

7. ESCOAMENTO EM CONDUTOS FORÇADOS

7.1 Considerações Gerais

Tendo em vista a pressão de funcionamento, os condutos hidráulicos podem se classificar em:

a) Condutos forçados: nos quais a pressão interna é diferente da pressão atmosférica. Nesse tipo de conduto, as seções transversais são sempre fechadas e o fluido circulante as enche completamente. O movimento pode se efetuar em qualquer sentido do conduto; e

b) Condutos livres: nestes, o líquido escoante apresenta superfície livre, na qual atua a pressão atmosférica. A seção não necessariamente apresenta perímetro fechado e quando isto ocorre, para satisfazer a condição de superfície livre, a seção transversal funciona parcialmente cheia. O movimento se faz no sentido decrescente das cotas topográficas.

7.1.1 Equação de Bernoulli aplicada aos fluidos reais

Na dedução deste teorema, fundamentada na Equação de Euler, foram consideradas as seguintes hipóteses:

- a) o fluido não tem viscosidade;
- b) o movimento é permanente;
- c) o escoamento se dá ao longo de um tubo de fluxo; e
- d) o fluido é incompressível.

A experiência mostra que, em condições reais, o escoamento se afasta do escoamento ideal. A viscosidade dá origem a tensões de cisalhamento e, portanto, interfere no processo de escoamento. Em conseqüência, o fluxo só se

realiza com uma “perda” de energia, que nada mais é que a transformação de energia mecânica em calor e trabalho.

A equação de Bernoulli, quando aplicada a seções distintas da canalização, fornece a carga total em cada seção. Se o líquido é ideal, sem viscosidade, a carga ou energia total permanece constante em todas seções. Porém, se o líquido é real, o seu deslocamento da seção 1 para a seção 2 (Figura 40) ocorrerá mediante uma dissipação de energia, necessária para vencer as resistências ao escoamento entre as seções. Portanto, a carga total em 2 será menor do que em 1 e esta diferença é a energia dissipada sob forma de calor. Como a energia calorífica não tem utilidade no escoamento do líquido, diz-se que esta parcela é a perda de carga ou perda de energia, simbolizada comumente por h_f . É possível observar na Figura 40 que, independente da forma como a tubulação de encontra instalada, sempre haverá dissipação de energia quando o líquido estiver em movimento.

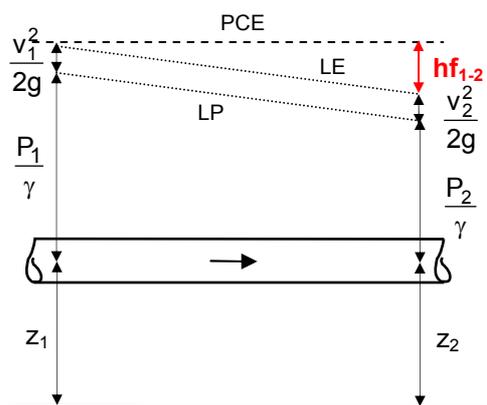
Analisando as Figuras, além do plano de referência, é possível identificar três planos:

- PCE → Plano de carga efetivo: é a linha que demarca a continuidade da altura da carga inicial, através das sucessivas seções de escoamento;
- LP → Linha piezométrica: é aquela que une as extremidades das colunas piezométricas. Fica acima do conduto de uma distância igual à pressão existente, e é expressa em altura do líquido. É chamada também de gradiente hidráulico; e
- LE → Linha de energia: é a linha que representa a energia total do fluido. Fica, portanto, acima da linha piezométrica de uma distância correspondente à energia de velocidade e se o conduto tiver seção uniforme, ela é paralela à piezométrica. A linha piezométrica pode subir ou descer, em seções de descontinuidade. A linha de energia somente desce.

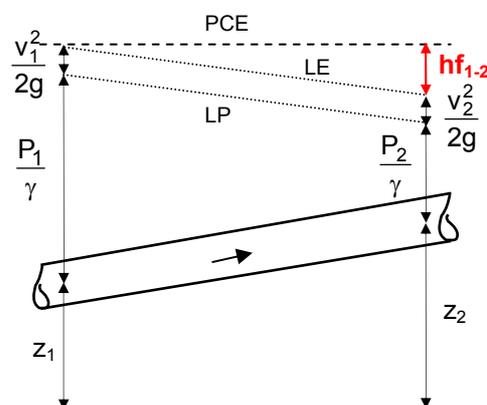
Nas Figuras, $E_1 - E_2 = h_f$ ou $E_1 = E_2 + h_f$

Como $E = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z$, tem-se que: $\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_f$

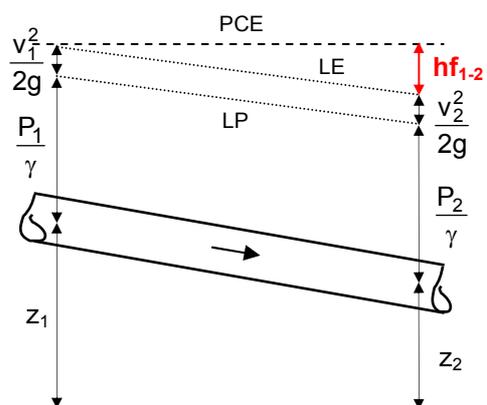
que é a equação de Bernoulli aplicada em duas seções quaisquer de um escoamento de fluido real.



a



b



c

Figura 40 - Escoamento de um líquido real em um conduto forçado, mostrando a carga total em duas seções de escoamento: a) tubulação em nível; b) tubulação em aclive; c) tubulação em declive.

Quando existem peças especiais e trechos com diâmetros diferentes, as linhas de carga e piezométrica vão se alterar ao longo do conduto. Para traçá-las, basta conhecer as cargas de posição, pressão e velocidade nos trechos onde há singularidades na canalização. A instalação esquematizada na Figura 41 ilustra esta situação.

