HIDRODINÂMICA

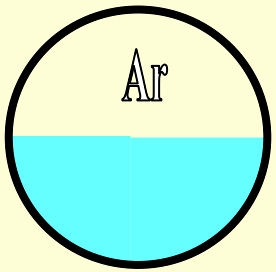
CONDUTOS SOB PRESSÃO

CONDUTOS SOB PRESSÃO

Denominam-se condutos sob pressão ou condutos forçados, as canalizações onde o líquido escoa sob uma pressão diferente da atmosférica.

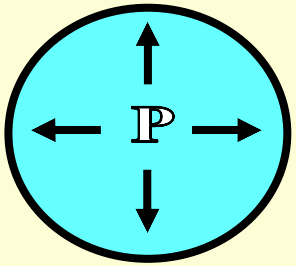
As seções desses condutos são sempre fechadas e o líquido escoa enchendo-as totalmente; são, em geral, de seção circular.

CONDUTOS SOB PRESSÃO



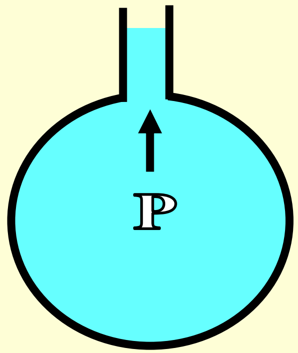
Conduto Livre

P = Patm



Conduto forçado

P ≠ Patm

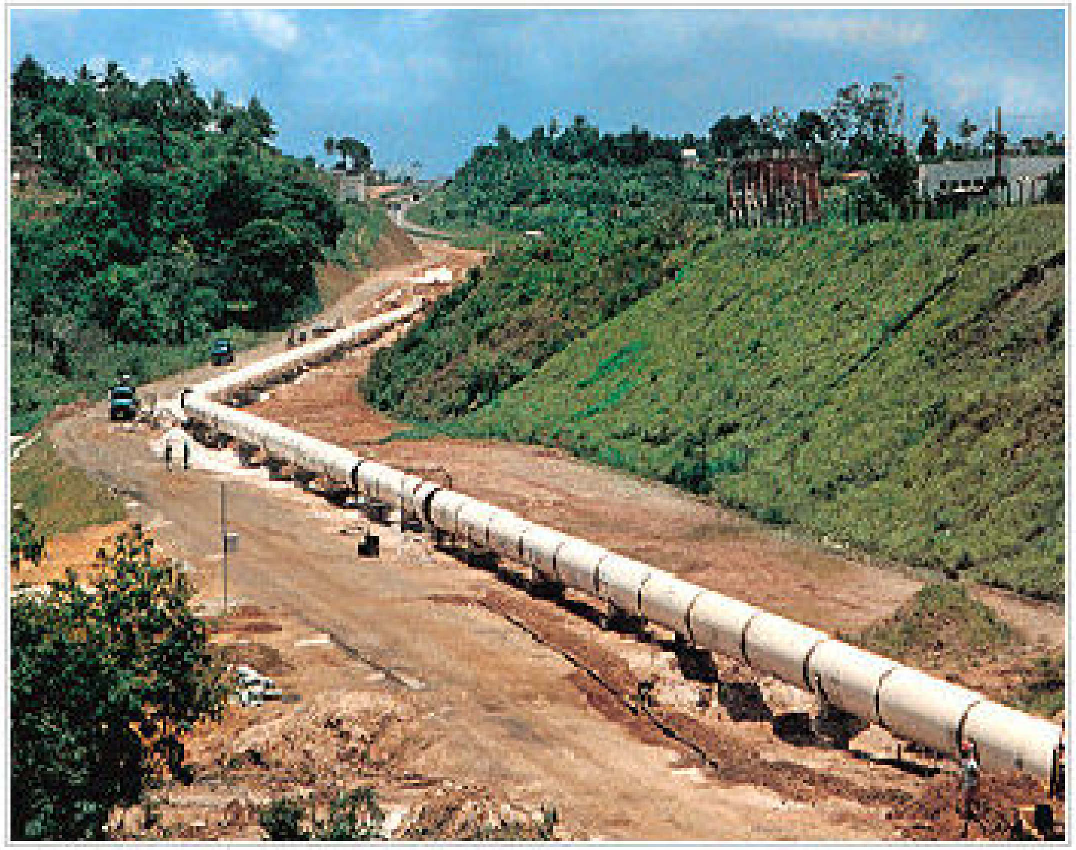


Conduto forçado

P > Patm

CONDUTOS SOB PRESSÃO

» Adutora de Pedra do Cavalo - Candeias - BA



CONDUTOS LIVRES

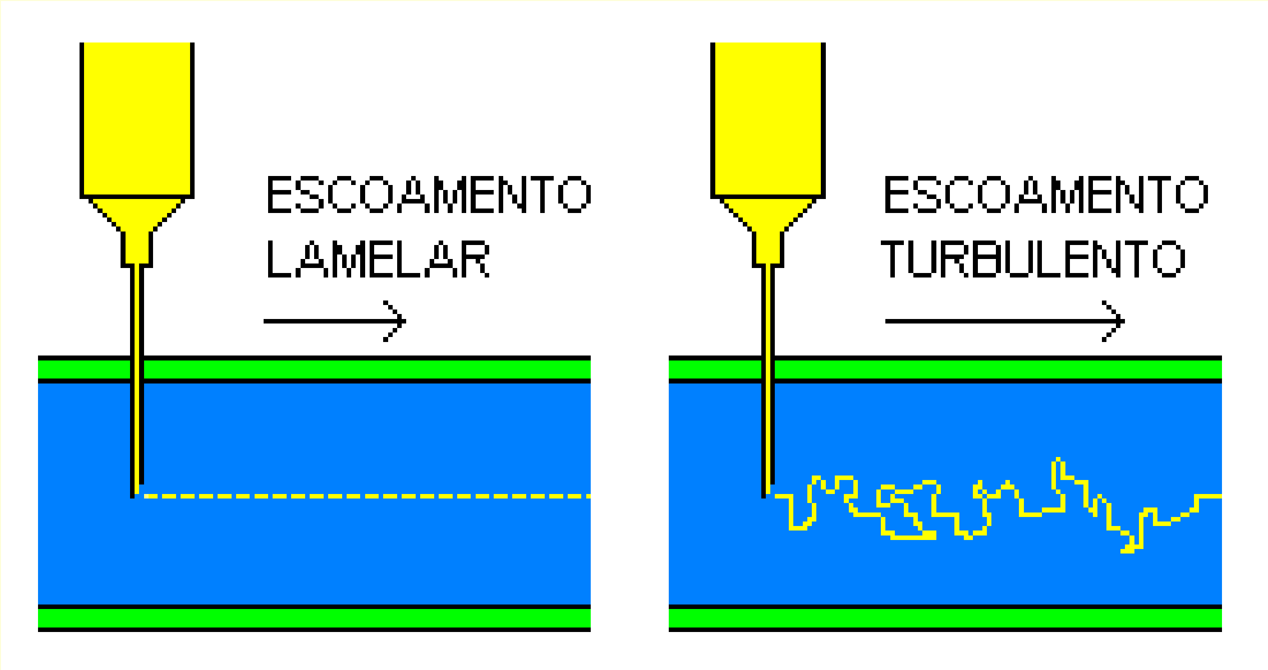
Canal artificial = Conduto livre

Condições de operação

Condutos livres funcionam sempre por gravidade. Sua construção exige um nivelamento cuidadoso do terreno, pois devem ter declividades pequenas e constantes.

Condutos forçados podem funcionar por gravidade, aproveitando a declividade do terreno, ou por recalque (bombeamento), vencendo desníveis entre o ponto de captação e o ponto de utilização.

