

8 - DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÃO

O princípio para o projeto de condutos é a escolha da velocidade adequada. A velocidade de operação é dada por:

$$V = \frac{\dot{V}}{A}$$

\dot{V} = vazão volumétrica;

A = área de seção transversal do conduto.

Seleção da Velocidade Mínima

Se a corrente gasosa contém partículas em suspensão, o conduto deve ser projetado para manter as partículas em suspensão, ou seja, a velocidade deve ser suficientemente alta para prevenir a queda das partículas maiores. Uma expressão empírica recomendada para estimar a velocidade mínima, usada para condições de T e P ambientes, é:

$$V = 15.700 \left(\frac{\rho_R}{\rho_R + 1} \right) \sqrt{d_p}$$

ρ_R = densidade relativa da partícula;

d_p = diâmetro da partícula maior (pol);

V = velocidade (ft/min).

A tabela a seguir também pode ser utilizada para determinação da velocidade mínima. Sabendo-se a vazão gasosa proveniente da fonte de emissão, e com a velocidade estimada pela Tabela 1 ou pela expressão acima, a área da seção do conduto pode ser determinada.

Os valores da velocidade, geralmente, estão entre 10 e 20 m/s. Abaixo de 10 m/s podem ocorrer entupimentos na tubulação provocados pela deposição do material particulado. Acima de 20 m/s podem ocorrer ruído e vibração excessivos na tubulação.

Tabela 1 - Velocidade mínima recomendada.

Contaminante	Exemplo	V (ft/min)
Vapores, gases, fumaça, fumos, pó muito leve	COV's, gases ácidos	2.000 (10 m/s)
Pós secos de média densidade	Fibras, madeira, grãos, borracha, plásticos, areia	3.000 - 4.000 (15 - 20 m/s)
Pós secos de alta densidade	Metais, pós de fundição	5.000 (25 m/s)
Pós úmidos de alta densidade	Metais, pós de fundição	> 5.000 (> 25 m/s)

Perda de Carga

Um método rápido para cálculo da perda de carga em conduto faz uso da Figura 1, que exhibe uma relação entre a queda de pressão por unidade de comprimento do conduto, a vazão gasosa e o diâmetro do conduto metálico de seção circular. Nesta figura adotou-se uma rugosidade, ϵ , de 0,00012 m (0,12 mm).

Condutos Retangulares

O método com o uso da Figura 1 é limitado a condutos de seção circular. Para condutos de seção retangular o procedimento adotado é a obtenção do diâmetro equivalente de um conduto circular com mesma queda de pressão por unidade de comprimento e mesma vazão do conduto retangular de dimensões a e b ($a > b$).

Para um conduto circular podemos escrever:

$$\frac{\Delta P_c}{L} = \frac{f_c \rho V^2}{2D_c} \quad \text{e} \quad V = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi D_c^2}{4}}$$

Assim:

$$\frac{\Delta P_c}{L} = \frac{8f_c \rho \dot{V}^2}{\pi^2 D_c^5}$$

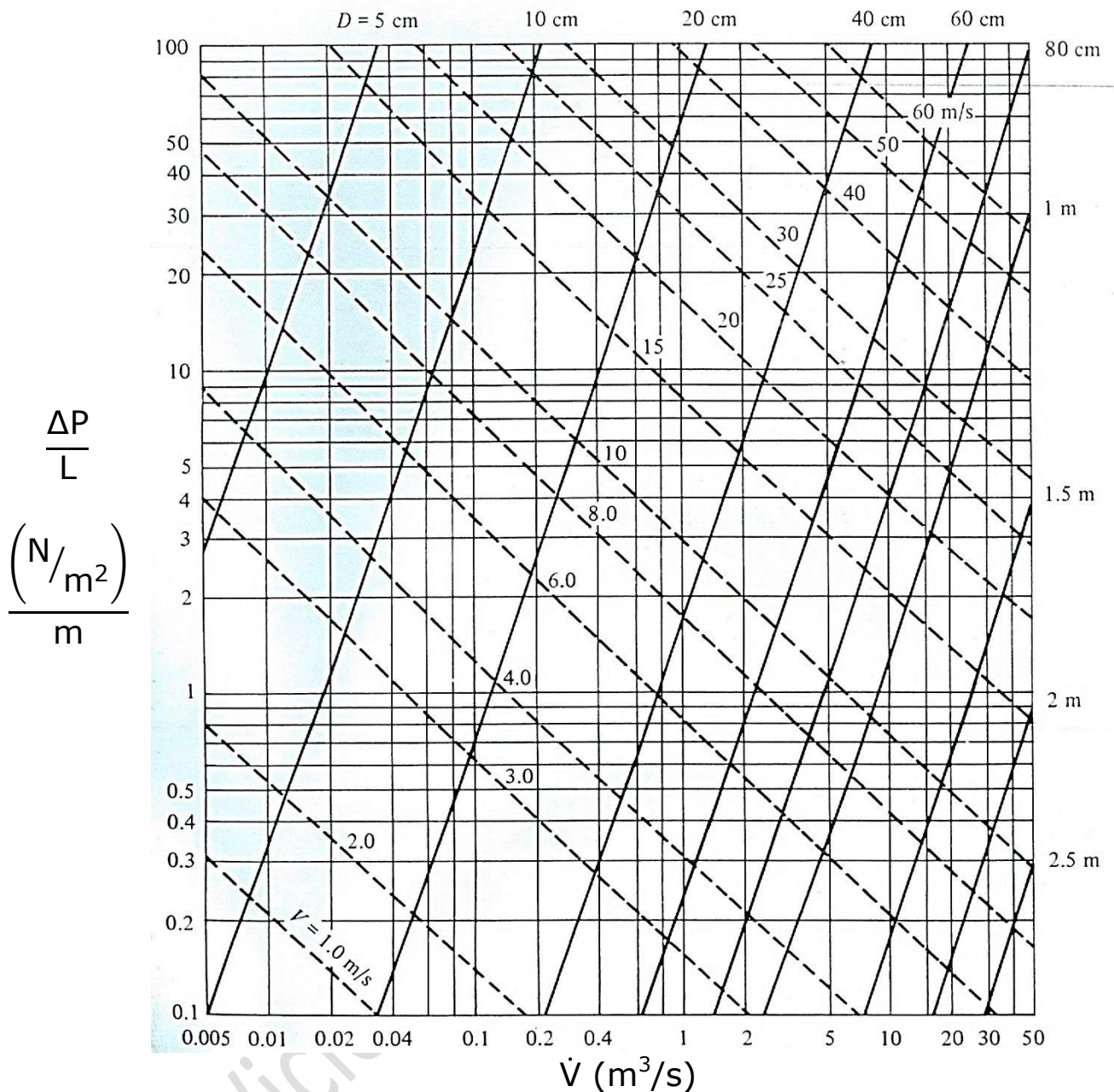


Figura 1 - Queda de pressão e velocidade em condutos circulares de metal ($T = 298 \text{ K}$; $P = 1 \text{ atm}$; rugosidade = $0,00012 \text{ m}$). Adaptado de Crawford, Martin. Air Pollution Control Theory, 1976.

Para um conduto retangular podemos adotar o diâmetro hidráulico (D_H):

$$D_H = \frac{4A}{P} = \frac{4(\text{Área da seção})}{\text{Perímetro molhado}}$$

$$\frac{\Delta P_r}{L} = \frac{f_r \rho V^2}{2D_H} \quad \text{e} \quad v = \frac{\dot{V}}{ab}$$

$$\frac{\Delta P_r}{L} = \frac{f_r \rho \left(\frac{\dot{V}}{ab}\right)^2}{2 \left(\frac{4ab}{2a+2b}\right)} = \frac{f_r \rho (a+b) \dot{V}^2}{4(ab)^3}$$

Para $\Delta P_c = \Delta P_r$ e mesma vazão:

$$\frac{8f_c \rho \dot{V}^2}{\pi^2 D_c^5} = \frac{f_r \rho (a+b) \dot{V}^2}{4(ab)^3} \quad \rightarrow \quad \frac{8f_c}{\pi^2 D_c^5} = \frac{f_r (a+b)}{4(ab)^3}$$

$$D_c = 1,265 \left[\left(\frac{f_c}{f_r} \right) \frac{(ab)^3}{(a+b)} \right]^{\frac{1}{5}} \quad \text{Se } f_c = f_r \rightarrow D_c = 1,265 \left[\frac{(ab)^3}{(a+b)} \right]^{\frac{1}{5}}$$

A partir da equação acima, pode-se converter um conduto retangular em um conduto circular. O uso do diâmetro hidráulico é uma aproximação válida para formas "próximas" a um círculo. Para a avaliação desta aproximação, podemos nos basear na relação D_H/D , sendo D o diâmetro de um círculo de mesma área, assim:

$$\frac{D_H}{D} = \frac{4A}{PD} = \frac{4A}{P \sqrt{\frac{4A}{\pi}}} = \frac{\sqrt{\pi} \sqrt{4A}}{P} = 3,54 \frac{\sqrt{A}}{P}$$

Em geral, o diâmetro hidráulico pode ser usado para $D_H/D > 0,5$.

Configuração	D_H/D
Círculo	1,00
Quadrado	0,88
2:1 retângulo	0,84
4:1 retângulo	0,71
10:1 retângulo	0,51

O fator de atrito para regime turbulento ($Re > 4.000$) em tubos lisos ($\epsilon/D < 0,00001$) pode ser aproximado por:

$$f = 0,0056 + 0,5(\text{Re})^{-0,32}$$

Queda de Pressão em Acessórios

Em acessórios ou acidentes a queda de pressão pode ser calculada:

$$\Delta P = \frac{K_L \rho V^2}{2}$$

K_L = coeficiente de perda de carga.