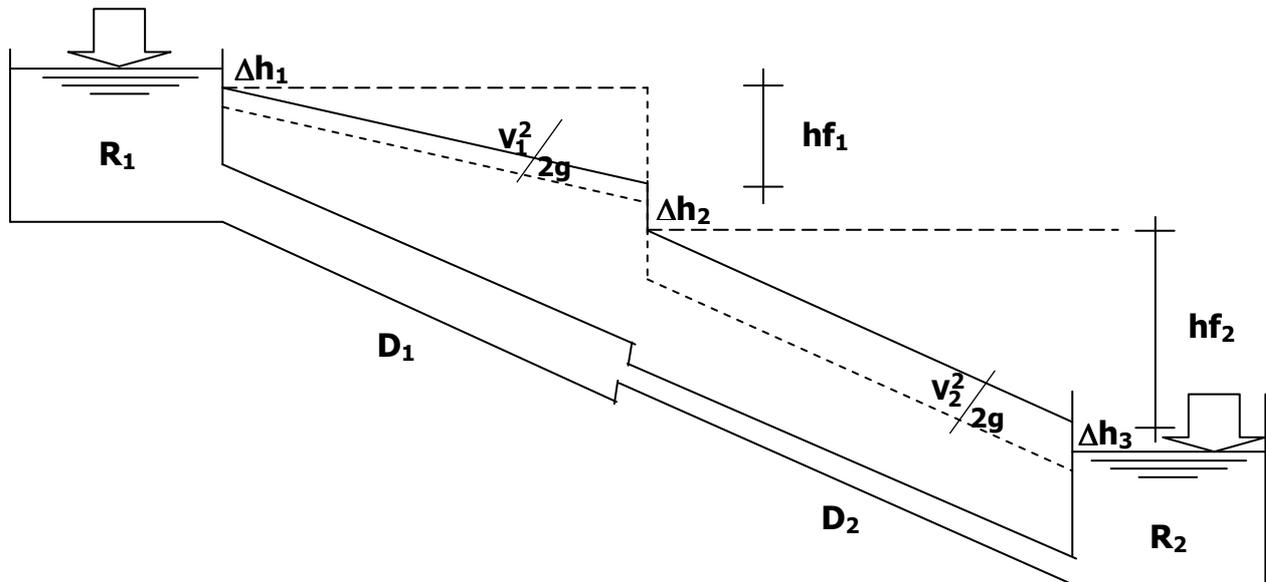


Figura 41 – Perfil de uma canalização que alimenta o reservatório R₂, a partir do reservatório R₁, com uma redução de diâmetro.

Do reservatório R1 para R2 existe uma perda de carga total “ht”, igual à diferença de nível entre os mesmos. Esta perda de carga é devida à:

- Δh_1 - perda de carga localizada na entrada da canalização;
- hf_1 - perda de carga contínua no conduto de diâmetro D_1 ;
- Δh_2 - perda de carga localizada na redução do conduto, representada pela descontinuidade da linha de carga;
- hf_2 - perda de carga contínua no trecho de diâmetro D_2 ; e
- Δh_3 - perda de carga na entrada do reservatório.

Para traçar esta linha de carga é necessário calcular as cargas logo após a entrada da canalização, imediatamente antes e após a redução de diâmetro e na entrada do reservatório.

Exercício: Qual a energia consumida para vencer as resistências ao escoamento em um trecho do conduto de 100 mm. A pressão no início é de 0,2 MPa e no final 0,15 MPa. A velocidade média de escoamento é de $1,5 \text{ m s}^{-1}$. Considere uma diferença de nível na tubulação de 1 m.

7.1.2 Regimes de movimento

Os hidráulicos do século XVIII, já observavam que dependendo das condições de escoamento, a turbulência era maior ou menor, e conseqüentemente a perda de carga também o era. Osborne Reynolds fez uma experiência para tentar caracterizar o regime de escoamento, que a princípio ele imaginava depender da velocidade de escoamento. A experiência, bastante simples, consistia em fazer o fluido escoar com diferentes velocidades, para que se pudesse distinguir a velocidade de mudança de comportamento dos fluidos em escoamento e caracterizar estes regimes. Para visualizar mudanças, incluiu-se um líquido de contraste (corante).

Inicialmente, usando pequenas velocidades, ele observou que o líquido escoava-se ordenadamente, como se lamínulas do líquido se deslizassem uma em relação às outras, e a este estado de movimento, ele denominou *laminar*. Logo que a velocidade foi sendo aumentada gradativamente, ele observou que o líquido passou a escoar de forma desordenada, com as trajetórias das partículas se cruzando, sem uma direção definida. A este estado de movimento, ele chamou de *turbulento ou desordenado*.

Tentando repetir a sua experiência, em sentido contrário, começando de uma velocidade maior (regime turbulento) e, gradativamente reduzindo a velocidade, ele observou que o fluido passou do regime turbulento para o laminar, porém a velocidade que ocorreu nesta passagem era menor que aquela em que o regime passou laminar a turbulento. Ficou, portanto, uma faixa de velocidade onde não se pôde definir com exatidão qual o regime de escoamento. A esta faixa, chamou de *zona de transição*.

Ele distinguiu inicialmente também duas velocidades:

- velocidade crítica superior: é aquela onde ocorre a passagem do regime laminar para o turbulento; e
- velocidade crítica inferior: é aquela onde ocorre a passagem do regime turbulento para o laminar.

Repetiu-se a experiência de Reynolds fazendo-a para várias combinações de diâmetros e fluidos e concluiu-se que não só a velocidade é importante para caracterizar o regime de escoamento, mas também o diâmetro da canalização e o fluido escoante. Chegou-se a uma expressão que caracteriza o regime de

$$\text{escoamento : } R_e = \frac{v D}{\nu}$$

em que:

R_e = é conhecido como número de Reynolds, adimensional;

v = a velocidade média de escoamento, m s^{-1} ;

D = o diâmetro da canalização, m; e

ν = a viscosidade cinética do fluido, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$. ($\nu_{\text{água}} = 1,02 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$)

Para definir o regime, basta calcular o número de Reynolds e caracterizá-lo pelos limites.

Se $R_e < 2.000$ - regime laminar

Se $R_e > 4.000$ - regime turbulento

Se $2.000 < R_e < 4.000$ - zona de transição

Na zona de transição não se pode determinar com precisão a perda nas canalizações.

