

ENGENHARIA QUÍMICA
Universidade Federal de Goiás

Escoamento Viscoso no Interior de Tubulações

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
Disciplina: Fenômenos de Transporte 1
site: www.dyrney.com

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.1 Introdução

Escoamentos internos através de tubos, cotovelos, tubos em T, válvulas etc., como em refinarias de petróleo, são encontrados em praticamente todas as indústrias de processamento químico ou físico.













Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.1 Introdução

Comentário: Osborne Reynolds descobriu que o regime de escoamento depende principalmente da razão entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido cuja razão é chamada de "**Número de Reynolds**" (**Re**)



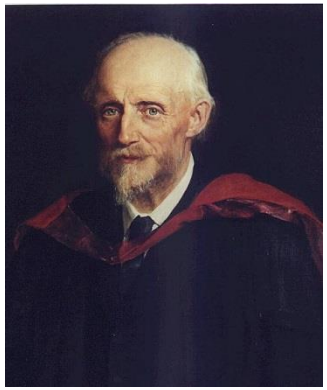
Aparelho original de Osbone Reynolds
(Universidade de Manchester)
Çengel e Cimbala (2015)

$$\mathrm{Re} = \frac{\text{forças inerciais}}{\text{forças viscosas}} = \frac{DV_{média}\rho}{\mu}$$

$\mathrm{Re} \lesssim 2300$ **escoamento laminar**

$2300 \lesssim \mathrm{Re} \lesssim 4000$ **escoamento de transição**

$\mathrm{Re} \gtrsim 4000$ **escoamento turbulento**



Osborne Reynolds
(1842 – 1912)
(Físico e engenheiro irlandês)

Para escoamento através de tubos não circulares, o número de Reynolds (**Re**) se baseia no diâmetro hidráulico (D_h), definido como

Diâmetro hidráulico: $$D_h = \frac{4Ac}{P}$$ **sendo:**

Ac = área da seção transversal do duto (**m^2 no S.I.**)

P = perímetro molhado (**m no S.I.**)

Professor Dyrney Araújo dos Santos

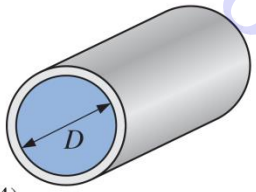
Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.1 Introdução

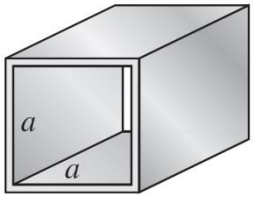
Exemplos: O diâmetro hidráulico para algumas geometrias da área da seção transversal é mostrado a seguir:

Tubo Circular



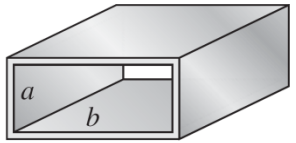
$$D_h = \frac{4(\pi D^2/4)}{\pi D} = D$$

Tubo Quadrangular



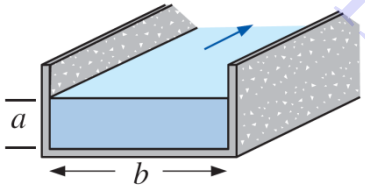
$$D_h = \frac{4a^2}{4a} = a$$

Tubo Retangular



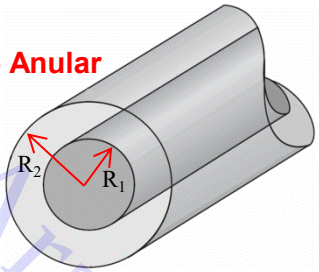
$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b}$$

Canal aberto



$$D_h = \frac{4ab}{2a+b}$$

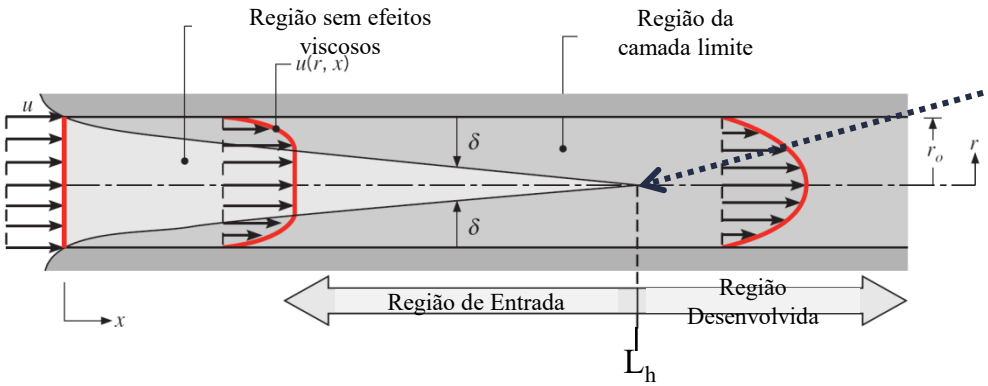
Seção Anular



Prove!!!!!!

$$D_h = D_2 - D_1$$

Região de Entrada: região onde o perfil de velocidade é função das direções radial e axial e onde os efeitos viscosos começam a serem sentidos pelo fluido.



Escoamento Dinamicamente Desenvolvido: a partir do local onde ocorre a fusão da camada-limite no eixo central do tubo (L_h). A velocidade u não varia mais com x, apenas com r.

Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

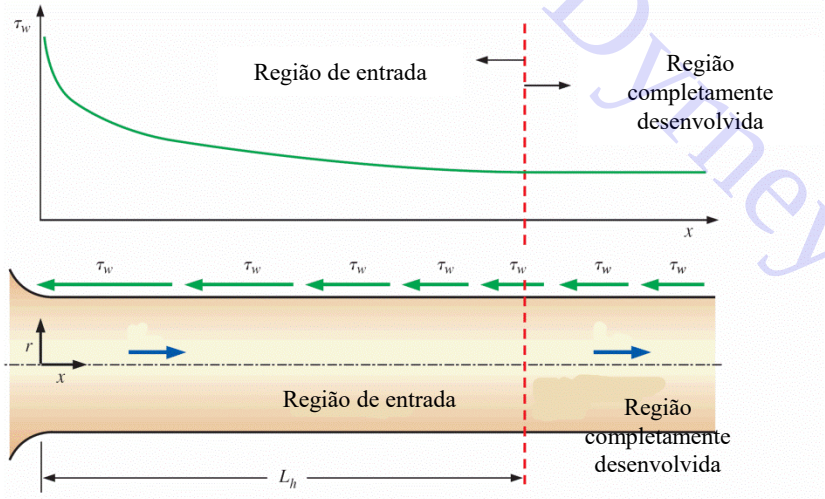
Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.1 Introdução

A tensão de cisalhamento na parede do tubo τ_w está relacionada à inclinação do perfil de velocidade (gradiente de velocidade avaliado na parede do tubo), logo τ_w permanece constante na região completamente desenvolvida;



Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

- ✓ **A tensão de cisalhamento na parede é máxima na entrada do tubo e diminui ao longo do comprimento até um valor constante;**
- ✓ **A queda de pressão é mais alta na região de entrada e o efeito da região de entrada é sempre o aumento do fator de atrito médio de todo o tubo;**
- ✓ **O aumento do fator de atrito médio pode ser significativo para tubos curtos, mas é desprezível nos tubos longos.**

Correlações para a previsão do comprimento de entrada (L_h)

- **Escoamento Laminar (Kays e Crawford, 2004) :** $\left(\frac{L_{h,la\,\min ar}}{D}\right) \approx 0,05\,\mathrm{Re}_D$

- **Escoamento Turbulento (Bhatti e Shah, 1987):** $\left(\frac{L_{h,turbulento}}{D}\right) \approx 1,359\,\mathrm{Re}_D^{1/4}$ **ou** $\left(\frac{L_{h,turbulento}}{D}\right) \approx 10$ ← **Aproximação prática para a engenharia**

