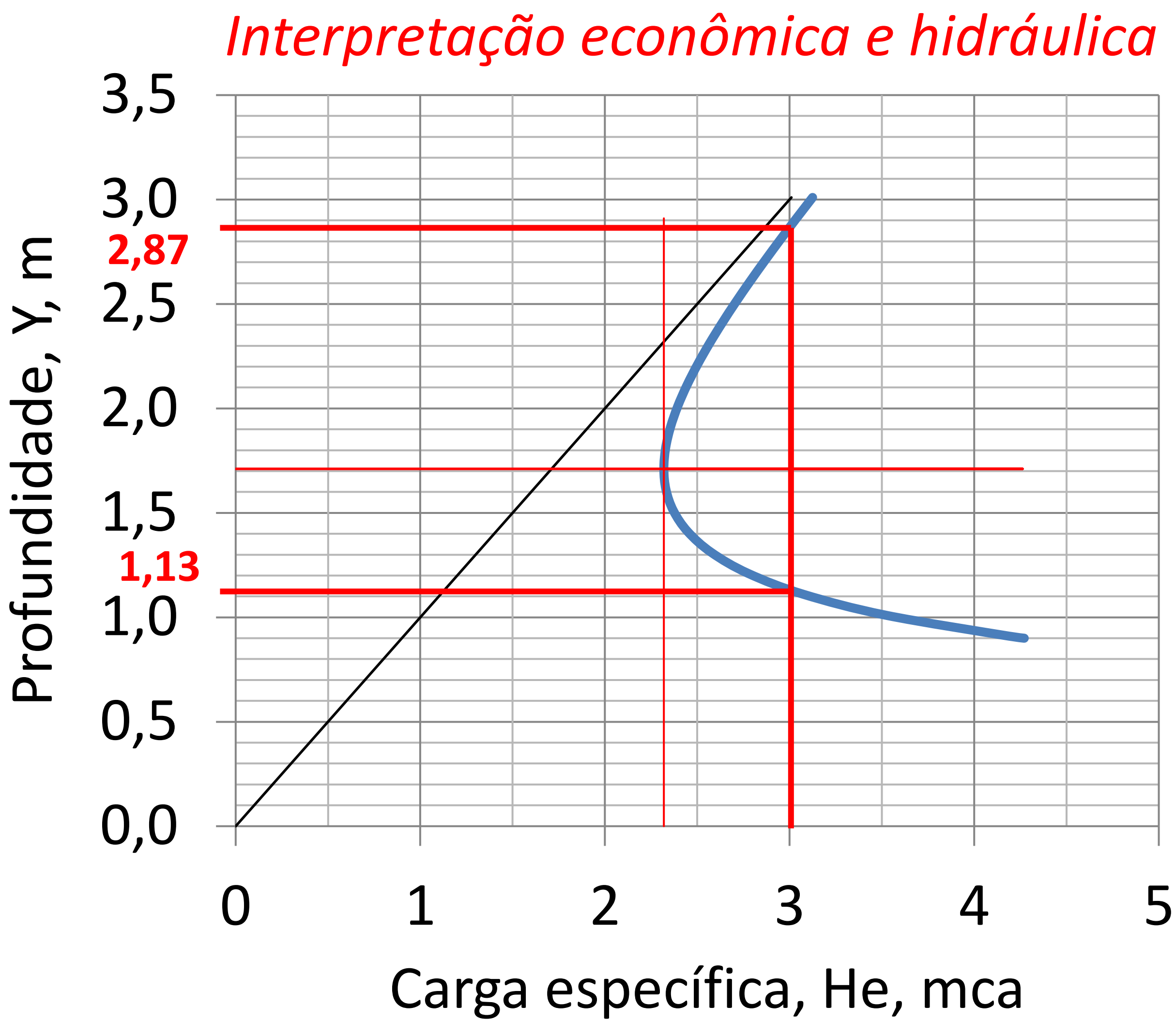


Ok - Valores Atualizados

Yc	**1,72**	**m**	profundidade crítica
B	**11,86**	**m**	base maior da área molhada
Ac	**14,46**	**m2**	área molhada crítica
Hm	**1,22**	**m**	altura hidráulica
Vc	3,46	m/s	Vc =(g*Hm)^0,5 Erro (%) = 2,85E-09
Vc	**3,46**	**m/s**	velocidade crítica

Interpretando o gráfico:





Para instalação de canal com 2,00 km de extensão, Analisemos:

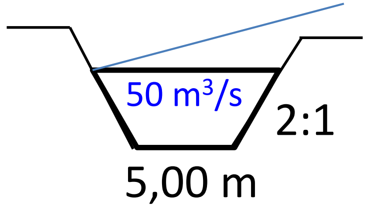
Quais os valores de Y para He = 3,00 mca?