No dia a dia, pode-se facilmente distinguir estes escoamentos. Basta observar o comportamento da fumaça de um cigarro descansando em um cinzeiro, em um ambiente sem ventilação. Próximo à brasa, a fumaça escoar em uma trajetória retilínea e definida, sem perturbações. É o escoamento laminar. Na medida em que este filete de fumaça se ascende na atmosfera, ele vai se acelerando e se turbilhonando, e sua trajetória não tem definição. A cada

instante o vetor velocidade de cada partícula muda de direção. É o que caracteriza um regime turbulento.

De modo geral, por causa da pequena viscosidade da água e pelo fato da velocidade de escoamento ser sempre superior a $0,4$ ou $0,5 \text{ m s}^{-1}$, o regime dos escoamentos, na prática, é turbulento.

7.1.3 Perda de carga

A princípio acreditava-se que a perda de energia ao escoamento era resultado do atrito da massa fluida com as paredes da tubulação. Todavia, essa conceituação é errônea, pois independente do tipo de escoamento, existe uma camada de velocidade igual a zero junto às paredes (camada limite). Isto significa que a massa fluida em escoamento não atrita com as paredes do conduto.

Portanto, no regime laminar, a perda de carga deve-se unicamente à resistência oferecida pela camada mais lenta àquela mais rápida que lhe é adjacente, ou seja, a energia hidráulica é transformada em trabalho na anulação da resistência oferecida pelo fluido em escoamento em função da sua viscosidade. A resistência é função das tensões tangenciais que promovem a transferência da quantidade de movimento.

No regime turbulento, além do fenômeno descrito acima, existe ainda perda de energia nos choques moleculares oriundos do movimento desordenado das partículas.

A perda de carga está diretamente relacionada com a turbulência que ocorre no conduto. Com esta ponderação, é possível imaginar que, em uma tubulação retilínea, a perda de carga seja menor se comparada com uma tubulação semelhante, mas com uma série de peças especiais, tais como curvas, cotovelos, etc. As peças especiais provocam perdas localizadas pela maior turbulência na região da peça, pois alteram o paralelismo das linhas de corrente.

Para efeito didático vamos separar as perdas localizadas da perda de carga ao longo de uma canalização retilínea, ou perda de carga contínua.

7.2 Cálculos dos condutos forçados: perda de carga contínua

Desde o século XVIII, os hidráulicos vêm estudando o comportamento dos fluidos em escoamento. Darcy, hidráulico suíço, e outros concluíram, naquela época, que a perda de carga ao longo das canalizações era:

- diretamente proporcional ao comprimento do conduto;
- proporcional a uma potência da velocidade;
- inversamente proporcional a uma potência do diâmetro;
- função da natureza das paredes, no caso de regime turbulento;
- independente da pressão sob a qual o líquido escoar; e
- independente da posição da tubulação e do sentido de escoamento.

Naquela época, surgiram numerosas fórmulas para o dimensionamento das canalizações. A maioria delas era específica para as condições de trabalho de uma dada região. Hoje, o número de fórmulas utilizadas é bem menor.

7.2.1 Fórmulas práticas

a) Fórmula de Hazen-Williams

Essa fórmula talvez seja a mais utilizada nos países de influência americana. Ela originou-se de um trabalho experimental com grande número de tratamentos (vários diâmetros, vazões e materiais) e repetições. Ela deve ser utilizada para escoamento de água à temperatura ambiente, para tubulações com diâmetro maior ou igual a 2" ou 50mm e para regime turbulento. Ela possui várias apresentações:

$$v = 0,355 C D^{0,63} J^{0,54} \quad \text{ou} \quad Q = 0,279 C D^{2,63} J^{0,54} \quad \text{ou} \quad J = \frac{10,646 Q^{1,852}}{C^{1,852} D^{4,87}}$$

em que:

v - velocidade, m s⁻¹;

D - diâmetro da canalização, m;

Q - vazão, m³ s⁻¹;

J - perda de carga unitária, $m\ m^{-1}$; e

C - coeficiente que depende da natureza das paredes e estado de conservação de suas paredes internas, Tabela 1.

Tabela 1 - Valores do coeficiente C da fórmula de Hazen-Williams (apresentados por E. T. Neves).

Tipo de conduto	C
Aço corrugado	60
Aço com juntas “loc-bar”, novas	130
Aço com juntas “loc-bar”, usadas	90-100
Aço galvanizado	125
Aço rebitado, novo	110
Aço rebitado, usado	85-90
Aço soldado, novo	130
Aço soldado, usado	90-100
Aço soldado com revestimento especial	130
Aço zincado	140-145
Alumínio	140-145
Cimento-amianto	130-140
Concreto, com bom acabamento	130
Concreto, com acabamento comum	120
Ferro fundido, novo	130
Ferro fundido, usado	90-100
Plástico	140-145
PVC rígido	145-150

b) Fórmula de Flamant

A fórmula de Flamant deve ser aplicada também para água à temperatura ambiente, para instalações domiciliares e tubulações com diâmetro variando de 12,5 a 100 mm. Inicialmente foram desenvolvidas as equações para ferro fundido e aço galvanizado.

$$J = 0,00092 \frac{v^{1,75}}{Q^{1,25}} \quad \text{ou} \quad J = 0,001404 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$$

Para tubos de plástico, a equação é apresentada como:

$$J = 0,000826 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$$

c) Fórmula de Darcy-Weisbach ou Universal

Esta fórmula é de uso geral, tanto serve para escoamento em regime turbulento quanto para o laminar, e é também utilizada para toda a gama de diâmetros.

$$J = \frac{f v^2}{D 2 g} \quad \text{ou} \quad J = \frac{8 f Q^2}{\pi^2 g D^5}$$

em que “ f ” é um coeficiente que depende do material e estado de conservação das paredes, ou determinado no diagrama de Moody (Figura 42).

Na hipótese de regime laminar, f é independente da rugosidade relativa (e/D) e é unicamente função do número de Reynolds:

$$f = \frac{64}{Re}$$

No regime turbulento, o valor de f é dependente do número de Reynolds e da rugosidade relativa, em se tratando da transição. No regime turbulento pleno, o número de Reynolds não tem influência, mas apenas a rugosidade relativa.

A rugosidade relativa é a relação entre a rugosidade do material e seu diâmetro. A Tabela 2 fornece a rugosidade dos materiais mais comumente utilizados.