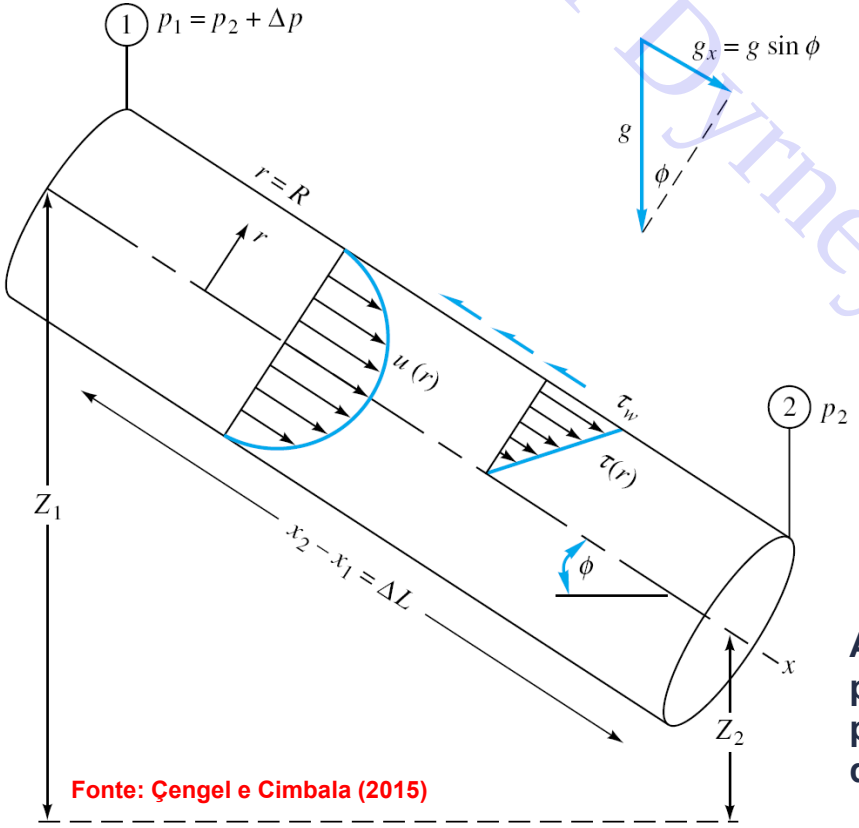
Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Aplicação do Balanço de Energia Mecânica a Fluidos Viscosos

Comentário: A "**Equação de Bernoulli**"(conservação da energia mecânica) é somente válida para fluidos ideais, ou seja, aqueles em que não ocorre dissipação de energia devido aos efeitos viscosos.



Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

Aplicação da Conservação da Energia Mecânica a fluidos Reais (viscosos)

Considere o escoamento permanente incompressível entre as seções 1 e 2 do tubo inclinado abaixo

A aplicação da conservação da energia mecânica entre os pontos 1 e 2 fornece (z medido para cima)

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + h_T$$

A soma das energias cinética, de pressão e potencial no ponto 1 é igual à soma das energias cinética, de pressão e potencial no ponto 2 mais a energia perdida durante o trajeto devido aos efeitos viscosos.

A energia perdida devido aos efeitos viscosos é chamada de "**perda de carga total**" (h_T) e tem dimensão de comprimento.

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Aplicação do Balanço de Energia Mecânica a Fluidos Viscosos

Visto que as áreas das seções transversais nos pontos 1 e 2 são iguais, tem-se $V_1 = V_2$, logo:

$$h_T = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} + z_1 - z_2 \longrightarrow \boxed{h_T = \frac{-\Delta P}{\rho g} + \Delta z}$$

A carga de pressão menos a carga potencial é denominada de pressão piezométrica ($\mathbb{P}$), logo, de uma forma geral pode-se escrever

$$\boxed{h_T = \frac{-\Delta \mathbb{P}}{\rho g}}$$

A perda de carga entre dois pontos na tubulação pode ser calculada através da queda de pressão piezométrica entre os respectivos pontos, medida por meio de um manômetro do tipo "U".

Nota-se que, se a tubulação for horizontal, não existe variação de carga potencial e, desta forma, $\Delta z = 0$ e a equação se resume a

$$\boxed{h_T = \frac{-\Delta P}{\rho g}}$$

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Aplicação do Balanço de Energia Mecânica a Fluidos Viscosos

Relação entre o "fator de atrito" (*f*) e a "perda de carga" em tubulações (h_T)

Na seção sobre análise dimensional, verificamos que os adimensionais relevantes ao problema de escoamento de fluidos viscosos em tubulações podem ser relacionados como a seguir:

$$f = \mathrm{f}\left(Re, \frac{\varepsilon}{D}\right)$$ sendo *f* o "fator de atrito de Darcy", dado por $$f = \frac{-\Delta \mathcal{P} D}{\left(\rho V^2/2\right) L}$$

f **é uma função da rugosidade relativa (ε/D) e do número de Reynolds (Re)**

Isolando-se a queda de pressão da equação e dividindo ambos os membros por g, tem-se:

$$\frac{-\Delta \mathcal{P}}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

A queda de pressão pode ser expressa, de uma forma geral, em termos da queda de pressão piezométrica

Finalmente, substituindo esta expressão na equação anterior da perda de carga total, tem-se:

$$h_T = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Observações:

- **Quanto maior for o comprimento da tubulação (L) e/ou a velocidade média de escoamento (V), maior será h_T;**
- **Quanto menor o diâmetro da tubulação (D), maior será h_T;**
- **Como já foi visto anteriormente, *f* pode ser obtido por meio do diagrama de "Moody", no caso de fluidos newtonianos.**

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

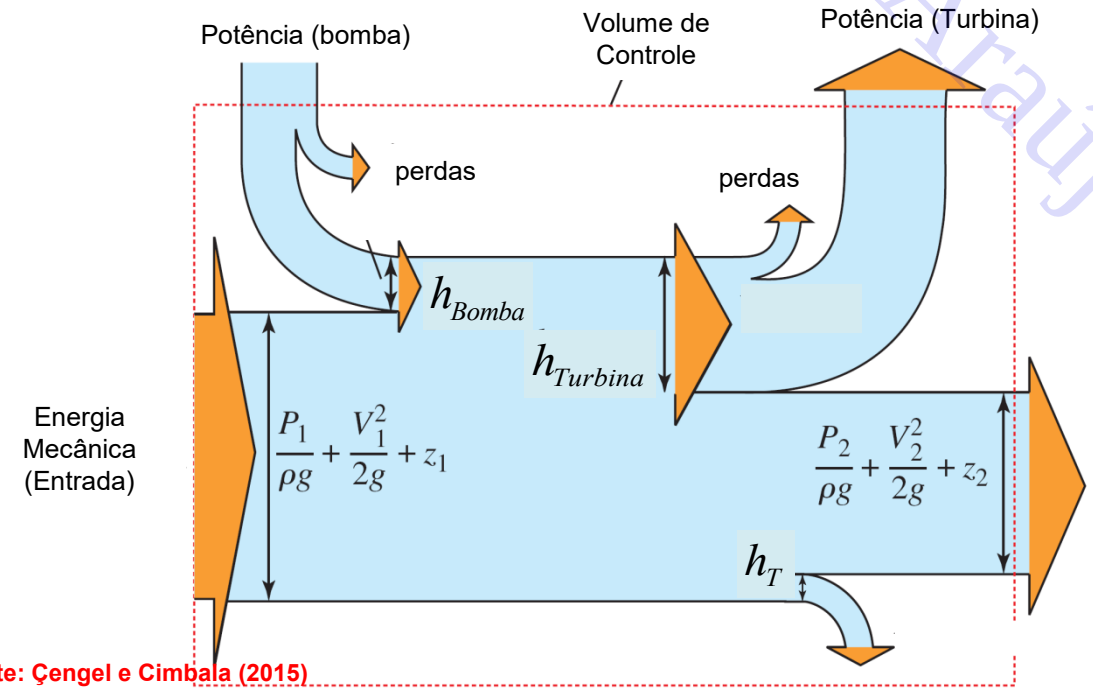
7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Aplicação do Balanço de Energia Mecânica a Fluidos Viscosos

Caso haja uma carga útil fornecida ao fluido por uma bomba ou altura manométrica da bomba (h_{Bomba}) e/ou uma carga útil extraída do fluido por uma turbina ($h_{turbina}$), a Equação da Energia Mecânica pode ser escrita na sua forma completa como:

$$\frac{V_1^2}{2g}+\frac{P_1}{\rho g}+z_1+h_{Bomba}=\frac{V_2^2}{2g}+\frac{P_2}{\rho g}+z_2+h_T+h_{Turbina}$$

Gráfico de fluxo de energia mecânica envolvendo bomba e turbina



No diagrama ao lado, cada termo de energia é expresso como uma altura de coluna equivalente do fluido, ou seja, como CARGA.

Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Aplicação do Balanço de Energia Mecânica a Fluidos Viscosos

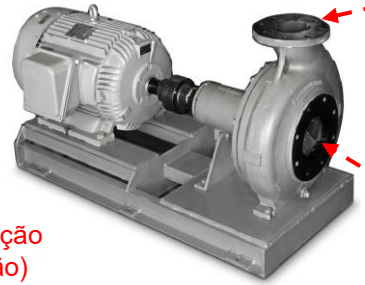
BOMBA CENTRÍFUGA:

recebe o trabalho de eixo (em geral, de um motor elétrico) e o transfere para o fluido como energia mecânica.

