Hidráulica Aplicada

Anotações de Aula

Disciplina: HIDRÁULICA APLICADA

ESCOAMENTO PERMANENTE DE FLUÍDOS REAIS INCOMPRESSÍVEIS EM CONDUTOS FORÇADOS

O conduto é dito forçado quando o fluído que nele escoa o preenche totalmente, estando o fluído em contato com toda a sua parede interna, não apresentando nenhuma superfície livre no conduto.

RUGOSIDADE

Os condutos apresentam rugosidade ou aspereza nas paredes internas.
A rugosidade (ou aspereza), pode ser determinada através de um aparelho chamado rugosimetro, que mede a altura média das asperezas da parede interna dos tubos.

A rugosidade relativa é a relação entre a rugosidade absoluta " e " e o diâmetro " D " da tubulação.

$$rr = \frac{e}{D}$$; Onde: rr= Rugosidade relativa ;
e= Rugosidade absoluta (m);
D= Diâmetro do tubo (m).

Condutos Lisos e Rugosos

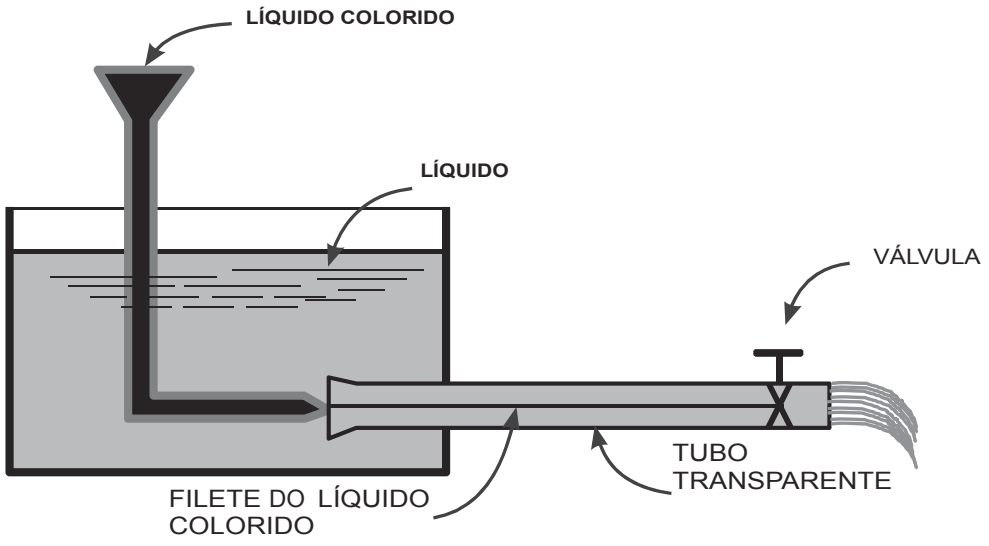
Superfície 100% lisa, na verdade não há. Em um escoamento do líquido por um conduto ou tubo, junto a parede do tubo, encontra-se uma camada aderente e imóvel do líquido. O líquido em movimento está em contato com esta camada aderente e imóvel, esta camada de líquido estacionária é chamada filme laminar. Portanto, se diz:

a) O escoamento se realiza em tubo liso, quando as asperezas da parede do tubo são menores que a espessura do filme laminar. Nesta condição, a natureza dessas asperezas não influi na zona turbulenta ;

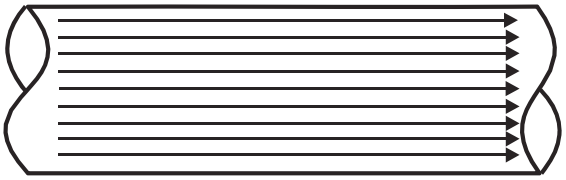
b) O escoamento se realiza em tubo rugoso, quando as asperezas da parede ultrapassam a espessura do filme laminar e entram na zona turbulenta, provocam o aumento desta, resultando uma perda mais elevada.

EXPERIÊNCIA DE REYNOLDS

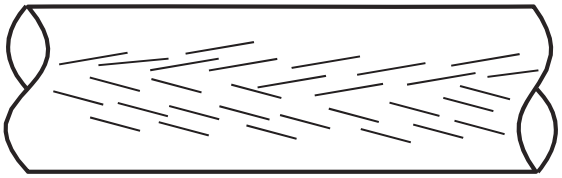
Osborne Reynolds, em 1833, realizou diversas experiências, onde pode visualizar os tipos de escoamentos. Vide figura abaixo.
Deixando o líquido escoar gradativamente pelo tubo transparente juntamente com o líquido colorido (corante), observa-se inicialmente um filamento colorido em linha reta, uma trajetória bem definida de filamentos coloridos que não se misturam. Nesta condição o regime é laminar.
Abrindo-se a válvula, aumenta a vazão do líquido (aumento da velocidade), nota-se que os filamentos coloridos começam a oscilar, se ramificar, estabelecendo o regime de transição.
Abrindo-se ainda mais a válvula (velocidade ainda maior), os filamentos coloridos misturam-se ao líquido, em consequência do movimento desordenado das partículas. Neste caso está em regime turbulento.



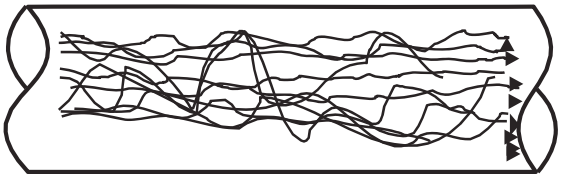
.REGIME LAMINAR:



.REGIME TRANSITÓRIO:



.REGIME TURBULENTO:



Reynolds após sua investigações, concluiu que o melhor critério para determinar estes regimes são, através da equação:

$$Re = \frac{v \times D}{\upsilon}$$

Re → Número de Reynolds (n° sem dimensão)
v → velocidade de escoamento do fluido (m/s)
D → diâmetro interno da tubulação(m)
υ → viscosidade cinemática do fluido(m2/s)

.LIMITES DO NÚMERO DE REYNOLDS PARA TUBOS

$Re \leq 2000$	escoamento laminar
$2000 < Re \leq 4000$	escoamento transitório
$Re > 4000$	escoamento turbulento

Notar que o número de Reynolds é um número adi mensional, independendo portanto do sistema de unidades adotado, desde que coeente.
No geral, na prática, o escoamento da água em canalizações se dá em regime turbulento. Exceção feita quando as velocidades são muito baixas ou fluidos tem alta viscosidade.

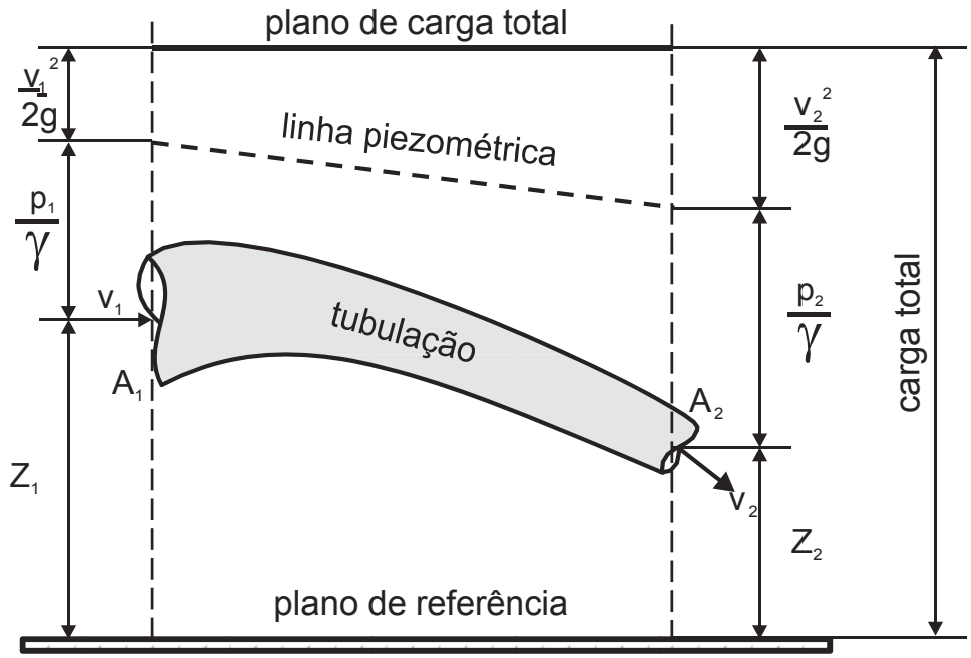
EQUAÇÃO DA ENERGIA PARA REGIME PERMANENTE

.EQUAÇÃO DE BERNOULLI

O teorema de Bernouilli é um dos mais importantes da hidráulica e representa um caso particular do Princípio da Conservação de Energia.
Considerando-se um escoamento em regime permanente de um líquido perfeito (ou ideal, não existe viscosidade, não há dissipação de energia durante o seu movimento), é constante a soma das energias, potêncial ou de posição (Z) por unidade de peso, de pressão (p/γ) por unidade de peso e cinética ($v^2/2g$) por unidade de peso, em qualquer ponto do fluido, ou seja:

$$Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante}$$

Considerando a figura abaixo:

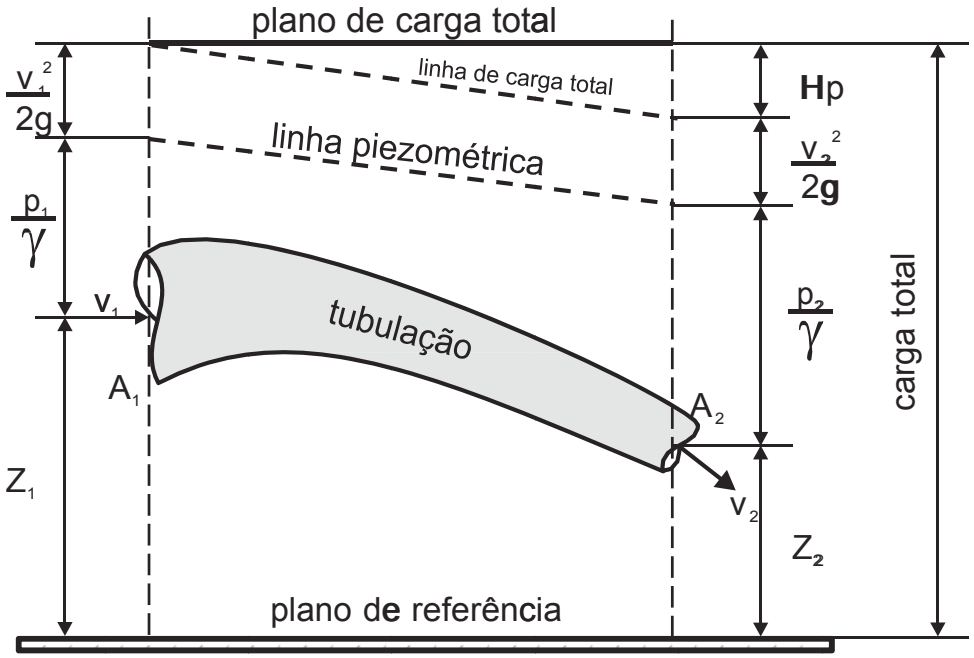


A linha piezométrica é determinada pela soma dos termos ($Z + \frac{p}{\gamma}$) para cada seção.

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

ADAPTAÇÃO DO TEOREMA DE BERNOUILLI PARA LÍQUIDOS REAIS

No item anterior, considerou-se um líquido perfeito (que não considera o efeito das perdas de energia por atrito do líquido com a tubulação, a viscosidade, etc).
Para os líquidos reais, faz-se necessária a adaptação do Teorema de Bernouilli, introduzindo-se uma parcela representativa destas perdas, conforme abaixo:



$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Hp$$

NOTA:
O termo Hp é a energia perdida pelo líquido real, por unidade de peso, no escoamento do ponto 1 para o ponto 2 e ainda:

a) H1

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = H1$$

b) H2

$$Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = H2$$

Perdas de Carga

Os líquidos reais não são perfeitos. A viscosidade e o atrito são os principais responsáveis pelas perdas de carga. O escoamento do líquido real por um conduto ou tubo, provoca perdas de carga (que dissipam na forma de calor) que ocorrem principalmente devido ao atrito entre as partículas do líquido real com as paredes do tubo (os condutos apresentam asperezas nas paredes internas).
Portanto a perda de carga é uma perda de energia ou de pressão.

As perdas de carga podem ser:
.Distribuídas ;
.Localizadas, ou singulares, ou acidentais.
Perda de carga total é a soma de todas as perdas de carga distribuídas com todas as perdas de carga localizadas.

Distribuídas:
São aquelas que ocorrem ao longo dos condutos. Ocorrem pelo movimento do líquido na própria tubulação. Também chamadas de perdas contínuas, pois admite-se que essa perda seja uniforme em qualquer trecho da tubulação de dimensões constantes, independente da posição da mesma.
Através de experiências realizadas por pesquisadores, foram desenvolvidas fórmulas para o cálculo da perda de carga distribuída. As principais são:

.Fórmula Universal ou fórmula de Darcy-Weisbach ;
.Fórmula de Hazen-Williams ;
.Fórmula Fair-Whipple-Hsiao ;
.Fórmula Flamant .

Localizadas, ou singulares ou acidentais:
São aquelas ocasionadas pela passagem do líquido pelos diversos pontos singulares existente na canalização ou tubulação, ou seja, são aquelas ocasionadas por peças especiais, conexões, válvulas, registros, medidores, mudanças de direção (cotovelos, curvas, tês, etc), mudança de diâmetro (reduções e ampliações), por obstruções parciais e etc., existentes em uma determinada canalização ou tubulação. Portanto, diversos tipos de perdas acidentais, ou singulares ou localizadas podem existir nas canalizações ou tubulações e devem ser observadas.
Abaixo as principais fórmulas e métodos para calcular as perdas de carga localizadas :

.Fórmula geral da perda de carga localizada ou método do k ;
.Método dos comprimentos equivalentes ou virtual .

1. Estudo da Perda de Carga Distribuída

São as perdas ocasionadas por atrito e que se distribuem ao longo dos tubos de uma canalização ou tubulação. Através de experiências realizadas por pesquisadores, foram desenvolvidas fórmulas para o cálculo da perda de carga distribuída. As principais são:

.Fórmula Universal ou fórmula de Darcy-Weisbach ;

.Fórmula de Hazen-Williams ;

.Fórmula Fair-Whipple-Hsiao ;

.Fórmula Flamant .

As fórmulas são para o cálculo das perdas de carga distribuídas em tubos de seção circular, fechados, totalmente preenchidos pelo líquido.

1.1.Fórmula Universal ou fórmula de Darcy-Weisbach

Darcy um pesquisador importante da hidráulica, com base em observações, elaborou uma fórmula cuja utilização é reconhecida e aplicada por muitos anos.

Darcy foi o primeiro a considerar a natureza e o estado das paredes dos tubos.

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

Onde:

hp = Perda de carga distribuída total (m) para tubo de seção circular ;

f = Coeficiente de atrito ;

L= Comprimento total da tubulação (m) ;

V= Velocidade média do líquido na tubulação (m/s) ;

D= Diâmetro da tubulação (m) ;

g= Aceleração da gravidade (m/s^2).

1.1.2.Raio Hidráulico

É a relação entre a área da seção transversal molhada (A) e o perímetro molhado (P).

$$Rh = \frac{A}{P}$$

, Onde: Rh= Raio hidráulico (m) ;

A= área molhada (m2) ;

P= Perímetro molhado (m).

Em um tudo de seção circular, totalmente cheio pelo líquido, verifica-se:

$Rh = (\pi D^2/4) / (\pi D)$

$Rh = D/4$

D= 4 Rh

Substituindo o valor D (D=4Rh), diâmetro da seção circular, totalmente cheia pelo líquido, na fórmula Universal ou de Darcy-Weisbach, do item 1 acima, tem-se abaixo a expressão para uma seção não circular:

$$hpp = f \frac{L V^2}{Rh\ 8g}$$

; Onde: hpp= Perda de carga distribuída total (m), para tubo de seção não circular ;

f = Coeficiente de atrito ;

L= Comprimento total da tubulação (m) ;

V= Velocidade média do líquido na tubulação (m/s) ;

Rh= A/P = Raio hidráulico (m) ;

g= Aceleração da gravidade (m/s^2).

1.1.3.Coeficiente " f " da fórmula Universal ou de Darcy-Weisbach:

O Coeficiente de atrito "f" é dado por expressões que o relacionam com a rugosidade da parede, com as características do líquido, dimensões do conduto e número de Reynolds.

No caso do escoamento laminar, " f " depende do número de Reynolds (Rey) e portanto: **f = 64/Rey**.

Para o turbulento, " f " depende principalmente do número de Reynolds e da rugosidade relativa do tubo.

Para a determinação do coeficiente " f ", são aceitos experimentos, fórmulas ou ábacos de Prandtl, Moody, Rouse, Coolebrok e Nikuradse, entre outros.

O diagrama de Moody é de grande utilidade para a determinação do coeficiente " f " e na solução geral dos problemas de escoamento em tubos.

1.1.4.Moody

Moody representou um gráfico, na forma de diagrama, chamado de Diagrama de Moody, que apresenta basicamente, os eixos coordenados em graduação logarítmica, o fator de atrito " f " em ordenadas, o número de Reynolds em abscissas, valores da rugosidade relativa (e/D) e tipos de escoamento.

1.1.5.Rugosidade Relativa

Rugosidade ou aspereza, pode ser determinada através de um aparelho chamado rugosimetro, que mede a altura média das asperezas da parede interna dos tubos.
Rugosidade relativa é a relação entre a rugosidade absoluta " e " e o diâmetro " D " da tubulação.

$$rr = \frac{e}{D}$$; Onde: rr= Rugosidade relativa ;
e= Rugosidade absoluta (m);
D= Diâmetro do tubo (m).

1.1.6.Condutos Lisos e Rugosos

Superfície 100% lisa, na verdade não há. Junto a parede do tubo, encontra-se uma camada aderente e imóvel do líquido em escoamento. O líquido em movimento está em contato com esta camada e não com a parede do tubo, esta camada de líquido estacionária é chamada filme laminar. Portanto, se diz:

a) O escoamento se realiza em tubo liso, quando as asperezas da parede do tubo são menores que a espessura do filme laminar. Nesta condição, a natureza dessas asperezas não influi na zona turbulenta ;

b) O escoamento se realiza em tubo rugoso, quando as asperezas da parede ultrapassam a espessura do filme laminar e entram na zona turbulenta, provocam o aumento desta, resultando uma perda mais elevada.