Nestas equações, a perda de carga é unitária, ou seja, é a perda de carga que ocorre em um metro de canalização retilínea. A perda de carga ao longo de toda a extensão da canalização é dada por:

$$h_f = J L \rightarrow \text{em que “L” é o comprimento total da canalização retilínea, m.}$$

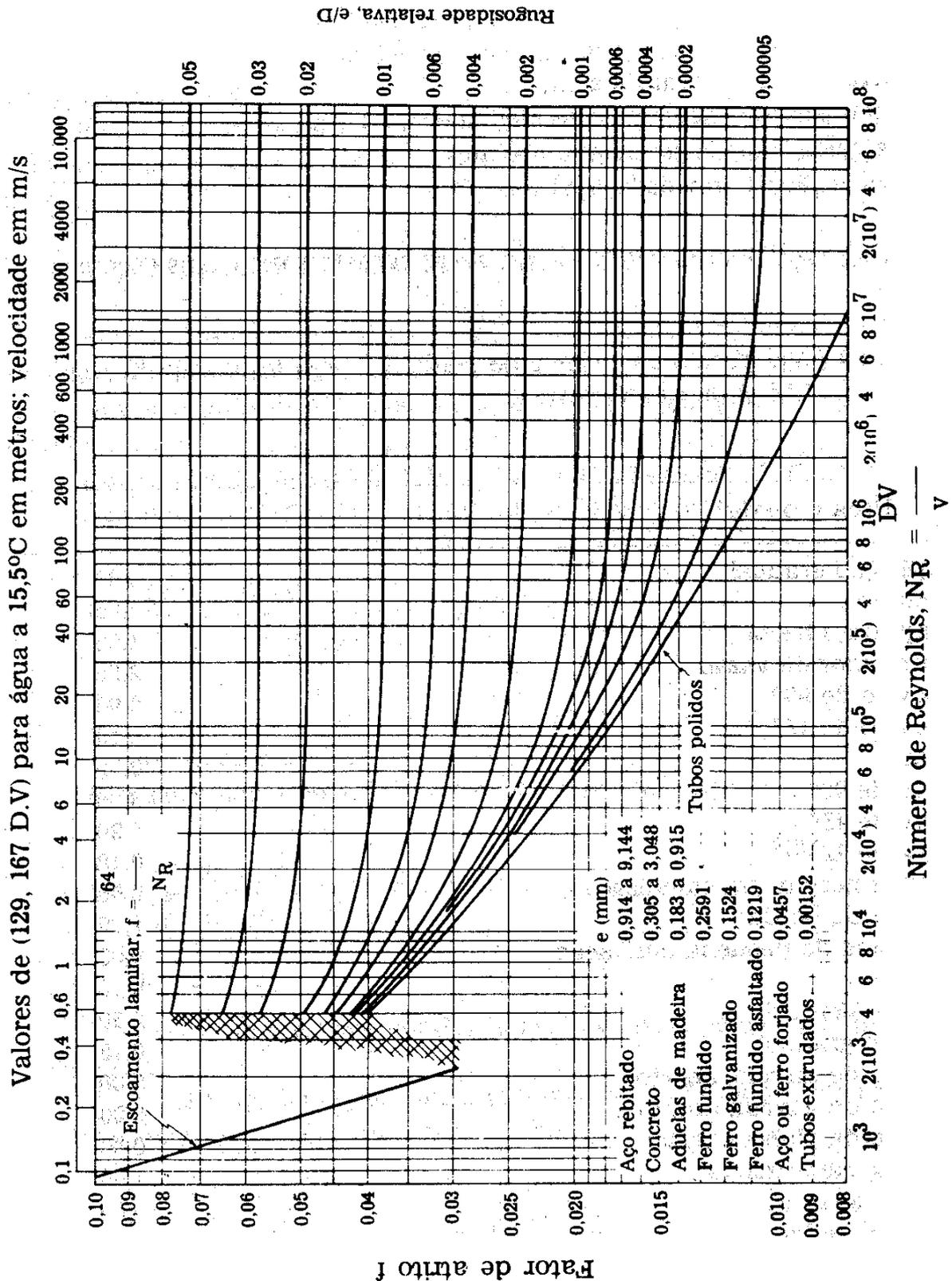


Figura 42 - Diagrama de Stanton, segundo Moody, para determinação de valores do coeficiente f , em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa.

Tabela 2 - Valores da rugosidade média (e) dos materiais empregados em condutos forçados.

Tipo de material	e (mm)
Ferro fundido novo	0,26 - 1
Ferro fundido enferrujado	1 - 1,5
Ferro fundido incrustado	1,5 - 3
Ferro fundido asfaltado	0,12 - 0,26
Aço laminado novo	0,0015
Aço comercial	0,046
Aço rebitado	0,092 - 9,2
Aço asfaltado	0,04
Aço galvanizado	0,15
Aço soldado liso	0,1
Aço muito corroído	2,0
Aço rebitado, com cabeças cortadas	0,3
Cobre ou vidro	0,0015
Concreto centrifugado	0,07
Cimento alisado	0,3 - 0,8
Cimento bruto	1 - 3
Madeira aplainada	0,2 - 0,9
Madeira não aplainada	1,0 - 2,5
Alvenaria de pedra bruta	8 - 15
Tijolo	5
Plástico	0,06
Alvenaria de pedra regular	1

Todas as equações têm muito em comum, principalmente se forem tomadas àquelas que são apresentadas com o parâmetro vazão. Para simplificar vamos generalizá-las por:

$$J = \beta \frac{Q^n}{D^m}$$

em que:

$$\beta = \frac{10,646}{C^{1,85}}$$

$n = 1,852$ Para equação de Hazen-Williams;