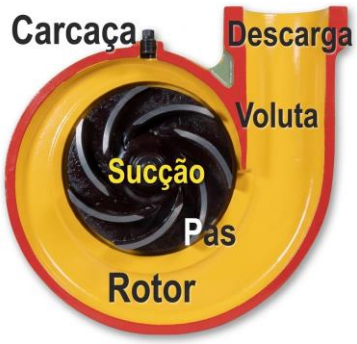
Bomba centrífuga



Bomba acoplada ao motor

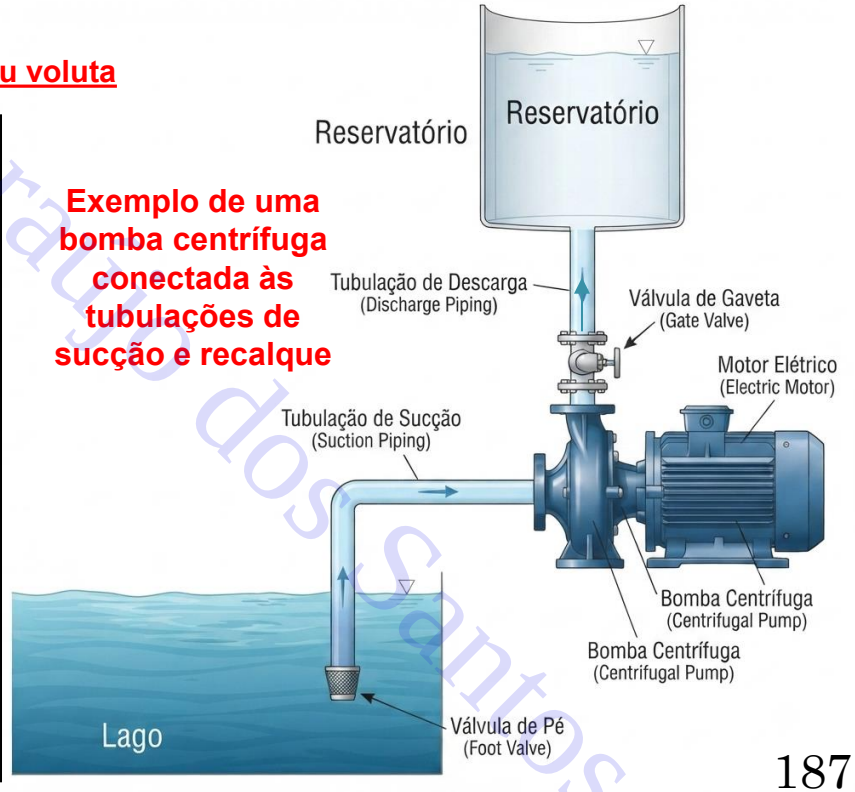


Corte transversal de uma bomba centrífuga destacando a carcaça ou voluta



Pela rotação do rotor, há a formação de uma zona de baixa pressão na região de sucção; esta carga de pressão (gradiente de pressão) faz o fluido ser succionado para a entrada da sucção da bomba e chegar até o rotor; a rotação do rotor fornece energia cinética para o fluido; a geometria em forma de voluta da bomba (forma de "caracol") permite um aumento da área, ou seja, a carga cinética dada pelo rotor diminui e há um aumento da carga de pressão. Desta forma, basicamente, a bomba centrífuga serve para aumentar a carga de pressão para vencer as perdas de carga e fazer com que o fluido escoe com uma vazão específica.

Exemplo de uma bomba centrífuga conectada às tubulações de sucção e recalque



Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

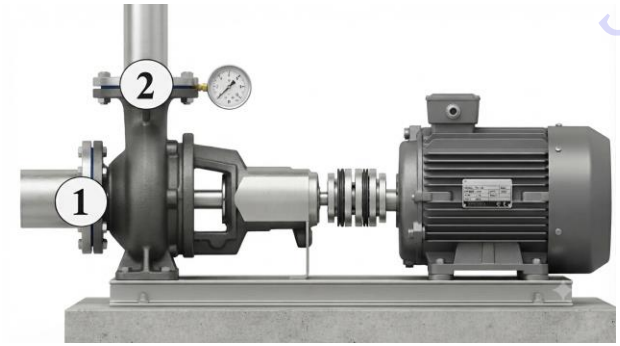
7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Aplicação do Balanço de Energia Mecânica a Fluidos Viscosos

Potência útil de uma bomba ($\dot{W}_{bomba,útil}$): **pode ser definida como a potência necessária para causar um aumento de pressão (ΔP) a uma determina vazão de fluido (Q), caso não houvessem perdas irreversíveis na bomba.**

$$\dot{W}_{bomba,útil} = \Delta P Q \quad \text{(Eq. 1)}$$

Uma outra forma de escrever a Eq. 1, em função da altura manométrica da bomba (h_{Bomba}), é dada a seguir. Aplicando a Equação de Bernoulli (caso não houvessem perdas irreversíveis) entre a sucção e o recalque de uma bomba, tem-se:



$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 + h_{Bomba} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2$$

$$(P_2 - P_1) = \Delta P = \rho g \left[h_{Bomba} - (z_2 - z_1) - \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g} \right] \quad \text{(Eq. 2)}$$

Substituindo Eq. 2 em Eq. 1, tem-se:

$$\dot{W}_{bomba,útil} = \rho g \left[h_{Bomba} - (z_2 - z_1) - \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g} \right] Q \quad \text{(Eq. 3)}$$

Observação: Se os diâmetros das tubulações de sucção e recalque forem iguais e se a diferença de altura entre a sucção e o recalque for desprezível, a Eq. 3 pode ser simplificada, como mostrado a seguir:

$$\dot{W}_{bomba,útil} = \rho g h_{Bomba} Q \quad \text{(Eq. 4)}$$

Devido às perdas irreversíveis, a Potência real fornecida pelo motor à bomba para causar o mesmo aumento de pressão a uma mesma vazão de fluido deve ser maior do que a potência útil.

$$\dot{W}_{bomba} = \frac{\dot{W}_{bomba,útil}}{\eta_{Bomba}}$$

sendo: η_{Bomba} a eficiência da bomba que varia de 0 a 1 ou de 0% a 100%.

Logo: $\dot{W}_{Bomba} = \frac{\Delta P Q}{\eta}$ **ou** $\dot{W}_{Bomba} = \frac{\rho g h_{Bomba} Q}{\eta}$ **(Simplificado)**

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

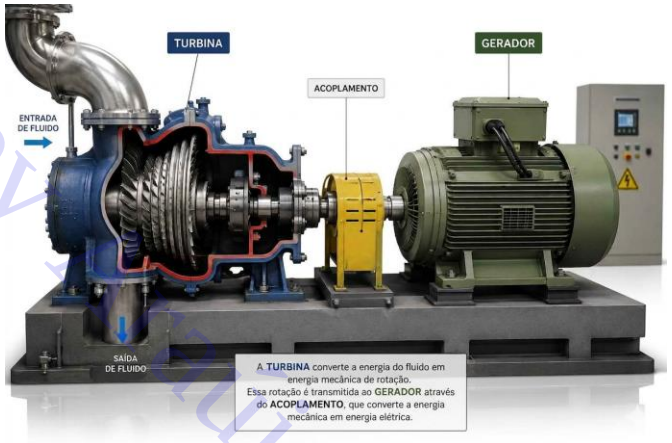
7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Aplicação do Balanço de Energia Mecânica a Fluidos Viscosos

A Eficiência Mecânica da Bomba Centrífuga (η_{Bomba}) não deve ser confundida com a eficiência do motor (η_{motor}), definidas como:

$$\eta_{Bomba} = \frac{\text{aumento da potência mecânica do fluido}}{\text{entrada de potência mecânica}} \quad \textbf{e} \quad \eta_{Motor} = \frac{\text{saída de potência mecânica}}{\text{entrada de energia elétrica}}$$

TURBINA: a turbina funciona de forma contrária à bomba; recebe energia mecânica do fluido, o qual movimenta as suas pás, e converte em trabalho de eixo que, por meio de um gerador, é convertido em energia elétrica.



Potência real da Turbina: por analogia do que foi feita anteriormente para o caso da bomba, a **potência real** extraída do fluido pela turbina é menor do que a **potência útil**, logo:

$$\dot{W}_{Turbina} = \eta_{Turbina}\dot{W}_{Turbinaba,útil} = \eta_{Turbina}\rho g h_{Turbina} Q$$

sendo: $\eta_{Turbina}$ **a eficiência da turbina que varia de 0 a 1 ou de 0% a 100%.**

A Eficiência Mecânica da Turbina ($\eta_{Turbina}$) não deve ser confundida com a eficiência do gerador ($\eta_{gerador}$), definidas como:

$$\eta_{Turbina} = \frac{\text{saída de potência mecânica}}{\text{diminuição da potência mecânica do fluido}} \quad \textbf{e} \quad \eta_{gerador} = \frac{\text{saída de energia elétrica}}{\text{entrada de potência mecânica}}$$

Professor Dyrney Araújo dos Santos

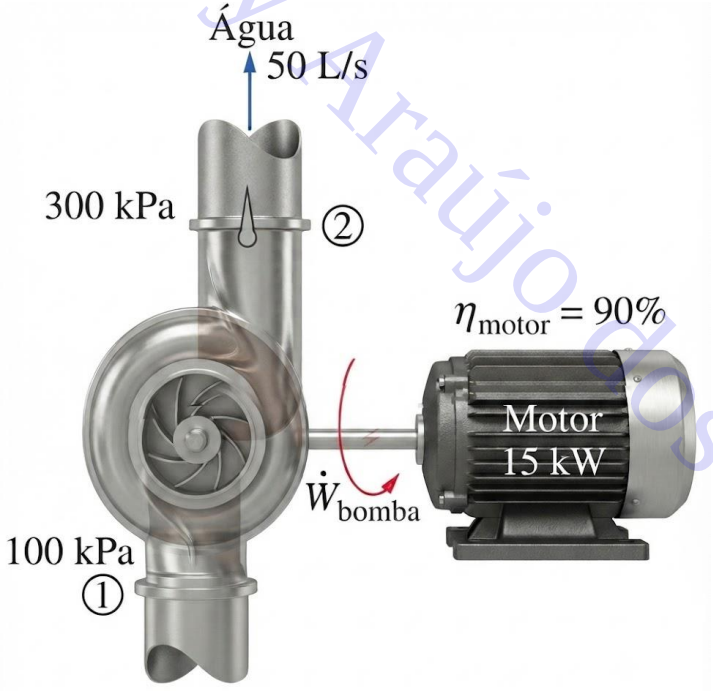
Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

Exercício proposto 10: **A bomba de um sistema de distribuição de água (ρ = 1000 kg/m^3 e c_p = 4180 J/(kg./°C)) é alimentada por um motor elétrico de 15 kW cuja eficiência é de 90%. A vazão de água através da bomba é de 50 L/s. Os diâmetros dos tubos de entrada (sucção) e saída (recalque) são iguais, e a diferença de elevação através da bomba é desprezível. Se as pressões absolutas na entrada e na saída da bomba são medidas como 100 kPa e 300 kPa, respectivamente, determine**

a) a eficiência mecânica da bomba;

b) a elevação de temperatura da água à medida que ela escoa através da bomba devido à ineficiência mecânica.



Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

Exercício proposto 11: Uma bomba submersível com uma potência de eixo de **5 kW** e uma eficiência de **72%** é usada para bombear a água (ρ = 1000 kg/m^3) de um lago para uma piscina através de um tubo de diâmetro constante. A superfície livre da piscina está **25 m** acima da superfície livre do lago. Se a perda de carga total no sistema de tubulação é de **4 m** (h_T), determine a vazão de descarga de água e a diferença de pressão através da bomba.



Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.3 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

A perda de carga total (h_T) pode ser escrita como sendo a soma da perda de carga distribuída (h_L) e da perda de carga localizada (h_S)

$$h_T = h_L + h_S$$

h_L: perda de carga devido aos trechos retos de tubulações (dimensão de comprimento)

h_S: perda de carga nos "acidentes" existentes na tubulação (dimensão de comprimento)

A) Perda de Carga Distribuída (h_L):

Para o caso de uma tubulação sem acidentes, tem-se:

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Comentário: Em se tratando de um fluido newtoniano, o fator de atrito pode ser obtido por meio do "Diagrama de Moody", mostrado a seguir

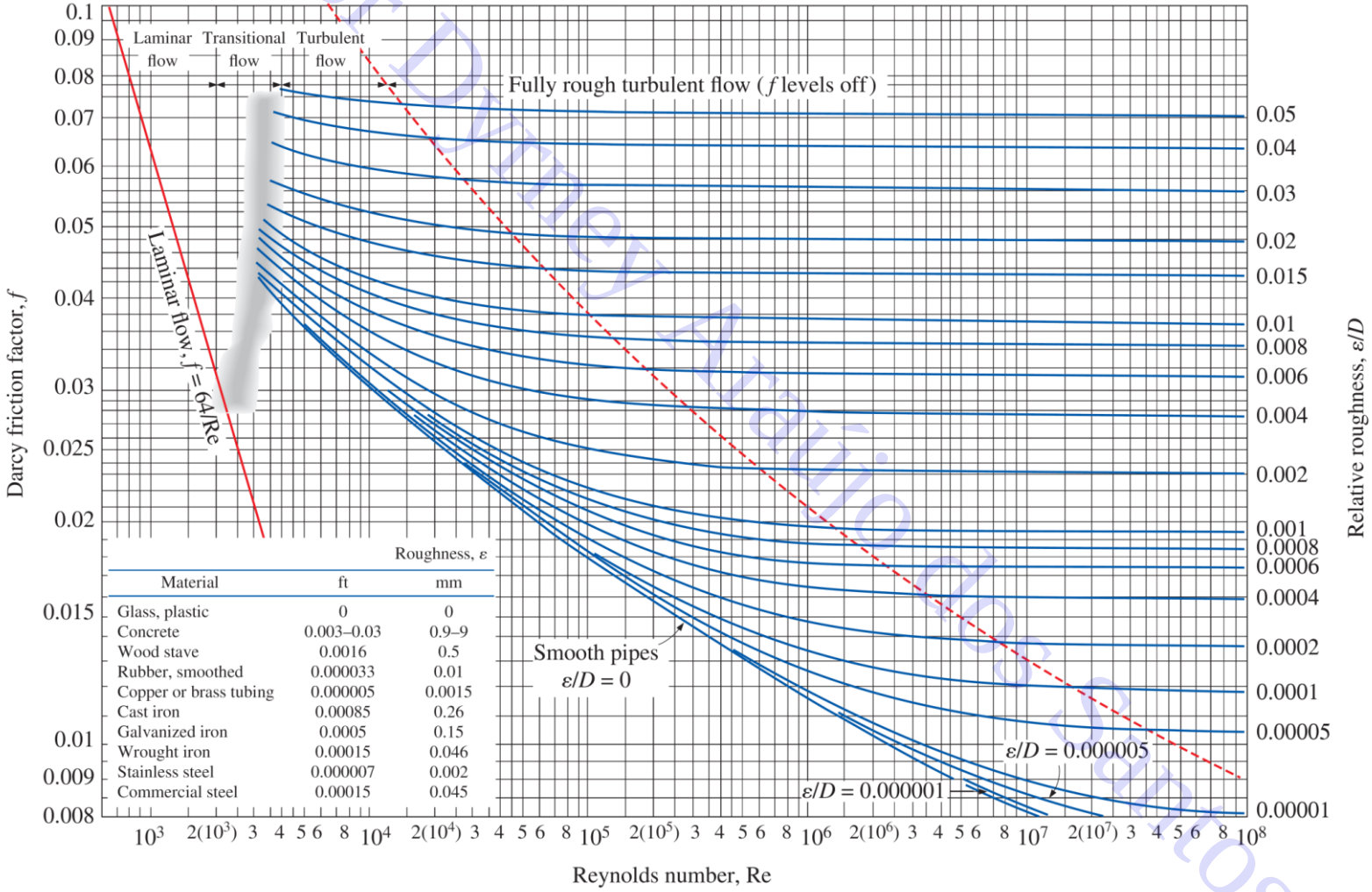
Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

A) Perda de Carga Distribuída (h_L):

Diagrama de Moody para se obter o fator de atrito (f)



Roughness, ε

Material	ft	mm
Glass, plastic	0	0
Concrete	0.003–0.03	0.9–9
Wood stave	0.0016	0.5
Rubber, smoothed	0.000033	0.01
Copper or brass tubing	0.000005	0.0015
Cast iron	0.00085	0.26
Galvanized iron	0.0005	0.15
Wrought iron	0.00015	0.046
Stainless steel	0.000007	0.002
Commercial steel	0.00015	0.045

Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

A) Perda de Carga Distribuída (h_L):

Valores recomendados de rugosidade (ε) para dutos comerciais

Material	Condição	ε (mm)
Aço	Chapa metálica, nova	0,05
	Inoxidável, novo	0,002
	Comercial, novo	0,046
Ferro	Fundido, novo	0,26
	Galvanizado, novo	0,046
Latão	Estirado, novo	0,002
Plástico	Tubo estirado	0,0015
Vidro	----	Liso
Concreto	Alisado	0,04
	Rugoso	2,0
Borracha	Alisada	0,01
Madeira	Aduela	0,5

Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

A) Perda de Carga Distribuída (h_L):

Relações do fator de atrito para escoamentos laminar e turbulento

Para o caso de um escoamento laminar no interior de uma tubulação (escoamento de Hagen-Poiseuille), foi demonstrado que a distribuição de velocidades é dada por:

$$V_z = \frac{-\Delta \mathbb{P} R^2}{4\mu L}\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right]$$

sendo a velocidade média calculada pela integral de área, resultando em:

$$V = \frac{-\Delta \mathbb{P} R^2}{8\mu L} = \frac{-\Delta \mathbb{P} D^2}{32\mu L}$$

Isolando-se $\Delta \mathbb{P}$ da equação acima, e dividindo ambos os lados por ρg tem-se:

$$\frac{-\Delta \mathbb{P}}{\rho g} = \frac{32\mu L V}{\rho g D^2} \quad \textbf{(Eq. 3)}$$

Vimos que a perda de carga pode ser escrita, tanto em termos do fator de atrito, quanto da queda de pressão. Logo:

$$h_L = \frac{-\Delta \mathbb{P}}{\rho g} = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \quad \textbf{(Eq. 4)}$$

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

A) Perda de Carga Distribuída (h_L):

Igualando-se as Equações 3 e 4, tem-se:

$$f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}=\frac{32\mu LV}{\rho g D^2}$$

Logo, após rearranjar a equação acima, tem-se:

$$f=\frac{64\mu}{DV\rho} \longrightarrow \boxed{f=\frac{64}{Re}}$$

Escoamento Laminar

Para o escoamento laminar em um tubo, o fator de atrito (*f*) independe da rugosidade relativa (ε/D), sendo dependente apenas do número de Reynolds (Re). Isto ocorre porque forma-se uma película de fluido junto às paredes do tubo, independentemente de sua rugosidade. Esta película de fluido estático faz com que o tubo se comporte como liso.