Y1 = 1,13 m

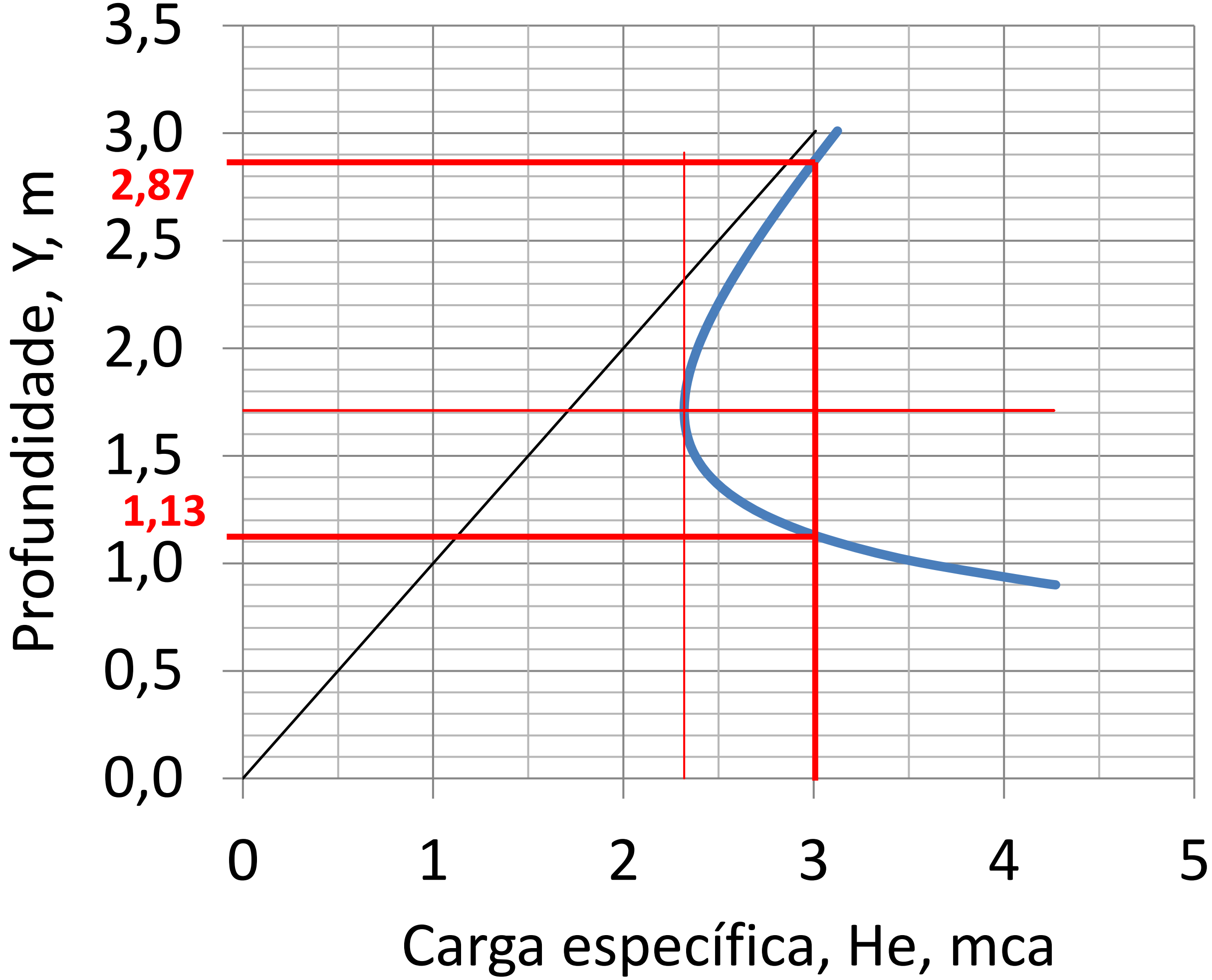
Y 2 = 2,87 m

Agora compare as área transversais!

Interpretando o gráfico:



Interpretação econômica e hidráulica



Para **Y1 = 1,13 m**

$$\mathbf{A = b*h + m*h^2}$$

$$A1 = 5*1{,}13+2*1{,}13^2$$

$$\mathbf{A1 = 8{,}20\ m^2}$$

Para **Y2 = 2,87 m**

$$A2 = 5*2{,}87+2*2{,}87^2$$

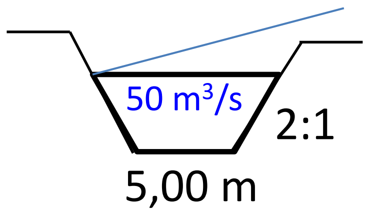
$$\mathbf{A2 = 30{,}82\ m^2}$$

Considerando custos lineares por unidade de área, ***o caso 2 seria 3,76 vezes mais oneroso.***

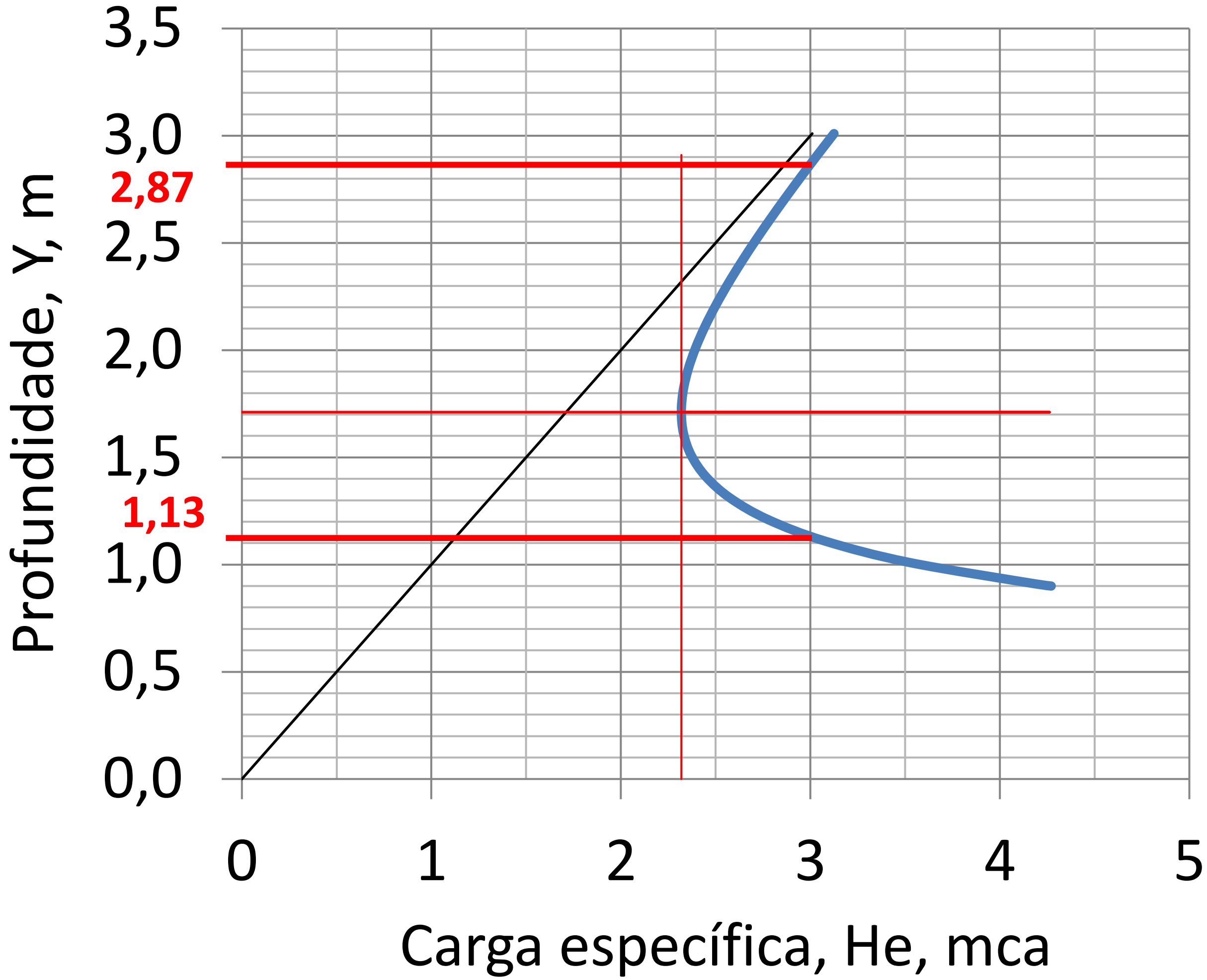
E hidraulicamente?