1.2.Fórmula de Hazen-Williams

Resultado de cuidadoso estudo estatístico. É uma fórmula de grande aceitação, devido principalmente:

.Ao amplo uso e às confirmações experimentais ;

.Pode-se considerar o envelhecimento dos tubos ;

.Para tubos: 50mm $\leq D \leq$ 3500mm .

$$\mathbf{j = 10{,}643\ Q^{1,85}\ C^{-1,85}\ D^{-4,87}}$$

Onde:

j = Perda de carga distribuída unitária (m/m), para tubo de seção circular ;

Q= Vazão de líquido (m^3/s) ;

D= Diâmetro da tubulação (m) ;

C= Coeficiente de Hazen-Williams (valor tabelado).

1.3.Fórmula Fair-Whipple-Hsiao

Após inúmeros experimentos, foram elaboradas fórmulas especiais, conforme abaixo, para canalizações ou tubulações de seção circular, principalmente, residenciais, prediais e industriais, D ≤150mm :

1.3.1.Para Aço Galvanizado – água fria:

$$j = 0{,}002021 \frac{Q^{1,88}}{D^{4,88}}$$

, Onde: j = Perda de carga distribuída unitária (m/m) ;

Q= Vazão do líquido (m^3/s) ;

D= Diâmetro da tubulação (m) .

e

$$Q = 27{,}113\ j^{0,532}\ D^{2,596}$$

1.3.2.Para Cobre ou Latão – água fria:

$$j = 0{,}00086 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad \text{e} \quad Q = 55{,}934\, j^{0,571}\, D^{2,714}$$

1.3.3.Para Cobre ou Latão – água quente:

$$j = 0{,}000692 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad \text{e} \quad Q = 63{,}281\, j^{0,571}\, D^{2,714}$$

1.4.Fórmula Flamant

As fórmulas abaixo, também elaboradas para canalizações ou tubulações de seção circular, principalmente, residenciais, prediais e industriais, D ≤150mm :

1.4.1.Para PVC - Rígido

$$j = 0{,}000824 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$$

, Onde: j = Perda de carga distribuída unitária (m/m) ;
Q= Vazão do líquido (m^3/s) ;
D= Diâmetro da tubulação (m) ,

1.4.2.Para Ferro Fundido usado – água fria

$$j = 0{,}0014 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$$

1.4.3.Para Ferro Fundido novo – água quente

$$j = 0{,}00113 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$$

1.5.Perda de carga distribuída total:

A perda de carga distribuída " j " é unitária (m/m) e portanto, para calcular a perda de carga distribuída total, multiplica-se " j " pelo comprimento total da tubulação. Abaixo a expressão:

hd = j L , Onde: hd = Perda de carga distribuída total (m), para tubos de seção circular ;

j = Perda de carga unitária (m/m) ;

L= Comprimento total da tubulação (m) .

2. Estudo das Perdas de Carga Singulares, Acidentais ou Localizadas

São aquelas ocasionadas pela passagem do líquido pelos diversos pontos singulares existente na canalização ou tubulação, ou seja, pela passagem do líquido pelas peças especiais, mudança de diâmetro (reduções e ampliações), mudança de direção (cotovelos, curvas, tês, etc), registros, válvulas e etc., existente em uma determinada canalização ou tubulação. Portanto, diversos tipos de perdas acidentais, singulares ou localizadas podem existir nas canalizações ou tubulações e devem ser observadas.
Abaixo as principais fórmulas e métodos para calcular as perdas de carga localizadas :
.Fórmula geral da perda de carga localizada ou método do k ;
.Método dos comprimentos equivalentes .

As fórmulas são para o cálculo das perdas de carga localizadas em canalizações e tubulações de seção circular, fechadas, totalmente preenchidas pelo líquido.

2.1.Fórmula geral da perda de carga localizada ou método do k

$$hf = k \frac{V^2}{2g}$$

Onde: **hf = Perda de carga localizada de um ponto singular /peça (m) ;**

V= Velocidade média do líquido (m) ;

g= Aceleração da gravidade (m/s^2) ;

k= Coeficiente tabelado, obtido experimentalmente.

O coeficiente " k " é obtido experimentalmente para cada tipo de ponto singular/peça. Para fins de aplicação prática e escoamento turbulento, pode-se considerar " k " constante para uma determinada peça, independentemente do diâmetro da tubulação e da velocidade e natureza do líquido.

Em geral, nas mudanças de diâmetros, é tomada a velocidade média na seção de menor diâmetro. Calculado todas as perdas " hf " de uma tubulação, estas são somadas e encontra-se então a perda de carga localizada total, abaixo a expressão:

$hft = \Sigma hf$

Onde: hft= Perda de carga localizada total (m) ;

Σ hf= Somatória das perdas de carga localizada dos pontos singulares /peças (m) de uma tubulação ou canalização.

2.1.Método do comprimento equivalente

Para o cálculo da perda de carga localizada, deste método, transforma-se o ponto singular/peça em comprimento reto de tubo de seção circular, que com a mesma vazão e diâmetro, provocam a mesma perda de carga. Estes comprimentos retos obtidos, são chamados de comprimentos equivalentes (Le). Abaixo a expressão para obter o comprimento equivalente de uma peça:

$$Le = k \frac{D}{f}$$

, Onde: Le = Comprimento equivalente (m) ;

k= Coeficiente ;

f= Coeficiente de atrito ;

D= Diâmetro da peça (m) .

Encontram-se os valores de comprimentos equivalentes **" Le " tabelados**. Estes foram calculados e parte se baseiam nos resultados de trabalhos feitos por autoridades no assunto.

Uma vez obtido todos os comprimentos equivalentes dos pontos singulares/peças de uma tubulação, estes são somados e então obtemos o comprimentos equivalente total, ou seja:

Let = Σ Le , onde: Let= Comprimento equivalente total da tubulação (m) ;

Σ Le= Somatória dos comprimentos equivalentes (m) ;

Calcula-se a perda de carga localizada total, deste método, multiplicando o comprimento equivalente total (Let) encontrado, pela perda de carga unitária (j), calculada através da fórmula de perda de carga distribuída. Abaixo a expressão:

hft = j Let , Onde: hft = Perda de carga localizada total (m) ;

j = Perda de carga unitária (m/m), obtida das fórmulas da perda de carga distribuída ;

Let= Comprimento equivalente total da tubulação (m) .

Obs.: Quando utilizar a fórmula universal para cálculo da **hft** (perda de carga localizada total), considerar o **L** (comprimento) da fórmula **igual** ao **Let** (comprimento equivalente total da tubulação) calculado.

3. Perda de Carga Total

Uma vez calculadas todas as perdas de carga, distribuídas e localizadas, estas são somadas e obtemos a perda de carga total "**HP**", ou seja:

HP = perdas de carga distribuídas totais + perdas de carga localizadas totais

Velocidades Médias comuns nas Tubulações

O diâmetro da tubulação influencia na velocidade do líquido na tubulação, por exemplo, quanto menor o diâmetro que pode ser empregado, maior é a velocidade do líquido na tubulação.
Velocidades elevadas implicam principalmente em maiores perdas de carga, diminuição da pressão disponível na tubulação, desgastes, ruído desagradáveis e etc. Velocidade muito baixa possibilita, dependendo das características ou qualidade do líquido, deposições nas tubulações.

1.Velocidade Mínima

Para os sistemas de distribuição de água potável, pela norma NBR 12218, a velocidade mínima é de 0,6m/s.

2.Velocidade Máxima

1.1. No sistema de abastecimento de água (redes de distribuição), segundo o Eng. Azevedo Netto, para determinar o valor máximo da velocidade, nas tubulações de distribuição de água, é usual a seguinte expressão: **$V_{max.} = 0{,}60 + 1{,}5D$** , Onde: Vmax. = Velocidade máxima em m/s ;
D= Diâmetro da tubulação em m.

1.2. Instalações prediais: A velocidade nas instalações não deve ultrapassar (vide NBR5626):

$V_{máx.} = 14 (D)^{0,5}$

Vmáx. menor ou igual a 3,0 m/s

1.3. Linhas de recalque: A velocidade é definida, considerando condições econômicas. Geralmente é superior a 0,8 m/s e raramente ultrapassa 2,4 m/s.

1.4. Instalações industriais: A velocidade da água, geralmente está compreendida entre 1 e 2 m/s.

Posição da tubulação com relação a linha de carga (vide anexo)

1.Tubulação abaixo da linha de carga em toda a sua extensão (posição 1):

Este é o caso da posição ideal, ótima para o escoamento, onde só existem pressões positivas, pois a linha piezométrica efetiva (LPE) está sempre acima da tubulação. Nos pontos mais baixos prever registro para limpeza da linha e eventuais esvaziamentos. Nos pontos mais altos, instalar ventosas, que são válvulas que permitem o escape do ar, que pode estar acumulado na tubulação.

Hidr. Apl.

2.Tubulação coincide com a linha piezométrica. Posição 2:

Trata-se de escoamento livre (rios, canais abertos ou tubulação trabalhando parcialmente cheia). A pressão ao longo da tubulação é igual a pressão atmosfera.