Já para um escoamento plenamente turbulento no interior de uma tubulação, pode-se observar, pelo "Diagrama de Moody", que o *f* é uma função apenas da rugosidade relativa (ε/D)

$$f=\mathrm{f}\left(\varepsilon/D\right)$$

Escoamento Plenamente Turbulento

Professor Dyrney Araújo dos Santos

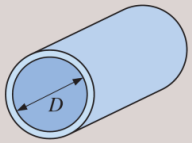
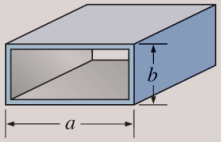
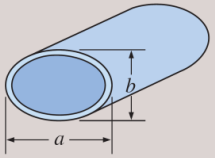
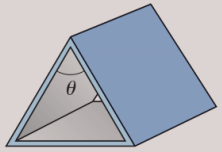
Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

A) Perda de Carga Distribuída (h_L):

Escoamento Laminar em Tubos não Circulares: as relações do fator de atrito para o escoamento laminar completamente desenvolvido em tubos de diversas seções transversais são dadas abaixo. O número de Reynolds desses tubos tem por base o diâmetro hidráulico.

Tube Geometry	a/b or $\theta°$	Friction Factor f
Circle 	—	64.00/Re
Rectangle 	a/b	
	1	56.92/Re
	2	62.20/Re
	3	68.36/Re
	4	72.92/Re
	6	78.80/Re
	8	82.32/Re
	∞	96.00/Re
Ellipse 	a/b	
	1	64.00/Re
	2	67.28/Re
	4	72.96/Re
	8	76.60/Re
	16	78.16/Re
Isosceles triangle 	θ	
	10°	50.80/Re
	30°	52.28/Re
	60°	53.32/Re
	90°	52.60/Re
	120°	50.96/Re

Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

A) Perda de Carga Distribuída (h_L):

Tipos de Problemas que envolvem o cálculo da perda de carga distribuída (h_L)

Existem três problemas clássicos na hidráulica de fluidos newtonianos:

Problema do Tipo 1: Conhecidos ***V***, **L**, **D**, **ε**, **μ** e **ρ**, deseja-se calcular $-\Delta P$ *(queda de pressão)*

Problema do Tipo 2: Conhecidos $-\Delta P$, **L**, **D**, **ε**, **μ** e **ρ**, deseja-se calcular ***V*** *(velocidade)*

Problema do Tipo 3: Conhecidos ***V***, $-\Delta P$, **L**, **ε**, **μ** e **ρ**, deseja-se calcular ***D*** *(diâmetro do tubo)*

I) Resolução de Problemas do Tipo 1 – Cálculo de $-\Delta P$

Este é considerado um problema de fácil resolução pois são conhecidas todas as variáveis necessárias ao cálculo de *f* através do "Diagrama de Moody"

$$f = \mathrm{f}\left(\frac{DV\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{D}\right) \qquad \textbf{logo} \qquad -\Delta\mathbb{P} = f\,\frac{\rho L}{D}\,\frac{V^2}{2}$$

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

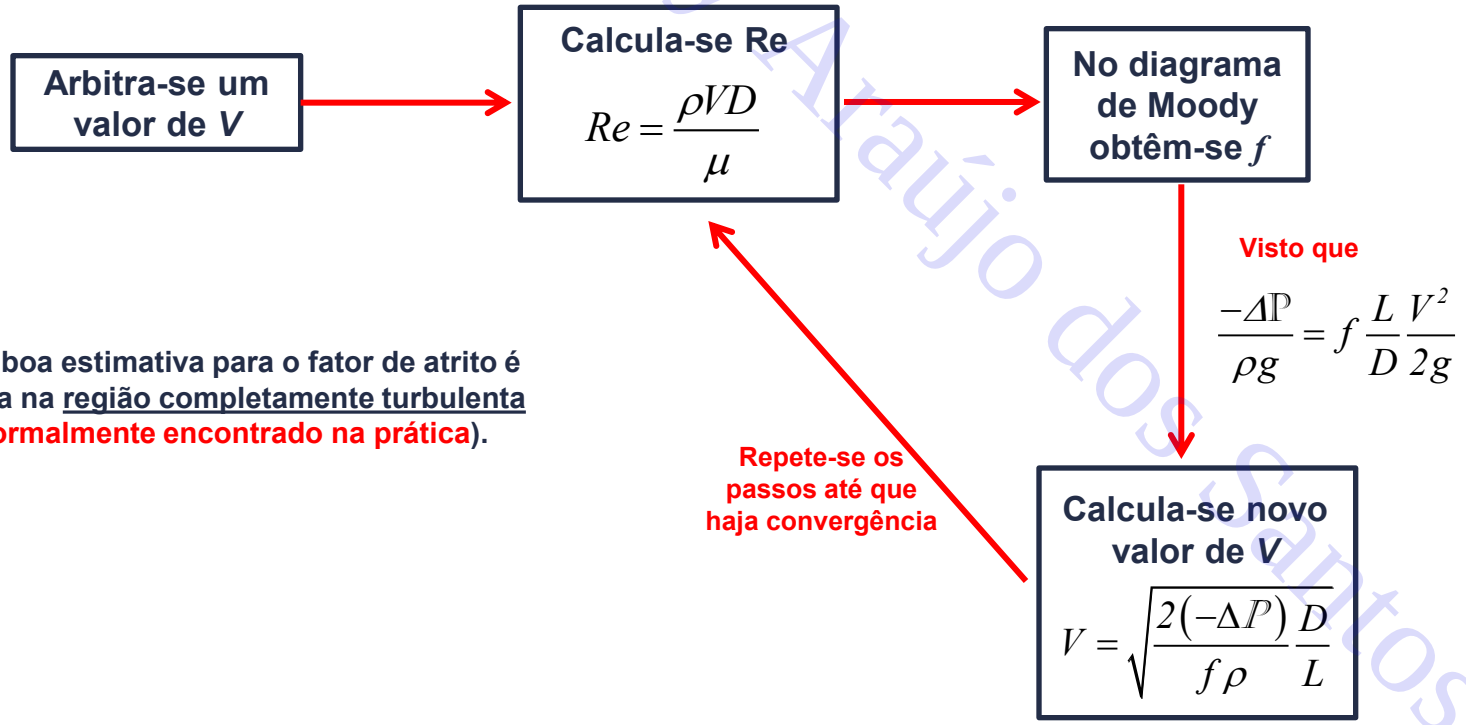
A) Perda de Carga Distribuída (h_L):

Tipos de Problemas que envolvem o cálculo da perda de carga distribuída (h_L)

II) Resolução de Problemas do Tipo 2 – Cálculo de *V*

Este é considerado um problema de médio grau de dificuldade pois não se sabe a velocidade e, consequentemente, não é possível o cálculo do número de Reynolds e do fator de atrito.

Neste caso, um procedimento iterativo deve ser utilizado



Uma boa estimativa para o fator de atrito é obtida na região completamente turbulenta (normalmente encontrado na prática).

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

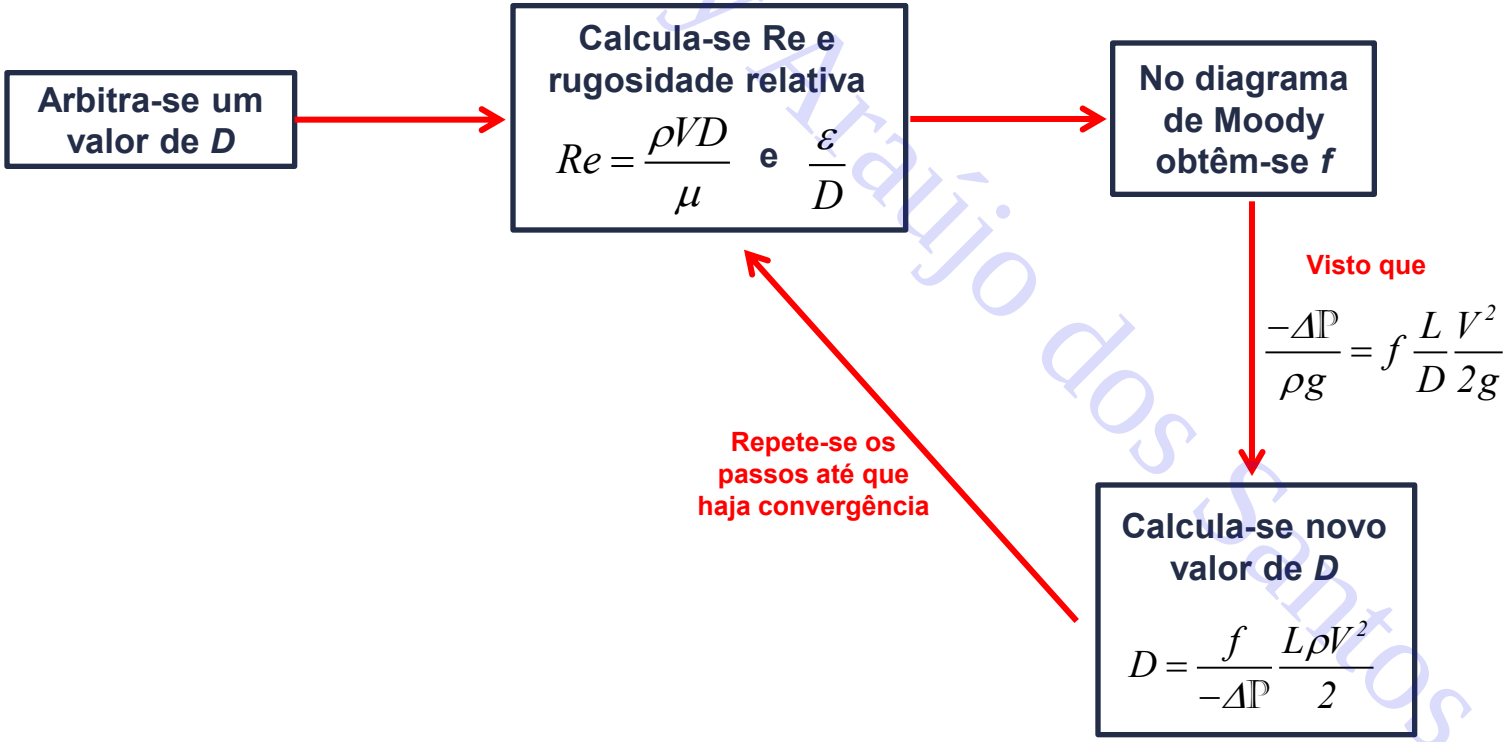
A) Perda de Carga Distribuída (h_L):

Tipos de Problemas que envolvem o cálculo da perda de carga distribuída (h_L)

III) Resolução de Problemas do Tipo 3 – Cálculo de *D*

Este é o problema de mais difícil resolução pois, como D não é conhecido, não é possível calcular *Re* e *ε/D* e, consequentemente, o fator de atrito *f*.

Neste caso, um procedimento iterativo deve ser utilizado



Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

Exercício proposto 12: Água a 16°C escoa estacionariamente em um tubo horizontal de 5,08 cm de diâmetro interno feito de aço inoxidável (ε = 0,000002 m) a uma vazão de 0,0056 m^3/s. Determine a queda de pressão para o escoamento em uma seção do tubo com 61 m de comprimento.

Propriedades da água a 16°C:

$\mu = 1{,}12 \times 10^{-3}$ kg/(m.s)

$\rho = 998{,}91$ kg/m^3

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

Exercício proposto 13: Ar aquecido a **1 atm** e **35°C** deve ser transportado em um duto plástico circular (**ε = 0,0000015m**) de **150 m** de comprimento a **0,35 m^3/s**. Se a perda de carga no tubo não deve exceder os **20 m**, determine o diâmetro mínimo do duto.

Propriedades do ar 35°C:

$\mu = 1{,}895 \times 10^{-5}$ kg/(m.s)

$\rho = 1{,}145$ kg/m^3

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

Exercício proposto 14: **Reconsidere o "Exercício proposto 13". Agora, o comprimento do duto dobra enquanto seu diâmetro é mantido constante. Se a perda de carga total deve permanecer constante, determine a queda na vazão através do duto.**

Propriedades do ar 35°C:

$\mu = 1{,}895 \times 10^{-5}$ kg/(m.s)

$\rho = 1{,}145$ kg/m^3

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

B) Perda de Carga Localizada ou em "acidentes" (h_S):

Para qualquer sistema de tubulação, além da perda de carga por atrito ao longo de um trecho reto de tubo, existem perdas adicionais chamadas de perdas localizadas (em acessórios), que podem ser decorrentes de, dentre outros:

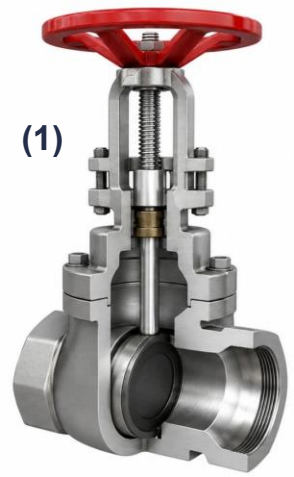
- **Expansões ou contrações bruscas;**

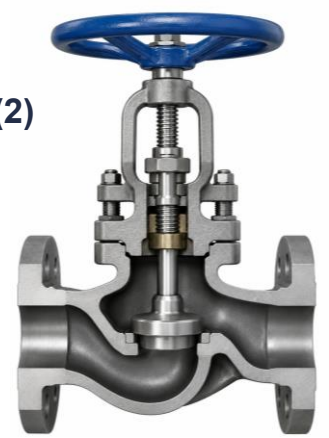


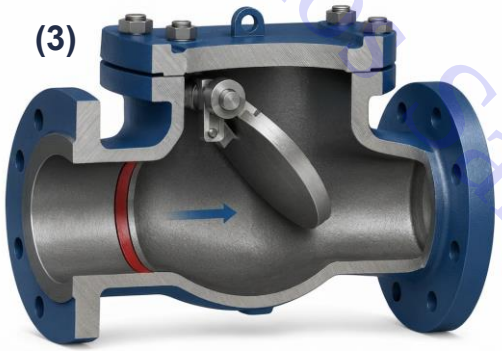
- **Curvas, cotovelos, tês e outros acessórios;**

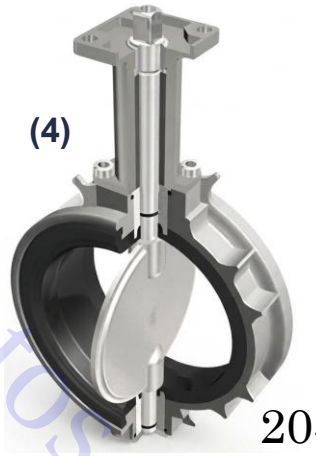


- **Válvulas (abertas ou parcialmente fechadas). Ex.: (1) válvula gaveta; (2) válvula globo; (3) válvula de retenção; (4) válvula borboleta**







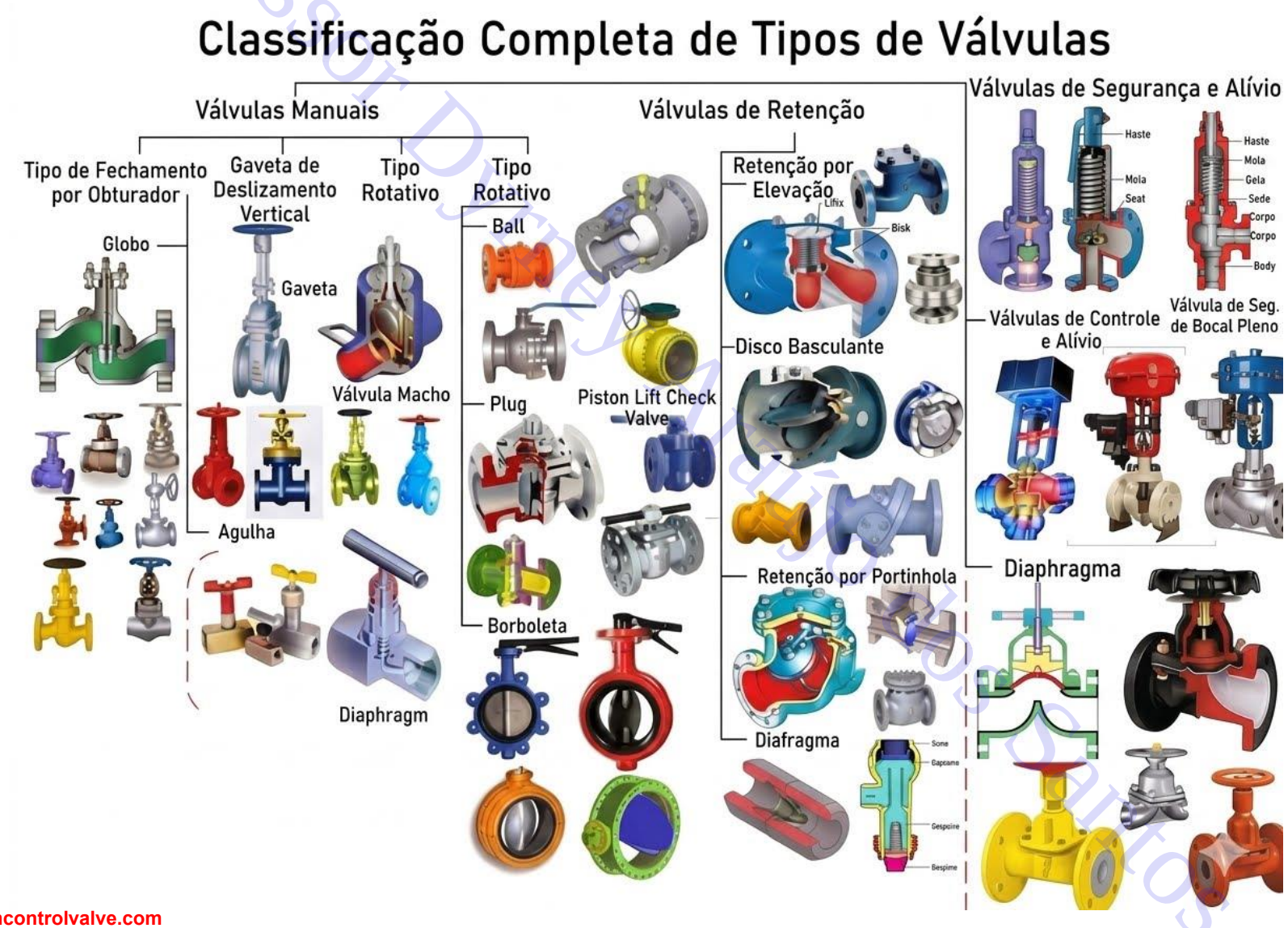


Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

B) Perda de Carga Localizada ou em "acidentes" (h_s):



www.cncontrolvalve.com

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

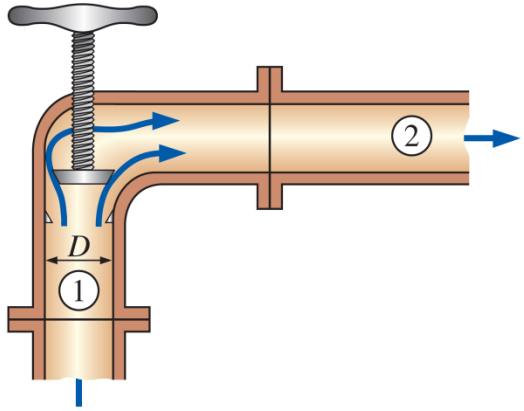
B) Perda de Carga Localizada ou em "acidentes" (h_S):

Existem dois métodos para o cálculo de h_S:

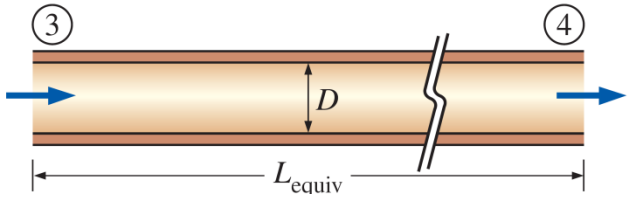
I) *Método do Comprimento Equivalente (L_{eq})*

Definição: L_{eq} é o comprimento do tubo, com o diâmetro da tubulação, que produz a mesma perda de carga que o acessório. Para o acessório "i", tem-se

$$(h_S)_i = f\left(\frac{L_{eq}}{D}\right)_i \frac{V^2}{2g}$$



$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_3 - P_4$$



Para n_i acessórios na tubulação, tem-se a perda de carga localizada total como uma simples soma das perdas de carga em cada "acidente". Caso a tubulação tenha diâmetro constante, tem-se

$$h_S = \frac{V^2}{2g}\sum_i^{n_i} f_i\left(\frac{L_{eq}}{D}\right)_i$$

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

B) Perda de Carga Localizada ou em "acidentes" (h_S):

Comprimento equivalente adimensional para algumas válvulas e acessórios

Tipos de Acessórios		Comprimento Equivalente (L_{eq}/D)
Válvulas (completamente abertas)		
Válvula de gaveta		8
Válvula globo		340
Válvula angular		150
Válvula de esfera		3
Válvula de retenção:	globo	600
	angular	55
Válvula de pé de crivo:	disco solto	420
	disco articulado	75
Cotovelo-padrão:	90°	30
	45°	16
Tê-padrão:	escoamento principal	20
	escoamento lateral (ramal)	60

Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

B) Perda de Carga Localizada ou em "acidentes" (h_S):

ii) *Método do Coeficiente de Resistência (k_i)*

Definição: k_i é a constante de proporcionalidade ou o coeficiente de relação entre a perda de carga no acidente e a carga de velocidade do fluido, ou seja

$$\left(h_S\right)_i = k_i \frac{V^2}{2g}$$

para n_i acidentes e diâmetro constante

$$h_S = \frac{V^2}{2g} \sum_i^{n_i} k_i$$

Relação entre o comprimento equivalente (Leq) e o coeficiente de resistência (k_i)

É evidente que,

$$\left(h_S\right)_i = f\left(\frac{L_{eq}}{D}\right)_i \frac{V^2}{2g} = k_i \frac{V^2}{2g}$$

logo,

$$k_i = f\left(\frac{L_{eq}}{D}\right)_i$$

Professor Dyrney Araújo dos Santos

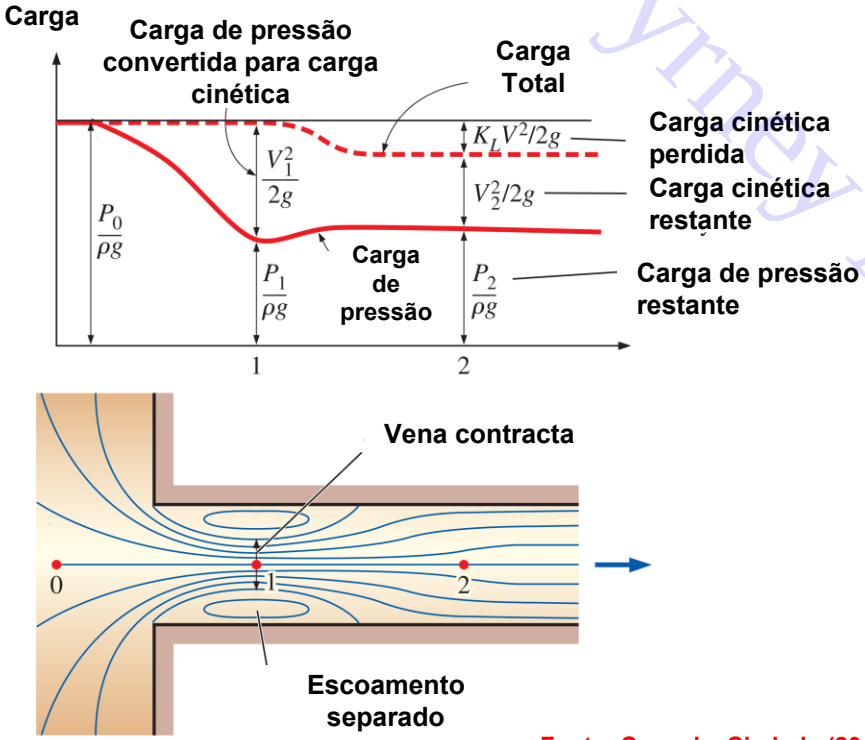
Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

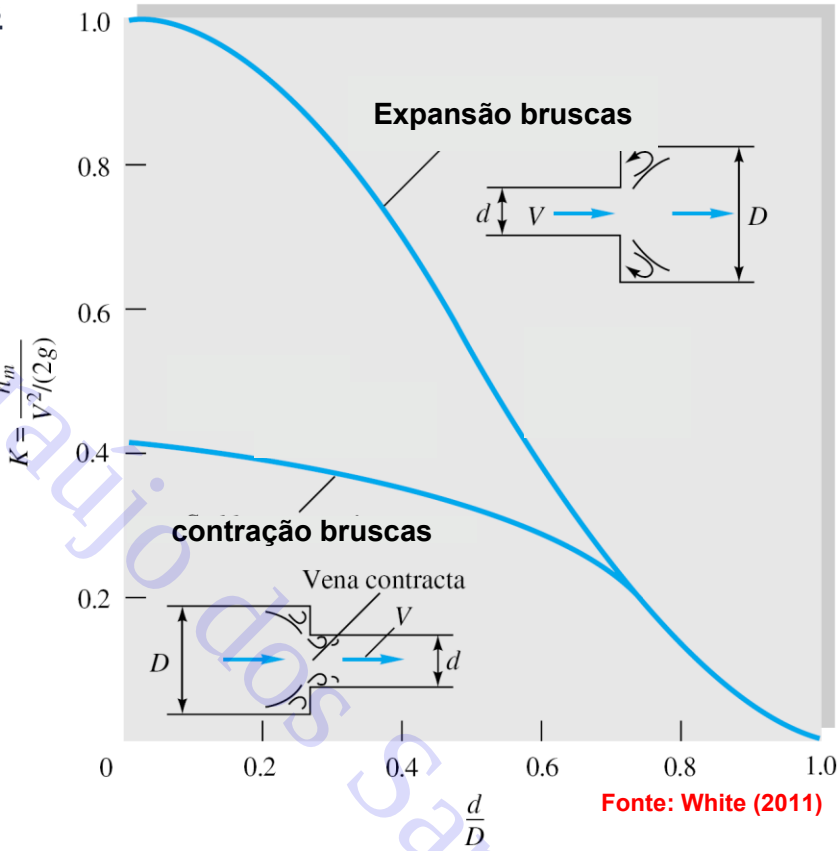
7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

B) Perda de Carga Localizada ou em "acidentes" (h_s):

Perda de carga em expansões e contrações bruscas



Fonte: Çengel e Cimbala (2015)



Fonte: White (2011)

Vena contracta: estreitamento das linhas de corrente de um fluido após uma redução súbita do diâmetro do tubo. Visto que o fluxo não pode mudar de direção tão rapidamente a ponto de preencher todo o espaço disponível, isto resulta em **separação interna de fluxo no local (zona de recirculação)**.

Nota-se que o coeficiente de perda se baseia na velocidade no tubo de menor diâmetro.

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

B) Perda de Carga Localizada ou em "acidentes" (h_s):

Coeficiente de resistência k para válvulas abertas, cotovelos e tês.

	Diâmetro nominal, pol. (mm)						
	Rosqueada				Flangeada		
Tipos de Acessórios	**½ (13)**	**1 (25)**	**2 (50)**	**4 (100)**	**1 (25)**	**2 (50)**	**4 (100)**
Válvulas (completamente abertas):							
Globo	14	8,2	6,9	5,7	13	8,5	6,0
Gaveta	0,3	0,24	0,16	0,11	0,80	0,35	0,16
Retenção	5,1	2,9	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0
Cotovelos:							
45°	0,39	0,32	0,30	0,29			
90°	2,0	1,5	0,95	0,64	0,50	0,39	0,30
180°	2,0	1,5	0,95	0,64	0,41	0,35	0,30
Tês:							
Escoamento direto	0,90	0,90	0,90	0,90	0,24	0,19	0,14
Escoamento no ramal	2,4	1,8	1,4	1,1	1,0	0,80	0,64

Fonte: Çengel e Cimbala (2015)

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

7.2 Cálculo da Perda de Carga Total (h_T)

B) Perda de Carga Localizada ou em "acidentes" (h_S):

Finalmente, pode-se escrever, de uma forma geral, a perda de carga total como sendo:

$$h_T = h_L + h_S$$

Logo, a perda de carga total em termos do Leq (Eq. 5) e em termos do k (Eq. 6) são dadas a seguir,

$$h_T = \sum_k^{n_k} f_k \frac{L_k}{D_k}\frac{V_k^2}{2g} + \sum_i^{n_i} f_i \left(\frac{L_{eq}}{D}\right)_i \frac{V_i^2}{2g} \quad \text{Eq.5}$$

$$h_T = \sum_k^{n_k} f_k \frac{L_k}{D_k}\frac{V_k^2}{2g} + \sum_j^{n_j} k_j \frac{V_j^2}{2g} \quad \text{Eq.6}$$

sendo n_i + n_j o número total de acidentes e n_k os diferentes trechos retos de tubulação

Ou , no caso de tubulação com diâmetro constante e mesmo material, teremos, respectivamente

$$h_T = \left(\frac{L}{D} + \sum_i^{n_i}\left(\frac{L_{eq}}{D}\right)_i\right) f \frac{V^2}{2g} \quad \text{Eq.7}$$

$$h_T = \left(f\frac{L}{D} + \sum_j^{n_j} k_j\right)\frac{V^2}{2g} \quad \text{Eq.8}$$

Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Curso de Engenharia Química
site: www.dyrney.com

7 . Escoamento Viscoso em Tubulação

Exercício proposto 15: Uma solução (ρ = 1,1 g/cm^3 e μ = 0,85 cp) deve ser transportada de um reservatório até uma torre de absorção (ver figura). A pressão do manômetro à entrada da coluna é de 15 kgf/cm^2 e a vazão do processo é de 10 m^3/h. Qual a potência fornecida ao fluido pela bomba? Qual a pressão indicada pelo manômetro situado após a bomba? A tubulação é de aço comercial com 2 in na sucção da bomba e 1½ in em seu recalque.

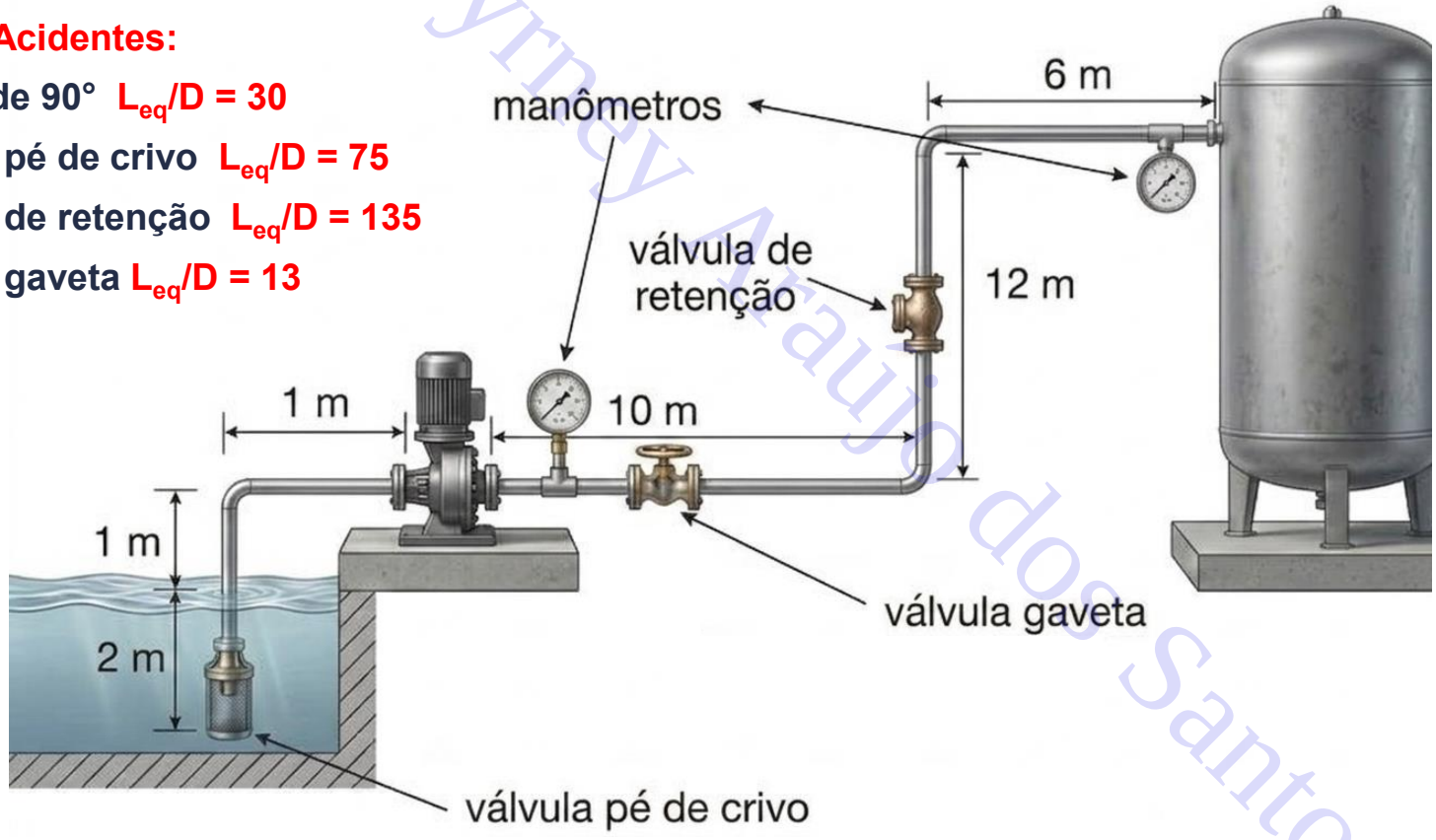
Dados Acidentes:

joelho de 90° $L_{eq}/D = 30$

válvula pé de crivo $L_{eq}/D = 75$

válvula de retenção $L_{eq}/D = 135$

válvula gaveta $L_{eq}/D = 13$



Professor Dyrney Araújo dos Santos

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
Engenharia Química
site: www.dyrney.com

Bibliografia

BIRD, R.B.; STEWART, W.E. e; LIGHTFOOT, E.N. Fenômenos de transporte, 2ª ed., LTC, 2004.

ÇENGEL, Y.A e CIMBALA, J.M.; Mecânica dos fluidos, McGraw Hill, 3ª edição, 2015.

WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos. 6ª edição. MCGRAW-HILL, 2011.

Professor Dyrney Araújo dos Santos