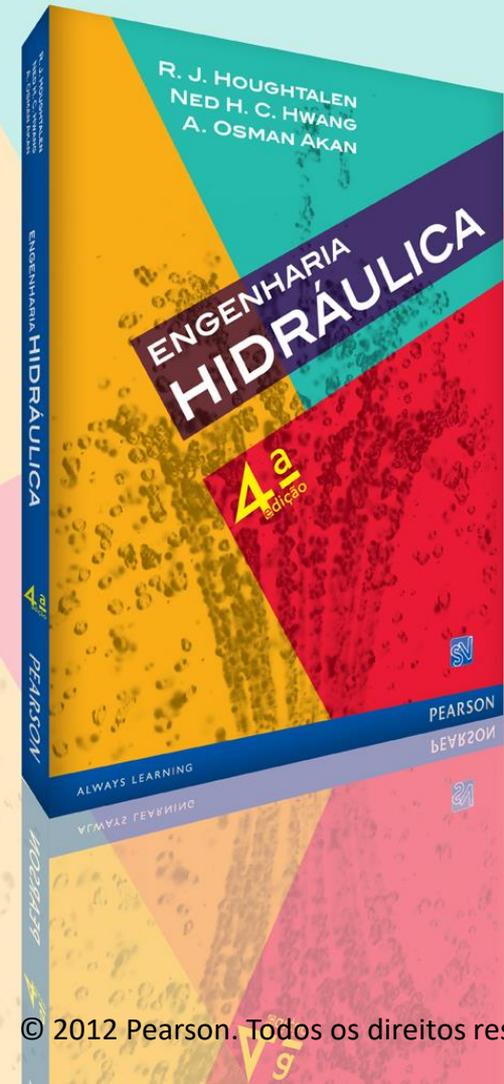


Capítulo 6

Fluxo de água em canais abertos



Fluxo de água em canais abertos

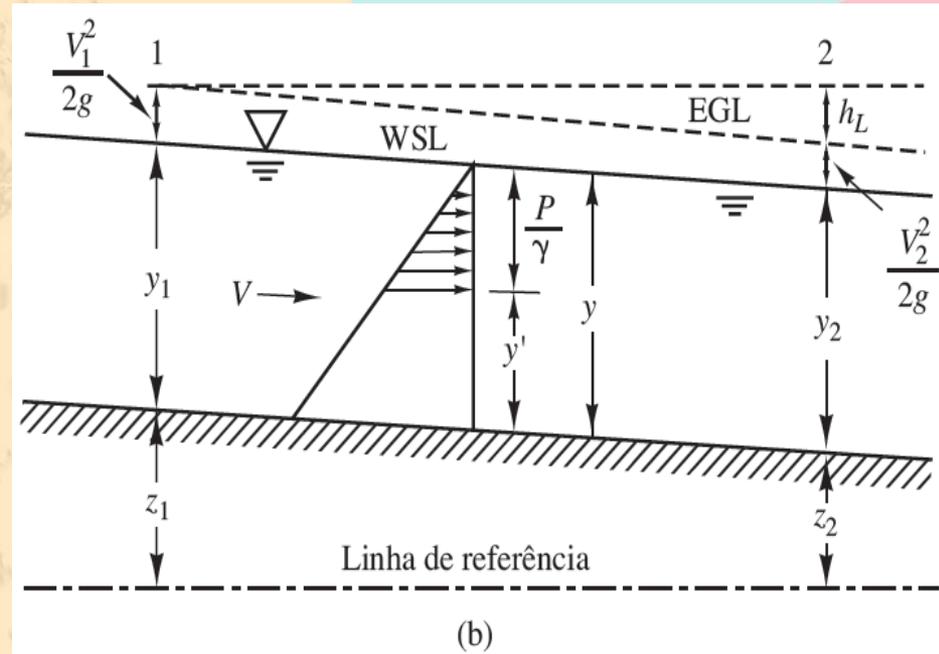
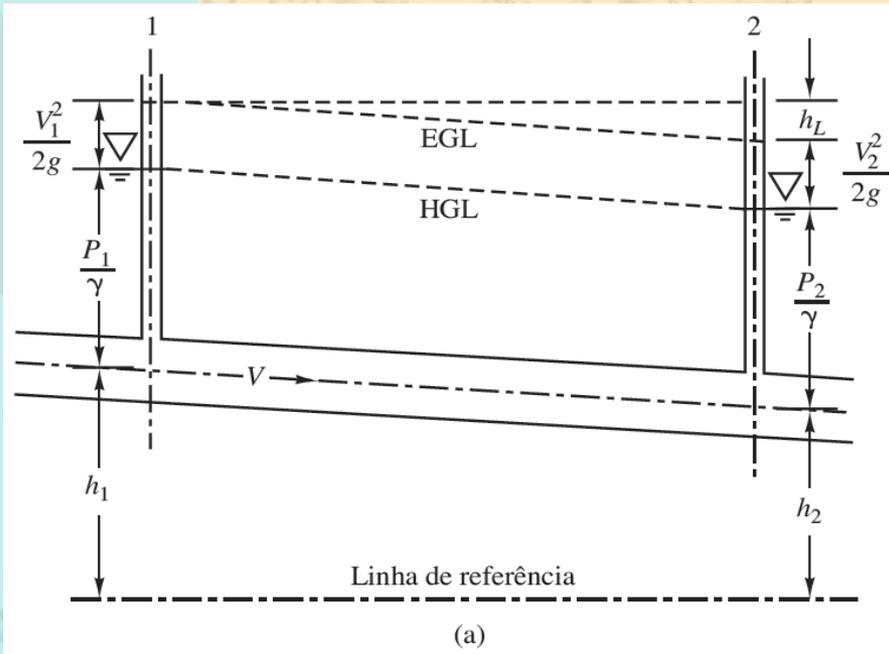
R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA

4^a
edição

- O fluxo em canais abertos possui uma superfície livre que se ajusta dependendo das condições de fluxo.
- Essa superfície está sujeita à pressão atmosférica.
- O fluxo em canais abertos é direcionado pelo componente de força gravitacional ao longo da declividade do canal.
- Na figura a seguir, o fluxo de canais abertos está esquematicamente comparado ao de tubos.

