6. PERDAS DE CARGA

1. DEFINIÇÃO

VAMOS APLICAR A EQUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO DA ENERGIA NA FORMA INTEGRAL, EQ. (3.25), SOBRE O VOLUME DE CONTROLE AO LONGO DA TUBULAÇÃO MOSTRADA NA FIGURA 1.

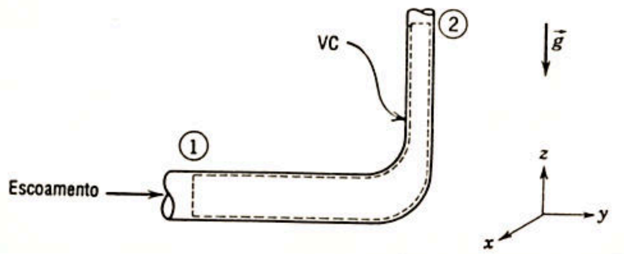


FIGURA 1.

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{VC}\left(u+\frac{V^2}{2}+gz\right)\rho\, dV + \int_{SC}\left(u+\frac{V^2}{2}+gz+\frac{p}{\rho}\right)\rho\,\vec{V}\cdot\hat{n}\, dA = \dot{Q} + \dot{W} \qquad (1)$$

PRETENDEMOS APLICAR ESTA EQUAÇÃO A FLUIDOS REAIS. APESAR DISSO, VAMOS FAZER ALGUMAS HIPÓTESES SIMPLIFICATIVAS:

1- ESCOAMENTO EM REGIME PERMANENTE
2- FLUIDO INCOMPRESSÍVEL
3- SEM POTÊNCIAS
4- ENERGIA INTERNA (u) E PRESSÃO UNIFORMES NAS SEÇÕES 1 E 2
5- g CONSTANTE

COM ESTAS HIPÓTESES E LEMBRANDO QUE $\int_A \rho\,\vec{V}\cdot\hat{n}\, dA = \dot{M}$ OBTEMOS

$$\dot{M}(u_2-u_1) + \dot{M}g(z_2-z_1) + \dot{M}\left(\frac{p_2}{\rho}-\frac{p_1}{\rho}\right) + \int_{SC}\frac{V^2}{2}\rho\,\vec{V}\cdot\hat{n}\, dA = \dot{Q} \qquad (2)$$

SABEMOS QUE EM ESCOAMENTOS REAIS OS PERFIS DE VELOCIDADES NÃO SÃO UNIFORMES. PARA CONSIDERAR ISSO, USAREMOS O COEFICIENTE DE ENERGIA CINÉTICA (α) DEFINIDO POR

$$\int_A \frac{V^2}{2} \rho \vec{V} \cdot \hat{n}\, dA = \alpha \frac{\bar{V}^2}{2} \int_A \rho \vec{V} \cdot \hat{n}\, dA = \alpha \frac{\bar{V}^2}{2} \dot{M} \qquad (3)$$

COM A EQ. (3) NA EQ. (2) TEMOS

$$\dot{M}(u_2 - u_1) + \dot{M} g (z_2 - z_1) + \dot{M}\left(\frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho}\right) + \dot{M}\left(\alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} - \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2}\right) = \dot{Q}$$

DIVIDINDO ESTA EQUAÇÃO POR $\dot{M}$ E REARRANJANDO OS TERMOS OBTÉM-SE

$$\underbrace{\left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + g z_1\right)}_{\mathrm{I}} = \underbrace{\left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + g z_2\right)}_{\mathrm{II}} + \underbrace{(u_2 - u_1)}_{\mathrm{III}} - \underbrace{\frac{\dot{Q}}{\dot{M}}}_{\mathrm{IV}} \qquad (4)$$

O SIGNIFICADO DA EQ. (4) É: A ENERGIA MECÂNICA NA SEÇÃO 1 (TERMO I) É IGUAL À ENERGIA MECÂNICA NA SEÇÃO 2 (TERMO II) MAIS A ENERGIA TÉRMICA GERADA ENTRE AS SEÇÕES 1 E 2 (TERMO III) E O CALOR TRANSFERIDO (TERMO IV).

OS TERMOS III E IV SE ORIGINAM DA PERDA DE ENERGIA MECÂNICA ENTRE AS SEÇÕES 1 E 2.

PORTANTO,

PERDA DE CARGA É A ENERGIA MECÂNICA PERDIDA PELO FLUIDO AO ESCOAR EM UMA TUBULAÇÃO DEVIDO AO ATRITO ENTRE SUAS PARTÍCULAS.

