

PERDA DE CARGA EM CONDUTOS FORÇADOS

SANDRA MAUREN ELL¹; ALDIE TRABACHINI²

¹ Engenheira Civil, Profª. M.Sc, FATEC Tatuí – SP. E-mail: maurenell@yahoo.com.br

² Engenheiro de Produção Mecânica, Prof., FATEC Tatuí – SP. E-mail: atrabachini@fatectatui.edu.br

RESUMO

O estudo do processo de perda de carga em condutos forçados se faz presente para o correto dimensionamento de sistemas de bombeamento e de tubulações. O líquido ao escoar em um conduto é submetido a forças resistentes exercidas pelas paredes da tubulação e por uma região do próprio líquido, denominada camada limite. Assim, há o surgimento de forças cisalhantes que reduzem a capacidade de fluidez do líquido. O líquido, ao escoar, dissipa parte de sua energia, principalmente, em forma de calor. Essa energia não é mais recuperada como energia cinética e potencial e, por isso, denomina-se perda de carga (ΔH). A perda de carga pode ser classificada, distribuída ao longo do trecho e localizada (presença de conexões, aparelhos, singularidades em pontos particulares do conduto). Os objetivos desse trabalho são o de revisar os conceitos teóricos de perda de carga, o de demonstrar a importância de suas aplicações em sistemas hidráulicos, levando-se em conta as perdas por atrito e por componentes instalados nas tubulações, para motivar o envolvimento de alunos de graduação da FATEC Tatuí em novas análises sobre o assunto.

PALAVRAS-CHAVE: perda de carga, tubulação, singularidades.

1- INTRODUÇÃO

Esse artigo faz uma releitura do segmento da engenharia relacionado à hidráulica de tubulações, para demonstrar aspectos teóricos que envolvem a análise do escoamento de fluidos incompressíveis em condutos forçados e uniformes, nos regimes laminar e turbulento. Contudo, essa abordagem não visa esgotar este vasto assunto, mas sim mostrar alguns aspectos sobre o dimensionamento hidráulico em condutos forçados, mais especificamente do tipo de escoamento e sua relação diretamente proporcional com a perda de carga.

2- DESENVOLVIMENTO

Segundo QUINTELA (1981), entende-se por conduto forçado aquele no qual o fluido escoar à plena seção e sob pressão. Muitas vezes os condutos de seção circular são chamados de tubos ou tubulações. Um conduto é dito uniforme quando a sua seção transversal não varia com o seu comprimento.

De modo geral, o escoamento de um fluido não é descrito pelo movimento individual de cada uma de suas partículas, mas é especificado por sua densidade (ρ) e velocidade de escoamento (V) numa determinada posição e num determinado instante.

Ao escoar por um conduto forçado, o fluido é submetido a variações de pressão, decorrentes de variação na elevação da tubulação, da velocidade de escoamento ou ainda do atrito do fluido com a face interna da parede do conduto.

A área da física que estuda esse fenômeno é a Mecânica dos Fluidos, que divide o escoamento quanto à natureza do fluido, relacionada à sua viscosidade, em escoamentos viscosos e não-viscosos. Todos os fluidos possuem viscosidade, mas, para diversas aplicações em engenharia, assumir a hipótese de viscosidade nula, simplifica as análises e oferece resultados satisfatórios (FOX & McDONALD, 2006).

A viscosidade tem uma influência sobre o perfil de velocidades ao longo de uma dada seção transversal de uma tubulação em análise. Tomando-se como referência o escoamento de um determinado fluido sobre uma placa de comprimento semi-infinito, observa-se a ocorrência de dois regimes distintos quanto à estrutura das linhas de fluxo. No escoamento laminar ou no regime laminar, o fluido se move em camadas, com velocidade constante. As partículas movem-se de forma ordenada, mantendo sempre a mesma posição relativa.

