

INSTITUTO FEDERAL
Sertão Pernambucano
Campus Petrolina Zona Rural



HIDRÁULICA

AULA Nº 9.1

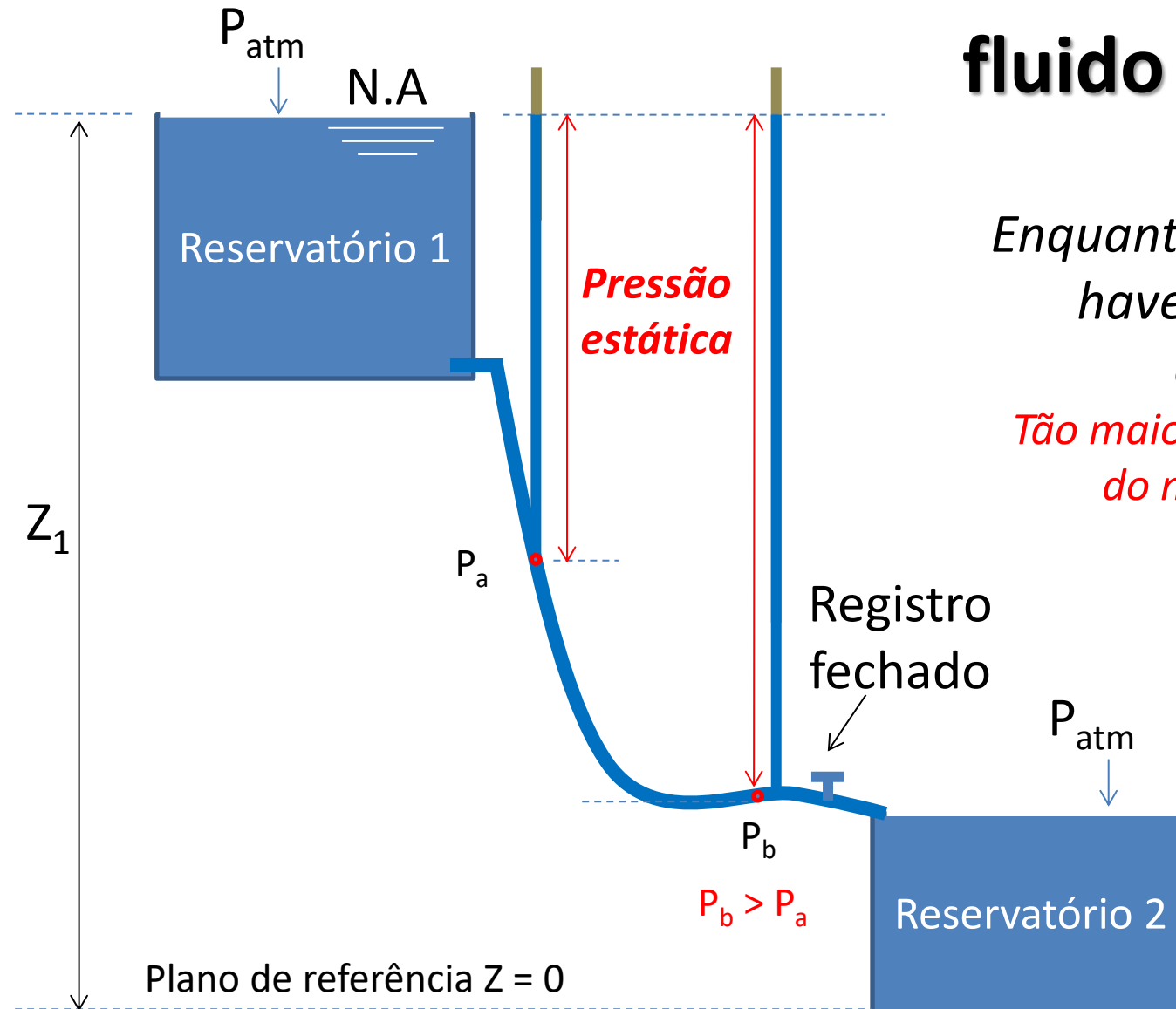
Condução Forçada – Parte 1
Eq. Universal de perda de carga

Prof. Dr. José Sebastião Costa de Sousa

Sumário da aula:

- Tipos de perdas de carga
- Equações universal de perda de carga
- Diagramas de Moody e Rouse
- Equações usadas para obtenção do fator f

Hidrostática fluido em repouso



Enquanto o registro estiver fechado não haverá fluxo e as pressões serão estáticas – hidrostática.

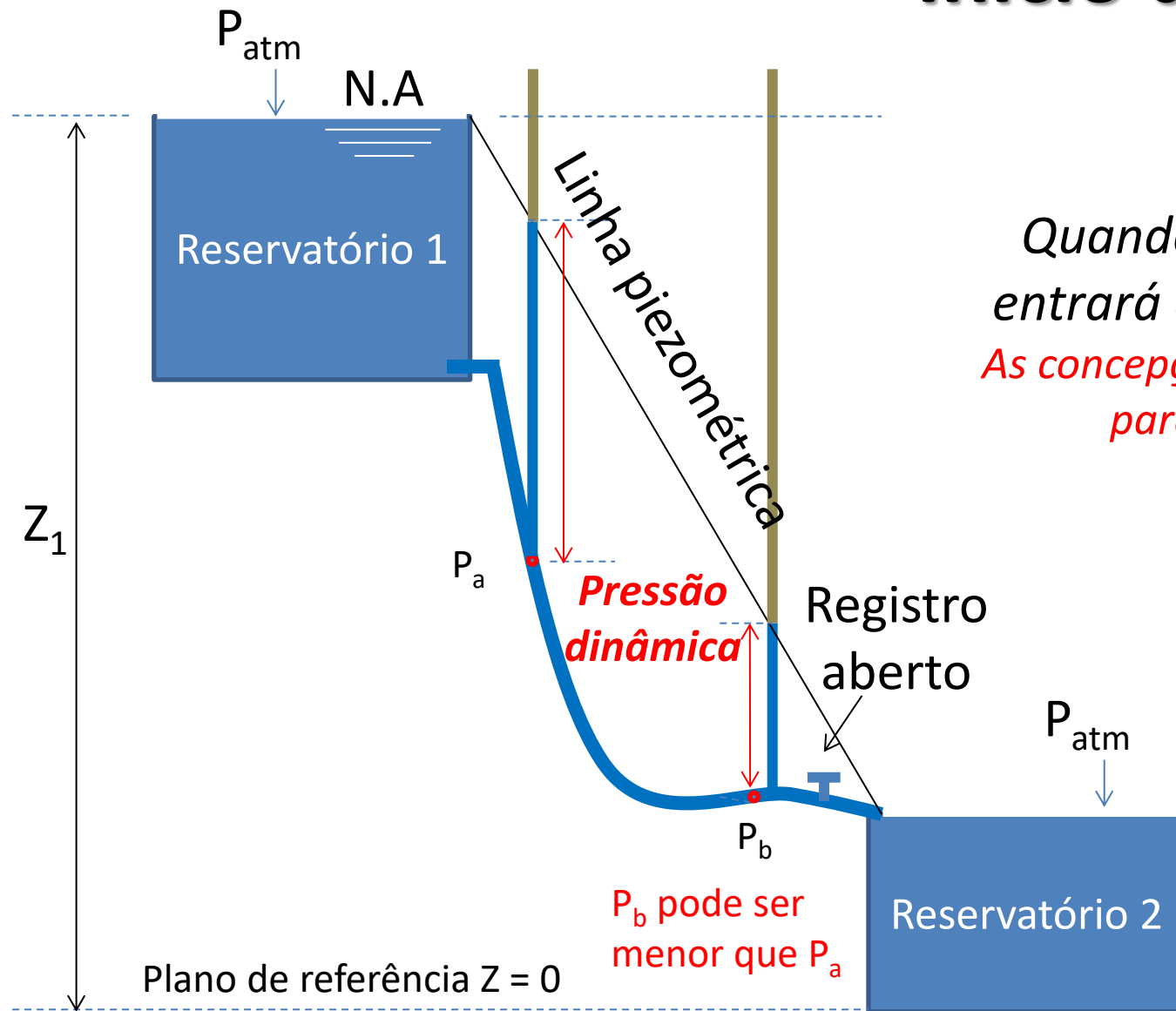
Tão maior será a pressão quando mais abaixo do nível da água estiver localizado o ponto em análise.

Nota:

$$\text{Pressão} = \rho * g * h$$

Tubulação – conjunto de tubos.

Início da condução

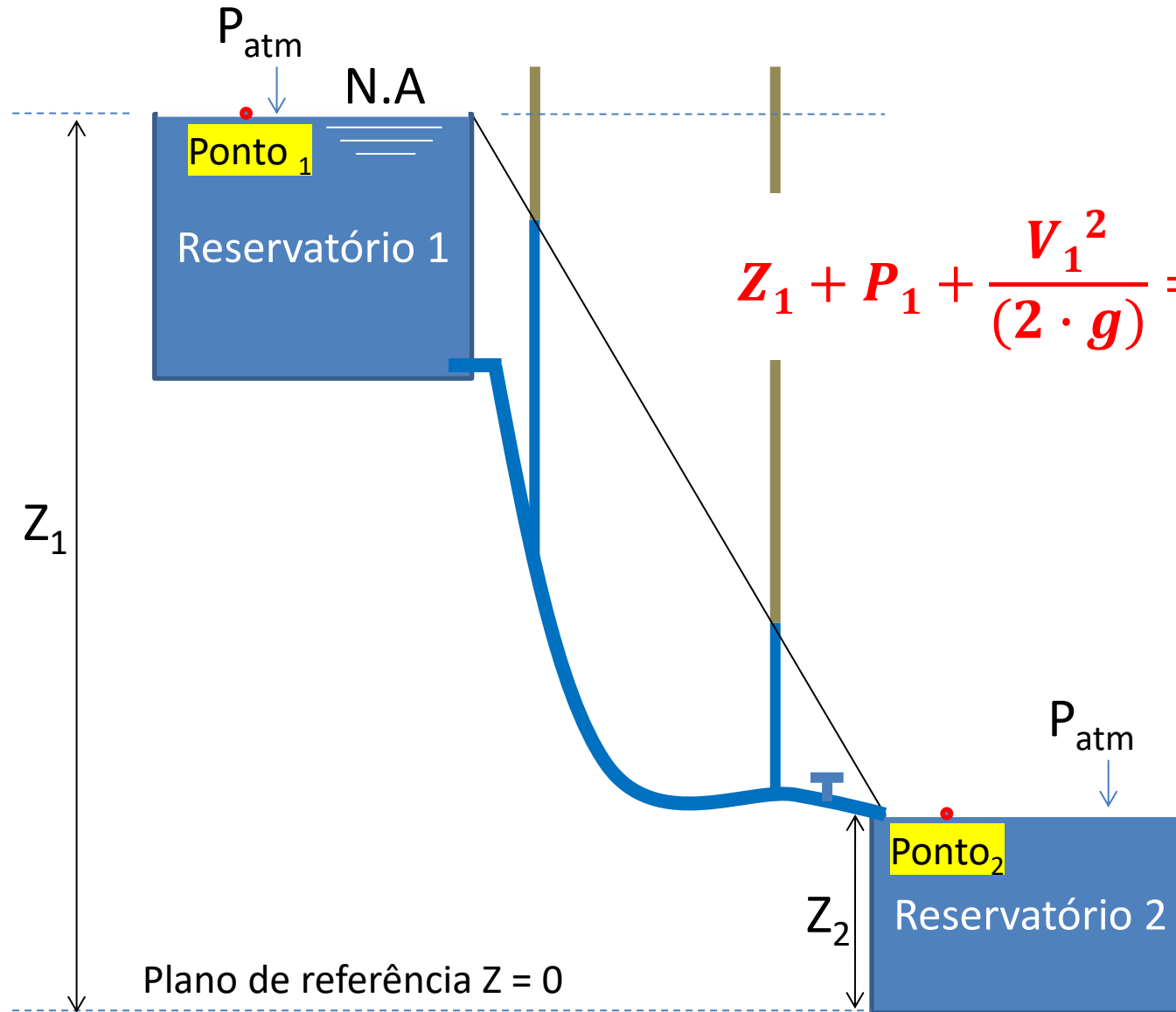


Quando o registro for aberto o fluido entrará em movimento - hidrodinâmica
As concepções de Bernoulli devem ser estudadas para entendimento do movimento.

Nota:

Linha piezométrica – somatório das cargas de posição e pressão.

Recorrendo ao Teorema de Bernoulli



$$Z_1 + P_1 + \frac{V_1^2}{(2 \cdot g)} = Z_2 + P_2 + \frac{V_2^2}{(2 \cdot g)} + \Delta H_{1-2}$$

Carga de posição
Carga de pressão
Carga cinética
Perda de carga

ΔH_{1-2} – perda de carga entre os pontos 1 e 2.

Nota-se que a Carga cinética (CC) é praticamente desprezível:

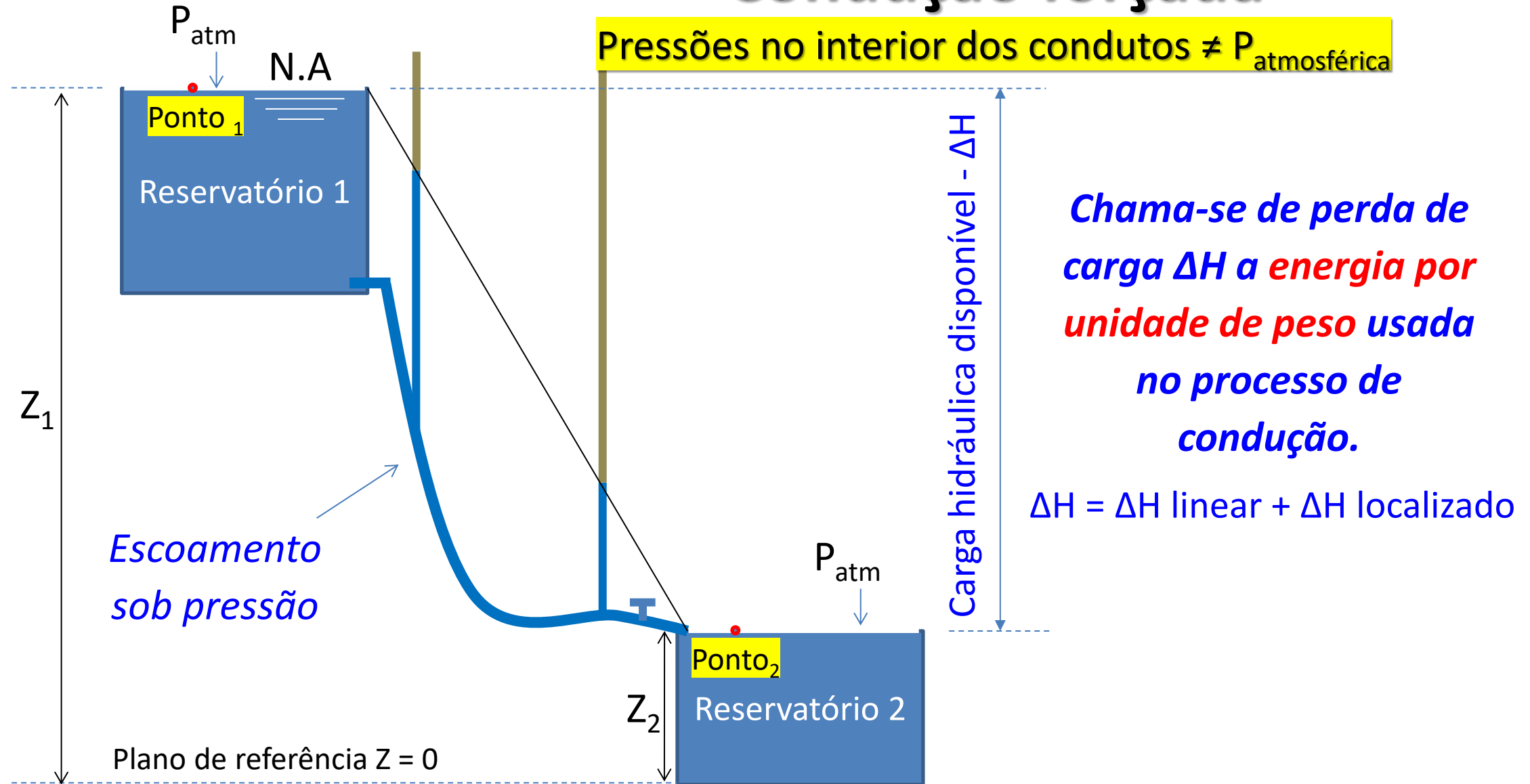
$V = 1,0 \text{ m/s} \rightarrow CC = 0,05 \text{ mca}$

$V = 1,5 \text{ m/s} \rightarrow CC = 0,11 \text{ mca}$

$V = 2,0 \text{ m/s} \rightarrow CC = 0,20 \text{ mca}$

$V = 3,0 \text{ m/s} \rightarrow CC = 0,46 \text{ mca}$

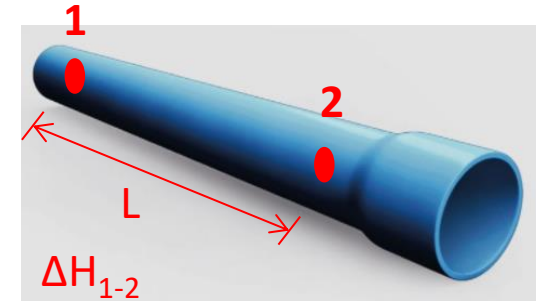
Condução forçada



Tipos de perdas de carga

Lineares

Ocorrem em partes retilíneas das tubulações – exclusivamente para o escoamento permanente e uniforme. *escoamento desenvolvido.*



Unitária - J

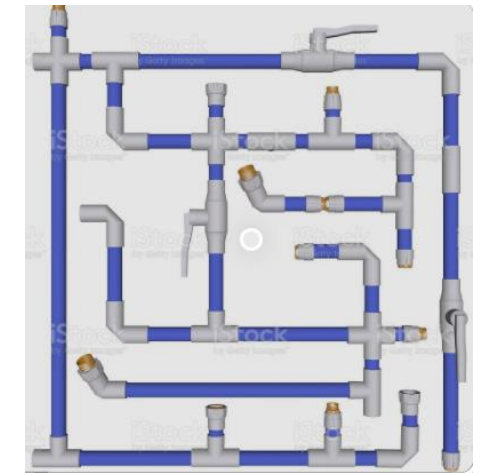
Perda de carga gerada em 1 metro de tubulação retilínea.

