

III SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
(SILUBESA)

SISTEMA DE PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

PERSPECTIVAS ACTUAIS SOBRE A CONSIDERAÇÃO DE PERDAS
DE CARGA ACIDENTAIS EM SISTEMAS DE TUBAGENS

Rodrigo J.F. Oliveira Maia, Eng^o Civil, Assistente Convidado da F.E.U.P.

e
Manuel I.F. Malafaya-Baptista, Eng^o Civil, Doutor em Hidráulica,
Professor Associado da F.E.U.P.

Laboratório de Hidráulica
Faculdade de Engenharia
Universidade do Porto
Porto
Portugal

RESUMO

Propõe-se uma reformulação de critérios para quantificação das perdas de carga acidentais em sistemas de tubagens, na perspectiva de: i) melhor adaptação aos processos iterativos usados nos programas computacionais; ii) maior rigor e versatilidade desses programas.

É proposto o desenvolvimento e utilização de bases de dados correspondentes à discretização, para cada acessório, de curvas definidoras de (K_a) , geridas por sub-rotinas interpoladoras (modelo RMB).

São apresentados e comparados resultados obtidos em modelo físico e em modelos matemáticos explorados com base em programa computacional.

É salientada a melhoria de precisão esperada para a determinação de caudais e perdas de carga totais devida à consideração das perdas de carga acidentais.

Apresenta-se uma análise prévia da aplicação do modelo proposto a sistemas de distribuição.

ÍNDICE.

1. Introdução. 2. Critérios de cálculo em modelos computacionais. 3. Modelos utilizados. 4. Resultados do modelo físico. 5. Resultados do modelo matemático. 6. Malha de grande comprimento. 7. Conclusões. 8. Simbologia. 9. Bibliografia. 10. Agradecimentos.

1. INTRODUÇÃO.

A quantificação de perdas de carga acidentais em sistemas de tubagens, nomeadamente sistemas de distribuição de água, é ainda (apesar do recurso cada vez mais generalizado a modelos computacionais) dependente em geral dos critérios e experiência do projectista.

Essa quantificação, quando considerada, é em geral efectuada para uma determinada situação de análise para a qual se escolhem previamente os tipos de ligações e componentes considerados mais significativos.

A necessidade de um maior rigor de cálculo e versatilidade procurados para os modelos computacionais utilizados justificam uma reformulação de critérios para quantificação das perdas de carga acidentais.

2. CRITÉRIOS DE CÁLCULO EM MODELOS COMPUTACIONAIS.

As perdas de carga acidentais (PCA) são do tipo

$$H_a = K_a \cdot V^2 / (2 \cdot g) \quad (1)$$

Os valores de (K_a) dependem em geral de:

a) Número de Reynolds; b) Rugosidade; c) Geometria dos acessórios e do sistema; d) Características direccionais do escoamento; e) Influência de singularidades próximas.

A perda de carga total entre os pontos extremos de uma tubagem de comprimento (L) onde se encontram instalados diversos acessórios e componentes será dada por

$$\Delta H = J \cdot L + \sum K_a \cdot V^2 / (2 \cdot g) \quad (2)$$

sendo

$$J = f \cdot (1/D) \cdot (V^2 / (2 \cdot g)) \quad (3)$$

2.1. Procedimento habitual.

Utiliza-se em geral a noção de comprimento equivalente de conduta, (L_e), definido como o comprimento da conduta a que corresponde uma perda de carga contínua igual à perda de carga acidental provocada por um determinado acessório/componente.

A quantificação de (L_e) para cada acessório é feita através da definição de um valor de (K_a) constante.

Utilizando a expressão de Darcy-Weisbach (3) e substituindo na expressão (1) obtém-se

$$L_e = K_a \cdot D / f \quad (4)$$

sendo (D) o diâmetro da tubagem e (f) o coeficiente de resistência.

No processo de cálculo utilizado poderá considerar-se, para definição de (L_e), (f) constante ou função do caudal escoado.

Os valores de (K_a) para os diferentes acessórios e componentes do sistema são ge

ralmente definidos para valores de caudais correspondentes a uma solução de equilíbrio (por vezes bastante diferente da distribuição real dos caudais na rede).

2.2. Perspectivas actuais.

O modelo proposto (RMB) utiliza bases de dados, definidoras das perdas de carga em todos os acessórios e componentes, interligadas com o programa de cálculo.

Genericamente o processo consiste na discretização, para cada acessório/componen te, de curvas definidoras das perdas de carga (ou (K_a)) em função dos parâmetros a) a e) atrás referidos e no seu armazenamento numa base de dados. A partir destas, e através de sub-rotinas interpoladoras em relação a cada um desses parâmetros, definem-se as perdas de carga para cada situação de escoamento.

3. MODELOS UTILIZADOS.

Foi desenvolvido um programa computacional (em linguagem Fortran 77) permitindo a modelação matemática de sistemas emalhados (determinação dos caudais e das perdas de carga totais em cada tubo).

Para afinação e calibração do modelo matemático proposto recorreu-se à modelação física com base numa instalação experimental de um sistema de tubagens de tipo industrial instalado para o efeito no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

3.1. Modelo físico.

Foi utilizada uma malha simples da instalação experimental referida, com dimensões e características definidas esquematicamente na Figura 1.

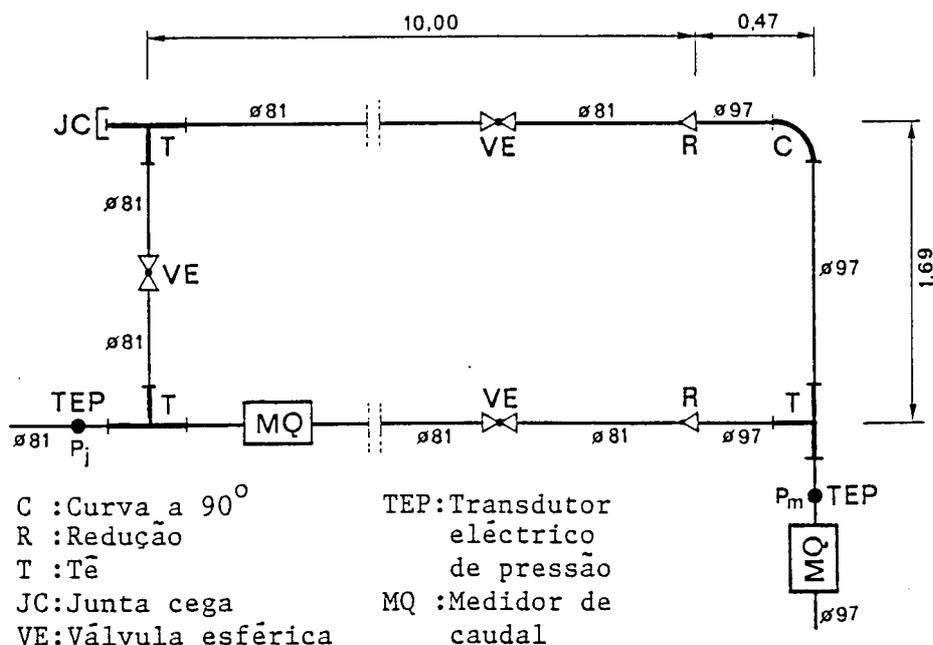


FIGURA 1. - Esquema da instalação experimental.
(Comprimentos em metros).

As tubagens, acessórios e componentes utilizados são em PVC.

Foram feitas medições simultâneas da diferença de pressão entre o ponto imediatamente a montante da entrada (P_m) e o ponto imediatamente a jusante da saída da malha (P_j) (utilizando transdutores eléctricos de pressão) e dos caudais (por meio de medidores de caudais electromagnéticos, um localizado na tubagem de alimentação e outro numa das tubagens da malha).

3.2. Modelo matemático.

3.2.1. Foi feita a modelação matemática da malha utilizada no modelo físico, utilizando o programa computacional desenvolvido, que consta de dois módulos: i) O módulo CNETD cria um ficheiro de dados por um processo interactivo com o utilizador. É assim possível, após a análise de uma configuração do escoamento, modificar facilmente qualquer dos dados de modo a permitir o estudo de outras configurações do sistema; ii) O módulo NET faz a análise do sistema criado através do ficheiro de dados e, opcionalmente, faz a saída dos resultados para ficheiro criado para essa configuração do sistema. Utiliza o método da Teoria Linear (formulação com equações dos troços).

3.2.2. O programa faz a inicialização automática dos caudais e está desenvolvido modularmente, com base em várias rotinas, designadamente:

- Conversão de unidades de entrada de dados/saída de resultados (sistema Internacional e sistema Inglês), opcional.

- Resolução de sistemas de equações lineares (método de Gauss-Jordan).

- Cálculo da perda de carga contínua utilizando a expressão de Darcy-Weisbach. O factor de resistência (f) é calculado distinguindo regimes laminar, turbulento e transição laminar-turbulento, utilizando uma fórmula explícita universal, [1].

- Cálculo de perdas de carga acidentais, opcional.

Caso se opte pela sua consideração, o programa faz uma primeira análise desprezando as PCA e só após atingido o critério de convergência é que as inclui no cálculo.

Esta sub-rotina gere então um conjunto de sub-rotinas, cada uma delas correspondendo a uma base de dados de cada um dos acessórios considerados, e ainda sub-rotinas interpoladoras.

Através da base de dados e da sub-rotina interpoladora correspondente obtêm-se os valores de (K_a) para cada acessório ou componente em função do número de Reynolds, da rugosidade, dos ângulos entre eixos de tubagens, do sentido do escoamento em nós (tês), do grau de abertura em válvulas, do raio de curvatura (curvas a 90°), etc., [2].

É possível considerar neste momento: i) Válvulas (diferentes tipos); ii) Curvas a 90° ; iii) Reduções; iv) Alargamentos; v) Nós (Tês: Escoamentos linha-ramal, linha-linha e ramal-linha).

O programa está preparado para se poder ampliar a base de dados usada, incluindo outras ligações e componentes.

3.2.3. A utilização do programa, na perspectiva de estudo da influência das perdas de carga acidentais, foi feita para os seguintes tipos de modelação:

a) SPCA - sem consideração de perdas de carga acidentais, ($\Delta H = J.L$).

b) CPCA - com consideração de perdas de carga acidentais, ($\Delta H = J.L + \Sigma H_a$).

b1) MHG - com valores de (K_a) fixos para cada tipo de acessório, definidos através do "Manual de Hidráulica Geral", [3].

Os valores de (K_a) são assim praticamente independentes dos caudais escoados.

b2) VDI - com valores de (Ka) definidos através das "Normas VDI", [4].
Os valores de (Ka) são definidos após uma primeira análise dos valores dos caudais escoados (sem considerar perdas de carga accidentais).

b3) RMB - (modelo proposto) com valores de (Ka) definidos através de bases de dados interligadas ao programa de cálculo.
Em cada iteração os valores de (Ka) são ajustados aos valores e sentido dos caudais que se escoam nos diferentes tubos da malha.

4. RESULTADOS DO MODELO FÍSICO.

No Quadro 1. apresentam-se os valores medidos na instalação experimental descrita na secção anterior, valores estes utilizados como referência para comparação dos diversos critérios de modelação matemática utilizados.

Os valores da perda de carga total são os correspondentes às medições efectuadas nos pontos (Pm) e (Pj) (ver Figura 1.).

ENSAIO	Q	Q1	Q2	H
	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(mca)
1	10.388	5.301	5.087	0.3665
2	14.907	7.553	7.354	0.7201
3	21.399	10.949	10.450	1.4511
4	25.251	12.888	12.363	1.9995

QUADRO 1. - Valores medidos.

5. RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO.

Nos Quadros 2. e 3. apresentam-se os valores dos caudais e perdas de carga calculados, bem como os seus desvios percentuais relativamente aos valores medidos.

$$DG = (G_{\text{calculado}} - G_{\text{medido}}) \cdot 100 / G_{\text{medido}} \quad (5)$$

Relativamente aos valores apresentados refere-se:

- i) No caso correspondente à definição de valores de (Ka) através do MHG, são apresentados valores calculados para duas hipóteses de cálculo distintas:
 - (f) constante e correspondente ao regime turbulento rugoso.
 - (f) variável com o número de Reynolds correspondente, para cada tubagem, à análise efectuada sem consideração das PCA.

Em qualquer destas hipóteses os dados de entrada no programa são os comprimentos equivalentes (Le) adicionados aos comprimentos reais de cada tubagem.

- ii) No caso correspondente à definição de (Ka) através das normas VDI, o cálculo de (f), ou seja (Le), é feito internamente no programa, considerando os cau-

ENSAIO		VALORES MEDIDOS (Quadro 1)	SPCA	CPCA			
				RMB	VDI	MHG	
				KaVar.	KaCt.	KaCt.	
				f(U)	f(U)	f(U)	fCt.
1	Q1	5.301	5.459	5.341	5.266	6.086	6.250
	Q2	5.087	4.929	5.047	5.122	4.302	4.138
	+-DQ	---	3.1	0.8	0.7	15.4	18.6
2	Q1	7.553	7.830	7.645	7.548	8.762	8.959
	Q2	7.354	7.077	7.262	7.359	6.145	5.948
	+-DQ	---	3.7	1.2	0.1	16.4	19.1
3	Q1	10.949	11.240	10.955	10.825	12.610	12.847
	Q2	10.450	10.159	10.444	10.574	8.789	8.552
	+-DQ	---	2.7	0.1	1.1	15.9	18.1
4	Q1	12.888	13.256	12.911	12.771	14.900	15.151
	Q2	12.363	11.995	12.340	12.480	10.351	10.100
	+-DQ	---	2.9	0.2	0.9	16.2	18.3

QUADRO 2. - Valores calculados dos caudais (em l/s).
Desvios percentuais (em %) [Exp. (5)].

ENSAIO		VALORES MEDIDOS (Quadro 1)	SPCA	CPCA			
				RMB	VDI	MHG	
				KaVar.	KaCt.	KaCt.	
				f(U)	f(U)	f(U)	fCt.
1	ΔH	0.3665	0.1374	0.3575	0.3200	0.2371	0.3033
	D ΔH	----	-62.5	- 2.4	-12.7	-35.3	-17.2
2	ΔH	0.7201	0.2260	0.7194	0.6379	0.4562	0.5835
	D ΔH	----	-63.1	- 0.1	-11.4	-36.6	-19.0
3	ΔH	1.4551	0.5152	1.4494	1.2803	0.8825	1.1286
	D ΔH	----	-64.5	- 0.1	-11.8	-39.2	-22.2
4	ΔH	1.9995	0.6958	1.9966	1.7631	1.1958	1.5290
	D ΔH	----	-65.2	- 0.1	-11.8	-40.2	-23.5

QUADRO 3. - Valores calculados da perda de carga principal (em mca).
Desvios percentuais (em %) [Exp. (5)].

dais nas tubagens calculados em cada iteração e os valores de (K_a) constantes e previamente definidos.

iii) O cálculo de (f) (e portanto de (L_e)) é feito de modo semelhante no modelo proposto (RMB). No entanto a definição dos valores de (K_a) é feita internamente no próprio programa, recorrendo às bases de dados respectivas e atendendo às características direccionais do escoamento e valores dos caudais em cada iteração.

Os dados de entrada são assim a definição das características geométricas dos nós e demais acessórios, bem como o tipo de acessório e características de funcionamento.

6. MALHA DE GRANDE COMPRIMENTO.

No sentido de averiguar a influência da consideração das perdas de carga acidentais em sistemas emalhadados de redes de distribuição de água estudou-se o caso de uma malha simples e simétrica com comprimentos significativamente maiores, aplicando o modelo proposto (RMB).

Dois tipos de perdas de carga acidentais ocorrem em situações deste tipo:

- Perdas de carga que ocorrem nos nós de ligação entre malhas.
- Perdas de carga que ocorrem nos tubos, designadamente as devidas às derivações na rede de distribuição.

Nesta fase do trabalho, apenas foi possível estudar os efeitos da causa mencionada na alínea (a) e que se referem na Figura 2., no Quadro 4. e na parte final desta secção, onde se apresentam um esquema da malha estudada, as suas características geométricas, a distribuição de caudais na malha e a perda de carga total sem e com consideração das perdas de carga acidentais.

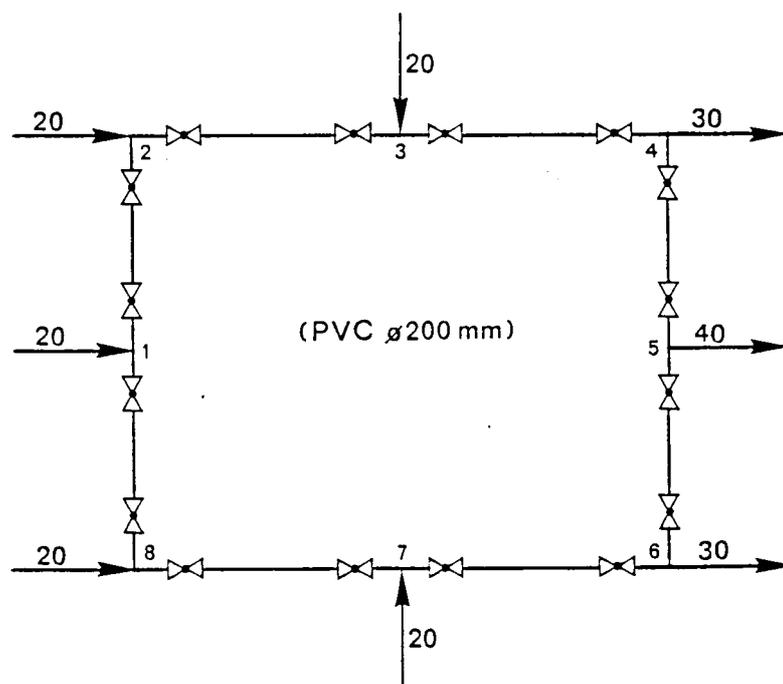


FIGURA 2. - Esquema da malha simétrica (Q em l/s).

T R O Ç O		L	D	Q
		(m)	(m)	(l/s)
1-2	1-8	200	0.200	10
2-3	8-7	250	0.200	30
3-4	7-6	250	0.200	50
4-5	6-5	200	0.200	30

QUADRO 4. - Características geométricas da malha.
Distribuição de caudais.

O cálculo da perda de carga total entre os nós (1) e (5) sem e com consideração das perdas de carga accidentais fornecem os seguintes valores:

i) SPCA: $\Delta H = 3,7137$ mca

ii) CPCA (RMB) $\Delta H = 4,1010$ mca

Tomando como referência o valor correspondente à consideração das perdas de carga accidentais o desvio percentual é

$$D\Delta H = (3,7137 - 4,1010) \cdot 100 / 4,1010 = -9,4\%$$

7. CONCLUSÕES.

7.1. Modelo físico e modelos matemáticos.

i) Em sistemas de tubagem do tipo da ensaiada (frequentemente utilizadas na indústria e em circuitos de estações de tratamento) torna-se fundamental, em termos de determinação de pressões/perdas de carga totais, a consideração das perdas de carga accidentais.

ii) A comparação dos valores medidos com os valores calculados sem consideração de perdas de carga accidentais (SPCA) mostra claramente que: iil) é satisfatório o grau de precisão obtido por este processo para determinação dos caudais, para efeitos de uma primeira análise da sua ordem de grandeza ($DQ < \pm 4\%$); ii2) os valores das perdas de carga calculados são-no por defeito e com desvios percentuais significativos ($D\Delta H \approx -65\%$).

iii) Os valores dos caudais calculados com a consideração das perdas de carga accidentais melhoram substancialmente com a consideração de valores de (K_a) mais actualizados.

Designadamente entre os valores obtidos através do MHG ($DQ \approx \pm 19\%$) e os obtidos recorrendo às normas VDI e ao modelo proposto ($DQ \approx \pm 1\%$) a melhoria é evidente.

iv) Os valores das perdas de carga totais calculados com a consideração das perdas de carga accidentais mostram, por comparação, que as normas VDI, indicando valores mais actuais de (K_a) que o MHG, conduzem a uma melhoria relativa dos desvios percentuais mas ainda pouco satisfatória (VDI: $D\Delta H \approx -12\%$; MHG: $D\Delta H \approx -40\%$).

Tal facto resulta, entre outras razões, de em todo o processo de cálculo se con

siderar (K_a) constante e ainda de não ser possível entrar em linha de conta com as alterações das características direccionais do escoamento que possam ocorrer durante o processo iterativo.

v) O modelo proposto (RMB), no qual os diferentes (K_a) variam ao longo do processo de cálculo (em função da variação ao longo do processo iterativo dos parâmetros de que dependem) conduz a valores das perdas de carga totais significativamente mais precisos ($\Delta H = -3\%$).

Este procedimento só é possível por recurso a bases de dados utilizadas como sub-rotinas pelo programa de cálculo.

7.2. Malha simples de grande comprimento.

i) O estudo restrito que se fez permite desde já detectar a necessidade de prosseguir a pesquisa neste domínio. A análise feita para as perdas de carga nos nós das malhas mostra que, mesmo à escala dos sistemas de distribuição de água, a sua consideração conduz a agravamentos da perda de carga total da ordem dos 10%. A esta parcela haverá que adicionar o efeito (igualmente gravoso) das perdas de carga devidas às derivações na rede.

7.3. Perspectivas futuras.

i) O grande passo a dar será a determinação experimental exaustiva da variação do (K_a) de cada acessório com os parâmetros que nele influem significativamente (em particular as características direccionais do escoamento), visando a possibilidade de criação de bases de dados mais completas do que as actualmente disponíveis.

ii) Com os modelos matemáticos disponíveis e a capacidade, a preço acessível, dos computadores já existentes, parece ser esta a maneira mais correcta de atacar o problema, aproximando o mais possível os resultados do modelo matemático aos valores efectivamente instalados num sistema de tubagens.

Tal procedimento é tão mais pertinente quanto se constata que os modelos disponíveis até agora conduzem a valores "optimistas" das perdas de carga, inferiores aos valores reais.

8. SIMBOLOGIA.

D	diâmetro
DG	desvio percentual da grandeza G
f	coeficiente de resistência de Darcy
fT.R	coeficiente de resistência de Darcy (Regime turbulento rugoso)
g	aceleração da gravidade
H _a	perda de carga accidental
ΔH	perda de carga total
J	gradiente piezométrico
K _a	coeficiente de perda de carga accidental
L	comprimento
L _e	comprimento equivalente de conduta
Q	caudal
V	velocidade média
Σ	somatório
+	adição
-	subtracção
.	multiplicação
/	divisão

9. BIBLIOGRAFIA.

- [1] Malafaya-Baptista, M. - "Escoamentos sob Pressão em Tubos de Secção Circular. Modelo Explícito Universal para Determinação da Perda de Energia Principal", 4º Congresso de Mecânica Teórica e Aplicada, Coimbra, Dezembro.1987.
- [2] Idelchik, I.E. - "Handbook of Hydraulic Resistance", Hemisphere Publishing Corporation, 1986.
- [3] Lencastre, A. - "Manual de Hidráulica Geral", Ed. Técnica - AEIST, Lisboa, 1969.
- [4] Normas VDI, 1984.

10. AGRADECIMENTOS.

Os autores expressam o seu agradecimento pela colaboração prestada na execução deste trabalho a A.J. Domingos (dactilografia), A.L. Martins (desenho) e J. Sousa (execução do "stand" experimental), do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.