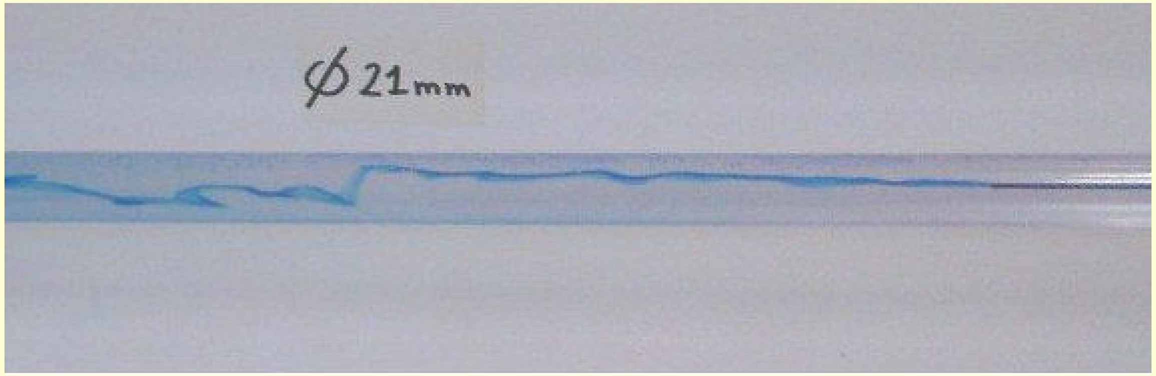
Regimes de escoamento

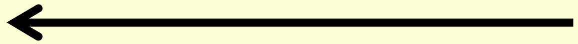


Experiência de Reynolds

Regimes de escoamento

Fluxo em regime laminar





Fluxo em regime turbulento

Regimes de escoamento

O estabelecimento do regime de escoamento depende do valor de uma expressão sem dimensões, denominado número de Reynolds (Re).

$$\mathrm{Re} = \frac{V.D}{\nu}$$

Na qual:

V = velocidade do fluido (m/s);

D = diâmetro da canalização (m);

ν = viscosidade cinemática (m^2/s).

Regimes de escoamento

Re < 2.000 → regime laminar

As partículas fluidas apresentam trajetórias bem definidas e não se cruzam;

Re > 4.000 regime turbulento

Movimento desordenado das partículas;

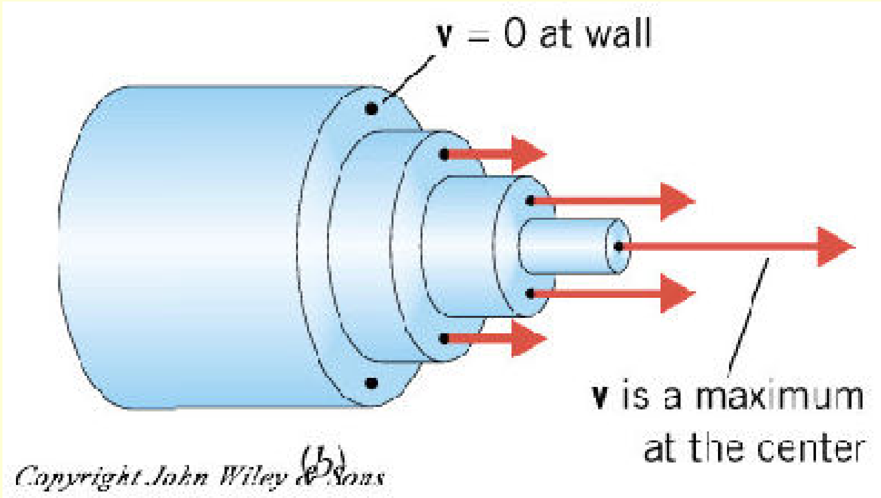
Entre esses dois valores encontra-se a denominada zona crítica.

ESCOAMENTO EM CONDUTOS FORÇADOS

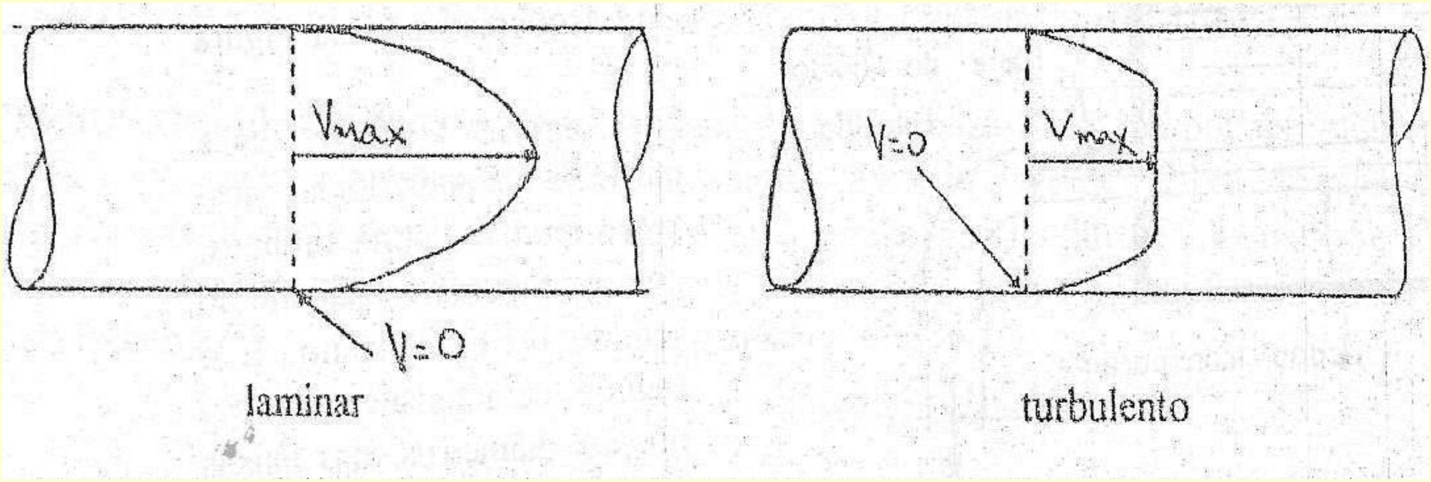
O líquido ao escoar em um conduto é submetido a forças resistentes exercidas pelas paredes da tubulação (atrito devido à rugosidade da canalização) e pelo próprio líquido (viscosidade).

