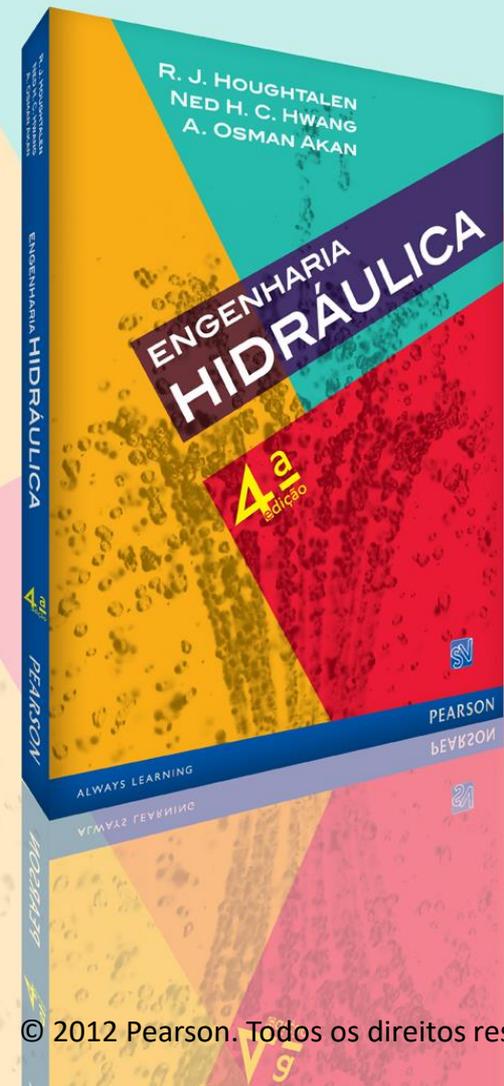


Capítulo 4

Tubulações e redes de tubos



Tubulações e redes de tubos

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

4^a
edição

- Em geral, quando um conjunto de tubos está interligado para transportar água para determinado projeto, tem-se um sistema que pode incluir tubos em série, em paralelo, tubos de distribuição, cotovelos, válvulas, medidores e outros dispositivos.
- Essa organização é conhecida como *tubulação*, se todos os elementos estiverem conectados em série.
- Caso contrário, essa organização é conhecida como *rede de tubos*.