Fluxo de água em canais abertos

Comparação de (a) fluxo em tubos e (b) fluxo em canais abertos.



Fluxo de água em canais abertos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA

4^a
edição

- As definições geométricas e hidráulicas básicas usadas para descrever o fluxo de um canal aberto ao longo de uma seção do canal são:

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: $R_h = A/P$

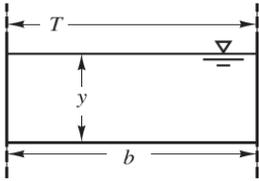
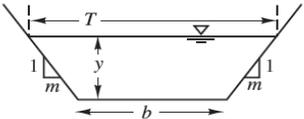
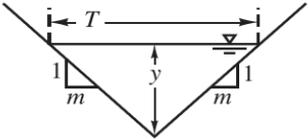
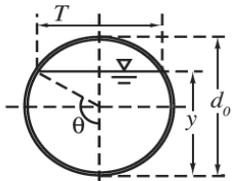
Declividade longitudinal do fundo do canal

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

Largura da seção do canal no fundo

Fluxo de água em canais abertos

Relações transversais para fluxos em canais abertos.

Tipo de seção	Área (A)	Perímetro molhado (P)	Raio hidráulico (R_h)	Largura do topo (T)	Profundidade hidráulica (D)
Retangular 	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b	y
Trapezoidal 	$(b + my)y$	$b + 2y\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{(b + my)y}{b + 2y\sqrt{1 + m^2}}$	$b + 2my$	$\frac{(b + my)y}{b + 2my}$
Triangular 	my^2	$2y\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{my}{2\sqrt{1 + m^2}}$	$2my$	$\frac{y}{2}$
Circular (θ em radianos) 	$\frac{1}{8}(2\theta - \text{sen } 2\theta)d_0^2$	θd_0	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen } 2\theta}{2\theta}\right)d_0$	$\frac{(\text{sen } \theta)d_0 \text{ ou}}{2\sqrt{y(d_0 - y)}}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{2\theta - \text{sen } 2\theta}{\text{sen } \theta}\right)d_0$

Classificações de fluxos em canais abertos

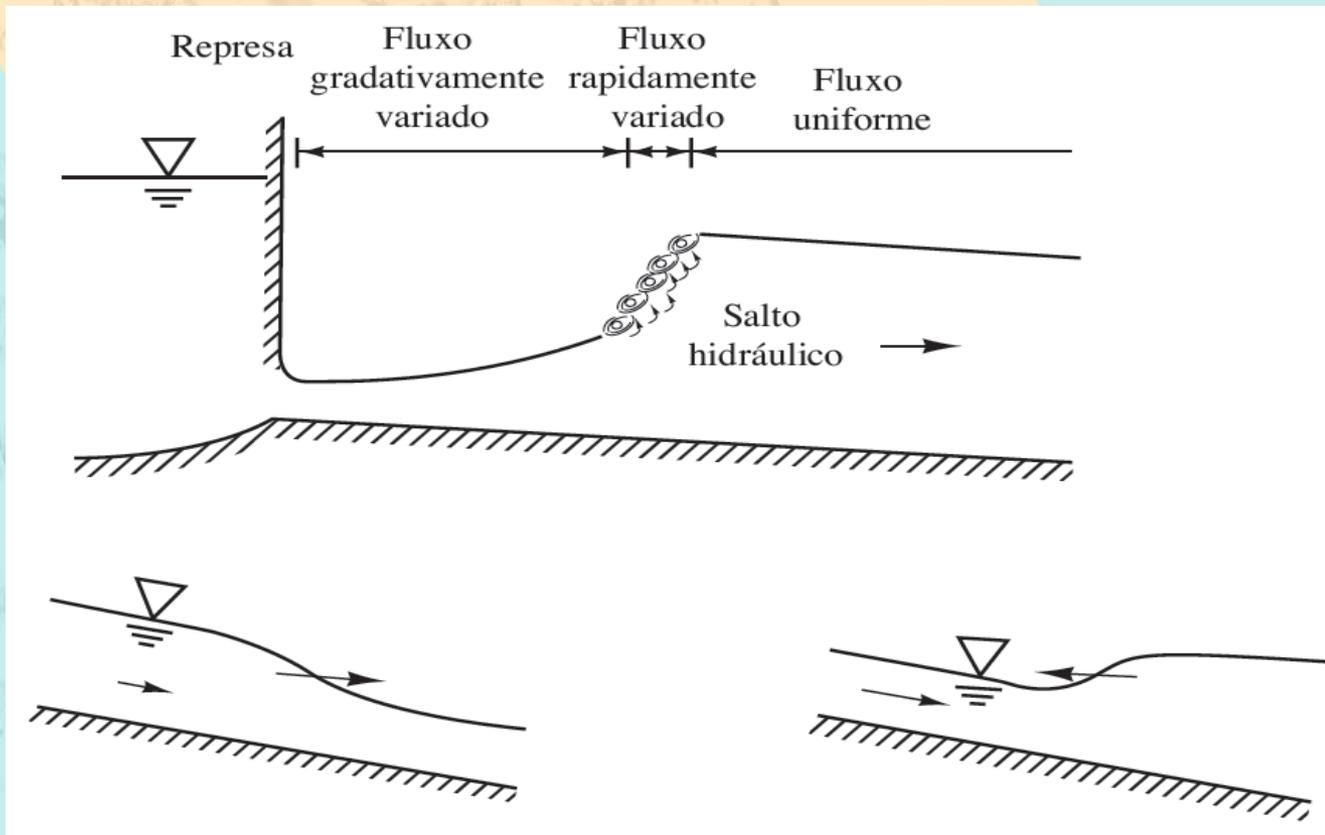
R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA

4^a
edição

- Com base no critério de espaço, um canal aberto caracteriza *fluxo uniforme* 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.