3.Tubulação passa acima da LPE, porém abaixo da linha piezométrica absoluta (LPA). Posição 3:

A pressão efetiva assume valor negativo no trecho AB, será difícil evitar bolsas (ou bolhas) de ar neste trecho. Em consequência, a vazão diminuirá. É o caso de sifão verdadeiro que necessitará de escorva (remoção do ar acumulado).

4.A tubulação corta a LPA, porém fica abaixo do plano de carga efetivo (PCE). Posição 4:

A tubulação poderá funcionar sem escorva. Assim, coloca-se o ponto T em contato com a atmosfera. Neste ponto T coloca-se uma caixa de passagem.

Tem-se assim dois trechos trabalhando. LT com carga TX e o TM sob carga h-TX.

5.A tubulação corta a linha Piezométrica e o plano de carga efetivo (PCE), porém fica abaixo da LPA. Posição 5:

É o caso de sifões. A tubulação deverá ser escorvada por meio externo (bomba de vácuo, por exemplo).

6.A tubulação passa acima do LPA e PCE, porém abaixo do plano de carga absoluta (PCA). Posição 6:
Trata-se de um sifão operando nas piores condições. Pior que na condição anterior.

7.A tubulação corta o PCA (posição 7):
O escoamento por gravidade não é possível. Há necessidade do uso de bomba.

Condutos equivalentes

Uma tubulação equivalente a outra ou a outras, é aquela capaz de conduzir a mesma quantidade de água com a mesma perda de carga total.
Determina-se uma tubulação equivalente, com o objetivo de substituir tubulações existentes, por exemplo, por uma outra mais simples. Dois casos podem ser considerados:
a.Uma tubulação equivalente a outra ;
b.Uma tubulação equivalente a diversas (condutos em série, paralelo e mistos).

1.Tubulação equivalente a outra:

Abaixo as expressões que permitem calcular o comprimento L de uma tubulação equivalente a outra de diâmetro diferente:

1.1) $L2 = \frac{L1 \cdot k1}{k2} \left(\frac{D2}{D1}\right)^5$ **,** onde: L2 = Comprimento da tubulação equivalente (m) ;

D2 = Diâmetro da tubulação equivalente (m) ;

$k2$ = Coeficiente de rugosidade da tubulação equivalente.

A expressão acima é para diferentes coeficientes de rugosidade "k" (k=0,0827.f) .

1.2) $L2 = L1 \left(\frac{D2}{D1}\right)^5$ **,** onde: L2 = Comprimento da tubulação equivalente (m) ;

D2 = Diâmetro da tubulação equivalente (m) ;

A expressão acima é para coeficientes de rugosidade "k" iguais .

1.3) Adotando a fórmula de Hazen-Williams, tem-se:

1.3.1) $L2 = L1 \left(\frac{C2}{C1}\right)^{1,85} \left(\frac{D2}{D1}\right)^{4,87}$ **,** onde: L2 = Comprimento da tubulação equivalente (m) ;

D2 = Diâmetro da tubulação equivalente (m) ;

C2 = Coeficiente C da tubulação equivalente.

A expressão acima é para diferentes coeficientes C .

1.3.2) L2 = L1 $\left(\frac{D2}{D1}\right)^{4,87}$ **,** onde: L2 = Comprimento da tubulação equivalente (m) ;

D2 = Diâmetro da tubulação equivalente (m) ;

A expressão acima é para coeficientes C iguais .

2.Tubulação equivalente com outras tubulações, em série:

É a tubulação constituída por uma sequência de tubos de diferentes diâmetros ligados entre si. A vazão será a mesma para cada trecho e a perda de carga total será a soma das perdas que neles ocorrem.

Assim temos as expressões:

2.1) $\frac{Le\,ke}{(De)^5} = \frac{L1\,k1}{(D1)^5} + \frac{L2\,k2}{(D2)^5} + \ldots + \frac{Ln\,kn}{(Dn)^5}$. (regra de Dupuit)

A expressão acima é para diferentes coeficientes de rugosidade "k" (k=0,0827.f) , onde:

Le = Comprimento da tubulação equivalente (m) ;

L1, L2 e Ln = Comprimento das tubulações existentes (m) ;

De = Diâmetro da tubulação equivalente (m) ;

D1, D2 e Dn = Diâmetro das tubulações existentes (m) ;

ke = Coeficiente de rugosidade da tubulação equivalente (m) ;

$k1$, $k2$ e kn = Coeficiente de rugosidade das tubulações existentes .

Hidr. Apl.

2.2) $\frac{Le}{(De)^5} = \frac{L1}{(D1)^5} + \frac{L2}{(D2)^5} + \ldots + \frac{Ln}{(Dn)^5}$.

A expressão acima é para coeficientes de rugosidade "k" iguais .

2.3) Adotando a fórmula de Hazen-Williams, temos:

2.3.1) $\frac{Le}{(Ce)^{1,85}\,(De)^{4,87}} = \frac{L1}{(C1)^{1,85}\,(D1)^{4,87}} + \frac{L2}{(C2)^{1,85}\,(D2)^{4,87}} + \ldots + \frac{Ln}{(Cn)^{1,85}\,(Dn)^{4,87}}$.

A expressão acima é para diferentes coeficientes C, onde:
Le = Comprimento da tubulação equivalente (m) ;
L1, L2 e Ln = Comprimento das tubulações existentes (m) ;
De = Diâmetro da tubulação equivalente (m) ;
D1, D2 e Dn = Diâmetro das tubulações existentes (m) ;
Ce = Coeficiente C da tubulação equivalente (m) ;
C1, C2 e Cn = Coeficiente C das tubulações existentes .

2.3.2) $\frac{Le}{(De)^{4,87}} = \frac{L1}{(D1)^{4,87}} + \frac{L2}{(D2)^{4,87}} + \ldots + \frac{Ln}{(Dn)^{4,87}}$.

A expressão acima é para coeficientes C iguais.

3.Tubulação equivalente com outras tubulações, em paralelo:

São constituídos por diversas canalizações que tem os mesmos pontos inicial e final, de modo que a vazão que recebem no primeiro se divide pelos diversos condutos do feixe, sendo por eles conduzida até o próximo ponto. Assim temos as expressões:

3.1) A vazão para um conduto equivalente a um conjunto de "n" tubos em paralelo será:

$$\mathbf{Q} = \sqrt{\frac{\mathbf{hp}.\ \mathbf{D^5}}{k\ .\ \mathbf{L}}}$$

, onde: hp = perda de carga (m) ;

k = coeficientes de rugosidade (k=0,0827.f) ;

L = comprimento da tubulação (m) ;

D = Diâmetro da tubulação (m) ;

Q = Vazão do líquido (m3/s) .

3.2) $$\sqrt{\frac{\mathbf{De^5}}{k_{\mathbf{e}}\ .\ \mathbf{Le}}} = \sqrt{\frac{\mathbf{D1^5}}{k_{\mathbf{1}}\ .\ \mathbf{L1}}} + \sqrt{\frac{\mathbf{D2^5}}{k_{\mathbf{2}}\ .\ \mathbf{L2}}} + \ldots + \sqrt{\frac{\mathbf{Dn^5}}{k_{\mathbf{n}}\ .\ \mathbf{Ln}}}$$

, para diferentes coeficientes "k" .

3.3) $$\sqrt{\frac{\mathbf{De^5}}{\mathbf{Le}}} = \sqrt{\frac{\mathbf{D1^5}}{\mathbf{L1}}} + \sqrt{\frac{\mathbf{D2^5}}{\mathbf{L2}}} + \ldots + \sqrt{\frac{\mathbf{Dn^5}}{\mathbf{Ln}}}$$

, para coeficientes "k" iguais .

3.4) Adotando a fórmula de Hazen-Williams, temos:

3.4.1) $$\frac{Ce\,.\,De^{2,63}}{Le^{0,54}} = \frac{C1\,.\,D1^{2,63}}{L1^{0,54}} + \frac{C2\,.\,D2^{2,63}}{L2^{0,54}} + \ldots + \frac{Cn\,.\,Dn^{2,63}}{Ln^{0,54}}$$

A expressão acima é para diferentes coeficientes C, onde:
Le = Comprimento da tubulação equivalente (m) ;
L1, L2 e Ln = Comprimento das tubulações existentes (m) ;
De = Diâmetro da tubulação equivalente (m) ;
D1, D2 e Dn = Diâmetro das tubulações existentes (m) ;
Ce = Coeficiente C da tubulação equivalente (m) ;
C1, C2 e Cn = Coeficiente C das tubulações existentes .

3.4.2) $$\frac{De^{2,63}}{Le^{0,54}} = \frac{D1^{2,63}}{L1^{0,54}} + \frac{D2^{2,63}}{L2^{0,54}} + \ldots + \frac{Dn^{2,63}}{Ln^{0,54}}$$, para coeficientes C iguais.

A expressão acima é para coeficientes C iguais.

Rede de Distribuição de Água

As redes de água dos sistemas de abastecimento público, por exemplo, são as tubulações que servem aos diversos pontos de consumo, como prédios, residências, indústrias, fontes, hospitais, chafarizes, etc.

1) Tipos de redes:

1.1) Redes Ramificadas:

Está mais direcionada à pequena comunidade, de traçado linear, formada por um tronco principal, do qual se conectam trechos transversais, este conjunto lembra uma espinha de peixe.

Nas tubulações da rede ramificada, o escoamento da água está em um único sentido, ou melhor, da tubulação tronco principal para as extremidade morta (tubulação bloqueada) ;

1.2) Rede malhada:

Na rede malhada as tubulações interligadas formam malhas ou anéis, o escoamento da água ora está em um sentido, ora está em outro sentido, conforme as solicitações do consumo.

