

Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP



HIDROLOGIA E HIDRÁULICA APLICADAS (LOB1216)

Aula 6

Escoamento em condutos livres

Prof. MSc. Paulo Ricardo Amador Mendes

Canais – Conduitos livres –

Canais

Parte superior do líquido está sujeita à pressão atmosférica, o movimento não depende da pressão existente, mas sim da **inclinação do fundo do canal** e da superfície da água.



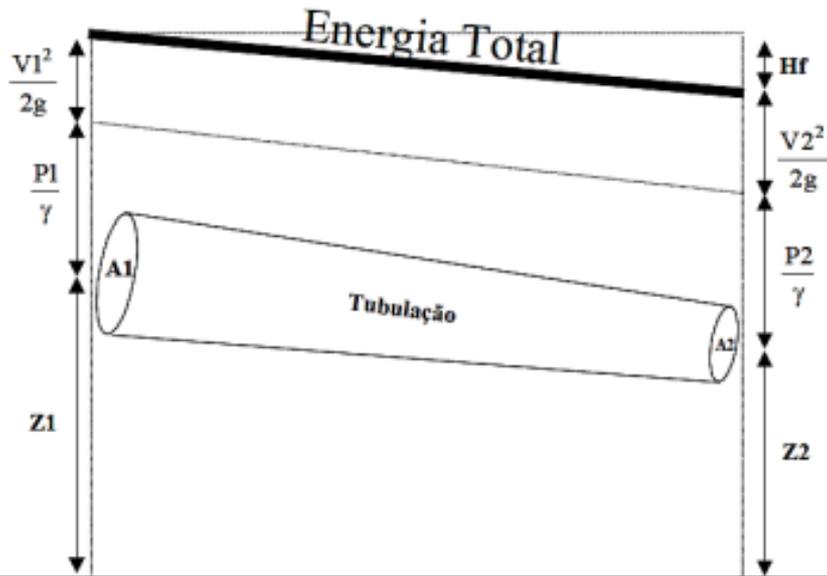
Canais – Condutos livres –

Canais

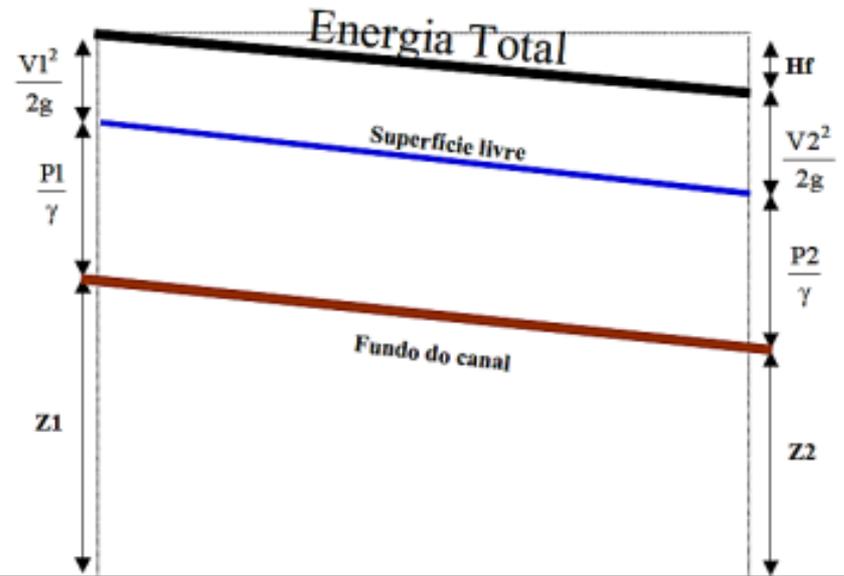
- Cursos de água naturais;
- Canais artificiais de irrigação e drenagem;
- Aquedutos abertos;
- Condutos de esgoto sanitário;
- Canalizações fechadas onde o líquido não enche completamente a seção de escoamento.

Canais – Condutos livres –

Canais



Plano de Referência
Condutos Forçados



Plano de Referência
Condutos livres

Canais – Condutos livres –

Canais

- Definições geométricas e hidráulicas para descrever o fluxo de água ao longo da seção de um canal aberto:

Descarga (Q)

Área de fluxo (A)

Velocidade média (V)

Profundidade do fluxo (y)

Largura do topo (T)

Perímetro molhado (P)

Profundidade hidráulica (D)

Raio hidráulico (R_h)

Declividade do fundo (S_0)

Declividade das margens (m)

Largura do fundo (b)