Classificações de fluxos em canais abertos

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

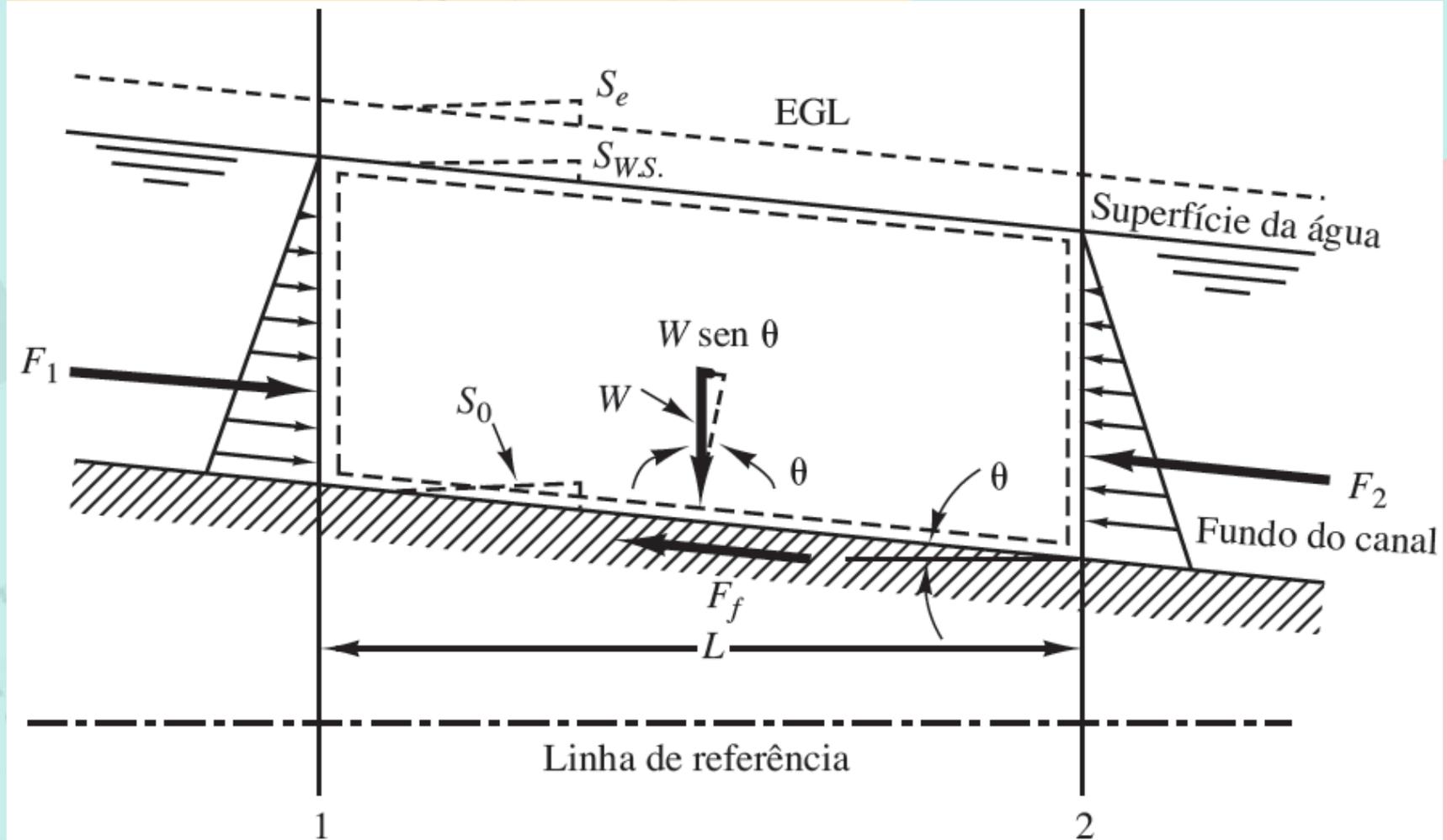


Fluxo uniforme em canais abertos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA
4ª edição

- Em canais abertos, o fluxo uniforme deve satisfazer as seguintes condições:
 1. 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.
 2. 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).

Fluxo uniforme em canais abertos



Fluxo uniforme em canais abertos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA
4ª edição

- As forças atuando sobre o corpo livre na direção do fluxo incluem:
 1. as forças de pressão hidrostáticas, F_1 e F_2 , atuando sobre o volume de controle;
 2. o peso do corpo de água na extensão, W , que possui um componente, $W \sin \theta$, na direção do fluxo e
 3. 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 $F_1 + W \sin \theta - F_2 - F_f = 0$

Fluxo uniforme em canais abertos

- 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.

Fluxo uniforme em canais abertos

- 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

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_e^{1/2}$$

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

Fluxo uniforme em canais abertos

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

Eficiência hidráulica de seções de canais abertos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA

4^a
edição

- 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.
- A seção trapezoidal mais eficiente é o meio hexágono.

Eficiência hidráulica de seções de canais abertos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA

4^a
edição

- 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 fluxos de canais abertos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA
4ª edição

- A energia contida em uma unidade de peso de água fluindo em um canal aberto também pode ser medida em três formas básicas:
 1. Energia cinética;
 2. Energia de pressão;
 3. Energia de elevação (potencial) acima de uma determinada linha de referência de energia.
- A energia cinética em qualquer seção de um canal aberto é expressa na forma $V^2/2g$, onde V é a velocidade média definida pela descarga dividida pela área de água.