Esta condição facilita a manutenção ou reparo das tubulações, possibilitando, por exemplo, o mínimo de interrupção no fornecimento de água.

2)Cálculo da Rede Ramificada:

2.1) Cálculo da Vazão de Distribuição:

A vazão a ser distribuída em um determinado sistema é:

$$\mathbf{Qd} = \frac{K1\ K2\ P\ gp}{86400}$$, onde : Qd = vazão de distribuição em l/s ;

K1 = coef. do dia de maior consumo (valores usuais: 1,20, 1,25 e 1,50) ;

K2 = coef. da hora de maior consumo (valor comum: 1,50) ;

P = população a ser abastecida ;

qp = consumo ou cota per capita (l/hab/dia) .

2.2) Cálculo da vazão de distribuição em marcha, por metro de tubulação:

$$\mathbf{qm} = \frac{Qd}{Lt}$$

Onde:
qm = vazão ou taxa de distribuição em l/s.m ;
Lt = comprimento total da rede em metros ;
Qd = Vazão de distribuição (l/s) .

2.3) Cálculo da vazão em marcha:

$$q = qm\ L$$

, onde : q= vazão em marcha (l/s)
qm = vazão ou taxa de distribuição (l/s.m) ;
L = comprimento de um trecho da tubulação (m) .

2.4) Cálculo da vazão montante:

$$QM = QJ + q$$

, onde: QM = vazão montante (l/s) ;
QJ = vazão jusante (l/s) ;
q = vazão em marcha (l/s) .

2.5) Cálculo da vazão fictícia. Será utilizada para o cálculo da perda de carga unitária "J" (m/m) :

2.5.1) Se QJ é diferente de zero, utiliza-se: $Qf = \frac{QJ+QM}{2}$, onde: Qf = Vazão fictícia (l/s) ;
QM = Vazão montante (l/s) ;
QJ = Vazão jusante (l/s) .

2.5.2) Se QJ (vazão jusante) é igual a zero, utiliza-se: $\mathbf{Qf = \frac{QM}{3^{0,5}}}$, onde: Qf = Vazão fictícia (l/s) ;

QM = Vazão montante (l/s) .

2.6) Determinação do diâmetro da tubulação do trecho da rede:

Pela vazão montante (QM), determina-se o diâmetro da tubulação do trecho, obedecendo os limites da tabela de velocidades e vazões máximas em redes de abastecimento.

2.7) Cálculo da perda de carga unitária " j " (m/m) :

Calculada pela equação de perda adotada.

2.8) Cálculo da perda de carga total para um trecho da rede:

Calculada pela equação de perda adotada ou conhecendo a perda de carga unitária " j " (m/m):

$$\mathbf{hp = j\ L}$$

onde:

hp = perda de carga total do trecho da rede (m) ;

j = perda de carga unitária do trecho da rede (m/m) ;

L = comprimento do trecho da rede (m) .

3) Cálculo da Rede Malhada:

3.1) Método de Hardy-Cross
Este método se baseia nos seguintes princípios:

3.1.1) Equação da continuidade (Lei dos Nós):
A soma algébrica das vazões em cada nó da rede é igual a zero .
3.1.2) Equação da energia (Lei das malhas):
A soma algébrica das perdas de carga, saindo ou chegando ao nó, é igual a zero.

3.2) Cálculo da vazão de distribuição:
A vazão a ser distribuída em um determinado sistema é:

$$\mathbf{Qd} = \frac{K1\ K2\ P\ gp}{86400}$$

Onde:

Qd = vazão de distribuição em l/s ;

K1 = coef. do dia de maior consumo (valores usuais: 1,20, 1,25 e 1,50) ;

K2 = coef. da hora de maior consumo (valor comum: 1,50) ;

P = população a ser abastecida ;

qp = consumo ou cota per capita (l/hab/dia) .

3.3) Vazão ou taxa de distribuição referida a unidade de área:

$$qa = \frac{Qd}{A}$$ **,** Onde: qa= vazão ou taxa de distribuição em litros por segundo por hectare ;

Qd = vazão de distribuição em l/s ;

A= área abrangida pela rede em hectares .

3.4) Conhecidas as cargas localizadas nos NÓS, atribui-se, partindo dos pontos de alimentação uma vazão de escoamento em cada trecho do circuito, respeitando em cada NÓ, a Lei dos NÓS ($\Sigma Q_{nó}=0$). Para cada anel da rede determina-se o valor de ($\Sigma \Delta H$), sendo:

3.4.1) Se $\Sigma \Delta H=0$ para todas as malhas, a distribuição de vazões está correta e Fim.

3.4.2) Se $\Sigma \Delta H \neq 0$ é necessário compensar as vazões, corrigindo cada uma dela de um valor ΔQ, tal que $\Sigma \Delta H=0$.

3.4.3) $$\Delta Q = \frac{-\Sigma \Delta H}{n \Sigma \frac{\Delta H}{Q}}$$, onde: **a)** Para perda de carga calculada por Hazen-Williams, n=1,85 ;

b) Para perda de carga calculada pela fórmula Universal, n=2 .

ANEXOS

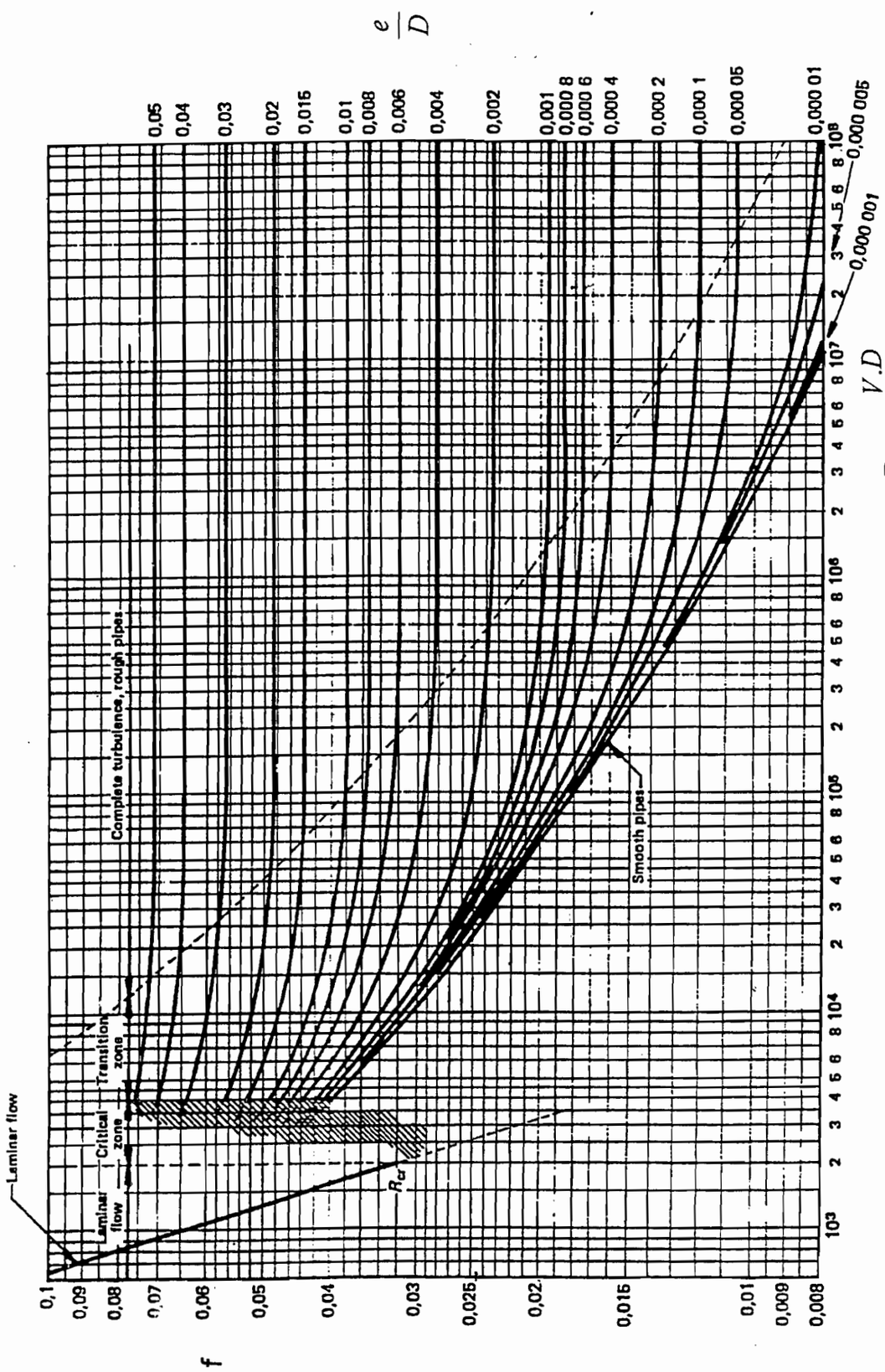


Diagrama de Moody

Valores para a rugosidade dos materiais, em milímetro.