Tem-se de calcular velocidade e perdas de carga

Interpretando o gráfico:



Interpretação econômica e hidráulica



Para **Y1 = 1,13 m**

V1 = 50,00/8,20

V1 = 6,10 m/s

Para **Y2 = 2,87 m**

V2 = 50,00/30,82

V2 = 1,62 m/s

V1 3,77 vezes maior que V2

E as declividades necessárias?

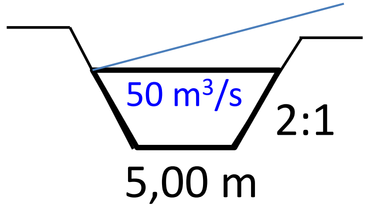
Fórmulas:

$P = b + 2h\sqrt{(1 + m^2)}$

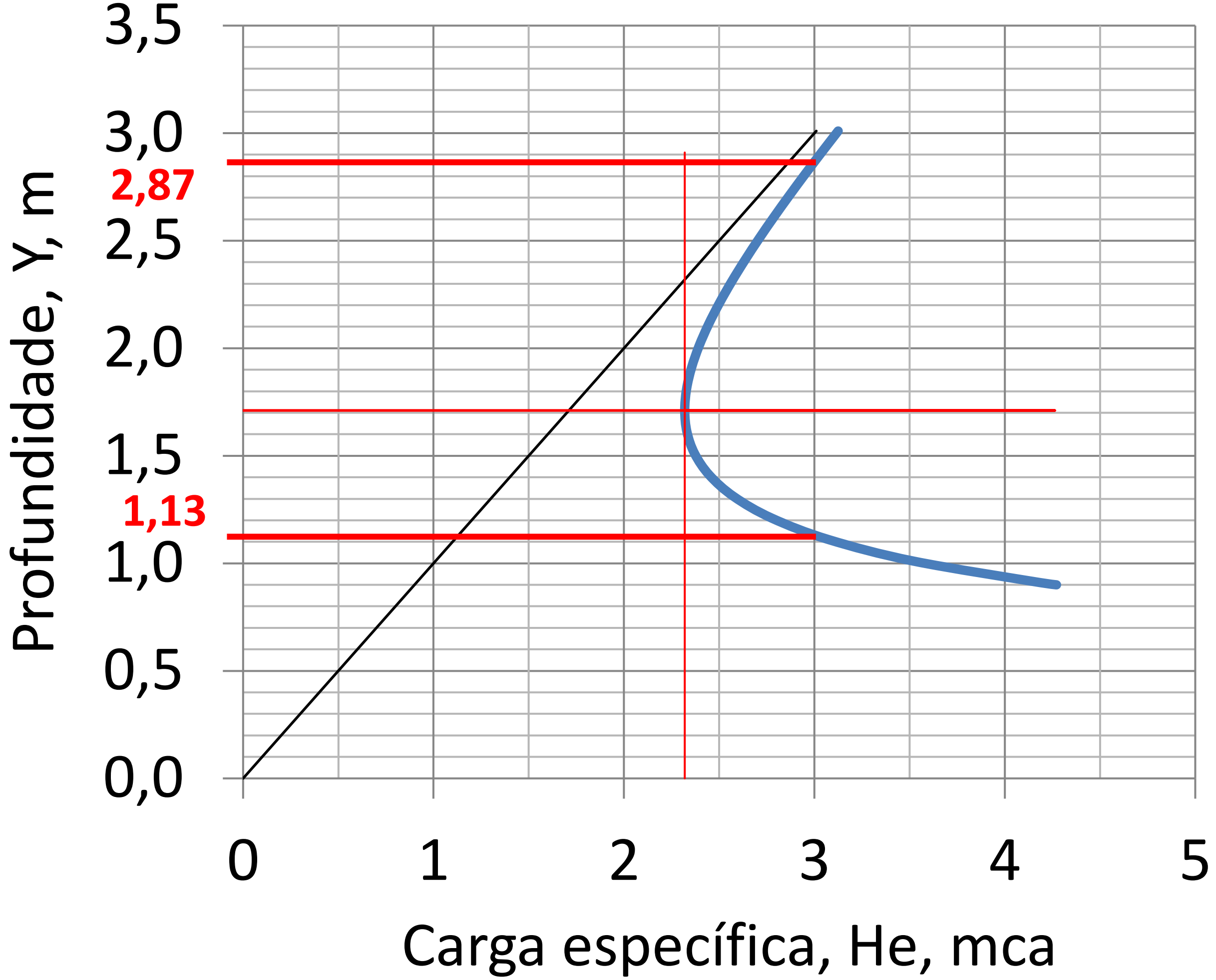
$R_h = A/P$

$i = J = (V*n/R_h^{2/3})^2$

Interpretando o gráfico:



Interpretação econômica e hidráulica



Declividade total, considerando n = 0,012

Para **caso 1**

$P = 5{,}00 + 2*1{,}13\sqrt{(1 + 2^2)}$

$\Rightarrow \mathbf{P = 10{,}05\ m}$

$Rh = 8{,}20/10{,}05 = \mathbf{0{,}82\ m}$

$J = (6{,}10*n/0{,}82^{2/3})^2$ **= 48,48*n²**

Para **caso 2**

$P = 5{,}00 + 2*2{,}87\sqrt{(1 + 2^2)}$

$\Rightarrow \mathbf{P = 17{,}84\ m}$

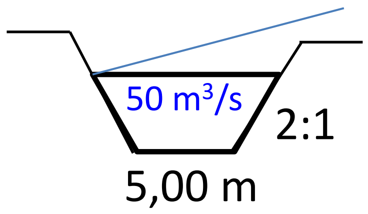
$Rh = 30{,}82/17{,}84$

$\mathbf{Rh = 1{,}73\ m}$

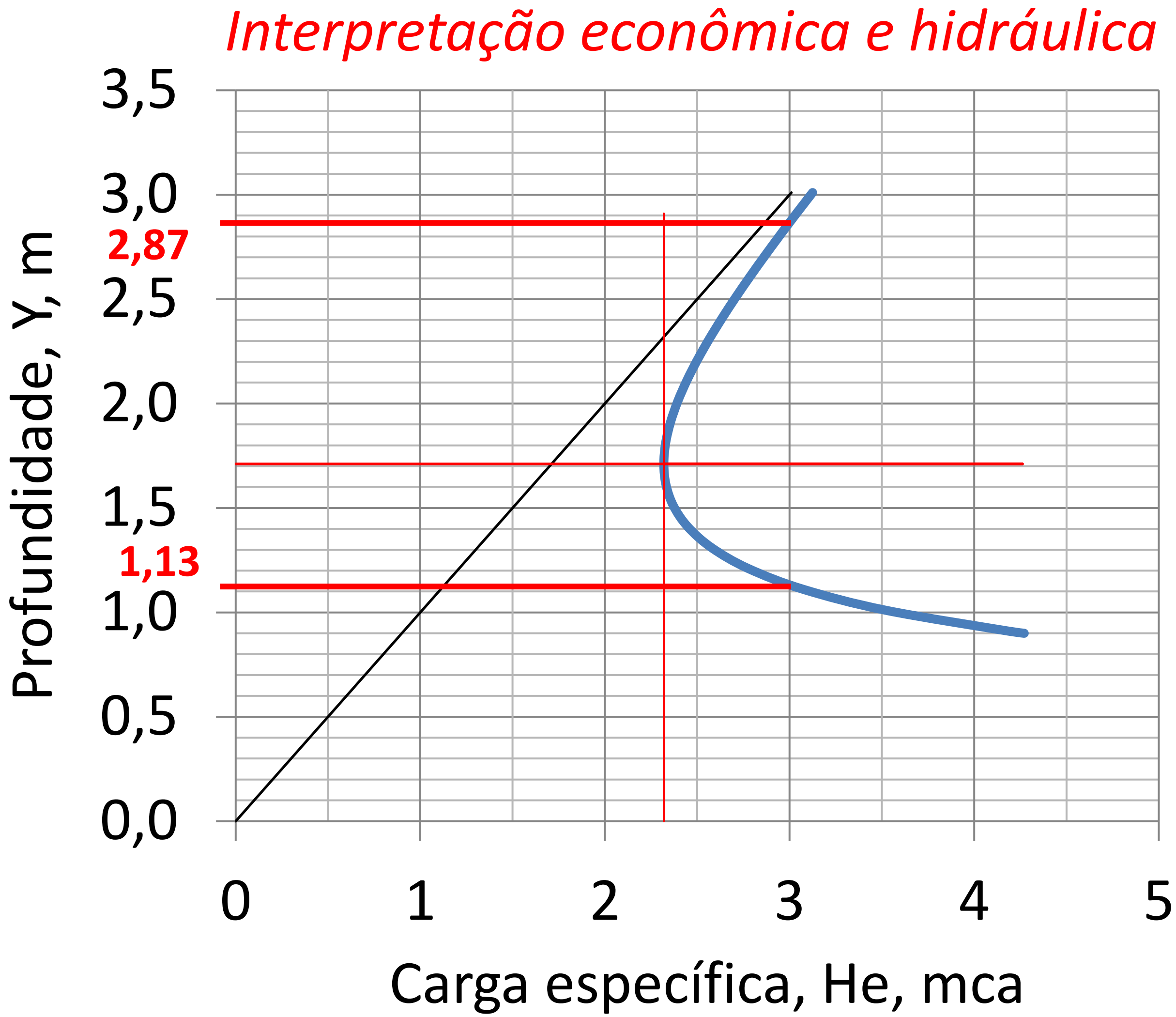
$J = (1{,}62*n/1{,}73^{2/3})^2$ **= 1,26*n²**

Diferença de ≈

39 vezes.



Interpretando o gráfico:



Caso 1

$i = 48{,}48 * 0{,}012^2 = 0{,}00698$ m/m

$\Delta H = 48{,}48 * 0{,}012^2 * 2000$

$\Delta H = \Delta Z = 13{,}69$ m.

Caso 2

$i = 1{,}26 * 0{,}012^2 = 0{,}000181$ m/m

$\Delta H = 1{,}26 * 0{,}012^2 * 2000$

$\Delta H = \Delta Z = 0{,}36$ m.

Conclusão:

Caso 1 é mais barato, porém, demanda maior desnível e taludes resistentes a altas velocidades.

Outra avaliação é a vazão conseguida em determinada profundidade

Variação da vazão em função da profundidade (pg. 381)

- A vazão (Q) pode ser adicionada ao cálculo da carga específica (He) da seguinte forma:

$$\mathrm{He} = \mathrm{Y} + \frac{\mathrm{V}^2}{2\cdot \mathrm{g}}\ ;\ \text{da eq. cont. } \mathrm{Q} = \mathrm{A}\cdot\mathrm{V} \therefore V = \frac{Q}{A},$$

substituindo:

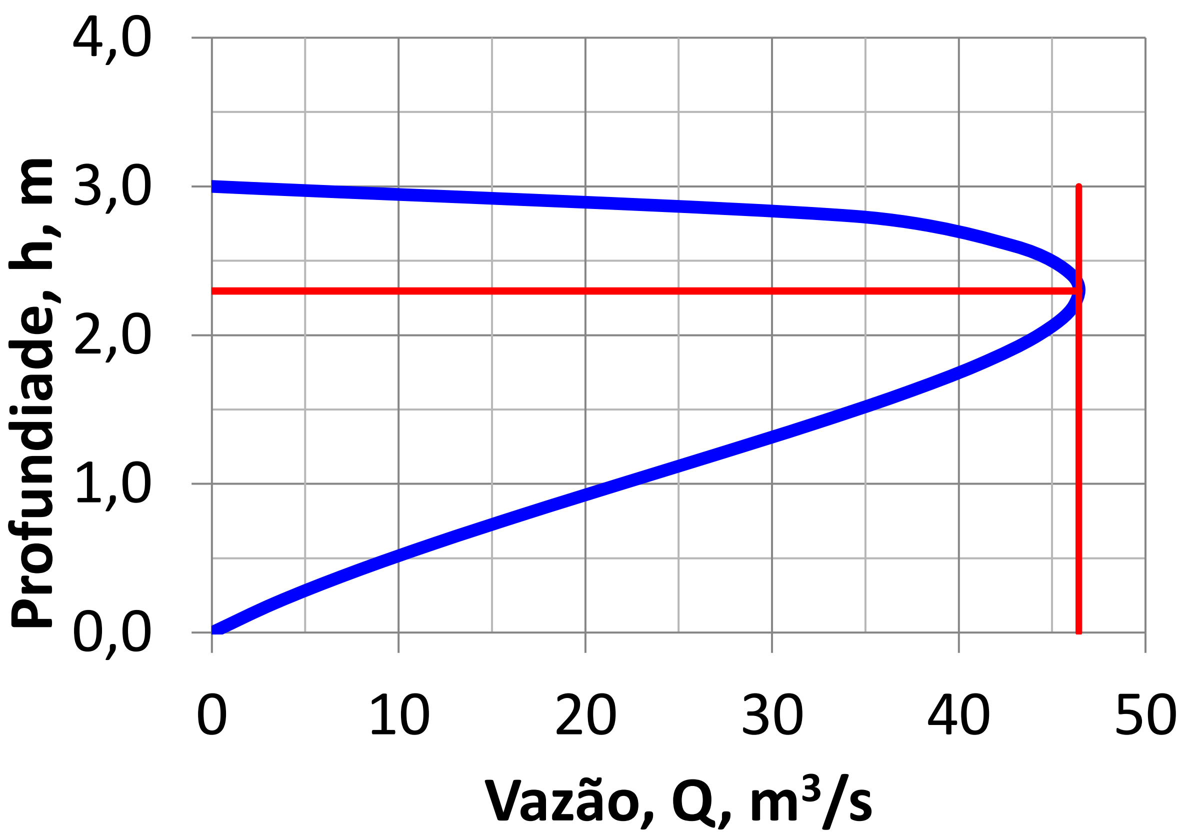
$$\mathrm{He} = \mathrm{Y} + \frac{\mathrm{Q}^2}{2\cdot\mathrm{g}\cdot A^2} \therefore Q^2 = (He - Y)\cdot 2\cdot g\cdot A^2\ ,$$

resulta em:

- $\boldsymbol{Q = A\cdot\sqrt{2\cdot g\cdot (He - Y)}}$ (com Y = h)
- Com esta equação é possível determinar Qmáx. **Ex.:**

Ex.: m = 1,5; He = 3,00 m; b = 2,00 m

h (m)	A (m^2)	Q (m^3/s)
0,00	0,00	0,00
0,20	0,46	3,41
0,40	1,04	7,42
0,60	1,74	11,93
0,80	2,56	16,81
1,00	3,50	21,91
1,20	4,56	27,09
1,40	5,74	32,14
1,60	7,04	36,88
1,80	8,46	41,03
2,00	10,00	44,27
2,20	11,66	46,17
2,40	13,44	46,09
2,60	15,34	42,95
2,80	17,36	34,37
3,00	19,50	0,00
2,30	12,51	46,43



Vazão máxima seria = 46,43 m^3/s com h = 2,30 m.

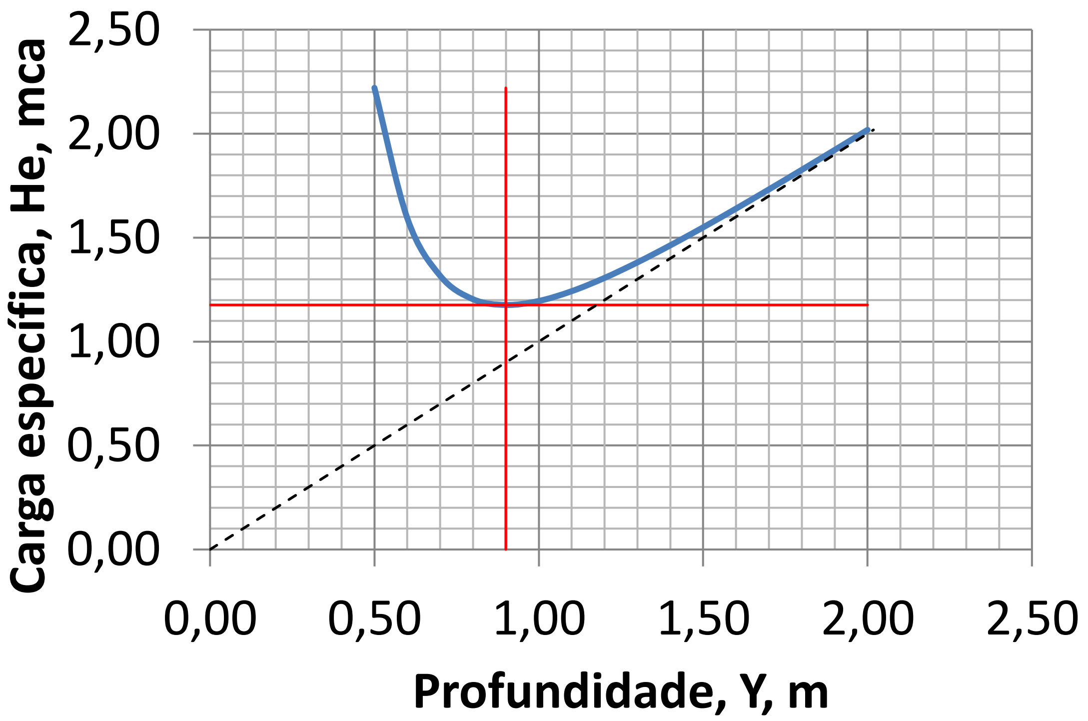
Fazer avaliação para Q = 10 m^3/s.

Variação da He em função de Y

- Neste avaliar-se-á a variação da carga específica (He) com a mudança da "carga hidráulica" (Y) mantendo vazão constante.
- Considere o exemplo: Q = 4,50 m^3/s; m = 1,50; b = 0,80 m.

Yc e He mín ??

Q	4,50	m3/s	
b	0,80	m	
m	1,50	adm.	
h	A	V	He
0,50	0,78	5,81	2,22
0,80	1,60	2,81	1,20
1,10	2,70	1,67	1,24
1,40	4,06	1,11	1,46
1,70	5,70	0,79	1,73
2,00	7,60	0,59	2,02

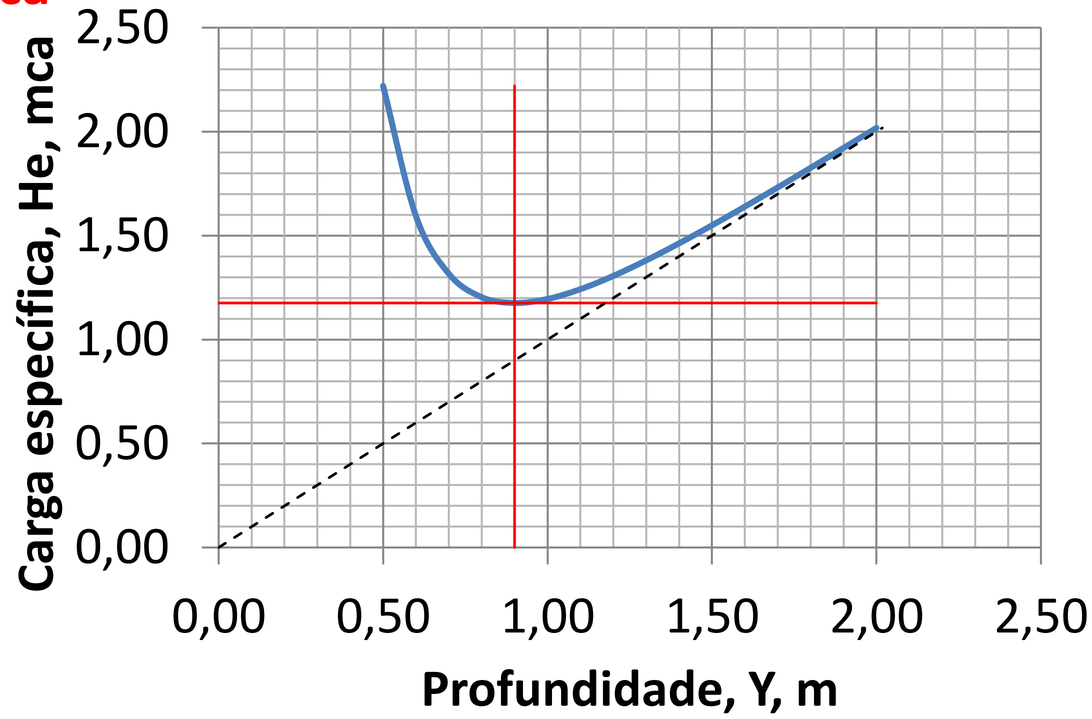


Variação da He em função de Y

- Neste avaliar-se-á a variação da carga específica (He) com a mudança da "carga hidráulica" (Y) mantendo vazão constante.
- Considere o exemplo: Q = 4,50 m^3/s; m = 1,50; b = 0,80 m.

Yc = 0,90 m; He = 1,18 mca

Q	4,50	m3/s	
b	0,80	m	
m	1,50	adm.	
h	A	V	He
0,50	0,78	5,81	2,22
0,80	1,60	2,81	1,20
1,10	2,70	1,67	1,24
1,40	4,06	1,11	1,46
1,70	5,70	0,79	1,73
2,00	7,60	0,59	2,02
0,90	1,93	2,33	1,18



Atividade - Exemplo 14.1 pg. 383

A) Um canal retangular de concreto (n = 0,013) mede 2,00 m de largura e foi projetado para funcionar com uma profundidade útil de 1,00 m. A declividade de fundo é de 0,0005 m/m. Pede-se que determine a vazão e verifique as condições hidráulicas do escoamento (V, He, Yc e declividade crítica).

B) Mantendo a geometria anterior, recalcule os parâmetros para I = 0,004 m/m.

Ressalto hidráulico

O ressalto hidráulico ou salto hidráulico é o fenômeno que ocorre na transição de um escoamento torrencial ou supercrítico para um escoamento fluvial ou subcrítico. O escoamento é caracterizado por uma elevação brusca no nível d'água, sobre uma distância curta, acompanhada de uma instabilidade na superfície com ondulações e entrada de ar do ambiente e por uma conseqüente perda de energia em forma de grande turbulência.

Fonte: Na íntegra de Porto (2006).

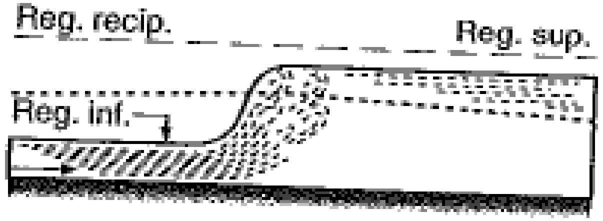


Figura 14.19

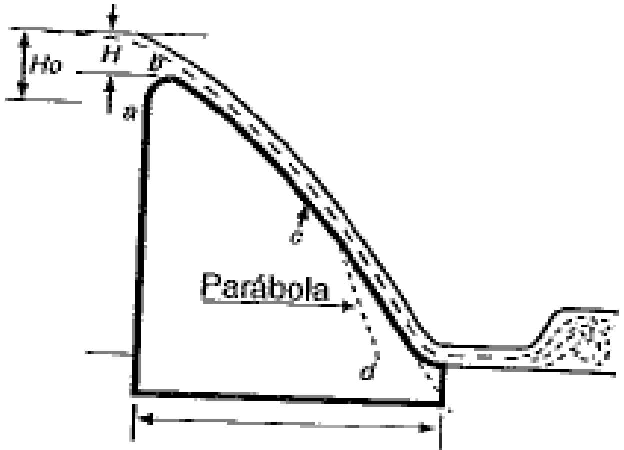


Figura 14.20

Fonte: Na íntegra de Azevedo Netto et al. (1998).