$$m = 4,87$$

$$\beta = 0,000826$$

$n = 1,75$ Para a equação de Flamant, para condutos de plástico; e

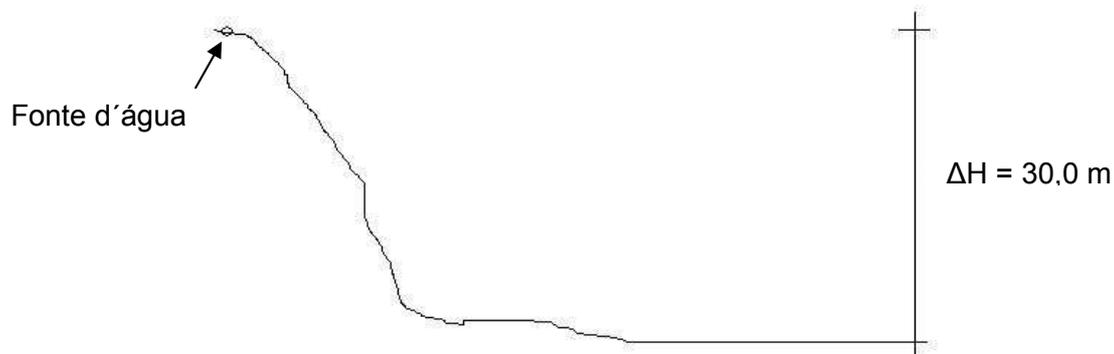
$$m = 4,75$$

$$\beta = \frac{8 f}{\pi^2 g}$$

$n = 2$ Para a equação de Darcy ou Universal.

$m = 5$

Exercício: Com base no esquema abaixo, dimensione uma tubulação de ferro fundido novo, com 500 m de comprimento, para transportar uma vazão de 25 L s^{-1} , de modo que haja uma pressão disponível na extremidade da tubulação de 20 mca (resolver pelas três equações).



7.3 Cálculos de condutos forçados: Perda de carga localizada

A perda de carga localizada é aquela causada por acidentes colocados ou existentes ao longo da canalização, tais como as peças especiais. Em tubulações com longo comprimento e poucas peças a turbulência causada por essas passa a ser desprezível. Porém em condutos com muitas peças e menor comprimento, este tipo de perda tem uma importância muito grande, como no caso de instalações prediais. Podem-se desconsiderar as perdas localizadas quando a velocidade da água é pequena ($v < 1,0 \text{ m s}^{-1}$), quando o comprimento é maior que 4.000 vezes o diâmetro e quando existem poucas peças no conduto.

No projeto, as perdas localizadas devem ser somadas à contínua. Considerar ou não as perdas localizadas é uma atitude que o projetista irá tomar, em face das condições locais e da experiência do mesmo.

a) Expressão de Borda-Belanger

A expressão que calcula as perdas partiu do teorema de Borda-Berlanger. É assim apresentada:

$$\Delta h = K \frac{v^2}{2g}$$

em que:

Δh - perda de carga causada por uma peça especial, m;

K - coeficiente que depende de cada peça e diâmetro, obtido experimentalmente, Tabela 3.

O valor de K depende do regime de escoamento. Para escoamento plenamente turbulento, $R_e > 50.000$, o valor de K para as peças especiais é praticamente constante, e são os valores encontrados nas tabelas e ábacos.

b) Método dos comprimentos virtuais

Ao se comparar à perda de carga que ocorre em uma peça especial, pode-se imaginar que esta perda também seria oriunda de um atrito ao longo de uma canalização retilínea. Pergunta-se: Que comprimento de uma canalização provocaria a mesma perda? Para saber, basta igualar a equação de perda de carga localizada, com a perda de carga contínua. Portanto:

$$\text{Perda contínua: } h_f = \frac{f v^2}{D 2g} L$$

$$\text{Perda localizada: } \Delta h = K \frac{v^2}{2g}$$

Como um se iguala ao outro, temos:

$$h_f = \Delta h \quad \rightarrow \quad \frac{f v^2}{D 2g} L = K \frac{v^2}{2g} \quad \rightarrow \quad L = \frac{K}{f} D$$

Tabela 3 - Valor do coeficiente K, para cálculos das perdas de carga localizadas, em função do tipo de peça, segundo J. M. Azevedo Neto.

Tipo da peça	K
Ampliação gradual	0,30
Bocais	2,75
Comporta, aberta	1,00
Controlador de vazão	2,50
Cotovelo de 90°	0,90
Cotovelo de 45°	0,40
Crivo	0,75
Curva de 90°	0,40
Curva de 45°	0,20
Curva de 22,5°	0,10
Entrada normal de canalização	0,50
Entrada de Borda	1,00
Existência de pequena derivação	0,03
Junção	0,04
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 direita	0,60
Tê, saída de lado	1,30
Tê, saída bilateral	1,80
Válvula de pé	1,75
Válvula de retenção	2,50

A Tabela 4 contém os valores do comprimento retilíneo, equivalentes a cada peça especial. Este método, portanto consiste em adicionar ao trecho retilíneo real da canalização, um trecho retilíneo fictício, gerando um comprimento virtual maior que o real. Este comprimento virtual é o que deve ser usado na fórmula de perda de carga contínua total. O valor de carga por este procedimento já inclui as perdas localizadas.

Tabela 4 - Comprimento fictício em metros das principais peças especiais, para os diâmetros comerciais mais usados.

Tipo de Peça	Diâmetros comerciais (mm)									
	50	63	75	100	125	150	200	250	300	350
Cotovelo 90 (rl)	1,1	1,3	1,6	2,1	2,7	3,4	4,3	5,5	6,1	7,3
Cotovelo 90 (rm)	1,4	1,7	2,1	2,8	3,7	4,3	5,5	6,7	7,9	9,5
Cotovelo 90 (rc)	1,7	2,0	2,5	3,4	4,2	4,9	6,4	7,9	9,5	10,0
Cotovelo 45	0,8	0,9	1,2	1,5	2,9	2,3	3,0	3,8	4,6	5,3
Curva 90 (rl)	0,6	0,8	1,0	1,3	1,6	1,9	2,4	3,0	3,6	4,4
Curva 90 (rc)	0,9	1,0	1,3	1,6	2,1	2,5	3,3	4,1	4,8	5,4
Curva 45	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,1	1,5	1,8	2,2	2,5
Entr.normal	0,7	0,9	1,1	1,6	2,0	2,5	3,5	4,5	5,5	6,2
Entr. borda	1,5	1,9	2,2	3,2	4,0	5,0	6,0	7,5	9,0	11,0
Reg gav Ab	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,7	2,1	2,4
Reg. gl. Ab.	17,0	21,0	26,0	34,0	43,0	51,0	67,0	85,0	102	120
Reg.angulo	8,5	10,0	13,0	17,0	21,0	26,0	34,0	43,0	51,0	60,0
Tê pass. Direta	1,1	1,3	1,6	2,1	2,7	3,4	4,3	5,5	6,1	7,3
Tê saída de lado	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4	10,0	13,0	16,0	19,0	22,0
Tê saída bilater.	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4	10,0	13,0	16,0	19,0	22,0
Válv. Pe/cr.	14,0	17,0	20,0	23,0	30,0	39,0	52,0	65,0	78,0	90,0
Saída de canal.	1,5	1,9	2,2	3,2	4,0	5,0	6,0	7,5	9,0	11,0
Válvula retenção	4,2	5,2	6,3	8,4	10,0	13,0	16,0	20,0	24,0	28,0