Ferro fundido novo	e = 0,26 a 1,00
Ferro fundido enferrujado	e = 1,00 a 1,50
Ferro fundido incrustado	e = 1,50 a 3,00
Ferro fundido asfaltado	e = 0,12 a 0,20
Aço laminado novo	e = 0,0015
Aço comercial	e = 0,046
Aço rebitado	e = 0,92 a 9,20
Aço asfaltado	e = 0,04
Aço galvanizado	e = 0,15
Aço soldado liso	e = 0,10
Aço muito corroído	e = 2,00
Cobre ou vidro	e = 0,0015
Concreto centrifugado	e = 0,07
Cimento alisado	e = 0,30 a 0,80
Cimento bruto	e = 1,00 a 3,00
Madeira aplainada	e = 0,20 a 0,90
Madeira não aplainada	e = 1,00 a 2,50
Alvenaria de pedra bruta	e = 8,00 a15,00
Rocha bruta	e = 0,20
Tijolo	e = 5,00
Alvenaria de pedra regular	e = 1,00

PVC ..... e = 0,001

Valores aproximados de K

Peça	K
Ampliação gradual	0,30*
Bocais	2,75
Comporta aberta	1,00
Cotovelo 90°	0,90
Cotovelo 45°	0,40
Crivo	0,75
Curva 90°	0,40
Curva 45°	0,20
Curva 22 1/2°	0,10
Entrada normal em canalização	0,50
Entrada de borda	1,00
Existência de pequena derivação	0,03
Junção	0,40
Medidor Venturi	2,50**
Redução gradual	0,15*
Registro de ângulo aberto	5,00
Registro de gaveta aberto	0,20
Registro de globo aberto	10,00
Saída de canalização	1,00
Tê, passagem direta	0,60
Tê, saída de lado	1,30
Tê, saída bilateral	1,80
Válvula - de - pé	1,75
Válvula de retenção	2,50

* com base na velocidade maior (seção menor).

** relativa à velocidade na canalização.

Quadro 1 - Comprimento equivalente à perdas localizadas, em metros de tubo de ferro fundido ou aço galvanizado.

Diâmetro (D)		Registro aberto			Tê 90° de passagem			Válvula de pé e crivo	Saída de canalização	Válvula de retenção	
		gaveta	Pressão	ângulo	direta	lado	bi-lateral			tipo leve	tipo pesada
(mm)	(pol.)										
13	1/2	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	3/4	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1.1/4	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1.1/2	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2.1/2	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	8,4	12,9
125	5	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,6	25,0
250	10	1,7	85,0	43,0	5,5	1,60	1,60	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

Quadro 1 - Comprimento equivalente à perdas localizadas, em metros de tubo de ferro fundido ou aço galvanizado.

Diâmetro (D)		Cotovelo				Curva			Entrada de canalização	
		90° raio longo	90° raio médio	90° raio curto	45°	90° R/D 1".1/2	90° R/D 1"	45°	normal	borda
(mm)	(pol.)									
13	1/2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4
19	3/4	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7
32	1.1/4	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9
38	1.1/2	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5
63	2.1/2	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2
100	4	2,1	2,8	3,4	1,5	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0

Quadro 1 - Comprimento equivalente à perdas localizadas, em metros de tubo de PVC rígido ou cobre.

Diâmetro (D)		Registro aberto			Tê 90° de passagem			Válvula de pé e crivo	Saída de canalização	Válvula de retenção	
		gaveta	Pressão	ângulo	direta	lado	bi-lateral			tipo leve	tipo pesada
Interno (mm)	Ref. (pol.)										
17,0	1/2	0,1	11,1	5,9	0,7	2,3	2,3	8,1	0,8	2,5	3,6
21,6	3/4	0,2	11,4	6,1	0,8	2,4	2,4	9,5	0,9	2,7	4,1
27,8	1	0,3	15,0	8,4	0,9	3,1	3,1	13,3	1,3	3,8	5,8
35,2	1.1/4	0,4	22,0	10,5	1,5	4,6	4,6	15,5	1,4	4,9	7,4
44,0	1.1/2	0,7	35,8	17,0	2,2	7,3	7,3	18,3	3,2	6,8	9,1
53,4	2	0,8	37,9	18,5	2,3	7,6	7,6	23,7	3,3	7,1	10,8
66,6	2.1/2	0,9	38,0	19,0	2,4	7,8	7,8	25,0	3,5	8,2	12,5
75,6	3	0,9	40,0	20,0	2,5	8,0	8,0	26,8	3,7	9,3	14,2
97,8	4	1,0	42,3	22,1	2,6	8,3	8,3	28,6	3,9	10,4	16,0
124,4	5	1,1	50,9	26,2	3,3	10,0	10,0	37,4	4,9	12,5	19,2
142,0	6	1,2	56,7	29,0	3,8	11,1	11,1	43,4	5,5	13,9	21,4

Quadro 1 - Comprimento equivalente à perdas localizadas, em metros de tubo de PVC rígido ou cobre.

Diâmetro (D)		Joelho		Curva		Entrada de canalização	
		90°	45°	90°	45°	normal	borda
Interno (mm)	Ref. (pol.)						
17,0	1/2	1,1	0,4	0,4	0,2	0,3	0,9
21,6	3/4	1,2	0,5	0,5	0,3	0,4	1,0
27,8	1	1,5	0,7	0,6	0,4	0,5	1,2
35,2	1.1/4	2,0	1,0	0,7	0,5	0,6	1,8
44,0	1.1/2	3,2	1,3	1,2	0,6	1,0	2,3
53,4	2	3,4	1,5	1,3	0,7	1,5	2,8
66,6	2.1/2	3,7	1,7	1,4	0,8	1,6	3,3
75,6	3	3,9	1,8	1,5	0,9	2,0	3,7
97,8	4	4,3	1,9	1,6	1,0	2,2	4,0
124,4	5	4,9	2,4	1,9	1,1	2,5	5,0
142,0	6	5,4	2,6	2,1	1,2	2,8	5,6

Quadro 2 – Comprimento equivalentes à perdas localizadas, em metros de tubo de aço galvanizado.

DN (pol.)	2" x 1"	2" x 1".1/4	2" x 1".1/2	2".1/2 x 1".1/4	2".1/2 x 1".1/2	2".1/2 x 2"	3" x 1".1/2	3" x 2"	3" x 2" 1/.2
	0,30	0,35	0,38	0,44	0,48	0,64	0,71	0,70	0,71

VALORES DE C

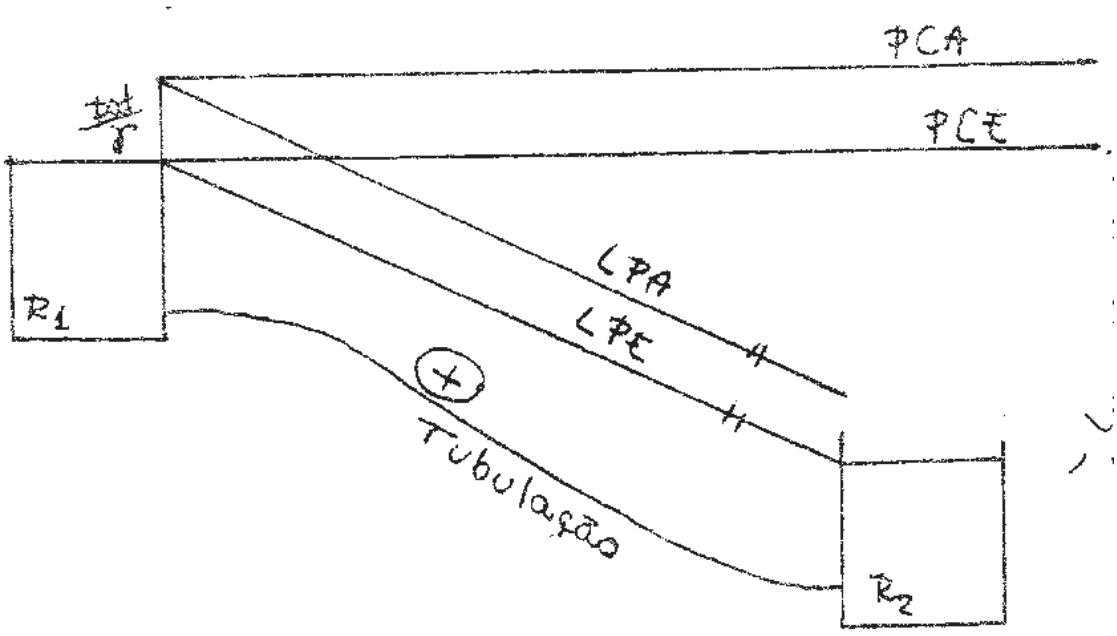
Tubos	C
Aço corrugado (chapa ondulada)	60
Aço com juntas lock-bar, novos	130
Aço galvanizado (novos e em uso)	125
Aço rebitado, novos	110
Aço rebitado, em uso	85
Aço soldado, novos	120
Aço soldado, em uso	90
Aço soldado c/revest. especial, novos e em uso	130
Chumbo	130
Cimento-amianto	140
Cobre	130
Concreto, bom acabamento	130
Concreto, acabamento comum	120
Ferro fundido, novos	130
Ferro fundido, em uso	90
Ferro fundido, tubos revestidos de cimento	130
Crês cerâmico vidrado (manilhas)	110
Latão	130
Madeira, em aduelas	120
Tijolos, condutos bem executados	100
Vidro	140
Plástico	140

Variação do coeficiente C de Hazen Williams com a idade e o diâmetro da canalização
Para tubos de Ferro Fundido (FoFo); Aço com juntas " lock-bar"