Volume de água passando por uma seção do fluxo por unidade de tempo

Área de seção transversal do fluxo

Descarga dividida pela área do fluxo: $V = Q/A$

Distância vertical entre o fundo do canal e a superfície livre

Largura da seção do canal na superfície livre

Extensão do contato entre a água e o canal em uma seção transversal

Área de fluxo dividida pela largura do topo: $D = A/T$

Área de fluxo dividida pelo perímetro molhado: $R_h = A/P$

Declividade longitudinal do fundo do canal

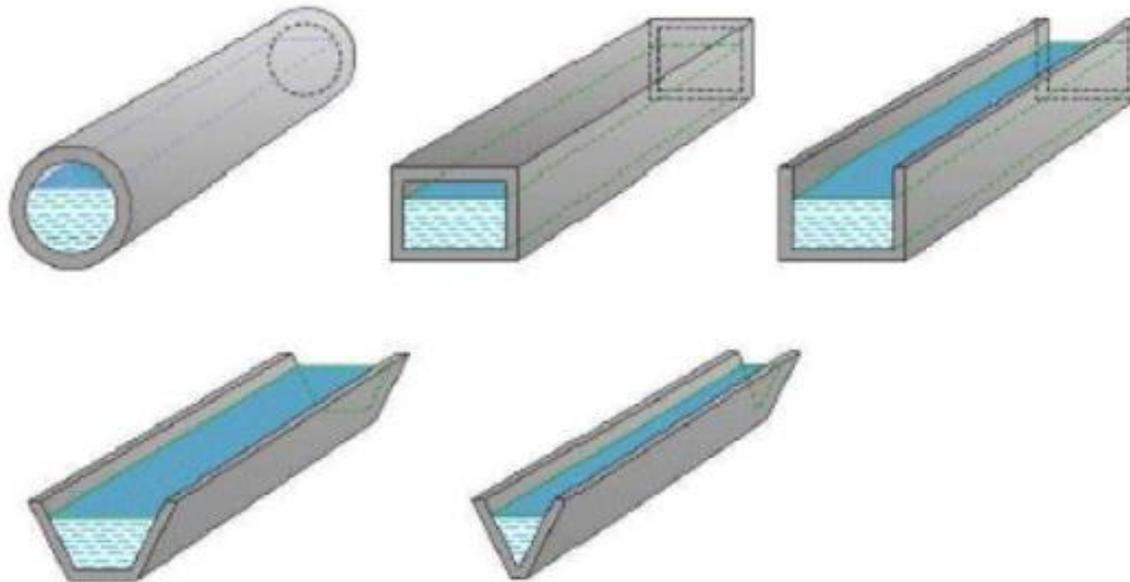
Declividade das margens do canal definida como 1 vertical sobre m horizontal

Largura da seção do canal no fundo

Canais – Conduitos livres –

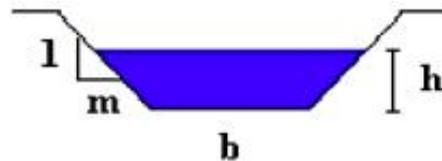
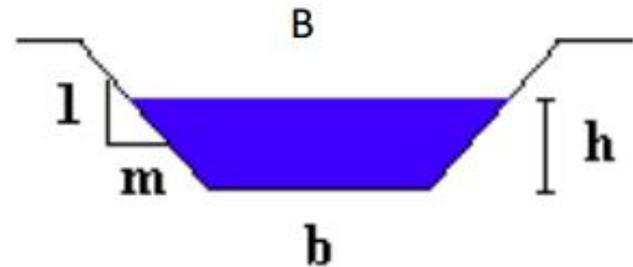
Canais

- Parâmetros geométricos:
 - Conduitos forçados: Seções circulares;
 - Canais: Mais variadas formas.



Elementos geométricos de um canal Trapezoidal

B – largura da superfície livre de água;
b – largura do fundo do canal;
h – altura de água;
Talude do canal – l:m (vert:horiz)



- Seção (área): $A = h(b + m.h)$

- Perímetro: $P = b + 2.h\sqrt{1 + m^2}$

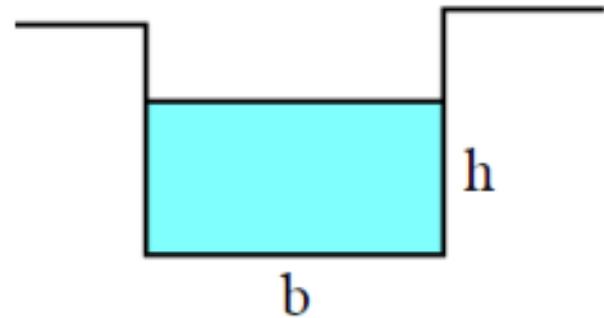
Raio hidráulico: $R = \frac{A}{P}$

Elementos geométricos de um canal Retangular

- Seção (área): $A = b.h$

- Perímetro: $P = b + 2.h$

- Raio hidráulico: $R = \frac{A}{P}$



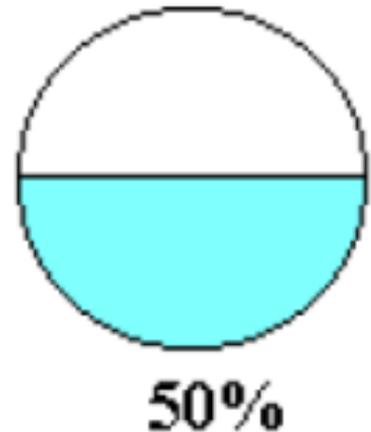
Elementos geométricos de um canal Circular

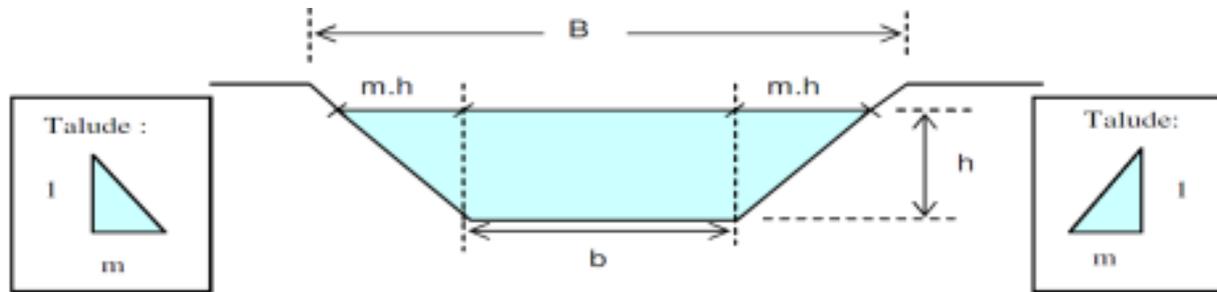
- Largura da superfície:

- Seção (área): $A = \frac{\pi \cdot D^2}{8}$

- Perímetro: $P = \frac{\pi \cdot D}{2}$

- Raio hidráulico: $R = \frac{A}{P} = \frac{D}{4}$

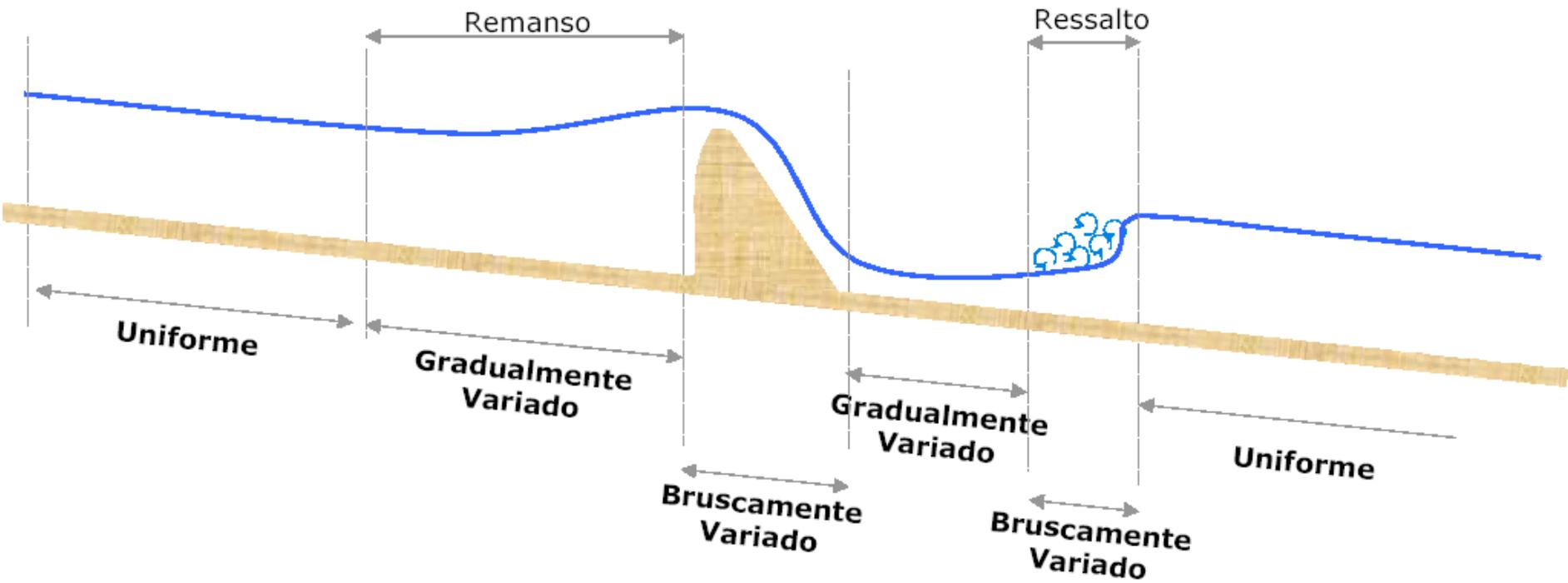




Forma da seção	Área (A) (m ²)	Perímetro molhado (P) (m)	Raio hidráulico (R) (m)	Largura do Topo (B) (m)
	$b.h$	$b + 2.h$	$\left(\frac{A}{P}\right) = \frac{b.h}{b + 2.h}$	b
	$(b + m.h).h$	$b + 2.h.\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{A}{P}$	$b + 2.m.h$
	$m.h^2$	$2.h.\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{A}{P}$	$2.m.h$
	$\frac{1}{8} . (\theta - \text{sen } \theta) . D^2$ $\theta = \text{RAD}$	$\frac{\theta . D}{2}$	$\frac{1}{4} . \left(1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta}\right) . D$	$\left(\text{sen } \frac{\theta}{2}\right) . D$
	$\frac{\pi . D^2}{8}$ $h = D/2$	$\frac{\pi . D}{2}$	$\frac{D}{4} = \frac{h}{2}$	$D = 2.h$

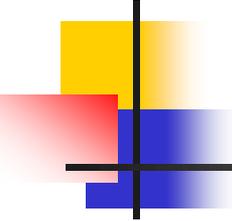
Obs.: $\theta = 2 . \arccos\left(1 - 2 . \frac{h}{D}\right)$, onde θ deve ser calculado em **radianos**.