Localizadas

Perdas de carga geradas nas singularidades (peças etc.) da tubulação – movimento permanente uniforme ou variado.



Total - ΔH



Perda de carga ocorrida em todas a tubulação.

Aula de hoje: Perda de carga linear

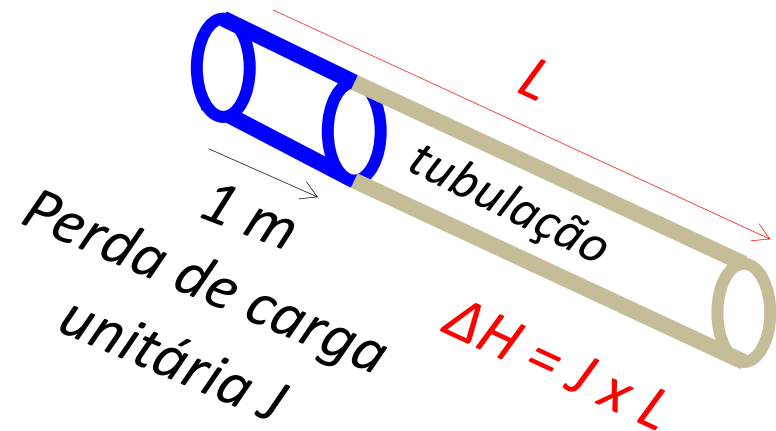
Perda de carga unitária (J) e total (ΔH) - Linear

- Unidades usuais: mca/m ou **m/m** (para J) e mca (para ΔH).
- Ocorre por choques internos e por fricção nas paredes dos condutos.
- Sofre influência da velocidade de escoamento (V), do diâmetro int. (D) e material do conduto e independe da pressão submetida ao conduto.
- J cresce com: o aumento de V; envelhecimento do conduto ou maior asperezas internas deste; com a diminuição de D.
- **Equação básica: $\Delta H = J \times L$**

ΔH – perda de carga total no conduto, mca

J – perda de carga unitária linear, m/m

L – comprimento do conduto, m



Para obtenção da perda de carga unitária (J)

Principais equações:

1. Equação universal ou equação de Darcy-Weisbach

Empíricas

2. Equação de Hazen-Williams
 3. Equação de Scobey
 4. Equação de Flamant
 5. Equação de Fair-Whipple-Hsiao
- * E ainda tabelas de catálogos.

*Para aula de hoje estudaremos
somente a equação universal.*

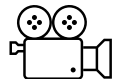
1. Equação Universal

$$J = f \times \frac{V^2}{(2 \times g \times D)}$$

$$J = 0,0827 \times f \times \frac{Q^2}{D^5}$$

Em que: J – perda de carga unitária, m/m; f – fator de atrito, adm.; V – velocidade média do fluxo, m/s; g – aceleração da gravidade, m/s²; D – diâmetro interno da tubulação, m; Q – vazão, m³/s.

- O fator de atrito pode ser obtido dos diagramas de Moody e Rouse em função do número de Reynolds (Rey = V*D/v).
- Ou de equações específicas como pode ser consultado no artigo: “Equação explícita para cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach em projetos de irrigação pressurizada” <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/726>.

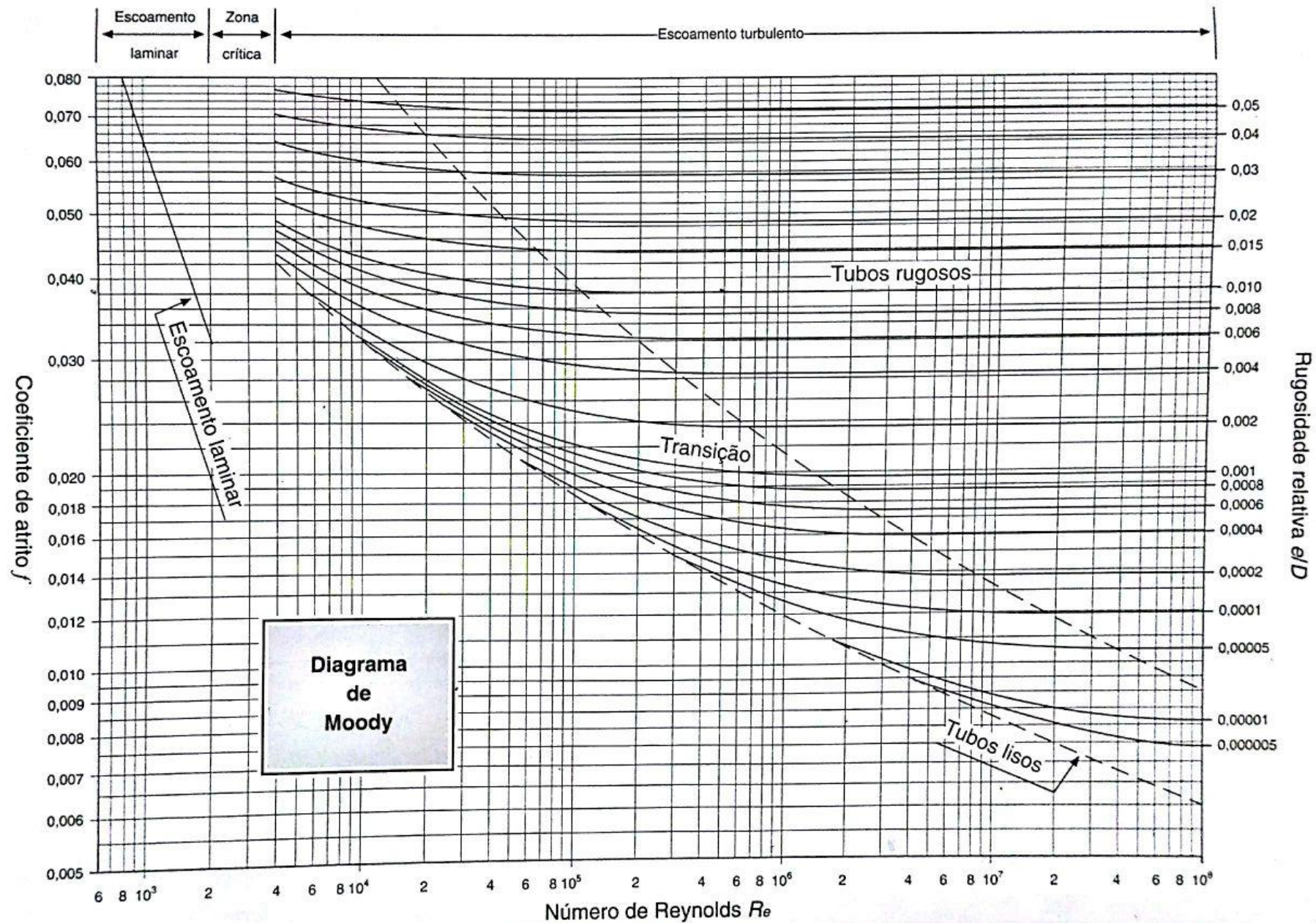


https://www.youtube.com/watch?v=pk_9HCvajbU&t=280s

PROBLEMAS TÍPICOS DE ESCOAMENTOS FORÇADOS

QUADRO 8.6							
Problema tipo	Dados	Incógnitas	1º Passo	2º Passo	3º Passo	4º Passo	5º Passo
I simples	D, Q	h_f, v	Calcular $v = \frac{Q}{A}$	Calcular $Re = \frac{vD}{\nu}$	Determinar $\frac{e}{D}$	Com valores de Re e de e/D , encontrar f no diagrama (Moody)	Calcular $h_f = \frac{fLv^2}{D2g}$ (Darcy)
II	D, h_f	v, Q	Calcular $Re\sqrt{f} = \sqrt{\frac{2gh_f D^3}{Lv^2}}$	Determinar $\frac{D}{e}$	Com os valores de $Re\sqrt{f}$ e de $\frac{D}{e}$ encontrar f no diagrama (Rouse)	Calcular $v = \sqrt{\frac{h_f D 2g}{fL}}$	Calcular $Q = Av$
III	h_f, Q	D, v	Assumir um primeiro valor de $f : f_1$	Com f_1 calcular $D_1 = \sqrt[5]{\frac{f_1 8LQ^2}{h_f \pi^2 g}}$	Calcular $Re = \frac{4Q}{\pi D_1 v}$	Determinar $\frac{e}{D_1}$	Com esses valores, encontrar no diagrama um novo valor para $f : f_2$
IV	h_f, v	D, Q	Assumir um primeiro valor para $f : f_1$	Com f_1 calcular $D_1 = \frac{f_1 Lv^2}{h_f 2g}$	Calcular $Re = \frac{vD_1}{\nu}$	Determinar $\frac{e}{D_1}$	repetir as operações até que $f_{n+1} = f_n$ (Moody)
V simples	v, Q	D, h_f	Calcular $A = \frac{Q}{v}$	Conhecido D , o problema recal no tipo I	—	—	—
VI simples	v, D	h_f, Q	Calcular $Q = Av$	Conhecido Q , o problema recal no tipo I	—	—	—

DIAGRAMA DE MOODY



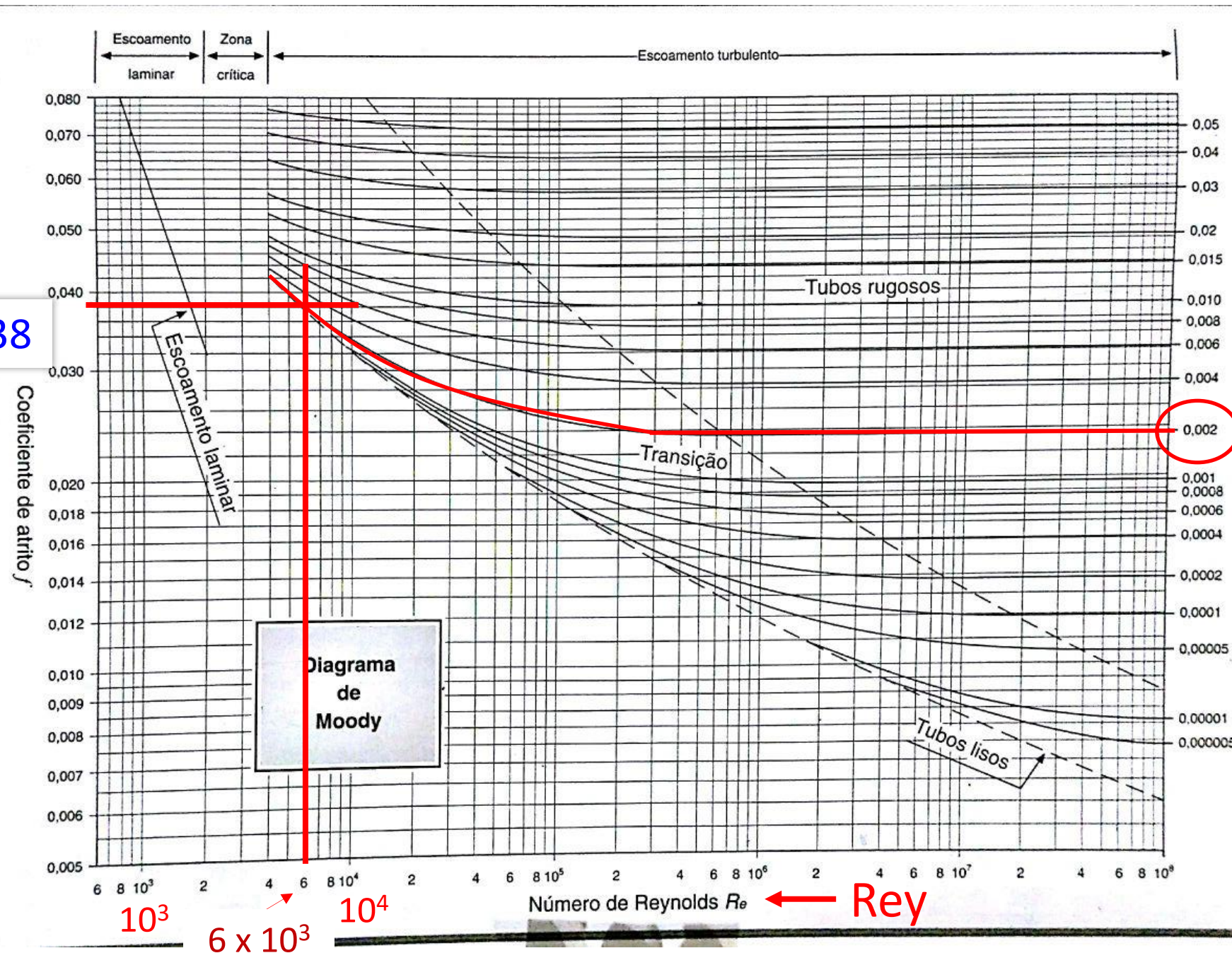
Fonte: Azevedo Netto et al. (1998)

O diagrama de Moody é semelhante a Harpa de Nikuradse. Existem regiões de fluxos específicos.