ESCOAMENTO EM CONDUTOS FORÇADOS

Numa região próxima à parede do tubo, denominada *camada limite,* há um elevado gradiente de velocidade, que causa um efeito significante.



ESCOAMENTO EM CONDUTOS FORÇADOS



Exemplo

Em uma tubulação de 150 mm de diâmetro escoa água à temperatura de 20°C a uma velocidade de 2,50 m/s. Determinar o regime de escoamento na tubulação. Dados: $\mu = 1{,}01 \times 10^{-3}$ N s/m e $\rho = 1000$ kg/m^3.

Solução:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{1000\,\dfrac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \times 2{,}5\,\dfrac{m}{s} \times 0{,}15\mathrm{m}}{1{,}01 \times 10^{-3}\,\dfrac{Ns}{m^2}}$$

$$\mathrm{Re} = 3712871{,}29$$

Como Re = 3712871,29 > 4000, o regime de escoamento é turbulento

Exercícios

1) Em uma tubulação de 100 mm de diâmetro circula óleo combustível a 20ºC (ρ = 869 kg/m^3; μ = 0,104 Ns/m^2) a velocidade de 2,0 m/s. Determinar o regime de escoamento.

2) Um fluido a 20ºC escoa à razão de 8 L/s, através de tubulação de 100 mm de diâmetro. Determinar o regime de escoamento se o fluido em questão for: a) hidrogênio (ν = 1,08x10^{-4} m^2/s); b) ar atmosférico (ν = 1,51x10^{-5} m^2/s); c) gasolina (ν = 4,06x10^{-7} m^2/s); d) água (ν = 1,02x10^{-6} m^2/s); e) mercúrio (ν = 1,15x10^{-7} m^2/s); f) glicerina (ν = 1,18x10^{-3} m^2/s).

CONDUTOS SOB PRESSÃO

A conseqüência disso é o surgimento de forças cisalhantes que reduzem a capacidade de fluidez do líquido.

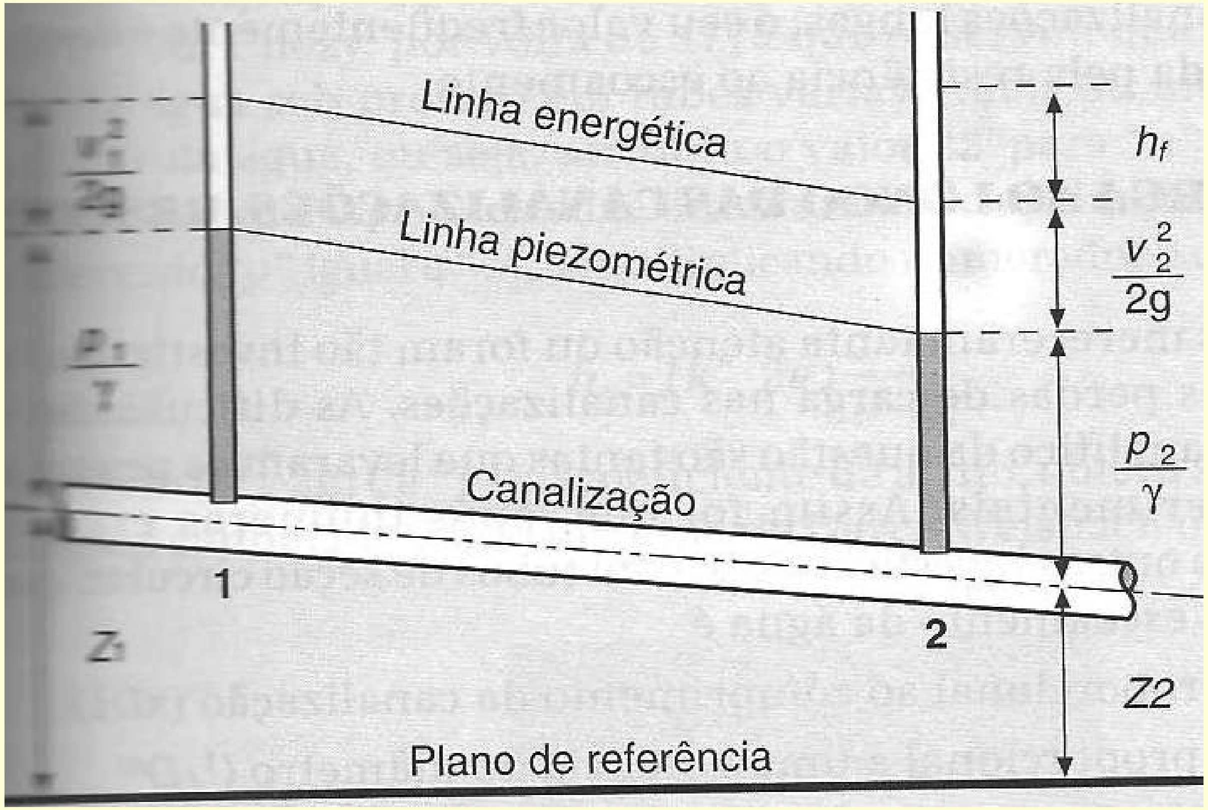
CONSEQÜÊNCIA:

O líquido ao escoar dissipa parte de sua energia, principalmente em forma de calor.