Classificação dos escoamentos em canais



Canais – Conduitos livres –

Canais

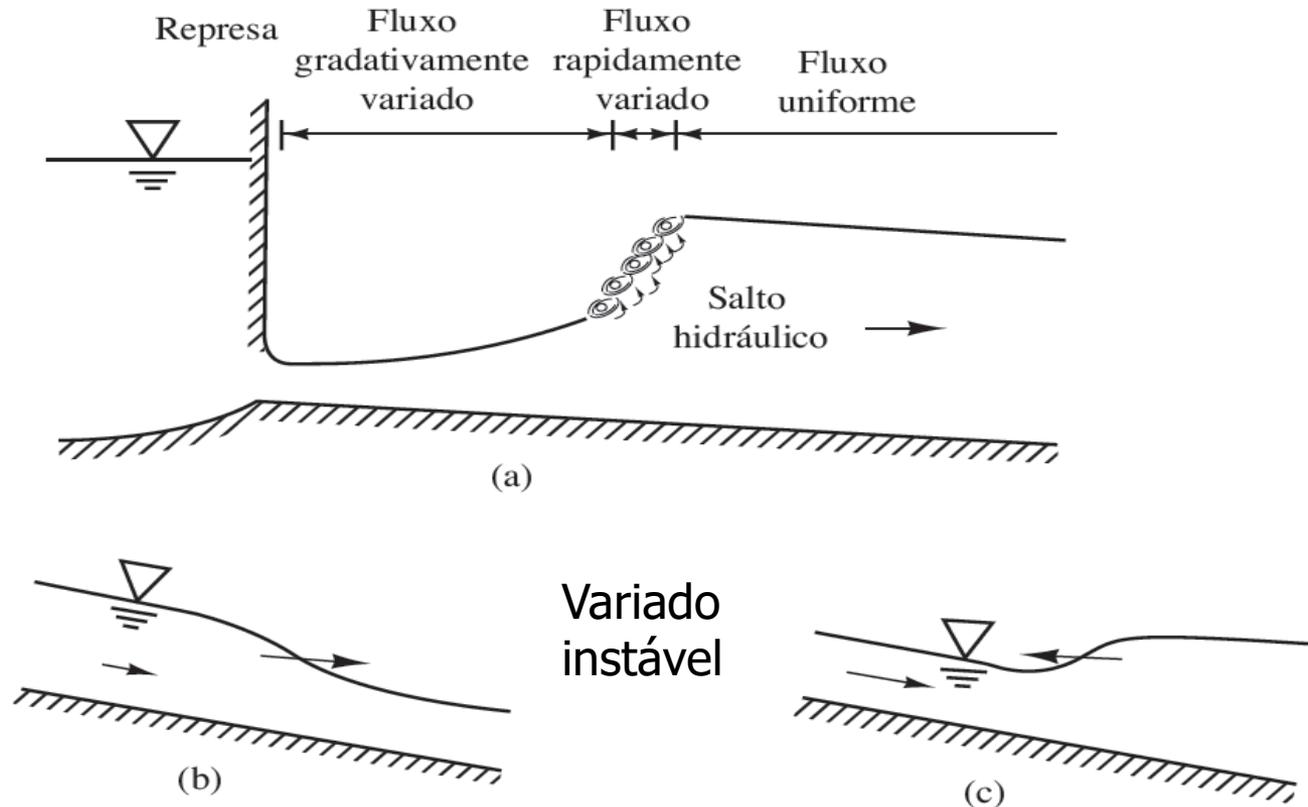


- Com base no critério de espaço, um canal aberto caracteriza *fluxo uniforme e permanente* se a profundidade da água permanecer a mesma ao longo de toda a extensão do canal em determinado tempo.
- Um canal aberto caracteriza *fluxo variado* se a profundidade da água e a descarga se alteram ao longo da extensão do canal.
- No *fluxo estável*, a descarga e a profundidade da água em qualquer seção do percurso não se alteram com o tempo durante o período considerado.

Canais – Condutos livres –

Canais

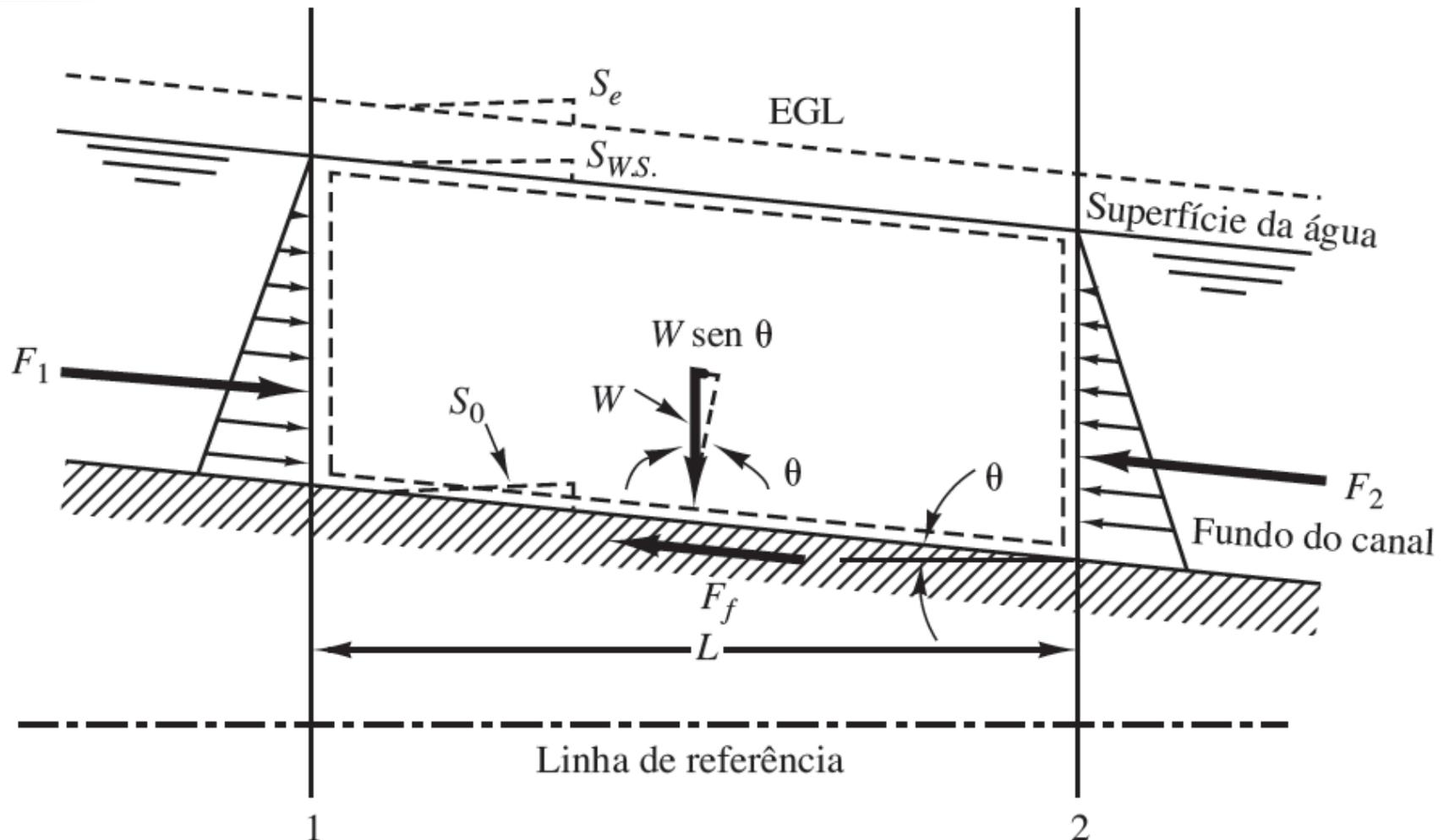
- No *fluxo instável*, a descarga e a profundidade da água em qualquer seção da extensão se alteram com o tempo.