Tubulações conectando dois reservatórios

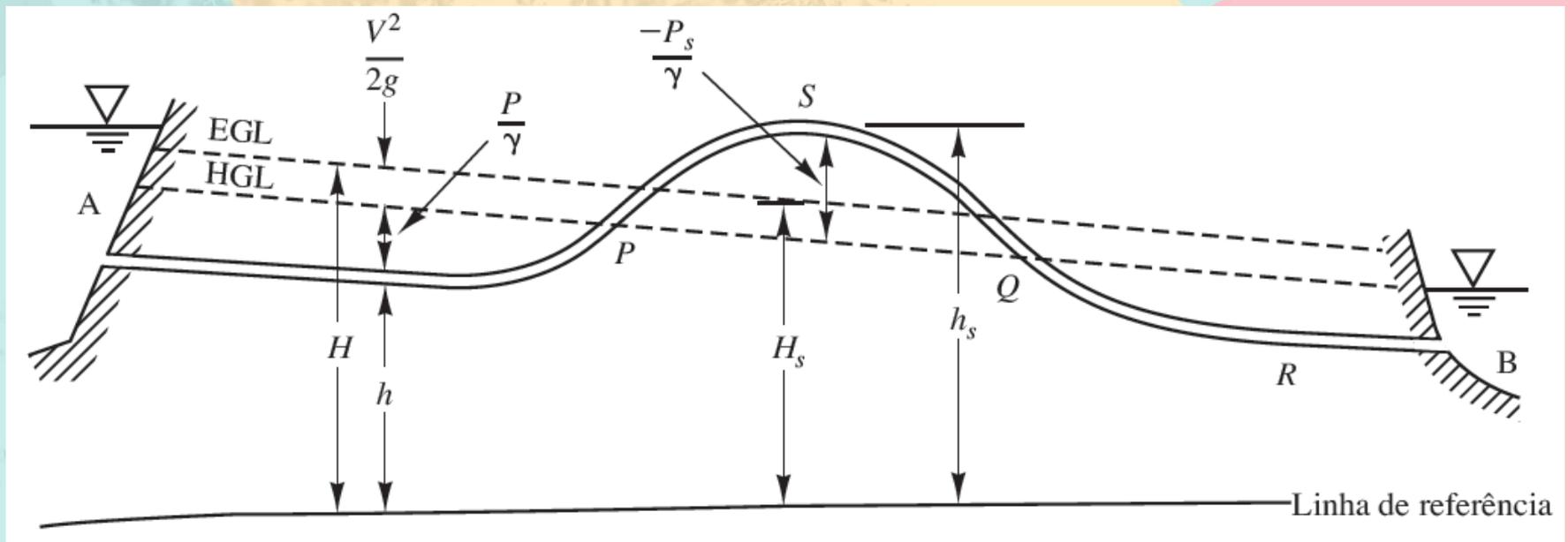
R. J. HOUGHTALEN
NED H. C. HWANG
A. OSMAN AKAN
ENGENHARIA
HIDRÁULICA

4^a
edição

- Existem três tipos principais de problemas de tubulações.
 1. Dadas a taxa de fluxo e as combinações de tubos, determinar a perda total de altura.
 2. Dadas a perda total de altura permitida e as combinações de tubos, determinar a taxa de fluxo.
 3. Dadas a taxa de fluxo e a perda total de altura permitida, determinar o diâmetro do tubo.
- O primeiro tipo de problema pode ser resolvido por uma abordagem direta, mas o segundo e o terceiro tipos envolvem procedimentos iterativos.

Cenários de pressão negativa (tubulações e bombas)

- Tubulações utilizadas para transportar água de uma localização a outra em distâncias longas geralmente seguem o contorno natural do terreno. Ocasionalmente, uma seção da tubulação pode ser elevada a uma altura acima da linha de altura piezométrica (HGL), como mostra a figura abaixo:



Cenários de pressão negativa (tubulações e bombas)

- A diferença na elevação entre dois pontos quaisquer 1 e 2 em uma tubulação é
$$\Delta h_{1-2} = \left(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} \right) + h_f$$
- É importante manter a pressão em todos os pontos em uma tubulação acima da pressão de vapor da água. Teoricamente, uma tubulação pode ser projetada para permitir que a pressão caia até o nível da pressão de vapor em determinadas seções dela própria.
- Não se deve permitir que a pressão negativa exceda aproximadamente dois terços da altura de pressão atmosférica padrão em qualquer seção da tubulação.

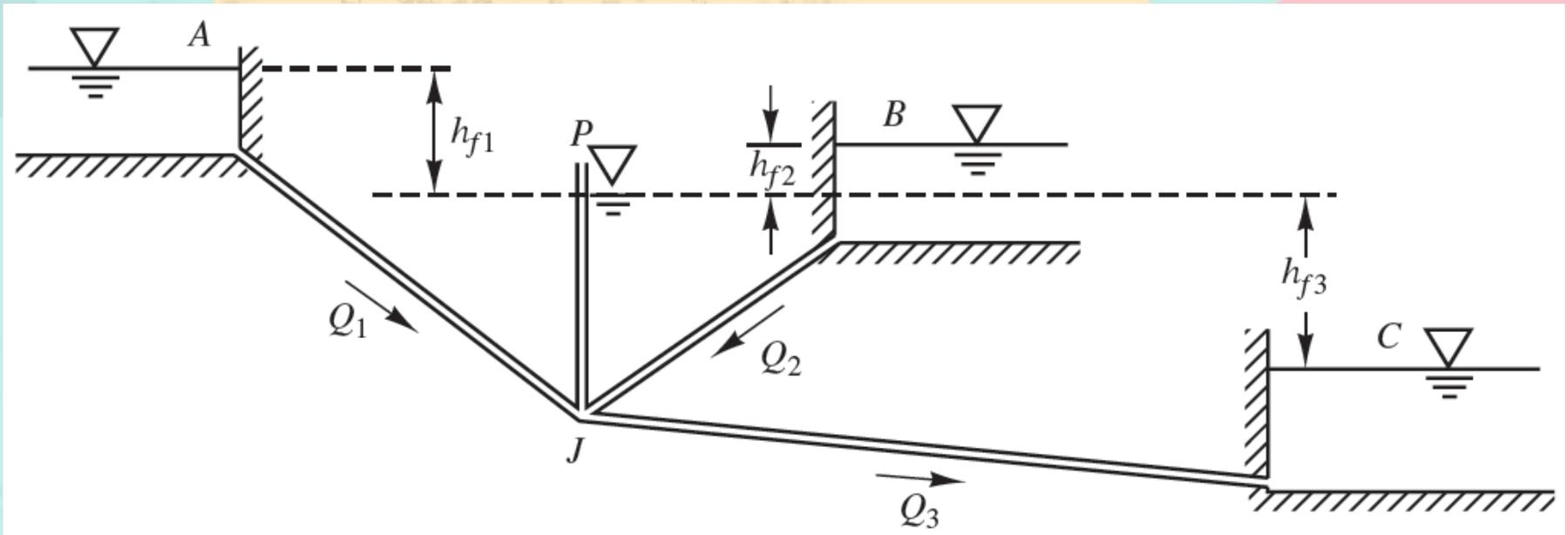
Sistemas de tubos ramificados

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

- Os sistemas de tubos ramificados são o resultado de duas ou mais tubulações que convergem em uma junção. Esses sistemas devem satisfazer simultaneamente a duas condições básicas:
 1. o volume total de água transportado pelos tubos até a junção deve ser sempre igual àquele transportado a partir da junção pelos outros tubos (conservação da massa) e
 2. todos os tubos que se encontram na junção devem compartilhar do mesmo nível de energia na junção (conservação da energia).