TODA A ENERGIA MECÂNICA PERDIDA É TRANSFORMADA EM ENERGIA TÉRMICA.

A EQ. (4) PODE, ENTÃO, SER REESCRITA COMO

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + g z_1\right) = \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + g z_2\right) + h_T \qquad (5)$$

ONDE

h_T = PERDA DE CARGA TOTAL (m^2/s^2)

A PERDA DE CARGA TOTAL, NORMALMENTE, É DIVIDIDA EM PERDA DE CARGA CONTÍNUA (h_C) E PERDA DE CARGA LOCAL (h_ℓ), OU SEJA

$$h_T = h_c + h_\ell \qquad (6)$$

2. PERDA DE CARGA CONTÍNUA

A PERDA DE CARGA QUE UM FLUIDO SOFRE NO ESCOAMENTO COMPLETAMENTE DESENVOLVIDO NUM DUTO DE SEÇÃO CONSTANTE É CHAMADA DE PERDA DE CARGA CONTÍNUA. ELA É AVALIADA POR MEIO DE

$$h_C = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \qquad (7)$$

ONDE

f = FATOR DE ATRITO DE DARCY (ADIMENSIONAL)

L = COMPRIMENTO DO DUTO (m)

D = DIÂMETRO DO DUTO (m)

$\bar{V}$ = VELOCIDADE MÉDIA DO ESCOAMENTO (m/s)

VERIFICOU-SE EXPERIMENTALMENTE QUE O FATOR DE ATRITO É FUNÇÃO SÓ DO NÚMERO DE REYNOLDS (Re) NO CASO DE ESCOAMENTOS LAMINARES. JÁ PARA ESCOAMENTOS TURBULENTOS, O FATOR DE ATRITO É FUNÇÃO DO Re E DA RUGOSIDADE RELATIVA (e/D) DO DUTO.

O PARÂMETRO "e" REPRESENTA A ALTURA DA RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES DOS DUTOS. ALGUNS EXEMPLOS:

- CONCRETO: $e \cong 0{,}30$ A $3{,}0$ mm
- FERRO FUNDIDO: $e \cong 0{,}26$ mm
- AÇO: $e \cong 0{,}046$ mm

VAMOS CONSIDERAR UM PROBLEMA EM QUE O PERFIL DE VELOCIDADES É COMPLETAMENTE DESENVOLVIDO NA ENTRADA DE UM DUTO (SEÇÃO 1) E EM SUA SAÍDA (SEÇÃO 2). O DUTO TEM COMPRIMENTO L E DIÂMETRO D E $Z_1 = Z_2$. APLICANDO-SE A EQ. (5) A ESTE PROBLEMA TEM-SE

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + h_c \qquad \text{OU} \qquad h_c = \frac{(p_1 - p_2)}{\rho} \tag{8}$$

ASSIM COMO OBTIVEMOS PARA ESCOAMENTO LAMINAR COMPLETAMENTE DESENVOLVIDO ENTRE PLACAS PLANAS E PARALELAS A EQ. (4.58), PODEMOS OBTER PARA UM DUTO CIRCULAR A RELAÇÃO

$$\bar{V} = -\frac{R^2}{8\mu}\left(\frac{dp}{dx}\right) = -\frac{D^2}{32\mu}\left(\frac{dp}{dx}\right) \Longrightarrow \frac{dp}{dx} = -\frac{32\mu\bar{V}}{D^2} \tag{9}$$

DA EQ. (9) VERIFICA-SE QUE A VARIAÇÃO DA PRESSÃO (dp/dx) NO ESCOAMENTO PLENAMENTE DESENVOLVIDO É LINEAR. INTEGRANDO-SE A EQ. (9) ENTRE AS SEÇÕES 1 E 2 DO PROBLEMA DA EQ. (8) TEMOS

$$\frac{p_2 - p_1}{L} = -\frac{32\mu\bar{V}}{D^2} \quad \text{OU} \quad (p_1 - p_2) = \frac{32\mu L\bar{V}}{D^2} \tag{10}$$