Acessório	K_L
Te	2,0
Cotovelo 90°	0,9
Cotovelo 60°	0,6
Cotovelo 45°	0,45
Entrada em conduto	
30°	0,2
45°	0,3

Para uma redução: $K_L = 0,4 \left(1 - \frac{A_S}{A_E}\right)$

Para uma expansão: $K_L = \left(1 - \frac{A_E}{A_S}\right)^2$

A_E = área da seção de entrada;

A_S = área da seção de saída.

Alta Pressão e Comportamento Não-Ideal de um Gás

Para considerarmos os desvios da idealidade de um gás em alta pressão, introduzimos um fator de correção na lei dos gases ideais: o fator de compressibilidade (Z).

$$PV = ZnRT$$

Para cálculo da densidade do gás, temos:

$$\rho = \frac{PM_A}{ZRT} \quad \rightarrow \quad M_A = \text{massa molar do gás}$$

O fator de compressibilidade pode ser encontrado em figuras e tabelas, em função da temperatura e pressão críticas das substâncias.

Tabela 6.1: Fatores de Compressibilidade Z para o Isobutano

P/bar	340 K	350 K	360 K	370 K	380 K
0,1	0,99700	0,99719	0,99737	0,99753	0,99767
0,5	0,98745	0,98830	0,98907	0,98977	0,99040
2	0,95895	0,96206	0,96483	0,96730	0,96953
4	0,92422	0,93069	0,93635	0,94132	0,94574
6	0,88742	0,89816	0,90734	0,91529	0,92223
8	0,84575	0,86218	0,87586	0,88745	0,89743
10	0,79659	0,82117	0,84077	0,85695	0,87061
12	.....	0,77310	0,80103	0,82315	0,84134
14	.....	.....	0,75506	0,78531	0,80923
15,41	.....	.....	0,71727		

Adaptado de: Smith, J.M. Van Ness, H.C. Abbott, M.M. Introdução à Termodinâmica, 2000.

Se a pressão é relativamente baixa ($P < 2 \text{ atm}$), podemos usar:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1}$$

P_1, T_1 são as condições padrão ($25 \text{ }^\circ\text{C}, 1 \text{ atm}$)

Ex. - Ar a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e 1 atm escoam no interior de um conduto de 40 cm de diâmetro com vazão de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Estime a velocidade do escoamento e a queda de pressão para 100 m de conduto.

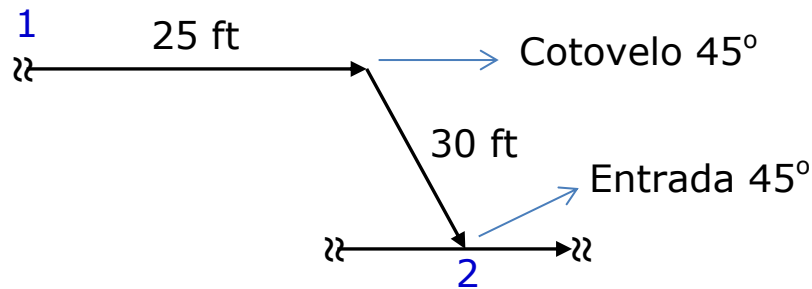
Da figura 1:

$$D = 40 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta P}{L} = 1,8 \text{ (N/m}^2\text{)/m}$$

$$\dot{V} = 1,0 \text{ m}^3/\text{s} \quad \rightarrow \quad V = 8 \text{ m/s}$$

Para 100 m de conduto: $\Delta P = 180 \text{ N/m}^2$

Ex. - Calcule a queda de pressão entre os pontos 1 e 2 da tubulação. O conduto tem seção circular e a vazão de ar (25 °C, 1 atm) é de 12.000 ft³/min. $\rho_{Ar} = 1,185 \text{ kg/m}^3$.



Adotar: $V = 10 \text{ m/s}$.

$$\dot{V} = 12.000 \left(\frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \left(\frac{1 \text{ m}}{3,28 \text{ ft}} \right)^3 = 5,67 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$A = \dot{V}/V = 5,67/10 = 0,567 \text{ m}^2 \rightarrow D = 0,85 \text{ m}$$

$$L = 55 \text{ ft} = 16,8 \text{ m}$$

$$\text{Da Figura 1} \rightarrow \Delta P/L \approx 1,0 \text{ (N/m}^2\text{)/m}$$

$$\text{Cotovelo } 45^\circ \rightarrow K_L = 0,45$$

$$\text{Entrada } 45^\circ \rightarrow K_L = 0,30$$

$$\Delta P_{1-2} = 16,8 \times 1,0 + (1,185 \times 10^2 / 2)(0,45 + 0,30) =$$

$$\Delta P_{1-2} = 16,8 + 44,4 = 61,2 \text{ N/m}^2$$