Sistemas de tubos ramificados

- A hidráulica dos sistemas de tubos ramificados em uma junção pode ser mais bem demonstrada pelo clássico *problema dos três reservatórios*, no qual três reservatórios de elevações diferentes são conectados a uma junção comum J ,



Sistemas de tubos ramificados

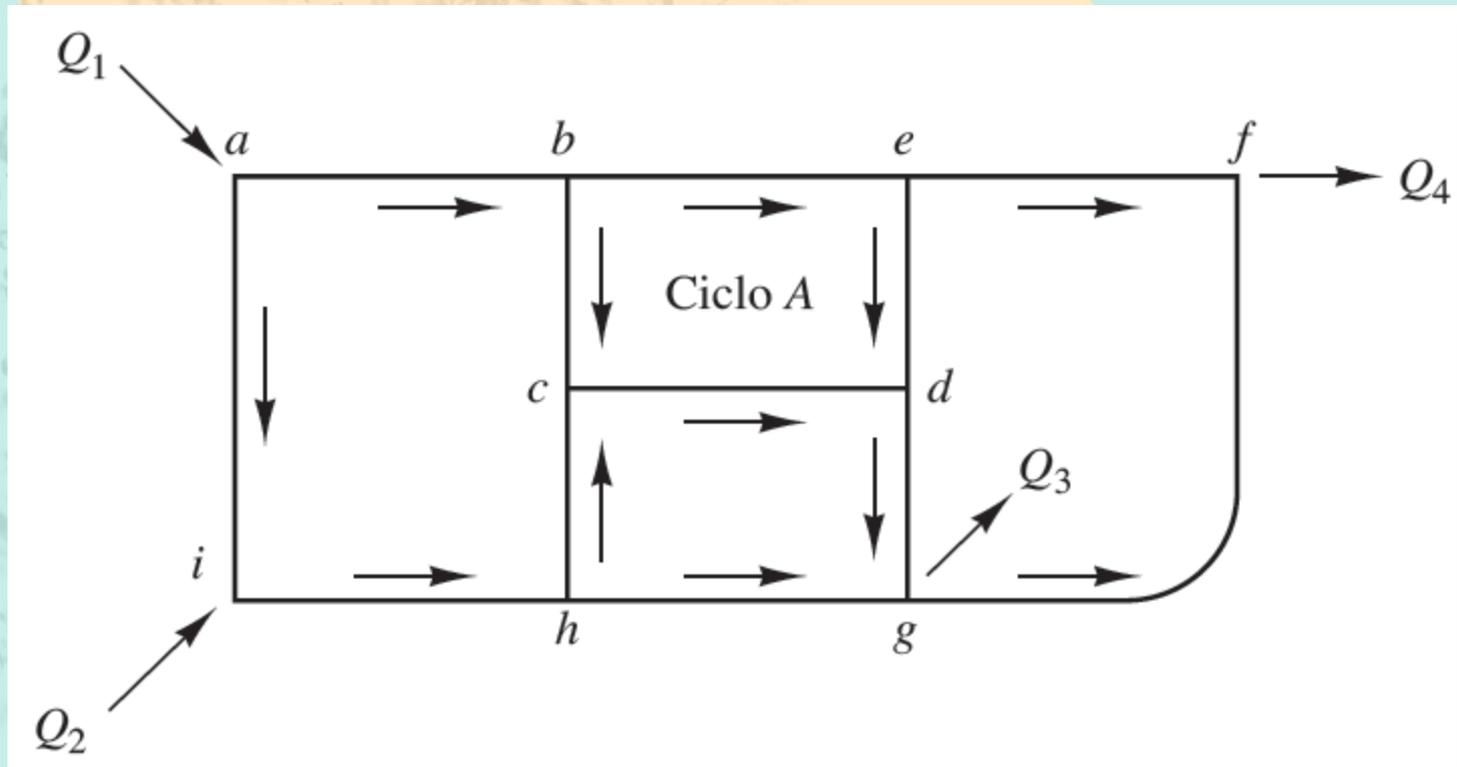
- Como a massa da água transportada até a junção deve ser igual à massa da água retirada da junção, podemos simplesmente escrever $Q_3 = Q_1 + Q_2$
- Se a elevação de energia total P estiver correta, então os Q calculados devem satisfazer à condição de equilíbrio de massa anterior, ou seja, $\Sigma Q = Q_1 + Q_2 - Q_3 = 0$
- Se não, a
- supõe-se uma nova elevação P para a segunda iteração. Realiza-se o cálculo de um novo conjunto de Q até que a condição anterior seja satisfeita. Os valores corretos da descarga em cada tubo são, então, obtidos.

