

CHOQUE HIDRÁULICO EM CONDUTAS ELEVATÓRIAS. METODOLOGIAS PARA A SUA QUANTIFICAÇÃO. APLICAÇÃO INFORMÁTICA - CHCE

Albano Martins

Engenheiro Civil

Faculdade de Ciência e Tecnologia – UFP

albano.martins@ufp.edu.pt

COMO REFERENCIAR ESTE ARTIGO: MARTINS, Albano. - Choque hidráulico em condutas elevatórias. Metodologias para a sua quantificação. Aplicação informática – CHCE. Revista da Faculdade de Ciência e Tecnologia. Porto : Edições Universidade Fernando Pessoa. ISSN 215364-04. 6 (2009) 60-69. Rosich, E.M., (1987). El Golpe de Aríete en Impulsiones. Madrid, Bellisco Editorial.

RESUMO

É feita uma abordagem da quantificação dos valores do choque hidráulico numa conduta elevatória tirando partido da formulação matemática das equações de Allievi e da metodologia aplicada no método gráfico de Schneider-Bergeron, a partir das quais se formulam as expressões resolventes do problema geométrico, permitindo assim o desenvolvimento de um algoritmo, com suporte informático (CHCE), que permite resolver o mesmo problema com maior rapidez, maior precisão numérica e com a possibilidade de analisar os valores do choque hidráulico em várias secções da conduta elevatória. Recorre-se a um caso de estudo para fundamentar a validade da aplicação CHCE e para comparar os resultados obtidos recorrendo às duas vias de cálculo analisadas.

PALAVRAS-CHAVE

Choque hidráulico, pressões mínimas, método de Schneider-Bergeron, aplicação informática CHCE

ABSTRACT

An alternative approach to the study of waterhammer in a pumping system is studied, using the classical Allievi equations and the geometrical interpretation of the Schneider-Bergeron method. Based on that, the solving expressions of the geometrical problem are presented, allowing the development of an informatic application (CHCE) which solves the problem faster, with greater numerical accuracy and with the possibility of studying various sections of the pumping system. A case study is used to ground the suitability of the CHCE application as well as to make a comparison of the results obtained using the two methodologies.

KEYWORDS

Waterhammer, minimum pressures, Schneider-Bergeron method, informatic program CHCE

1. INTRODUÇÃO

O circuito hidráulico correspondente a uma conduta adutora elevatória, em que se processa um escoamento sob pressão, está sujeito à ocorrência de regimes transitórios (regime variável que ocorre na transição entre dois regimes permanentes) durante os quais os valores da pressão e da velocidade da água, numa secção qualquer, são função do tempo.

Esse regime transitório designa-se por choque hidráulico (ou golpe de aríete). Da sua ocorrência resulta o aparecimento de cenários de aumento (sobrepções) e diminuição (depressões) dos valores das pressões ao longo da conduta, valores esses que podem pôr em causa o bom funcionamento do circuito hidráulico (Betâmio, 1981) (Streeter e Wylie, 1967).

Nas condutas elevatórias é particularmente gravosa a situação originada pela paragem dos grupos electrobomba (GEB) por corte súbito da energia eléctrica.

Necessária se torna pois a quantificação e análise dos efeitos da ocorrência deste cenário de corte súbito da energia eléctrica.

No presente trabalho apresentam-se os resultados obtidos por recurso a uma aplicação informática desenvolvida com base na formulação analítica do método gráfico de *Schneider-Bergeron*. Igualmente se faz uma análise comparativa da precisão numérica dos resultados obtidos por cada uma das duas metodologias.

2. DESCRIÇÃO GERAL DO FENÓMENO

A manobra de paragem origina uma onda de pressão (negativa) que parte do GEB e se propaga para jusante até ao reservatório de jusante com uma velocidade constante (a), designada celeridade (função das características mecânicas da água e do material da conduta e das características geométricas da conduta). Após a chegada ao reservatório de jusante, uma onda de pressão (positiva) propaga-se em sentido contrário até atingir de novo a secção do GEB.

Na primeira fase, de depressões, podem originar-se situações de rotura na veia líquida (cavitação) e, na segunda fase, de sobrepressões, estas poderão eventualmente exceder o valor da pressão nominal do material de que é constituída a tubagem.

A sua interpretação física vem claramente descrita em diversa literatura da especialidade (Malafaya-Baptista, 1987).

A esquematização do circuito hidráulico em estudo, para o caso de paragem do GEB, apresenta-se na Figura 1.