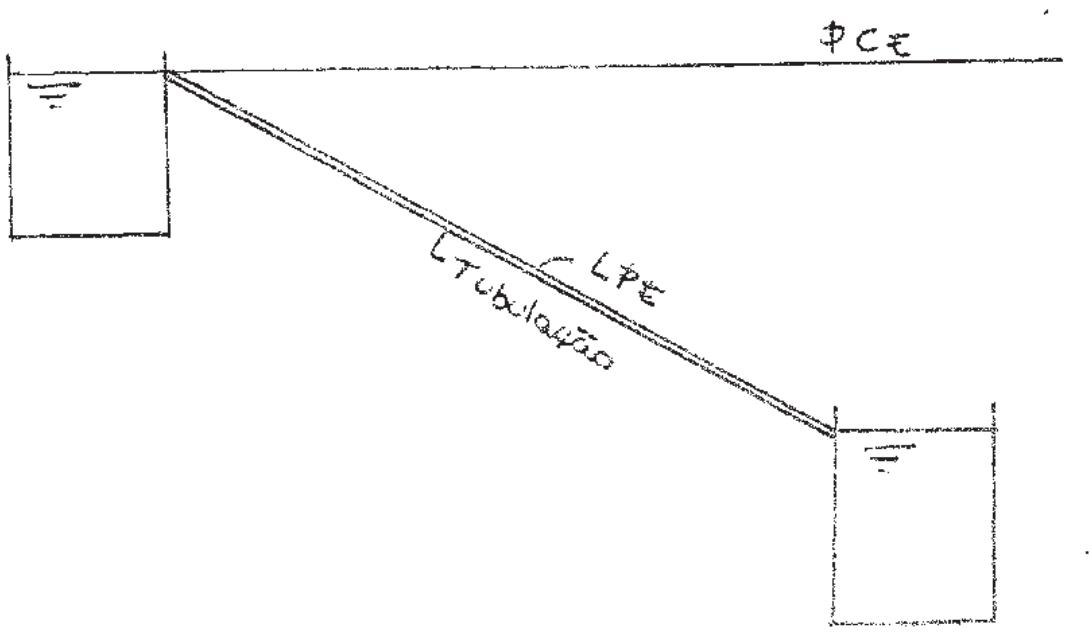
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,75	0,90	1,05	1,50
ANOS	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"	20"	24"	30"	36"	42"	60"
00	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
0	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
5	117	118	119	120	120	120	120	120	120	120	121	122	122	122
10	106	108	109	110	110	110	111	112	112	112	113	113	113	113
15	96	100	102	103	103	103	104	104	105	105	106	106	106	106
20	88	93	94	96	97	97	98	98	99	99	100	100	100	100
25	81	86	89	91	91	91	92	92	93	93	94	94	94	95
30	75	80	83	85	86	86	87	87	88	89	90	90	90	91
35	70	75	78	80	82	82	83	84	85	85	86	86	87	88
40	64	71	74	76	78	78	79	80	81	81	82	83	83	84
45	60	67	71	73	75	76	76	77	77	78	78	79	80	81
50	56	63	67	70	71	72	73	73	74	75	76	76	77	78

OBSERVAÇÕES: 1ª.) Aço soldado: tomar os valores do quadro 5 anos mais velhos;
2ª) Aço rebitado: tomar os valores do quadro 10 anos mais velhos.

Posição 1:

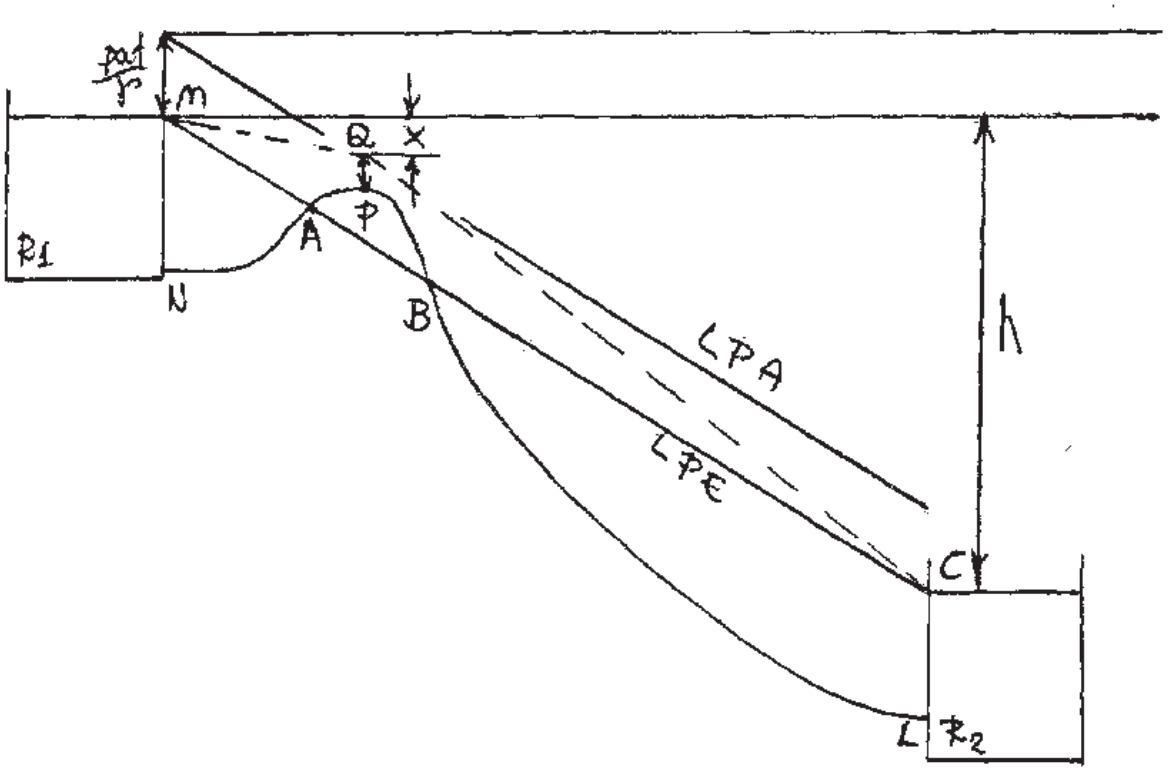


Posição 2:

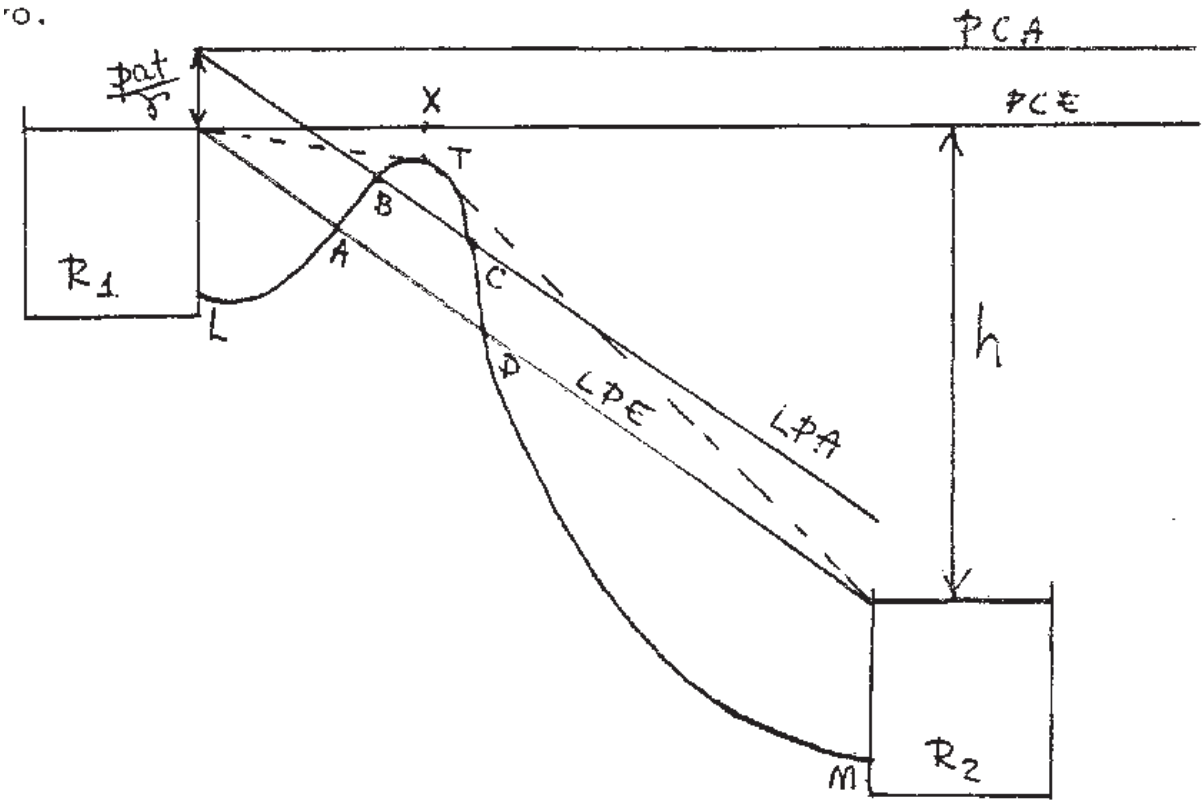


Onde: .PCA : Plano de Carga Absoluta ;
.PCE : Plano de Carga Efetiva ;
.LPA : Linha Piezométrica Absoluta ;
.LPE : Linha Piezométrica Efetiva .