Ressalto hidráulico

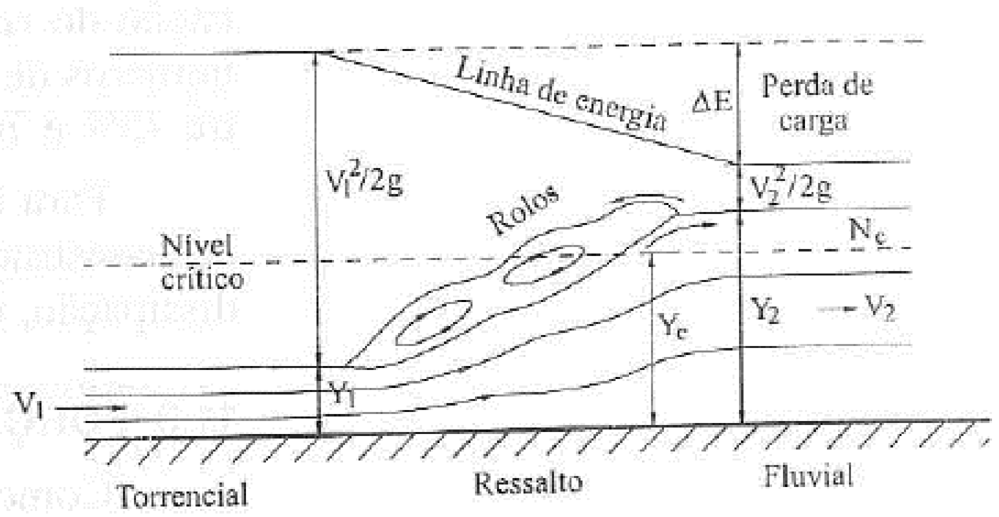


Figura 11.1 Ressalto hidráulico.

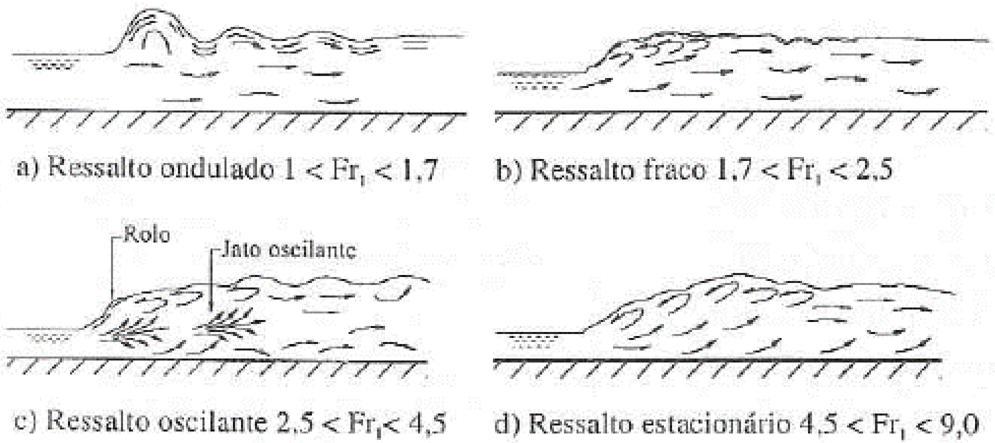


Figura 11.2 Tipos de ressaltos hidráulico em função do número de Froude a montante.

Fr > 9 – o ressalto pode causar danos a estrutura...

Fonte: Na íntegra de Porto (2006).

Ressalto hidráulico

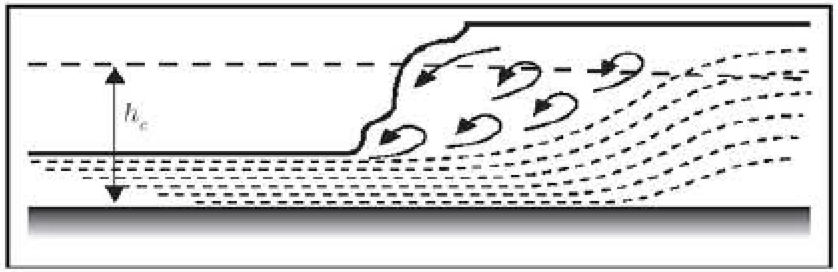


Figura A-14.3.8-c – Salto elevado.

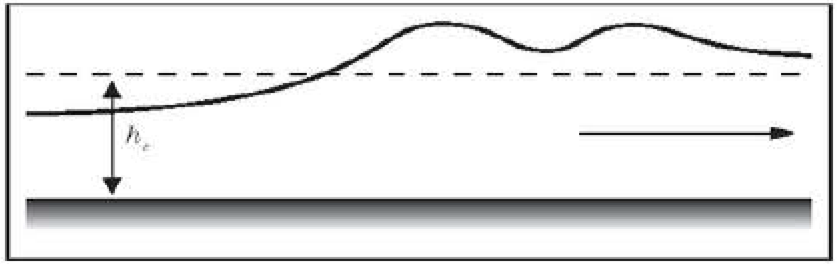


Figura A-14.3.8-d – Salto com superfície agitada.

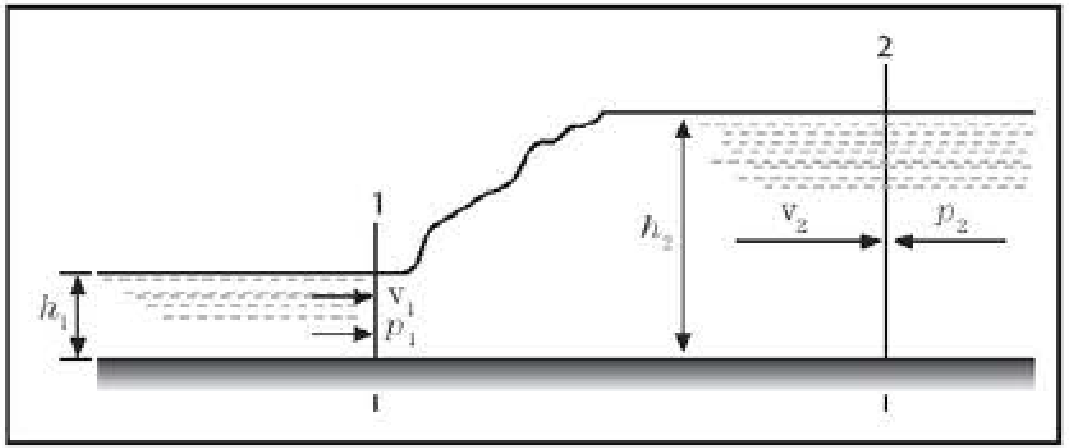


Figura A-14.3.8-e

Perda de carga entre as seções 1 e 2

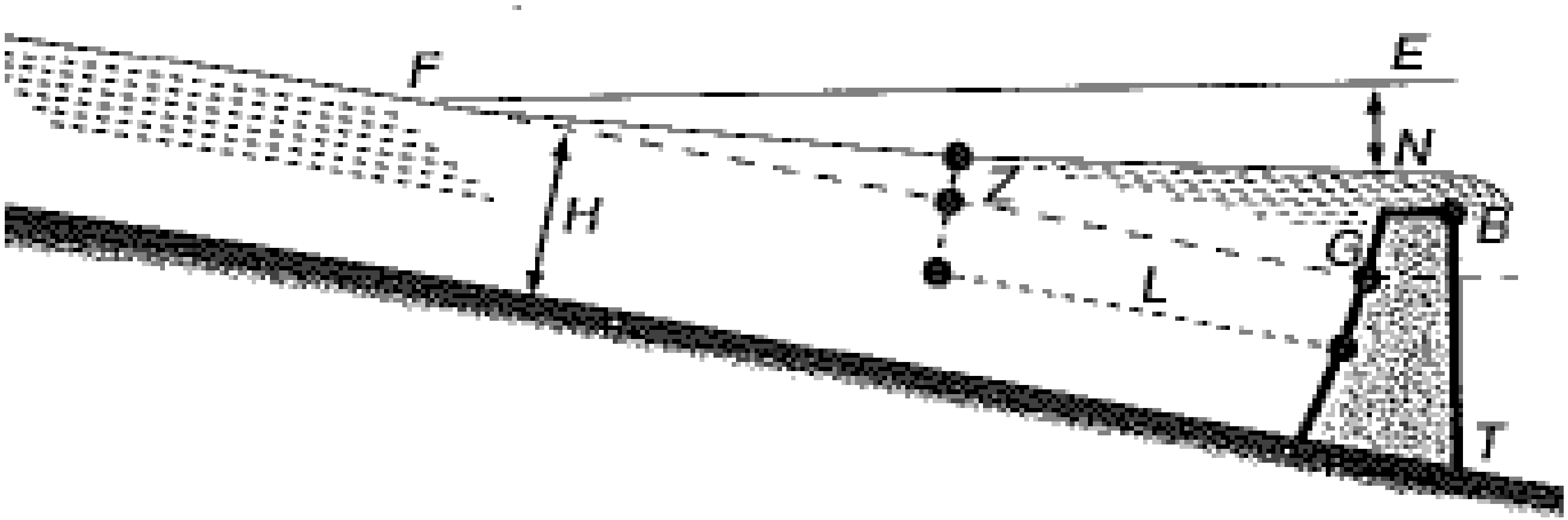
$$\Delta H = \left(\frac{v_1^2}{2 \times g} + h_1\right) - \left(\frac{v_2^2}{2 \times g} + h_2\right)$$

Fonte: Azevedo Netto et al. (2015).

14.16.11 — Remanso

O movimento uniforme em um curso de água caracteriza-se por uma seção de escoamento e declividade constantes.

Tais condições deixam de ser satisfeitas, por exemplo, quando se executa uma barragem em um rio. A barragem causa a sobreelevação das águas, influenciando o nível da água a uma grande distância a montante. É isso que se denomina remanso, remonte ou *remous* (em inglês: hardwater).



Sendo z_0 a sobreelevação NG do ponto N (com relação à linha primitiva ao regime uniforme) e z a sobreelevação de um ponto Z qualquer situado a uma distância L da barragem, a equação desta parábola será

$$z = \frac{(2z_0 - IL)^2}{4z_0}$$

Extraído na íntegra de Azevedo Netto et al. (1998).

Exercício 14.7 – Em um canal retangular com 2,4 m de largura e 0,001 m/m de declividade, o escoamento normal ocorre com uma profundidade de 0,65 com 1,04 m³/s.

Nesse mesmo canal, construiu-se uma pequena barragem de 0,75 m de altura. Determinar o remanso causado.

As águas vertem sobre a barragem, o que dá um vertedor de 2,4 m de soleira; a altura da lâmina de água, neste vertedor, é de 0,4 m para a vazão de 1,04 m³/s (Cap. 6 - seção 6.13). Portanto $NB = 0{,}4$ m. (Fig. 14.24).

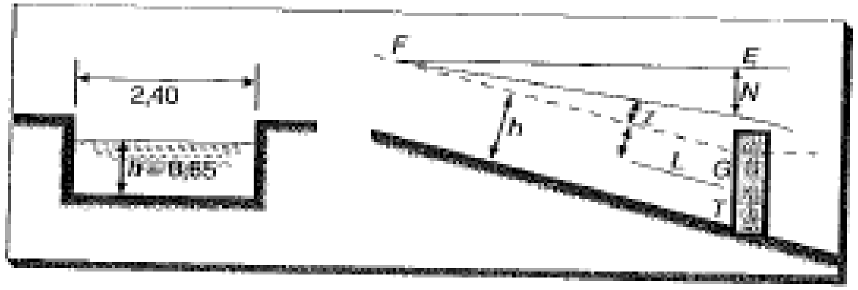


Figura 14.24

A sobrelevação no ponto B é

$$z_0 = TB + NB - h = 0{,}75 + 0{,}4 - 0{,}65 = 0{,}5 \text{ m}$$

Os efeitos de *remous* serão sensíveis até uma distância

$$EF = \frac{2z_0}{I} = \frac{2x0{,}5}{0{,}001} = 1\,000\text{m}$$

A sobrelevação de um ponto qualquer será

$$z = \frac{(2z_0 - IL)^2}{4z_0} = \frac{(2 \cdot 0{,}5 - 0{,}001 \cdot L)^2}{4 \cdot 0{,}5}$$

$$z = \frac{(1 - 0{,}001L)^2}{2}$$

$$2z = (1 - 0{,}001\,L)^2$$

$$\therefore L = 1\,000(1 - \sqrt{2z})$$

Dando valores sucessivos a z, resulta a seguinte tabela:

z, m	$\sqrt{2z}$	$1 - \sqrt{2z}$	L, m
0,40	0,893	0,107	107
0,30	0,776	0,224	224
0,20	0,632	0,368	368
0,10	0,447	0,553	553
0,05	0,316	0,684	683
0,00	0,000	1,000	1000

Extraído na íntegra de
Azevedo Netto et al. (1998).

PROF. SEBASTIÃO COSTA

FIM

AULAS VIRTUAIS