c) Método dos diâmetros equivalentes

Este método é uma particularidade do método anterior. Observando-se o anterior, nota-se que o comprimento vai depender do diâmetro e de uma relação K/f . Esta razão depende do número de Reynolds, K e f dependem dele. Porém, em regimes plenamente turbulentos, K e f passam a ficarem constantes com o número de Reynolds. Portanto a relação K/f fica dependente apenas da rugosidade de cada material. Em termos práticos, e como as perdas localizadas são pequenas em relação às contínuas, pode-se considerar que K e f são constantes. Por conseguinte, o comprimento fictício a ser adicionado ao comprimento real poderá ser expresso em um número de diâmetro:

$$\frac{K}{f} = n \quad (\text{constante}), \text{ ou seja, } L = n D$$

Em que n expressa o comprimento fictício de cada peça em números de diâmetros, Tabela 5.

Tabela 5 - Diâmetros equivalentes das principais peças especiais.

Tipo da peça	n° de diâmetros
Ampliação gradual	12
Cotovelo de 90°	45
Curva de 90°	30
Cotovelo de 45°	20
Curva de 45°	15
Entrada normal	17
Entrada de Borda	35
Junção	30
Redução gradual	6
Registro de gaveta, aberto	8
Registro de globo, aberto	350
Registro de ângulo, aberto	170
Saída de canalização	35
Tê, passagem direta	20
Tê, saída bilateral	65
Válvula de pé com crivo	250
Válvula de retenção	100

Nos problemas de condutos forçados, são quatro os elementos hidráulicos:

Q – vazão

v – velocidade de escoamento

J – perda de carga unitária

D – diâmetro da canalização

Na solução dos problemas, têm-se disponível duas equações:

- equação da continuidade: $Q = A V$

- equação genérica de perda de carga: $J = \beta \frac{Q^n}{D^m}$

Isto significa que para um sistema ser determinado, é necessário conhecer 2 dos 4 elementos hidráulicos.

A existência de peças especiais, bem como o seu número, além do material constituinte da tubulação deverão ser de conhecimento prévio do projetista. Nos problemas práticos, a vazão Q é quase sempre um elemento conhecido. Se for água que vai ser conduzida, deve-se saber, a priori, a sua utilidade e seu valor. Normalmente o diâmetro é um elemento incógnito e seu valor deve ser minimizado, pois reflete diretamente nos custos da canalização. Por outro lado, se o escoamento não é por gravidade, um menor diâmetro provocará uma maior perda de carga que implicará em um maior consumo de energia. Valores práticos de velocidade existem e podem orientar o projetista na definição do melhor diâmetro.

A literatura cita limites e valores de velocidade média recomendados para as mais diferentes situações:

- água com material em suspensão..... $v > 0,60$ m/s
- para instalações de recalque..... $0,55 < v < 2,40$ m/s
- mais usual..... $1,00 < v < 2,00$ m/s

7.4 Condutos Equivalentes

Conceito: Um conduto é equivalente a outro ou a outros quando escoar a mesma vazão sob a mesma perda de carga total.

Pode-se ter uma gama de condutos equivalentes, porém serão apresentados os condutos equivalentes em série e em paralelo.

7.4.1. Condutos em série ou misto

São os condutos constituídos por trechos de tubulação, com mais de um diâmetro diferente, conforme ilustra a Figura 43.

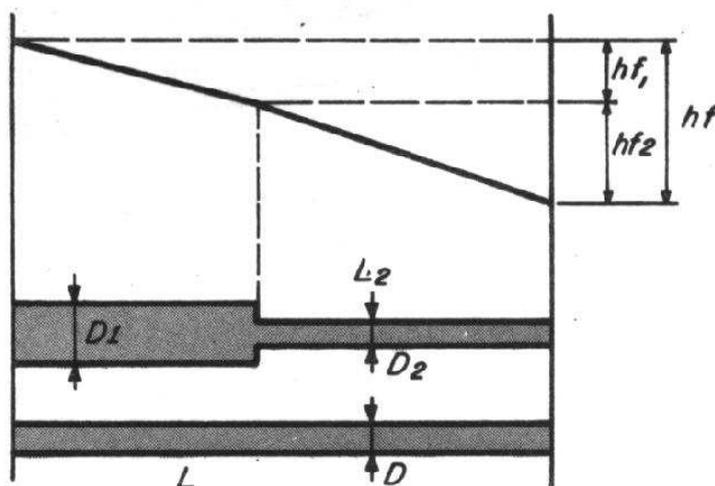


Figura 43 - Conduto misto com 2 diâmetros.

Desconsiderando as perdas secundárias ou localizadas:

$$h_f = h_{f_1} + h_{f_2} + h_{f_3} \dots$$

em que :

h_f = a perda de carga total no conduto;

h_{f_1} = a perda de carga contínua no trecho de diâmetro D_1 e comprimento L_1 ;

h_{f_2} = idem para diâmetro D_2 e comprimento L_2 ; e

h_{f_3} = idem para diâmetro D_3 e comprimento L_3 .