Redes de tubos

- Em geral, uma série de equações simultâneas pode ser escrita para a rede. Essas equações são escritas para satisfazer às seguintes condições:
 4. Em qualquer junção, $\Sigma Q = 0$ com base na conservação da massa (**equação da junção**).
 5. Entre duas junções quaisquer, a perda de altura total é independente do percurso realizado com base na conservação de energia (**equação do ciclo**).

Redes de tubos

- Para a rede simples apresentada na figura abaixo, um conjunto de 12 equações independentes é necessário para resolver a distribuição do fluxo nos 12 tubos.



O método de Hardy-Cross

- No ciclo A, mostrado na figura anterior, duas setas indicam a direção presumida do fluxo. Esse ciclo deve satisfazer às condições de equilíbrio de massa e de energia.
 1. Em cada junção (b , c , d e e), o influxo total deve ser igual ao escoamento total.
 2. A perda de altura do fluxo no sentido anti-horário ao longo dos tubos bc e cd deve ser igual à perda de altura do fluxo no sentido horário ao longo dos tubos be e ed .
- Para iniciar o processo, a distribuição dos fluxos em cada tubo é estimada de maneira que o influxo total seja igual ao escoamento total em cada junção ao longo da rede.

O método de Hardy-Cross

- Conhecendo o diâmetro, o comprimento e a rugosidade de um tubo, vemos que a perda de altura é uma função da taxa de fluxo, Q . Aplicando a equação de Darcy-Weisbach, podemos escrever

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} = \left[f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{1}{2gA^2} \right] Q^2 = KQ^2$$

- Em qualquer ciclo da rede, tal como o ciclo A , a perda de altura total no sentido horário (aqui designado pelo subscrito c) é a soma das perdas de altura em todos os tubos que transportam o fluxo no sentido horário ao redor do ciclo:

$$\Sigma h_{fc} = \Sigma K_c Q_c^2$$

O método de Hardy-Cross

- De maneira análoga, a perda de altura no sentido anti-horário (subscrito cc) é

$$\sum h_{fcc} = \sum K_{cc} Q_{cc}^2$$

- Podemos resolver ΔQ :

$$\Delta Q = \frac{\sum K_c Q_c^2 - \sum K_{cc} Q_{cc}^2}{2(\sum K_c Q_c + \sum K_{cc} Q_{cc})}$$

- Se tomarmos a primeira equação e a dividirmos por Q em ambos os lados, temos

$$KQ = \frac{h_f}{Q}$$

- As demais equações podem ser substituídas para obtermos

$$\Delta Q = \frac{(\sum h_{fc} - \sum h_{fcc})}{2\left(\sum \frac{h_{fc}}{Q_c} + \sum \frac{h_{fcc}}{Q_{cc}}\right)}$$

O método de Newton

- O método de iterações de Newton foi criado para resolver um conjunto de N equações simultâneas, F_i , escrito como

$$F_i[Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_N] = 0$$

- Os valores experimentais iniciais para Q_i não precisam satisfazer ao equilíbrio de massa em todas as junções.
- Além disso, as equações são formuladas com base nas direções dos fluxos inicialmente escolhidos. Um resultado positivo para uma taxa de fluxo indicará que a direção inicialmente escolhida está correta. Um valor negativo indicará que o fluxo naquele tubo em particular está em direção oposta àquela inicialmente suposta.

Fenômeno do martelo d'água em tubulações

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

4^a
edição

- Uma mudança repentina na taxa de fluxo em uma grande tubulação pode afetar uma grande massa de água em movimento dentro do tubo.
- A força resultante da alteração da velocidade da massa de água poderia causar um aumento de pressão no tubo com magnitude inúmeras vezes maior do que a pressão estática normal no interior do tubo.
- Esse fenômeno é comumente conhecido *como fenômeno do martelo d'água*.

Fenômeno do martelo d'água em tubulações

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

4^a
edição

- A coluna possui massa total m e modifica sua velocidade na taxa dV/dt . De acordo com a segunda lei de Newton para o movimento,

$$F = m \frac{dV}{dt}$$

- Imagine um tubo de comprimento L com diâmetro interno D , espessura da parede e e módulo de elasticidade E_p .
- Além disso, suponha que a água está escoando dentro do tubo vinda de um reservatório e que existe uma válvula no final do tubo, conforme mostra a figura a seguir.