Clicar aqui para ver a Harpa de Nikuradse

DIAGRAMA DE MOODY

$f = 0,038$



Rugosidade relativa = e/D

e, ϵ ou k
Rugosidade Absoluta

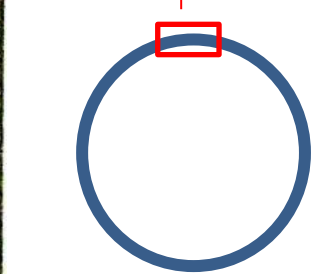
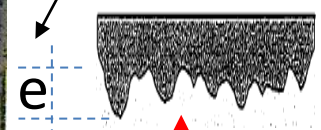


Tabela de e

Exemplo:
 $Rey = 6 \times 10^3$
 $e/D = 0,002$

Fonte: Azevedo Netto et al. (1998)

DIAGRAMA DE MOODY

Exemplo - Determinar Q , f , J e ΔH para os dados: $V = 2,50$ m/s;
 $D = 35$ mm; $\nu = 10^{-6}$ m²/s; $e = 0,020$ mm, $L = 100$ m.

$$Q = A \cdot V = (\pi \cdot 0,035^2 / 4) \cdot 2,50 \approx 0,002405 \text{ m}^3/\text{s} \approx 8.658 \text{ L/h.}$$

$$Re_y = V \cdot D / \nu = 2,50 \cdot 0,035 / (10^{-6}) = 87.500, \text{ ou, } 8,75 \times 10^4;$$

$$e/D = 0,020 \text{ mm} / 35 \text{ mm} = 0,000571 \approx 0,0006;$$

$$f = 0,0215; \quad J = 0,0215 \cdot 2,50^2 / (2 \cdot 9,80 \cdot 0,035) = 0,1959 \text{ m/m}$$

$$J = 0,0827 \cdot 0,0215 \cdot 0,002405^2 / 0,035^5 = 0,1958 \text{ m/m}$$

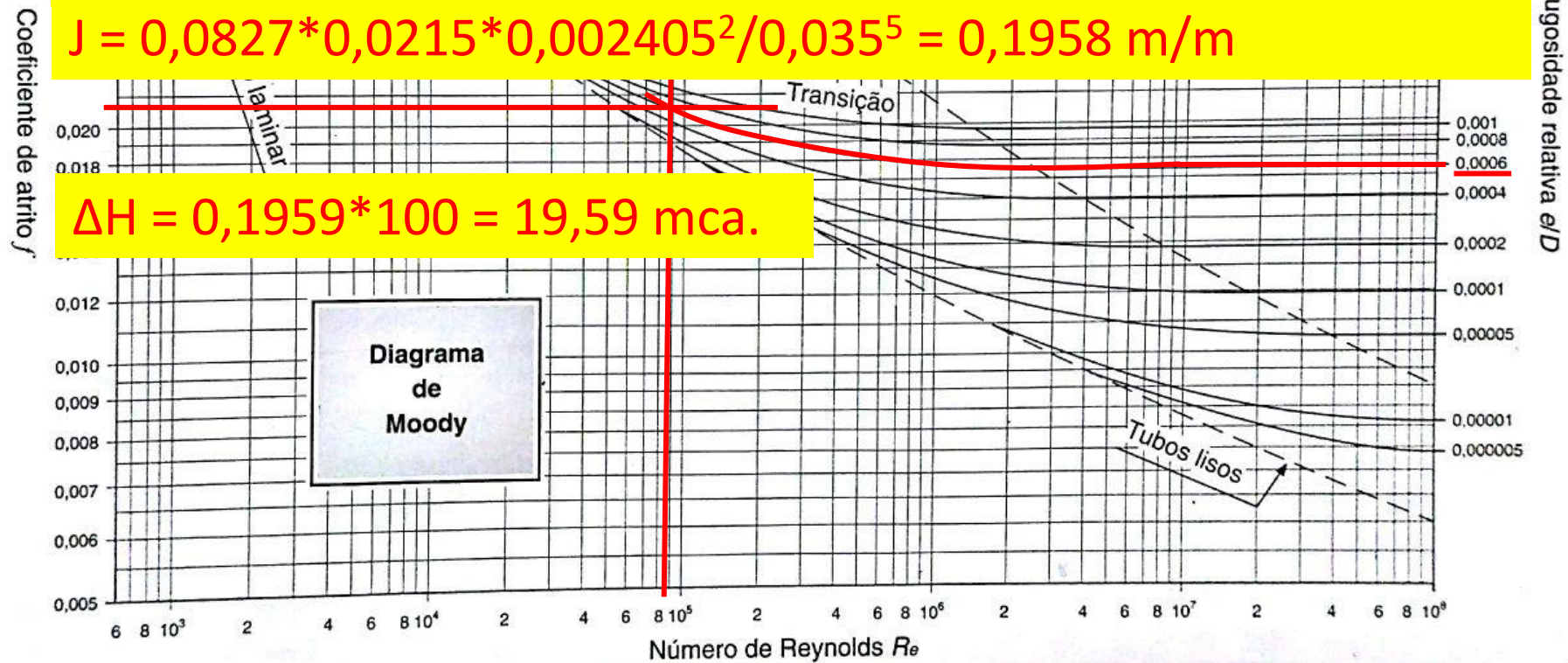


DIAGRAMA DE ROUSE

Quando vazão e velocidade são desconhecidas

Calcula-se:

$$Re\sqrt{f} = \sqrt{\frac{2gh_f D^3}{Lv^2}}$$

Depois:

$$\frac{D}{e}$$

Do diagrama obtêm-se f , e:

$$v = \sqrt{\frac{h_f D 2g}{f L}}$$

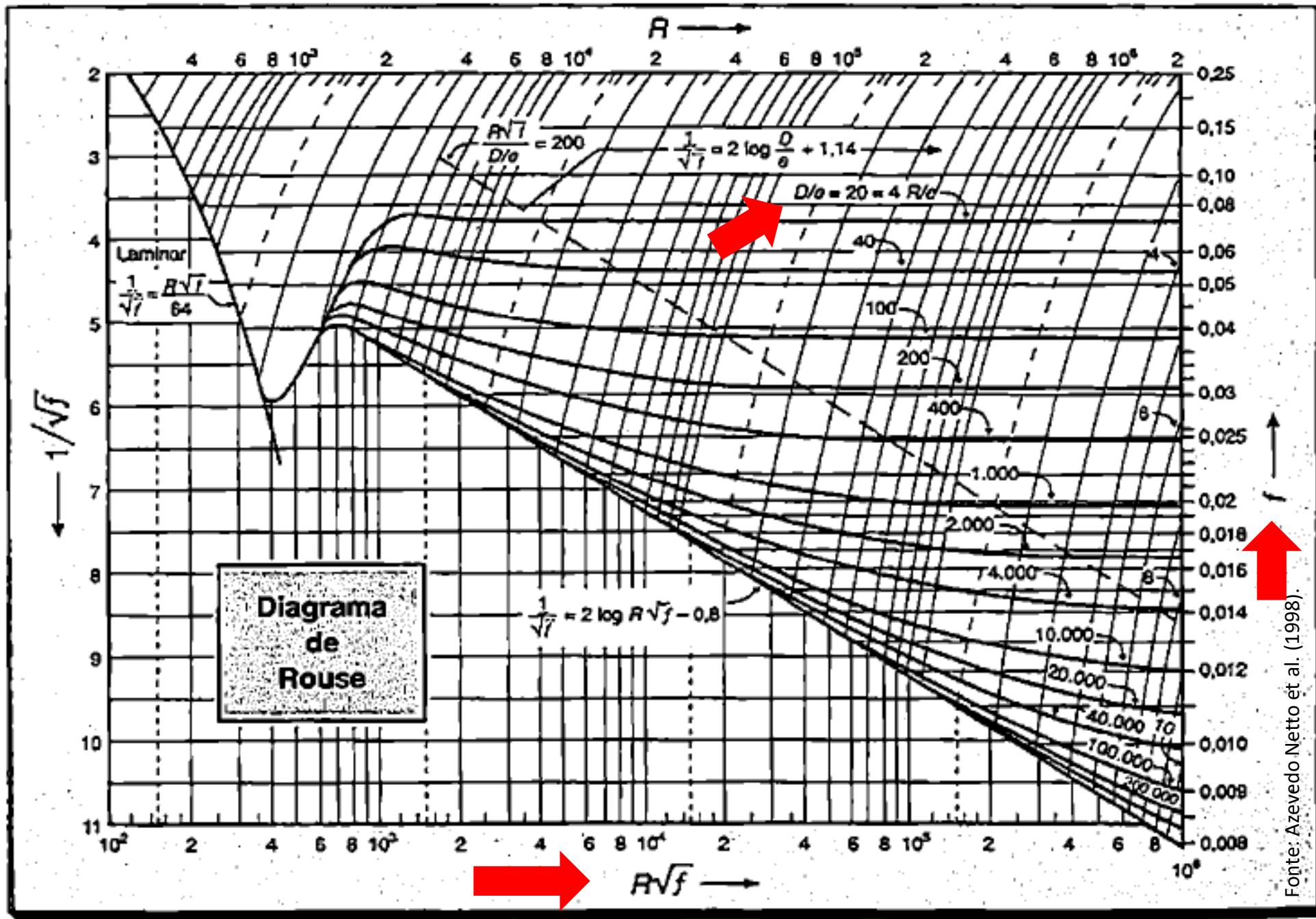


DIAGRAMA DE ROUSE

Quando vazão e velocidade são desconhecidas

Calcula-se:

$$Re\sqrt{f} = \sqrt{\frac{2gh_f D^3}{Lv^2}}$$

Depois:

$$\frac{D}{e}$$

Do diagrama obtêm-se f , e :

$$v = \sqrt{\frac{h_f D 2g}{fL}}$$

Exercício 8.6 – (Problema-tipo II)

Dois reservatórios estão ligados por uma canalização de ferro fundido ($e = 0,000260$ m) com 0,15 m de diâmetro e 360 m de extensão. Determinar a velocidade e a vazão no momento em que a diferença de nível entre os dois reservatórios igualar-se a 9,30 m. Admitir a temperatura da água como sendo de 26,5°C.

DIAGRAMA DE ROUSE

Quando vazão e velocidade são desconhecidas

Calcula-se:

$$R_e \sqrt{f} = \sqrt{\frac{2gh_f D^3}{Lv^2}}$$

Depois:

$$\frac{D}{e}$$

Do diagrama obtêm-se f , e:

$$v = \sqrt{\frac{h_f D 2g}{f L}}$$

Exercício 8.6 – (Problema-tipo)
Dois reservatórios estão ligados por um tubo de diâmetro $e = 0,000260$ m com $0,15$ m de comprimento. A vazão e a velocidade no momento em que os níveis dos reservatórios igualar-se a $9,30$ m e a temperatura de $26,5^\circ\text{C}$.

Solução:

Pela Tabela 8.10, tira-se a viscosidade ν da água a essa temperatura:
 $\nu = 0,000000866$ m²/s

Temperatura °C	Viscosidade cinemática m ² /s	Temperatura °C	Viscosidade cinemática m ² /s
0	0,000001792	20	0,000001007
2	0,000001673	22	0,000000960
4	0,000001567	24	0,000000917
6	0,000001473	26	0,000000876
8	0,000001386	28	0,000000839
10	0,000001308	30	0,000000804
12	0,000001237	32	0,000000772
14	0,000001172	34	0,000000741
16	0,000001112	36	0,000000713
18	0,000001059	38	0,000000687

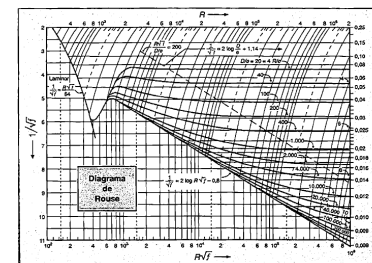
então: $R_e \sqrt{f} = \sqrt{\frac{2gh_f D^3}{Lv^2}} = \sqrt{\frac{2 \times 9,8 \times 9,3 \times 0,15^3}{360 \times 0,000000866^2}}$

→ 47.735,04

$$R_e \sqrt{f} \cong 47\ 800 \cong 4,8 \times 10^4$$

$$\frac{D}{e} = \frac{0,15}{0,000260} \cong 580$$

Agora deve-se consultar o diagrama de Rouse



$$R_c \sqrt{f} \equiv 47\,800 \equiv 4,8 \times 10^4$$

Exercício 8.6 – (Problema-tipo II)

Dois reservatórios estão ligados por uma canalização de ferro fundido ($e = 0,000260$ m) com 0,15 m de diâmetro e 360 m de extensão. Determinar a velocidade e a vazão no momento em que a diferença de nível entre os dois reservatórios igualar-se a 9,30 m. Admitir a temperatura da água como sendo de 26,5°C.

$$\frac{D}{e} = \frac{0,15}{0,000260} \equiv 580$$

$$f = 0,023$$

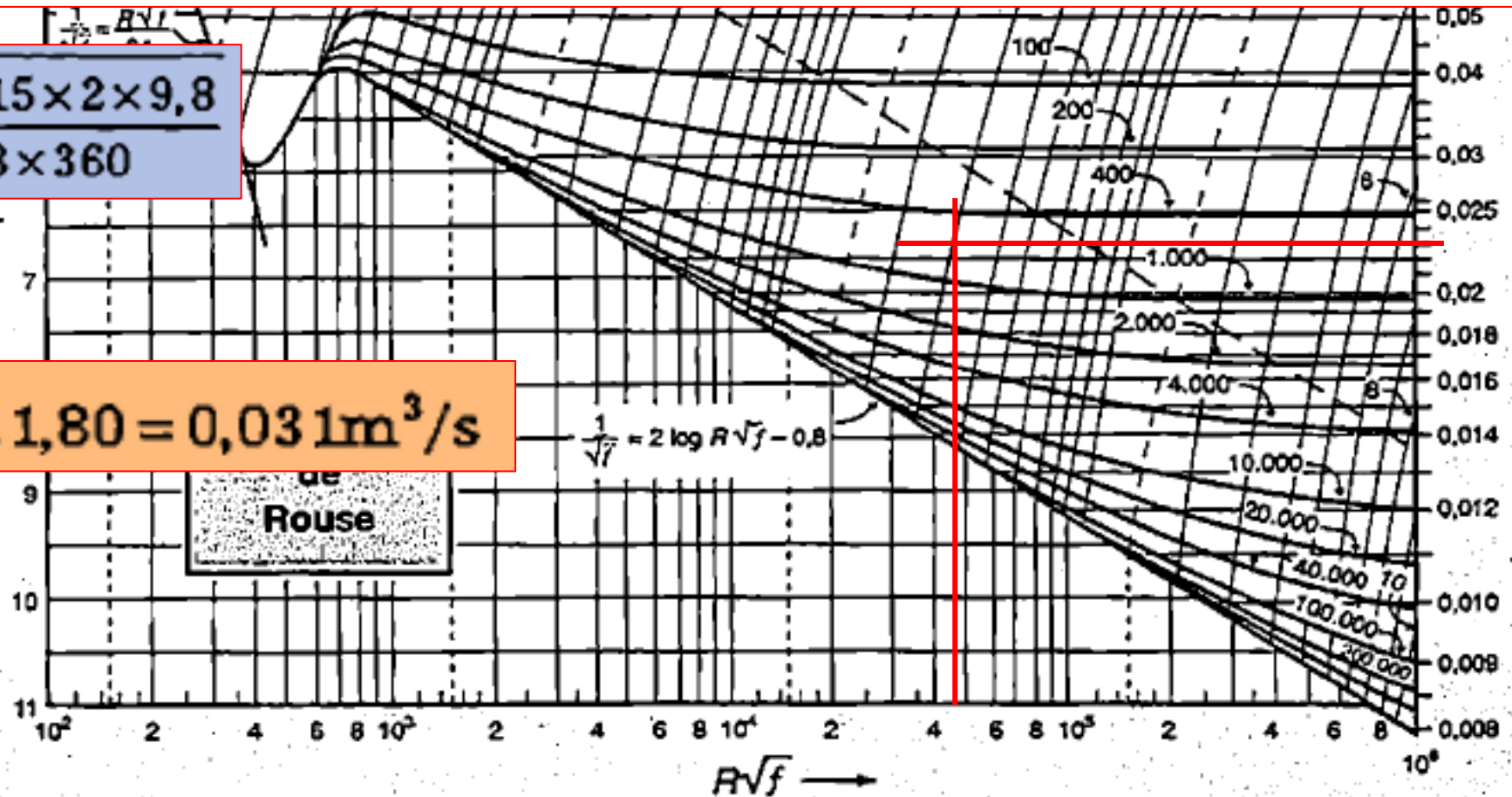
$$v = \sqrt{\frac{h_f D 2g}{f L}} = \sqrt{\frac{9,30 \times 0,15 \times 2 \times 9,8}{0,023 \times 360}}$$

$$v = 1,80 \text{ m/s} \quad 1,817 \text{ m/s}$$

$$Q = Av = 0,01777 \times 1,80 = 0,031 \text{ m}^3/\text{s}$$

Do diagrama
obtêm-se f , e:

$$v = \sqrt{\frac{h_f D 2g}{f L}}$$



Fator de atrito de Darcy-Weisbach – obtenção analítica

CRITÉRIOS PARA DEFINIÇÃO DO REGIME DE FLUXO:

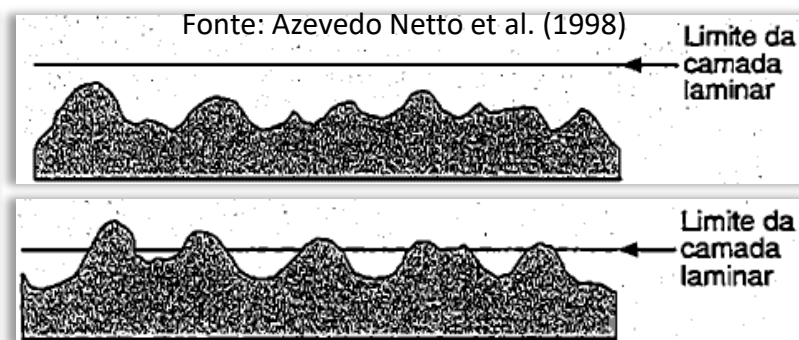
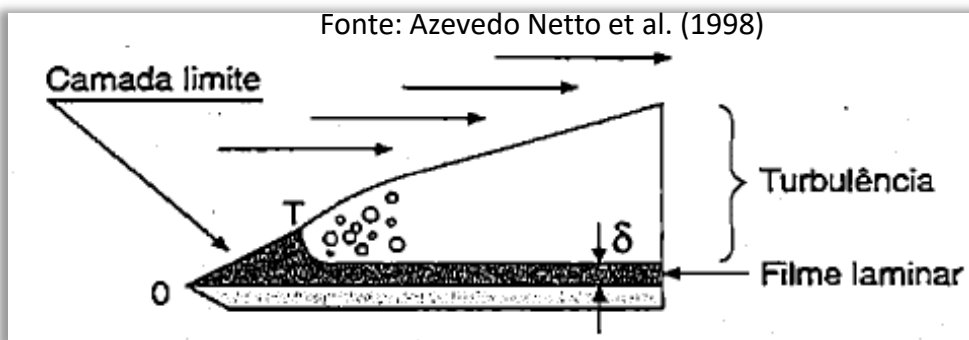
CRITÉRIOS	REGIME DE FLUXO DO ESCOAMENTO
$Re_y < 2.000$	Laminar
$2.000 \leq Re_y \leq 4.000$	Transitório
$Re_y > 4.000$ e $\left[Re_y \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_i} \right) \right] < 14,14$	Turbulento liso
$Re_y > 4.000$ e $14,14 \leq \left[Re_y \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_i} \right) \right] \leq 198$	Turbulento transitório
$\left[Re_y \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_i} \right) \right] > 198$	Turbulento rugoso

Fonte: Sousa e Dantas Neto (2014).

SOUSA, J. S. C.; DANTAS NETO, J. Equação explícita para cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach em projetos de irrigação pressurizada. Irriga, v. 19, n. 1, p. 137-148. 2014.

Onde: D_i - diâmetro interno da tubulação (m), f - fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional), Re_y - nº de Reynolds (adimensional), ε - rugosidade absoluta do tubo (m).

Ver equação de δ



Turbulento liso

Turbulento rugoso

Fator de atrito de Darcy-Weisbach – obtenção analítica

CRITÉRIOS PARA DEFINIÇÃO DO REGIME DE FLUXO:

CRITÉRIOS	REGIME DE FLUXO DO ESCOAMENTO
$Re_y < 2.000$	Laminar
$2.000 \leq Re_y \leq 4.000$	Transitório
$Re_y > 4.000$ e $\left[Re_y \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_i} \right) \right] < 14,14$	Turbulento liso
$Re_y > 4.000$ e $14,14 \leq \left[Re_y \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_i} \right) \right] \leq 198$	Turbulento transitório
$\left[Re_y \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_i} \right) \right] > 198$	Turbulento rugoso

Fonte: Sousa e Dantas Neto (2014).

SOUSA, J. S. C.; DANTAS NETO, J. Equação explícita para cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach em projetos de irrigação pressurizada. Irriga, v. 19, n. 1, p. 137-148. 2014.

Onde: D_i - diâmetro interno da tubulação (m), f - fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional), Re_y - nº de Reynolds (adimensional), ε - rugosidade absoluta do tubo (m).

Como o f é uma incógnita, a definição do regime de fluxo demanda processos iterativos.

- Pode-se obter o f aproximado com o diagrama de Moody e aplicar os critérios acima.
- Depois aplicar as equações indicadas (slide seguinte) e com o valor do f obtido aplicar novamente os critérios acima.
- Se o regime se mantiver o f procurado foi obtido, senão repetir a operação.

Fator de atrito de Darcy-Weisbach – obtenção analítica

A equação e função de:

Rey

$$f = \frac{64}{Rey}$$

- Escoamento em regime de fluxo laminar (Hagen-Poiseuille).

Rey e e/D

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Rey} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[\ln \left(\frac{\epsilon}{3,7 \cdot Di} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Rey} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

- Escoamento em regime de fluxo turbulento liso (Von Kármán).

Rey e f

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log(Rey \cdot \sqrt{f}) - 0,8 \quad \text{ou,} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log \left(\frac{Rey \cdot \sqrt{f}}{2,51} \right)$$

- Escoamento em regime de fluxo turbulento rugoso (Equação de Nikuradse).

e/D e f

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 - 2 \log \left(\frac{2 \cdot \epsilon}{Di} \right) \quad \text{ou,} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\epsilon}{3,71 \cdot Di} \right)$$

- Escoamento em regime de fluxo turbulento transitório (Colebrook-White), que consiste na combinação das equações de Von Kármán e Nikuradse.

Rey, e/D e f

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\epsilon}{3,71 \cdot Di} + \frac{2,51}{Rey \cdot \sqrt{f}} \right)$$

Atualmente os regimes de fluxo, turbulento liso e transitório, correspondem a quase totalidades do casos.

Notem que para estes regimes as equações indicadas não apresentam o f explícito.

Equações explícitas para o f de Darcy-Weisbach

- Para Rey entre 4.000 e 100.000, Equação de Blasius (1913):

$$f = \frac{0,316}{Rey^{0,25}}$$

- Para escoamento turbulento liso, equação de Sousa e Dantas Neto (2014):

$$f = 0,1114 \times Di^{-0,2333} \times Rey^{-(0,1638 \times Di^{-0,0964})}$$

- Para Rey entre 5.000 e 100.000.000 e e/D entre 10^{-6} e 10^{-2} , eq. Swamee e Jain (1976):

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{e}{3,7 \times Di} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) \right]^2}$$

*Em que: f – fator de atrito de Darcy-Weisbach, adimensional;
Rey – número de Reynolds, adimensional; Di – diâmetro interno da tubulação, m; e – rugosidade absoluta do tubo, m.*

Exemplo: para $Re_y = 69.000$, $Di = 26,70$ mm e $e = 0,001$ mm, determine f a partir das equações abaixo (Escoam. Turb. Liso).

1. Blasius (1913): $f = \frac{0,316}{Re_y^{0,25}}$

2. Sousa e Dantas Neto (2014): $f = 0,1114 \times Di^{-0,2333} \times Re_y^{-(0,1638 \times Di^{-0,0964})}$

3. Swamee e Jain (1976): $f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{e}{3,7 \times Di} + \frac{5,74}{Re_y^{0,9}} \right) \right]^2}$

Respostas:

✓ 1: $f = 0,316/69000^{0,25} = 0,019497315$.

✓ 2: $f = 0,1114 \times 0,0267^{-0,2333} \times 69000^{-(0,1638 \times 0,0267^{-0,0964})} = 0,019500576$.

✓ 3: $f = \frac{0,25}{\left\{ \log \left[\frac{0,001}{(3,7 \times 26,70)} + \frac{5,74}{69000^{0,9}} \right] \right\}^2} = 0,01951665$

Pela equação de Von Kármán
 $f = 0,019468059$

Estratégia de resolução para as equações implícitas

Considerando o exemplo anterior: $Re_y = 69.000$, $Di = 26,70$ mm e $e = 0,001$ mm, determine f a

partir da equação de Von Kármán, $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \times \log \left(\frac{Re_y \times \sqrt{f}}{2,51} \right)$.

1. Estima-se o f (pode ser por Moody, Blasius etc.); $f = 0,019497$ (Blasius).
2. Calcula-se o 1º membro da igualdade: $1/0,019497^{0,5} = 7,162$.
3. Calcula-se o 2º membro da igualdade: $2 \times \log(69000 \times 0,019497^{0,5} / 2,51) = 7,168$.
4. Diminuir o valor de f para Aumentar o valor do 1º membro da igualdade.
5. 2ª estimativa $f = 0,019000$.
6. 1º membro da igualdade $1/0,019000^{0,5} = 7,255$.
7. 2º membro da igualdade: $2 \times \log(69000 \times 0,019000^{0,5} / 2,51) = 7,157$.
8. Aumentar o valor de f para Diminuir o valor do 1º membro da igualdade. **Contudo, já se sabe que o valor do f deve estar entre 0,019000 e 0,19497.**
9. Repetir os procedimentos acima até obter igualdade em ambos os membros da equação.

Exercícios

Exercícios resolvidos:

V (m/s)	D (mm)	ε (mm)	ν (m ² /s)	L (m)	f	Δh (mca)	Regime de fluxo
0,50	1,00	0,02	0,000001	100	0,128000	163,27	Laminar
0,50	5,00	0,02	0,000001	100	0,035926	9,16	Transitório
0,50	10,00	0,02	0,000001	100	0,037401	4,77	Turbulento liso
0,50	50,00	0,20	0,000001	100	0,032214	0,82	Turbulento transitório
0,50	50,00	2,00	0,000001	100	0,064621	1,65	Turbulento rugoso

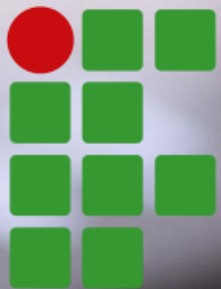
Exercícios propostos:

V (m/s)	D (mm)	ε (mm)	ν (m ² /s)	L (m)	f	Δh (mca)	Regime de fluxo
2,50	50,00	0,002	0,000001	50			
2,50	50,00	2,00	0,000001	50			
2,50	50,00	0,20	0,000001	50			
2,50	1,00	0,20	0,000001	50			
2,50	0,50	0,20	0,000001	0,2			
1,80	35,00	0,20	0,000001	25			
1,80	16,00	0,02	0,000001	25			
0,20	16,00	0,02	0,000001	25			

Onde: D_i - diâmetro interno da tubulação (m), f - fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional), g - aceleração da gravidade (m s⁻²), L - comprimento da tubulação (m), V - velocidade de fluxo na tubulação (m s⁻¹), Δh - perda de carga total ou real (mca), ε - rugosidade absoluta do tubo (m), ν - viscosidade cinemática da água (m² s⁻¹).



FIM DA PARTE 1



INSTITUTO FEDERAL
Sertão Pernambucano
Campus Petrolina Zona Rural



HIDRÁULICA

AULA Nº 9.2

Condução Forçada – Parte 2
Equações empíricas

Prof. Dr. José Sebastião Costa
de Sousa

Sumário da aula:

- ✓ Equação de Flamant,
- ✓ Hazen-Williams,
- ✓ Scobey,
- ✓ Fair-Whipple-Hsiao.
- ✓ Perda de carga tabelada.
- ✓ *Fórmula de Bresse (Diâm. econômico).*

Obtenção da perda de carga unitária (J):

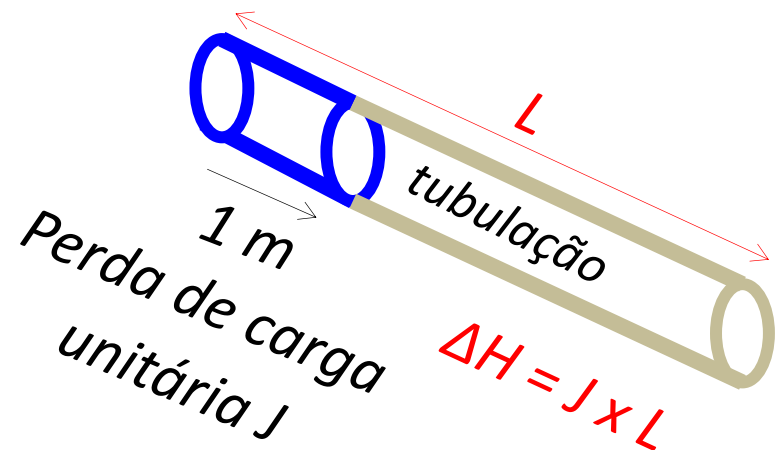
Principais equações:

1. Equação universal ou equação de Darcy-Weisbach

Equações empíricas:

2. Equação de Hazen-Williams
 3. Equação de Flamant
 4. Equação de Scobey
 5. Equação de Fair-Whipple-Hsiao
- * E ainda tabelas de catálogos.

São indicadas para água limpa a 20 °C, ou fluidos com viscosidades similares a este cenário.



EQUAÇÕES DE PERDA DE CARGA PARA DIMENSIONAMENTOS HIDRÁULICOS EM PROJETOS DE IRRIGAÇÃO PRESSURIZADA

José Sebastião Costa de Sousa¹

RESUMO

No dimensionamento hidráulico dos projetos de irrigação, por conta das dificuldades de emprego da equação universal de perda de carga, é comum o uso de equações empíricas. Neste trabalho buscou-se avaliar a exatidão das equações de Hazen-Williams, Flamant, Fair-Whipple-Hsiao e Scobey em comparação com a equação universal (Darcy-Weisbach) em situações corriqueiras de projetos de irrigação (velocidades de fluxo de até 4,00 m s⁻¹, tubulações de PVC e polietileno com diâmetros nominais de 13 a 200 mm). O método de avaliação adotado foi o do erro percentual. Observou-se que a equação de Flamant, com coeficiente de atrito de 0,000127, foi a que apresentou os menores erros para tubulações de até 75 mm diâmetro com qualquer velocidade de fluxo, e a partir deste diâmetro a equação de Hazen-Williams (com coeficiente de atrito de 155) é a mais indicada. A equação de Scobey não apresentou resultados satisfatórios nos cenários testados e a equação de Fair-Whipple-Hsiao apresentou-se semelhante à de Hazen-Williams para tubulações com diâmetros maiores que 150 mm combinada a velocidades superiores a 3,00 m s⁻¹. Recomenda-se, portanto, o uso das equações de Flamant e Hazen-Williams, respeitando as condições supracitadas, para o dimensionamento hidráulico de projetos de irrigação pressurizada.

Para cada cenário foi determinada a perda de carga unitária a partir das equações de Darcy-Weisbach, ou equação universal de perda de carga (equação 1), Hazen-Williams (equação 2), Flamant (equação 3), Fair-Whipple-Hsiao (equação 4) e Scobey (equação 5). Tais equações foram obtidas dos trabalhos de Williams e Hazen (1933), Azevedo Netto et al. (1998), Khiry et al. (2014), Rettore Netto et al. (2016) e Radhakrishna et al. (2017).

$$J = \left(\frac{8}{g \cdot \pi^2} \right) \cdot f \cdot \frac{Q^2}{D^5} \quad (1)$$

$$J = 10,67 \cdot \frac{Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}} \quad (2)$$

$$J = \frac{4^{2,75}}{\pi^{1,75}} \cdot b \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (3)$$

$$J = 8,63 \cdot 10^6 \cdot \frac{(1000 \cdot Q)^{1,75}}{(1000 \cdot D)^{4,75}} \quad (4)$$

$$J = \frac{Ks}{387} \cdot \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi} \right)^{1,9} \cdot \frac{1}{D^{4,9}} \quad (5)$$

Sobre as equações de Hazen-Williams e Flamant – Artigo Sousa (2018)*.

Observem
menor erro
percentual
para a
equação
de
Flamant.

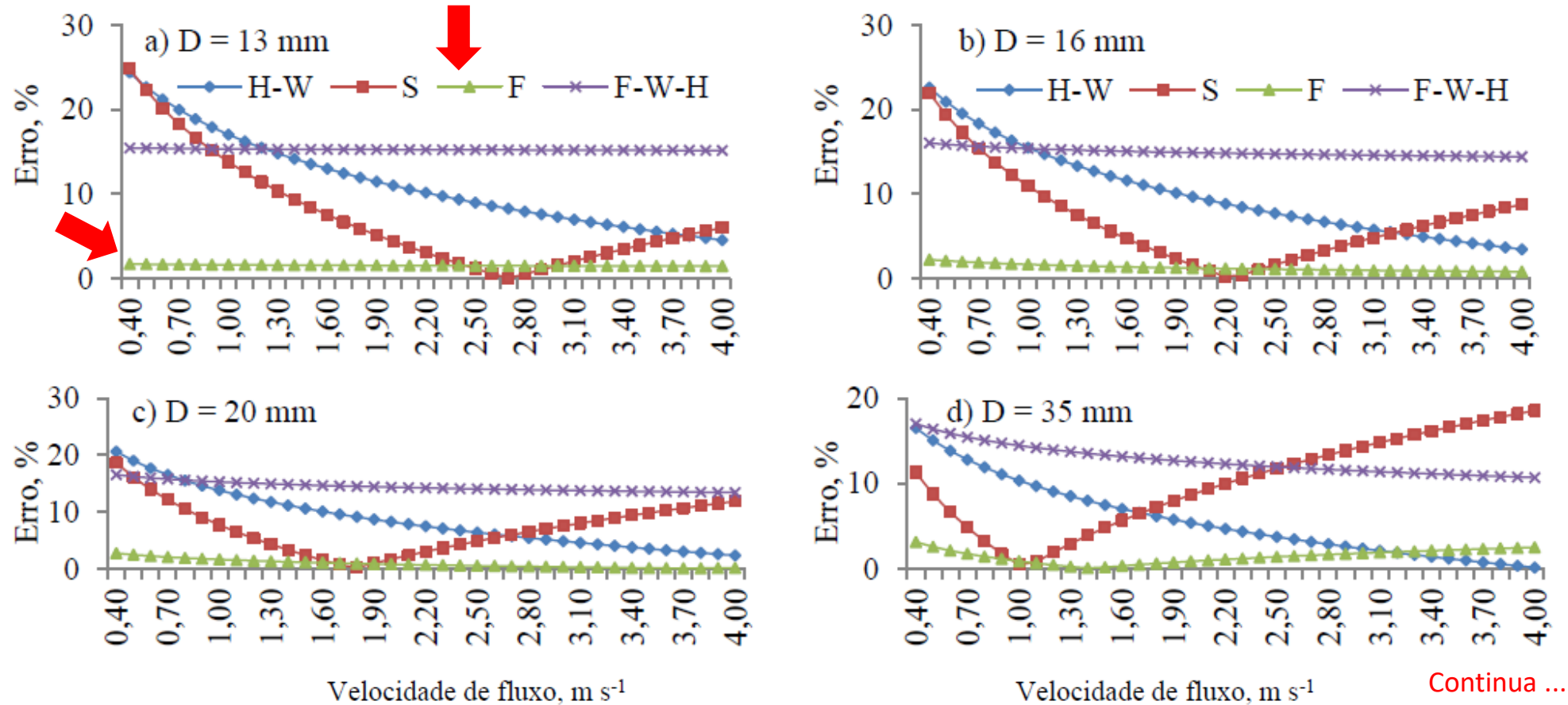


Figura 5. Erro percentual da perda de carga unitária gerada a partir das equações de Hazen-Williams (H-W), Scobey (S), Flamant (F) e Fair-Whipple-Hsiao (F-W-H) em comparação com a equação universal,

Continua ...

Observem menor erro percentual para a equação de Flamant até $D = 75$ mm e $V < 1,70$ m/s e Hazen-Williams para $D > 75$ mm com $V > 1,00$ m/s.

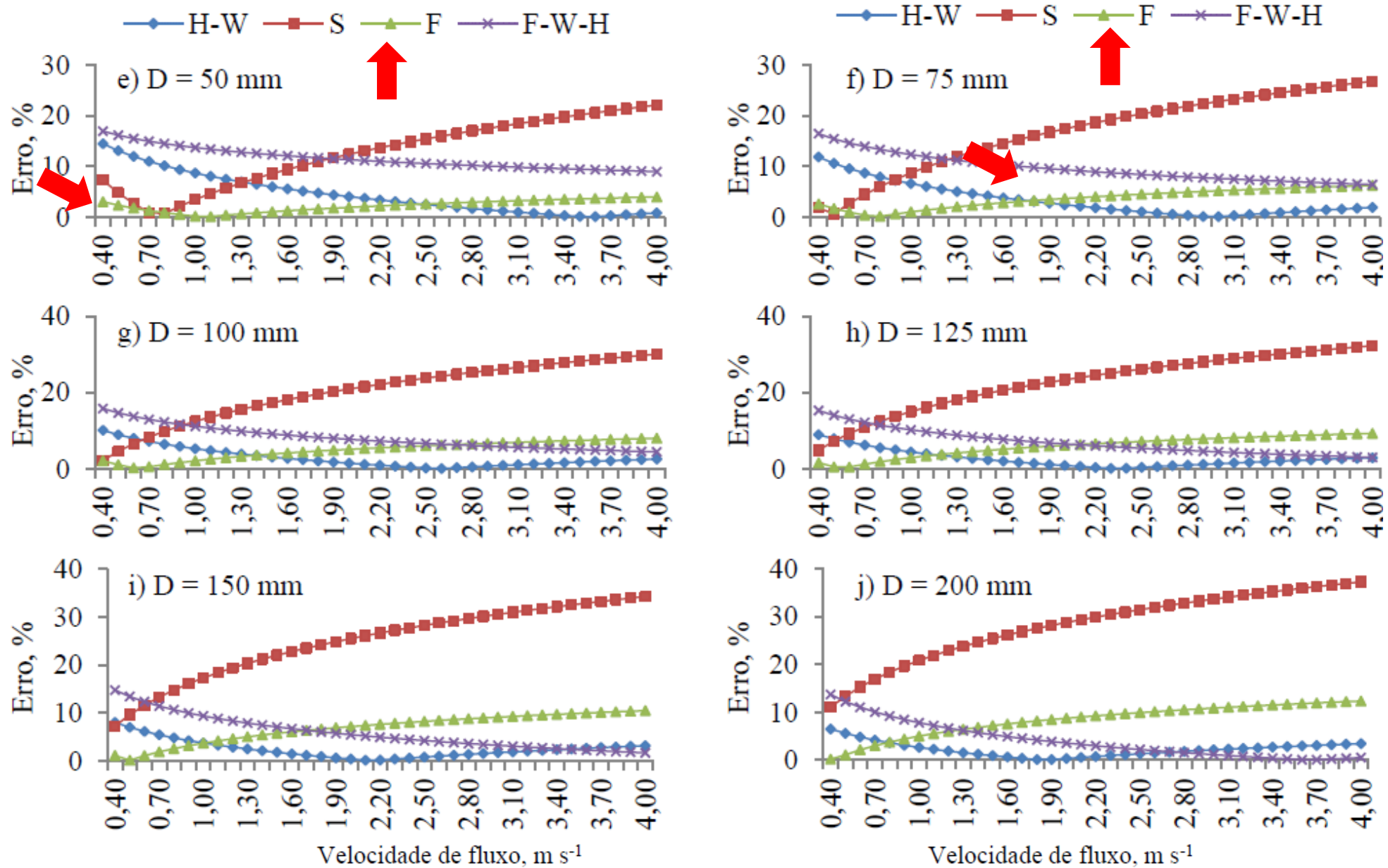


Figura 5. Erro percentual da perda de carga unitária gerada a partir das equações de Hazen-Williams (H-W), Scobey (S), Flamant (F) e Fair-Whipple-Hsiao (F-W-H) em comparação com a equação universal,

2 - Equação Hazen-Williams

Para $\phi \geq 75 \text{ mm}$

$$J = \frac{10,67 \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}}$$

Em que: J – perda de carga unitária, m/m; Q – vazão, m³/s; C – fator de atrito de Hazen-Williams, adm.; D ou ϕ – diâmetro interno do conduto, m.

QUADRO 8.3 – Valor do coeficiente C sugerido para a fórmula de Hazen-Williams			
Tubos	Novos	Usados ± 10 anos	Usados ± 20 anos
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	—	—
Aço galvanizado rosariado	125	100	—
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado, comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	—	—
Concreto, acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento de argamassa de cimento	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Madeira, em aduelas	120	120	110
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Vidro	140	140	140
Plástico (PVC)	140	135	130

Fonte: Azevedo Netto et al. (1998)

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V$$

$$Q = \frac{\pi \cdot 0,096^2}{4} \cdot 2,50$$

$$Q = 0,0181 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$J = \frac{10,67 \cdot 0,0181^{1,852}}{155^{1,852} \cdot 0,096^{4,87}}$$

$$J = 0,0503 \text{ m/m}$$

$$\Delta H = 0,0503 \cdot 100$$

$$\Delta H = 5,03 \text{ mca}$$

Exemplo 1: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s num conduto de PVC, novo (C = 155), de 96,00 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

2 - Equação Hazen-Williams

Para $\phi \geq 75 \text{ mm}$

$$J = \frac{10,67 \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}}$$

Em que: J – perda de carga unitária, m/m; Q – vazão, m³/s; C – fator de atrito de Hazen-Williams, adm.; D ou ϕ – diâmetro interno do conduto, m.

QUADRO 8.3 – Valor do coeficiente C sugerido para a fórmula de Hazen-Williams			
Tubos	Novos	Usados ± 10 anos	Usados ± 20 anos
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	—	—
Aço galvanizado rosariado	125	100	—
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado, comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	—	—
Concreto, acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento de argamassa de cimento	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Madeira, em aduelas	120	120	110
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Vidro	140	140	140
Plástico (PVC)	140	135	130

Fonte: Azevedo Netto et al. (1998)

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V$$

$$Q = \frac{\pi \cdot 0,0725^2}{4} \cdot 2,50$$

$$Q = 0,0103 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$J = \frac{10,67 \cdot 0,0103^{1,852}}{155^{1,852} \cdot 0,0725^{4,87}}$$

$$J = 0,0694 \text{ m/m}$$

$$\Delta H = 0,0694 \cdot 100$$

$$\Delta H = 6,94 \text{ mca}$$

Exemplo 2: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s num conduto de PVC, novo (C = 155), de **72,50 mm** de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

Considerações sobre a equação de Hazen-Williams

- Segundo Porto (2006) a equação é indicada para:
(foi gerada para) Escoam. turbulento transitório. E Fluido água limpa a 20 °C.
 - Escoamento turbulento liso com $Rey > 5,00 \times 10^6$ e $D \geq 150$ mm (fig. A e B).
 - Para Rey entre $5,00 \times 10^4$ a $1,00 \times 10^5$, o valor de C será de 140 a 150 (fig. C).

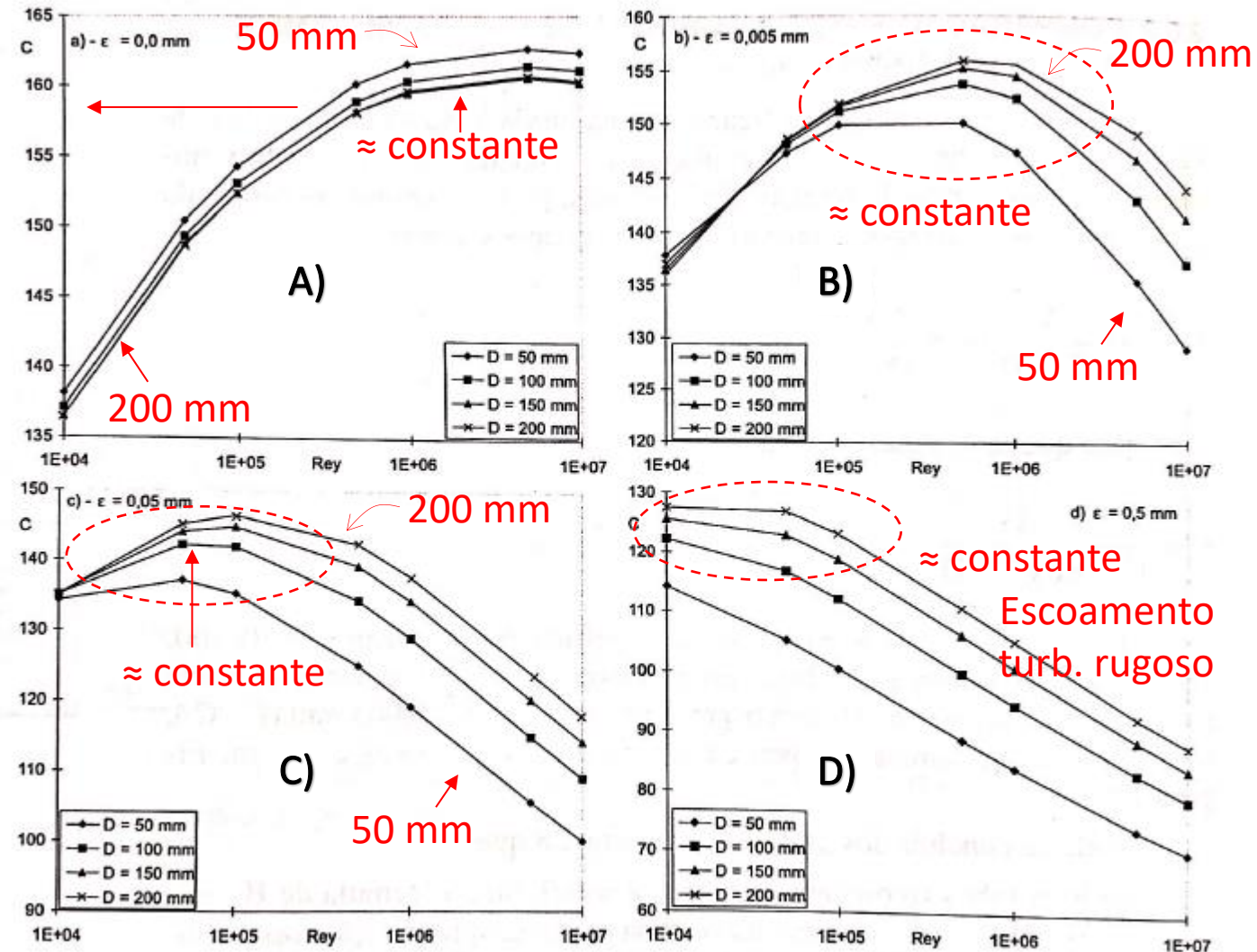


Figura 2.8 Adequabilidade da fórmula de Hazen-Williams.

3 - Equação Flamant

Para canalizações de pequenos diâmetros ($\phi < 75$ mm).

$$J = 4 \cdot b \cdot \frac{V^{1,75}}{D^{1,25}}$$

Onde: J – perda de carga unitária, m/m; b – fator de atrito, adm.; V – velocidade, m/s; D ou ϕ – diâmetro interno do conduto, m.

Material da tubulação	b
Ferro ou aço usado	0,000230
Ferro e aço novo	0,000185
Chumbo	0,000140
Cobre	0,000130
Plástico (PVC, etc.)	0,000120
PVC* (Sousa, 2018)	0,000127

Fonte: Azevedo Netto et al. (1998)

Exemplo: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s num conduto de PVC, novo ($b = 0,000127$), de 72,50 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

$$J = 4 \cdot 0,000127 \cdot \frac{2,50^{1,75}}{0,0725^{1,25}}$$

$$J = 0,0671 \text{ m/m}$$

$$\Delta H = 0,0671 \times 100$$

$$\Delta H = \mathbf{6,71 \text{ mca}}$$

Observações sobre a equação de Flamant

A Eq. Flamant é obtida da inserção da eq. de Blasius na eq. universal, vejamos:

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad \text{como: } Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad \text{e adotado: } \nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{tem-se:}$$

$$f = \frac{0,316}{\left(\frac{V \times D}{10^{-6}}\right)^{0,25}} \quad \text{substituindo esta equação na eq. Universal, } J = f \times \frac{V^2}{(2 \times g \times D)}, \quad \text{tem-se:}$$

$$J = \frac{0,316}{\left(\frac{V \times D}{10^{-6}}\right)^{0,25}} \times \frac{V^2}{(2 \times g \times D)} \rightarrow J = \frac{0,316}{\frac{V^{0,25} \times D^{0,25}}{10^{-1,5}}} \times \frac{V^2}{(2 \times g \times D)} \rightarrow J = \frac{0,316 \times 10^{-1,5}}{(2 \times g)} \times \frac{V^2}{(V^{0,25} \times D^{0,25} \times D)}$$

$$J = \frac{0,316 \times 10^{-1,5}}{(2 \times 9,80)} \times \frac{V^{1,75}}{D^{1,25}} \quad \rightarrow \quad J = 0,000509836 \times \frac{V^{1,75}}{D^{1,25}}$$

Esta foi a explicação dada por Sousa (2018) para uso do fator b = 0,000127 (para tubos lisos novos) na equação de Flamant.

$$J = 4 \times 0,000127459 \times \frac{V^{1,75}}{D^{1,25}} \quad \rightarrow \quad J = 4 \times 0,000127 \times \frac{V^{1,75}}{D^{1,25}} \quad \rightarrow \quad J \cong \frac{V^{1,75}}{2000 \times D^{1,25}}$$

Erros menores que 2%

4. Equação de Scobey

- Mais indicada para tubos de pequenos diâmetros.

$$J = \frac{ks}{387} \cdot \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi}\right)^{1,9} \cdot \frac{1}{D^{4,9}}$$

Material da tubulação	Ks
Plástico e cimento-amianto	0,32
Alumínio c/engates rápidos a cada 6 m	0,43
Aço galvanizado c/engates rápidos a cada 6 m	0,45

Onde: J – perda de carga unitária, m/m; Q – vazão, m³/s; ks – fator de atrito de Scobey, adm.; D ou ϕ – diâmetro interno do conduto, m.

Exemplo: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s num conduto de PVC, novo, de 72,50 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

$$Q = 0,0103 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$J = 0,0842 \text{ m/m}$$

$$J = \frac{0,32}{387} \cdot \left(\frac{4 \cdot 0,0103}{\pi}\right)^{1,9} \cdot \frac{1}{0,0725^{4,9}}$$

$$\Delta H = 0,0842 \cdot 100$$

$$\Delta H = \mathbf{8,42 \text{ mca}}$$

5. Equação de Fair-Whipple-Hsiao

- Para instalações prediais com água fria.
 - Tubos plásticos, cobre e ligas de cobre (tubos lisos)

$$J = 8,63 \times 10^6 \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$$

Onde: J – perda de carga unitária, **kPa/m**;
Q – vazão, **l/s**; D ou ϕ – diâmetro interno do conduto, **mm**.

- Tubos aço galvanizado (tubos rugosos)

$$J = 19,80 \times 10^6 \cdot \frac{Q^{1,88}}{D^{4,88}}$$

Exemplo: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s num conduto de PVC, novo, de 72,50 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

$$Q = 0,0103 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q = 10,30 \text{ L/s}$$

$$J = 8,63 \times 10^6 \cdot \frac{10,30^{1,75}}{72,50^{4,75}}$$

5. Equação de Fair-Whipple-Hsiao

- Para instalações prediais com água fria.
 - Tubos plásticos, cobre e ligas de cobre (tubos lisos)

$$J = 8,63 \times 10^6 \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$$

Onde: J – perda de carga unitária, **kPa/m**;
Q – vazão, **l/s**; D ou ϕ – diâmetro interno do conduto, **mm**.