Usando a fórmula genérica de perda de carga tem-se:

$$h_{f_1} = \beta_1 \frac{Q^n}{D_1^m} L_1 \quad ; \quad h_{f_2} = \beta_2 \frac{Q^n}{D_2^m} L_2 \quad ; \quad h_{f_3} = \beta_3 \frac{Q^n}{D_3^m} L_3 \quad ; \quad h_f = \beta_e \frac{Q^n}{D_e^m} L_e$$

$$\beta_e \frac{Q^n}{D_e^m} L_e = \beta_1 \frac{Q^n}{D_1^m} L_1 + \beta_2 \frac{Q^n}{D_2^m} L_2 + \beta_3 \frac{Q^n}{D_3^m} L_3$$

Para uma condição de mesma rugosidade,

$$\beta_e = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$$

E como a vazão deve ser a mesma, condição de ser equivalente, a equação simplifica-se:

$$\frac{L_e}{D_e^m} = \frac{L_1}{D_1^m} + \frac{L_2}{D_2^m} + \frac{L_3}{D_3^m}$$

que é a expressão que traduz a regra de Dupuit.

A aplicação prática desta regra se faz presente no dimensionamento dos condutos. Via de regra chega-se a diâmetros não comerciais. Como, por exemplo, cita-se um caso: $D = 133$ mm. Se for escolhido o diâmetro comercial 125 mm, este não irá fornecer a vazão desejada ou a perda ultrapassará o limite de projeto. Se for escolhido 150 mm, que é o imediatamente superior, a vazão será maior que a de projeto ou a perda de carga será menor que a projetada. Nesse caso, o problema pode ser resolvido com a colocação de um registro para aumentar a perda de carga total e conseqüentemente reduzir a vazão até o projetado. Porém, esta saída não é a mais econômica, pois o custo das tubulações cresce exponencialmente com o diâmetro. Então, a melhor solução técnica e econômica é fazer uma associação em série, ou seja, colocar um trecho do conduto com o diâmetro comercial imediatamente superior, e um trecho com o diâmetro comercial imediatamente inferior, de tal forma que este conduto misto seja equivalente ao projetado. Porém, quais os comprimentos de cada diâmetro? Suponha que o comprimento total seja L e os comprimentos de cada trecho seja L_1 e L_2 , de tal forma que:

$$L = L_1 + L_2 \text{ e que } h_f = h_{f1} + h_{f2}$$

Como genericamente $h_f = J L$, tem-se

$$J L = J_1 L_1 + J_2 L_2$$

Fazendo:

$$L_1 = L - L_2$$

$$JL = J_1 (L - L_2) + J_2 L_2$$

$$JL = J_1 L - J_1 L_2 + J_2 L_2$$

Rearranjando

$$L_2 (J_2 - J_1) = L (J - J_1) \quad \rightarrow \quad L_2 = \frac{(J - J_1)}{(J_2 - J_1)} L$$

em que:

L_2 = comprimento do trecho de diâmetro D_2 ;

J = perda de carga unitária no conduto de diâmetro não comercial;

J_1 = perda de carga unitária no conduto de diâmetro comercial D_2 ;

J_2 = perda de carga unitária no conduto de diâmetro comercial D_2 ; e

L = o comprimento total da canalização.

7.4.2. Condutos em paralelos ou múltiplos

São os condutos que têm as extremidades comuns, ou seja, a pressão no início de todos é a mesma. Também a pressão no final é comum a todos os condutos.

Observa-se pela Figura 44 que no ponto A, a vazão total Q se bifurca nas vazões Q_1, Q_2 e Q_3 . Na extremidade final, ponto B, estas vazões voltam a se somar, voltando-se novamente à vazão Q , portanto:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Pela equação genérica de perda de carga tem-se que:

$$Q = \left[\frac{h_f D^m}{\beta L} \right]^{\frac{1}{n}}$$

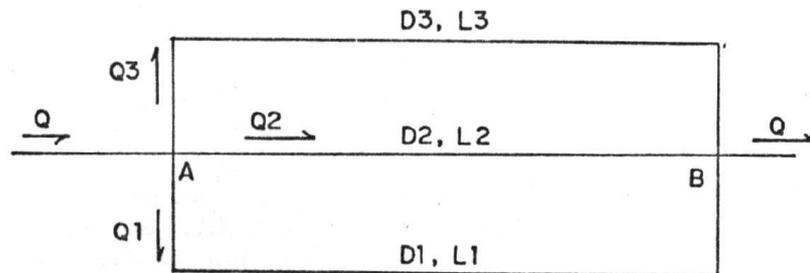


Figura 44 - Esquema de três condutos em paralelo.

Partindo-se desta equação:

$$\left[\frac{h_f D_e^m}{\beta_e L_e} \right]^{\frac{1}{n}} = \left[\frac{h_f D_1^m}{\beta_1 L_1} \right]^{\frac{1}{n}} + \left[\frac{h_f D_2^m}{\beta_2 L_2} \right]^{\frac{1}{n}} + \left[\frac{h_f D_3^m}{\beta_3 L_3} \right]^{\frac{1}{n}}$$

Considerando a mesma rugosidade para todos os condutos e como h_f deve ser igual em todos, condição de ser equivalente, tem-se:

$$\frac{D_e^{m/n}}{L_e^{1/n}} = \frac{D_1^{m/n}}{L_1^{1/n}} + \frac{D_2^{m/n}}{L_2^{1/n}} + \frac{D_3^{m/n}}{L_3^{1/n}}$$

Se todos os comprimentos forem iguais, a equação acima simplifica-se:

$$D_e^{m/n} = D_1^{m/n} + D_2^{m/n} + D_3^{m/n}$$

Generalizando:

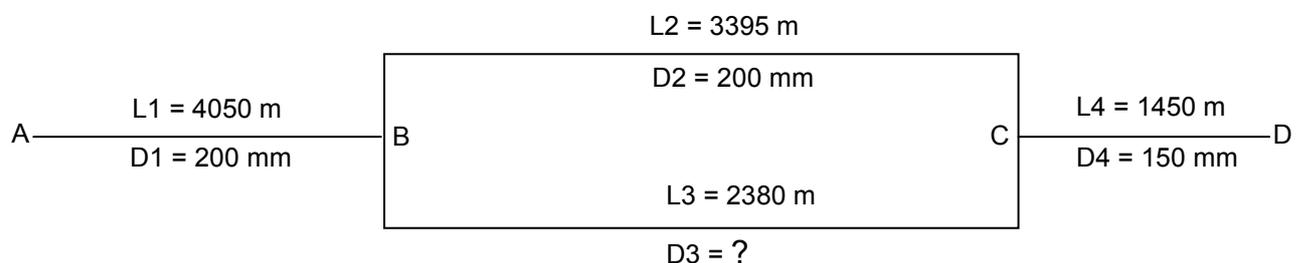
$$D_e^{m/n} = \sum_{i=1}^k D_i^{m/n}$$

Sendo K o número de condutos em paralelo.

$$\text{Se também os diâmetros forem iguais a } D: \begin{cases} D_e^{m/n} = K D^{m/n} \\ D_e = K^{n/m} D \end{cases}$$

A aplicação prática deste tipo de conduto está na expansão de uma área ou de um projeto hidráulico, Por exemplo. Se houver expansão, basta projetar o conduto para atender ao projeto global que deverá ficar em paralelo.