SUBSTITUINDO A EQ. (10) EM (8),

$$h_c = \frac{32\,\nu L\bar{V}}{D^2} \tag{11}$$

TRABALHANDO ALGEBRICAMENTE A EQ. (11) PARA COLOCÁ-LA NA FORMA DA EQ. (7) CHEGAMOS A

$$h_c = 32\,\frac{\nu}{D}\,\frac{L}{D}\,\bar{V} \times \frac{2\bar{V}}{2\bar{V}} = 64\left(\frac{\nu}{\bar{V}D}\right)\frac{L}{D}\,\frac{\bar{V}^2}{2} = \frac{64}{Re_D}\,\frac{L}{D}\,\frac{\bar{V}^2}{2}$$

COMPARANDO ESTE RESULTADO COM A EQ. (7) VERIFICAMOS QUE

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad \text{(ESCOAMENTO LAMINAR)} \tag{12}$$

O FATOR DE ATRITO PARA ESCOAMENTOS TURBULENTOS DE FLUIDOS INCOMPRESSÍVEIS É OBTIDO ATRAVÉS DO DIAGRAMA DE MOODY (1944) MOSTRADO NA FIGURA 2. ESTE DIAGRAMA FOI MONTADO COMPILANDO-SE DADOS EXPERIMENTAIS DE DIVERSAS FONTES. A INCERTEZA NESTES DADOS É DE ±10%.

O DIAGRAMA DE MOODY PODE SER DIVIDIDO EM 4 REGIÕES:

1- ESCOAMENTO LAMINAR ATÉ $Re_D \cong 2000 \rightarrow f(Re_D)$; LINEAR

2- ZONA CRÍTICA ENTRE $Re_D \cong 2000$ E 4000; f VARIÁVEL
ESCOAMENTO PULSANTE E TRANSIENTE, ORA LAMINAR ORA TURBULENTO

$$\left.\begin{array}{l}\text{3- ZONA DE TRANSIÇÃO: } f\left(Re_D, \frac{e}{D}\right) \\ \text{4- ZONA DE TUBOS RUGOSOS: } f\left(\frac{e}{D}\right)\text{; CONSTANTE COM } Re_D\end{array}\right\} \text{ESCOAMENTO TURBULENTO}$$

O FATOR DE ATRITO PARA ESCOAMENTOS TURBULENTOS TAMBÉM PODE SER OBTIDO DA EQUAÇÃO DE MILLER (1983):

$$f = 0{,}25\left[\log\left(\frac{e/D}{3{,}7} + \frac{5{,}74}{Re_D^{0{,}9}}\right)\right]^{-2} \quad \text{(ESCOAMENTO TURBULENTO)} \qquad (13)$$

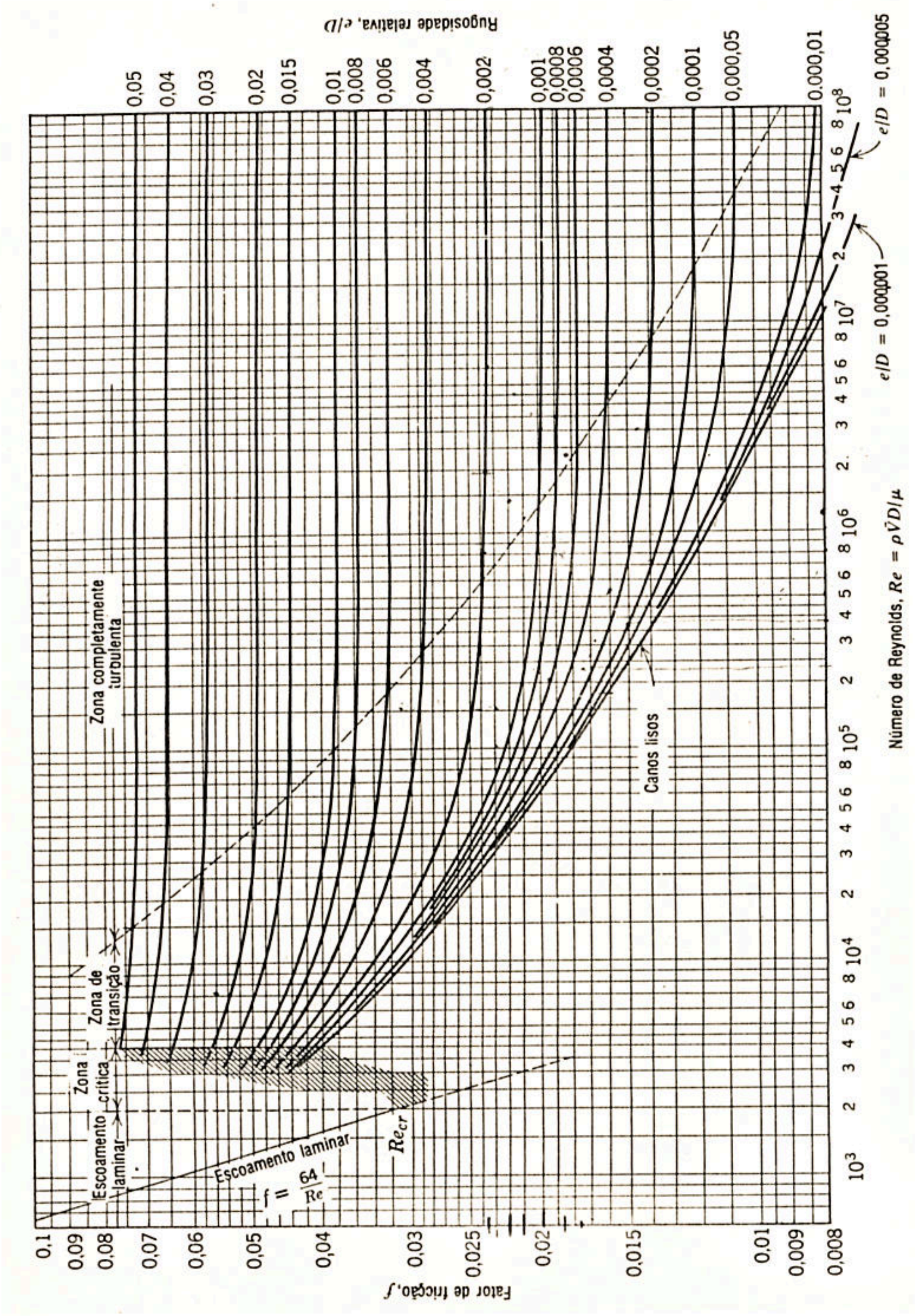
É IMPORTANTE NOTAR QUE PARA ESCOAMENTO LAMINAR A PERDA DE CARGA É PROPORCIONAL À VELOCIDADE, EQ. (11). JÁ PARA ESCOAMENTO TURBULENTO, A PERDA DE CARGA É PROPORCIONAL AO QUADRADO DA VELOCIDADE QUANDO f É CONSTANTE, EQ. (7).

EXEMPLO: FLUIDO = ÁGUA $\qquad D = 0{,}1\,m$

$\nu = 10^{-6}\,m^2/s \qquad L = 10\,m$

$\rho = 10^3\,kg/m^3 \qquad e/D = 0{,}015$ (FERRO FUNDIDO)

$$Re_D = \frac{\bar{V} D}{\nu} \quad \text{OU} \quad \bar{V} = \frac{Re_D\,\nu}{D} \qquad (14)$$



Rugosidade relativa, e/D
0,05
0,04
0,03
0,02
0,015
0,01
0,008
0,006
0,004
0,002
0,001
0,0008
0,0006
0,0004
0,0002
0,0001
0,000,05
0,000,01
Zona completamente turbulenta
Zona de transição
Zona crítica
Escoamento laminar
Escoamento laminar
f = 64/Re
Re_cr
Canos lisos
e/D = 0,000001
e/D = 0,000005
Fator de fricção, f
0,1
0,09
0,08
0,07
0,06
0,05
0,04
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,009
0,008
Número de Reynolds, Re = ρV̄D/μ

FIGURA 2.

Re_D	$\bar{V}$ (m/s)	f	h_C (m^2/s^2)	Δp (Pa)	
10^2	0,001	0,64	$3,2 \times 10^{-5}$	0,032	LAMINAR
10^3	0,01	0,064	$3,2 \times 10^{-4}$	0,32	
10^4	0,1	0,049	0,024	24	TURBULENTO
10^5	1,0	0,044	2,2	$2,2 \times 10^3$	
10^6	10,0	0,044	220,0	$2,2 \times 10^5$	

NA TABELA ACIMA, h_c FOI CALCULADO COM A EQ. (7) E Δp COM A EQ. (8).