CONDUTOS SOB PRESSÃO

Perda de carga: conceito e natureza

A resistência ao escoamento no caso do regime laminar é devida à inteiramente à viscosidade.



CONDUTOS SOB PRESSÃO

Perda de carga: classificação

A energia dissipada não é mais recuperada como energia cinética e/ou potencial e por isso, denomina-se perda de energia ou perda de carga.

Para efeito de estudo, a perda de energia, denotada por Δh ou Hf, é classificada em:

- **Perdas de energia contínuas;**
- **Perdas de energia localizadas**

CONDUTOS SOB PRESSÃO

Perda de energia contínua: Distribuída ao longo do comprimento da canalização.

Ocorre devido ao atrito entre as diversas camadas do escoamento e ainda ao atrito entre o fluido e as paredes do conduto (efeitos da viscosidade e da rugosidade);

CONDUTOS SOB PRESSÃO

Fatores determinantes:

- **Comprimento da canalização;**
- **Diâmetro da canalização;**
- **Velocidade média do escoamento;**
- **Rugosidade das paredes dos canos.**

Não influem:

- **Posição dos canos;**
- **Pressão interna.**

CONDUTOS SOB PRESSÃO

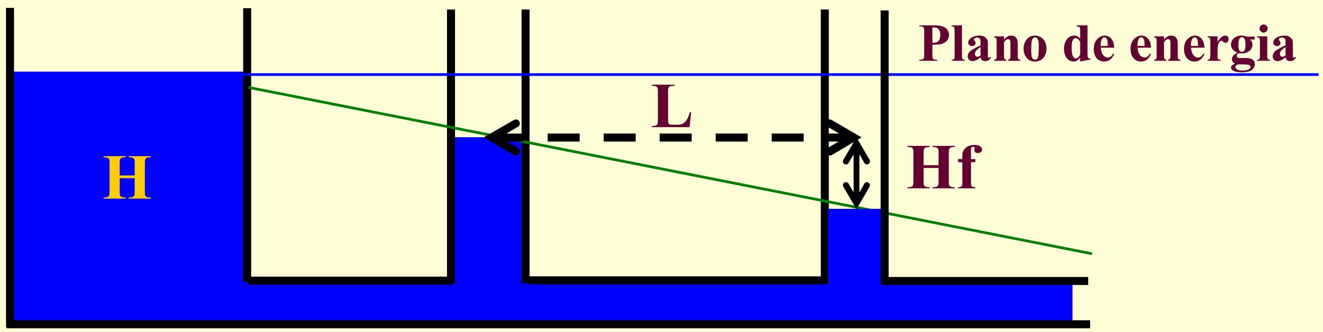
Perda de energia localizada:

Ocorre devido devida à presença de conexões e peças existentes em alguns pontos da canalização, que geram turbulência adicional e maior dissipação de energia naquele local.

Exemplo de singularidades: cotovelo, curva, tê, alargamento, redução de diâmetro, registro, etc.

Importantes no caso de canalizações curtas e com muitas singularidades (instalações prediais, rede urbana, sistemas de bombeamento etc.).

CONDUTOS SOB PRESSÃO



A perda ao longo da canalização é uniforme em qualquer trecho de dimensões constantes, independente da posição da tubulação.

$$\frac{Hf}{L} = j$$

Com j = perda de carga por metro de tubo

Hf = perda de pressão (mH_2O);

L = comprimento do trecho da tubulação (m).

Perda de carga

As fórmulas utilizadas para o cálculo das perdas de carga contínuas tem o seguinte aspecto:

$$h_f = c\left(\frac{L}{D^n}\right)V^m$$

onde: $\mathbf{h_f}$ = perda de carga ou energia; **L** = comprimento do conduto; **D** = diâmetro do conduto, **m** e **n** = potências determinadas teórica ou empiricamente e **c** = coeficiente que leva em conta as características do fluido e do conduto.

Perda de carga: fórmula universal (Darcy-Weisbach)

Apresenta fundamento teórico rígido, tendo sido deduzida através da aplicação da análise dimensional. Este tipo de análise permite estabelecer a relação entre as diferentes grandezas que afetam a perda de carga.

Para um conduto circular tem o seguinte formato:

$$h_f = f\,\frac{L\mathrm{v}^2}{D2g}$$

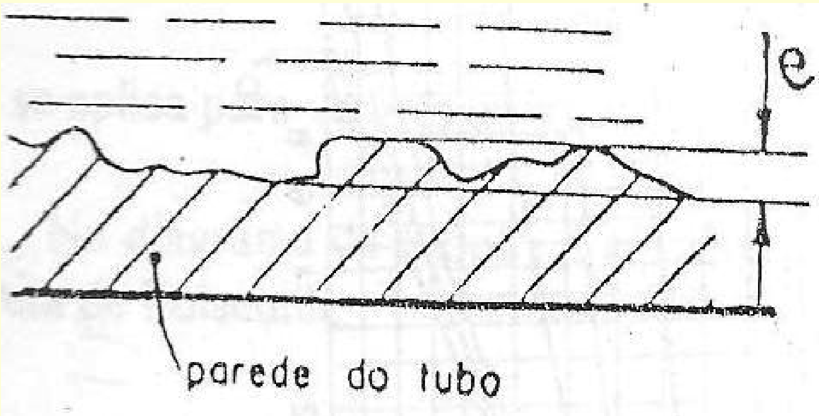
onde: $\mathbf{h_f}$ = perda de carga ou energia expressa em energia por unidade de peso; f = coeficiente de atrito; **L** e **D** = comprimento e diâmetro do conduto, **v** = velocidade média de escoamento e **g** = aceleração da gravidade

Perda de carga: fórmula universal (Darcy-Weisbach)

O coeficiente de atrito (f) é um adimensional em função do Re e da rugosidade relativa do conduto.