Quando a estrutura dessas linhas de fluxo desenvolve movimentos tridimensionais aleatórios, nas quais os vetores de velocidade das partículas possuem componentes tridimensionais aleatórios, em adição à velocidade média, o escoamento é dito turbulento (FOX & McDONALD, 2006).

Em tubulações, a variação na velocidade de escoamento está associada não só às diferentes áreas das seções transversais do tubo, como ocorre nas reduções e ampliações, mas também ao grau de aspereza e de regularidade de sua superfície interna.

Em ambos os casos, essa variação na velocidade provoca uma perda de energia hidráulica, denominada de perda de carga, que pode ser dividida em:

- Perda localizada (devido a singularidades, tais como ampliações, reduções, curvas, válvulas com área transversal não constante);
- Perda distribuída (devido ao atrito do fluido com as paredes do conduto, ao longo de toda a sua extensão, com área transversal constante).

A camada de fluido que permanece em contato com as paredes de um determinado corpo dentro de um escoamento é definida como Camada Limite, sendo esse conceito desenvolvido em 1904, por Ludwig Prandtl. Essa camada é medida a partir do contato da mesma com o referido corpo (onde apresenta velocidade nula) até um ponto tal que a velocidade do fluido apresente noventa e nove por cento da velocidade de entrada do fluido no escoamento. Esse fenômeno de variação de velocidade ocorre devido à viscosidade do fluido (atrito viscoso). (GROSSMANN & DETLEF, 2002).

A relação entre o campo de tensão de cisalhamento e o campo de velocidade média para o escoamento laminar completamente desenvolvido foi descoberta primeiramente pelo médico francês *Jean Louis Poiseuille* e de maneira independente pelo engenheiro alemão *Gotthilf H. L. Hagen*, na década de 1850 (ROUSE & INCE, 1957 apud FOX & McDONALD, 2006).

No escoamento turbulento, não há relação simples entre o campo de tensões de cisalhamento e o campo de velocidade média. As flutuações de velocidade em torno da velocidade média resultam no transporte de quantidade de movimento entre camadas de fluido adjacentes e podem ser vistas como uma tensão aparente que deve ser adicionada à tensão causada pelos gradientes de velocidade média.

Em experimento feito no Laboratório de Mecânica dos Fluidos da FATEC Tatuí, pode-se visualizar essa estrutura. Observa-se que a velocidade de escoamento num determinado ponto no interior do fluxo não varia em função do tempo no escoamento laminar, porém, no escoamento turbulento, a velocidade instantânea oscila aleatoriamente em torno de uma velocidade média, conforme figuras 01 e 02 abaixo.

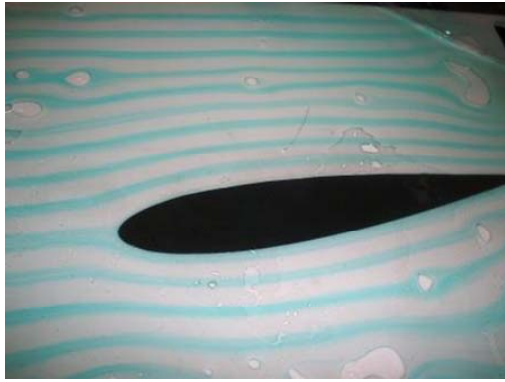


Figura 01 – Simulação escoamento de água em regime laminar.



Figura 02 – Simulação escoamento de água com a introdução de uma turbulência.

No caso em estudo, que trata do escoamento de fluidos incompressíveis ao longo de tubulações, a natureza do escoamento (laminar ou turbulento) é determinada pelo parâmetro número de Reynolds (nome dado em homenagem a *Osborne Reynolds*, físico e engenheiro hidráulico irlandês), dado pela seguinte expressão:

$$R_e = \frac{V.D}{\nu} \quad (1)$$

Onde: V = velocidade do fluido (m/s), D = diâmetro da canalização (m) e ν = viscosidade cinemática (m²/s).

Para: $R_e < 2.000$ → regime laminar – as partículas fluidas apresentam trajetórias bem definidas e não se cruzam.