- Tubos aço galvanizado (tubos rugosos)

$$J = 19,80 \times 10^6 \cdot \frac{Q^{1,88}}{D^{4,88}}$$

Exemplo: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s num conduto de PVC, novo, de 72,50 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

$$J = 0,745 \text{ kPa/m} \quad J = 0,0760 \text{ m/m}$$

$$\Delta H = 0,0760 \times 100$$

$$\Delta H = 7,60 \text{ mca}$$

5. Equação de Fair-Whipple-Hsiao (Ábaco)

Exemplo: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s num conduto de PVC, novo, de 72,50 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

$$Q = 10,30 \text{ L/s}$$

$$J = 0,0725 \text{ m/m}$$

$$\Delta H = 0,0725 \times 100$$

$$\Delta H = 7,25 \text{ mca}$$

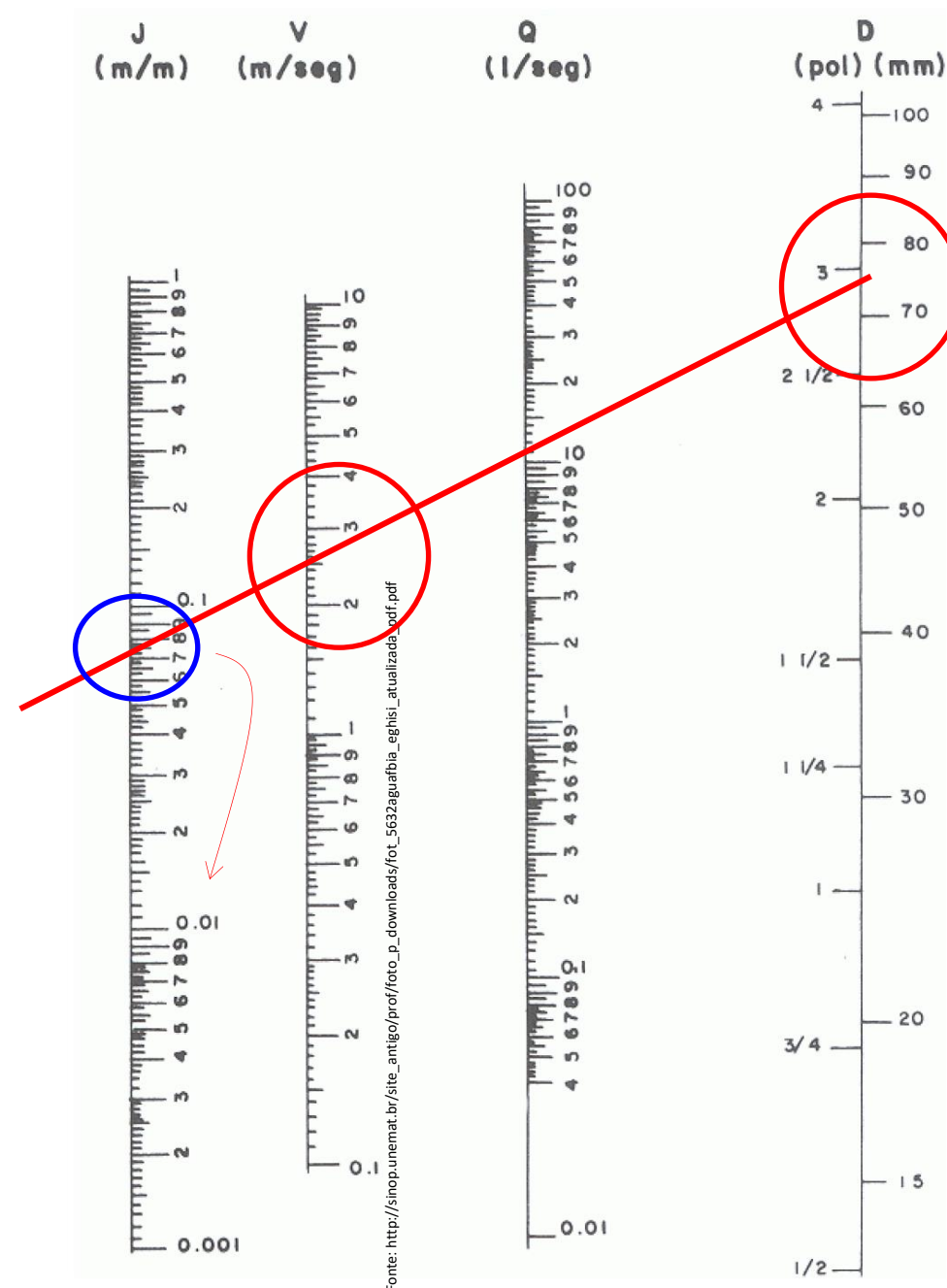


Figura 1.7. Ábaco de Fair-Whipple-Hsiao para tubulações de cobre e plástico.

6 – J tabelado

β da expressão $J = \beta * Q^{1,85}$ (Porto, 2006):

VALORES DA CONSTANTE β PARA Q (m³/s) e J (m/100 m)

D pol.	D (m)	C = 90	C = 100	C = 110	C = 120	C = 130	C = 140	C = 150
2	0,050	5,593x10 ⁵	4,602x10 ⁵	3,858x10 ⁵	3,285x10 ⁵	2,832x10 ⁵	2,470x10 ⁵	2,174x10 ⁵
2½	0,060	2,301x10 ⁵	1,894x10 ⁵	1,588x10 ⁵	1,325x10 ⁵	1,166x10 ⁵	1,016x10 ⁵	8,945x10 ⁴
3	0,075	7,763x10 ⁴	6,388x10 ⁴	5,356x10 ⁴	4,559x10 ⁴	3,932x10 ⁴	3,428x10 ⁴	3,017x10 ⁴
4	0,100	1,912x10 ⁴	1,574x10 ⁴	1,319x10 ⁴	1,123x10 ⁴	9,686x10 ³	8,445x10 ³	7,433x10 ³
5	0,125	6,451x10 ³	5,308x10 ³	4,451x10 ³	3,789x10 ³	3,267x10 ³	2,849x10 ³	2,507x10 ³
6	0,150	2,655x10 ³	2,185x10 ³	1,831x10 ³	1,559x10 ³	1,345x10 ³	1,172x10 ³	1,032x10 ³
8	0,200	6,540x10 ²	5,382x10 ²	4,512x10 ²	3,841x10 ²	3,312x10 ²	2,888x10 ²	2,542x10 ²
10	0,250	2,206x10 ²	1,815x10 ²	1,522x10 ²	1,296x10 ²	1,117x10 ²	97,417	85,744
12	0,300	90,785	74,707	62,630	53,318	45,980	40,089	35,285
14	0,350	42,853	35,264	29,563	25,168	21,704	18,923	16,656
16	0,400	22,365	18,404	15,429	13,135	11,327	9,876	8,692
18	0,450	12,602	10,379	8,694	7,401	6,383	5,565	4,898
20	0,500	7,544	6,208	5,204	4,431	3,821	3,331	2,932

Exemplo: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s ($Q = 0,0103$ m³/s) num conduto de PVC, novo, de 72,50 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

Para $C = 140$

$$\beta = 3,428 \times 10^4$$

$$J = 3,428 \times 10^4 * 0,0103^{1,85} = 7,22 \text{ m/100 m}$$

$$J = 0,0722 \text{ m/m}$$

$$\Delta H = 7,22 \text{ mca}$$

6 – J tabelado

β da expressão $J = \beta * Q^{1,85}$ (Porto, 2006):

VALORES DA CONSTANTE β PARA Q (m³/s) e J (m/100 m)

D pol.	D (m)	C = 90	C = 100	C = 110	C = 120	C = 130	C = 140	C = 150
2	0,050	5,593x10 ⁵	4,602x10 ⁵	3,858x10 ⁵	3,285x10 ⁵	2,832x10 ⁵	2,470x10 ⁵	2,174x10 ⁵
2½	0,060	2,301x10 ⁵	1,894x10 ⁵	1,588x10 ⁵	1,325x10 ⁵	1,166x10 ⁵	1,016x10 ⁵	8,945x10 ⁴
3	0,075	7,763x10 ⁴	6,388x10 ⁴	5,356x10 ⁴	4,559x10 ⁴	3,932x10 ⁴	3,428x10 ⁴	3,017x10 ⁴
4	0,100	1,912x10 ⁴	1,574x10 ⁴	1,319x10 ⁴	1,123x10 ⁴	9,686x10 ³	8,445x10 ³	7,433x10 ³
5	0,125	6,451x10 ³	5,308x10 ³	4,451x10 ³	3,789x10 ³	3,267x10 ³	2,849x10 ³	2,507x10 ³
6	0,150	2,655x10 ³	2,185x10 ³	1,831x10 ³	1,559x10 ³	1,345x10 ³	1,172x10 ³	1,032x10 ³
8	0,200	6,540x10 ²	5,382x10 ²	4,512x10 ²	3,841x10 ²	3,312x10 ²	2,888x10 ²	2,542x10 ²
10	0,250	2,206x10 ²	1,815x10 ²	1,522x10 ²	1,296x10 ²	1,117x10 ²	97,417	85,744
12	0,300	90,785	74,707	62,630	53,318	45,980	40,089	35,285
14	0,350	42,853	35,264	29,563	25,168	21,704	18,923	16,656
16	0,400	22,365	18,404	15,429	13,135	11,327	9,876	8,692
18	0,450	12,602	10,379	8,694	7,401	6,383	5,565	4,898
20	0,500	7,544	6,208	5,204	4,431	3,821	3,331	2,932

Exemplo: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s ($Q = 0,0103$ m³/s) num conduto de PVC, novo, de 72,50 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

Para $C = 150$

$$\beta = 3,017 \times 10^4$$

$$J = 3,017 \times 10^4 * 0,0103^{1,85} = 6,36 \text{ m/100 m}$$

$$J = 0,0636 \text{ m/m}$$

$$\Delta H = 6,36 \text{ mca}$$

Catálogo da Schneider para 100 m de tubulação

Perda de Carga em Tubulações (Valores em %)																					
Percentagem de perda de carga ao longo de 100 metros de tubulação nova de PVC ou tubos de ferro fundido ou galvanizado																					
Vazão m³/h	PVC	F°F°	PVC	F°F°	PVC	F°F°	PVC	F°F°	PVC	F°F°	PVC	F°F°	PVC	F°F°	PVC	F°F°	PVC	F°F°	PVC	F°F°	PVC
	3/4" (25 mm)	1" (32 mm)	1 1/4" (40 mm)	1 1/2" (50 mm)	2" (60 mm)	2 1/2" (75 mm)	3" (85 mm)	4" (110 mm)	5" (140 mm)	6" (160 mm)	200 mm										
0,5	1,5	1,3	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1													
1,0	4,9	4,8	1,6	1,6	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1											
1,5	10,0	10,1	3,3	3,4	0,9	0,9	0,5	0,4	0,1	0,1											
2,0	16,5	17,2	5,4	5,8	1,4	1,5	0,8	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1									
2,5	24,4	26,1	8,0	8,8	2,1	2,3	1,2	1,1	0,4	0,3	0,1	0,1									
3,0	33,6	36,5	11,0	12,3	2,9	3,2	1,6	1,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1							
3,5	44,0	48,6	14,4	16,4	3,8	4,2	2,1	2,0	0,6	0,6	0,2	0,2	0,1	0,1							
4,0	55,6	62,2	18,2	21,0	4,8	5,4	2,7	2,6	0,8	0,8	0,2	0,2	0,1	0,1							
4,5	68,3	77,3	22,3	26,1	6,0	6,7	3,3	3,2	1,0	1,0	0,3	0,3	0,1	0,1							
5,0	82,2	94,0	26,8	31,7	7,2	8,1	4,0	3,9	1,2	1,2	0,3	0,3	0,1	0,2							
5,5	97,1		31,7	37,8	8,5	9,7	4,7	4,6	1,4	1,4	0,4	0,4	0,2	0,2			0,1				
6,0			36,9	44,4	9,9	11,4	5,4	5,4	1,6	1,7	0,5	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1					
6,5			42,5	51,5	11,3	13,2	6,3	6,3	1,9	2,0	0,5	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1					
7,0			48,4	59,1	12,9	15,2	7,1	7,2	2,1	2,3	0,6	0,6	0,3	0,3	0,1	0,1					
7,5			54,6	67,1	14,6	17,2	8,0	8,2	2,4	2,6	0,7	0,7	0,3	0,3	0,1	0,1					
8,0			61,1	75,6	16,3	19,4	9,0	9,2	2,7	2,9	0,8	0,8	0,3	0,4	0,1	0,1					
8,5			67,9	84,6	18,1	21,7	10,0	10,3	3,0	3,2	0,8	0,9	0,4	0,4	0,1	0,1					
9,0			75,1	94,0	20,0	24,1	11,1	11,5	3,3	3,6	0,9	1,0	0,4	0,5	0,1	0,1					
9,5			82,5		22,0	26,7	12,2	12,7	3,6	4,0	1,0	1,1	0,4	0,5	0,1	0,1					
10			90,3		24,1	29,3	13,3	13,9	4,0	4,4	1,1	1,2	0,5	0,5	0,1	0,2			0,1		
12					33,1	41,1	18,3	19,5	5,4	6,1	1,5	1,7	0,7	0,8	0,2	0,2	0,1	0,1			
14					43,4	54,6	24,0	25,9	7,1	8,1	2,0	2,3	0,9	1,0	0,2	0,3	0,1	0,1			
16					54,8	69,9	30,3	33,2	9,0	10,4	2,5	2,9	1,1	1,3	0,3	0,4	0,1	0,1			
18					67,4	87,0	37,2	41,3	11,1	12,9	3,1	3,6	1,4	1,6	0,4	0,4	0,1	0,2			
20					81,0		44,8	50,2	13,3	15,7	3,7	4,4	1,6	2,0	0,5	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	
25							66,2	75,8	19,7	23,7	5,5	6,6	2,4	3,0	0,7	0,8	0,2	0,3	0,2	0,2	
30							91,1		27,1	33,3	7,6	9,3	3,3	4,2	0,9	1,2	0,3	0,4	0,2	0,3	
35									35,5	44,3	10,0	12,4	4,4	5,6	1,2	1,5	0,4	0,6	0,3	0,4	
40									44,8	56,7	12,6	15,8	5,5	7,1	1,5	2,0	0,5	0,7	0,3	0,5	0,1
45									55,1	70,4	15,5	19,7	6,8	8,9	1,9	2,4	0,7	0,9	0,4	0,6	0,1
50									66,2	85,6	18,6	23,9	8,1	10,8	2,3	3,0	0,8	1,1	0,5	0,7	0,2

Evite o uso dos valores abaixo da linha grifada para não ocasionar excesso de perdas de carga.

Fonte: Catálogos Franklin Electric (Schneider Motobombas).