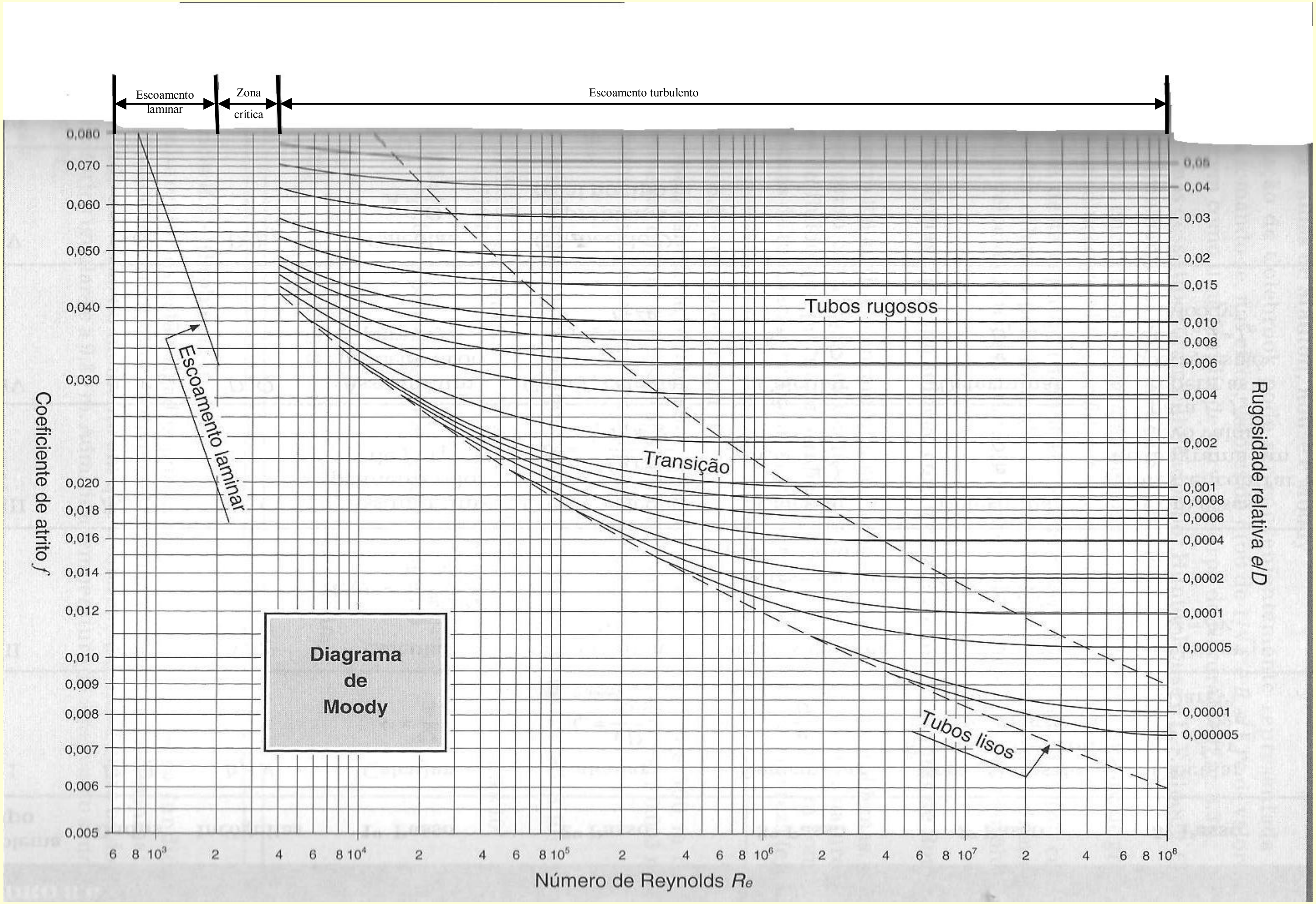
A rugosidade relativa é definida como a razão enre a rugosidade absoluta (e) e o diâmetro do conduto. Assim:

$$\text{rugosidade relativa} = \frac{e}{D}$$



A rugosidade (e) é dada pela média das alturas das asperezas da parede do tubo.

Obtenção de f pelo diagrama de Moody



Exemplo

Uma tubulação de aço rebitado, com 0,30 m de diâmetro e 300 m de comprimento, conduz 130 L/s de água a 15,5ºC. A rugosidade do tubo é 0,003 m. Determinar a velocidade média e a perda de carga. Dado a viscosidade cinemática da água a 15,5ºC = 0,000001132m²/s (valor tabelado).

Solução:

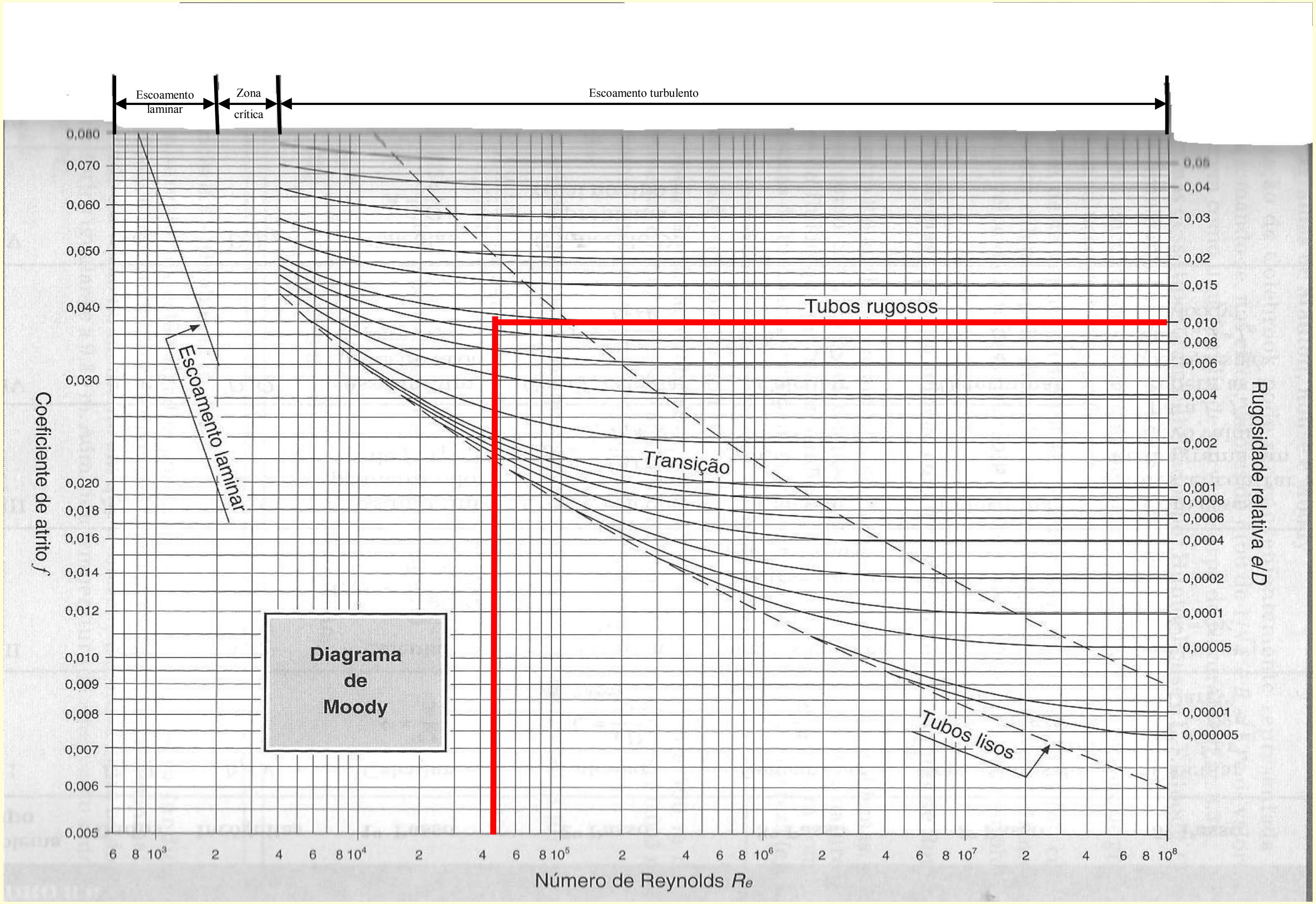
$$\mathrm{v} = \frac{Q}{A} = \frac{0{,}130}{0{,}0707} = 1{,}84\,\mathrm{m/s}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\mathrm{vD}}{\upsilon} = \frac{1{,}84 \times 0{,}30}{0{,}000001123} \cong 490.000 = 4{,}9 \times 10^5$$