DEVE-SE OBSERVAR QUE NO CASO DO ESCOAMENTO DE UM FLUIDO IDEAL NO INTERIOR DE UM DUTO DE SEÇÃO CONSTANTE, $V = \bar{V}$ E $\alpha = 1$. E, COMO $\mu = 0$, NÃO EXISTE PERDA DE CARGA, OU SEJA, $h_T = 0$. PORTANTO, DA EQ. (5) CHEGA-SE A

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{\bar{V}_1^2}{2} + g z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{\bar{V}_2^2}{2} + g z_2 \qquad (15)$$

QUE É A EQUAÇÃO DE BERNOULLI. É IMPORTANTE NOTAR QUE A EQ. (15) FOI OBTIDA A PARTIR DA EQUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO DA ENERGIA E A EQ. (4.29) FOI OBTIDA DA EQUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO LINEAR. CONTUDO, PARA SE CHEGAR À EQ. (15), ALÉM DAS CINCO HIPÓTESES SIMPLIFICATIVAS USADADAS NA OBTENÇÃO DA EQ. (4.29), TEVE-SE QUE CONSIDERAR ESCOAMENTO ADIABÁTICO ($\dot{Q} = 0$) E ISOTÉRMICO ($u_2 = u_1$).

OUTRO PONTO A DESTACAR É O SEGUINTE: VAMOS CONSIDERAR UM DUTO DE SEÇÃO TRANSVERSAL CONSTANTE EM QUE O PERFIL DE VELOCIDADES NA ENTRADA É UNIFORME ($\alpha_1 = 1$) E, NA SAÍDA, QUALQUER, CONFORME MOSTRADO NA FIGURA 3. ALÉM DISSO Z=CONSTANTE.

COMO $\bar{V}_1 = \bar{V}_2 = \bar{V}$, A EQ. (5) PARA ESTE CASO RESULTA EM

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{\bar{V}^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}^2}{2} + h_T$$

OU

$$(p_1 - p_2) = (\alpha_2 - 1)\rho \frac{\bar{V}^2}{2} + \rho h_T \qquad (16)$$

ONDE

h_T CONTEMPLA A PERDA DE CARGA DEVIDO A ENTRADA DO ESCOAMENTO NO DUTO MAIS O COMPRIMENTO DE ENTRADA.

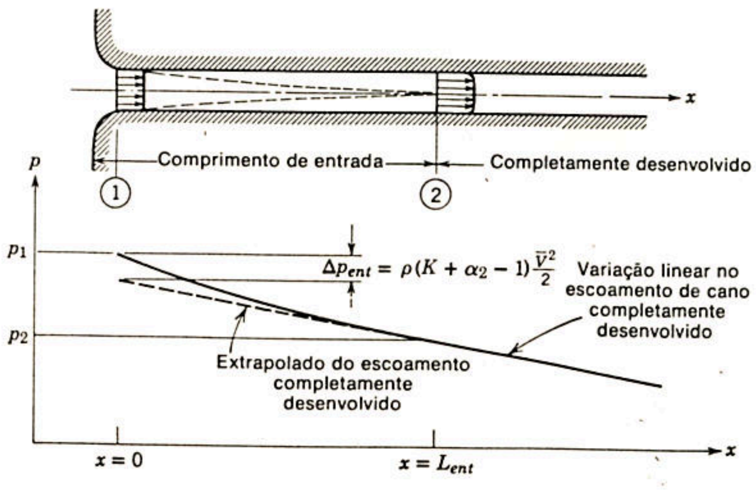


FIGURA 3.

O COEFICIENTE DE ENERGIA CINÉTICA (α) É DADO A SEGUIR PARA ALGUNS CASOS (EM DUTOS CIRCULARES):

- ESCOAMENTO COM PERFIL UNIFORME: $\alpha = 1$
- ESCOAMENTO LAMINAR PLENAMENTE DESENVOLVIDO: $\alpha = 2$
- ESCOAMENTO EM DESENVOLVIMENTO: $\alpha > 1$
- ESCOAMENTO TURBULENTO PLENAMENTE DESENVOLVIDO:

$$\alpha = \frac{\left[(n+1)(2n+1)\right]^3}{4n^4(3+n)(3+2n)} \qquad (17)$$

ONDE "n" É FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS CONFORME VISTO NO CAPÍTULO 5. EXEMPLOS: $n=6 \rightarrow \alpha = 1,08$ E $n=10 \rightarrow \alpha = 1,03$.

DEVE-SE NOTAR QUE QUALQUER QUE SEJA O PERFIL DE VELOCIDADES, EXCETO O UNIFORME, $\alpha > 1$. ASSIM, COM A EQ (16) CONCLUI-SE: O DESENVOLVIMENTO DE UM PERFIL DE VELOCIDADES RESULTA NA QUEDA DA PRESSÃO DO ESCOAMENTO.