Para: $R_e > 4.000$ → regime turbulento – movimento desordenado das partículas.

O valor da carga pode ser obtido através da fórmula:

$$\text{Carga (H)} = \frac{\text{Energia}}{\text{peso}} \quad (2)$$

Carga total numa seção (Bernoulli):

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Onde: H – carga total; z – carga potencial ou de posição; $\frac{p}{\gamma}$ – carga piezométrica ou de pressão; α - Coeficiente de Coriolis (vale aproximadamente 1) e $\frac{v^2}{2g}$ – carga cinética ou termo cinético.

A perda de carga é classificada em perda de carga contínua, linear ou distribuída (ΔH_D) e em perda de carga singular ou localizada (ΔH_S). As perdas de carga distribuídas ocorrem devido ao escoamento em trechos retilíneos de tubulação, enquanto que as singulares são originadas em trechos curvos, em peças e dispositivos especiais instalados na linha em estudo.

As perdas distribuídas ocorrem devido ao atrito entre as diversas camadas do escoamento e ainda ao atrito entre o fluido e as paredes do conduto (efeito da viscosidade e da rugosidade). A razão entre a perda de carga distribuída (ΔH_D) e o comprimento do conduto L , representa o gradiente ou a inclinação da linha de carga e é denominada perda de carga unitária j .

$$j = \frac{\Delta H_D}{L} \quad (4)$$

Aplicando-se a equação de Bernoulli entre as seções 1 e 2 da Figura 1, há:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{12} \quad (5)$$

DARCY e WEISBACH (1845), após inúmeras experiências, estabeleceram uma das melhores equações empíricas para o cálculo da perda de carga distribuída ao longo das tubulações. ROUSE (1946) denominou a equação de Fórmula de *Darcy-Weisbach*, que, também, ficou conhecida por Fórmula Universal para o cálculo da perda de carga distribuída.

$$\Delta H_{12} = f \frac{V^2 L}{2g D} \quad (6)$$

Sendo:

j = perda de carga unitária em m/m;

V = velocidade média do escoamento em m/s;

D = diâmetro do conduto em m/s;

L = comprimento do conduto em m;

g = aceleração da gravidade = 9,81 m/s²;

f = coeficiente de perda de carga, obtido pelo Diagrama de Moody.

O coeficiente de perda de carga f é um adimensional que depende basicamente do regime de escoamento.

As perdas localizadas ocorrem devido à descontinuidade do conduto, chamada singularidade, que gera turbulência adicional e maior dissipação de energia. Exemplo de singularidades são cotovelo, curva, tê, alargamento, redução, registro. Essas perdas podem ser obtidas pelo Comprimento Equivalente ou pelo Método do k_s .

SAMPAIO (2007) avalia a perda de carga em tubulações comerciais de aço zincado, ferro galvanizado e PVC, com diferentes diâmetros, em águas residuárias oriundas da suinocultura. Em seus estudos, os resultados mostraram que a perda de carga possui comportamento linear em função da concentração de sólidos totais da água residuária proveniente da suinocultura; as perdas de carga determinadas a partir dos fatores de correção parcial e global apresentaram superestimativa e subestimativa média de 0,7% e 13%, respectivamente

Outro caso de estudo de perda de carga é mostrado na dissertação de mestrado de RESENDE (2007), onde a infestação de um molusco *Limnoperna fortunei* promove grandes perdas de carga de tubulações de usinas hidrelétricas devido à perda de seção útil dos tubos.

Outro exemplo da importância do estudo de perda de carga é mostrado no artigo de ELIO & ROBAINA (2002). Esse trabalho avalia o consumo de energia e a eficiência das estações de bombeamento de lavouras de arroz irrigado. Os resultados evidenciaram que 67% das bombas operavam com rendimentos abaixo de 75% devido, entre outros fatores, à grande perda de carga no sistema. Verificou-se, também que, adequando-se às estações de bombeamento, é possível economizar 29% da energia elétrica com a redução das perdas de carga e 41%.

O trabalho de FABIANI et al. (2008) apresenta uma metodologia de análise para determinação da perda de carga em circuitos hidráulicos e determinação, se necessário, da substituição ou recuperação da tubulação adutora. Mostrou-se que para sua aplicação é necessária a realização do estudo hidráulico do sistema de adução da configuração atual da usina e da nova configuração proposta para implantação. As definições dos diâmetros equivalente e econômicos são aspectos importantes neste estudo, assim como a determinação do grau de envelhecimento dos condutos de forma a minimizar a perda de carga, sendo esta outra importante aplicação da teoria mostrada.

3- MÉTODOS

A partir do levantamento bibliográfico sobre os aspectos teóricos da “Perda de Carga em Conduitos Forçados”, foi possível desenvolver aplicações focadas nessa teoria.

É possível também desenvolver uma simulação matemática dos conceitos de perda de carga distribuída e de perda de carga localizada.

O desenvolvimento dessa simulação utiliza a equação de *Darcy-Weisbach* e foi baseado em duas situações distintas: a primeira para um escoamento turbulento ; a segunda para um escoamento laminar, sendo realizado em tubulação de ferro galvanizado.

Os parâmetros adotados para a simulação nas duas situações são demonstrados nas Tabelas 02 e 03.

Q =0,04	m ³ /s
f =0,021	
V =2,263537	m/s
g =9,81	m/s ²
D =0,15	m
v =0,000001	m ² /s
Re =339530,5	esc. turbulento

Tabela 02 – Parâmetros de carga da água em escoamento turbulento.

Q =0,0002	m ³ /s
f =0,037699	
V =0,011318	m/s
g =9,81	m/s ²
D =0,15	m
v =0,000001	m ² /s
Re =1697,653	esc. laminar

Tabela 03 – Parâmetros de carga da água em escoamento laminar.

Onde: V = velocidade do fluido (m/s), D = diâmetro da tubulação (m), v = viscosidade cinemática (m²/s), Q = vazão (m³/s), f = fator de atrito, Re = Número de Reynolds's.

Para a visualização da perda de carga (ΔH) em função da distância, foi adotado o intervalo de medição de doze metros seccionados de um em um metro.

Os cálculos da perda de carga foram feitos aplicando-se a equação (6), com os seguintes resultados apresentados nas Tabelas 04 e 05.

L(m)	ΔH (m)
1	0,0366
2	0,0731
3	0,1097
4	0,1462
5	0,1828
6	0,2194
7	0,2559
8	0,2925
9	0,3290
10	0,3656
11	0,4022
12	0,4387

Tabela 04 – Resultados de perda carga em escoamento turbulento.

L(m)	ΔH (m)
1	3,66E-02
2	7,31E-02
3	1,10E-01
4	1,46E-01
5	1,83E-01
6	2,19E-01
7	2,56E-01
8	2,92E-01
9	3,29E-01
10	3,66E-01
11	4,02E-01
12	4,39E-01

Tabela 05 – Resultados de perda carga em escoamento laminar.

Os resultados da perda de carga de uma tubulação de ferro galvanizado em escoamento turbulento e laminar podem ser visualizados pelos gráficos 01 e 02.

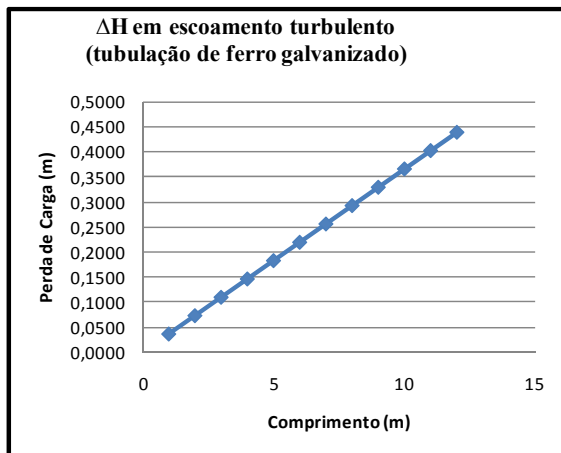


Gráfico 01 - Perda de Carga da água em escoamento turbulento numa tubulação de ferro galvanizado

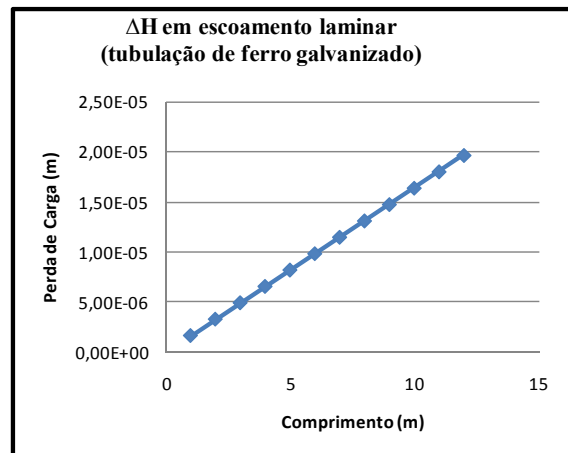


Gráfico 01 - Perda de Carga da água em escoamento laminar numa tubulação de ferro galvanizado

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme observado, pode-se concluir que a Perda de Carga é proporcional ao aumento do comprimento da tubulação. A teoria a importância do estudo do atrito do fluido na tubulação, considerando-se os diferentes tipos de escoamento: laminar e turbulento. As simulações foram desenvolvidas com vazões distintas, mesmo diâmetro, tendo como variável o comprimento da tubulação.

O líquido, ao escoar em um conduto, é submetido a forças resistentes exercidas pelas paredes da tubulação e por uma região do próprio líquido, denominada camada limite. Assim, há o surgimento de forças cisalhantes que reduzem a capacidade de fluidez do líquido. O líquido ao escoar dissipa parte de sua energia, principalmente, em forma de calor. Essa energia não é mais recuperada como energia cinética e potencial, surgindo a perda de carga (ΔH).

5- CONCLUSÕES

O estudo sobre Perda de Carga em Condutos Forçados é de extrema importância para o avanço nas pesquisas hidráulicas que avaliam o atrito do fluido em escoamento nas tubulações e as perdas decorrentes pelos componentes instalados nos sistemas. Alguns exemplos de pesquisas, que incluem desde sistemas de irrigação até usinas hidrelétricas, são citados nesse artigo. No laboratório de Mecânica dos Fluidos da Fatec Tatuí, o conceito de perda de carga pode ser demonstrado e simulado, possibilitando o engajamento dos graduandos no estudo desse fenômeno, a fim de que tomem contato com ele, o que poderá possibilitar novas investigações sobre o tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MARCOLIN, E.; ROBAINA, A. D. Consumo de energia e eficiência das estações de bombeamento de lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.2, p.229-235, 2002.

FABIANI, A. L. T.; OTA, J. J.; SILVA, D. T.; AKIL, C. V. Perda de carga em circuitos hidráulicos de pequenas centrais hidrelétricas – pch's. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS. 2008. Belo Horizonte.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro – RJ, 2006.

GROSSMANN, S.; LOHSE, D. Prandtl and Rayleigh number dependence of the Reynolds number in turbulent thermal convection. **Physical Review E**, v. 66, n. 1, p. 16305, 2002.

QUINTELA, A. C. Turbo máquinas hidráulicas. In: _____ **Hidráulica**. 1. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1981. p. 393-487.

SAMPAIO, S. C. et al. Equação de Hazen-Williams corrigida para água residuária proveniente da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 5-10, 2007.

RESENDE; M. F. **A variação das características hidráulicas em condutos forçados devido à infestação pelo *Limnoperna fortunei***. 2007. Dissertação (Mestrado em Saneamento, meio ambiente e recursos hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ROUSE, H., INCE, S. History of hydraulics. In: FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro – RJ, 2006.