Fenômeno do martelo d'água em tubulações

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

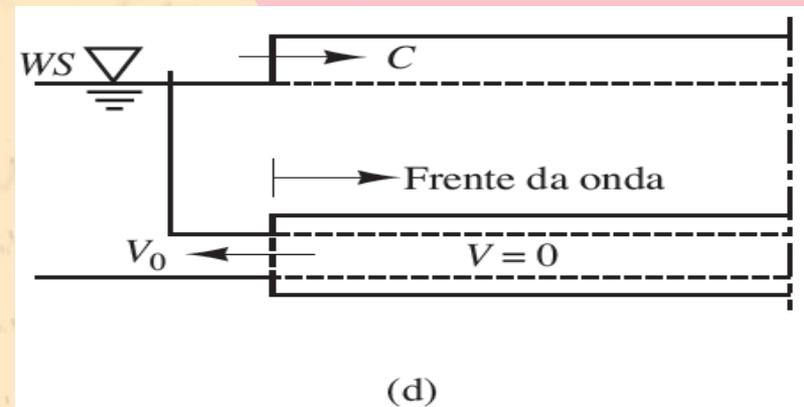
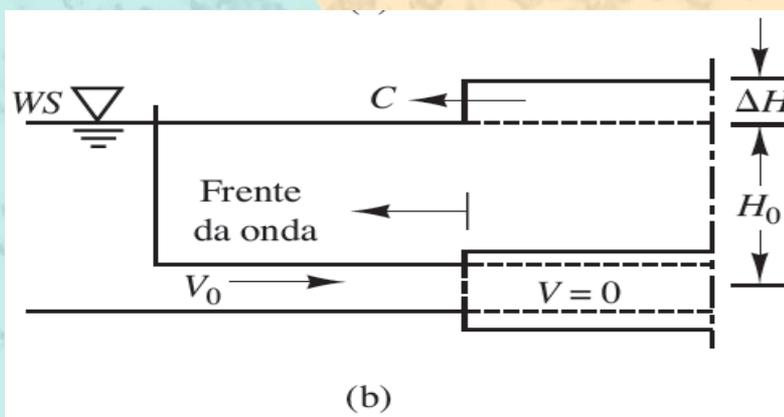
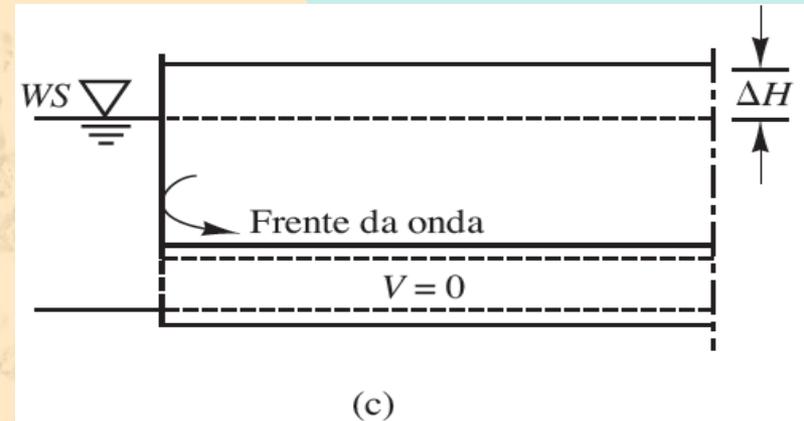
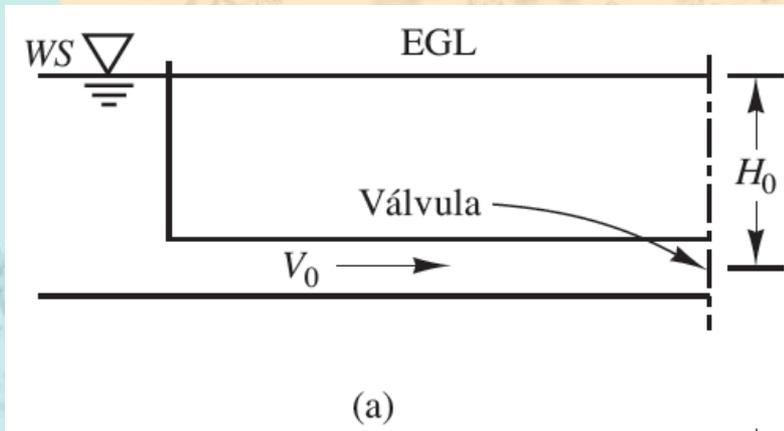
4^a
edição

- Veremos a propagação das ondas de pressão do martelo d'água (atrito desprezível no tubo).