Escoamento uniforme em canais

- Em canais abertos, o fluxo uniforme deve satisfazer as seguintes condições:
 - A profundidade da água, a área do fluxo, a descarga e a velocidade de distribuição devem permanecer as mesmas em todas as seções de toda a extensão do canal.
 - A EGL, a superfície da água e o fundo do canal devem estar paralelos uns aos outros.
- Para um canal aberto uniforme, um diagrama de corpo livre pode ser extraído entre duas seções adjacentes (o volume de controle) para demonstrar o equilíbrio dos componentes de força da gravidade e da resistência (figura a seguir).

Escoamento uniforme em canais



Escoamento uniforme em canais

- As forças atuando sobre o corpo livre na direção do fluxo incluem:
 - as forças de pressão hidrostáticas, F_1 e F_2 , atuando sobre o volume de controle;
 - o peso do corpo de água na extensão, W , que possui um componente, $W \sin \theta$, na direção do fluxo e
 - a força de resistência, F_f , exercida pelo canal (fundo e margens) no fluxo.
- O somatório de todos esses componentes de força na direção do canal resulta em $F_1 + W \sin \theta - F_2 - F_f = 0$

Escoamento uniforme em canais

- O componente de força da gravidade pode, então, ser escrito como

$$W \sen \theta = \gamma AL S_0$$

- A força de resistência total pode ser escrita como

$$F_f = \tau_0 PL = KV^2 PL$$

- Para fluxo uniforme, $S_0 = S_e$

$$V = C \sqrt{R_h S_e}$$

- Essa equação é conhecida como *fórmula de Chezy* para fluxos em canais abertos.

Escoamento uniforme em canais

- Manning derivou a seguinte relação empírica: $C = \frac{1}{n} R_h^{1/6}$
- Substituindo essa equação na equação anterior, temos a equação de Manning: $V = \frac{k_M}{n} R_h^{2/3} S_e^{1/2}$
- Em termos da descarga (Q) e da área do fluxo (A), a equação é escrita como $Q = AV = \frac{k_M}{n} AR_h^{2/3} S_e^{1/2}$
- Definindo $k_M = 1$ no sistema internacional de unidades, as equações se tornam $V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_e^{1/2}$ e $Q = AV = \frac{1}{n} AR_h^{2/3} S_e^{1/2}$



Escoamento uniforme em canais

Tabela - Coeficiente de Manning.

Natureza da parede	Conservação			
	Excelente	Bom	Regular	Ruim
Canal revestido com concreto	0,012	0,014	0,016	0,018
Canal não revestido escavado em terra, reto e uniforme	0,017	0,020	0,023	0,025

Geanini Peres (1996)

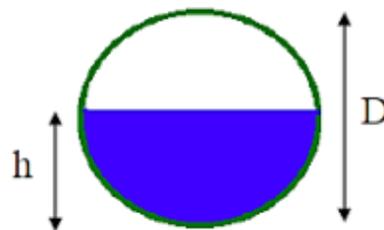
Escoamento uniforme em canais

A fórmula de Manning também é bastante utilizada para o dimensionamento de drenos e bueiros. Neste caso utiliza-se a equação abaixo.

$$D = \left(\frac{Q \cdot n}{k \cdot i^{1/2}} \right)^{0,375}$$

Tabela - Valores de K.

h/D	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	1,0
K	0,156	0,209	0,260	0,304	0,331	0,334	0,311



Escoamento uniforme em canais

- Definindo $k_M = 1,49$ no sistema britânico, a equação de Manning é escrita como
$$V = \frac{1,49}{n} R_h^{2/3} S_e^{1/2} \quad \text{ou} \quad Q = \frac{1,49}{n} A R_h^{2/3} S_e^{1/2}$$
- O cálculo do fluxo uniforme envolve basicamente:
 1. coeficiente de rugosidade (n);
 2. declividade do canal (S_0) (pois $S_0 = S_e$ no fluxo uniforme);
 3. geometria do canal: área de água (A);
 4. raio hidráulico (R_h);
 5. profundidade normal (y_n);
 6. descarga normal (Q) e
 7. velocidade média (V).

Eficiência hidráulica de seções de canais abertos



- Entre todas as formas de canais abertos, o semicírculo possui o menor perímetro para uma determinada área e, portanto, é o mais eficiente hidraulicamente de todas as seções.
- Na prática, seções semicirculares somente são utilizadas quando tubos são apropriados ou em canais artificiais de materiais pré-fabricados.
- Para canais longos, as seções trapezoidais são as mais comumente utilizadas.

Eficiência hidráulica de seções de canais abertos



- Outra seção comumente utilizada é a retangular.
- A seção retangular mais eficiente é o meio quadrado.
- O conceito de seções hidraulicamente eficientes somente é válido quando o canal estiver alinhado com materiais estabilizados e não erodíveis.
- Idealmente, um canal deve ser projetado visando à melhor eficiência hidráulica, mas deve ser modificado para fins de viabilidade e custos de construção.

Princípios de energia em canais abertos

- A altura de energia total em qualquer seção de um canal aberto é geralmente expressa como