Exercício: A perda de carga entre os pontos A e D no sistema da figura abaixo é de 50 mca. Sabendo que a vazão no trecho AB é de 25 L s^{-1} , e adotando-se a fórmula de Hazen-Williams, com $C = 120$ para todos os trechos, calcular: a) as vazões nos trechos 2 e 3; b) o(s) diâmetro(s) comercial(is) e o(s) comprimento(s) correspondente(s) da tubulação 3, sabendo que os diâmetros disponíveis no mercado são 75, 100, 150, 200 mm. (Desprezar as perdas localizadas).



7.5 Sifão

É um conduto fechado que levanta o líquido a uma cota mais alta que aquela da superfície livre e o descarrega numa cota mais baixa. Para que o sifão funcione é necessário que se proceda a escorva do mesmo, ou seja, que o ar de seu interior seja substituído pelo fluido.

Uma vez que no ponto "b" (Figura 45) ocorre pressão absoluta inferior à atmosférica, percebe-se que o sifão tem seu funcionamento limitado. Com a diminuição da pressão em "b" (maior altura do ponto "b" em relação ao ponto "a") o fluxo tende a diminuir.

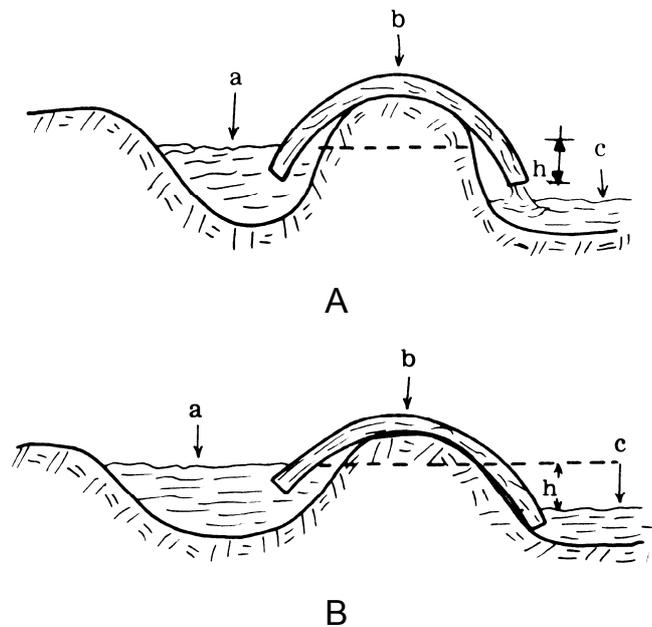


Figura 45 – Sifão trabalhando livre (A) e afogado (B).

Teoricamente, a diferença de nível entre “a” e “b” poderia corresponder ao valor local da pressão atmosférica; todavia, a pressão de vaporização e as perdas de energia fazem com que esta altura, na prática, seja inferior à pressão barométrica.

Os tubos utilizados como sifões são geralmente de alumínio, ferro ou plástico, com diâmetros que variam de $\frac{1}{2}$ a 12 polegadas.

A vazão no sifão depende do diâmetro, do comprimento, do material que constitui o tubo e da carga sob a qual o sifão está trabalhando. Uma vez escolhido o tipo de sifão, a vazão dependerá exclusivamente da carga hidráulica, que deve ser considerada na condição de descarga livre ou afogada (“h” da Figura).

A escolha do diâmetro vai depender da vazão que se deseja medir. A Tabela 6 apresenta a vazão média de sifões com $\frac{3}{4}$, 1, $1\frac{1}{2}$, $1\frac{3}{4}$ e 2 polegadas de diâmetro operando sob cargas que variam de 5 a 50 cm, para sifões de plástico com 1,5 m de comprimento.

Tabela 6 - Vazão e altura de carga para diferentes diâmetros de sifão

Carga h (cm)	Vazão ($L s^{-1}$) de sifão com diâmetro de				
	2"	1 3/4"	1 1/2"	1"	3/4"
4	1,12	0,62	0,48	0,24	0,10
6	1,38	0,77	0,60	0,29	0,13
8	1,59	0,89	0,69	0,34	0,15
10	1,78	1,00	0,78	0,38	0,18
12	1,95	1,10	0,85	0,42	0,20
14	2,11	1,19	0,93	0,45	0,22
16	2,26	1,28	0,99	0,48	0,23
18	2,40	1,36	1,05	0,51	0,25
20	2,53	1,44	1,11	0,54	0,27
22	2,65	1,51	1,17	0,57	0,28
24	2,77	1,58	1,22	0,59	0,30
26	2,89	1,65	1,27	0,62	0,31
28	3,00	1,71	1,32	0,64	0,33
30	3,10	1,78	1,37	0,66	0,34
32	3,21	1,84	1,42	0,68	0,35
34	3,31	1,90	1,46	0,71	0,36
36	3,40	1,95	1,51	0,72	0,38
38	3,50	2,01	1,55	0,75	0,39
40	3,59	2,06	1,59	0,77	0,40
42	3,68	2,12	1,63	0,78	0,41
44	3,77	2,17	1,67	0,80	0,43
46	3,85	2,22	1,71	0,82	0,44
48	3,93	2,27	1,75	0,84	0,45
50	4,02	2,32	1,79	0,86	0,46

Exercício: A Figura abaixo representa um sifão que conduz água do reservatório R1 até o ponto B, onde atua a pressão atmosférica. Determinar a vazão escoada e a pressão no seu ponto mais alto sabendo que a tubulação é de PVC ($f = 0,032$) e tem diâmetro de 150 mm.