- (a) Estado estacionário anterior ao movimento da válvula
- (b) Condições provisórias em $t < L/C$
- (c) Condições provisórias em $t = L/C$
- (d) Condições provisórias em $L/C < t < 2L/C$
- (e) Condições provisórias em $t = 2L/C$
- (f) Condições provisórias em $2L/C < t < 3L/C$
- (g) Condições provisórias em $t = 3L/C$
- (h) Condições provisórias em $t = 3L/C < t < 4L/C$
- (i) Condições provisórias em $t = 4L/C$.

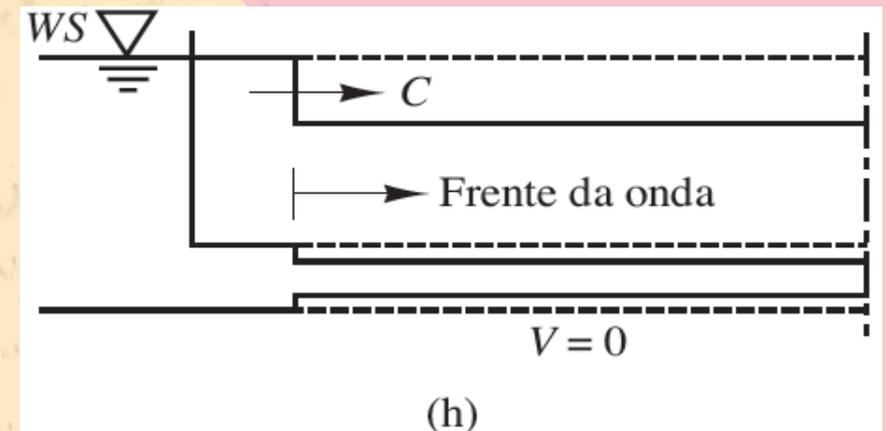
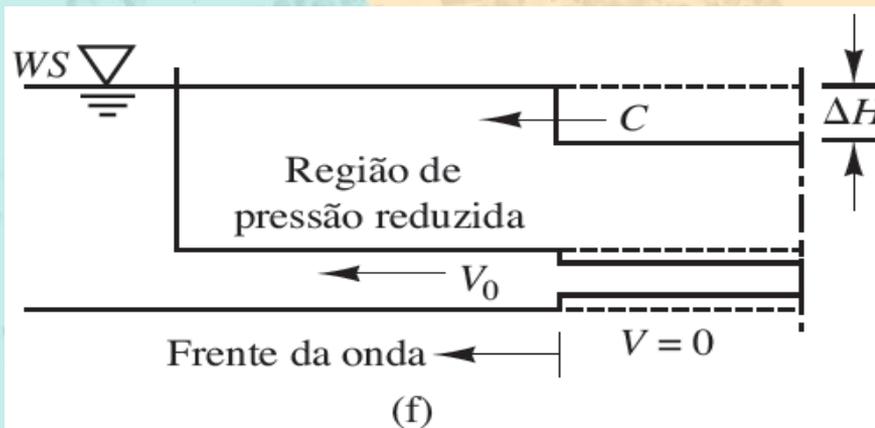
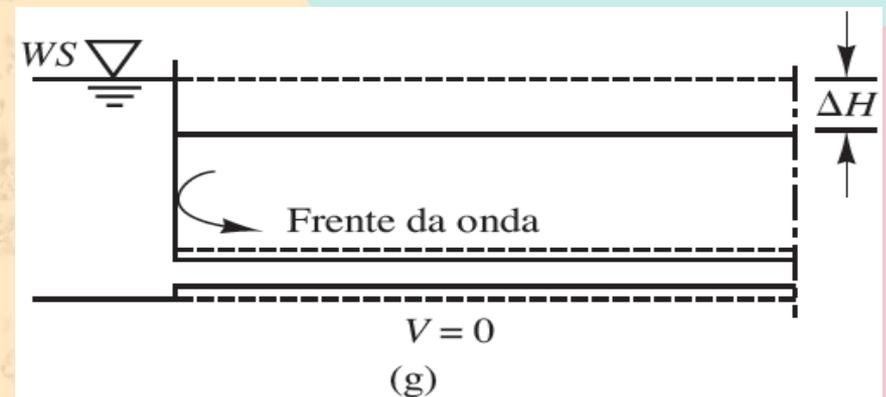
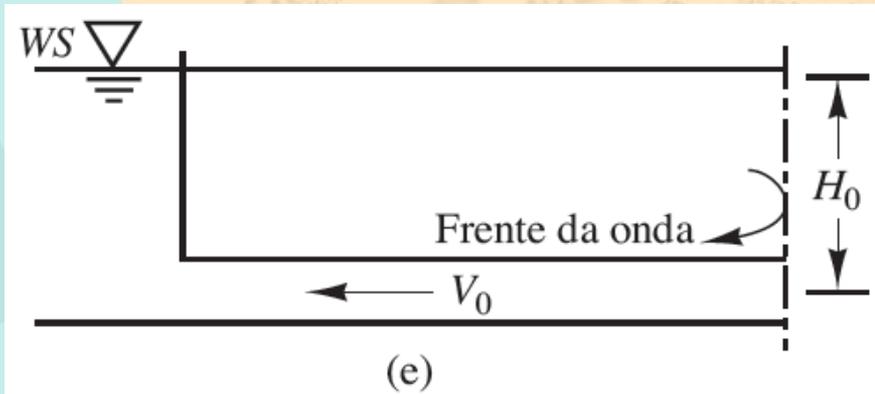
Fenômeno do martelo d'água em tubulações

- Veremos a propagação das ondas de pressão do martelo d'água (atrito desprezível no tubo).



Fenômeno do martelo d'água em tubulações

- Veremos a propagação das ondas de pressão do martelo d'água (atrito desprezível no tubo).

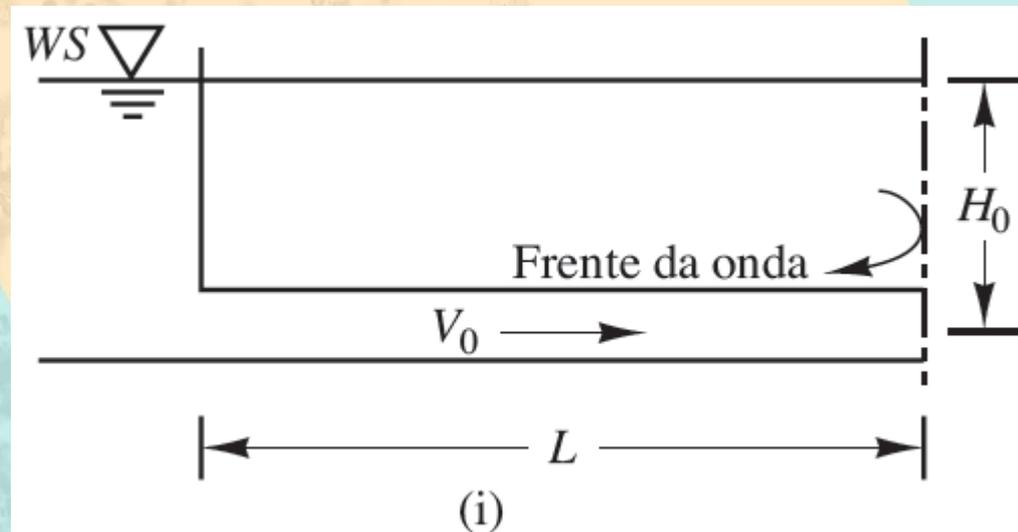


Fenômeno do martelo d'água em tubulações

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

4^a
edição

- Veremos a propagação das ondas de pressão do martelo d'água (atrito desprezível no tubo).



Fenômeno do martelo d'água em tubulações

- O módulo de elasticidade de diversos materiais de tubo comuns está listado na tabela abaixo:

Material do tubo	E_p (N/m ²)	E_p (psi)
Alumínio	$7,0 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^7$
Latão bronze	$9,0 \times 10^{10}$	$1,3 \times 10^7$
Concreto reforçado	$1,6 \times 10^{11}$	$2,5 \times 10^7$
Cobre	$9,7 \times 10^{10}$	$1,4 \times 10^7$
Vidro	$7,0 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^7$
Ferro fundido	$1,1 \times 10^{11}$	$1,6 \times 10^7$
Ferro flexível	$1,6 \times 10^{11}$	$2,3 \times 10^7$
Chumbo	$3,1 \times 10^8$	$4,5 \times 10^4$
Acrílico	$2,8 \times 10^8$	$4,0 \times 10^4$
Borracha vulcanizada	$1,4 \times 10^{10}$	$2,0 \times 10^6$
Aço	$1,9 \times 10^{11}$	$2,8 \times 10^7$