$$H = \frac{V^2}{2g} + y + z$$

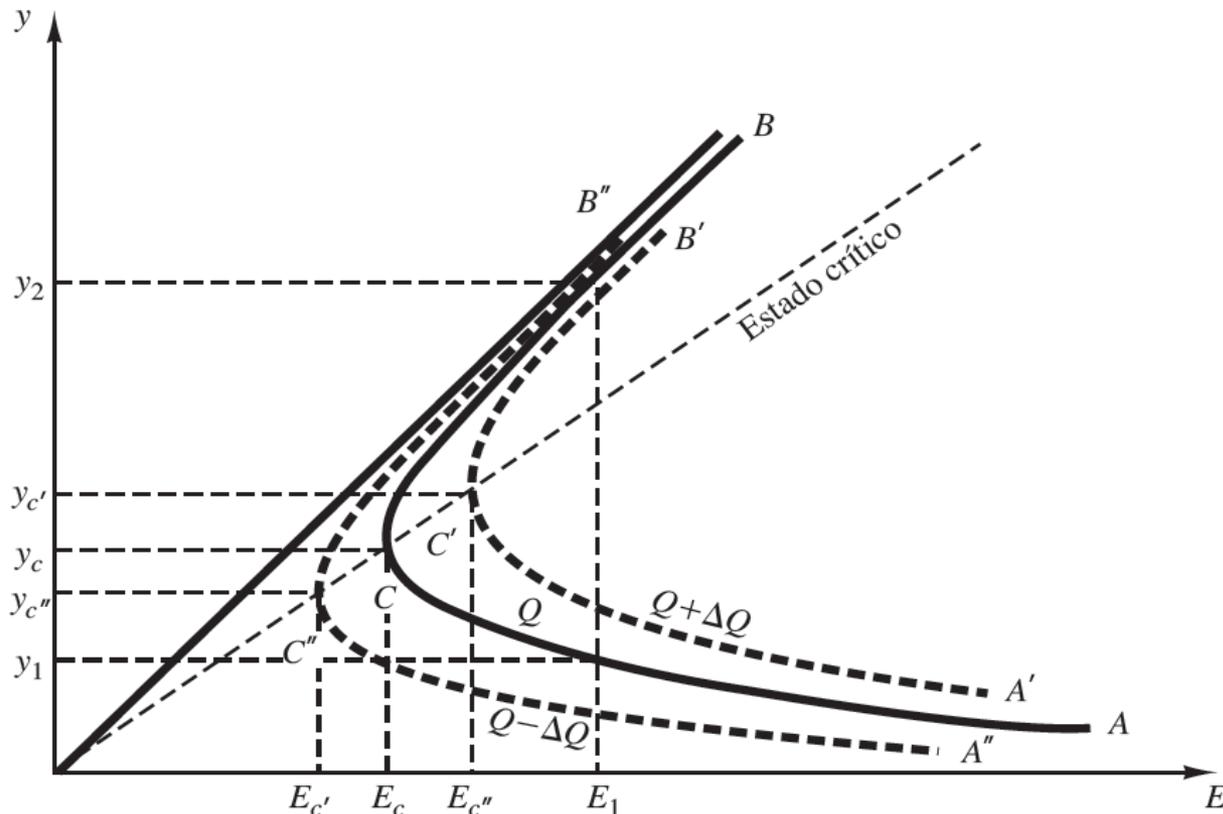
- A energia específica em qualquer seção é $E = \frac{V^2}{2g} + y$

- Dadas a área de água (A) e a descarga (Q) em uma seção em particular, a equação acima pode ser reescrita como

$$E = \frac{Q^2}{2gA^2} + y$$

Princípios de energia em canais abertos

Curvas de energia específica de diferentes descargas em uma determinada seção de canal.



Princípios de energia em canais abertos

- No estado crítico, a energia específica do fluxo assume um valor mínimo.
- Esse valor pode ser calculado equacionando-se a primeira derivada da energia específica com relação à profundidade da água igual a zero:

$$\frac{dE}{dy} = \frac{d}{dy} \left(\frac{Q^2}{2gA^2} + y \right) = -\frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dy} + 1 = 0$$

- Profundidade crítica ($y = y_c$):

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

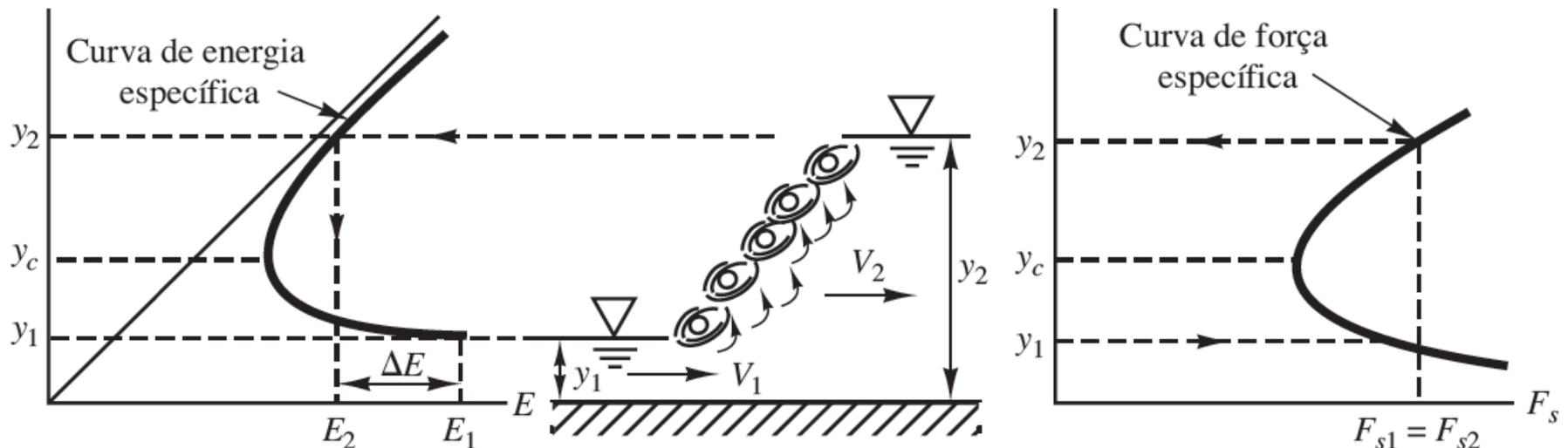


Ressaltos hidráulicos

- Saltos hidráulicos podem ocorrer naturalmente em canais abertos, mas são mais comuns em estruturas construídas, tais como bacias de dissipação de energia (ou ressaltos hidráulicos).
- Eles são resultado de uma redução abrupta na velocidade do fluxo causada por um aumento repentino na profundidade da água na direção do fluxo.
- Os saltos hidráulicos convertem um fluxo supercrítico de alta velocidade (contrária ao fluxo) em um fluxo subcrítico de baixa velocidade (no sentido do fluxo).

Ressaltos hidráulicos

- De modo análogo, uma profundidade supercrítica de baixo estágio (y_1) transforma-se em uma profundidade subcrítica de alto estágio (y_2); elas são conhecidas, respectivamente, como profundidade inicial e profundidade sequente do ressalto hidráulico (figura abaixo).





Ressaltos hidráulicos

- O equilíbrio entre as forças hidrostáticas e o fluxo do momento ao longo das seções 1 e 2, por unidade de largura do canal, pode ser escrito como $F_1 - F_2 = \rho q(V_2 - V_1)$

- Substituindo as quantidades a seguir na equação acima e simplificando, obtemos

$$\frac{q^2}{g} = y_1 y_2 \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right) \quad F_1 = \frac{\gamma}{2} y_1^2, \quad F_2 = \frac{\gamma}{2} y_2^2, \quad V_1 = \frac{q}{y_1}, \quad V_2 = \frac{q}{y_2}$$

- Essa equação pode ser reorganizada em uma forma mais conveniente, conforme se vê a seguir:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8N_{F_1}^2} - 1 \right)$$

- onde N_{F_1} é o número de

Froude do fluxo que se aproxima: $N_{F_1} = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}$

Tipos de fluxos em canais abertos

Número de Freud

$$Fr = V / \sqrt{gy}$$

Número adimensional que representa a razão entre a velocidade característica e a velocidade de onda gravitacional. Taxa da força de inercia para a força gravitacional do fluido em movimento.

Regime torrencial	(supercrítico $Fr > 1$)
Regime crítico	($Fr = 1$)
Regime fluvial	(subcrítico < 1)



Fluxo gradualmente variado

- No fluxo gradualmente variado, as alterações de velocidade acontecem gradativamente com a distância, de modo que os efeitos da aceleração no fluxo entre duas seções adjacentes são desprezíveis.
- Perfil de superfície ao longo da altura (seções retangulares):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 \left[1 - \left(\frac{y_n}{y} \right)^{10/3} \right]}{\left[1 - \left(\frac{y_c}{y} \right)^3 \right]}$$



Fluxo gradualmente variado

- No fluxo gradualmente variado, as alterações de velocidade acontecem gradativamente com a distância, de modo que os efeitos da aceleração no fluxo entre duas seções adjacentes são desprezíveis.
- Perfil de superfície ao longo da altura (seções não retangulares):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 \left[1 - \left(\frac{y_n}{y} \right)^N \right]}{\left[1 - \left(\frac{y_c}{y} \right)^M \right]}$$

Classificações de fluxos gradualmente variados



- Dependendo da declividade, geometria, rugosidade e descarga, os canais abertos podem ser classificados em cinco categorias:
 1. canais acentuados;
 2. canais críticos;
 3. canais medianos;
 4. canais horizontais;
 5. canais adversos.

Classificações de fluxos gradualmente variados

Os critérios são os seguintes:

- Canais acentuados: $y_n/y_c < 1,0$ ou $y_n < y_c$
- Canais críticos: $y_n/y_c = 1,0$ ou $y_n = y_c$
- Canais medianos: $y_n/y_c > 1,0$ ou $y_n > y_c$
- Canais horizontais: $S_0 = 0$
- Canais adversos: $S_0 < 0$

Se tanto y/y_c como y/y_n forem maiores do que 1, então a curva do perfil da superfície da água está acima tanto da linha da profundidade crítica quanto da linha da profundidade normal no canal, conforme mostra a figura a seguir.

Projeto hidráulico de canais abertos



Os canais abertos costumam ser projetados para fluxo uniforme ou condições normais e, portanto, equações de fluxo uniforme são usadas na definição da extensão desses canais.

O projeto envolve a escolha do alinhamento, da extensão e da forma do canal, bem como da declividade longitudinal e do tipo de material para revestimento.

Em geral, consideramos diversas alternativas hidráulicas viáveis e as comparamos para definir a alternativa mais eficiente em termos de custo.

Considerações importantes para o projeto de canais

a) Declividade de canais:

Vazão (m ³ /s)	Declividade (%)	Porte
> 10	0,01 a 0,03	Grande
3 a 10	0,025 a 0,05	Mediano
0,1 a 3	0,05 a 0,1	Pequeno
< 0,1	0,1 a 0,4	Muito pequeno

Considerações importantes para o projeto de canais

b) Inclinação dos Taludes (valores de m):

Material das paredes	Canais pouco profundos ($h < 1 \text{ m}$)	Canais profundos ($h > 1 \text{ m}$)
Rochas em boas condições	0	0,25
Argilas Compactas	0,5	1,0 ou 0,75
Limo Argiloso	1,0	1,0 ou 1,50
Limo Arenoso	1,5	2,0
Areias Soltas	2,0	3,0

Considerações importantes para o projeto de canais

c) Limites de velocidade:

Material	Velocidade máxima (m/s)
Terreno Arenoso Comum	0,76
Terreno de Aluvião	0,91
Terreno Argila Compacta	1,14
Cascalho grosso , Pedregulho, Piçarra	1,83
Alvenaria	3,00
Concreto	6,00



Canais não revestidos

O principal critério para o projeto de canais de terra é que ele não sofra erosão sob as condições de fluxo planejadas.

Existem duas abordagens para o projeto de canais erodíveis:

o método da velocidade máxima permitida e
o método da força de tração.

O método da velocidade máxima permitida baseia-se na premissa de que um canal não sofrerá erosão se a velocidade média na seção transversal não exceder a velocidade máxima permitida.



Canais não revestidos

Sugestão de velocidades máximas permitidas em canais.

Material do canal	$V_{\text{máx}}$ (pés/s)	$V_{\text{máx}}$ (m/s)
Areia e cascalho		
Areia fina	2	0,6
Areia grossa	4	1,2
Cascalho fino ^a	6	1,8
Terra		
Silte arenoso	2	0,6
Argila e silte	3,5	1
Argila	6	1,8



Canais não revestidos

Em um problema típico de projeto de canal, seriam fornecidos o material do canal, a declividade do fundo (S_0) e a descarga planejada (Q).

O procedimento para medir a seção do canal seria composto pelas seguintes etapas:

Canais com limites rígidos

Considera-se que os canais revestidos com materiais como concreto, concreto asfáltico, solo em cimento e enrocamento de cimento possuem limites rígidos.