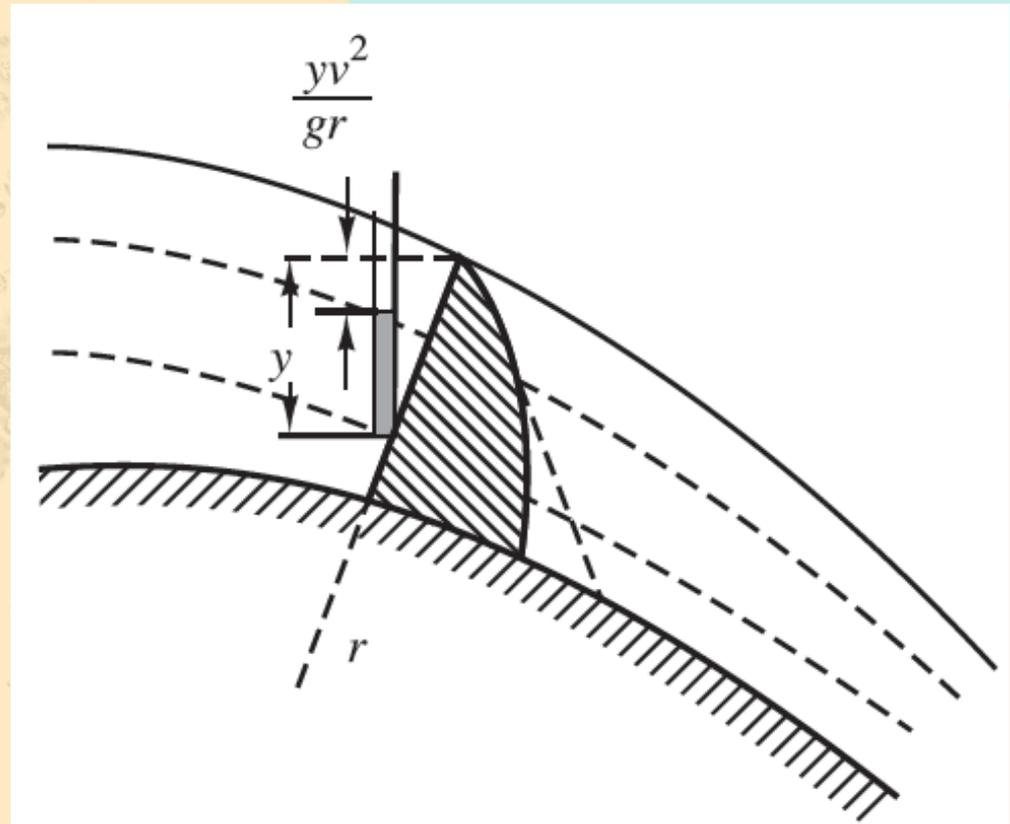
Princípios de energia em fluxos de canais abertos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA

4^a
edição

- Quando a água flui por um percurso convexo (figura abaixo), a força centrífuga atua na direção oposta à da força de gravidade, e a pressão é menor do que a da profundidade da água, em my^2/r . A altura de pressão resultante é

$$\frac{p}{\gamma} = y - \frac{yv^2}{gr}$$

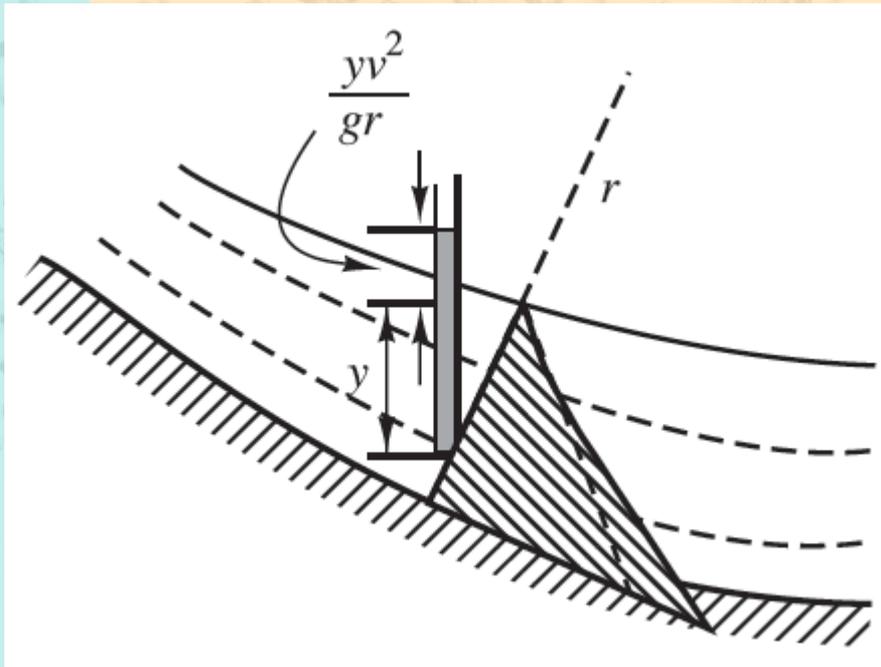


Princípios de energia em fluxos de canais abertos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA

4^a
edição

- Quando a água flui sobre um percurso côncavo (figura abaixo), a força centrífuga está na mesma direção da força de gravidade, e a pressão é maior do que aquela representada pela profundidade da água. A altura de pressão resultante é



$$\frac{p}{\gamma} = y + \frac{yv^2}{gr}$$

Princípios de energia em fluxos de canais abertos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA
4ª edição