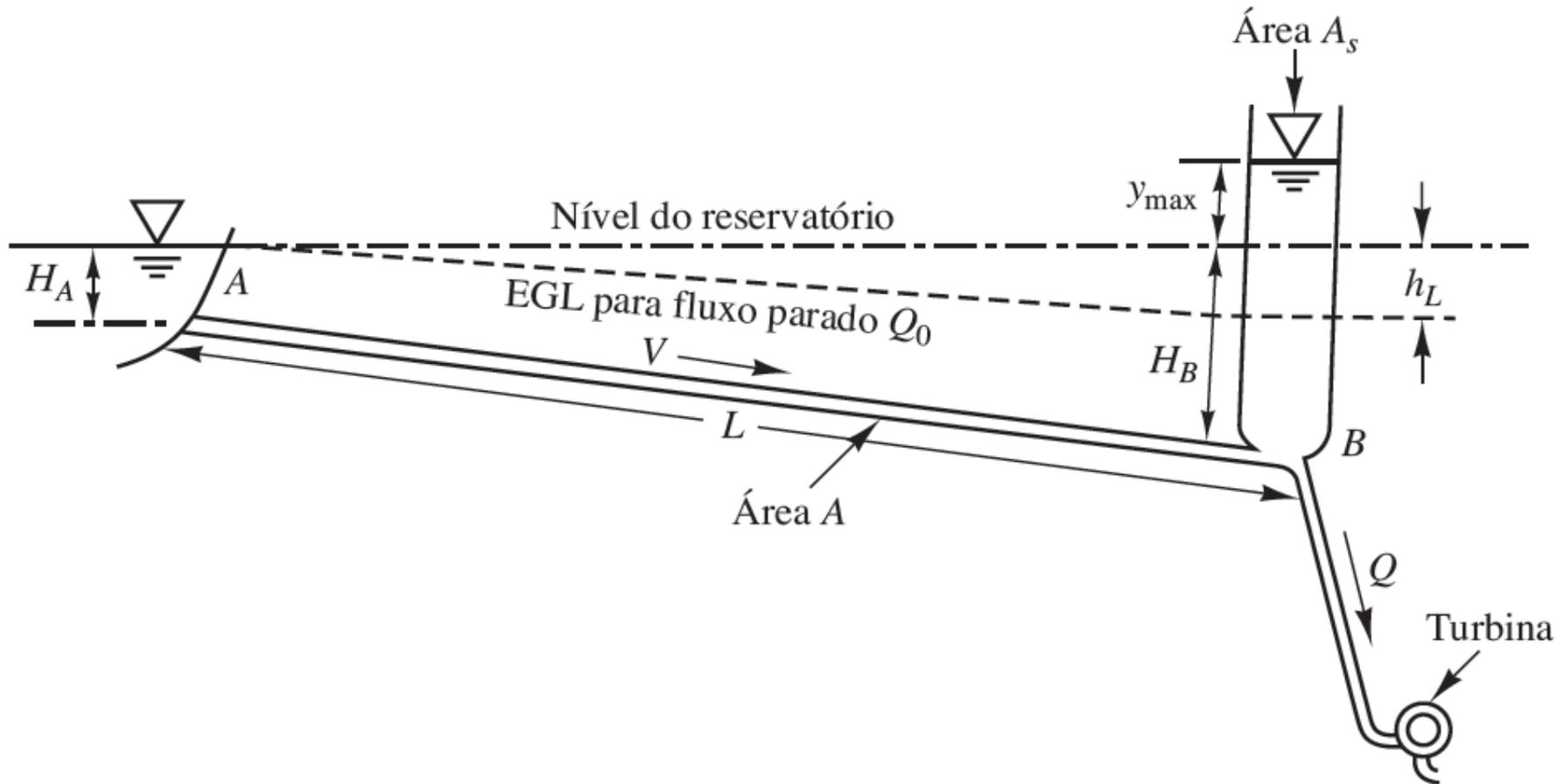
Tanques de compensação

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

- Existem muitas maneiras de eliminar os impactos prejudiciais causados pelo martelo d'água às tubulações.
- A inclusão de um tanque de compensação perto da estação de controle (figura a seguir) de uma tubulação minimizará as forças produzidas quando uma massa de água é parada ou tem sua velocidade diminuída.
- Um tanque de compensação é definido como um tubo ereto ou um reservatório de armazenamento colocado na extremidade final de uma longa tubulação para prevenir aumentos repentinos de pressão ou quedas de pressão.

Tanques de compensação

Tanque de compensação.



Tanques de compensação

$$\rho LA \frac{dV}{dt} = \rho g A [(H_A \pm \text{perda na entrada}) + (H_B - H_A) - (H_B + y \pm \text{perda na válvula reguladora}) \pm (\text{perdas na tubulação})]$$

- Se introduzirmos a forma de módulo, $h_L = K_f V|V|$ e $H_T = K_T U|U|$
- Onde $U = \frac{dy}{dt}$,
- Temos a equação dinâmica para o tanque de compensação:

$$\frac{L}{g} \frac{dV}{dt} + y + K_f V|V| + K_T U|U| = 0$$

Tanques de compensação

- Além disso, a condição de continuidade em B deve ser satisfeita

$$VA = UA_s + Q$$

- A solução para uma área constante simples (irrestrita) de um tanque de compensação pode ser expressa como

$$\frac{y_{\text{máx}} + h_L}{\beta} = \ln\left(\frac{\beta}{\beta - y_{\text{máx}}}\right)$$

- onde β é o fator de descarga, definido como

$$\beta = \frac{LA}{2gK_f A_s}$$