Resumo:

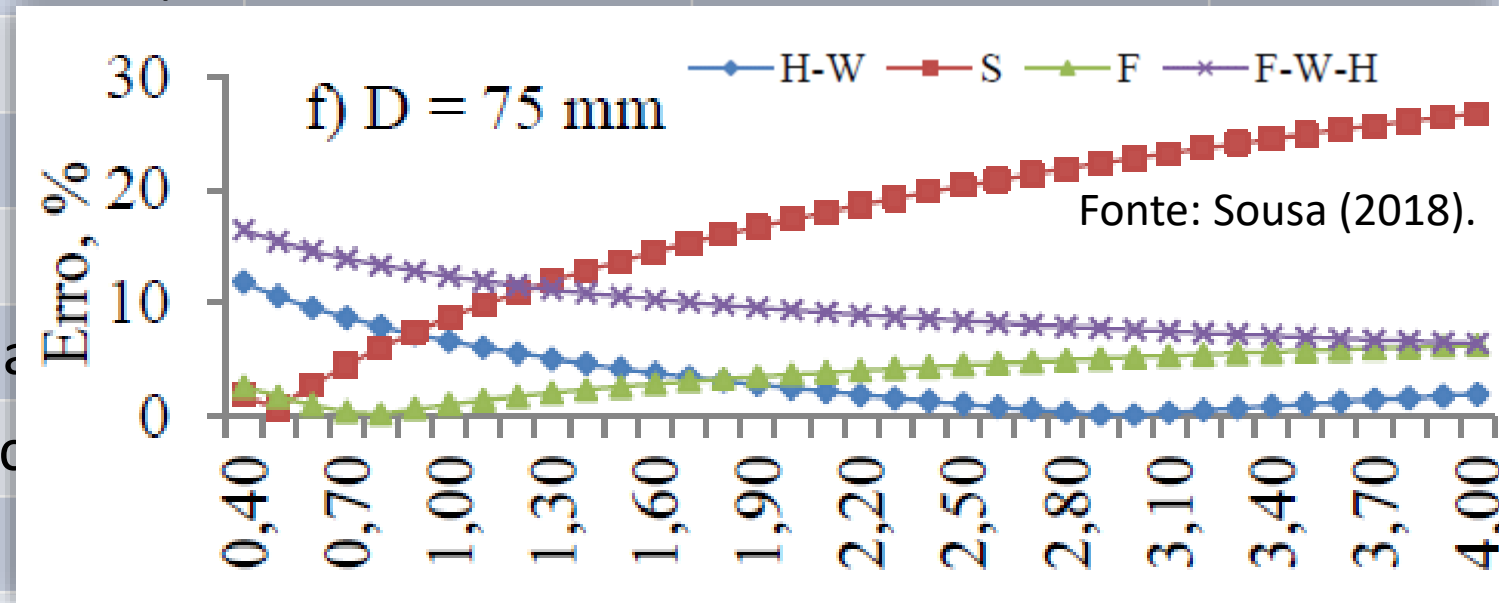
Exemplo: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s num conduto de PVC, novo, de 72,50 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

Equação	Coef. Atrito	J (m/m)	ΔH (mca)	Erro (%)
Darcy-Weisbach (Eq. Universal)	$f = 0,0160$	0,0704	7,04	0
Hazen-Williams	$C = 155$	0,0694	6,94	-1,42
Scobey	$k_s = 0,32$	0,0842	8,42	19,60
Flamant	$b = 0,000127$	0,0671	6,71	-4,69
Fair-Whipple-Hsiao (equação)	Não existe	0,0760	7,60	7,95
Fair-Whipple-Hsiao (ábaco)	Não existe	0,0725	7,25	2,98
Tabelas de Porto (2006)	$C = 140 / 150$	0,0722 / 0,0636	7,22 / 6,36	2,56 / -9,66
Catálogo da Schneider	-	-	$\approx 11,00$	$> 56,00$

Resumo:

Exemplo: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s num conduto de PVC, novo, de 72,50 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

Equação	Coef. Atrito	J (m/m)	ΔH (mca)	Erro (%)
Darcy-Wesibach (Eq. Universal)	$f = 0,0160$	0,0704	7,04	0
Hazen-Williams				-1,42
Scobey				19,60
Flamant				-4,69
Fair-Whipple-Hsiao (equação)				7,81
Fair-Whipple-Hsiao (ábaco)				2,98
Tabelas de Porto (2006)				2,56 / -9,66
Catálogo da Schneider	-	-	$\approx 11,00$	$> 56,00$



Diâmetros econômico

Formulas de Bresse:

$$D = K \times \sqrt{Q}$$

$$D = 1,3 \times \sqrt[4]{X} \times \sqrt{Q}$$

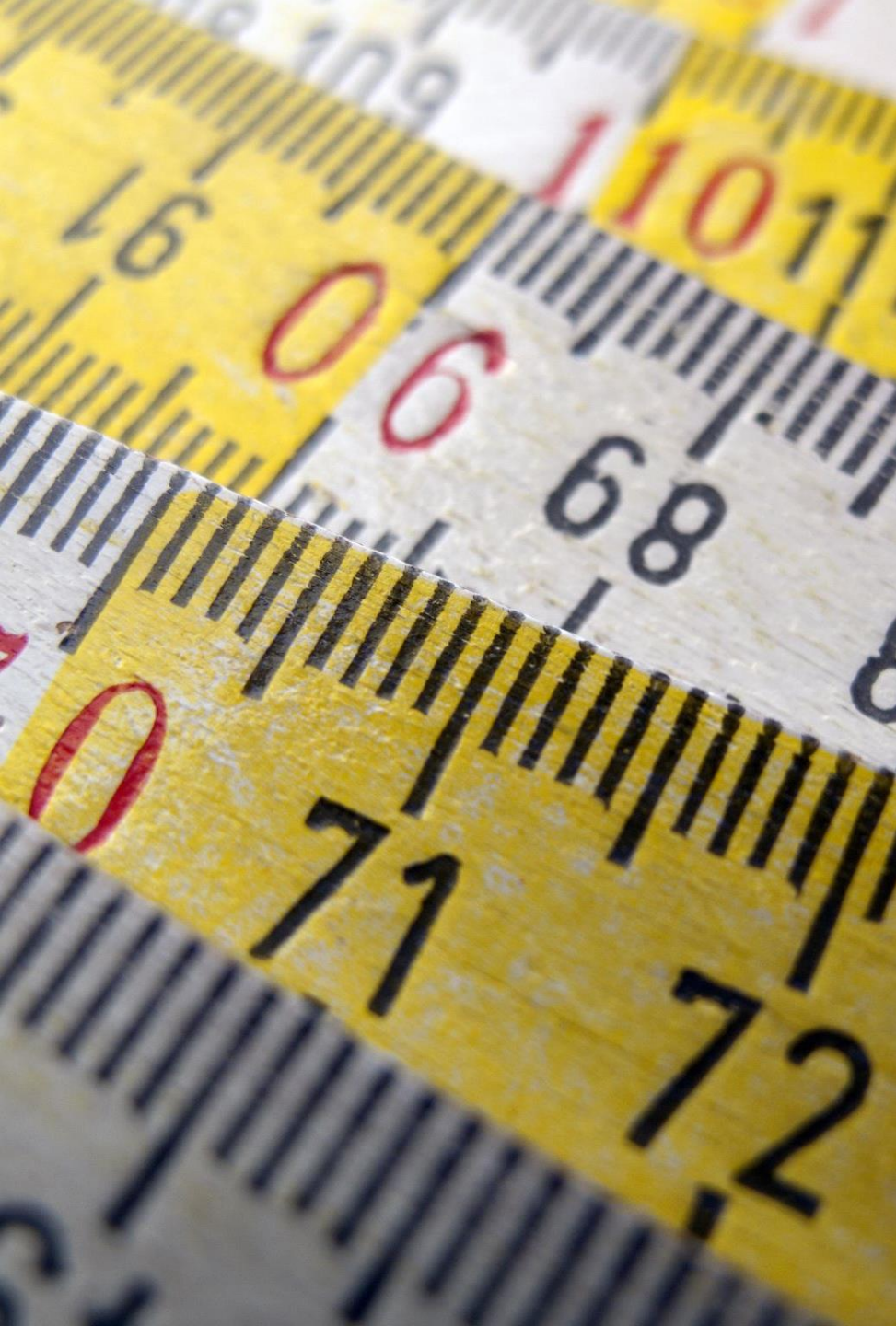
Em que: D – diâmetro interno, m; Q – vazão, m³/s; K – constante econômica e técnica da tubulação, é comum adotar de 0,7 a 1,3. X = Horas de funcionamento diário dividido por 24.

Em aulas seguintes veremos que fixando a velocidade de 2,50 m/s (chamado método da velocidade máxima) o valor de K da fórmula de Bresse será aproximadamente 0,71.

A tabela abaixo é um opção muito usada:

Sugestão de Diâmetro de Tubulação por Vazão										
Succão										
Vazão (m ³ /h)		0 a 1,5	1,5 a 3,0	3,0 a 6,5	6,5 a 8,5	8,5 a 16	16 a 25	25 a 35	35 a 65	65 a 120
Diâmetro	Polegadas	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5
	Milímetros	25	32	40	50	60	75	85	110	140
Recalque										
Vazão (m ³ /h)		0 a 1,5	1,5 a 3,0	3,0 a 6,5	6,5 a 8,5	8,5 a 18	18 a 35	35 a 60	60 a 120	120 a 250
Diâmetro	Polegadas	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5
	Milímetros	25	32	40	50	60	75	85	110	140

Fonte: Catálogos Franklin Electric (Schneider Motobombas).



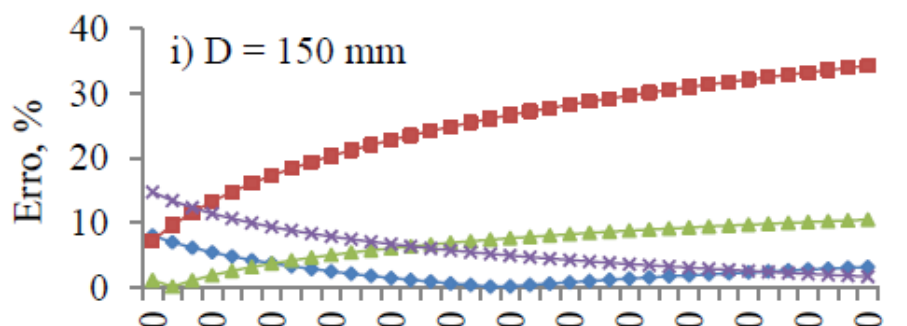
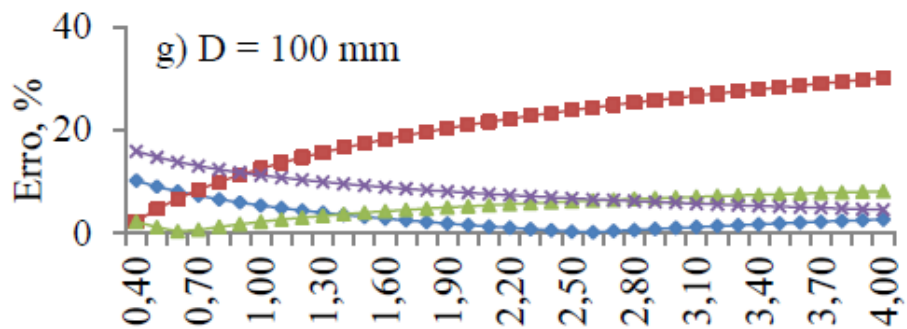
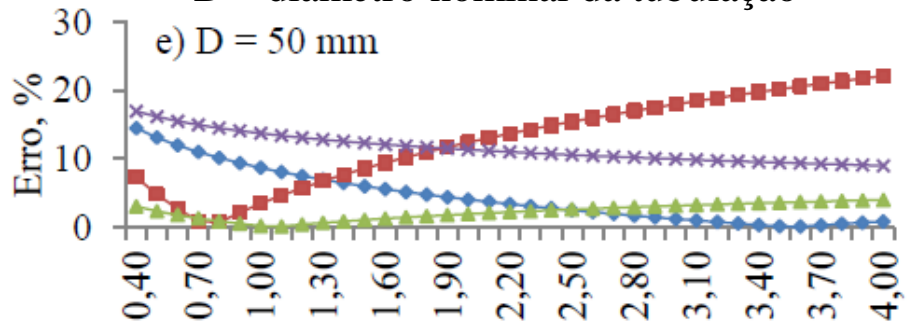
Exercícios

Determine a perda de carga total numa tubulação de PVC novo de 540 m de comprimento com diâmetro interno de 72,50 mm conduzindo 25 m³/h de água limpa.

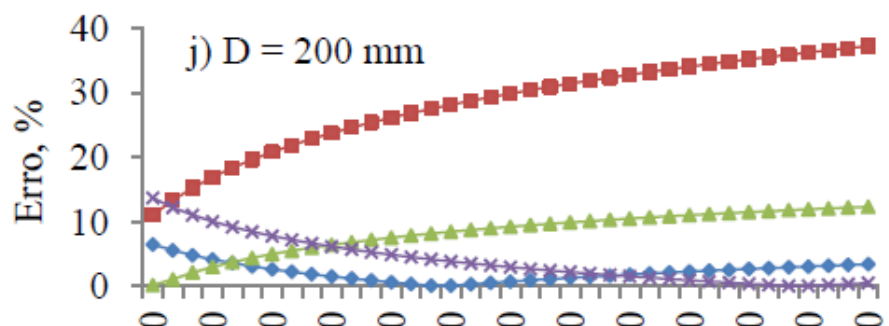
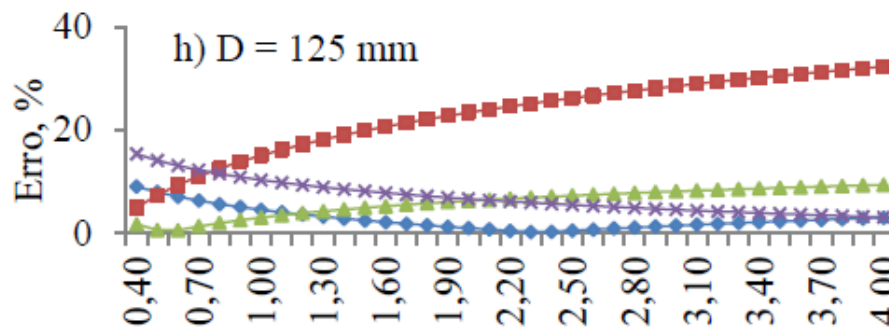
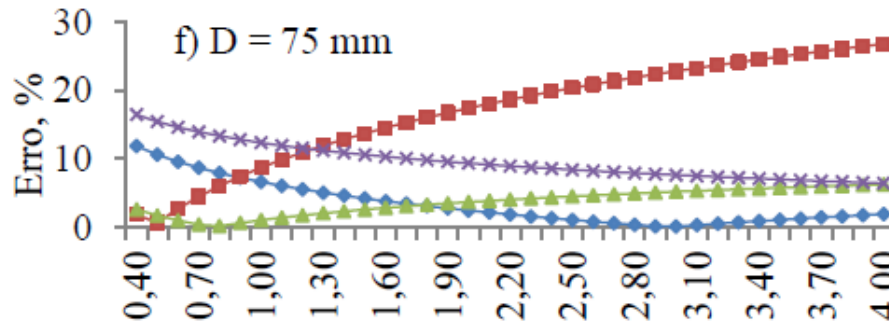
1. Use todas as equações empíricas.
2. Compare com a equação universal e gere os respectivos erros percentuais.
3. Repita as operações considerando diâmetro interno da tubulação de 48,10 mm. Terça comentários sobre as diferenças observadas.
4. Nota: Qual seria o diâmetro econômico para o caso? Adote valores de K e justifique as escolhas.

◆ H-W ■ S ▲ F ✱ F-W-H

D – diâmetro nominal da tubulação



Velocidade de fluxo, $m s^{-1}$



Velocidade de fluxo, $m s^{-1}$

Exercícios

Analise a figura ao lado e responda:

- Qual a faixa de utilização da eq. de Flamant?
- Qual faixa a eq. de Hazen-Williams é a mais indicada?
- Quais os cenários mais indicados para uso da eq. de Scobey?
- Em quais situações a eq. De Fair-Whipple-Hsiao apresenta-se melhor que as demais?

Figura 5. Erro percentual da perda de carga unitária gerada a partir das equações de Hazen-Williams (H-W), Scobey (S), Flamant (F) e Fair-Whipple-Hsiao (F-W-H) em comparação com a equação universal,

Exercícios – extratos de provas

Questão 1: Determine a perda de carga total ocasionada numa tubulação de PVC com diâmetro interno de (1,5 ponto) 72,5 mm e 300 m de comprimento transportando 20 mil L/h de água limpa. Adotar Equação universal de perda de carga e fator de atrito (f) de Blasius. Obs.: arredondamentos para 4 casas decimais em todos os cálculos.

Questão 2: Determine a perda de carga total ocasionada numa tubulação de PVC com diâmetro interno de (1,5 ponto) 72,5 mm e 300 m de comprimento transportando 20 mil L/h de água limpa. Adotar b de Flamant de 0,000127 e usar as equações: $J = 6,1045 \cdot b \cdot Q^{1,75} / D^{4,75}$ e $\Delta H = J \cdot L$. Obs.: na conversão da unidade de medida da vazão usar 5 casas decimais, e 3 casas para o J.

DETERMINE:

1. (1,0) O fator de atrito de Blasius para condução de água limpa a 20 °C numa tubulação com 32,50 mm de diâmetro interno e vazão de 3.400 L/h.
2. (2,0) A perda de carga unitária, por Flamant, numa condução de 2.800 L/h de água, por tubulação de PVC nova com 32,50 mm de diâmetro interno.

Fim



Anexo



Rugosidades absolutas segundo
Azevedo Netto et al. (1998).

Tabela 8.9 – Rugosidade dos tubos (valores de e em metros)* (ver também a Tab. 8.11)		
Material	Tubos novos	Tubos velhos**
Aço galvanizado	0,00015 a 0,00020	0,0046
Aço rebitado	0,0010 a 0,0030	0,0060
Aço revestido	0,0004	0,0005 a 0,0012
Aço soldado	0,00004 a 0,00006	0,0024
Chumbo	lisos	lisos
Cimento-amianto	0,000025	
Cobre ou latão	lisos	lisos
Concreto bem acabado	0,0003 a 0,0010	
Concreto ordinário	0,0010 a 0,0020	
Ferro forjado	0,0004 a 0,0006	0,0024
Ferro fundido	0,00025 a 0,00050	0,0030 a 0,0050
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,00012	0,0021
Madeira em aduelas	0,0002 a 0,0010	
Manilhas cerâmicas	0,0006	0,0030
Vidro	lisos***	lisos***
Plástico	lisos	lisos

* Para os tubos lisos, o valor de e é 0,00001 ou menos

** Dados indicados por R. W. Powell

*** Correspondem aos maiores valores de D/e

A tabela a seguir (8.11) é indicada para projetos (Azevedo Netto et al., 1998).

Rugosidades absolutas segundo Azevedo Netto et al. (1998).

Tabela 8.11 – Coeficientes de rugosidade "e" em mm para a fórmula Universal
Valores recomendados para projeto (pesquisa da literatura internacional). Tubos em serviço (J. M. Azevedo Netto)

Autores	Tubos de aço com revestimento especial ou esmalte	Tubos de concreto	Tubos de ferro fundido e ferro dúctil		Tubos de cimento-amianto	Ferro galvanizado	Tubos lisos chumbo, cobre, latão etc.	PVC	Tubos cerâmicos
			Sem revestimento especial	Com revestimento especial					
• Câmara Sindical Nacional (SCNHP) França	0,1	—	—	0,1	—	—	—	—	—
• Dégremont, M. Technique de l'eau (1978)	0,1	0,2 a 0,5	0,2	0,1	0,1	—	0,01	0,03 a 0,1	1,0
• Lamont, Peter, IWSA, 3º. Cong. (1955)	0,06	0,25 a 0,50	0,25	0,125	0,025	0,125	—	—	—
• Manual of British Water Engineering Practice, IWE, (1961)	0,125	0,04	—	0,125	0,03	—	—	—	—
• Chemical Engineers Handbook, R. H. Perry, 4ª. Ed., (1963)	0,05	0,3	0,26	—	—	0,15	—	—	—
• Internal Flow, British Hydromechanics Research Association	0,025 a 0,50	0,1	—	—	—	—	—	—	—
• Pipping Handbook, King e Crocker (1967)	0,05	—	—	0,12	—	—	—	—	—
• Fair, Geyer e Okun (1966)	0,03 a 0,09	0,3 a 3,0	0,06 a 0,12	—	—	0,06 a 0,24	<0,03	—	—
• R. W. Powell (citado Azevedo Netto) (1951)	0,5 a 1,2	0,3 a 1,0	2,1	—	—	—	—	—	3,0
• Hydraulic Institute (1979)	0,05	—	0,14	—	—	0,17	—	—	—
• A. Lencastre	0,06 a 0,15	0,06 a 0,5	—	—	—	—	—	—	—
• Linsley & Franzini (1978)	—	0,3 a 3,0	0,26	0,12	—	0,15	—	0,02	—
• PNB 591 (1977)	0,08 a 0,12	0,08 a 0,66	—	0,14 a 0,20	0,14 a 0,20	—	—	0,08 a 0,12	—
• Azevedo Netto →	0,125	0,30	0,25	0,125	0,05	0,15	0,02	0,10	1,5

Obs.: A experiência francesa recomenda a adoção de $e = 0,1$ mm para tubos e para tubos não sujeitos à corrosão e incrustação e $e = 2$ mm para tubos sujeitos a esse fenômenos de deterioração.



Tabela A-8.3.11-a Valores de “e” (em mm) para a rugosidade das tubulações para a fórmula “Universal” para águas a ~20 °C, pouco incrustantes, pouco corrosivas (corrigidas) [$v \sim 1,5$ m/s]

Tubulações compostas por tubos de	Novos	Usados ± 10 anos	Usados ± 20 anos
Aço soldado, revestimento não permanente (betuminoso)	0,250	1,250	3,000
Aço soldado, revestimento interno permanente (epóxi)	0,020	0,032	0,100
Concreto	0,750	1,250	2,500
Ferro fundido dúctil/aço PB revestido argamassa cimento	0,020	1,000	2,500
Ferro fundido dúctil/aço PB revestimento permanente (epóxi)	0,0175	0,0325	0,0750
PVC ou resina com fibra, juntas tipo PB ou luva	0,0050	0,0200	0,0400
PEAD, polipropileno outros termoplásticos, junta soldada	0,0025	0,0100	0,0200
Material em desuso ou usado eventualmente:			
Aço (“ferro doce”) galvanizado roscado, até DN 125 mm	0,20	1,50	5,00
Aço corrugado (chapa ondulada)	8,00	-	-
Aço rebitado	2,00	4,00	6,00
Chumbo	0,01	0,02	0,03
Cobre, latão, bronze, aço inox, até DN 125 mm	0,01	0,01	0,02
Cimento-amianto	0,02	0,10	0,20
Ferro fundido/aço PB ou luva, sem revestimento permanente	0,300	2,500	4,000
Madeira, em aduelas (tanoaria)	0,20	0,65	1,00
Mangueiras de Incêndio emborrachadas internamente	0,02	-	-
Manilhas de barro vidrado (tubos cerâmicos) com 3 m, 125 < DN < 750	1,50	2,50	3,50
Tijolos, condutos muito bem executados em concreto <i>in loco</i> etc.	0,75	1,00	1,05
Vidro (laboratório)	0,01	0,01	0,01

Compilação de diversas fontes, ajustada pelo autor, para fins didáticos e para cálculos e avaliações expeditas

Observações: (*1) Valem todas as observações feitas para a Tabela A-8.2.7-a; (*2) ver também a Tabela A-8.3.11-b

Tabela A-8.3.11-b Coeficientes de rugosidade "e" em mm para a fórmula Universal

Valores recomendados para projeto (pesquisa da literatura internacional)							Tubos em serviço (Azevedo Netto)		
Autores	Tubos de aço com revestimento especial ou esmalte	Tubos de concreto	Tubos de ferro fundido e ferro dúctil		Tubos de dimento-amiante	Ferro galvanizado	Tubos lisos chumbo, cobre, latão etc.	PVC	Tubos cerâmicos
			sem revestimento especial	com revestimento especial					
Câmara Sindical Nacional (SCNHP) França	0,1	-	-	0,1	-	-	-	-	-
Dégremont, M. Technique de léau (1978)	0,1	0,2 a 0,5	0,2	0,1	0,1	-	0,01	0,03 a 0,1	1,0
Lamont, Peter, IWSA, 3º Congresso (1955)	0,06	0,25 a 0,50	0,25	0,125	0,025	0,125	-	-	-
Manual of British Water Engineering Practice, IWE, (1961)	0,125	0,04	-	0,125	0,03	-	-	-	-
Chemical Engineers Handbook, R. H. Perry, 4ª ed. (1963)	0,05	0,3	0,26	-	-	0,15	-	-	-
Internal Flow, British Hydromechanics Research Association	0,025 a 0,50	0,1	-	-	-	-	-	-	-
Pipping Handbook, King e Croker (1967)	0,05	-	-	0,12	-	-	-	-	-
Fair, Geyer e Okun (1966)	0,03 a 0,09	0,3 a 3,0	0,06 a 0,12	-	-	0,06 a 0,24	< 0,03	-	-
R. W. Powell (citado Azevedo Netto) (1951)	0,5 a 1,2	0,3 a 1,0	2,1	-	-	-	-	-	3
Hydraulic Institute (1979)	0,05	-	0,14	-	-	0,17	-	-	-
A. Lencastre	0,06 a 0,15	0,06 a 0,5	-	-	-	-	-	-	-
Linsley & Franzine (1978)	-	0,3 a 3,0	0,26	0,12	-	0,15	-	0,02	-
PNB 591 (1977)	0,08 a 0,12	0,08 a 0,66	-	0,14 a 0,20	0,14 a 0,20	-	-	0,08 a 0,12	-
Azevedo Netto	0,125	0,30	0,25	0,125	0,05	0,15	0,02	0,1	1,5

Obs.: A experiência francesa recomendada é de $e = 0,1$ mm para tubos e para tubos não sujeitos à corrosão e incrustação e $e = 2$ mm para tubos sujeitos a esse fenômeno de deterioração.

Fonte: Azevedo Netto et al. (2015).

Subcamada limite laminar



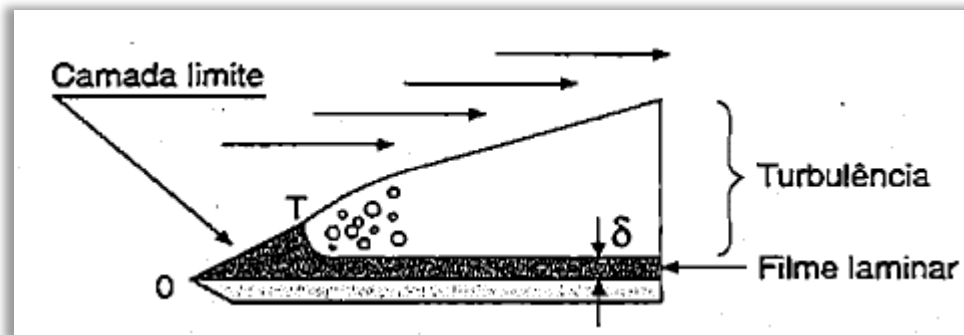
- Camada adjacente a parede da tubulação onde ocorre fluxo laminar.

- $$\delta = \frac{11,6 \times \nu}{u_*}$$

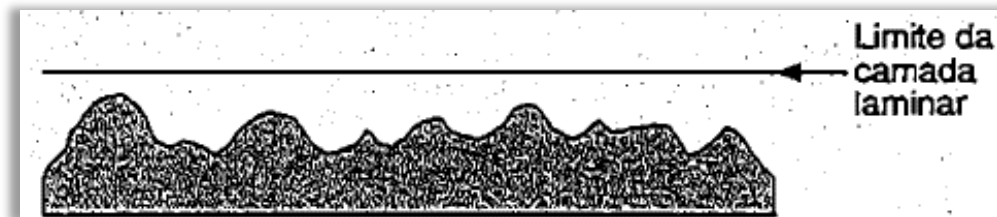
- $$u_* = \frac{\sqrt{J \times g \times D}}{2}$$

- $$u_* = V \times \sqrt{\frac{f}{8}}$$

Em que: δ – espessura da subcamada limite linear, m; ν – viscosidade cinemática do fluido, m^2/s ; u_* – velocidade de atrito, m/s; J – perda de carga unitária, m/m; g – aceleração da gravidade, m/s^2 ; D – diâmetro interno da tubulação, m; V – velocidade de fluxo, m/s; f – fator de atrito de Darcy-Weisbach, adimensional.



Fonte: Azevedo Netto et al. (1998)



Turbulento
liso



Turbulento
rugoso

Fonte: Azevedo Netto et al. (1998)

Harpa de Nikuradse

Região da harpa e seus tipos de fluxo:

- I. **Laminar** – o fator f varia inversamente com o Re . ($f = 64/Re$)
- II. **Transitório** – não há equação indicada.
- III. **Turbulento liso** – f depende apenas de Re .
- IV. **Turbulento transitório** – f depende de e/D e Re .
- V. **Turbulento rugoso** – f depende apenas de e/D .

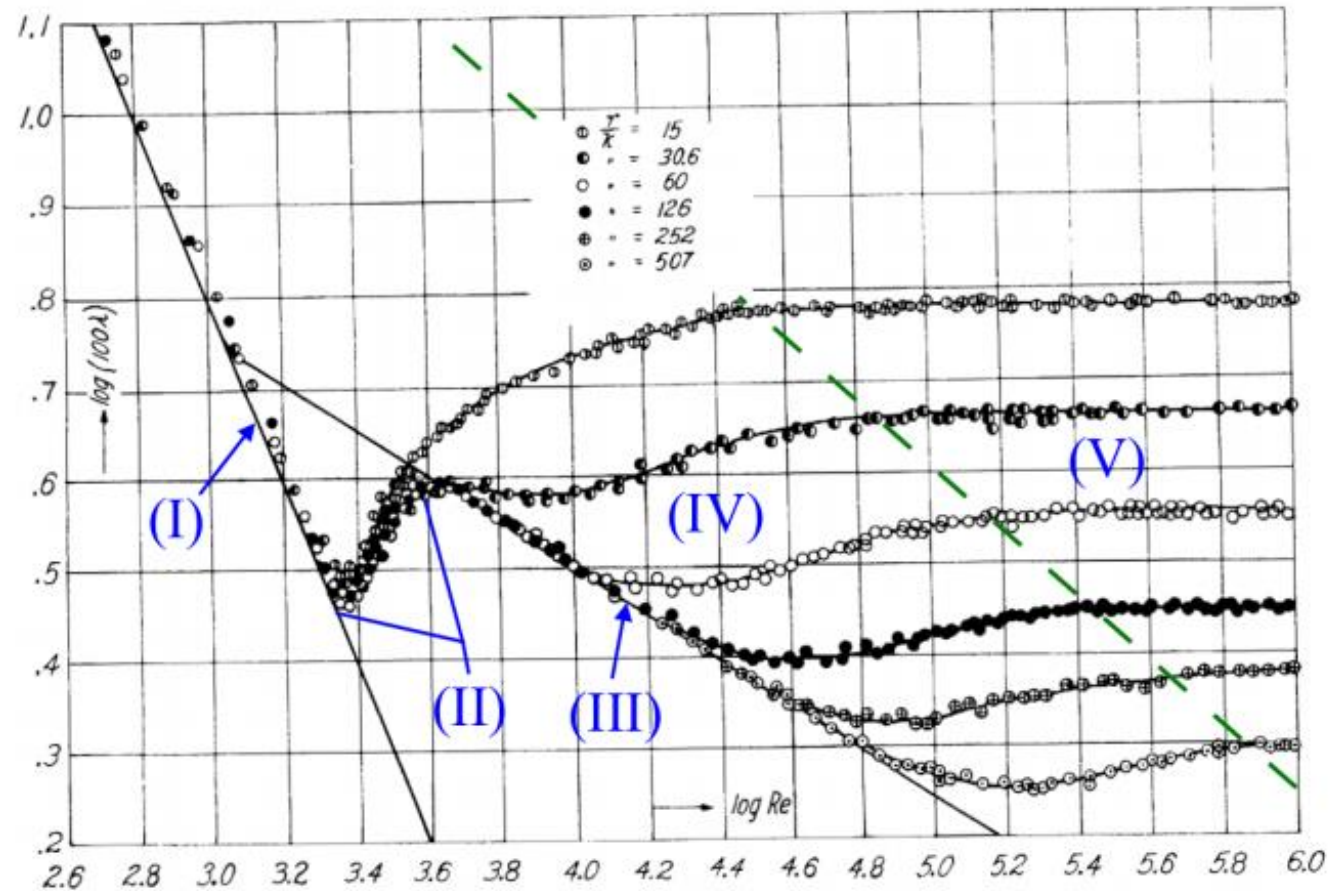


FIGURA 5 – Variação do fator de atrito em função do número de Reynolds e da rugosidade dos tubos, adaptado do artigo de Nikuradse (1933). Neste gráfico, o fator de atrito é denotado por λ , a rugosidade por k e o raio do tubo por r .



Fator de atrito de Darcy-Weisbach – exemplo

Exemplo: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s num conduto de PVC, novo, de 72,50 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

Resolução:

Considerado tubo liso o \underline{e} (rugos. absol.) para o PVC será assumido igual a 0,0010 mm. Como não foi informada a temperatura da água a $\underline{\nu}$ (visc. cinem.) será $1,00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$Rey = \frac{2,50 \times 0,0725}{1,00 \times 10^{-6}} \quad Rey = 181.250$$

$$\frac{e}{D} = \frac{0,0010 \text{ mm}}{72,50 \text{ mm}} \quad \frac{e}{D} = 1,38 \times 10^{-5}$$

- Equação de Sousa & Dantas Neto (2014),

$$f = 0,1114 \cdot Di^{-0,2333} \cdot Rey^{-\left(0,1638 \cdot Di^{-0,0964}\right)}$$

$$f = 0,1114 \times 0,0725^{-0,2333} \times 181250^{-\left(0,1638 \times 0,0725^{-0,0964}\right)}$$

$$f = 0,0160$$

$$\text{Conferência: } \left[Rey \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{Di} \right) \right] < 14,14 \quad \therefore 181250 \times \sqrt{0,0160} \times 1,38 \times 10^{-5} = 0,32$$

Fator de atrito de Darcy-Weisbach – exemplo

Exemplo: determinar a perda de carga numa condução de água a velocidade de 2,50 m/s num conduto de PVC, novo, de 72,50 mm de diâmetro interno e 100 m de comprimento.

Resolução:

Considerado tubo liso o \underline{e} (rugos. absol.) para o PVC será assumido igual a 0,0010 mm. Como não foi informada a temperatura da água a $\underline{\nu}$ (visc. cinem.) será $1,00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$f = 0,0160$$

$$J = f \times \frac{V^2}{(2 \times g \times D)} \quad J = 0,0160 \times \frac{2,50^2}{(2 \times 9,80 \times 0,0725)} \quad J = 0,0704 \text{ m/m}$$

$$\Delta H = J \times L$$

$$\Delta H = 0,0704 \times 100$$

$$\Delta H = 7,04 \text{ mca}$$