- 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

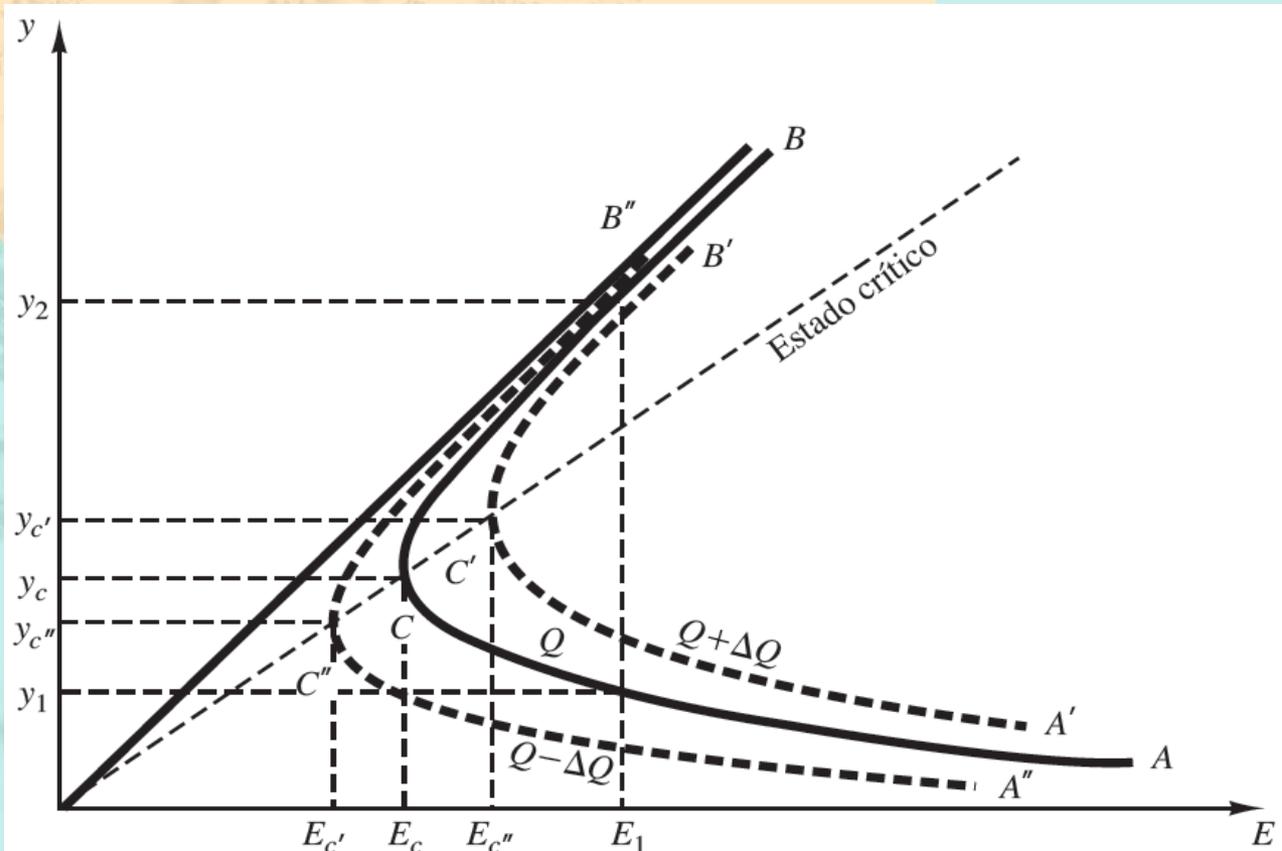
$$E = \frac{Q^2}{2gA^2} + y$$

Princípios de energia em fluxos de canais abertos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA

4ª
edição

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



Princípios de energia em fluxos de 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:

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

- A área de água diferencial (dA/dy) próxima da superfície livre é $dA/dy = T$, onde T é a *largura do topo* da seção do canal. Logo,

$$-\frac{Q^2 T}{gA^3} + 1 = 0$$

Princípios de energia em fluxos de canais abertos

- A equação anterior pode, então, ser simplificada para

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{gDA^2} = 1 - \frac{V^2}{gD} = 0$$

- Ou $\frac{V}{\sqrt{gD}} = 1$

- Podemos também escrever (para o fluxo crítico) $\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{T} = DA^2$

- Como essa relação é derivada das condições de fluxo crítico definidas anteriormente, $y = y_c$, que é a profundidade crítica, e

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

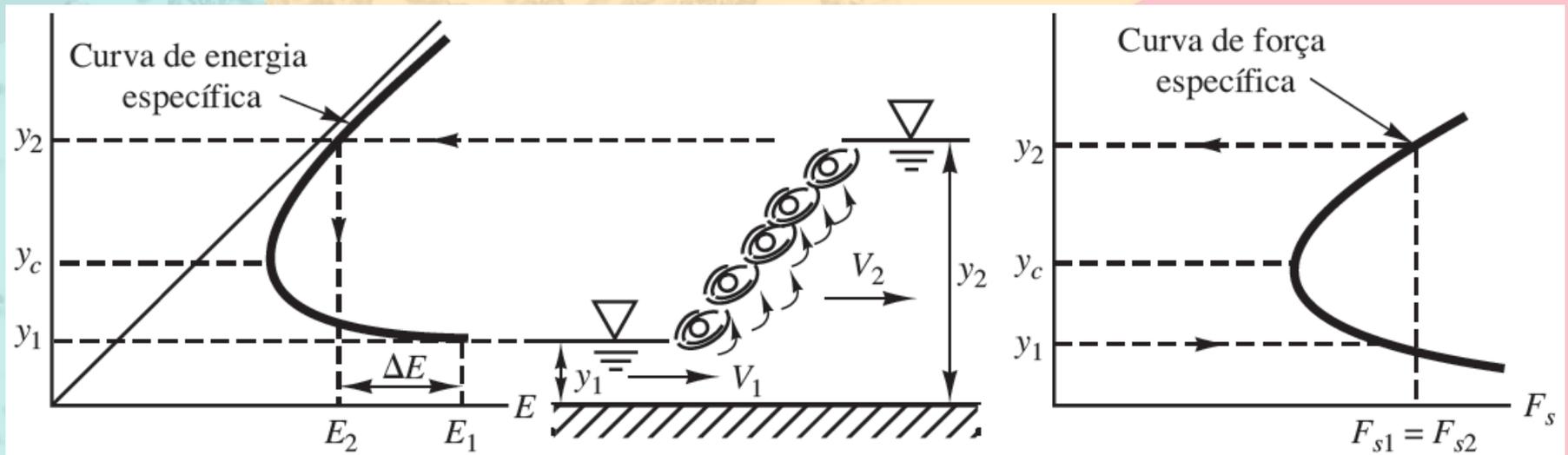
Saltos hidráulicos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA
4ª edição

- Saltos hidráulicos podem ocorrer naturalmente em canais abertos, mas são mais comuns em estruturas construídas, tais como bacias de dissipação de energia (ou saltos 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).

Saltos 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 salto hidráulico (figura abaixo).



Saltos 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

$$\frac{q^2}{g} = y_1 y_2 \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right)$$

$$F_1 = \frac{\gamma}{2} y_1^2, \quad F_2 = \frac{\gamma}{2} y_2^2, \quad V_1 = \frac{q}{y_1}, \quad V_2 = \frac{q}{y_2}$$

- 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:

$$N_{F_1} = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}$$

Fluxo gradualmente variado

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA

4^a
edição

- 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.
- Para calcular o perfil da superfície da água, primeiro devemos obter a variação da altura de energia total ao longo do canal:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dH}{dx} - \frac{dz}{dx}}{1 - \frac{Q^2 T}{gA^3}}$$

Fluxo gradualmente variado

- Utilizando a fórmula de Manning, obtemos

$$S_e = -\frac{dH}{dx} = \frac{n^2 Q^2}{R_h^{4/3} A^2} = \frac{n^2 Q^2}{b^2 y^{10/3}}$$

- Como a declividade do leito do canal é igual à declividade de energia no fluxo uniforme, as condições hipotéticas de fluxo uniforme são definidas pelo subscrito n . Temos

$$S_0 = -\frac{dz}{dx} = \left(\frac{n^2 Q^2}{b^2 y^{10/3}} \right)_n$$

- Para canais retangulares,

$$Q^2 = g y_c^3 b^2 = \frac{g A_c^3}{b}$$

Fluxo gradualmente variado

- Substituindo as equações anteriores na equação

Temos

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

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dH}{dx} - \frac{dz}{dx}}{1 - \frac{Q^2 T}{gA^3}}$$

- Para canais não retangulares, a equação acima pode ser generalizada:

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

Classificações de fluxos gradualmente variados

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA

4^a
edição

- 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.

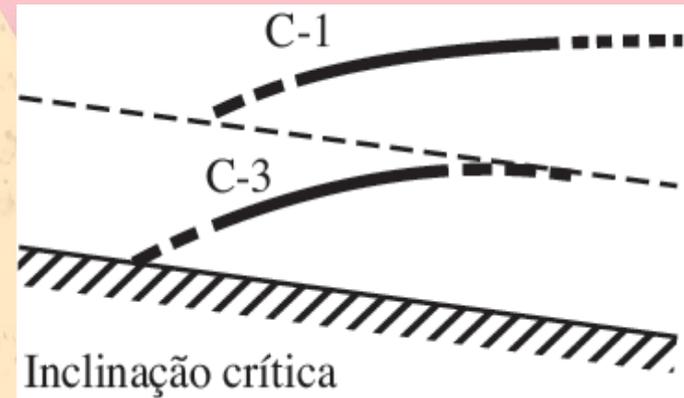
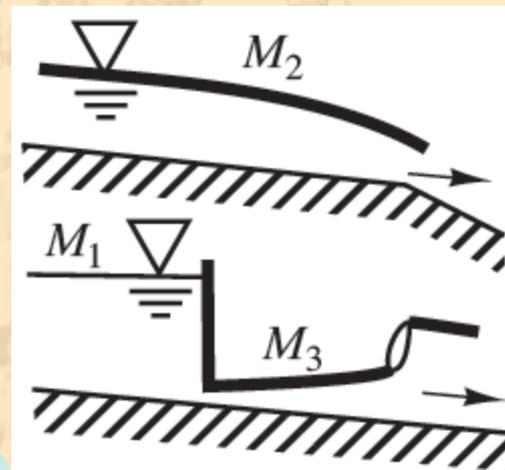
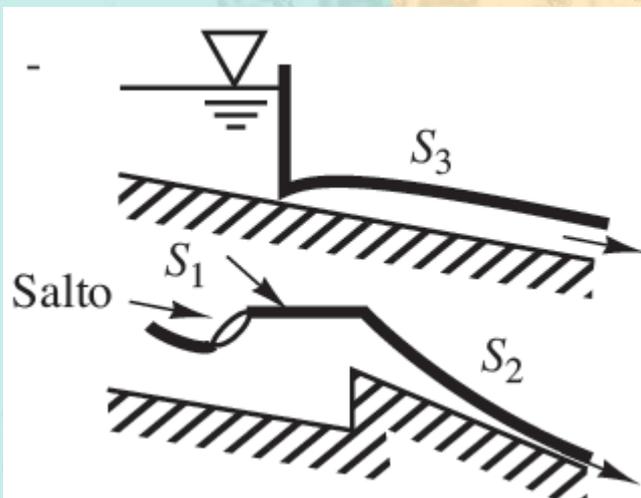
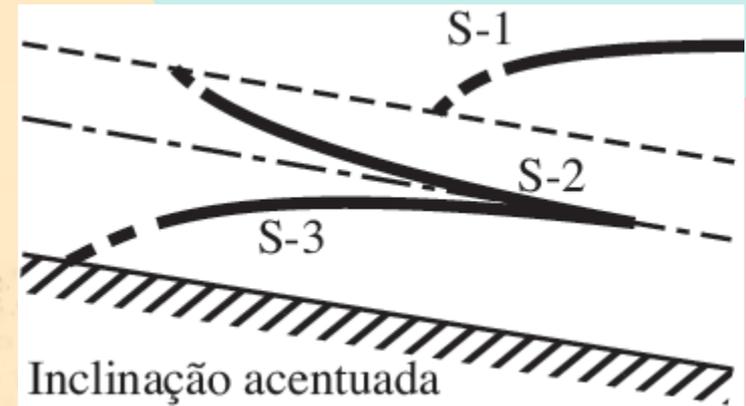
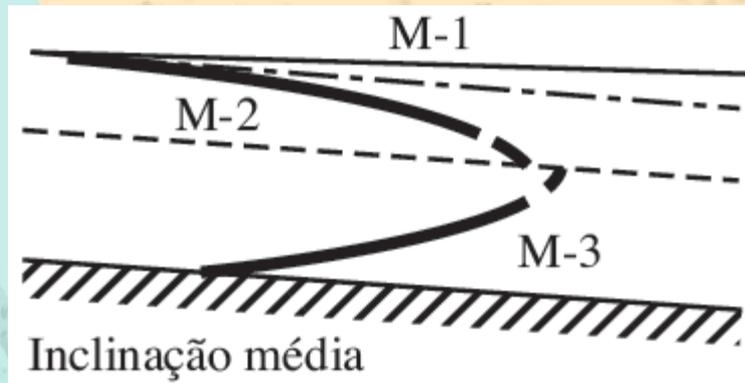
Classificações de fluxos gradualmente variados

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.

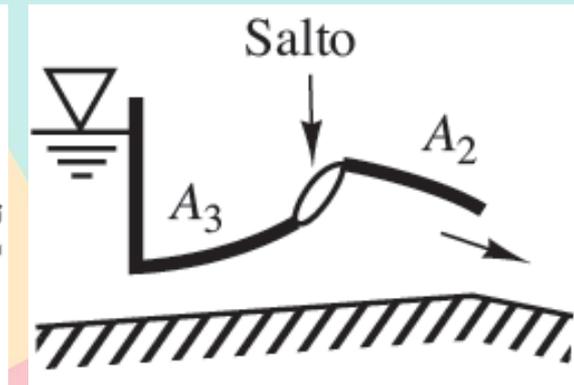
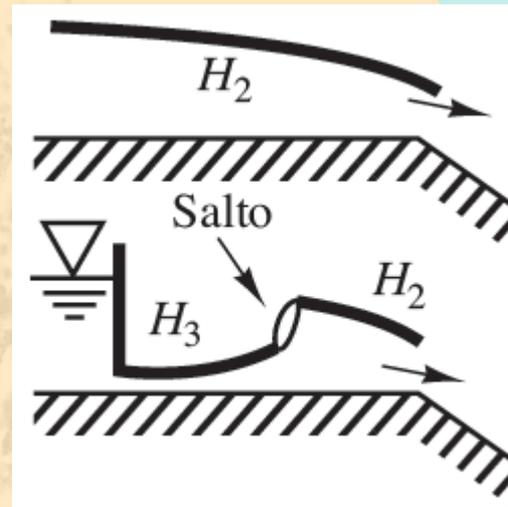
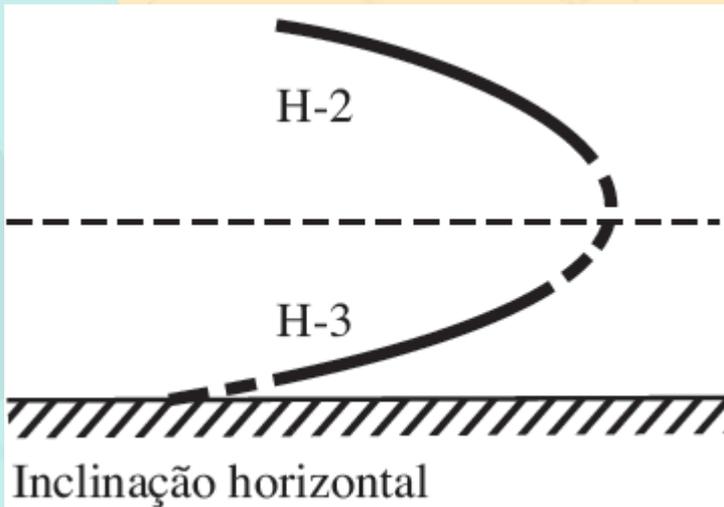
Classificações de fluxos gradualmente variados

Classificações de fluxos gradualmente variados.

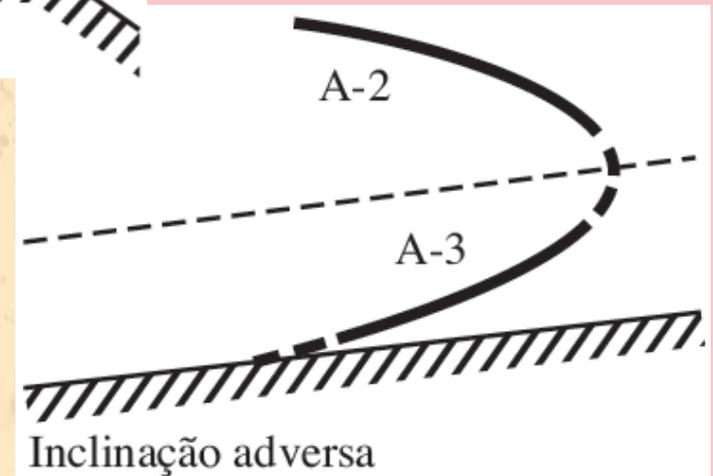


Classificações de fluxos gradualmente variados

Classificações de fluxos gradualmente variados.



----- Linha da profundidade normal
- - - - - Linha da profundidade crítica



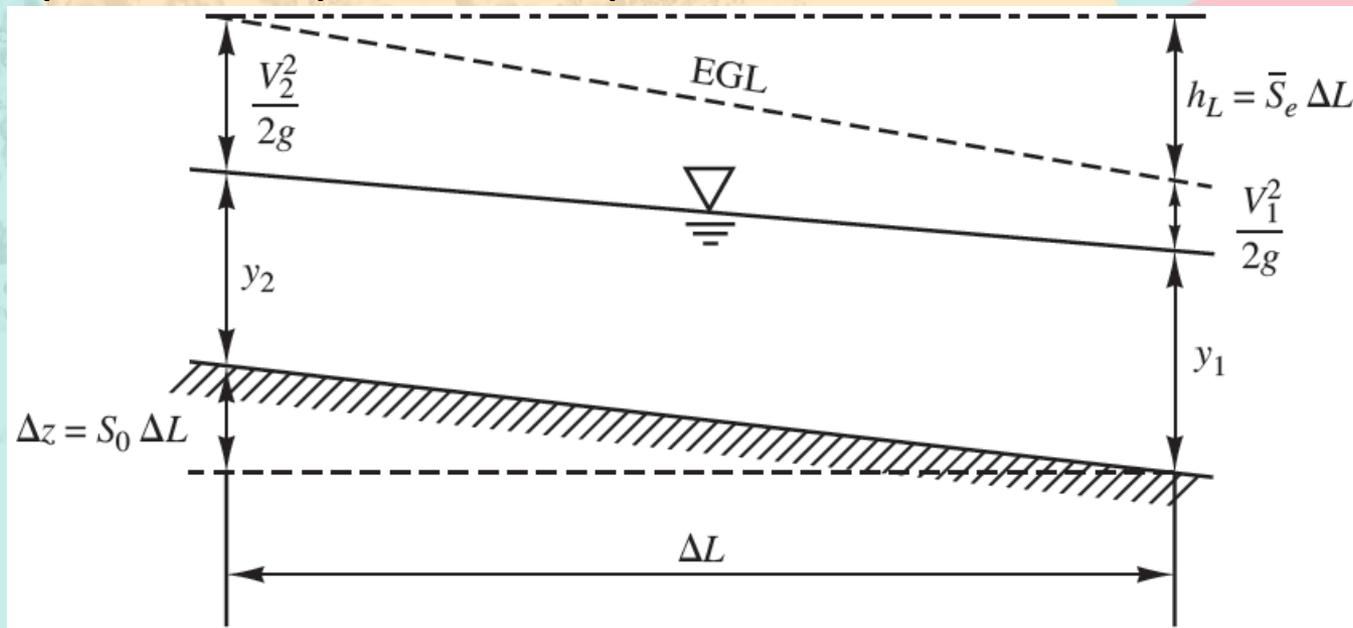
Classificações de fluxos gradualmente variados

A tabela abaixo oferece um resumo das curvas do perfil da superfície da água.

Canal	Símbolo	Tipo	Declividade	Profundidade	Curva
Mediano	M	1	$S_0 > 0$	$y > y_n > y_c$	M-1
Mediano	M	2	$S_0 > 0$	$y_n > y > y_c$	M-2
Mediano	M	3	$S_0 > 0$	$y_n > y_c > y$	M-3
Crítico	C	1	$S_0 > 0$	$y > y_n = y_c$	C-1
Crítico	C	3	$S_0 > 0$	$y_n = y_c > y$	C-3
Acentuado	S	1	$S_0 > 0$	$y > y_c > y_n$	S-1
Acentuado	S	2	$S_0 > 0$	$y_c > y > y_n$	S-2
Acentuado	S	3	$S_0 > 0$	$y_c > y_n > y$	S-3
Horizontal	H	2	$S_0 = 0$	$y > y_c$	H-2
Horizontal	H	3	$S_0 = 0$	$y_c > y$	H-3
Adverso	A	2	$S_0 < 0$	$y > y_c$	A-2
Adverso	A	3	$S_0 < 0$	$y_c > y$	A-3

Standard step method

- O método das diferenças finitas é derivado diretamente do equilíbrio de energia entre duas seções transversais adjacentes (figura abaixo) que estão separadas por uma distância suficientemente curta de modo que a superfície da água pode ser aproximada por uma linha reta.



Standard step method

- A relação de energia entre as duas seções pode ser escrita como

$$\frac{V_2^2}{2g} + y_2 + \Delta z = \frac{V_1^2}{2g} + y_1 + h_L$$

- Pode ser reescrita como

$$\left(z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) = \left(z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) + \bar{S}_e \Delta L \quad (6.26b)$$

- Ou

$$E'_2 = E'_1 + \text{perdas}$$

Standard step method

- A declividade de energia (S_e) pode ser calculada por meio da aplicação da equação de Manning, seja em unidades do sistema internacional

$$S_e = \frac{n^2 V^2}{R_h^{4/3}}$$

- ou em unidades do sistema britânico,

$$S_e = \frac{n^2 V^2}{2,22 R_h^{4/3}}$$

- Um procedimento de cálculo tabulado é recomendado.

Direct step method

- No *direct step method* (método direto), as equações de fluxo gradualmente variado são reorganizadas para determinar a distância (ΔL) explícita entre duas profundidades de fluxo selecionadas.
- Substituindo as seções 1 e 2 por U e D , respectivamente, e observando que $S_0 = (z_U - z_D)/\Delta L = \Delta z/\Delta L$, reorganizamos da seguinte maneira:

$$\Delta L = \frac{(y_D + \frac{V_D^2}{2g}) - (y_U + \frac{V_U^2}{2g})}{S_0 - \bar{S}_e} = \frac{E_D - E_U}{S_0 - \bar{S}_e}$$

Projeto hidráulico de canais abertos

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA
4^a
edição

- 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.

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

R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA
4ª edição

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.