$$\frac{e}{D} = \frac{0{,}003}{0{,}3} = 0{,}01,\ \text{e pelo diagrama : f} = 0{,}038\ \text{(Moody)}$$

$$h_f = f\frac{L\mathrm{v}^2}{D2g} = 0{,}038\frac{300 \times 1{,}84^2}{0{,}30 \times 2 \times 9{,}8} \therefore hf = 6{,}55m$$

Obtenção de f pelo diagrama de Moody



Obtenção de f pelo uso de fórmulas

A fórmula a ser utilizada no cálculo de f depende do regime de escoamento.

Regime laminar: neste caso, *f* é independente da rugosidade relativa do conduto, sendo unicamente em função de *Re*, podendo ser obtido pela expressão:

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}}$$

que se aplica para valores de $\mathrm{Re} \leq 2000$

Obtenção de f pelo uso de fórmulas

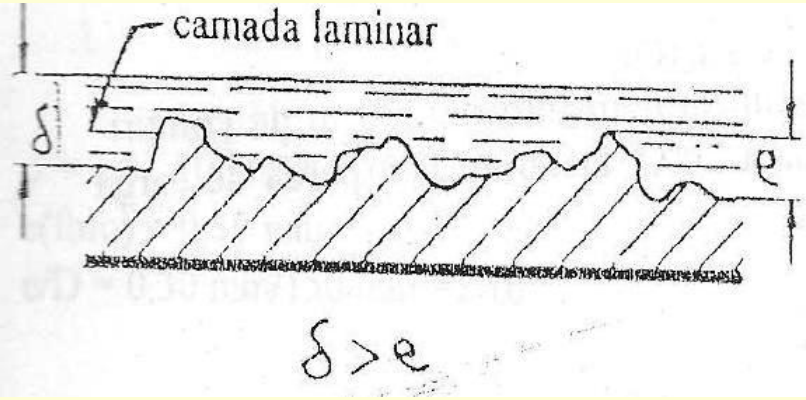
Regime turbulento: há necessidade de se fazer uma distinção entre tubos hidraulicamente lisos e tubos hidraulicamente rugosos.

Tubo hidraulicamente liso (THL) quando a sua rugosidade absoluta, ou seja, o tamanho médio de suas asperezas for menor do que a espessura da camada laminar aderente a sua parede.

Fórmula de Blasius

$$f = 0{,}3164 R^{-0{,}25}$$

válida para Re < 100.000



Fórmula de Karman-Prandtl

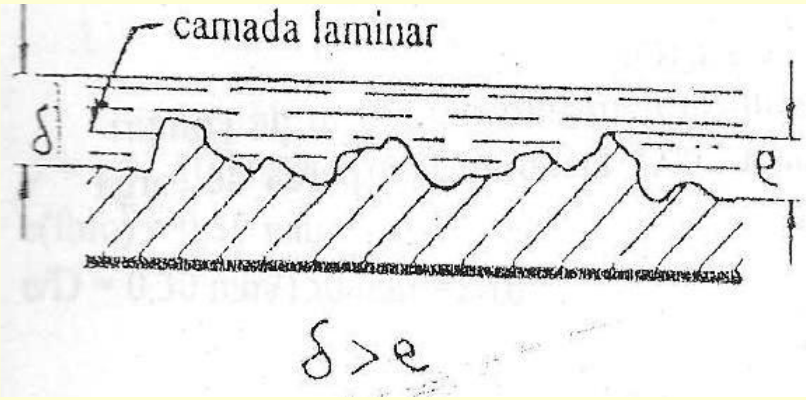
$$f = \left[2\log\left(\mathrm{Re}\sqrt{f}\right) - 0{,}8\right]^{-2}$$

válida para Re ≥ 4.000

Obtenção de f pelo uso de fórmulas

Regime turbulento: há necessidade de se fazer uma distinção entre tubos hidraulicamente lisos e tubos hidraulicamente rugosos.

Tubo hidraulicamente liso (THL) quando a sua rugosidade absoluta, ou seja, o tamanho médio de suas asperezas for menor do que a espessura da camada laminar aderente a sua parede.



Fórmula de Blasius

$$f = \frac{0,3164}{R^{0,25}}$$

válida para Re < 100.000

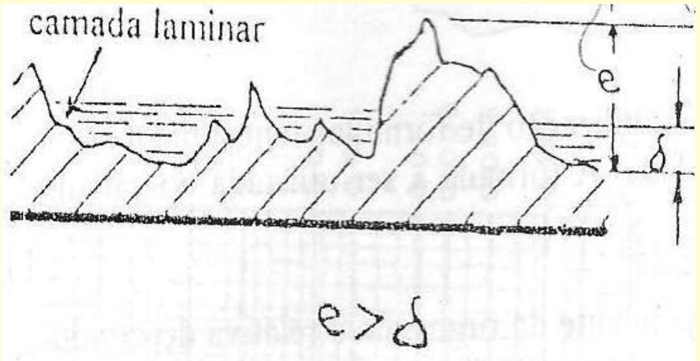
Fórmula de Karman-Prandtl

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log(\mathrm{Re}\sqrt{f}) - 08$$

válida para Re ≥ 4.000

Obtenção de f pelo uso de fórmulas

Tubo hidraulicamente rugoso (THR) quando a sua rugosidade absoluta (e) for maior do que a espessura da camada laminar e, neste caso as asperezas adentram à zona turbulenta do movimento.



Fórmula de Karman-Prandtl

$$f = \left[1{,}14 - \log\left(\frac{e}{D}\right)\right]^{-2}$$

Fórmula de Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{e}{3{,}71D} + \frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right)$$

Exemplo

Por uma canalização nova de cimento-amianto de 200 m de comprimento e 25 mm de diâmetro escoa 1 L/s de água à 20ºC. Determinar a perda de carga contínua (h_f) devido ao escoamento.

Solução:

ν= 1,01x10^{-6} m^2/s a 20ºC

Rugosidade absoluta para tubo cimento-amianto (e) = 0,025 mm

Rugosidade relativa = (e/D) = 0,025mm/25 mm = 0,001= 10^{-3}

$$V = \frac{Q}{A} = V = 1{,}273\frac{Q}{D^2} = 1{,}273\frac{1\times10^{-3}\,\text{m/s}}{(0{,}025m)^2} = 2{,}04\text{m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{V.D}{\nu} = \frac{2{,}04\times0{,}025}{1{,}01\times10^{-6}} = 50.495$$ Como Re = 50.495 > 4.000, o fluxo é turbulento

$$\text{f} = \left[1{,}14 - 2\log\left(\frac{e}{D}\right)\right]^{-2} = \left[1{,}14 - 2\log 0{,}001\right]^{-2}$$

$$f = \left[1{,}14 - 2(-3)\right]^{-2} = 0{,}020$$

$$h_f = f\frac{L\text{v}^2}{D2g} = 0{,}020\frac{200\times2{,}04^2}{0{,}025\times2\times10}$$

$$\therefore hf = 33{,}29mca$$

CONDUTOS SOB PRESSÃO

Fórmula de Hazen-Willians

Mais utilizada;

$$J = \frac{10,646}{D^{4,87}} * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}$$

a) escoamento turbulento de transição;

b) líquido: água a 20°C, pois não leva em conta o efeito viscoso;

c) diâmetro: em geral maior ou igual a 4";

d) origem: experimental com tratamento estatístico dos dados;

e) aplicação: redes de distribuição de água, adutoras, sistemas de recalque.

Q = vazão ou descarga (m^3/s);
V = velocidade média do líquido no tubo (m/s);
D = diâmetro do tubo (m);
j = perda de carga unitária (mH_2O/m linear de tubo);
C = Coeficiente de rugosidade do tubo.

CONDUTOS SOB PRESSÃO

Fórmula de Hazen-Willians

$$Q = 0{,}2788 * C * D^{2,63} * J^{0,54}$$

$$V = 0{,}355 * C * D^{0,63} * J^{0,54}$$

$$D = \left(\frac{3{,}587 * Q}{J^{0,54} * C} \right)^{0,38}$$

$$J = \frac{10{,}646}{D^{4,87}} * \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852}$$

Q = vazão ou descarga (m^3/s);
V = velocidade média do líquido no tubo (m/s);
D = diâmetro do tubo (m);
j = perda de carga unitária (mH_2O/m linear de tubo);
C = Coeficiente de rugosidade do tubo.

VALORES DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE C PARA A FÓRMULA DE HAZEN-WILLIANS

Material do tubo	Coeficiente C
Plástico Diâmetro até 50mm Diâmetro entre 60 e 100 mm Diâmetro entre 125 e 300 mm	 125 135 140
Ferro fundido (tubos novos)	130
Ferro fundido (tubos com 15 a 20 anos)	100
Manilhas de cerâmica	110
Aço galvanizado (novos)	125
Aço soldado (novos)	110

CONDUTOS SOB PRESSÃO

Fórmula de Fair-Whipple-Siao

(indicada para o cálculo de pequenos diâmetros e de instalações domiciliares de até 50 mm de diâmetro)

$$Q = 55,934.D^{2,71}.j^{0,57}$$

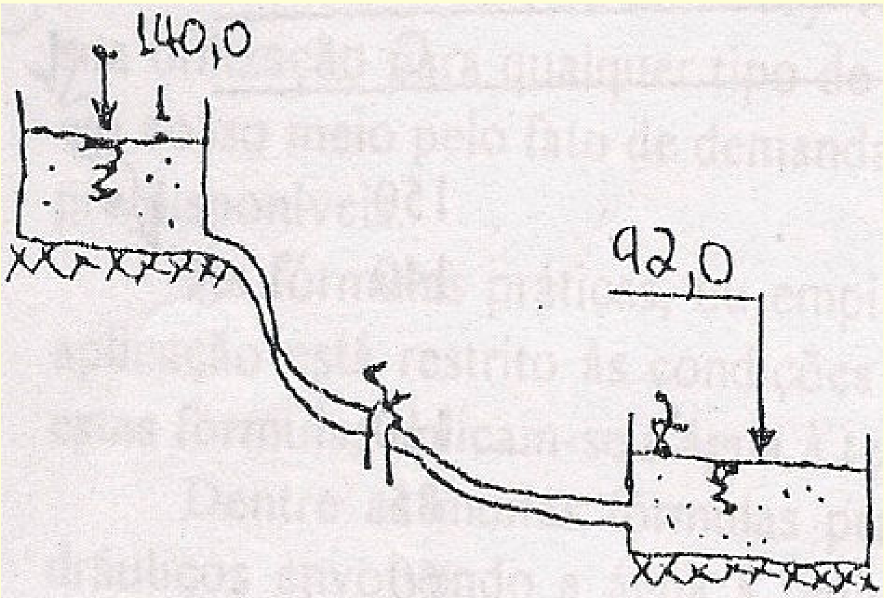
Q é a vazão em m3/s;

D é o diâmetro em m;

J é a perda de carga unitária.

EXEMPLOS

Calcular a vazão fornecida por uma adutora de ferro fundido nova, sem revestimento, com 3200 m de comprimento e 200 mm de diâmetro. A adutora é alimentada por um reservatório cujo nível está na cota 140,00 e a descarga em um reservatório com nível na cota 92,00. Desprezar as perdas de carga localizadas. Qual será a vazão quando a adutora tiver 20 anos de uso?



C = 130 (fofo novo)

C = 90 para 20 anos de uso

EXEMPLOS

Dimensionar uma linha lateral de irrigação, instalada em nível, com as características de projeto abaixo, utilizando a fórmula de Hazen-Williams.

Linha lateral: comprimento (L) = 144 m.

tubos de alumínio de engate rápido (C = 120)

Aspersor: pressão de serviço = 3 atm

vazão (q) = 3,63 m3/h

espaçamento: 18 X 24 m.

Um critério consagrado no dimensionamento de linhas laterais consiste em estabelecer que a variação da pressão permitida entre o primeiro e o último aspersor não deve ultrapassar 20% da pressão de serviço do aspersor. Deve ser observado que esta variação de pressão corresponde à perda de carga total permitida na lateral.

Em uma linha de irrigação a vazão é decrescente no sentido do escoamento, o que se deve às múltiplas saídas para abastecimento dos aspersores. Neste caso, a perda de carga para dimensionamento (hf_{dim}) é igual a perda de carga que ocorreria (h_f) se a lateral não tivesse nenhuma saída (sem aspersores) dividida por um fator F, denominado de fator de atrito de Christiansen. Este fator, leva em consideração a diminuição da vazão ao longo da lateral.

O fator F de Christiansen, quando o primeiro aspersor está situado a meio espaçamento da linha lateral, pode ser calculado pela expressão:

$$F = \frac{2N}{2N-1}\left[\frac{1}{m+1} + \frac{(m-1)^{0,50}}{6N^2}\right]$$

onde: N = número de aspersores ao longo da lateral e m = expoente do termo velocidade da fórmula para estimar a perda de carga contínua:

m = 1,852 para a fórmula de Hazen-Williams

m = 2 para a fórmula racional

m = 1,75 para a fórmula de Flamant

m = 1,9 para a fórmula de Scobey

Na fórmula acima quando N ≥ 15, o termo $\frac{(m-1)^{0,50}}{6N^2}$ torna –se muito pequeno em relação a $\frac{1}{m+1}$,da ordem de 5% de sua grandeza, podendo ser desconsiderado sem grandes prejuízos à exatidão dos cálculos.

Solução:

N = nº saídas = nº de aspersores = 144m/18m = 8

Perda de carga permitida (h_f) = 20% da pressão de serviço do aspersor

m = 1,852

h_f = 0,2 x 3 atm = 0,6 atm

h_f = 0,6 atm x 10 mca = 6,2 mca

$$F = \frac{2N}{2N-1}\left[\frac{1}{m+1} + \frac{(m-1)^{0,50}}{6N^2}\right]$$

$$F = \frac{2(8)}{2(8)-1}\left[\frac{1}{1,852+1} + \frac{(1,852-1)^{0,50}}{6(8)^2}\right] = 0,377$$

hf_{dim} = hf/F

hf_{dim} = 6,2/0,377 mca

hf_{dim} = 16,46 mca

J = hf_{dim}/L = 16,46 mca/144m

J = 0,1143 mca/m tubo

Q = Nxq = 8x3,63m³/h

Q = 29,04 m³/h = 0,00807 m³/s

$$D = \left(\frac{3,587 * Q}{J^{0,54} * C}\right)^{0,38}$$

$$D = \left(\frac{3,587 * 0,00807}{0,1143^{0,54} * 120}\right)^{0,38}$$

$$D = 0,066m$$

Deve ser adquirido o diâmetro comercial imediatamente acima, ou seja, 70 mm

CONDUTOS SOB PRESSÃO

Fórmula de Flamant

A FHW tem sua aplicação recomendada para diâmetros iguais ou superiores a 50 mm. Porém nos sistemas de irrigação localizada, como o gotejamento e microaspersão, normalmente as linhas laterais e de distribuição possuem diâmetros inferiores a 50 mm e, neste caso, é particularmente indicado o uso da fórmula de Flamant.

$$J = 4\frac{bV^{1,75}}{D^{1,25}} \qquad J = 6{,}107\frac{bQ^{1,75}}{D^{4,75}}$$

onde J = perda de carga unitária (m/m),
V = velocidade de escoamento (m/s),
D = diâmetro do tubo (m),
Q = vazão (m^3/s) e
b = coeficiente que depende do material do tubo

CONDUTOS SOB PRESSÃO

Fórmula de Flamant

Valores de b para alguns materiais:

b = 0,000185 para tubos de ferro fundido ou aço galvanizado;
b = 0,000230 para tubos usados de ferro fundido ou aço galvanizado;
b = 0,000155 para tubos de cimento amianto;
b = 0,000185 para tubos de concreto;
b = 0,000135 para tubos de PVC ou polietileno.

Exemplo

Dimensionar uma linha lateral de gotejamento, instalada em nível com as seguintes características, utilizando a fórmula de Flamant.

linha lateral: comprimento (L) = 240 m
tubos de polietileno (b = 0,000135)

gotejador: pressão de serviço = 10 mca
vazão = 4 L/h
espaçamento = 4m x 6m

Solução:

N= nº de saídas = nº de gotejadores = 240m/4m = 60

Perda de carga permitida (h_f) = 20% da pressão de serviço do gotejador

m = 1,75

hf = 0,2 x 10 mca = 2 mca

$$F = \frac{2N}{2N-1}\left[\frac{1}{m+1} + \frac{(m-1)^{0,50}}{6N^2}\right]$$

$$F = \frac{2(60)}{2(60)-1}\left[\frac{1}{1,75+1} + \frac{(1,75-1)^{0,50}}{6(60)^2}\right] = 0,367$$

hf_{dim} = hf/F

hf_{dim} = 2,0/0,367 mca

hf_{dim} = 5,45 mca

J = hf_{dim}/L = 5,45 mca/240m

J = 0,0227 mca/m tubo

Q = Nxq = 60x 4L/h

Q = 240 L/h = 6,67x10^{-5} m^3/s

$$J = 6,107\frac{bQ^{1,75}}{D^{4,75}} \rightarrow D = \left[\frac{6,107bQ^{1,75}}{J}\right]$$

$$D = \left[\frac{6,107 \times 0,000135 \times (6,67 \cdot 10^{-5})^{1,75}}{0,0227}\right]^{\frac{1}{4,75}}$$

$$D = 0,00144 \cong 15mm$$