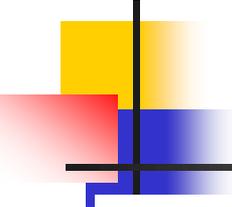


Canais com limites rígidos

Esses canais não são erodíveis em razão da resistência ao cisalhamento do material do revestimento.

Em geral, não existe qualquer restrição de projeto com relação à velocidade máxima.

Logo, o melhor conceito com relação à seção hidráulica é usar extensões de canais com limites rígidos.



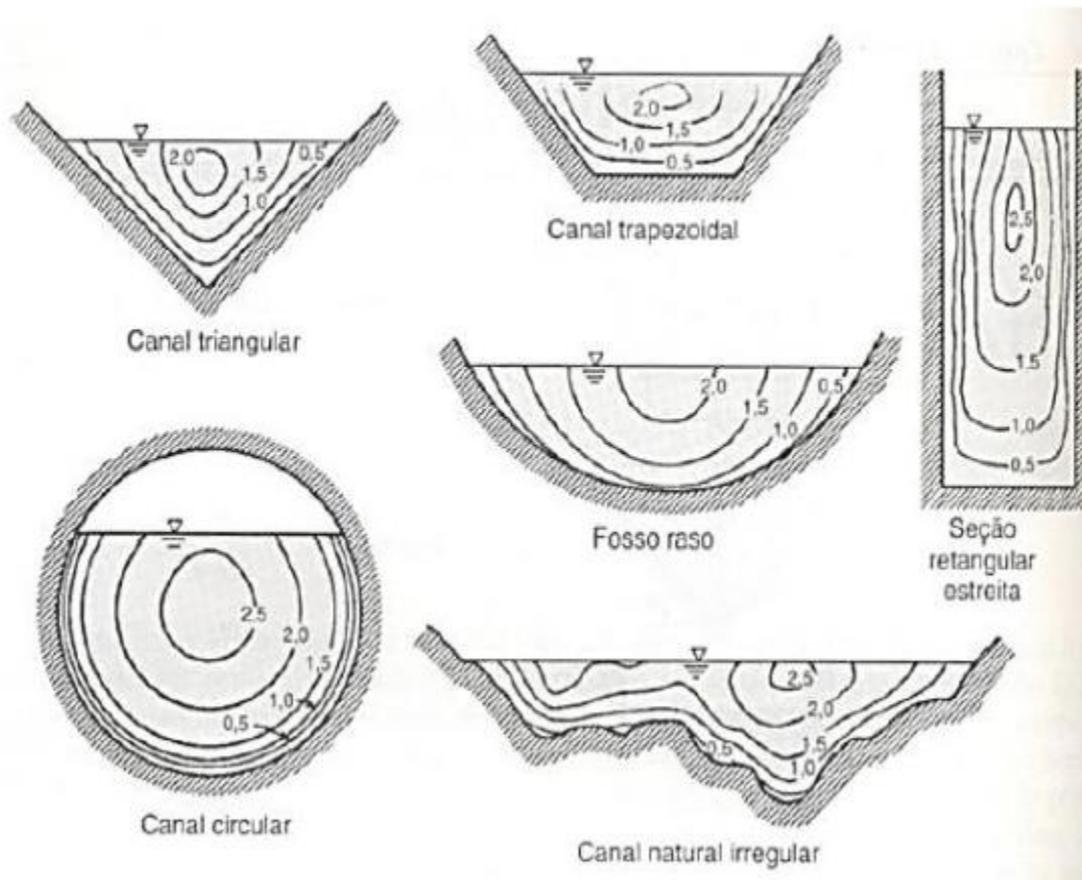
Velocidade média de canais

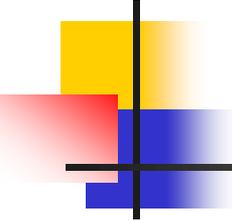
A velocidade adotada será um **valor médio**, pois, na área molhada, a *velocidade varia com a posição* e com a *profundidade* considerada. Esta velocidade é a usada nos cálculos e é calculada como a média das velocidades à profundidades 0,20y e 0,80y, ou seja, igual a velocidade e à profundidade 0,6y. Mais precisamente, ela é definida por:

$$v_M = \frac{v_{0,2} + v_{0,8} + 2v_{0,6}}{4}$$

Velocidade média de canais

Exemplos de curvas isotáquitas (linhas que possuem pontos de iguais velocidades):





Exercícios

1- Determinar a velocidade de escoamento e a vazão de um canal trapezoidal com as seguintes características: inclinação do talude – 1:1,5; declividade do canal 0,00067 m/m, largura do fundo = 3,5 m e profundidade de escoamento = 1,2 m. Considera um canal com paredes de terra, reto e uniforme

Resposta: $Q = 7,15 \text{ m}^3/\text{s}$ $V = 1,13 \text{ m/s}$

2- Determinar a declividade “I” que deve ser dada a um canal retangular para atender as seguintes condições de projeto: $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$; $h = 0,8 \text{ m}$; $b = 2 \text{ m}$ e paredes revestidas com concreto em bom estado ($n = 0,014$).

Resposta: $I = 0,0009 \text{ m/m}$

3. Dimensionar dreno subterrâneo, supondo $Q = 0,73 \text{ L/s}$, $i = 0,002 \text{ m/m}$, tubo de PVC corrugado – $n = 0,016$ e $h/D = 0,6$.

Resposta: 81,5 mm, diâmetro comercial mais próximo = 4”



Bibliografia

- CHAVEZ, J.D.R. **Escoamento – Canais, Fórmulas Empíricas, perda de carga.** Apostila da Disciplina LOB1216 – Hidrologia e Hidráulica Aplicadas. Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. Departamento de Ciências Básicas e Ambientais. Lorena, 2016.
- HOUGHTALEN, R.J.; HWANG, N.H.C.; AKAN, A.O. **Engenharia Hidráulica**, 4^a ed. Tradução: Luciana Teixeira. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.