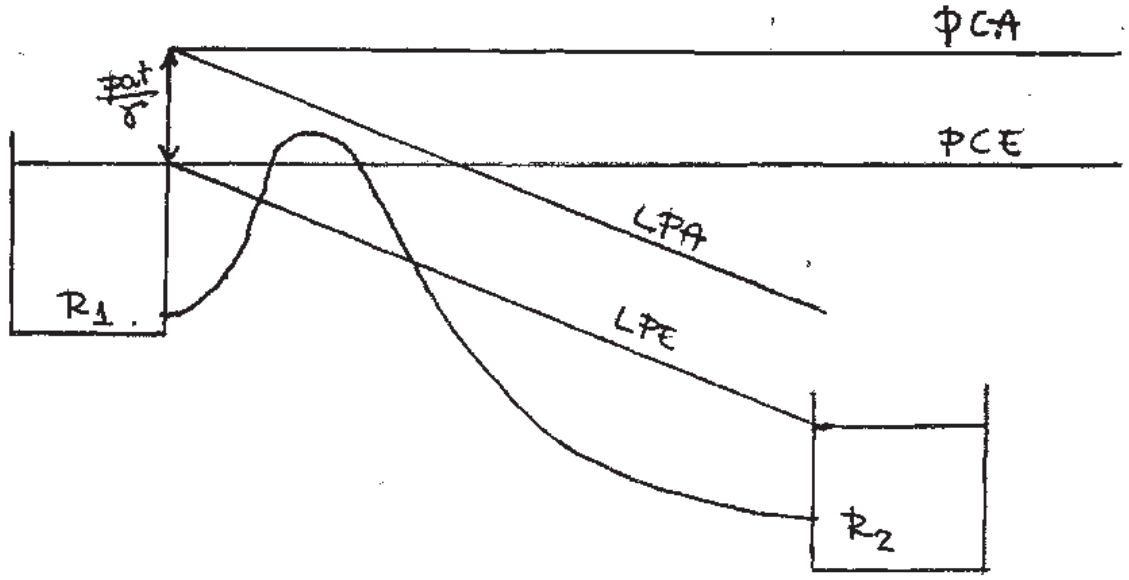
Posição 3:



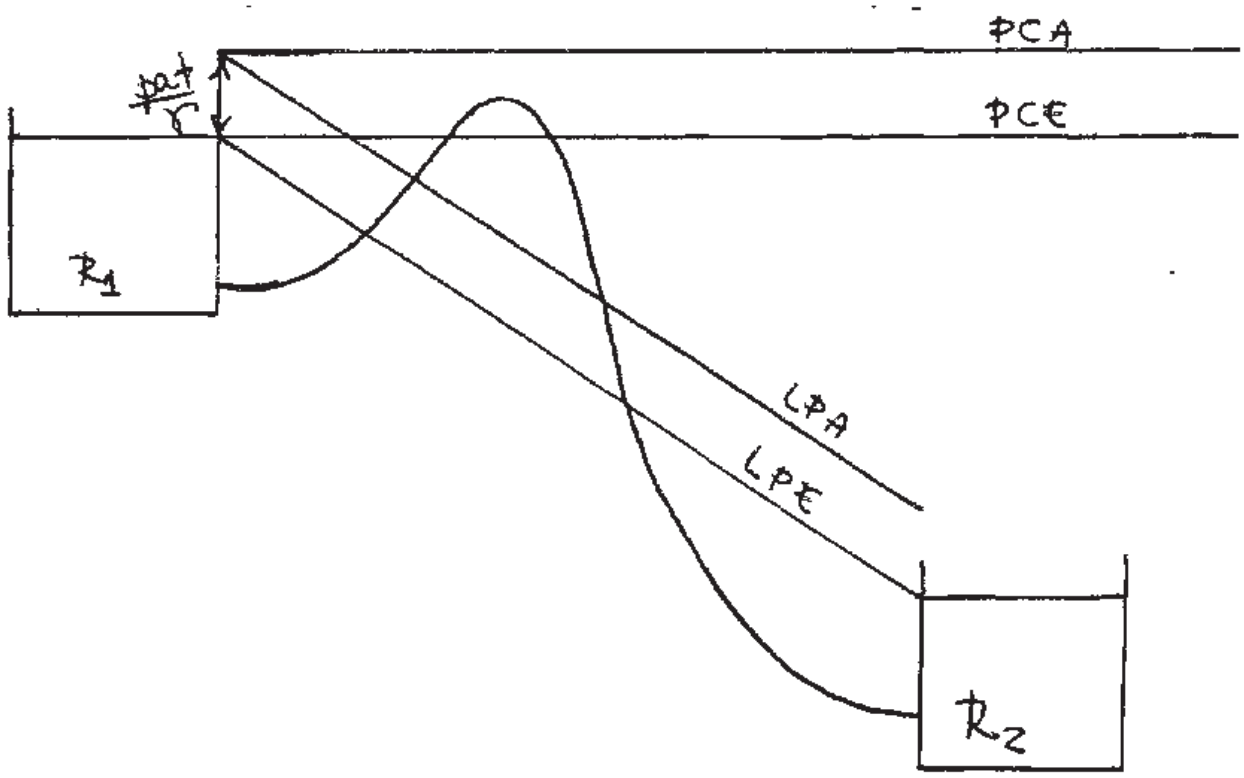
Posição 4:



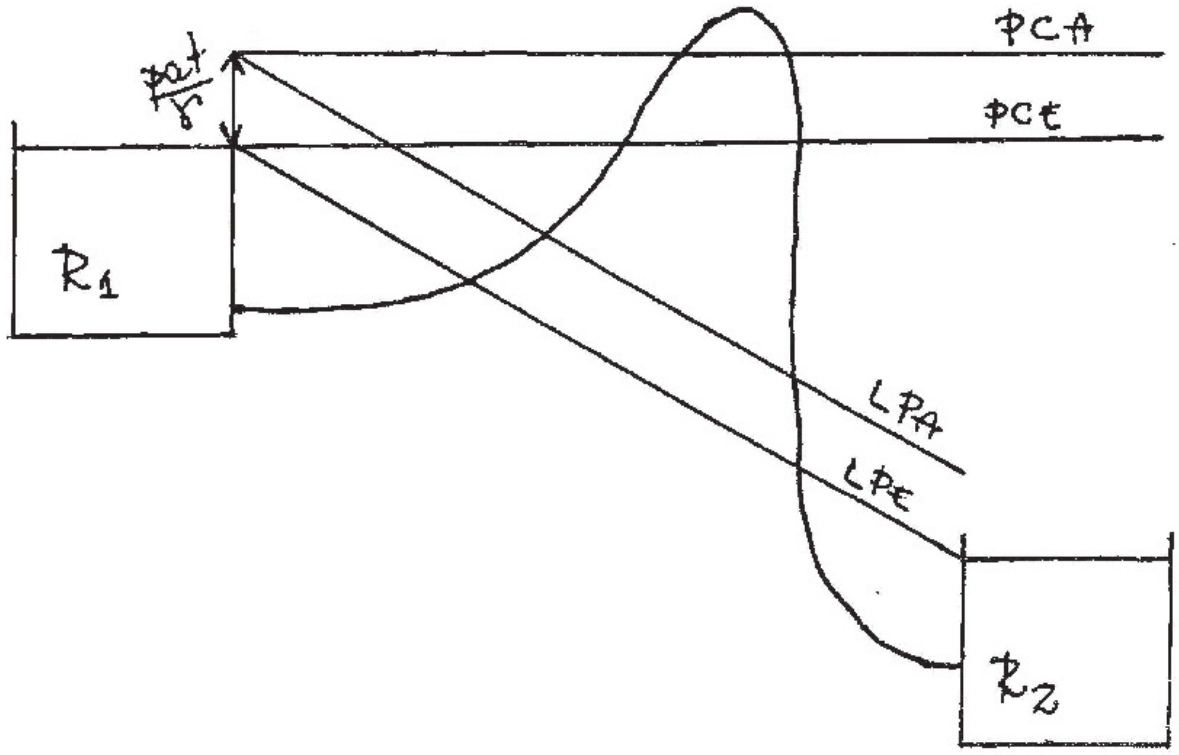
Posição 5:



Posição 6:



Posição 7:



RÊDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Limites de velocidades e de vazão com base na seguinte equação:

$V_{max}=0,6 + 1,5.D$

Na qual: V_{max} (m/s) e D (m)

D (mm)	V (m/s)	Q (l/s)
50	0,67	1,30
60	0,70	2,00
75	0,71	3,10
100	0,75	5,90
125	0,79	9,80
150	0,83	14,80
200	0,90	28,50
250	0,97	48,00
300	1,05	74,00
350	1,13	108,00
400	1,20	151,00
450	1,28	202,80
500	1,35	265,00
550	1,43	338,50
600	1,50	424,10

REDE RAMIFICADA

Trecho	Compr.	Vazão (l/s)				Diâm. Tubul.	Perda de carga		Cota do terreno (m)		Cota Piezométrica (m)		Pressão disp. dinâmica (m)	
	(m)	Jusante	Marcha	Montante	Ficticía	(mm)	**J (m/m)**	Total (m)	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante