

Perda de carga

Manuel F. Barral

1. Escoamentos em Dutos Sob-Pressão

O transporte de fluídos é feito através de condutos projetados para esta finalidade.

Esses condutos podem ser:

- abertos para a atmosfera recebendo o nome de canais e destinados principalmente ao transporte de água.
- condutos fechados onde a pressão é maior que a atmosférica, sendo assim denominados duetos sob pressão.

Os escoamentos em dutos sob pressão são característicos nos escoamentos provocados por bombas hidráulicas.

1.1. Perda de Carga

O escoamento interno em tubulações sofre forte influência das paredes, dissipando energia devido ao atrito.

As partículas em contato com a parede adquirem a velocidade da parede, ou seja, velocidade nula, e passam a influir nas partículas vizinhas através da viscosidade e da turbulência, dissipando energia.

Essa dissipação de energia provoca um abaixamento da pressão total do fluido ao longo do escoamento que é denominada de Perda de Carga.

A perda de carga pode ser distribuída ou localizada, dependendo do motivo que a causa:

- Perda de Carga Distribuída
- Perda de Carga Localizada

1.1. Perda de Carga

- **Perda de Carga Distribuída**: a parede dos dutos retilíneos causa uma perda de pressão distribuída ao longo do comprimento do tubo, fazendo com que a pressão total vá diminuindo gradativamente ao longo do comprimento e por isso é denominada de **Perda de Carga Distribuída**.
- **Perda de Carga Localizada**: este tipo de perda de carga é causado pelos acessórios de canalização, isto é, as diversas peças necessárias para a montagem da tubulação e para o controle do fluxo do escoamento, que provocam variação brusca da velocidade, em módulo ou direção, intensificando a perda de energia nos pontos onde estão localizadas, sendo por isso conhecidas como **Perdas de Carga Localizadas**. O escoamento sofre perturbações bruscas em pontos da instalação tais como em válvulas, curvas, reduções, etc.

1.2. Perda de Carga Distribuída

A perda de carga distribuída ocorre ao longo dos trechos retos de tubulação devido ao atrito.

Esta perda de carga depende do diâmetro D e do comprimento L do tubo; da rugosidade ϵ da parede; das propriedades do fluido, da massa específica ρ , da viscosidade μ e da velocidade V do escoamento.

A rugosidade da parede depende do material de fabricação do tubo bem como do seu estado de conservação. De maneira geral um tubo usado apresenta uma rugosidade maior que um tubo novo.

A tabela a seguir apresenta valores da rugosidade para alguns tipos de tubos mais comuns, incluindo a condição de uso para alguns tipos.



1.2. Perda de Carga Distribuída

Material	Rugosidade absoluta ϵ (mm)	
Aço comercial novo	0,045	
Aço laminado novo	0,04 a	0,1
Aço soldado novo	0,05 a	0,1
Aço soldado limpo, usado	0,15	0,2
Aço soldado moderadamente oxidado	0,4	
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,1	
Aço laminado revestido de asfalto	0,05	
Aço rebitado novo	1 a	3
Aço rebitado em uso	6	
Aço galvanizado, com costura	0,15	
Aço galvanizado, sem costura	0,06	
Ferro forjado	0,05	
Ferro fundido novo	0,25 a	0,5
Ferro fundido com leve oxidação	0,3	
Ferro fundido velho	3 a	5
Ferro fundido centrifugado	0,05	
Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,1	
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,12	
Ferro fundido oxidado	1 a	1,5
Cimento amianto novo	0,025	
Concreto centrifugado novo	0,16	
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,2 a	0,3
Concreto com acabamento normal	1 a	3
Concreto protendido Freyssinet	0,04	
Cobre, latão, aço revestido de epoxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,0015	

1.2. Perda de Carga Distribuída

Dentre as propriedades do fluido, a viscosidade é a mais importante na dissipação de energia. Além de ser proporcional à perda de carga, sua relação com as forças de inércia do escoamento fornece um número adimensional, o número de Reynolds, Re , que é o parâmetro que indica o regime do escoamento.

Para tubulações de seção circular, o número de Reynolds é calculado conforme a equação abaixo, e é admitido o valor 2100 como o limite de transição entre o escoamento laminar e o turbulento.

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot D}{\mu}$$

A viscosidade da água varia com a pressão e temperatura, mas na prática, para água fria, é usado o valor referente à temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, que vale:

$$\mu_{20} = 1,00 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (\text{viscosidade dinâmica})$$

$$\mu_{20} = 1,00 \quad \text{cp} \quad (\text{viscosidade dinâmica})$$

$$\nu_{20} = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}. \quad (\text{viscosidade cinemática})$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

1.2.1. Método de cálculo da Perda de Carga Distribuída

Além do apoio teórico, várias experiências foram efetuadas para o desenvolvimento de fórmulas que expressem satisfatoriamente os valores da perda de carga distribuída, destacando-se entre outros, os trabalhos de Moody-Rouse, Hazen-Williams e Darcy-Weisbach.

As perdas de carga em geral são expressas pela fórmula:

$$h_l = \frac{\Delta P}{\gamma} = k \frac{\bar{v}^2}{2g}$$

h_l perda de carga [m];

k coeficiente de perda de carga, [adimensional]

v velocidade média do escoamento no duto, [m/s];

g aceleração da gravidade [m/s²].

A-MÉTODO DE MOODY-ROUSE

O ábaco de Moody-Rouse é um dos mais utilizados para o cálculo de perda de carga distribuída. Entra-se com o valor de e/D (rugosidade relativa) e o número de Reynolds (Re), obtendo-se o valor de f (coeficiente de atrito).

A fórmula de perda de carga para aplicação do ábaco de Moody-Rouse é:

$$h_l = \frac{\Delta P}{\gamma} = f \frac{L}{D} \frac{\bar{v}^2}{2g}$$

h_l : perda de carga; f : coeficiente de atrito;

L : comprimento da tubulação; D : diâmetro da tubulação;

v : velocidade; g : aceleração da gravidade

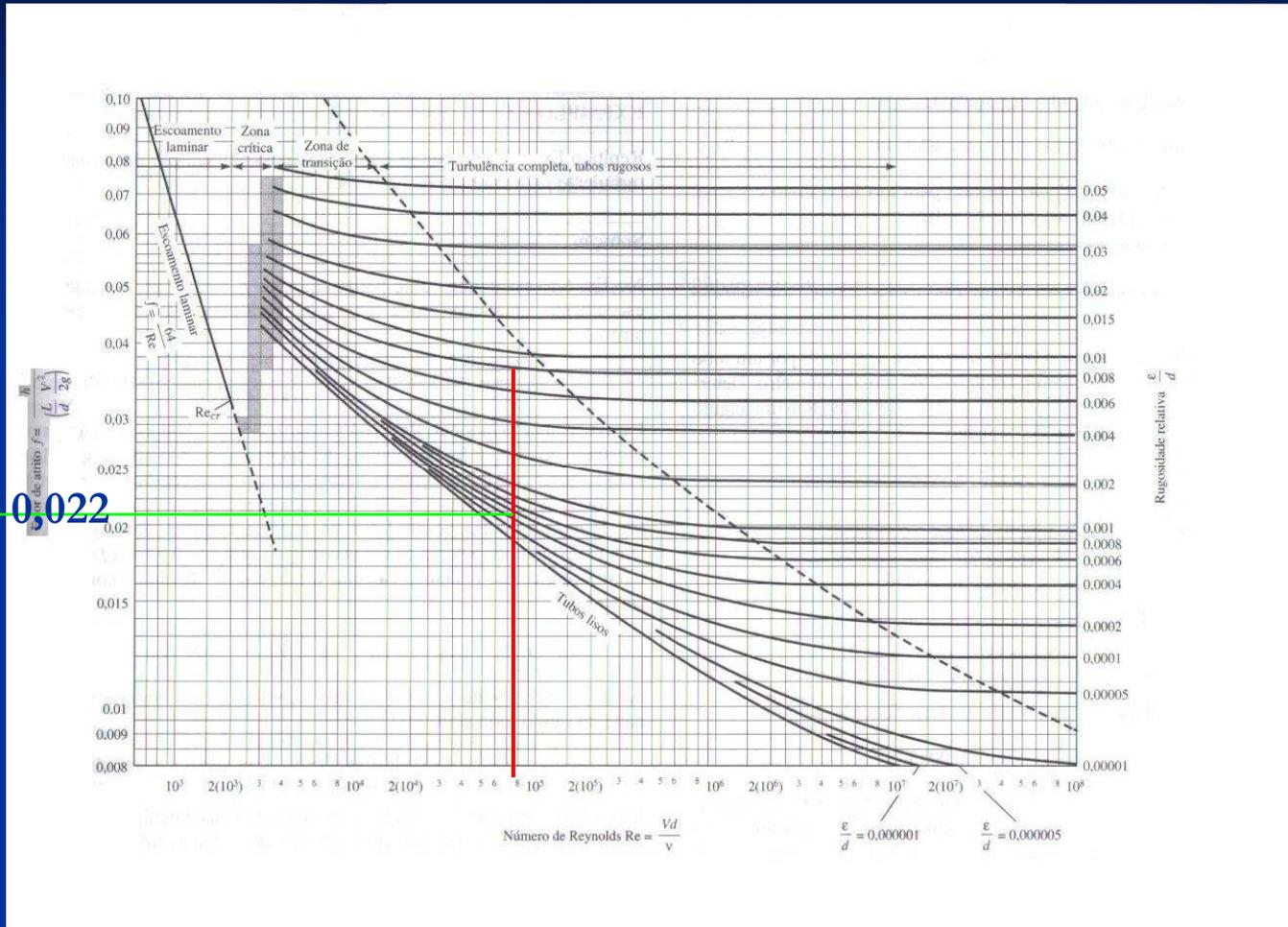
A rugosidade relativa é expressa pelo quociente entre o diâmetro da tubulação e a rugosidade absoluta (e/D).

O coeficiente de atrito f deve ser calculado corretamente para se estimar com precisão a perda de carga. Ele, por sua vez, depende da velocidade do escoamento, diâmetro, massa específica, viscosidade e rugosidade do duto.

Rugosidade dos tubos (valores de ϵ em metros)

Material	Tubos novos	Tubos velhos ⁽²⁾
aço galvanizado	0,00015 a 0,00020	0,0046
aço rebitado	0,0010 a 0,0030	0,0060
aço revestido	0,0004	0,0005 a 0,0012
aço soldado	0,00004 a 0,00006	0,0024
chumbo	lisos	lisos
cimento-amianto	0,000025	
cobre ou latão	lisos	lisos
concreto bem acabado	0,0003 a 0,0010	
concreto ordinário	0,0010 a 0,0020	
ferro forjado	0,00004 a 0,00006	0,0024
ferro fundido	0,00025 a 0,00050	0,0030 a 0,0050
ferro fundido com revestimento asfáltico	0,00012	0,0021
madeira em aduelas	0,0002 a 0,0010	
manilhas cerâmicas	0,0006	0,0030
vidro	lisos ⁽³⁾	lisos ⁽³⁾
plásticos	lisos ⁽¹⁾	lisos ⁽¹⁾

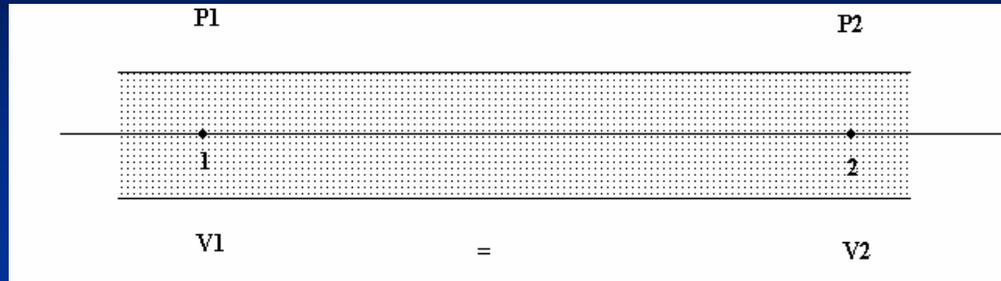
Perda de carga-fator de atrito (Diagrama de Moody)



Apresenta regiões características:

- região laminar ($Re < 2100$);
- região de transição ($2100 < Re < 4000$);
- região turbulenta ($Re > 4000$)

Perda de carga



$$F_k = c_f * A_{S_cilindro} * \rho \frac{V^2}{2}$$

$$F_k = (P_1 - P_2) * A_{Trans}$$

=>

$$(P_2 - P_1) * A_{Trans} = c_f * A_{S_cilindro} * \rho \frac{V^2}{2}$$

$$(P_1 - P_2) = c_f * \frac{A_{S_cilindro}}{A_{Trans}} * \rho \frac{V^2}{2}$$

$$(P_1 - P_2) = c_f * \frac{2\pi L * R}{\pi R^2} * \rho \frac{V^2}{2} = c_f * \frac{2L}{R} * \rho \frac{V^2}{2} = c_f * \frac{2L}{D} * \rho \frac{V^2}{2} = 4.c_f * \frac{L}{D} * \rho \frac{V^2}{2}$$

$$h_l = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} = \frac{4.c_f * \frac{L}{D} * \rho \frac{V^2}{2}}{\gamma} = 4.c_f * \frac{L}{D} * \rho \frac{V^2}{2} \frac{1}{\rho g}$$

$$h_l = 4.c_f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{g}$$

c_f => Fator de Fanny

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

f => Fator de atrito de Moody

Perda de carga-fator de atrito

Exemplo

Exemplo:1.3. Uma vazão de $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ de água a $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ocorre em um duto de ferro fundido de 10 cm de diâmetro. Determine o fator de atrito usando o diagrama de Moody e calcule a perda de carga estimada para essa condição. $L = 30 \text{ m}$

B-MÉTODO DE HAZEN-WILLIAMS

É o método mais empregado no transporte de água e esgoto em canalizações diversas com diâmetro maior que 50 mm. Sua forma é:

$$h_f = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} = L \cdot \frac{10,641 Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}}$$

C : coeficiente que depende da natureza do material empregado na fabricação dos tubos e das condições de suas paredes internas

Q : vazão, m³/s

D: diâmetro, m

L : comprimento da tubulação, m

O coeficiente experimental denotado por C, assume valores entre 70 e 140 crescendo à medida que o tubo fica mais liso.

B-MÉTODO DE HAZEN-WILLIAMS

Na tabela abaixo são apresentados os valores do coeficiente C para os tubos mais usados atualmente.

Tipo de Tubo	C
Aço soldado com 30 anos de uso	75
Aço soldado com 20 anos de uso	90
Ferro fundido, usado.	90
Ferro fundido, com 15 anos de uso	100
Aço galvanizado, usado.	100
Aço galvanizado com costura.	125
Aço galvanizado sem costura, novo.	130
Cobre e latão.	130
Plástico PVC, até 75mm	125
Plástico PVC, até 100mm	135
Plástico PVC, mais de 100mm	140

C-Método de Darcy-Weisbachou Fórmula Universal

Muitas vezes é mais prático aplicar esta equação quando é conhecida a vazão, e não a velocidade. Para isto basta substituir a velocidade pela expressão vazão dividida pela área. Essa operação resulta na expressão abaixo, onde o valor 0,0826 substitui a relação entre as diversas constantes envolvidas. Como são equações determinadas teoricamente elas são dimensionalmente homogêneas, e o coeficiente de perda de carga C_f é um parâmetro adimensional.

$$h_l = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} = C_f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = C_f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{Q^2}{\pi^2 D^4} \frac{1}{2g} = \frac{8}{\pi^2} \cdot C_f \frac{L \cdot Q^2}{D^5} \cdot \frac{1}{g}$$

$$h_l = 0,0826 C_f \frac{L \cdot Q^2}{D^5}$$

C-Método de Darcy-Weisbachou Fórmula Universal

$$h_l = 0,0826C_f \frac{L.Q^2}{D^5}$$

Para o cálculo de C_f tem-se a fórmula de Swamee Jain, que alia grande simplicidade e é uma ótima aproximação nos regimes de escoamento normalmente encontrados nas instalações de Máquinas Hidráulicas.

$$C_f = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

E2. Uma vazão de $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ de água a $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ocorre em um duto de ferro fundido de 10 cm de diâmetro e com 30 m de comprimento. Determine a perda de carga estimada para essa condição.

1.3. Perda de Carga Localizada

A perda localizada ocorre sempre que um acessório é inserido na tubulação, seja para promover a junção de dois tubos, ou para mudar a direção do escoamento, ou ainda para controlar a vazão.

A ocorrência da perda de carga é considerada concentrada no ponto provocando uma queda acentuada da pressão no curto espaço compreendido pelo acessório.

A seguir serão vistos métodos de cálculo da perda de carga localizada.

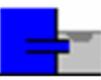
1.3.1-Método do Coeficiente de Perda em Função da Carga Cinética

O acessório tem sua perda de carga localizada calculada através do produto de um coeficiente característico pela carga cinética que o atravessa.

Cada tipo de acessório tem um coeficiente de perda de carga característico, normalmente indicado pela letra K.

A perda causada pelo acessório, em m.c.a, é calculada pela expressão:

$$h_l = \frac{\Delta P}{\gamma} = K \frac{\bar{v}^2}{2g}$$

Entradas				K	Tês		K
normal					0,5	passagem direta	0,6
							
						passagem lateral	1,3
							
com borda					0,8	passagem bilateral	1,8
							
convergente						Registros	
					0,03	de gaveta, aberto	0,2
Saidas							
livre					1	de globo, aberto	10
							
afogada					0,9	de ângulo, aberto	5
							
Curvas							
raio longo		0,25	a		0,4		
raio longo, 45°					0,2		
Cotovelos		0,9	a		1,5		
Cotovelos 45°					0,4		

Coefficiente K para Acessórios de Tubulação Escolhidos

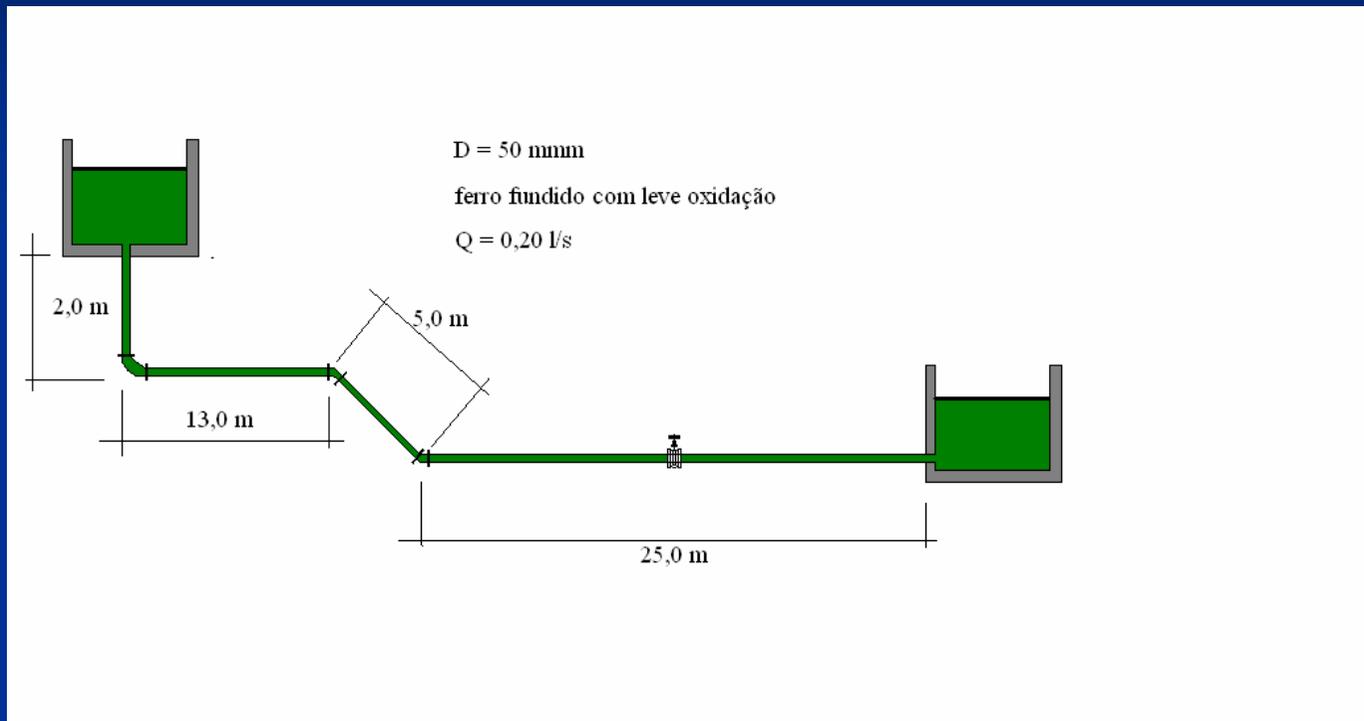
Descrição	Esquema	K
ENTRADAS de condutos		
Normal		0,5
de Borda		0,78 a 1,0
convergente		0,1
SAIDAS de condutos		
Livre		1
Afogada		0,9
Curvas		
raio longo		0,25 a 0,40
raio longo, 45°		0,20
cotovelo		0,9 a 1,5
cotovelo, 45°		0,40
Tês		
passagem direta		0,60
passagem lateral		1,30
passagem bilateral		1,80
Registros		
de Gaveta, aberto		0,20
de Globo, aberto		10,0
de Angulo, aberto		5,0
Diversos		
alargamento gradual		0,30
luvas		0,10
junção		0,40
bucha de redução		0,15
crivo		0,75
Válvula de retenção		2,50
Válvula de pé		1,75

1.3.1-Método do Coeficiente de Perda em Função da Carga Cinética

A perda de carga total do sistema é dada pela somatória das perdas de carga dos acessórios mais a perda distribuída do tubo, resultando na expressão abaixo, na qual a carga cinética foi colocada em evidência.

$$h_l = \frac{\Delta P}{\gamma} = \left(f \cdot \frac{L}{D} + \sum K_i \right) \frac{\bar{v}^2}{2g}$$

E3. Calcular a perda de carga na instalação indicada na figura.



1.3.2-Método do Comprimento Equivalente

É definido como um comprimento de tubulação, l_{eq} , que causa a mesma perda de carga que o acessório. Os comprimentos equivalentes dos acessórios presentes na tubulação são "adicionados" ao comprimento físico da tubulação fornecendo um comprimento equivalente, L_{eq} .

Matematicamente o comprimento equivalente pode ser calculado pela expressão:

$$L_{eq} = \frac{\Delta P}{\gamma} = L + \sum l_{eq}$$

Este comprimento equivalente permite tratar o sistema de transporte de líquido como se fosse um único conduto retilíneo. Nessa condição a perda de carga total do sistema pode ser avaliada pelas equações:

$$h_l = \frac{\Delta P}{\gamma} = f \frac{L}{D} \frac{\bar{v}^2}{2g}$$

$$h_l = \frac{\Delta P}{\gamma} = f 0,0826 \frac{LQ^2}{D^5}$$

onde o comprimento L é substituído pelo comprimento equivalente L_{eq} .

1.3.2-Método do Comprimento Equivalente

O comprimento equivalente de cada tipo de acessório pode ser determinado experimentalmente e o valor obtido é válido somente para o tubo usado no ensaio.

Para uso em tubos diferentes os valores devem ser corrigidos em função das características do novo tubo.

Existem também tabelas de fácil utilização onde são constados os comprimentos equivalentes dos principais componentes de um sistema hidráulico.

1.3.2-Método do Comprimento Equivalente

Comprimentos equivalentes para peças metálicas , ferro galvanizado e ferro fundido.

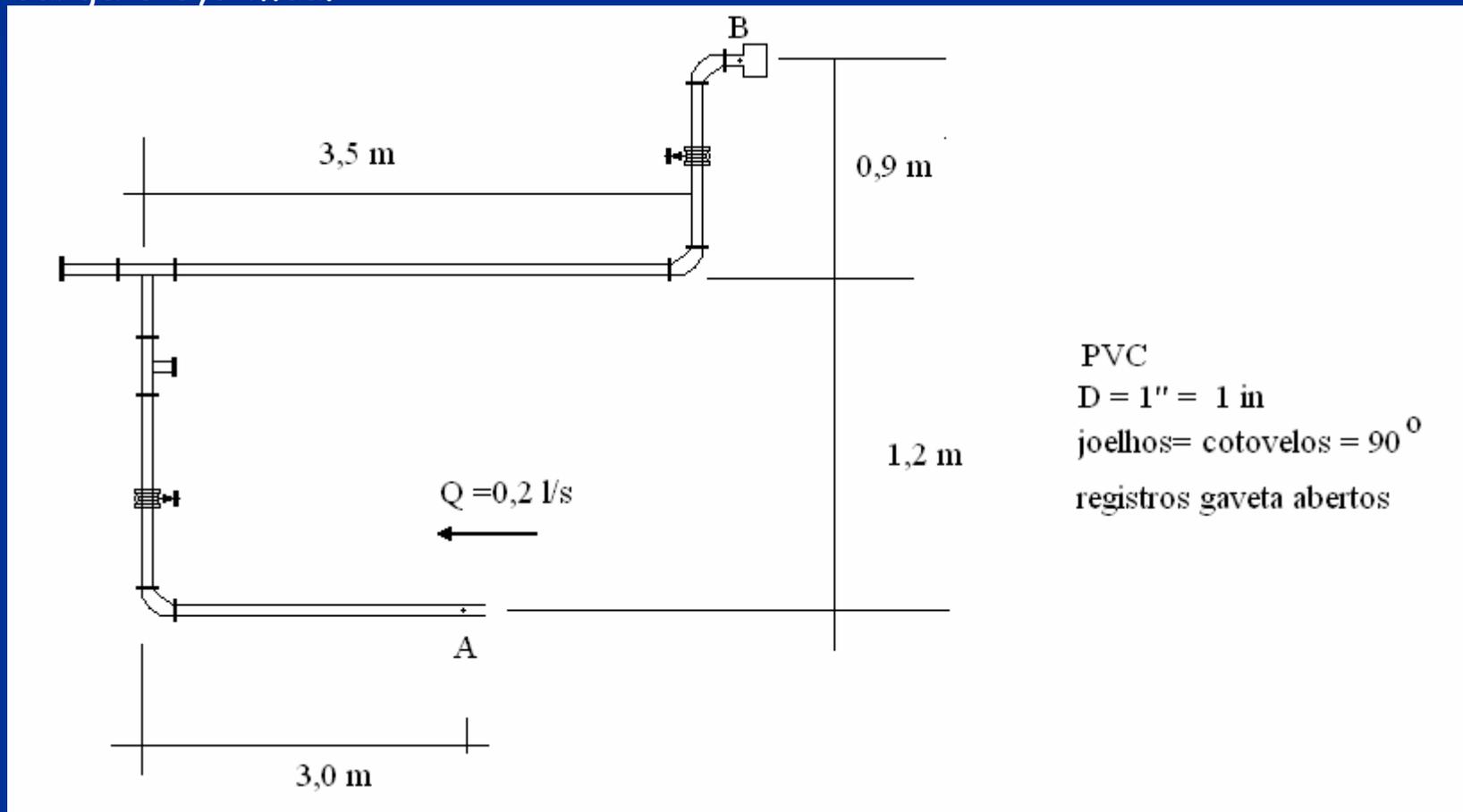
	Le/D		Le/D
Cotovelo 90 o raio longo	22	Registro gaveta aberto	7
Cotovelo 90 o raio médio	28,5	Registro globo aberto	342
Cotovelo 90 o raio curto	34	Registro de angulo aberto	171,5
Cotovelo 45 o	15,4	Tê passagem direta	21,8
Curva 90 o R/D =1,5	12,8	Tê saída lateral	69
Curva 90o R/D=1	17,5	Tê saída bilateral	69
Curva 45 o	7,8	Válvula de pé com crivo	265
Entrada normal	14,7	Válvula de retenção	83,6
Entrada com borda	30,2		
Saída afogada	30,2		

1.3.2-Método do Comprimento Equivalente

Comprimentos equivalentes para peças de PVC rígido ou cobre

Diametro (externo) (mm)	Diametro nominal	Joelho 90 o	Joelho 45 o	Curva 90 o	Curva 45 o	Tê 90 o direto	Tê 90 o lateral	Entrada normal	Entra da de borda	Saída afogad a	Válvula de pé com crivo	Válvul a de retençã o	Registro gaveta aberto	Registro globo aberto
25	3/4	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4	0,4	1,0	0,9	9,5	2,7	0,2	11,4
32	1	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1	0,5	1,2	1,3	13,3	3,8	0,3	15,0
40	1 1/4	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6	0,6	1,8	1,5	15,5	4,9	0,4	22,0
50	1 1/2	3,2	1,3	1,2	0,6	2,2	7,3	1,0	2,3	3,2	18,3	6,8	0,7	35,8
60	2	3,4	1,5	1,3	0,7	2,3	7,6	1,5	2,8	3,3	23,7	7,1	0,8	37,9
75	2 1/2	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8	1,6	3,3	3,5	25,0	8,2	0,9	38,0
85	3	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0	2,0	3,7	3,7	26,8	9,3	0,9	40,0
110	4	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3	2,2	4,0	3,9	28,6	10,4	1,0	42,3
140	5	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0	2,5	5,0	4,9	37,4	12,5	1,1	50,9
160	6	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1	2,8	5,6	5,5	43,4	13,9	1,2	56,7

Exemplo 4. Na instalação hidráulica indicada na figura escoar água a uma vazão de $0,20 \text{ l/s}$. No ponto A a carga de pressão é $3,3 \text{ mH}_2\text{O}$. Determinar a carga e a pressão disponíveis imediatamente antes do chuveiro. A tubulação é de PVC rígido soldável de $1''$ de diâmetro nominal, os cotovelos são de 90° e os registros são do tipo gaveta abertos e os tês estão fechados em uma das saídas. No ponto A a carga é $3,3 \text{ mca}$.



pi	3,141592654				
g	9,81				
			Le/D		Leq
	3 joelhos		1,5	4,5	4,5
	2 registro gaveta		0,3	0,6	0,6
	1 Tê (direto)		0,9	0,9	0,9
	1 Tê (p lateral)		3,1	3,1	3,1
	L	8,6 m			
	ltotal	17,7		leq	9,1
Q	0,5	0,0005 m3/s	A	0,000515 m2	
v	0,97 m/s				
mi	1,00E-03				
ro	998				
re	3,10E+04		liso		
f	0,027				
	$h_l = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{g}$		0,72		
h1A	3,3 m				
h2	2,58 m				
DP	25276,10632 Pa				