



Introdução à Mecânica dos Fluidos

Prof. Carlos Eduardo Catunda

PARTE - 2/2

Material disponível em:

<http://www.cefet-rj.br/index.php/demec-downloads>



Ementa

1. Definições e Propriedades dos fluídos.
2. Estática dos fluídos.
3. Cinemática dos Fluidos.
4. Equação da Energia ou de Bernoulli.
5. Escoamento de fluidos incompressíveis e compressíveis.
6. Análise dimensional e semelhança mecânica.

Objetivos Gerais / Objetivos Específicos

1. Compreender os princípios que fundamentam a estática dos fluídos.
 - Conceituar as propriedades básicas dos fluídos.
 - Fundamentar elementos básicos de fluidostática. Entender e aplicar: teorema de Stevin, carga de pressão, lei de pascal e medidores de pressão.
 - Identificar as equações que regem empuxo e estabilidade de corpos flutuantes
2. Compreender os princípios que fundamentam a cinemática e dinâmica dos fluídos bem como suas aplicações em processos de engenharia .
 - Caracterizar a cinemática dos fluídos e suas aplicações em escoamentos compressíveis e incompressíveis.
 - Conceituar e utilizar análise dimensional aplicada a equações de escoamento.
 - Estudar o movimento dos fluidos, permitindo a compreensão de medidores de vazão e de velocidade.

Objetivos Gerais / Objetivos Específicos

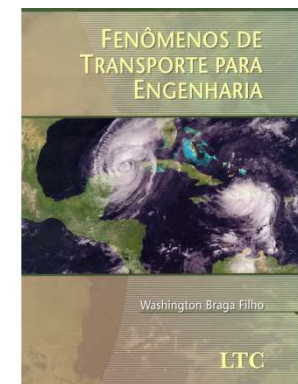
3. Desenvolver capacidade de selecionar e aplicar esses conceitos em projetos de instalações. Aprender suas aplicações em processos de engenharia e problemas envolvendo controle dos parâmetros estudados.
 - Calcular a perda de carga em tubulações.
 - Dimensionar uma instalação hidráulica básica;
 - Estudar a teoria dos modelos e evidenciar a vantagem de estudar um fenômeno físico através de um modelo, normalmente em escala reduzida.

Sumário

1. Introdução e Comentários Preliminares
2. Conceitos Fundamentais e Definições
3. Estática dos Fluidos
4. Equações Básicas, na Forma Integral, para um Volume de Controle
5. Introdução a Análise Diferencial dos Movimentos dos Fluidos
6. Escoamento Incompressível de Fluidos Não Viscosos
7. Análise Dimensional e Semelhança
8. Escoamento Viscoso, Incompressível, Interno
9. Escoamento Viscoso, Incompressível, Externo
10. Escoamento em Canais Abertos
11. Máquinas de Fluxo
12. Escoamento Compressível, Permanente, Unidimensional

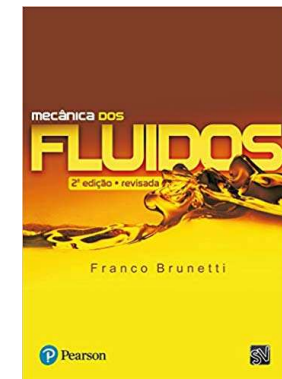
Bibliografia

1. Fox, R. W. **Introdução à Mecânica dos Fluidos** Editora LTC – 8ªed
2. BRAGA FILHO, Washington. **Fenômenos de transporte para engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2006
3. WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2005



Bibliografia Complementar

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: Prentice-Hall, 2009.



Bibliografia Complementar

1. Assy, Tufi Mamed. Mecanica dos fluidos: fundamentos e aplicações. São Paulo: LTC, 2004.
2. AZEVEDO NETTO, José Martiniano de. Manual de hidráulica. 8. ed. São Paulo: E. Blücher, 2007.
3. BAPTISTA, Márcio Benedito; COELHO, Márcia Maria Lara Pinto. Fundamentos de engenharia hidráulica. 2. ed. rev. Belo Horizonte: UFMG, 2006.
4. Cattani, Mauro Sergio Dorsa. Elementos de mecânica dos fluidos. São Paulo: E. Blucher, 2005.
5. GILES, Ranald V.; EVETT, Jack B.; LIU, Cheng. Mecânica dos fluidos e hidráulica. Tradução Luiz Liske. 2. ed. São Paulo: Makron, c1997

Capítulo 7 – Análise Dimensional e Semelhança

- ≡ Teorema dos Pi de Buckingham
- ≡ Determinação dos Grupos π
- ≡ Semelhança em Modelos
- ≡ Equações Diferenciais Básicas em forma adimensionais

Capítulo 7 – Análise Dimensional e Semelhança

**** Modelagem, Similaridade e Análise Dimensional**

- ≡ Semelhança em Modelos
- ≡ Equações Diferenciais Básicas em forma adimensionais



Estudo Dirigido Atividade em grupo (em sala)

27

Entre os grupos adimensionais importantes na mecânica dos fluidos estão o número de Weber e o número de Mach, que correspondem, respectivamente, à razão entre as forças de

- (A) pressão e as de inércia; e de inércia e as de compressibilidade.
- (B) pressão e as de inércia; e de inércia e viscosas.
- (C) inércia e viscosas; e de tensão superficial e as de compressibilidade.
- (D) inércia e as de tensão superficial; e de inércia e as de compressibilidade.
- (E) inércia e as de tensão superficial; e de gravidade e as de inércia.

**ENGENHEIRO(A): DE EQUIPAMENTOS JÚNIOR
MECÂNICA – 2010:**



Capítulo 8 – escoamento Viscoso, Incompressível, Interno

- ≡ 8.1 PERDA DE PRESSÃO NO ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES
- ≡ 8.2 PERDA DE CARGA TOTAL
- ≡ 8.3 PERDA DE POR TUBULAÇÕES
- ≡ 8.4 DIAGRAMA DE MOODY
- ≡ 8.5 MÉTODO PARA DETERMINAR A PERDA DE CARGA SECUNDARIA
 - ≡ 8.5.1 Método do comprimento equivalente
 - ≡ 8.5.2 Método do coeficiente de perda de carga
- ≡ 8.6. PERDA DE CARGA NOS SISTEMAS DE BOMBEAMENTO
- ≡ 8.7. RESUMO DAS PRINCÍPIAS EQ. NOS SIST. DE BOMBEAMENTO
- ≡ 8.8 VELOCIDADES TÍPICAS NOS SISTEMAS DE BOMBEAMENTO
- ≡ EXEMPLOS E DIMENSIONAMENTO DE SIST. DE BOMBEAMENTO

8.1 Perda de Pressão no escoamento em Tubulações

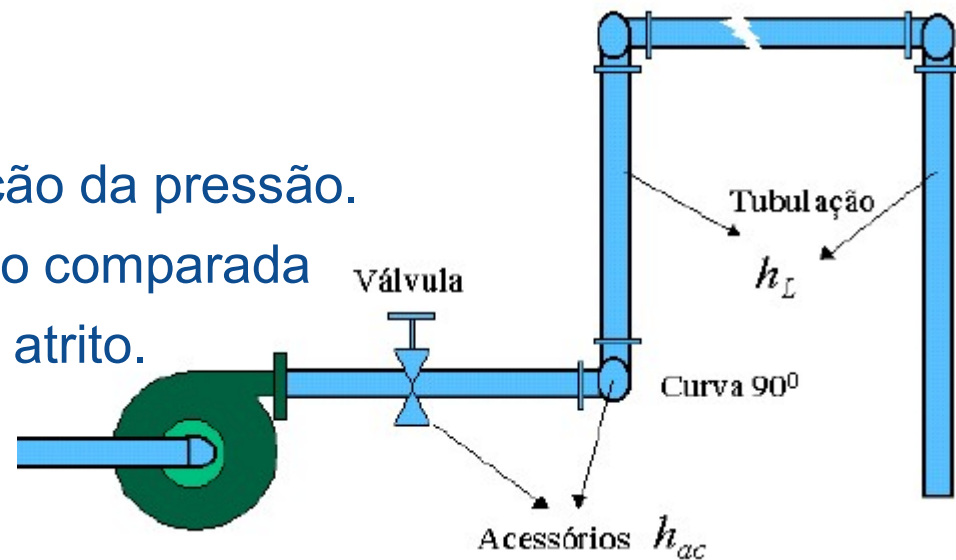
A variação de pressão num duto resulta da variação da elevação, da velocidade e do atrito e pode ser determinada aplicando a Eq. da Energia:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 - h_L = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + z_2$$

Desta forma:

$$\Delta P \rightarrow f(Z, V, h_L)$$

- ❑ O atrito origina uma diminuição da pressão.
- ❑ Causa uma perda de pressão comparada com o caso de escoamento sem atrito.



8.2 Perda de Carga Total

A perda de carga em tubulações é dada por duas parcelas.

$$h_L = h_{LD} + h_{LK}$$

Perda de Carga pelos Dutos ou Tubulações: (h_{LD})

□ Devido ao atrito no escoamento plenamente desenvolvido entre pontos da tubulação com área constante.

Perda de Carga por Acessórios - (h_{LK})

□ Devido ao escoamento através de acessórios como válvulas, joelhos, registros e em porções do sistema de área variável tais como saídas de reservatórios, bocais convergentes e divergentes.

□ A perda de carga na entrada ou saída de uma tubulação é considerada como perda de carga secundária.

8.3 Perda de Carga por Tubulações

Transformação da energia cinética para energia térmica por efeitos viscosos. Consideremos um escoamento plenamente desenvolvido numa tubulação de comprimento L . Analisando uma tubulação com área constante $A_1=A_2$ e desta forma pela Eq. da continuidade $u_1=u_2$. No caso de uma tubulação horizontal ($z_1=z_2$). Assim a equação da energia é reduzida para:

$$h_{LD} = \frac{(p_1 - p_2)}{\rho g} = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

8.3 Perda de Carga por Tubulações

Perda de Carga Principal - escoamento Turbulento

- ❑ No caso de escoamento turbulento não existem expressões que permitam avaliar analiticamente a queda de pressão.
- ❑ Utiliza-se análise dimensional e correlações de dados experimentais.

Analisando o caso de escoamento turbulento plenamente desenvolvido a queda de pressão é função das seguintes variáveis:

$$\Delta P \rightarrow \phi(D, L, \varepsilon, V, \rho, \mu)$$

Mostra-se que a perda de carga é diretamente proporcional a L/D .

A função ϕ é conhecida como fator de atrito ou coeficiente de atrito.

$$\frac{h_L}{V^2} = \frac{L}{D} \phi \left[\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D} \right] \quad \longrightarrow \quad f = \phi \left[\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D} \right]$$

8.3 Perda de Carga por Tubulações

Perda de Carga Principal - Escoamento Turbulento

Onde Re é o número de Reynolds e ε/D a rugosidade relativa.

Número de Reynolds

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

V : velocidade média do fluido (m/s)

D : diâmetro interno da tubulação (m)

ν : viscosidade cinemática do fluido (m²/s)

Tipos de regimes de escoamento: $Re < 2000$ *Laminar* $Re > 4000$ *Turbulento*

desta forma se obtém a equação da perda de carga que representa a energia dissipada por unidade de peso do fluido escoando.

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

Equação de Darcy-Weisbach.

O fator de atrito determina-se experimentalmente. Utiliza-se o **Diagrama de Moody**.

8.4 Diagrama de Moody

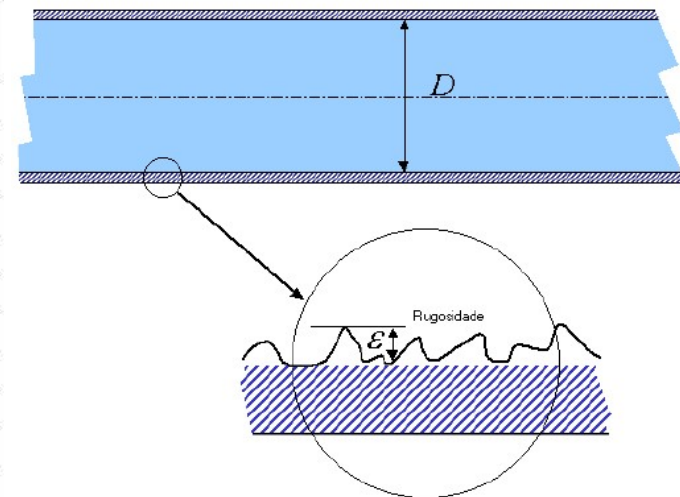
8.4.1 Rugosidade Absoluta e Rugosidade Relativa

Para determinar o fator de atrito se utiliza o **Diagrama de Moody**. Para tal deve-se ter o valor do número de Reynolds e a rugosidade relativa ϵ/D . A rugosidade absoluta depende do tipo de material da tubulação e do seu acabamento. Representa o valor médio das alturas da rugosidade da parede interna da tubulação. A Tabela dada mostra os valores da rugosidade absoluta para os materiais típicos de tubulações industriais utilizadas para o escoamento de fluidos.

Tabela 7.1 Rugosidade absoluta (mm) de tubulações industriais

Material	Rugosidade absoluta ϵ (mm)
Aço, revestimento asfalto quente.	0,3 a 0,9
Aço, revestimento esmalte centrifugado.	0,011 a 0,06
Aço enferrujado ligeiramente	0,15 a 0,3
Aço enferrujado	0,4 a 0,6
Aço muito enferrujado	0,9 a 2,4
Ferro galvanizado novo, com costura.	0,15 a 0,2
Ferro galvanizado novo, sem costura.	0,06 a 0,15
Ferro fundido revestido com asfalto	0,12 a 0,20
Ferro fundido com crostas	1,5 a 3,0
PVC e Cobre	0,015
Cimento-amianto novo	0,05 a 0,10

Fonte: - *Equipamentos Industriais e de Processo* - (Macintyre)



8.4 Diagrama de Moody

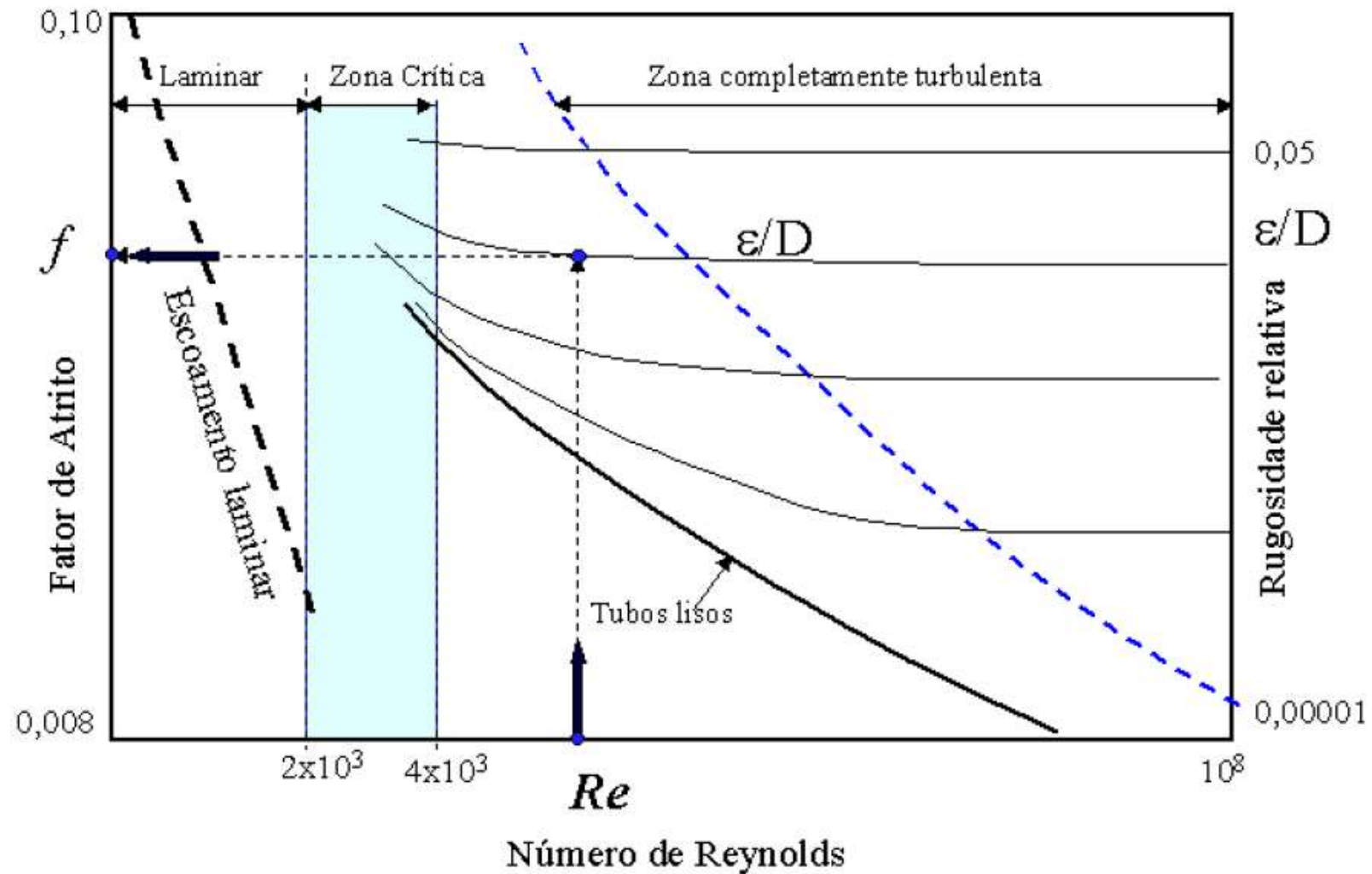
8.4.2 Descrição do Diagrama de Moody

O diagrama de Moody apresenta uma zona laminar ($Re < 2300$), uma zona crítica (Re de 2300 e 4000) uma zona de transição e uma zona inteiramente rugosa. Nestas zonas o fator de atrito f apresenta diferentes dependências em relação ao número de Reynolds (Re) e em relação a rugosidade relativa ε/D as quais são resumidas a seguir:

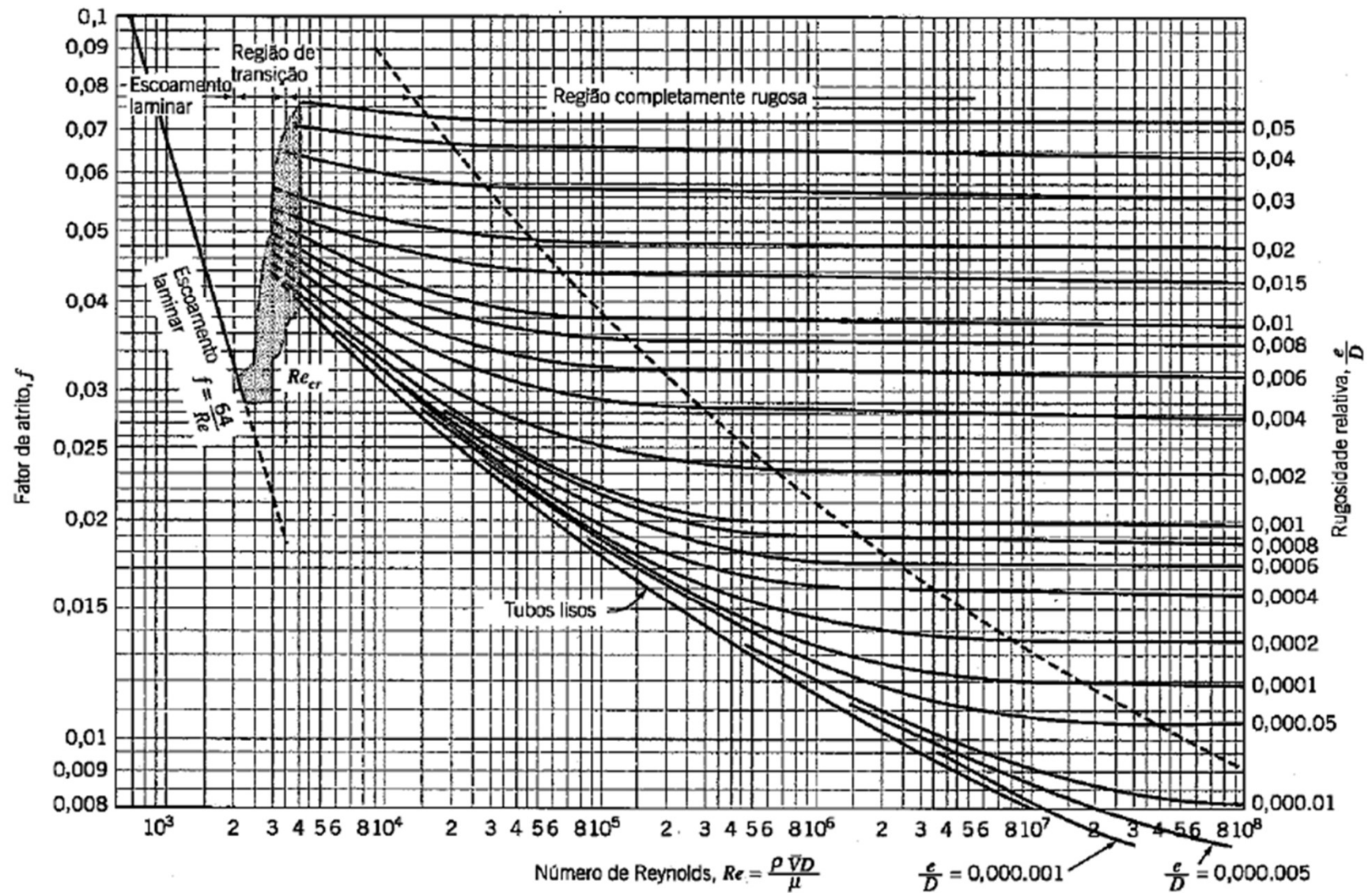
1. Na zona laminar fator de atrito f é independente da rugosidade ε/D e inversamente proporcional ao número de Re
2. Na zona crítica o fator de atrito apresenta aumentos bruscos.
3. Na zona de transição para um determinado Re o fator de atrito f diminui conforme a rugosidade relativa ε/D diminui.
4. Na zona de transição, para uma determinada rugosidade relativa ε/D o fator de atrito f diminui ao aumentar o Re até alcançar a região inteiramente rugosa.
5. Dentro da zona inteiramente rugosa, para uma determinada rugosidade relativa ε/D , o fator de atrito f , se mantém praticamente como um valor constante independente do Re .

8.4 Diagrama de Moody

8.4.2 Descrição do Diagrama de Moody



8.4 Diagrama de Moody



8.4 Diagrama de Moody

8.4.2 Descrição do Diagrama de Moody

Podemos utilizar os sites abaixo para determinar a perda de carga em Tubulações

<http://www.lmnoeng.com/moody.htm>

<http://grumpy.aero.ufl.edu/gasdynamics/colebrook.html>

Também podemos utilizar o aplicativo *hidrotec* disponível no site

<http://planeta.terra.com.br/servicos/hidrotec>



Há sites e aplicativos para determinar a **perda de carga em Tubulações**. *Fica a dica!!!*

8.4 Diagrama de Moody

8.4.2 Descrição do Diagrama de Moody

I - Escoamento Laminar

O fator de atrito para escoamento laminar pode ser obtido igualando a equação.

$$h_{LD} = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad \text{com a equação da perda de carga laminar} \quad h_{LD} = \frac{64 L \bar{V}^2}{\text{Re} D 2g} \quad \text{se obtém:}$$

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad \text{válido para } \text{Re} < 2300$$

- No escoamento laminar o fator de atrito (f) é função somente do número de Reynolds.
- Independe da rugosidade da tubulação.

8.4 Diagrama de Moody

8.4.2 Descrição do Diagrama de Moody

II - Escoamento com Tubos Hidraulicamente Lisos

Nesta região pode utilizar-se a Eq. de Blasius ou a Eq. de Drew Koo e McAdams

$$f = \frac{0,316}{(\text{Re})^{1/4}} \quad \text{Eq. de Blasius} \quad 4000 < \text{Re} < 10^5$$

$$f = 0,0056 + 0,5 \text{Re}^{-0,32} \quad \text{Eq. de Drew Koo e McAdams} \quad 10^5 < \text{Re} < 3 \times 10^6$$

8.4 Diagrama de Moody

8.4.2 Descrição do Diagrama de Moody

III - Escoamento Turbulento com Tubos Hidraulicamente Semi-Rugosos

Permite determinar o fator de atrito para escoamento turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad \text{Equação de Colebrook} \quad 5,0 \times 10^3 < \text{Re} < 1 \times 10^8$$

Como tal equação é do tipo transcendente deve ser utilizado um procedimento iterativo para determinar f . Uma alternativa é utilizar uma equação explícita:

$$f = 0,25 \left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad \text{Equação Explícita} \quad 5,0 \times 10^3 < \text{Re} < 1 \times 10^8$$

Utilizando a Eq. acima se encontram valores de f com margem de erro de +/-1% comparados com os obtidos com a Eq. de Colebrook, para: ε/D de $1,0 \times 10^{-4}$ (0,0001) até $1,0 \times 10^{-6}$ (0,000001)

8.4 Diagrama de Moody

8.4.2 Descrição do Diagrama de Moody

IV - Escoamento Turbulento com Tubos Hidraulicamente Rugosos

O fator de atrito depende unicamente da rugosidade relativa e pode ser determinado pela equação:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right) \quad \text{Equação de Von Karman}$$

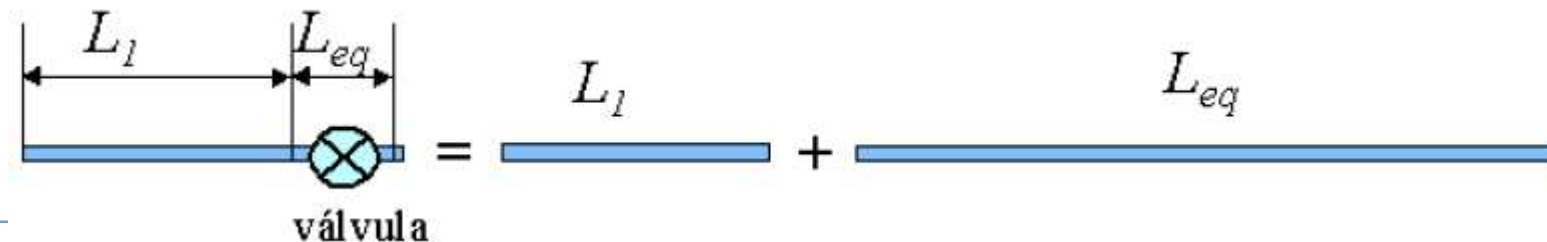
8.5 Método para Determinar a Perda de Carga Secundária

8.5.1 Método do comprimento equivalente

Os acessórios são todos aqueles elementos que existem numa tubulação através dos quais o fluido escoar, tais como curvas, bocais, registros e válvulas. Cada um destes elementos produz uma dissipação de energia que é avaliada pela perda de carga (h_{Lk}) definida como:

$$h_{Lk} = f \frac{L_{eq}}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{m})$$

O comprimento equivalente em metros de canalização retilínea (L_{eq}) é tabelado segundo o tipo de acessório, o material utilizado e o diâmetro da tubulação. Se substituirmos um certo acessório por uma tubulação retilínea com o comprimento igual ao comprimento equivalente (com igual material e diâmetro) ambos originariam a mesma perda de carga.

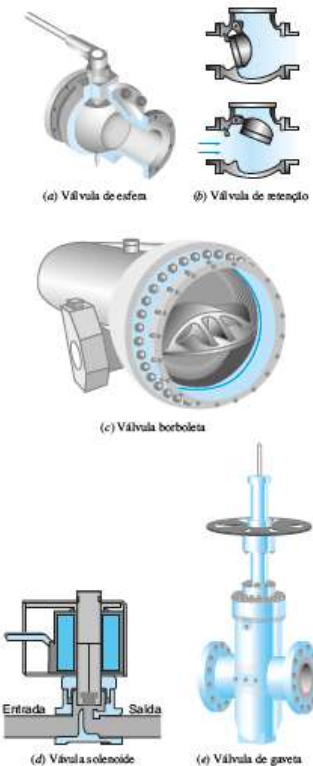


8.5 Método para Determinar a Perda de Carga Secundária

8.5.1 Método do comprimento equivalente

A tabela abaixo mostra o comprimento equivalente adimensional (L_{eq}/D) de diversos acessórios. (Perda de carga localizada)

Tipo de Acessório	Comprimento Equivalente (L_{eq}/D)
Válvula de globo aberta	340
Válvula de gaveta aberta	8
3/4 aberta	35
1/2 aberta	160
1/4 aberta	900
Válvula tipo borboleta aberta	45
Válvula de esfera aberta	3
Válvula de retenção tipo globo	600
Válvula de retenção tipo em ângulo	55
Válvula de pé com crivo: de disco móvel	75
Cotovelo padronizado 90°	30
Cotovelo padronizado 45°	16
Te padronizada fluxo direto	20
Te padronizada fluxo ramal	60



8.5 Método para Determinar a Perda de Carga Secundária

8.5.2 Método do coeficiente de perda de carga

Uma outra forma de representar a perda de carga nos acessórios (h_{LK}) é definindo a mesma na forma:

$$h_{LK} = k \frac{V^2}{2g} \quad (\text{m})$$

Onde k é o coeficiente de perda de carga e V a velocidade média. O coeficiente de perda de carga será maior quanto mais abrupto seja o elemento originando zonas de recirculação de fluxo e altos níveis de turbulência, aumentando desta forma a energia dissipada.

Igualando as equações de perda de carga por acessórios se obtém:

$$k = f \frac{L_{eq}}{D}$$

mostrando a relação entre o coeficiente de perda de carga (k) e o comprimento equivalente (L_{eq}).

8.5 Método para Determinar a Perda de Carga Secundária

8.5.2 Método do coeficiente de perda de carga

A tabela mostra o coeficiente de perda e carga de diversos elementos (**Coeficiente de perda de carga de acessórios**).

Tipo de Acessório		k	Tipo de Acessório		k
	Ampliação Gradual	0,20*		Junção	0,40
	Bocais	2,75		Medidor venturi	2,5
	Comporta aberta	1,00		Redução gradual	0,15
	Controlador de vazão	2,50		Registro de ângulo aberto	5,0
★	Cotovelo 90°	0,9	★	Registro de gaveta aberto	0,20
	Cotovelo 45°	0,4		Registro de globo aberto	10,0
★	Crivo	0,75		Saída de canalização	1,00
★	Curva 90	0,4		Tê passagem direta	0,6
	Curva 45	0,20		Tê saída de lado	1,30
	Curva 22,5	0,10		Tê saída bilateral	1,80
	Entrada normal em canalização	0,50		Válvula de pé ★	1,75
	Entrada de borda	1,0		Válvula de retenção	2,50
	Existência de pequena derivação	0,03		Velocidade	1,0

* com base na velocidade maior (seção menor) ** Relativa à velocidade de canalização



8.5 Método para Determinar a Perda de Carga Secundária

8.5.2 Método do coeficiente de perda de carga

Perda de Carga Localizada - Tubulações de **Ferro Fundido e Aço**

(Comprimento equivalente em metros de tubulação)

DIÂMETRO D	Cotovelo 90° Ralo Longo	Cotovelo 90° Ralo Médio	Cotovelo 90° Ralo Curto	Cotovelo 45°	Curva 90° $R_1 = 1\frac{1}{2}D$	Curva 90° $R_2 = 1D$	Curva 45°	Entrada Normal	Entrada de Borda	Registro Coneito Aberto	Registro Globo Aberto	Registro Ângulo Aberto	TÊ Passagem Direta	TÊ Saída de Lado	TÊ Saída Bilateral	Válvula de Pe e Griva	Saída de Conei- tagem	VÁLVULA DE RETENÇÃO	
																		Tipo Leve	Tipo Pesada
15 mm	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,0	2,0	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,8
19 mm	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,1	6,7	3,0	0,4	1,4	1,4	5,0	0,5	1,6	2,4
25 mm	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,0	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32 mm	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,8	0,2	11,9	5,0	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38 mm	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,8	2,8	2,8	11,8	1,0	3,2	4,5
50 mm	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,3	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,3	4,2	6,4
63 mm	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,6	5,2	8,1
75 mm	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100 mm	2,1	2,8	3,4	1,6	1,3	1,8	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	8,4	12,9
125 mm	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,8	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150 mm	3,4	4,5	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	24,0	3,4	10,0	10,0	36,0	5,0	12,3	19,3
200 mm	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,3	3,3	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250 mm	5,6	6,7	7,8	3,8	3,0	4,1	1,6	4,5	7,5	1,7	83,0	43,0	5,6	16,0	16,0	63,0	7,5	20,0	32,0
300 mm	6,1	7,9	9,5	4,6	3,8	4,9	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	76,0	9,0	24,0	38,0
350 mm	7,2	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	43,0

8.5 Método para Determinar a Perda de Carga Secundária

8.5.2 Método do coeficiente de perda de carga

Perda de Carga Localizada - Tubulações de **PVC Rígido**















(Comprimento equivalente em metros de tubulação)

DIÂMETRO EXTERNO mm (ref.)	Jeeho 90°	Jeeho 45°	Curva 90°	Curva 45°	Tee 90° Passagem Direta	Tee 90° Saída de Lado	Tee 90° Saída Bilateral	Entrada Normal	Entrada de Borda	Saída de Canali- -zoça	Válvula de pé e Crivo	Válvula de RETENÇÃO		Registro de Globo Aberto	Registro de Gaveta Aberto	Registro de Ângulo Aberto
												Tipo Lava	Tipo Passado			
20 (1/2)	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3	2,3	0,3	0,9	0,8	8,1	2,5	3,6	11,1	0,1	5,9
25 (3/4)	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4	2,4	0,4	1,0	0,9	9,5	2,7	4,1	11,4	0,2	6,1
32 (1)	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1	3,1	0,5	1,2	1,3	13,3	3,8	5,8	13,0	0,3	8,4
40 (1 1/4)	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6	4,6	0,6	1,8	1,4	15,5	4,9	7,4	22,0	0,4	10,5
50 (1 1/2)	3,2	1,3	1,2	0,6	2,2	7,3	7,3	1,0	2,3	3,2	18,3	6,8	9,1	35,8	0,7	17,0
60 (2)	3,4	1,5	1,3	0,7	2,3	7,6	7,6	1,5	2,8	3,3	23,7	7,1	10,8	37,9	0,8	18,5
75 (2 1/2)	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8	7,8	1,6	3,3	3,5	25,0	8,2	12,5	38,0	0,9	19,0
85 (3)	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0	8,0	2,0	3,7	3,7	26,8	9,3	14,2	40,0	0,9	20,0
110 (4)	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3	8,3	2,2	4,0	3,9	28,6	10,4	15,0	42,3	1,0	22,1
140 (5)	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0	10,0	2,5	5,0	4,9	37,4	12,5	19,2	50,9	1,1	26,2
160 (6)	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1	11,1	3,6	5,8	5,5	43,4	13,9	21,4	56,7	1,2	28,9

8.5 Método para Determinar a Perda de Carga Secundária

8.5.2 Método do coeficiente de perda de carga

Perda de Carga Localizada - Tubulações de **PVC Rígido**

Colável Ømm	25	32	40	50	60	75	85	110	140	160	200	250	300	
Roscável	3/4"	1"	1¼"	1½"	2"	2½"	3"	4"	5"	6"				
Joelho 90°	1,2	1,5	2,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,3	4,9	5,4	7,1	8,7	10,0	
Joelho 45°	0,5	0,7	1,0	1,0	1,3	1,7	1,8	1,9	2,4	2,6	3,4	4,2	5,0	
Curva 90°	0,5	0,6	0,7	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,9	2,1	2,8	3,4	4,0	
Curva 45°	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,6	1,9	2,3	
Tê 90° Dir	0,8	0,9	1,5	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	3,3	3,8	4,8	5,9	6,9	
Tê 90° Lat	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0	11,0	14,0	17,0	21,0	
Reg.Gaveta Aber	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,6	2,0	2,4	
Valv.Globo Aber	11,0	15,0	22,0	36,0	38,0	38,0	40,0	42,0	51,0	57,0	72,0	89,0	106,0	
Saída Canal.	0,9	1,3	1,4	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,9	5,5	6,9	8,6	10,0	
Ent. Normal	0,4	0,5	0,6	1,0	1,5	1,6	2,0	2,2	2,5	2,8	3,8	4,7	5,6	
Ent. Borda	1,0	1,2	1,8	2,3	2,8	3,3	3,7	4,0	5,0	5,6	7,2	9,0	11,0	
Valv.Pê Crivo	9,5	13,0	16,0	18,0	24,0	25,0	27,0	29,0	37,0	43,0	53,0	66,0	78,0	
Valv.Ret.Horiz.	2,7	3,8	4,9	6,8	7,1	8,2	9,3	10,0	13,0	14,0	18,0	22,0	26,0	
Valv.Ret.Vert.	4,1	5,8	7,4	9,1	11,0	13,0	14,0	16,0	19,0	21,0	28,0	34,0	41,0	

Fonte: Alpina Manual de aquecimento Solar

8.5 Método para Determinar a Perda de Carga Secundária

8.5.2 Método do coeficiente de perda de carga

Perda de Carga Localizada - Tubulações **Novas de Ferro Fundido ou Galvanizado e tubos de PVC Rígido**

(em metros de tubulação equivalente)

CONEXÕES	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"	6"	8"	10"	12"
registro gaveta	0,10	0,12	0,18	0,20	0,28	0,34	0,46	0,65	0,83	1,10	1,50	1,80	2,37
registro globo	5,00	6,80	9,70	11,80	16,00	20,00	26,00	37,00	48,00	60,00	83,00	103,00	135,00
válvula de retenção	1,10	1,50	2,10	2,50	3,40	4,30	5,50	7,70	10,20	12,60	17,60	21,70	28,60
curva - 90°	0,30	0,40	0,60	0,70	1,00	1,20	1,50	2,00	2,80	3,50	4,90	6,00	7,90
cotovelo - 45°	0,30	0,40	0,50	0,60	0,90	1,10	1,40	1,90	2,50	3,20	4,40	5,40	7,10
cotovelo - 90° Tee	0,60	0,80	1,10	1,30	1,80	2,20	2,90	4,00	5,20	6,50	9,00	11,30	14,80
válvula de pé	10,80	14,90	21,00	26,00	35,00	44,00	57,00	79,00	100,00	130,00	180,00	225,00	300,00

Fonte: Thebe Bombas Hidráulicas Ltda.

8.5 Método para Determinar a Perda de Carga Secundária

**PERDAS DE PRESSÃO EM 100 METROS
 DE TUBOS NOVOS DE FERRO FUNDIDO
 OU GALVANIZADO E TUBOS DE PVC**

VAZÃO m ³ /h	PVC	FP	PVC	FP	PVC	FP	PVC	FP	PVC	FP	PVC	FP	PVC	FP	PVC	FP	PVC	FP
	3/4"		1"		1.1/4"		1.1/2"		2"		2.1/2"		3"		4"		5"	
0,5	1,72	2,00	0,60	0,70	0,18	0,20												
1,0	5,79	7,50	2,00	2,70	0,62	0,75	0,20	0,22	0,07	0,08								
1,5	11,80	16,00	4,00	6,00	1,25	1,60	0,45	0,50	0,15	0,17								
2,0	19,50	27,00	6,80	10,00	2,10	2,70	0,70	0,80	0,25	0,28	0,06	0,07						
2,5	28,80	35,00	10,00	16,00	3,10	4,50	1,10	1,40	0,37	0,40	0,09	0,12						
3,0	39,60	58,00	13,70	21,50	4,20	6,00	1,50	1,80	0,50	0,60	0,13	0,16	0,04	0,05				
3,5	52,00	80,00	18,00	26,00	5,50	8,00	1,95	2,40	0,68	0,80	0,17	0,22	0,07	0,08				
4,0	65,50	100,00	22,70	37,00	7,00	10,00	2,50	3,00	0,85	1,05	0,21	0,27	0,09	0,10				
4,5	80,50		27,90	45,00	8,60	12,00	3,00	3,70	1,00	1,30	0,26	0,32	0,11	0,12				
5,0	97,00		33,50	55,00	10,40	15,50	3,60	4,70	1,25	1,60	0,31	0,42	0,13	0,15				
5,5			39,60	65,00	12,30	18,00	4,30	5,50	1,50	2,00	0,37	0,50	0,15	0,17				
6,0			46,20	80,00	14,30	22,00	5,00	6,60	1,70	2,20	0,43	0,60	0,18	0,20	0,05	0,07		
6,5			53,10	95,00	16,50	25,00	5,70	7,50	2,00	2,40	0,49	0,70	0,21	0,26	0,06	0,08		
7,0			60,50		18,70	29,00	6,50	8,30	2,30	3,00	0,56	0,80	0,24	0,28	0,07	0,10		
7,5			63,30		21,20	35,00	7,30	11,00	2,60	3,50	0,63	0,90	0,27	0,30	0,08	0,12		
8,0			76,40		23,60	37,00	8,20	11,50	2,90	3,90	0,70	1,00	0,31	0,35	0,09	0,13		
8,5			85,00		26,30	38,00	9,10	13,00	3,20	4,50	0,78	1,20	0,34	0,40	0,10	0,16		
9,0			94,00		29,00	40,00	10,00	14,00	3,50	4,80	0,87	1,25	0,38	0,45	0,11	0,18		
9,5					32,00	50,00	11,00	15,00	3,90	5,10	0,96	1,40	0,41	0,47	0,12	0,19		
10					35,00	56,00	12,10	17,00	4,20	5,70	1,05	1,50	0,45	0,50	0,13	0,20	0,04	0,06
12					48,00	80,00	16,80	24,00	5,80	8,00	1,45	2,20	0,62	0,80	0,17	0,28	0,06	0,09
14					63,00	100,00	22,00	35,00	7,80	11,50	1,90	3,00	0,80	1,00	0,23	0,31	0,08	0,12
16					80,00		28,00	40,00	9,50	14,00	2,40	3,70	1,00	1,20	0,28	0,40	0,10	0,14
18					98,00		34,00	52,00	12,00	17,00	3,00	4,50	1,25	1,80	0,35	0,45	0,12	0,17
20							41,00	63,00	14,20	21,50	3,60	5,70	1,50	2,00	0,42	0,70	0,15	0,23
25							60,00	95,00	21,00	33,00	5,20	8,50	2,20	3,00	0,62	1,10	0,23	0,35
30							83,00		29,00	45,00	7,20	12,00	3,00	4,20	0,85	1,50	0,30	0,50
35							100,00		38,00	61,00	9,40	16,00	4,00	5,70	1,20	2,00	0,40	0,65
40									48,00	78,00	12,00	20,50	5,10	7,00	1,45	2,50	0,50	0,80
45									59,00	100,00	14,50	26,00	6,30	9,00	1,80	3,10	0,60	1,00
50									70,00		18,00	32,00	7,50	11,00	2,10	3,80	0,70	1,25
55									83,00		21,00	41,00	9,00	13,00	2,50	4,30	0,90	1,60
60									97,00		24,00	45,00	10,50	16,00	2,90	5,50	1,00	1,80
65											28,00	55,00	12,00	18,00	3,30	6,00	1,20	2,10
70											32,00	60,00	13,60	21,00	3,80	7,20	1,35	2,40

Os valores acima estão de acordo com a NBR-5626
 OBS: Em se tratando de tubos Galvanizados ou FºFº usados, deve-se acrescentar 3% aos valores acima para cada ano de uso da tubulação.

8.6 Perda de Carga nos Sistemas de Bombeamento

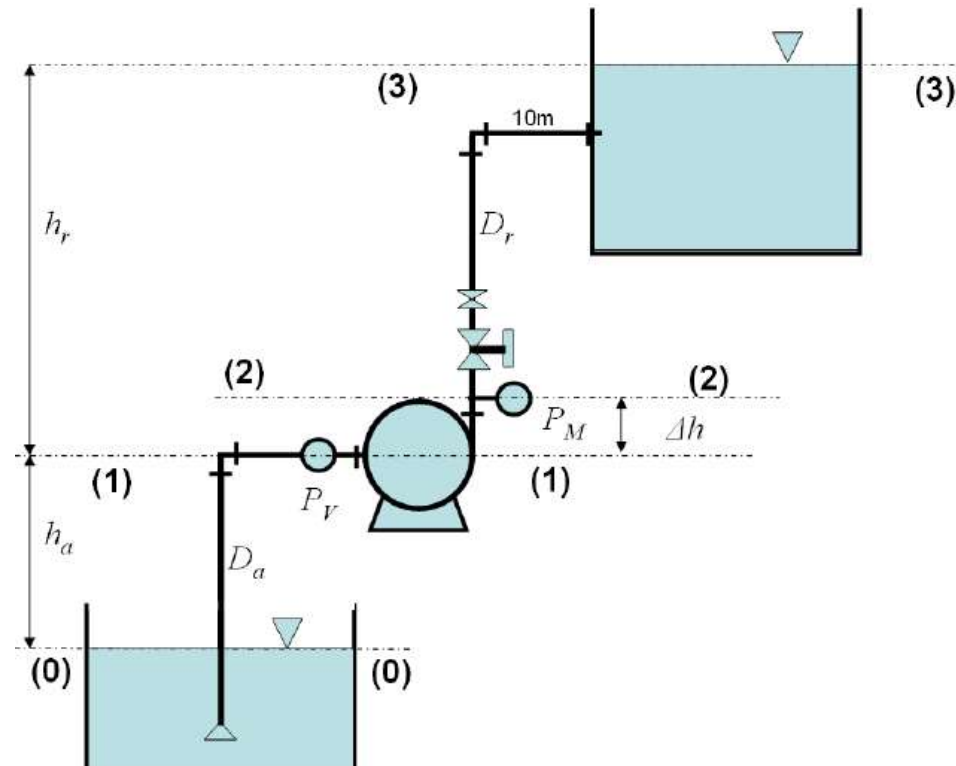
Para determinar a energia útil transferida do rotor ao fluido deve-se determinar total as **alturas físicas de aspiração e de recalque** assim como todos os **comprimentos das tubulações** e todos os **acessórios** existentes na tubulação.

Basicamente um sistema de bombeamento fica especificado quando determina-se a **altura manométrica e a vazão do sistema**.

A vazão é uma informação específica do projeto. As velocidades nas tubulações de aspiração e recalque podem ser determinadas a partir de recomendações e posteriormente determinar o diâmetro das tubulações. O diâmetro comercial imediatamente superior será o diâmetro da tubulação de aspiração (D_a) e diâmetro inferior será o diâmetro de recalque (D_r).

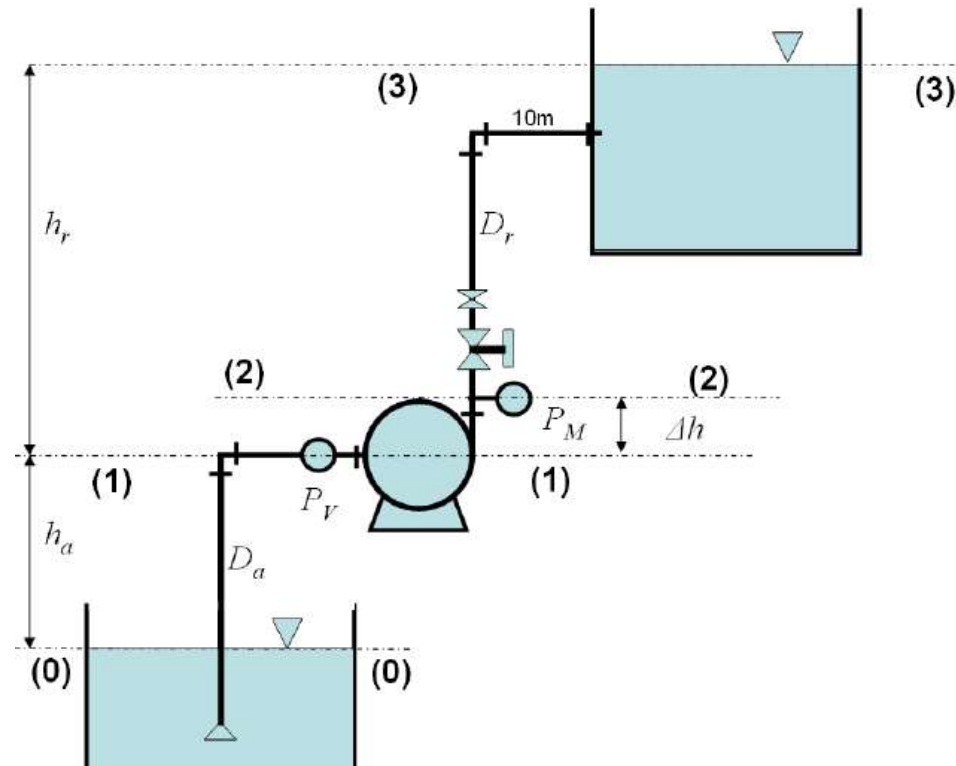
8.6 Perda de Carga nos Sistemas de Bombeamento

- ❑ Sistemas com velocidades muito baixas requerem de tubulações com diâmetros maiores e, portanto, eleva-se o custo do sistema.
- ❑ Sistemas com velocidades muito altas envolvem diâmetros menores, contudo, apresentam grandes perdas de carga e, portanto, aumenta o custo da potência de acionamento do sistema.



8.6 Perda de Carga nos Sistemas de Bombeamento

Para auxiliar em projetos podem ser utilizadas expressões ou tabelas que apresentam faixas de velocidades recomendadas segundo o tipo de fluido.



Recomendam-se velocidades inferiores na tubulação de aspiração para evitar problemas de altas perdas de carga o qual pode trazer problemas de cavitação.

8.7 Resumo das Principias Equações nos Sistemas de Bombeamento

Altura Manométrica em Sistemas de Bombeamento (reservatórios a pressão atmosférica.)

$H_{man} = h_a + h_r + h_{La} + h_{Lr} + h_{vel}$ <p>Obs: Conforme Figura 7.7</p>	<p>H_{man}: Altura manométrica do sistema (m) h_a: altura estática de aspiração (m) h_r: altura estática de recalque (m) h_{La}: perda de carga na tubulação de aspiração (m) h_{Lr}: perda de carga na tubulação de recalque (m) h_{veloc}: perda de carga dinâmica pela velocidade na tubulação (m)</p>
---	--

Perda de Carga nas Tubulações:

$h_{LD} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$	<p>f: coeficiente de atrito ou fator de atrito L: comprimento da tubulação (m) v: velocidade média do fluido na tubulação (m/s) D: diâmetro interno da tubulação (m) g: aceleração da gravidade (9,81m/s²)</p>
---	--

Perda de Carga nos Acessórios – método do comprimento equivalente

$h_{Lk} = f \frac{L_{eq}}{D} \frac{v^2}{2g}$	<p>L_{eq}: comprimento equivalente em metros de canalização retilínea. (m) Tabelado segundo tipo de acessórios, material e diâmetro da tubulação.</p>
--	---

Perda de Carga nos Acessórios – método do coeficiente de perda de carga

$h_{Lk} = \Sigma k \frac{v^2}{2g}$	<p>k: coeficiente de perda de carga dos acessórios Tabelado segundo tipo de acessórios.</p>
------------------------------------	---

8.7 Resumo das Principias Equações nos Sistemas de Bombeamento

Perda de Carga Total (tubulações + acessórios):

$h_L = h_{LD} + h_{Lk}$	
-------------------------	--

Potência de acionamento da bomba (potência motriz)

$\dot{W}_{ac} = \frac{\rho g H_{man} Q}{\eta_G} \quad (W)$	ρ : massa específica do fluido (kg/m^3) H_{man} : altura manométrica (m) Q : vazão (m^3/s) η_G : rendimento global do sistema (motor-bomba: 50% a 75%)
--	---

Rendimento Global (%) - (Eq. aproximada)

$\eta_G = 80 - 0,9367H + 5,46 \times 10^{-3}QH - 1,514 \times 10^{-5}Q^2H + 5,802 \times 10^{-3}H^2 - 3,028 \times 10^{-5}QH^2 + 8,346 \times 10^{-8}Q^2H^2$	
Q : (m^3/h); H_{man} : (m) Validade: $20 (m^3/h) < Q < 250 (m^3/h)$ $15 (m) < H < 100 (m)$	

Tabela 7.5 Acréscimo de segurança da potência do motor

Potência (kW)	Potência (kW)	Margem de segurança
Até 2	Até 1,5	50%
de 2 a 5	de 1,5 a 3,7	30%
de 5 a 10	de 3,7 a 7,4	20%
de 10 a 20	de 7,4 a 15	15%
Acima de 20	Acima de 15	10%

8.8 Velocidades Típicas nos Sistemas de Bombeamento

Na literatura encontramos diferentes recomendações para as velocidades a serem adotadas em sistemas de bombeamento. Reproduzimos aqui algumas que podem ser adotadas como critério de dimensionamento preliminar, as quais podem ser modificadas segundo o tipo de fluido e instalações específicas.

Velocidades econômicas em geral:

- ❑ $v_{asp} < 1,5\text{m/s}$ (máximo: $v_{asp} = 2,0\text{m/s}$)
- ❑ $v_{recal} < 2,5\text{m/s}$ (máximo $v_{recal} = 3,0\text{m/s}$).

8.8 Velocidades Típicas nos Sistemas de Bombeamento

8.8.1 Velocidades na Tubulação de aspiração

- ❑ Quando o fluxo provém de um poço de sucção em regime uniforme: $v \leq 1,5\text{m/s}$
- ❑ Quando o fluxo provém de uma tubulação geral $v \leq 0,9\text{m/s}$
- ❑ Velocidade mínima a ser adotada em qualquer situação nas tubulações de aspiração $v = 0,6\text{m/s}$.

8.8.2 Velocidades na Tubulação de Recalque em Função de Diâmetros

- ❑ Recomenda-se para $D < 300\text{mm} \rightarrow v$ (entre $1,0\text{m/s}$ e $2,65\text{m/s}$)
- ❑ Para $D > 300\text{mm}$ recomenda-se $v_{max} = 3,0\text{m/s}$ (*Macintyre*)

8.8 Velocidades Típicas nos Sistemas de Bombeamento

8.8.3 Fórmula de Bresse:

- ❑ Para tubulações em sistemas de pequeno porte **fluxo contínuo (24h/dia)**:

$D = k\sqrt{Q}$ (m)	D : diâmetro da tubulação (m) k : coeficiente que varia entre 0,9 a 1,2 Q : vazão (m ³ /s)
---------------------	---

- ❑ Para tubulações em sistemas com regime operacional intermitente:

$D = 1.3X^{1/4}\sqrt{Q}$ (m)	$X = \frac{\text{hrs de operacao por dia}}{24\text{horas}}$ Q : vazão (m ³ /s)
------------------------------	--

Fonte: *Equipamentos Industriais de Processo* (Macintyre)

Obs: Com a equação de Bresse pode ser determinado um diâmetro D . O diâmetro comercial imediatamente superior será o diâmetro da tubulação de aspiração (D_a) e diâmetro inferior será o diâmetro de recalque (D_r).

8.8 Velocidades Típicas nos Sistemas de Bombeamento

8.8.4 Velocidades Típicas (regime turbulento)

As seguintes relações podem ser utilizadas como referências.

<p><i>Líquidos</i></p> $V = 5,214D^{0,304} \quad (\text{m/s})$ <p><i>D</i>: diâmetro interno da tubulação (m)</p>	<p>Velocidades Limites</p> <p><i>Líquidos limpos não corrosivos</i></p> $v_{max} = \frac{36,886}{\rho^{1/3}} \quad (\text{m/s})$ <p>ρ: massa específica (kg/m³)</p> <p>Obs: utilizar a metade do valor para fluidos corrosivos e/ou erosivos.</p>
---	---

Fonte: *Operações com Fluidos* (Gomide)

8.8 Velocidades Típicas nos Sistemas de Bombeamento

Tipo de aplicação	Velocidades recomendadas (m/s)
Sucção de bombas e drenos	0,4 a 2,0
Recalque e tubulações de uso geral	1,5 a 3,0
Alimentação de caldeiras	2,4 a 4,0

As tabelas mostram valores típicos utilizados, contudo, a experiência em diferentes processos com fluidos podem exigir velocidades maiores o menores que estas. Velocidades menores podem ser utilizadas para levar em conta aumentos futuros de capacidade, corrosão e formação de crostas. Velocidades maiores podem ser utilizadas para prevenir decantação e entupimento.

Tipo de Serviço e tipos de Fluido	Velocidade (m/s)
Aspiração em bombas	
Líquido finos (água, álcool)	0,4 – 2,0
Líquidos viscosos (acima de 0,01Pa s)	0,1 – 0,4
Recalque e linhas de uso geral	
Líquidos finos	1,2 – 3,0
Líquidos viscosos	0,2 – 1,2
Escoamento por gravidade	
Drenos	1 – 2
Água industrial e de serviços	1,7 – 3,5
Alimentação de caldeiras	2,5 – 4,0
Vapor	
Saturado	12 – 40
Super-aquecido	25 – 60
de alta pressão	50 – 100
Ar comprimido	
Troncos	6,0 – 8,0
Ramais	8,0 – 10,0
Mangueira	15,0 – 30,0
Gases industriais	
Em alta pressão (acima de 1 MPa)	30 – 60
Baixa pressão (dutos de ventilação)	10 – 20
Em alto vácuo	100 - 120
Chaminés	
Tiragem natural	3 – 5
Tiragem forçada	10 – 20
Tubovias	
Conduzindo líquidos finos	1,5 – 2,0
Bombeamento líquidos viscosos (oleodutos)	0,4 – 1,0
Por gravidade	0,1 0,3
Linhas subterrâneas de esgoto	
Manilhas cerâmicas	5
Tubos de concreto	4
Tubos de cimento-amianto	3
Tubos de ferro fundido	6
Tubos de PVC	5

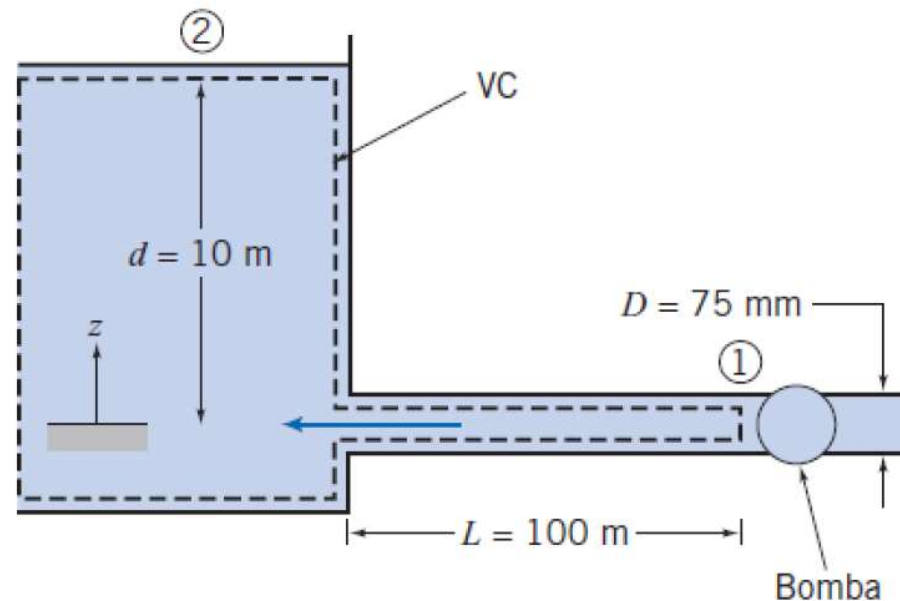
Fonte: *Operações com Fluidos* (Reynaldo Gomide)



Estudo de Caso

Escoamento em Tubo: Queda de Pressão Desconhecida

Um tubo liso, de 100m de comprimento, está conectado a um grande reservatório. Que profundidade, d , deve ser mantida no reservatório para produzir uma vazão volumétrica de água de $0,01\text{m}^3/\text{s}$? O diâmetro do tubo liso é 75mm. A entrada é de borda viva e a água descarrega para a atmosfera





Estudo de Caso

Escoamento em Tubo: Queda de Pressão Desconhecida

Um tubo liso, de 100m de comprimento, está conectado a um grande reservatório. Que profundidade, d , deve ser mantida no reservatório para produzir uma vazão volumétrica de água de $0,01\text{m}^3/\text{s}$? O diâmetro do tubo liso é 75mm. A entrada é de borda viva e a água descarrega para a atmosfera

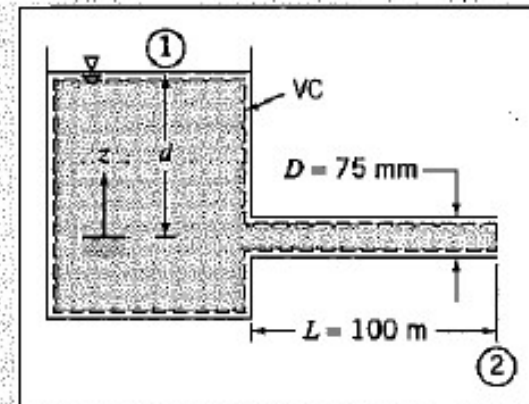
DADOS: Escoamento de água a $0,01\text{ m}^3/\text{s}$ através de um tubo de 75 mm de diâmetro, com $L = 100\text{ m}$, ligado a um reservatório de nível constante. Entrada de borda viva.

DETERMINAR: A profundidade do reservatório, d , para manter o escoamento.

SOLUÇÃO:

Equações básicas:

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) = h_{lT} = h_l + h_{lm}$$





Exemplo

Para o problema dado, $p_1 = p_2 = p_{atm}$, $\bar{V}_1 = 0$, $\bar{V}_2 = \bar{V}$, e $\alpha_2 = 1,0$. Se $z_2 = 0$, então $z_1 = d$. Simplificando a Eq. 8.29, temos

$$gd - \frac{\bar{V}^2}{2} = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} + K \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (1)$$

Logo

$$d = \frac{1}{g} \left[f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} + K \frac{\bar{V}^2}{2} + \frac{\bar{V}^2}{2} \right] = \frac{\bar{V}^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + K + 1 \right]$$

Como $\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2}$, então

$$d = \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \left[f \frac{L}{D} + K + 1 \right]$$

Considerando a água a 20°C, $\rho = 999 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1,0 \times 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$. Assim,

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\pi \mu D}$$
$$Re = \frac{4}{\pi} \times \frac{999 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times \frac{0,01 \text{ m}^3}{\text{s}} \times \frac{\text{m} \cdot \text{s}}{1,0 \times 10^{-3} \text{ kg}} \times \frac{1}{0,075 \text{ m}} = 1,70 \times 10^5$$

Para escoamento turbulento em um tubo liso, da Fig. 8.37, $f = 0,0162$. Da Tabela 8.2, $K = 0,5$. Então,

$$d = \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \left[f \frac{L}{D} + K + 1 \right]$$
$$= \frac{8}{\pi^2} \times \frac{(0,01)^2 \text{ m}^6}{\text{s}^2} \times \frac{1}{(0,075)^4 \text{ m}^4} \times \frac{\text{s}^2}{9,81 \text{ m}} \left[(0,0162) \frac{100 \text{ m}}{0,075 \text{ m}} + 0,5 + 1 \right]$$
$$d = 6,02 \text{ m} \approx 6 \text{ m} \quad \leftarrow d$$



Exemplo

Tabela 8.2 Coeficientes de Perdas Menores (Localizadas) para Entradas de Tubos (Dados de [12].)

Tipo de Entrada		Coeficiente de Perda Localizada, K^a								
Reentrante		0,78								
Borda viva		0,5								
Arredondado		<table border="1"> <thead> <tr> <th>r/D</th> <th>0,02</th> <th>0,06</th> <th>$\geq 0,15$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>K</td> <td>0,28</td> <td>0,15</td> <td>0,04</td> </tr> </tbody> </table>	r/D	0,02	0,06	$\geq 0,15$	K	0,28	0,15	0,04
r/D	0,02	0,06	$\geq 0,15$							
K	0,28	0,15	0,04							

^a Baseado em $h_{l_m} = K(\bar{V}^2/2)$, onde \bar{V} é a velocidade média no tubo.

Tabela 8.1 Rugosidade para Tubos de Materiais Comuns de Engenharia (Dados de [8])

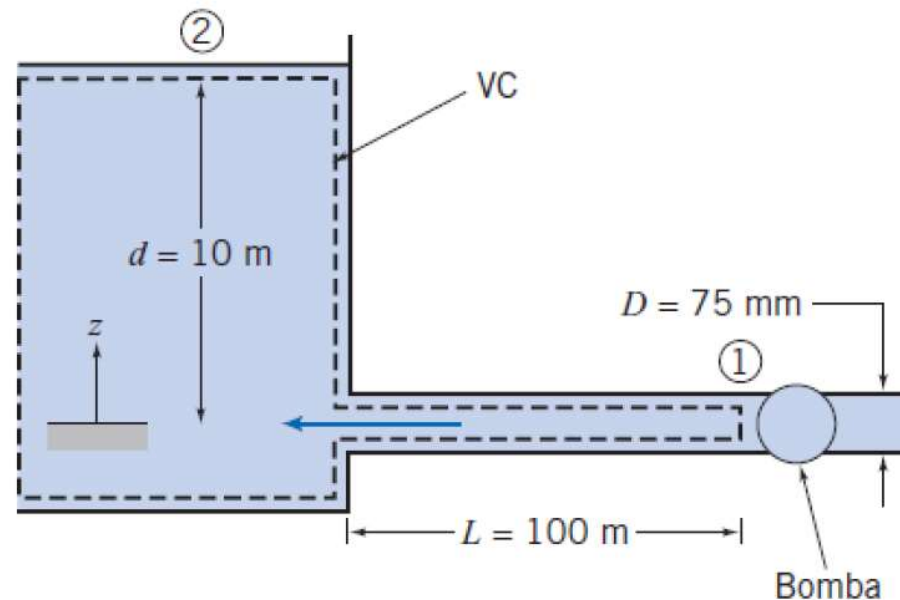
Tubo	Rugosidade, e	
	Pés	Milímetros
Aço rebitado	0,003–0,03	0,9–9
Concreto	0,001–0,01	0,3–3
Madeira	0,0006–0,003	0,2–0,9
Ferro fundido	0,00085	0,26
Ferro galvanizado	0,0005	0,15
Ferro fundido asfaltado	0,0004	0,12
Aço comercial ou ferro forjado	0,00015	0,046
Trefilado	0,000005	0,0015



Estudo de Caso

Escoamento em Tubo: Queda de Pressão Desconhecida

Um tubo liso horizontal, de 100 m de comprimento, está conectado a um grande reservatório. Uma bomba é ligada ao final do tubo para bombear água do reservatório a uma vazão volumétrica de $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$. Que pressão (manométrica) a bomba deve produzir para gerar essa vazão? O diâmetro interno do tubo liso é 75 mm.





Estudo de Caso

Escoamento em Tubo: Queda de Pressão Desconhecida

Equações básicas:

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) = h_{lr} = h_f + h_{lm} \quad (8.29)$$

Em que

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (8.34) \quad \text{e} \quad h_{lm} = K \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (8.40a)$$

Para o problema dado, $p_1 = p_{\text{bomba}}$ e $p_2 = 0$ (manométrica), de modo que $\Delta p = p_1 - p_2 = p_{\text{bomba}}$, $\bar{V}_1 = \bar{V}$, $\bar{V}_2 = 0$, K (perda de saída) = 1,0 e $\alpha_1 = 1,0$. Se $z_1 = 0$, então $z_2 = d$. Simplificando a Eq. 8.29, obtemos

$$\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\bar{V}^2}{2} - gd = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} + \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (1)$$



Estudo de Caso

Escoamento em Tubo: Queda de Pressão Desconhecida

O lado esquerdo da equação é a perda de energia mecânica entre os pontos ① e ② o lado direito representa as perdas maior e menor que contribuíram para as perdas totais. Resolvendo para a perda de pressão, $\Delta p = p_{\text{bomba}}$,

$$p_{\text{bomba}} = \Delta p = \rho \left(gd + f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \right)$$

Todas as variáveis no lado direito da equação são conhecidas ou podem ser facilmente calculadas. A vazão Q leva à \bar{V} ,

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4}{\pi} \times 0,01 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{1}{(0,075)^2 \text{m}^2} = 2,26 \text{ m/s}$$

Essa velocidade, por sua vez, leva ao número de Reynolds [Considerando a água a 20°C, $\rho = 999 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1,0 \times 10^{-3} \text{ kg/(m.s)}$]

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} = 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2,26 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,075 \text{ m} \times \frac{\text{m} \cdot \text{s}}{1,0 \times 10^{-3} \text{ kg}} = 1,70 \times 10^5$$

Para escoamento turbulento em um tubo liso ($e = 0$), da Eq. 8.37, $f = 0,0162$. Então



Estudo de Caso

Escoamento em Tubo: Queda de Pressão Desconhecida

$$p_{\text{bomba}} = \Delta p = \rho \left(gd + f \frac{L \bar{V}^2}{D} \right)$$
$$= 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 10 \text{ m} + (0,0162) \times \frac{100 \text{ m}}{0,075 \text{ m}} \times \frac{(2,26)^2 \text{m}^2}{2 \text{ s}^2} \right) \times \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}}$$
$$p_{\text{bomba}} = 1,53 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \text{ (manométrica)}$$

Portanto,

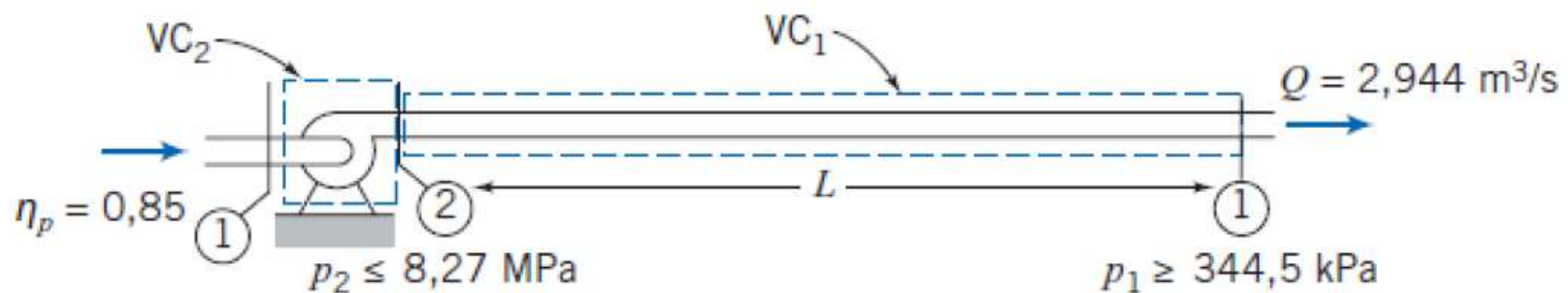
$$p_{\text{bomba}} = 153 \text{ kPa (manométrica)} \longleftarrow p_{\text{bomba}}$$



Estudo de Caso

Escoamento em Tubo: Comprimento Desconhecido

Petróleo cru escoava através de um trecho horizontal do oleoduto do Alasca a uma taxa de $2,944 \text{ m}^3/\text{s}$. O diâmetro interno do tubo é $1,22 \text{ m}$; a rugosidade do tubo é equivalente à do ferro galvanizado. A pressão máxima admissível é $8,27 \text{ MPa}$; a pressão mínima requerida para manter os gases dissolvidos em solução no petróleo cru é $344,5 \text{ kPa}$. O petróleo cru tem $SG = 0,93$; sua viscosidade à temperatura de bombeamento de 60°C é $\mu = 0,0168 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$. Para estas condições, determine o espaçamento máximo possível entre estações de bombeamento. Se a eficiência da bomba é de 85% , determine a potência que deve ser fornecida a cada estação de bombeamento.





Estudo de Caso

Escoamento em Tubo: Comprimento Desconhecido

Solução:

Conforme mostrado na figura, nós consideramos que o oleoduto no Alasca é feito de trechos bomba-tubo repetidos. Podemos, então, traçar dois volumes de controle: VC_1 , para o escoamento no tubo (do estado ② para o estado ①); VC_2 , para a bomba (do estado ① para o estado ②).

Primeiro, aplicamos ao VC_1 a equação de energia para escoamento permanente e incompressível.

Equações básicas:

$$\left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) - \left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) = h_{l_T} = h_l + h_{l_m} \quad (8.29)$$

em que

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (8.34) \quad \text{e} \quad h_{l_m} = K \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (8.40a)$$

- Considerações:** (1) $\alpha_1 \bar{V}_1^2 = \alpha_2 \bar{V}_2^2$
(2) Tubo horizontal, $z_1 = z_2$.
(3) Perdas menores desprezíveis.
(4) Viscosidade constante.



Estudo de Caso

Escoamento em Tubo: Comprimento Desconhecido

Então, usando o VC₁

$$\Delta p = p_2 - p_1 = f \frac{L}{D} \rho \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (1)$$

ou

$$L = \frac{2D}{f} \frac{\Delta p}{\rho \bar{V}^2} \text{ em que } f = f(Re, e/D)$$

assim

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = 2,944 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{4}{\pi(1,22)^2 \text{m}^2} = 2,52 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} = 0,93 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2,52 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 1,22 \text{ m} \times \frac{1}{0,0168 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2} \times \frac{\text{N}\cdot\text{s}^2}{\text{kg}\cdot\text{m}}$$

$$Re = 1,71 \times 10^5$$



Estudo de Caso

Escoamento em Tubo: Comprimento Desconhecido

Da Fig. 8.37, $f \pm 0,017$, e assim

$$L = \frac{2}{0,017} \times 1,22 \text{ m} \times (8,27 \times 10^6 - 3,445 \times 10^5) \text{ Pa} \times \frac{1}{0,93 \times 1000 \times \text{kg/m}^3} \\ \times \frac{1}{(2,52)^2 \text{ m}^2} \times \frac{\text{N}}{\text{m}^2 \cdot \text{Pa}} \times \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2} = 192.612 \text{ m}$$
$$L = 192.612 \text{ m} \leftarrow L$$

Para determinar a potência de bombeamento, nós podemos aplicar a primeira lei da termodinâmica ao VC₂. Este volume de controle consiste somente da bomba, e vimos na Seção 8.7 que esta lei é simplificada para

$$\dot{W}_{\text{bomba}} = Q \Delta p_{\text{bomba}} \quad (8.47)$$

e a eficiência de bomba é

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{bomba}}}{\dot{W}_{\text{entrada}}} \quad (8.48)$$

Lembramos que \dot{W}_{bomba} é a potência recebida pelo fluido, e \dot{W}_{entrada} é potência de alimentação da bomba. Como temos um sistema que se repete, o aumento de pressão através da bomba (isto é, do estado ① para o estado ②) iguala a queda de pressão no tubo (isto é, do estado ② para o estado ①),



Estudo de Caso

Escoamento em Tubo: Comprimento Desconhecido

Lembramos que \dot{W}_{bomba} é a potência recebida pelo fluido, e \dot{W}_{entrada} é potência de alimentação da bomba. Como temos um sistema que se repete, o aumento de pressão através da bomba (isto é, do estado ① para o estado ②) iguala a queda de pressão no tubo (isto é, do estado ② para o estado ①),

$$\Delta p_{\text{bomba}} = \Delta p$$

$$\begin{aligned}\dot{W}_{\text{bomba}} &= Q \Delta p_{\text{bomba}} = 2,944 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times (8,27 \times 10^6 - 3,445 \times 10^5) \text{Pa} \\ &\quad \times \frac{\text{N}}{\text{m}^2 \cdot \text{Pa}} \times \frac{\text{j}}{\text{N} \cdot \text{m}} \times \frac{\text{W} \cdot \text{S}}{\text{j}} \approx 23,13 \text{ MW}\end{aligned}$$

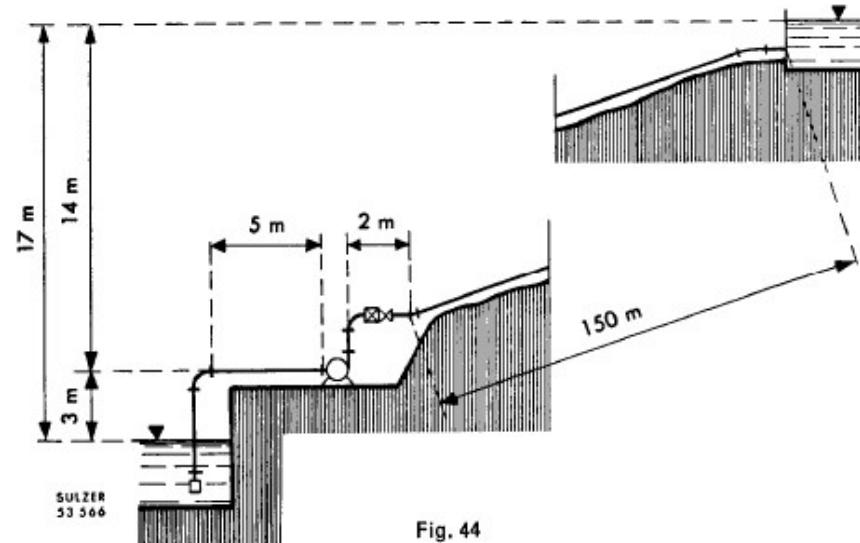
E a potência requerida na bomba é

$$\dot{W}_{\text{entrada}} = \frac{\dot{W}_{\text{bomba}}}{\eta} = \frac{23,13}{0,85} = 27,21 \text{ MW} \leftarrow \dot{W}_{\text{necessária}}$$



Estudo Dirigido Atividade em grupo (em sala) Exercício – 8.1.

Numa propriedade agrícola se requer uma estação de irrigação captando 40 litros/s de água de um canal. A figura representa o esquema da instalação de bombeamento a ser utilizada. Considere que a água 20°C . Os diâmetros internos da tubulação de aspiração e de recalque são iguais a 175mm. Utilize uma tubulação de pvc com rugosidade absoluta igual a 0,015mm. Determinar a altura manométrica e potência de acionamento da bomba considerando um rendimento global de 75%.





Estudo Dirigido Atividade em grupo (em sala) Exercício – 8.1.

Dados:

Aspiração:	01 válvula de pé: $L_{eq} = 43,4\text{m}$	01 curva de 90° : $L_{eq} = 2,1\text{m}$
Descarga:	01 curva de 90° : $L_{eq} = 2,1\text{m}$	1 válvula de retenção: $L_{eq} = 13,9\text{m}$

Solução:

Para água a 20°C : Viscosidade cinemática é igual a: $\nu = 1,127 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$. Massa específica: $\rho = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$
Vazão: $Q = 40 \text{l/s}$ ($0,040 \text{m}^3/\text{s}$). Pela Eq. da continuidade achamos: Velocidade na tubulação: $V = 1,65 \text{m/s}$

Somando os comprimentos da tubulação (160m) mais o comprimento equivalente dos acessórios (61,5m) determinado o comprimento total: $L_{\text{total}} = 160 + 61,5 = 221,5\text{m}$ (Aprox. 222m.) A altura manométrica é dada por:

$$H_{\text{man}} = h_a + h_r + h_{L_a} + h_{L_r} \text{ como a tubulação é do mesmo diâmetro } H_{\text{man}} = h_a + h_r + h_L$$

Altura estática de aspiração: $h_a = 3,0\text{m}$; Altura estática de recalque: $h_r = 14,0\text{m}$.



Estudo Dirigido Atividade em grupo (em sala) Exercício – 8.1.

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{1,65 \times 0,175}{1,127 \times 10^{-6}} = 256211 \quad (2,56 \times 10^5) \quad (\text{Escoamento em regime turbulento}).$$

$$f = 0,0055 \left[1 + \left(20.000 \frac{\varepsilon}{D} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right] = 0,0055 \left[1 + \left(20.000 \frac{0,015}{175} + \frac{10^6}{256211} \right)^{1/3} \right] \cong 0,0153$$

Neste exemplo, a tubulação de aspiração e recalque tem o mesmo diâmetro. Desta forma a perda de carga total da instalação é dada como:

$$h_L = h_{LD} + h_{Lk} = f \frac{(L + L_{eq})}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,0153 \frac{(160 + 61,5) \times 1,65^2}{0,16 \times 2 \times 9,81} = 2,94m$$

$$H_{man} = h_a + h_r + h_L = 3 + 14 + 2,94 = 19,94m$$

$$\dot{W}_{ac} = \frac{\rho g H_{man} Q}{\eta_G} = \frac{1000 \times 9,81 \times 19,94 \times 0,04}{0,75} = 10432,61W \text{ ou } 10,43kW$$

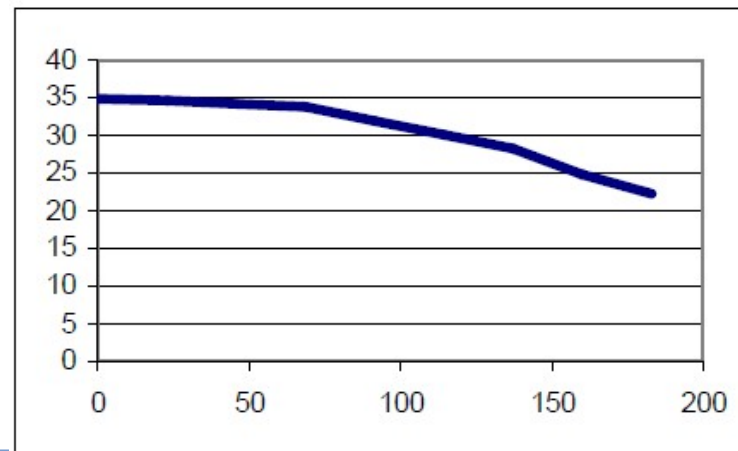


Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

Exercício – 8.2.

Uma bomba de um catálogo do fabricante opera a 1750rpm e apresenta uma curva característica H-Q como mostrado na figura abaixo. Trace a curva da bomba para uma rotação de 2000rpm. Um sistema deve bombear água através de uma tubulação de 150mm de diâmetro com 460m de comprimento. Considere o coeficiente de atrito da tubulação igual a 0,025. A altura estática de elevação é igual a 12m considerando nulas todas as perdas dos acessórios. Determinar e a equação característica do sistema. Traçar a curva característica do sistema (com pelo menos 09 pontos) mostrando as condições de operação [H(m),Q(m³/h)] na interseção com a curva de bomba quando trabalha com 1750rpm.





Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

Exercício – 8.2.

Solução:

$D=150\text{mm}$ $L=460\text{m}$ $f=0,025$ $h_e=12\text{m}$

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = f \frac{L}{D} \frac{\left(\frac{4Q}{\pi D^2}\right)^2}{2g} = f \frac{16L}{\pi^2 D^5} \frac{Q^2}{2g}$$

$$h_L = 0,0826 f \frac{L}{D^5} Q^2 = 0,0826 \times 0,025 \frac{460}{0,15^5} Q^2 = 12513 Q^2$$

A equação da curva característica da bomba é dada por:

$$H = h_e + h_L = 12 + 12513 Q^2$$

Curva Característica do Sistema:

Q (m ³ /h)	0	40	60	80	100	120	140
Q (m ³ /s)	0	0,011	0,01667	0,0222	0,0277	0,0333	0,0388
H (m)	12	13,55	15,5	18,2	21,67	25,9	31,0

Curva Característica da Bomba - 1750rpm

Q (m ³ /s)	0	20	40	60	80	100	120	140	160
H (m)	26,7	26,5	26,2	25,8	24,4	23	21,6	19	17

Curva Característica da Bomba - 2000rpm

Q (m ³ /s)	0	22,86	45,72	68,6	91,40	114	137,2	160,0	182,8
H (m)	34,9	34,6	34,2	33,7	31,87	30	28,2	24,8	22,2

$$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1} = Q_1 \times \frac{2000}{1750} = 1,143 Q_1$$

$$H_2 = H_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = H_1 \times \left(\frac{2000}{1750}\right)^2 = 1,306 H_1$$



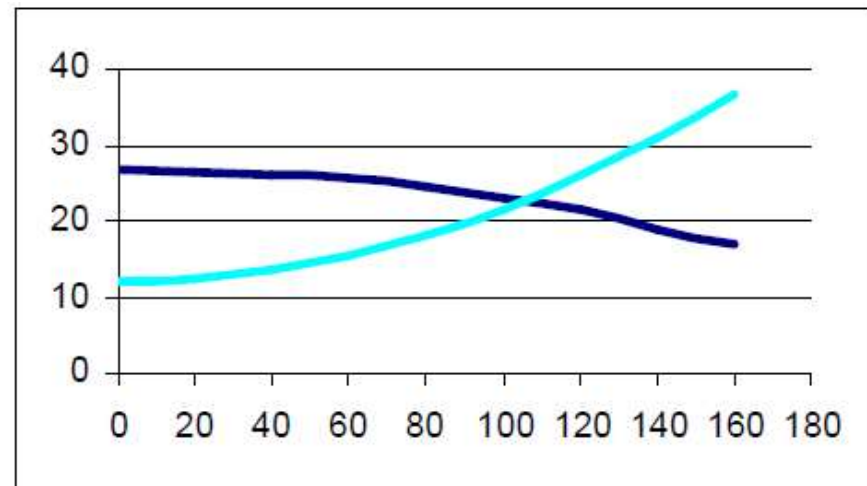
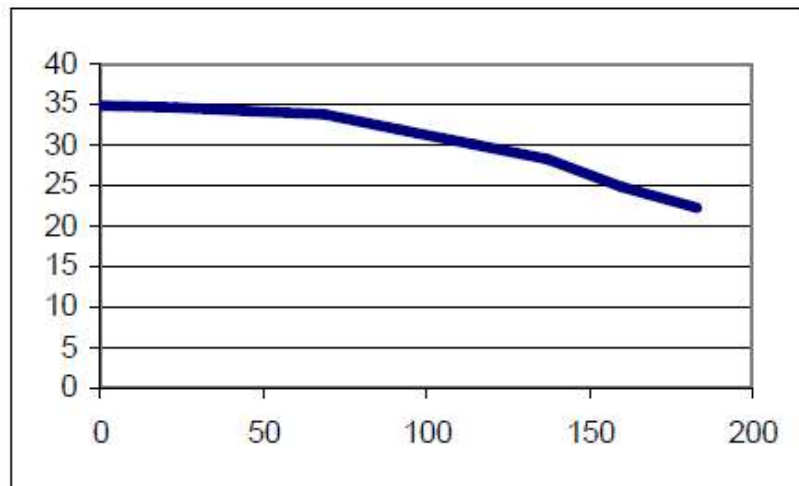
Estudo Dirigido

Atividade em grupo (em sala)

Exercício – 8.2.

Solução:

Condições de operação do sistema Aprox.: $Q=105 \text{ m}^3/\text{h}$ e $H=23\text{m}$





Estudo de **Caso Real** Atividade de Aprendizado (**auto estudo**) Dimensionamento de Sistema de Bombeamento

Determinar a altura manométrica, potência com os seguintes dados. Utilize o catálogo de uma bomba comercial para traçar a curva característica do sistema junto com a curva característica da bomba mostrando o ponto de funcionamento.

Fonte: (Equipamentos Industriais e de Processo - Macintyre)

Vazão: $Q=5l/s$	
Altura estática de aspiração $h_a=2,60m$	Tubulação: <i>Ferro galvanizado novo sem costura</i>
Comprimento da tubulação de aspiração: $L_a=5,4m$	Fluido: <i>água fria a 15^oC</i>
Altura estática de recalque: $h_r=42,50m$	Rendimento global estimado: <i>50%</i>
Comprimento da tubulação de recalque $L_r=60m$	



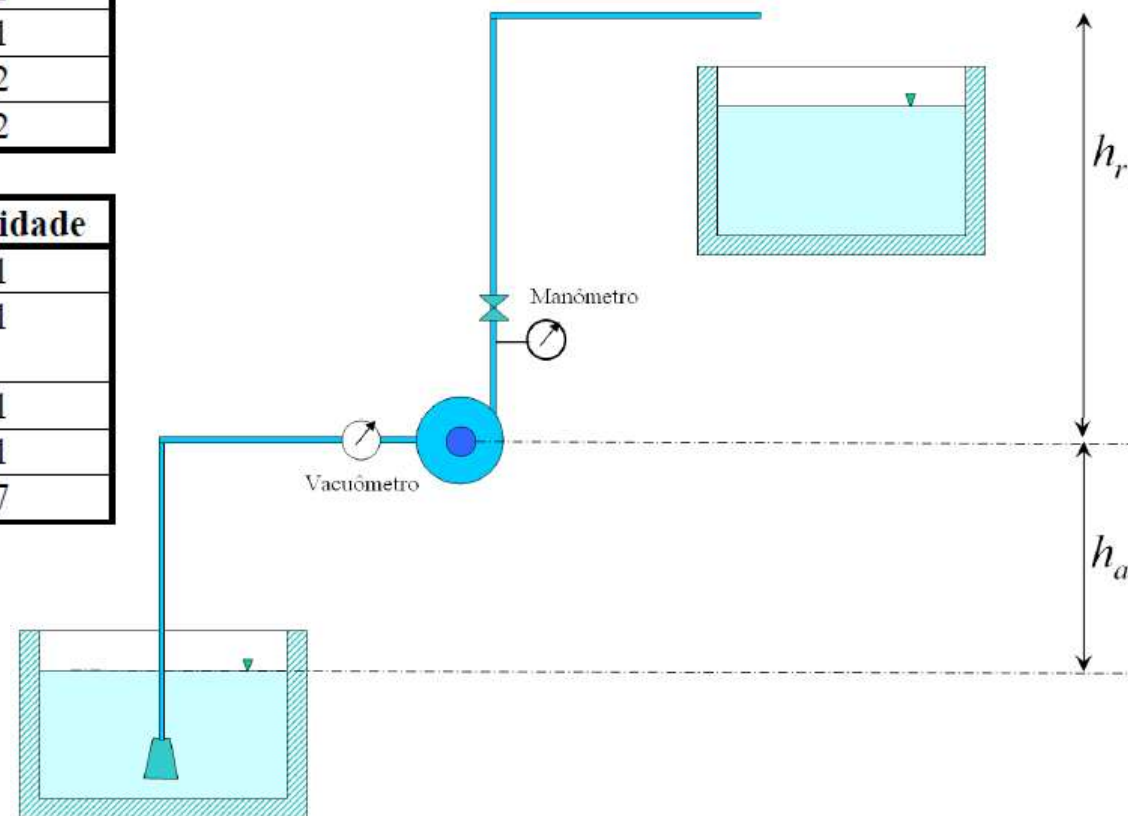
Estudo de **Caso Real** Atividade de Aprendizado (**auto estudo**) Dimensionamento de Sistema de Bombeamento

Aspiração

Elemento	Quantidade
Válvula de pé com crivo	01
Cotovelo 90° raio médio	01
Registro de gaveta	02
Tê com saída lateral	02

Recalque

Elemento	Quantidade
Registro de gaveta	01
Válvula de retenção (tipo pesada)	01
Tê de saída lateral	01
Cotovelo 45°	01
Cotovelo de 90° raio médio	07





Estudo de **Caso Real** Atividade de Aprendizado (**auto estudo**) Dimensionamento de Sistema de Bombeamento

Orientação:

Para determinar a altura manométrica devemos conhecer as perdas de carga da instalação, já que as alturas estáticas de aspiração e recalque são dadas no problema.

Roteiro:

- Tabela 1: Diâmetros e velocidades das tubulações
- Tabela 2: Comprimento equivalente dos acessórios
- Tabela 3: Rugosidade Absoluta da tubulação
- Tabela 4: Perda de Carga na Tubulação de aspiração
- Tabela 5: Perda de Carga na Tubulação de Descarga
- Tabela 6: Altura Manométrica
- Tabela 7: Potência de acionamento da bomba



Estudo de **Caso Real** Atividade de Aprendizado (**auto estudo**) Dimensionamento de Sistema de Bombeamento

Solução:

Para determinar a altura manométrica devemos conhecer as perdas de carga da instalação, já que as alturas estáticas de aspiração e recalque são dadas no problema.

$$H_{man} = h_a + h_r + h_{La} + h_{Lr} + h_{vel}$$

1. Diâmetros e velocidades das tubulações

1.1 Tubulação de aspiração:

com $Q=5\text{l/s}$ no gráfico de Sulzer se obtém: $D_a=75\text{mm}$ e $v_a=1,30\text{m/s}$ (diâmetro comercial)

- ❑ Utilizando a Eq. Bresse para fluxo contínuo com $k=1,05$ se obtém: $D=74\text{mm}$ (superior 75mm)

1.2 Tubulação de recalque:

com $Q=5\text{l/s}$ no gráfico de Sulzer se obtém: $D_r=63\text{mm}$ e $v_r=1,45\text{m/s}$ (diâmetro comercial)

- ❑ Utilizando a Eq. Bresse com $k=1,05$ se obtém $D=74\text{mm}$ (D inferior comercial: 63mm)



Estudo de **Caso Real** Atividade de Aprendizado (**auto estudo**) Dimensionamento de Sistema de Bombeamento

2. Comprimento equivalente dos acessórios

Considerando as tubulações de ferro fundido, podemos obter a perda de carga dos acessórios (para ferro fundido e aço) com seus respectivos diâmetros das tubulações (aspiração e descarga).

2.1 Tubulação de aspiração:

Diâmetro: 75mm (3")

Velocidade: 1,3m/s

Item	Elemento	Quantidade	Comprimento Equivalente unitário	Comprimento Equivalente total
1	Válvula de pé com crivo	01	20,0	20,00
2	Cotovelo 90° raio médio.	01	2,10	2,10
3	Registro de gaveta	02	0,50	1,00
4	Te - com saída lateral	02	5,20	10,40
			Total	33,50

Tubulação de aspiração: $L_{Ta} = L_a + L_{eqa} = 5,4 + 33,50 = 38,9\text{mca}$



Estudo de **Caso Real**

Atividade de Aprendizado (**auto estudo**)

Dimensionamento de Sistema de Bombeamento

2.2 Tubulação de recalque

Diâmetro: 63 mm (2 1/2")

Velocidade: 1,45m/s

Item	Elemento	Quantidade	Comprimento Equivalente unitário	Comprimento Equivalente total
1	Registro de gaveta (2 1/2")	01	0,4	0,4
2	Válvula de retenção (tipo pesada)	01	8,1	8,1
3	Te - saída lateral	01	4,3	4,3
4	Cotovelo 45°	01	0,9	0,9
5	Cotovelo de 90° raio médio	07	1,7	11,9
			Total	25,60

Tubulação de recalque : $L_{Tr} = L_{realr} + L_{eqr} = 60,0 + 25,6 = 85,6mca$.

Para água fria a 15°C, em tabela: encontramos $\nu = 1,127 \times 10^{-6} (m^2/s)$.

3. Rugosidade Absoluta da tubulação

Considerando ferro galvanizado novo sem costura obtemos em tabela o valor da rugosidade absoluta igual a $\varepsilon = 0,10mm$. (valor médio)



Estudo de **Caso Real** Atividade de Aprendizado (**auto estudo**) Dimensionamento de Sistema de Bombeamento

4. Perda de Carga na Tubulação de aspiração

Número de Reynolds da aspiração: $D_a=75\text{mm}$; $v_a=1,30\text{m/s}$; $\nu=1,127\times 10^{-6}$ (m^2/s)

$$\text{Re}_a = \frac{v_a D_a}{\nu} = \frac{1,30 \times 0,075}{1,127 \times 10^{-6}} = 86.513 \approx 8,7 \times 10^4$$

Coefficiente de atrito: Utilizando o diagrama de Moody ou a expressão aproximada de Moody:

A rugosidade relativa $\varepsilon/D_a = 0,10/75 = 0,001334$

$$f = 0,0055 \left[1 + \left(20.000 \frac{\varepsilon}{D} + \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{1/3} \right] = 0,0055 \left[1 + \left(20.000(0,001334) + \frac{10^6}{86513} \right)^{1/3} \right] = 0,024$$

$$h_{LDa} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,024 \frac{38,90}{0,075} \frac{(1,3)^2}{2 \times 9,81} = 1,076\text{m}$$



Estudo de **Caso Real** Atividade de Aprendizado (**auto estudo**) Dimensionamento de Sistema de Bombeamento

5. Perda de Carga na Tubulação de Descarga

Número de Reynolds do recalque: $D_r=63\text{mm}$; $v_r=1,45\text{m/s}$; $\nu=1,127 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$Re_r = \frac{v_r D_r}{\nu} = \frac{1,45 \times 0,0063}{1,127 \times 10^{-6}} = 81056 \approx 8,1 \times 10^4$$

Coefficiente de atrito:

Utilizando o diagrama de Moody ou a expressão aproximada de Moody:

A rugosidade relativa $\varepsilon/D_r = 0,10/63 = 0,0016$

$$f = 0,0055 \left[1 + \left(20.000 \frac{\varepsilon}{D} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right] = 0,0055 \left[1 + \left(20.000(0,0016) + \frac{10^6}{81056} \right)^{1/3} \right] = 0,025$$

$$h_{LDr} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,025 \frac{85,6}{0,063} \frac{(1,45)^2}{2 \times 9,81} = 3,64$$

$$h_{vel} = \frac{v^2}{2g} = \frac{1,3^2}{2 \times 9,81} = 0,086\text{m}$$



Estudo de **Caso Real** Atividade de Aprendizado (**auto estudo**) Dimensionamento de Sistema de Bombeamento

6. Altura Manométrica

$$H_{man} = h_a + h_v + h_{La} + h_{Lv} + h_{vel}$$

$$H_{man} = 2,6 + 42,5 + 1,08 + 3,64 + 0,086 \approx 50m$$

7. Potência de acionamento da bomba

$$Pot = \frac{\rho g H Q}{\eta_G} = \frac{1000 \times 9,81 \times 50 \times 0,005}{0,5} = 4,12 kW \approx 5 kW \approx 6,5 CV$$

Com $H_{man} = 51mca$ e $Q = 5l/s$ ($18m^3/h$) podemos determinar o tipo de bomba comercial.

Poderíamos verificar a perda de carga utilizando diretamente o Diagrama de Moody.

- Aspiração: $Re = 8,7 \times 10^4$ com $\varepsilon/D_a = 0,00133$; $f = 0,025$ (valor obtido pela eq. $f = 0,024$)
- Descarga: $Re = 8,1 \times 10^4$ com $\varepsilon/D_r = 0,10/63 = 0,0016$; $f = 0,025$ (pela eq. $f = 0,025$)

Continuar o problema:

- Selecionar uma bomba comercial em catálogo de fabricante.
- Determinar a Eq. que representa a curva característica do sistema e traçar junto a curva do fabricante.



Importante! Lista de Exercícios

Como reforço do aprendizado do conteúdo apresentado em sala de aula, são sugeridos os exercícios dispostos na lista abaixo. Bom estudo!

Fox, R. W. **Introdução à Mecânica dos Fluidos** Editora LTC – 8ªed

Exercícios Fox - 4ed			
Capítulo 8			
Exemplos resolvidos FOX 8ED	8.5	8.6	8.7

Capítulo 11 – Máquinas de Fluxo

- ≡ Introdução e Classificação das Máquinas de Fluxo
- ≡ Análise das Turbomáquinas
- ≡ Características de Desempenho

Capítulo 11 – Máquinas de Fluxo

**** Turbomáquinas**

- ≡ Análise das Turbomáquinas
- ≡ Características de Desempenho

Apêndice A

Propriedades Gerais

Tabela A.1

Fatores de Conversão

Aceleração da gravidade

$g = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2$

$g = 32,174\ 05\ \text{ft/s}^2$

Área (A)

$1\ \text{mm}^2 = 1,0 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$

$1\ \text{ft}^2 = 144\ \text{in}^2$

$1\ \text{cm}^2 = 1,0 \times 10^{-4}\ \text{m}^2 = 0,1550\ \text{in}^2$

$1\ \text{in}^2 = 6,4516\ \text{cm}^2 = 6,4516 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$

$1\ \text{m}^2 = 10,7639\ \text{ft}^2$

$1\ \text{ft}^2 = 0,092\ 903\ \text{m}^2$

Calor específico (C_p , C_v , C), entropia específica(s)

$1\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 0,238\ 846\ \text{Btu/lbm}\cdot\text{°R}$

$1\ \text{Btu/lbm}\cdot\text{°R)} = 4,1868\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$

Coeficiente de transferência de calor

$1\ \text{W/m}^2\cdot\text{K} = 0,176\ 11\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{°R}$

$1\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{°R)} = 5,678\ 26\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}$

Comprimento

$1\ \text{mm} = 0,001\ \text{m} = 0,1\ \text{cm}$

$1\ \text{ft} = 12\ \text{in}$

$1\ \text{cm} = 0,01 = 10\ \text{mm} = 0,3970\ \text{in}$

$1\ \text{in} = 2,54\ \text{cm} = 0,0254\ \text{m}$

$1\ \text{m} = 3,280\ 84\ \text{ft} = 39,370\ \text{in}$

$1\ \text{ft} = 0,3048\ \text{m}$

$1\ \text{km} = 0,621\ 371\ \text{mi}$

$1\ \text{mi} = 1,609\ 344\ \text{km}$

$1\ \text{mi} = 1609,3\ \text{m (US statute)}$

$1\ \text{yd} = 0,9144\ \text{m}$

Condutividade térmica

$1\ \text{W/m}\cdot\text{K} = 1\ \text{J/s}\cdot\text{m}\cdot\text{K} = 0,577\ 789\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}\cdot\text{°R}$

$1\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}\cdot\text{°R)} = 1,730\ 735\ \text{W/m}\cdot\text{K}$

Constante universal dos gases

$\bar{R} = N_A k = 8,314\ 51\ \text{kJ/kmol}\cdot\text{K}$

$\bar{R} = 1,985\ 89\ \text{Btu/lbmol}\cdot\text{R}$

$= 1,985\ 89\ \text{kcal/kmol}\cdot\text{K}$

$= 1545,36\ \text{lb}\cdot\text{ft/lbmol}\cdot\text{R}$

$= 82,0578\ \text{atm}\cdot\text{L/kmol}\cdot\text{K}$

$= 0,730\ 24\ \text{atm}\cdot\text{ft}^3/\text{lbmol}\cdot\text{R}$

$= 10,7317\ (\text{lb}\cdot\text{ft}^2/\text{in}^2)\cdot\text{ft}^3/\text{lbmol}\cdot\text{R}$

Energia

$1\ \text{J} = 1\ \text{N}\cdot\text{m} = 1\ \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$

$1\ \text{lb}\cdot\text{ft} = 1,355818$

$1\ \text{J} = 0,737\ 562\ \text{lb}\cdot\text{ft}$

$\text{J} = 1,285\ 07 \times 10^{-3}\ \text{Btu}$

$1\ \text{cal (Int.)} = 4,186\ 81\ \text{J}$

$1\ \text{erg} = 1,0 \times 10^{-7}\ \text{J}$

$1\ \text{Btu (Int.)} = 1,055\ 056\ \text{kJ}$

$1\ \text{eV} = 1,602\ 177\ 33 \times 10^{-19}\ \text{J}$

$= 778,1693\ \text{lb}\cdot\text{ft}$

Energia específica (e, u)

$1\ \text{kJ/kg} = 0,429\ 92\ \text{Btu/lbm}$

$1\ \text{Btu/lbm} = 2,326\ \text{kJ/kg}$

$= 334,55\ \text{lb}\cdot\text{ft/lbm}$

$1\ \text{lb}\cdot\text{ft/lbm} = 2,989\ 07 \times 10^{-3}\ \text{kJ/kg}$
 $= 1,285\ 07 \times 10^{-3}\ \text{Btu/lbm}$

Energia cinética específica ($1/2 V^2$)

$1\ \text{m}^2/\text{s}^2 = 0,001\ \text{kJ/kg}$

$1\ \text{ft}^2/\text{s}^2 = 3,9941 \times 10^{-5}\ \text{Btu/lbm}$

$1\ \text{kJ/kg} = 1000\ \text{m}^2/\text{s}^2$

$1\ \text{Btu/lbm} = 250\ 37\ \text{ft}^2/\text{s}^2$

Energia potencial específica (Zg)

$1\ \text{m} - \text{gstd} = 9,806\ 65 \times 10^{-3}\ \text{kJ/kg}$

$1\ \text{ft} - \text{gstd} = 1,0\ \text{lb}\cdot\text{ft/lbm}$

$= 4,216\ 07 \times 10^{-3}\ \text{Btu/lbm}$

$= 0,001\ 285\ \text{Btu/lbm}$

$= 0,002\ 989\ \text{kJ/kg}$

Fluxo de calor

$1\ \text{W/m}^2 = 0,316\ 998\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}^2$

$1\ \text{Btu/h}\cdot\text{ft}^2 = 3,154\ 59\ \text{W/m}^2$

Força (F)

$1\ \text{N} = 0,224\ 809\ \text{lb}$

$1\ \text{lb} = 4,448\ 222\ \text{N}$

$1\ \text{kgf} = 9,806\ 65\ \text{N (1 kgf)}$

Massa

$1\ \text{kg} = 2,204\ 623\ \text{lbm}$

$1\ \text{lbm} = 0,453\ 592\ \text{kg}$

$1\ \text{ton} = 1000\ \text{kg}$

$1\ \text{slug} = 14,5939\ \text{kg}$

$1\ \text{grain} = 6,479\ 89 \times 10^{-5}\ \text{kg}$

$1\ \text{ton} = 2000\ \text{lbm}$

Massa específica

$1\ \text{kg/m}^3 = 0,062\ 427\ 97\ \text{lbm/ft}^3$

$1\ \text{lbm/ft}^3 = 16,018\ 46\ \text{kg/m}^3$

$1\ \text{g/cm}^3 = 1000\ \text{kg/m}^3$

$1\ \text{g/cm}^3 = 1\ \text{kg/L}$

Momento (Torque, τ)

$1\ \text{N}\cdot\text{m} = 0,737\ 562\ \text{lbm}\cdot\text{ft}$

$1\ \text{lbm}\cdot\text{ft} = 1,355\ 818\ \text{N}\cdot\text{m}$

Potência (\dot{Q} , \dot{W})

$1\ \text{W} = 1\ \text{J/s} = 1\ \text{N}\cdot\text{m/s}$

$1\ \text{lb}\cdot\text{ft/s} = 1,355\ 818\ \text{W}$

$= 0,737\ 562\ \text{lb}\cdot\text{ft/s}$

$= 4,626\ 24\ \text{Btu/h}$

$1\ \text{kW} = 3412,14\ \text{Btu/h}$

$1\ \text{Btu/s} = 1,055\ 056\ \text{kW}$

$1\ \text{hp (métrico)} = 0,735\ 499\ \text{kW}$

$1\ \text{hp (UK)} = 0,7457\ \text{kW}$

$1\ \text{ton de refrigeração} = 3,516\ 85\ \text{kW}$

$= 550\ \text{lb}\cdot\text{ft/s}$

$= 2544,43\ \text{Btu/h}$

$1\ \text{ton de refrigeração} = 12\ 000\ \text{Btu/h}$

Pressão (P)	
1 Pa = 1 N/m ² = 1 kg/m·s ²	1 lbf/in ² = 6,894 757 kPa
1 bar = 1,0 × 10 ⁵ Pa = 100 kPa	
1 atm = 101,325 kPa	1 atm = 14,695 94 lbf/in ²
= 1,013 25 bar	= 29 921 in Hg [32 °F]
= 760 mm Hg [0 °C]	= 33,8995 ft H ₂ O [4 °C]
= 10,332 56 m H ₂ O [4 °C]	
1 torr = 1 mm Hg [0 °C]	
1 mm Hg [0 °C] = 0,133 322 kPa	1 in Hg [0 °C] = 0,491 15 lbf/in ²
1 m H ₂ O [4 °C] = 0,806 38 kPa	1 in H ₂ O [4 °C] = 0,0361 26 lbf/in ²
Quantidade de movimento (mV)	
1 kg·m/s = 7,232 94 lbf·ft/s	1 lbf·ft/s = 0,138 256 kg·m/s
= 0,224 809 lbf·s	
Temperatura (T)	
1 K = 1 °C = 1,8 R = 1,8 F	1 R = (5/9) K
TC = TK - 273,15	TF = TR - 459,67
= (TF - 32)/1,8	= 1,8 TC + 32
TK = TR/1,8	TR = 1,8 TK
Velocidade (V)	
1 m/s = 3,6 km/h	1 ft/s = 0,681 818 m/h
= 3,280 84 ft/s	= 0,3048 m/s
= 2,236 94 mi/h	= 1,097 28 km/h
1 km/h = 0,277 78 m/s	1 mi/h = 1,466 67 ft/s
= 0,911 34 ft/s	= 0,447 04 m/s
= 0,621 37 m/h	= 1,609 344 km/h
Volume específico (V)	
1 cm ³ /g = 0,001 m ³ /kg	
1 cm ³ /g = 1 L/kg	
1 m ³ /kg = 161 846 ft ³ /lbm	1 ft ³ /lbm = 0,062 428 m ³ /kg
Volume (V)	
1 m ³ = 35,3147 ft ³	1 ft ³ = 2,831 685 × 10 ⁻² m ³
1 L = 1 dm ³ = 0,001 m ³	1 in. ³ = 1,6387 × 10 ⁻⁵ m ³
1 Gal (US) = 3,785 412 L	1 Gal (UK) = 4,546 090 L
= 3,785 412 × 10 ⁻³ m ³	1 Gal (US) = 231,00 in. ³

Tabela A.2

Constantes críticas

Substância	Fórmula	Peso molecular	Temperatura K	Pressão MPa	Volume m ³ /kg
Amônia	NH ₃	17,031	405,5	11,35	0,00426
Argônio	Ar	39,948	150,8	4,87	0,00188
Bromo	Br ₂	159,808	588	10,30	0,000796
Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	304,1	7,38	0,00212
Monóxido de carbono	CO	28,01	132,9	3,50	0,00333
Cloro	Cl ₂	70,906	416,9	7,98	0,00175
Fúor	F ₂	37,997	144,3	5,22	0,00174
Hélio	He	4,003	145,19	0,227	0,0143
Hidrogênio (normal)	H ₂	2,016	33,2	1,30	0,0323
Criptônio	Kr	83,80	209,4	5,50	0,00109
Neônio	Ne	20,183	44,4	2,76	0,0206
Óxido nítrico	NO	30,006	180	6,48	0,00192
Nitrogênio	N ₂	28,013	126,2	3,39	0,0032
Dióxido de nitrogênio	NO ₂	46,006	431	10,1	0,00365
Óxido nítrico	N ₂ O	44,013	308,6	7,24	0,00221
Oxigênio	O ₂	31,999	154,6	5,04	0,00229
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,063	430,8	7,88	0,00191
Água	H ₂ O	18,015	647,3	22,12	0,00317
Xenônio	Xe	131,30	289,7	5,84	0,000902
Acetileno	C ₂ H ₂	26,038	308,3	6,14	0,00433
Benzeno	C ₆ H ₆	78,114	562,2	4,89	0,00332
n-Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	425,2	3,80	0,00439
Difluorocloroetano (142b)	CH ₂ ClCF ₂	100,495	410,3	4,25	0,00230
Difluoroclorometano (22)	CHClF ₂	86,469	369,3	4,97	0,00191
Diclorofluoreetano (141)	CH ₂ Cl ₂ F	116,95	481,5	4,54	0,00215
Diclorotetrafluoreetano (123)	CHCl ₂ CF ₃	152,93	456,9	3,66	0,00182
Difluoreetano (152a)	CHF ₂ CH ₃	66,05	386,4	4,52	0,00272
Difluorometano (32)	CF ₂ H ₂	52,024	351,3	5,78	0,00236
Etano	C ₂ H ₆	30,070	305,4	4,88	0,00493
Álcool etílico (etanol)	C ₂ H ₅ OH	46,069	513,9	6,14	0,00363
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	282,4	5,04	0,00465
n-Heptano	C ₇ H ₁₆	100,205	540,3	2,74	0,00431
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	86,178	507,5	3,01	0,00429
Metano	CH ₄	16,043	190,4	4,60	0,00615
Álcool metílico (metanol)	CH ₃ OH	32,042	512,6	8,09	0,00368
n-Octano	C ₈ H ₁₈	114,232	568,8	2,49	0,00431
Pentafluoreetano (125)	CHF ₂ CF ₃	120,022	339,2	3,62	0,00176
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	72,151	469,7	3,37	0,00421
Propano	C ₃ H ₈	44,094	369,8	4,25	0,00454
Propeno	C ₃ H ₆	42,081	364,9	4,60	0,00430
Refrigerante misto	R-410a	72,585	344,5	4,90	0,00218
Tetrafluoreetano (134a)	CF ₃ CH ₂ F	102,03	374,2	4,06	0,00197

Tabela A.3

Propriedades de alguns sólidos a 25 °C

Sólido	ρ , (kg/m ³)	C_p , (kJ/kg K)
Acrílico	1180	1,44
Areia (seca)	1500	0,8
Astato	2120	0,92
Borracha (maia)	1100	1,67
Carbono, diamante	3250	0,51
Carbono, grafite	2000-2500	0,61
Carvão	1200-1500	1,26
Concreto	2200	0,88
Gelo (0 °C)	917	2,04
Granito	2750	0,89
Lã	100	1,72
Lã de vidro	20	0,66
Madeira dura	720	1,26
Madeira mole (pinho)	510	1,38
Neve, firme	560	2,1
Papel	700	1,2
Poliestireno	920	2,3
PVC	1380	0,96
Sal, rocha	2100-2500	0,92
Silício	2330	0,70
Tijolo (comum)	1800	0,84
Vidro	2500	0,80
Metais		
Aço (AISI304)	7820	0,46
Alumínio	2700	0,90
Chumbo	113 40	0,13
Cobre comercial	8300	0,42
Estanho	7304	0,22
Ferro fundido	7272	0,42
Latão, 60-40	8400	0,38
Magnésio, 2% Mn	1778	1,00
Níquel, 10% Cr	8666	0,44
Ouro	193 00	0,13
Prata, 99,9% Ag	105 24	0,24
Sódio	971	1,21
Tungstênio	193 00	0,13
Zinco	7144	0,39

Tabela A.4

Propriedades de alguns líquidos a 25 °C

Líquido	ρ , kg/m ³	C_p , kJ/kg K
Água	4,18	997
Amônia	4,84	604
Benzeno	1,72	879
Butano	2,47	556
CCL ₄	0,83	1584
CO ₂	2,9	680
Etanol	2,46	783
Gasolina	2,08	750
Glicerina	2,42	1260
Metanol	2,55	787
n-Octano	2,23	692
Óleo (leve)	1,8	910
Óleo de motor	1,9	885
Propano	2,54	510
Querosene	2,0	815
R-12	0,97	1310
R-125	1,41	1191
R-134a	1,43	1206
R-22	1,26	1190
R-32	1,94	961
R-410a	1,69	1059
Metais líquidos		
Bismuto, Bi	100 40	0,14
Chumbo, Pb	106 60	0,16
Estanho, Sn	6950	0,24
Mercúrio, Hg	135 80	0,14
Na K (56/44)	887	1,13
Potássio, K	828	0,81
Sódio, Na	929	1,38
Zinco, Zn	6570	0,50

* Ou à temperatura de fusão, caso seja maior que 25 °C.

Tabela A.5

Propriedades de vários gases ideais a 25 °C e 100 kPa*

Gás	Fórmula química	Peso molecular	R kJ/kg K	ρ (kg/m ³)	C_{p0} kJ/kg K	C_{v0} kJ/kg K	$k = C_p/C_v$
Acetileno	C ₂ H ₂	26,038	0,3193	1,05	1,699	1,380	1,231
Água (vapor)	H ₂ O	18,015	0,4615	0,0231	1,872	1,410	1,327
Ar		28,97	0,287	1,169	1,004	0,717	1,400
Amônia	NH ₃	17,031	0,4882	0,694	2,130	1,642	1,297
Argônio	Ar	39,948	0,2081	1,613	0,520	0,312	1,667
Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	0,1430	2,407	1,716	1,573	1,091
Dióxido de Carbono	CO ₂	44,01	0,1899	1,775	0,842	0,653	1,289
Monóxido de Carbono	CO	28,01	0,2968	1,13	1,041	0,744	1,399
Etano	C ₂ H ₆	30,07	0,2785	1,222	1,766	1,490	1,186
Etanol	C ₂ H ₅ OH	46,069	0,1805	1,883	1,427	1,246	1,145
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	0,2964	1,138	1,548	1,252	1,237
Hélio	He	4,003	2,0771	0,1615	5,193	3,116	1,667
Hidrogênio	H ₂	2,016	4,1243	0,0813	14,209	10,085	1,409
Metano	CH ₄	16,043	0,5183	0,648	2,254	1,736	1,299
Metanol	CH ₃ OH	32,042	0,2595	1,31	1,405	1,146	1,227
Neônio	Ne	20,183	0,4120	0,814	1,03	0,618	1,667
Nitrogênio	N ₂	28,013	0,2968	1,13	1,042	0,745	1,400
Óxido nítrico	NO	30,006	0,2771	1,21	0,993	0,716	1,387
Óxido nítrico	N ₂ O	44,013	0,1899	1,775	0,879	0,690	1,274
n-Octano	C ₈ H ₁₈	114,23	0,07279	0,092	1,711	1,638	1,044
Oxigênio	O ₂	31,999	0,2598	1,292	0,922	0,662	1,393
Propano	C ₃ H ₈	44,094	0,1896	1,808	1,679	1,490	1,126
R-12	CCl ₂ F ₂	120,914	0,06876	4,98	0,616	0,547	1,126
R-22	CHClF ₂	86,469	0,09616	3,54	0,658	0,562	1,171
R-32	CF ₂ H ₂	52,024	0,1598	2,125	0,822	0,662	1,242
R-125	CHF ₂ CF ₃	120,022	0,06927	4,918	0,791	0,722	1,097
R-134a	CF ₃ CH ₂ F	102,03	0,08149	4,20	0,852	0,771	1,106
R-410a		72,585	0,11455	2,967	0,809	0,694	1,165
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,059	0,1298	2,618	0,624	0,494	1,263
Tríóxido de enxofre	SO ₃	80,053	0,10386	3,272	0,635	0,531	1,196

* Ou na pressão de saturação, se esta for menor que 100 kPa.

Tabela A.6

Calor específico a pressão constante de vários gases ideais em função da temperatura*

Gás	Fórmula	$C_{p0} = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3$ (kJ/kg K)				$\theta = T$ (Kelvin)/1000
		C0	C1	C2	C3	
Acetileno	C ₂ H ₂	1,03	2,91	-1,92	0,54	
Água (vapor)	H ₂ O	1,79	0,107	0,586	-0,20	
Amônia	NH ₃	1,60	1,4	1,0	-0,7	
Ar		1,05	-0,365	0,85	-0,39	
Argônio	Ar	0,52	0	0	0	
Butano	C ₄ H ₁₀	0,163	5,70	-1,906	-0,049	
Dióxido de carbono	CO ₂	0,45	1,67	-1,27	0,39	
Dióxido de enxofre	SO ₂	0,37	1,05	-0,77	0,21	
Etano	C ₂ H ₆	0,18	5,92	-2,31	0,29	
Etanol	C ₂ H ₅ OH	0,2	4,65	-1,82	0,03	
Etileno	C ₂ H ₄	0,136	5,58	-3,0	0,63	
Hélio	He	5,193	0	0	0	
Hidrogênio	H ₂	13,46	4,6	-6,85	3,79	
Metano	CH ₄	1,2	3,25	0,75	-0,71	
Metanol	CH ₃ OH	0,66	2,21	0,81	-0,89	
Monóxido de carbono	CO	1,10	-0,46	1,0	-0,454	
Neônio	Ne	1,03	0	0	0	
Nitrogênio	N ₂	1,11	-0,48	0,96	-0,42	
n-Octano	C ₈ H ₁₈	-0,053	6,75	-3,67	0,775	
Óxido nítrico	NO	0,98	-0,031	0,325	-0,14	
Óxido nítrico	N ₂ O	0,49	1,65	-1,31	0,42	
Oxigênio	O ₂	0,88	-0,0001	0,54	-0,33	
Propano	C ₃ H ₈	-0,096	6,95	-3,6	0,73	
R-12†	CCl ₂ F ₂	0,26	1,47	-1,25	0,36	
R-22†	CHClF ₂	0,2	1,87	-1,35	0,35	
R-32†	CF ₂ H ₂	0,227	2,27	-0,93	0,041	
R-125†	CHF ₂ CF ₃	0,305	1,68	-0,284	0	
R-134a†	CF ₃ CH ₂ F	0,165	2,81	-2,23	1,11	
Tríóxido de enxofre	SO ₃	0,24	1,7	-1,5	0,46	

* Equações proporcionam resultados válidos na faixa de 260 K a 1200 K.

† Equações aplicáveis para temperaturas de, no máximo, 500 K.

Tabela A.7.1

Propriedades termodinâmicas do ar (gás ideal; pressão de referência para a entropia é 0,1 MPa ou 1 bar)

T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s ^o (kJ/kg × K)
200	142,77	200,17	6,46260
220	157,07	220,22	6,55812
240	171,38	240,27	6,64535
260	185,70	260,32	6,72562
280	200,02	280,39	6,79998
290	207,19	290,43	6,83521
298,15	213,04	298,62	6,86305
300	214,36	300,47	6,86926
320	228,73	320,58	6,93413
340	243,11	340,70	6,99515
360	257,53	360,86	7,05276
380	271,99	381,06	7,10735
400	286,49	401,30	7,15926
420	301,04	421,59	7,20875
440	315,64	441,93	7,25607
460	330,31	462,34	7,30142
480	345,04	482,81	7,34499
500	359,84	503,36	7,38692
520	374,73	523,98	7,42736
540	389,69	544,69	7,46642
560	404,74	565,47	7,50422
580	419,87	586,35	7,54084
600	435,10	607,32	7,57638
620	450,42	628,38	7,61090
640	465,83	649,53	7,64448
660	481,34	670,78	7,67717
680	496,94	692,12	7,70903
700	512,64	713,56	7,74010
720	528,44	735,10	7,77044
740	544,33	756,73	7,80008
760	560,32	778,46	7,82905
780	576,40	800,28	7,85740
800	592,58	822,20	7,88514
850	633,42	877,40	7,95207
900	674,82	933,15	8,01581
950	716,76	989,44	8,07667
1000	759,19	1046,22	8,13493
1050	802,10	1103,48	8,19081

Tabela A.7

Propriedades termodinâmicas do ar (continuação)

T (K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s ^o (kJ/kg × K)
1100	845,45	1161,18	8,24449
1150	889,21	1219,30	8,29616
1200	933,37	1277,81	8,34596
1250	977,89	1336,68	8,39402
1300	1022,75	1395,89	8,44046
1350	1067,94	1455,43	8,48539
1400	1113,43	1515,27	8,52891
1450	1159,20	1575,40	8,57111
1500	1205,25	1635,80	8,61208
1550	1251,55	1696,45	8,65185
1600	1298,08	1757,33	8,69051
1650	1344,83	1818,44	8,72811
1700	1391,80	1879,76	8,76472
1750	1438,97	1941,28	8,80039
1800	1486,33	2002,99	8,83516
1850	1533,87	2064,88	8,86908
1900	1581,59	2126,95	8,90219
1950	1629,47	2189,19	8,93452
2000	1677,52	2251,58	8,96611
2050	1725,71	2314,13	8,99699
2100	1774,06	2376,82	9,02721
2150	1822,54	2439,66	9,05678
2200	1871,16	2502,63	9,08573
2250	1919,91	2565,73	9,11409
2300	1968,79	2628,96	9,14189
2350	2017,79	2692,31	9,16913
2400	2066,91	2755,78	9,19586
2450	2116,14	2819,37	9,22208
2500	2165,48	2883,06	9,24781
2550	2214,93	2946,86	9,27308
2600	2264,48	3010,76	9,29790
2650	2314,13	3074,77	9,32228
2700	2363,88	3138,87	9,34625
2750	2413,73	3203,06	9,36980
2800	2463,66	3267,35	9,39297
2850	2513,69	3331,73	9,41576
2900	2563,80	3396,19	9,43818
2950	2613,99	3460,73	9,46025
3000	2664,27	3525,36	9,48198

Tabela A.7.2

Pressões e volumes relativos em função da pressão em processos isotrópicos

T (K)	P _r	v _r	T (K)	P _r	v _r	T (K)	P _r	v _r
200	0,2703	493,47	680	20,784	21,818	1800	1051,05	1,14204
220	0,3770	389,15	700	23,160	20,155	1850	1182,9	1,04294
240	0,5109	313,27	720	25,742	18,652	1900	1327,5	0,95445
260	0,6757	256,58	740	28,542	17,289	1950	1485,8	0,87521
280	0,8756	213,26	760	31,573	16,052	2000	1658,6	0,80410
290	0,9899	195,36	780	34,851	14,925	2050	1847,1	0,74012
298,15	1,0907	182,29	800	38,388	13,897	2100	2052,1	0,68242
300	1,1146	179,49	850	46,468	11,695	2150	2274,8	0,63027
320	1,3972	152,73	900	60,520	9,9169	2200	2516,2	0,58305
340	1,7281	131,20	950	74,815	8,4677	2250	2777,5	0,54020
360	2,1123	113,65	1000	91,651	7,2760	2300	3059,9	0,50124
380	2,5548	99,188	1050	111,35	6,2885	2350	3364,6	0,46576
400	3,0612	87,137	1100	134,25	5,4641	2400	3693,0	0,43338
420	3,6373	77,003	1150	160,73	4,7714	2450	4046,2	0,40378
440	4,2892	68,409	1200	191,17	4,1859	2500	4425,8	0,37669
460	5,0233	61,066	1250	226,02	3,6880	2550	4833,0	0,35185
480	5,8466	54,748	1300	265,72	3,2626	2600	5269,5	0,32903
500	6,7663	49,278	1350	310,74	2,8971	2650	5736,7	0,30805
520	7,7900	44,514	1400	361,62	2,5817	2700	6236,2	0,28872
540	8,9257	40,344	1450	418,89	2,3083	2750	6769,7	0,27089
560	10,182	36,676	1500	483,16	2,0703	2800	7338,7	0,25443
580	11,568	33,436	1550	554,96	1,8625	2850	7945,1	0,23921
600	13,092	30,561	1600	634,97	1,6804	2900	8590,7	0,22511
620	14,766	28,001	1650	723,86	1,52007	2950	9277,2	0,21205
640	16,598	25,713	1700	822,33	1,37858	3000	10007	0,19992
660	18,600	23,662	1750	931,14	1,25330			

Tabela A.8

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base mássica

T (K)	Nitrogênio, Diatômico (N ₂) R = 0,2968 kJ/kg × K M = 28,013 kg/kmol			Oxigênio, Diatômico (O ₂) R = 0,2598 kJ/kg × K M = 31,999 kg/kmol		
	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S _T ⁰ (kJ/kg × K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S _T ⁰ (kJ/kg × K)
200	148,39	207,75	6,4250	129,84	181,81	6,0466
250	185,50	259,70	6,6568	162,41	227,37	6,2499
300	222,63	311,67	6,8463	195,20	273,15	6,4168
350	259,80	363,68	7,0067	228,37	319,31	6,5590
400	297,09	415,81	7,1459	262,10	366,03	6,6838
450	334,57	468,13	7,2692	296,52	413,45	6,7954
500	372,35	520,75	7,3800	331,72	461,63	6,8969
550	410,52	573,76	7,4811	367,70	510,61	6,9903
600	449,16	627,24	7,5741	404,46	560,36	7,0768
650	488,34	681,26	7,6606	441,97	610,86	7,1577
700	528,09	735,86	7,7415	480,18	662,06	7,2336
750	568,45	791,05	7,8176	519,02	713,90	7,3051
800	609,41	846,85	7,8897	558,46	766,33	7,3728
850	650,98	903,26	7,9581	598,44	819,30	7,4370
900	693,13	960,25	8,0232	638,90	872,75	7,4981
950	735,85	1017,81	8,0855	679,80	926,65	7,5564
1000	779,11	1075,91	8,1451	721,11	980,95	7,6121
1100	867,14	1193,62	8,2572	804,80	1090,62	7,7166
1200	957,00	1313,16	8,3612	889,72	1201,53	7,8131
1300	1048,46	1434,31	8,4582	975,72	1313,51	7,9027
1400	1141,35	1556,87	8,5490	1062,67	1426,44	7,9864
1500	1235,50	1680,70	8,6345	1150,48	1540,23	8,0649
1600	1330,72	1805,80	8,7151	1239,10	1654,83	8,1389
1700	1426,89	1931,45	8,7914	1328,49	1770,21	8,2088
1800	1523,90	2058,15	8,8638	1418,63	1886,33	8,2752
1900	1621,66	2185,58	8,9327	1509,50	2003,19	8,3384
2000	1720,07	2313,68	8,9984	1601,10	2120,77	8,3987
2100	1819,08	2442,36	9,0612	1693,41	2239,07	8,4564
2200	1918,62	2571,58	9,1213	1786,44	2358,08	8,5117
2300	2018,63	2701,28	9,1789	1880,17	2477,79	8,5650
2400	2119,08	2831,41	9,2343	1974,60	2598,20	8,6162
2500	2219,93	2961,93	9,2876	2069,71	2719,30	8,6656
2600	2321,13	3092,81	9,3389	2165,50	2841,07	8,7134
2700	2422,66	3224,03	9,3884	2261,94	2963,49	8,7596
2800	2524,50	3355,54	9,4363	2359,01	3086,55	8,8044
2900	2626,62	3487,34	9,4825	2456,70	3210,22	8,8478
3000	2729,00	3619,41	9,5273	2554,97	3334,48	8,8899

Tabela A.8 (continuação)

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base mássica

T (K)	Dióxido de carbono (CO ₂) R = 0,1889 kJ/kg × K M = 44,010 kg/kmol			Água (H ₂ O) R = 0,4615 kJ/kg × K M = 18,015 kg/kmol		
	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S _T ⁰ (kJ/kg × K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	S _T ⁰ (kJ/kg × K)
200	97,49	135,28	4,5439	276,38	368,69	9,7412
250	126,21	173,44	4,7139	345,98	461,36	10,1547
300	157,70	214,38	4,8631	415,87	554,32	10,4936
350	191,78	257,90	4,9972	486,37	647,90	10,7821
400	228,19	303,76	5,1196	557,79	742,40	11,0345
450	266,69	351,70	5,2325	630,40	838,09	11,2600
500	307,06	401,52	5,3375	704,36	935,12	11,4644
550	349,12	453,03	5,4356	779,79	1033,63	11,6522
600	392,72	506,07	5,5279	856,75	1133,67	11,8263
650	437,71	560,51	5,6151	935,31	1235,30	11,9890
700	483,97	616,22	5,6976	1015,49	1338,56	12,1421
750	531,40	673,09	5,7761	1097,35	1443,49	12,2868
800	579,89	731,02	5,8508	1180,90	1550,13	12,4244
850	629,35	789,93	5,9223	1266,19	1658,49	12,5558
900	678,69	849,72	5,9906	1353,23	1768,60	12,6817
950	730,85	910,33	6,0561	1442,03	1880,48	12,8026
1000	782,75	971,67	6,1190	1532,61	1994,13	12,9192
1100	888,55	1096,36	6,2379	1719,05	2226,73	13,1408
1200	996,64	1223,34	6,3483	1912,42	2466,25	13,3492
1300	1106,68	1352,28	6,4515	2112,47	2712,46	13,5462
1400	1218,38	1482,87	6,5483	2318,89	2965,03	13,7334
1500	1331,50	1614,88	6,6394	2531,28	3223,57	13,9117
1600	1445,85	1748,12	6,7254	2749,24	3487,69	14,0822
1700	1561,26	1882,43	6,8068	2972,35	3756,95	14,2454
1800	1677,61	2017,67	6,8841	3200,17	4030,92	14,4020
1900	1794,78	2153,73	6,9577	3432,28	4309,18	14,5524
2000	1912,67	2290,51	7,0278	3668,24	4591,30	14,6971
2100	2031,21	2427,95	7,0949	3908,08	4877,29	14,8366
2200	2150,34	2565,97	7,1591	4151,28	5166,64	14,9712
2300	2270,00	2704,52	7,2206	4397,56	5459,08	15,1012
2400	2390,14	2843,55	7,2798	4646,71	5754,37	15,2269
2500	2510,74	2983,04	7,3368	4898,49	6052,31	15,3485
2600	2631,73	3122,93	7,3917	5152,73	6352,70	15,4663
2700	2753,10	3263,19	7,4446	5409,24	6655,36	15,5805
2800	2874,81	3403,79	7,4957	5667,86	6960,13	15,6914
2900	2996,84	3544,71	7,5452	5928,44	7266,87	15,7990
3000	3119,18	3685,95	7,5931	6190,86	7575,44	15,9036

Tabela A.9
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Nitrogênio diatômico (N ₂) $\bar{h}_{f,298}^{\circ} = 0$ kJ/kmol $M = 28,013$ kg/kmol		Nitrogênio monatômico (N) $\bar{h}_{f,298}^{\circ} = 472\,680$ kJ/kmol $M = 14,007$ kg/kmol	
	$(\bar{h}-\bar{h}_{f,298}^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}_{f,298}^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K
	0	-8670	0	-6197
100	-5768	159,812	-4119	130,593
200	-2857	179,985	-2040	145,001
298	0	191,609	0	153,300
300	54	191,789	38	153,429
400	2971	200,181	2117	159,409
500	5911	206,740	4196	164,047
600	8894	212,177	6274	167,837
700	11937	216,865	8353	171,041
800	15046	221,016	10431	173,816
900	18223	224,757	12510	176,265
1000	21463	228,171	14589	178,455
1100	24760	231,314	16667	180,436
1200	28109	234,227	18746	182,244
1300	31503	236,943	20825	183,908
1400	34936	239,487	22903	185,448
1500	38405	241,881	24982	186,883
1600	41904	244,139	27060	188,224
1700	45430	246,276	29139	189,484
1800	48979	248,304	31218	190,672
1900	52549	250,234	33296	191,796
2000	56137	252,075	35375	192,863
2200	63362	255,518	39534	194,845
2400	70640	258,684	43695	196,655
2600	77963	261,615	47860	198,322
2800	85323	264,342	52033	199,868
3000	92715	266,892	56218	201,311
3200	100134	269,286	60420	202,667
3400	107577	271,542	64646	203,948
3600	115042	273,675	68902	205,164
3800	122526	275,698	73194	206,325
4000	130027	277,622	77532	207,437
4400	145078	281,209	86367	209,542
4800	160188	284,495	95457	211,519
5200	175352	287,530	104843	213,397
5600	190572	290,349	114550	215,195
6000	205848	292,984	124590	216,926

Tabela A.9 (continuação)
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Oxigênio diatômico (O ₂) $\bar{h}_{f,298}^{\circ} = 0$ kJ/kmol $M = 21,999$ kg/kmol		Oxigênio monatômico (O) $\bar{h}_{f,298}^{\circ} = 249\,170$ kJ/kmol $M = 16,00$ kg/kmol	
	$(\bar{h}-\bar{h}_{f,298}^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}_{f,298}^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K
	0	-8683	0	-6725
100	-5777	173,308	-4518	135,947
200	-2868	193,483	-2186	152,153
298	0	205,148	0	161,059
300	54	205,329	41	161,194
400	3027	213,873	2207	167,431
500	6086	220,693	4343	172,198
600	9245	226,450	6462	176,060
700	12499	231,465	8570	179,310
800	15836	235,920	10671	182,116
900	19241	239,931	12767	184,585
1000	22703	243,579	14860	186,790
1100	26212	246,923	16950	188,783
1200	29761	250,011	19039	190,600
1300	33345	252,878	21126	192,270
1400	36958	255,556	23212	193,816
1500	40600	258,068	25296	195,254
1600	44267	260,434	27381	196,599
1700	47959	262,673	29464	197,862
1800	51674	264,797	31547	199,053
1900	55414	266,819	33630	200,179
2000	59176	268,748	35713	201,247
2200	66770	272,366	39878	203,232
2400	74453	275,708	44045	205,045
2600	82225	278,818	48216	206,714
2800	90080	281,729	52391	208,262
3000	98013	284,466	56574	209,705
3200	106022	287,050	60767	211,058
3400	114101	289,499	64971	212,332
3600	122245	291,826	69190	213,538
3800	130447	294,043	73424	214,682
4000	138705	296,161	77675	215,773
4400	155374	300,133	86234	217,812
4800	172240	303,801	94873	219,891
5200	189312	307,217	103592	221,435
5600	206618	310,423	112391	223,066
6000	224210	313,457	121264	224,597

Tabela A.9 (continuação)
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Dióxido de carbono (CO ₂) $\bar{h}_{f,298}^{\circ} = -393\,522$ kJ/kmol $M = 44,01$ kg/kmol		Monóxido de carbono (CO) $\bar{h}_{f,298}^{\circ} = 110\,527$ kJ/kmol $M = 28,01$ kg/kmol	
	$(\bar{h}-\bar{h}_{f,298}^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}_{f,298}^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K
	0	-9364	0	-8671
100	-6457	179,010	-5772	165,852
200	-3413	199,976	-2860	186,024
298	0	213,794	0	197,651
300	69	214,024	54	197,831
400	4003	225,314	2977	206,240
500	8305	234,902	5932	212,833
600	12906	243,284	8942	218,321
700	17754	250,752	12021	223,067
800	22806	257,496	15174	227,277
900	28030	263,646	18397	231,074
1000	33397	269,299	21686	234,538
1100	38885	274,528	25031	237,726
1200	44473	279,390	28427	240,679
1300	50148	283,931	31867	243,431
1400	55895	288,190	35343	246,006
1500	61705	292,199	38852	248,426
1600	67569	295,984	42388	250,707
1700	73480	299,567	45948	252,866
1800	79432	302,969	49529	254,913
1900	85420	306,207	53128	256,860
2000	91439	309,294	56743	258,716
2200	103562	315,070	64012	262,182
2400	115779	320,384	71326	265,361
2600	128074	325,307	78679	268,302
2800	140435	329,887	86070	271,044
3000	152853	334,170	93504	273,607
3200	165321	338,194	100962	276,012
3400	177836	341,988	108440	278,279
3600	190394	345,576	115938	280,422
3800	202990	348,981	123454	282,454
4000	215624	352,221	130989	284,387
4400	240992	358,266	146108	287,989
4800	266488	363,812	161285	291,290
5200	292112	368,939	176510	294,337
5600	317870	373,711	191782	297,167
6000	343782	378,180	207105	299,809

Tabela A.9 (continuação)
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Água (H ₂ O) $\bar{h}_{f,298}^{\circ} = -241\,826$ kJ/kmol $M = 18,015$ kg/kmol		Hidroxila (OH) $\bar{h}_{f,298}^{\circ} = 38\,987$ kJ/kmol $M = 17,007$ kg/kmol	
	$(\bar{h}-\bar{h}_{f,298}^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K	$(\bar{h}-\bar{h}_{f,298}^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K
	0	-9904	0	-9172
100	-6617	152,386	-6140	149,591
200	-3262	175,468	-2975	171,592
298	0	188,835	0	183,709
300	62	189,043	55	183,894
400	3450	198,787	3034	192,466
500	6922	206,532	5991	199,066
600	10499	213,051	8943	204,448
700	14190	218,739	11902	209,008
800	18002	223,626	14881	212,984
900	21937	228,460	17889	216,526
1000	26000	232,739	20935	219,735
1100	30190	236,732	24024	222,680
1200	34506	240,485	27159	225,408
1300	38941	244,035	30340	227,955
1400	43491	247,406	33567	230,347
1500	48149	250,620	36838	232,604
1600	52907	253,690	40151	234,741
1700	57757	256,631	43502	236,772
1800	62693	259,452	46890	238,707
1900	67706	262,162	50311	240,556
2000	72788	264,769	53763	242,328
2200	83153	269,706	60751	245,659
2400	93741	274,312	67840	248,743
2600	104520	278,625	75018	251,614
2800	115463	282,680	82268	254,301
3000	126548	286,504	89585	256,825
3200	137756	290,120	96960	259,205
3400	149073	293,550	104388	261,456
3600	160484	296,812	111864	263,592
3800	171981	299,919	119382	265,625
4000	183552	302,887	126940	267,563
4400	206892	308,448	142165	271,191
4800	230456	313,573	157522	274,531
5200	254216	318,328	173002	277,629
5600	278161	322,764	188598	280,518
6000	302295	326,926	204309	283,227

Tabela A.9 (continuação)

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 x MPa) base molar

T (K)	Hidrogênio (H ₂)		Hidrogênio monoatômico (H)	
	$\bar{h}_f^{\circ} = 0$ kJ/kmol	$M = 2,016$ kg/kmol	$\bar{h}_f^{\circ} = 217\,999$ kJ/kmol	$M = 1,008$ kg/kmol
	$(\bar{h} - \bar{h}_f^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_f^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K
0	-8467	0	-6197	0
100	-5467	100,727	-4119	92,009
200	-2774	119,410	-2040	106,417
298	0	130,678	0	114,716
300	53	130,856	38	114,845
400	2961	139,219	2117	120,825
500	5883	145,738	4196	125,463
600	8799	151,078	6274	129,253
700	11730	155,609	8353	132,457
800	14681	159,554	10431	135,233
900	17657	163,060	12510	137,681
1000	20663	166,225	14589	139,871
1100	23704	169,121	16667	141,852
1200	26785	171,798	18746	143,661
1300	29907	174,294	20825	145,324
1400	33073	176,637	22903	146,865
1500	36281	178,849	24982	148,299
1600	39533	180,946	27060	149,640
1700	42826	182,941	29139	150,900
1800	46160	184,846	31218	152,089
1900	49532	186,670	33296	153,212
2000	52942	188,419	35375	154,279
2200	59665	191,719	39632	156,260
2400	66915	194,789	43689	158,069
2600	74082	197,659	47847	159,732
2800	81355	200,355	52004	161,273
3000	88725	202,898	56161	162,707
3200	96187	205,306	60318	164,048
3400	103736	207,593	64475	165,308
3600	111367	209,773	68633	166,497
3800	119077	211,856	72790	167,620
4000	126864	213,851	76947	168,687
4400	142658	217,612	85261	170,668
4800	158730	221,109	93576	172,476
5200	175057	224,379	101890	174,140
5600	191607	227,447	110205	175,681
6000	208332	230,322	118519	177,114

Tabela A.9 (continuação)

Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 x MPa) base molar

T (K)	Óxido nítrico (NO)		Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	
	$\bar{h}_f^{\circ} = 90\,291$ kJ/kmol	$M = 30,006$ kg/kmol	$\bar{h}_f^{\circ} = 33\,100$ kJ/kmol	$M = 46,005$ kg/kmol
	$(\bar{h} - \bar{h}_f^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_f^{\circ})$ kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K
0	-9192	0	-10186	0
100	-6073	177,031	-6861	202,563
200	-2951	198,747	-3495	225,852
298	0	210,759	0	240,034
300	55	210,943	68	240,263
400	3040	219,529	3927	251,342
500	6059	226,263	8099	260,638
600	9144	231,886	12555	268,755
700	12308	236,762	17250	275,988
800	15548	241,088	22138	282,513
900	18858	244,985	27180	288,450
1000	22229	248,536	32344	293,889
1100	25653	251,799	37606	298,904
1200	29120	254,816	42946	303,551
1300	32626	257,621	48351	307,876
1400	36164	260,243	53808	311,920
1500	39729	262,703	59309	315,715
1600	43319	265,019	64846	319,289
1700	46929	267,208	70414	322,664
1800	50557	269,282	76008	325,861
1900	54201	271,252	81624	328,898
2000	57859	273,128	87259	331,788
2200	65212	276,632	98578	337,182
2400	72606	279,849	109948	342,128
2600	80034	282,822	121358	346,695
2800	87491	285,585	132800	350,934
3000	94973	288,165	144267	354,890
3200	102477	290,587	155756	358,597
3400	110000	292,867	167262	362,085
3600	117541	295,022	178783	365,378
3800	125099	297,065	190316	368,495
4000	132671	299,007	201860	371,456
4400	147857	302,626	224973	376,963
4800	163094	305,940	248114	381,997
5200	178377	308,998	271276	386,632
5600	193703	311,838	294455	390,926
6000	209070	314,488	317648	394,926

Tabela A.10

Entalpia de formação e entropia absoluta de várias substâncias a 25 °C e 100 kPa

Substância	Fórmula	M	Estado	\bar{h}_f° kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol K
Acetileno	C ₂ H ₂	26,038	gás	+226 731	200,958
Água	H ₂ O	18,015	gás	-241 826	188,834
Água	H ₂ O	18,015	líquido	-285 830	69,950
Amônia	NH ₃	17,031	gás	-45 720	192,572
Benzeno	C ₆ H ₆	78,114	gás	+82 980	269,562
n-Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	gás	-126 200	306,647
Carbono (grafita)	C	12,011	sólido	0	5,740
Dióxido de carbono	CO ₂	44,010	gás	-393 522	213,795
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,059	gás	-296 842	248,212
Enxofre	S	32,06	sólido	0	32,066
Etileno	C ₂ H ₄	30,070	gás	-84 740	229,597
Etilanol	C ₂ H ₅ OH	46,069	gás	-235 000	282,444
Etilanol	C ₂ H ₅ OH	46,069	líquido	-277 380	160,554
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	gás	+52 467	219,330
Heptano	C ₇ H ₁₆	100,205	gás	-187 900	427,805
Hexano	C ₆ H ₁₄	86,178	gás	-167 300	387,979
Metano	CH ₄	16,043	gás	-74 873	186,251
Metanol	CH ₃ OH	32,042	gás	-201 300	239,709
Metanol	CH ₃ OH	32,042	líquido	-239 220	126,809
Monóxido de carbono	CO	28,011	gás	-110 527	197,653
Nitrometano	CH ₃ NO ₂	61,04	líquido	-113 100	171,80
n-Octano	C ₈ H ₁₈	114,232	gás	-208 600	466,514
n-Octano	C ₈ H ₁₈	114,232	líquido	-250 105	360,575
Óxido de Nitrogênio	N ₂ O	44,013	gás	+82 050	219,957
Ozônio	O ₃	47,998	gás	+142 674	238,932
Pentano	C ₅ H ₁₂	72,151	gás	-146 500	348,945
Peróxido de hidrogênio	H ₂ O ₂	34,015	gás	-136 106	232,991
Propano	C ₃ H ₈	44,094	gás	-103 900	269,917
Propeno	C ₃ H ₆	42,081	gás	+20 430	267,066
Trióxido de enxofre	SO ₃	80,059	gás	-395 765	256,769
T-T-Diesel	C ₁₄ H ₃₀	198,06	líquido	-174 000	525,90

Tabela A.11

Logaritmos na base e da constante de equilíbrio K

Para a reação $\nu_A A + \nu_B B \rightleftharpoons \nu_C C + \nu_D D$, a constante de equilíbrio K é definida por: $K = \frac{y_C^{\nu_C} y_D^{\nu_D}}{y_A^{\nu_A} y_B^{\nu_B}} \frac{P^{-\nu_C-\nu_D-\nu_A-\nu_B}}{P^{\nu}}$, $f^0 = 0,1 \text{ MPa}$

Temp K	$\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}$	$\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{O}$	$\text{N}_2 \rightleftharpoons 2\text{N}$	$2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	$2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + 2\text{OH}$	$2\text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + \text{O}_2$	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$	$\text{N}_2 + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$
298	-164,003	-186,963	-367,528	-184,420	-212,075	-207,529	-69,868	-41,355
500	-92,830	-105,623	-213,405	-105,385	-120,331	-115,234	-40,449	-30,725
1000	-39,810	-45,146	-99,146	-46,321	-51,951	-47,052	-18,709	-23,039
1200	-30,878	-35,003	-80,025	-36,363	-40,467	-36,736	-15,082	-21,752
1400	-24,467	-27,741	-66,345	-29,222	-32,244	-27,679	-12,491	-20,826
1600	-19,638	-22,282	-56,069	-23,849	-26,067	-21,656	-10,547	-20,126
1800	-15,868	-18,028	-48,066	-19,658	-21,258	-16,987	-9,035	-19,577
2000	-12,841	-14,619	-41,655	-16,299	-17,406	-13,266	-7,825	-19,136
2200	-10,356	-11,826	-36,404	-13,546	-14,253	-10,232	-6,836	-18,773
2400	-8,280	-9,495	-32,023	-11,249	-11,625	-7,715	-6,012	-18,470
2600	-6,519	-7,520	-28,313	-9,303	-9,402	-5,594	-5,316	-18,214
2800	-5,005	-5,826	-25,129	-7,633	-7,496	-3,781	-4,720	-17,994
3000	-3,690	-4,356	-22,367	-6,184	-5,845	-2,217	-4,205	-17,805
3200	-2,538	-3,069	-19,947	-4,916	-4,401	-0,853	-3,755	-17,640
3400	-1,519	-1,932	-17,810	-3,795	-3,128	0,346	-3,369	-17,496
3600	-0,611	-0,922	-15,909	-2,799	-1,996	1,408	-3,008	-17,369
3800	0,201	-0,017	-14,205	-1,906	-0,984	2,355	-2,694	-17,257
4000	0,934	0,799	-12,671	-1,101	-0,074	3,204	-2,413	-17,157
4500	2,483	2,520	-8,423	0,602	1,847	4,985	-1,824	-16,953
5000	3,724	3,898	-6,816	1,972	3,383	6,397	-1,368	-16,797
5500	4,739	5,027	-4,672	3,088	4,639	7,542	-0,980	-16,678
6000	5,587	5,969	-2,876	4,040	5,684	8,488	-0,671	-16,588

Fonte: Consistente com JANAF Thermochemical Tables, 3. ed., Thermal Group, Dow Chemical U.S.A., Mid., MI, 1985.

Apêndice B

Equação de Estado

Tabela D.1

Equações de estado

Modelo	c	d	b ₀	a ₀
Gás Ideal	0	0	0	0
Van der Waals	0	0	1/8	27/64
Redlich-Kwong	1	0	0,08664	0,42748 (T _r) ^{-1/2}
Soave	1	0	0,08664	0,42748 [1 + f(1 - T _r ^{1/2})] ²
Peng-Robinson	2	-1	0,0778	0,45724 [1 + f(1 - T _r ^{1/2})] ²

Tabela D.3

Fatores de compressibilidade na saturação líquido-vapor (fluido simples de Lee-Kesler)

T _r	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,85	0,90	0,95	1
P _r ^{sat}	2,7E-4	4,6E-3	0,028	0,099	0,252	0,373	0,532	0,737	1
Z _r	6,5E-5	9,5E-4	0,0052	0,017	0,042	0,062	0,090	0,132	0,29
Z _v	0,999	0,988	0,957	0,897	0,807	0,747	0,673	0,569	0,29

Tabela D.4

Fatores acêntricos de algumas substâncias

Substância		ω	Substância		ω
Água	H ₂ O	0,344	Hélio	He	-0,365
Amônia	NH ₃	0,25	Metano	CH ₄	0,011
Argônio	Ar	0,001	Neônio	Ne	-0,029
Bromo	Br ₂	0,108	Nitrogênio	N ₂	0,039
n-Butano	C ₄ H ₁₀	0,199	R-32	CF ₂ H ₂	0,277
Etano	C ₂ H ₆	0,099	R-125	CHF ₂ CF ₃	0,305

Tabela D.2

Equação de estado de Lee-Kesler

A equação generalizada de estado de Lee-Kesler é:

$$Z = \frac{P_r v_r}{T_r} = 1 + \frac{B}{v_r} + \frac{C}{v_r^2} + \frac{D}{v_r^5} + \frac{c_4}{T_r^3 v_r^2} \beta + \frac{\gamma}{v_r^2} \exp \left(-\frac{\gamma}{v_r^2} \right)$$

$$B = b_1 - \frac{b_2}{T_r} - \frac{b_3}{T_r^2} - \frac{b_4}{T_r^8}$$

$$C = c_1 - \frac{c_2}{T_r} + \frac{c_3}{T_r^3}$$

$$D = d_1 + \frac{d_2}{T_r}$$

em que:

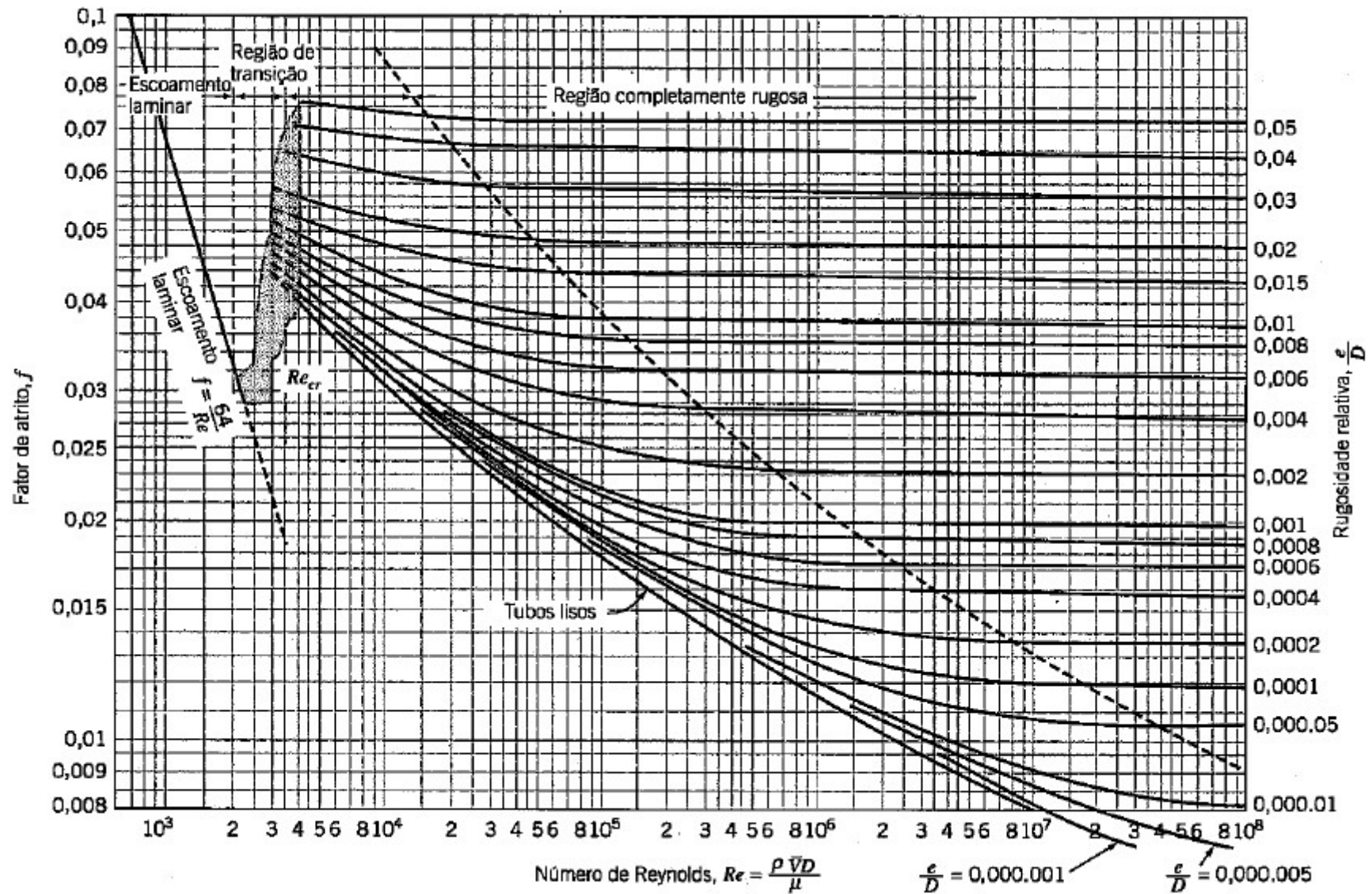
$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad P_r = \frac{P}{P_c} \quad v_r = \frac{v}{RT_c/P_c}$$

Os valores das constantes são os seguintes:

Constante	Fluido simples	Constante	Fluido simples
b ₁	0,1181193	c ₃	0,0
b ₂	0,265728	c ₄	0,042724
b ₃	0,154790	d ₁ × 10 ⁴	0,155488
b ₄	0,030323	d ₂ × 10 ⁴	0,623689
c ₁	0,0236744	β	0,65392
c ₂	0,0186984	γ	0,060167

Apêndice C

Diagrama de Moody



Perguntas?

Contato:



<http://lattes.cnpq.br/9510794972870727>



[@carloscatunda](#)



carlos.catunda@cefet-rj.br