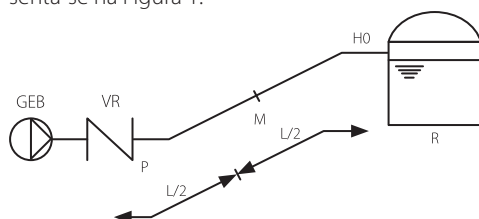


Fig. 1. Circuito hidráulico da conduta elevatória

Designar-se-á por fase (μ) o tempo que demora essa onda de pressão a propagar-se da secção (P) a jusante do conjunto 'GEB-Válvula de retenção' até ao reservatório de jusante (secção R) e regressar à secção (P).

$$\mu = (2 \cdot L) / a \quad (1)$$

3. EQUAÇÕES RESOLVENTES

A determinação das leis que regem o fenómeno do choque hidráulico é feita aplicando a um troço qualquer da conduta de comprimento (dx) duas condições de balanço: (i) Equilíbrio dinâmico (Princípio fundamental da dinâmica); e (ii) Equilíbrio da massa (Equação da continuidade). A integração do sistema de duas equações diferenciais de 2ª ordem assim obtido conduz às equações de *Allièvi* (Malafaya-Baptista, 1987).

$$H - H_0 = F(t - x/a) + f(t + x/a) \quad (2)$$

$$V - V_0 = (g/a) \cdot [F(t - x/a) - f(t + x/a)] \quad (3)$$

Da integração efectuada resulta o aparecimento de duas novas incógnitas (constantes de integração, F e f) cuja determinação será efectuada por recurso à definição das condições de fronteira nas secções extremas de montante (P) e de jusante (R) (Malafaya-Baptista, 1987).

Em (P): Lei de paragem do GEB (Ferreira, 2001) (Rosich, 1987), impondo ($V \geq 0$) resultante da existência de uma válvula de retenção a jusante do GEB. Conhecida a lei de paragem [$N(t)$] é técnica numérica habitual aproximar as curvas (H-V) a parábolas com a expressão geral

$$H = A \cdot N^2 + B \cdot V \cdot N + C \cdot V^2 \quad (4)$$

Em (R): Curva característica da instalação [6].

$$H = zR_{jus} - zR_{mont} + J(V) \cdot L \quad (5)$$

4. MÉTODO GRÁFICO

Desprezando a variação da perda de carga com a velocidade, e eliminando sucessivamente (f) e (F) nas equações de *Allièvi* chega-se às expressões:

$$(H - H_0) + (a/g) \cdot (V - V_0) = 2 \cdot F \quad (6)$$

$$(H - H_0) - (a/g) \cdot (V - V_0) = 2 \cdot f \quad (7)$$

Estas expressões traduzem analiticamente duas famílias de rectas com os coeficientes angulares ($-a/g$) e ($+a/g$), respectivamente.

A aplicação do método pretende quantificar as condições do escoamento, em termos de caudal (ou velocidade) e pressão, no instante $(t + UT)$ conhecendo a situação do regime transitório no instante (t) .

A primeira decisão a tomar prende-se com a escolha de acréscimo de tempo (UT) , o qual será condicionado pela escolha das secções, nas quais se pretende estudar o choque hidráulico.

Assim, pretendendo-se estudar as secções (P) e (M) bastará considerar $(UT = L/a)$.

4.1. SISTEMATIZAÇÃO DO CÁLCULO

Utilizar-se-á a notação simplificada $(i = t)$ e $(j = t + L/a)$.

(HRi) e (VRi) serão os valores de (H) e (V) na secção (R) no instante (i) , os quais serão identificados no método gráfico através da notação (Ri) .

(HPj) e (VPj) serão os valores de (H) e (V) na secção (P) no instante (j) , os quais serão identificados no método gráfico através da notação (Pj) .

A determinação dos pontos de funcionamento (Pj) é feita resolvendo o sistema de equações resultante da utilização das expressões (7) e (4), em que os valores de (Ri) são previamente conhecidos.

$$(HPj - HRi) = (a/g) \cdot (VPj - VRi) \quad (8)$$

$$HPj = A \cdot N^2 + B \cdot VPj \cdot N + C \cdot VPj^2 \quad (9)$$

A determinação dos pontos de funcionamento (Rj) é feita resolvendo o sistema de equações resultante da utilização das expressões (6) e (5), em que os valores de (Pi) são previamente conhecidos.

$$(HRj - HPi) = -(a/g) \cdot (VRj - VPi) \quad (10)$$

$$HRj = zR_{jus} - zR_{mont} + J(VRj) \cdot L \quad (11)$$

5. CASO DE ESTUDO

Conduta adutora elevatória. Dados do problema.

- | | | |
|------|-------------------------|---|
| i) | Caudal bombado: | $Q = 100$ litros/segundo |
| ii) | Material da conduta: | Ferro fundido |
| iii) | Diâmetro da conduta: | $D = 350$ milímetros |
| iv) | Celeridade: | $a = 1000$ metros/segundo |
| v) | Comprimento da conduta: | $L = 2600$ metros |
| vi) | Desnível topográfico: | $ZG = zR_{jusante} - zR_{montante} = 65$ metros |

Tabela 1. Lei de paragem do GEB

0 • UT	1 • UT	2 • UT	3 • UT	4 • UT
NR (0)	NR (1)	NR (2)	NR (3)	NR (4)
1.00	0.75	0.50	0.25	0.00

Tabela 2. Curvas características da bomba

t	H1	V1	H2	V2	H3	V3	H4	V4
	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)
0	109.32	0	102.17	0.40	87.76	0.80	72.88	1.04
1	61.49	0	57.47	0.30	49.37	0.60	41.00	0.78
2	27.33	0	25.54	0.20	21.94	0.40	18.22	0.52
3	6.83	0	6.39	0.10	5.49	0.20	4.56	0.26

6. RESULTADOS

6.1. MÉTODO GRÁFICO

A Figura 2 apresenta o procedimento e os resultados obtidos recorrendo ao método gráfico.

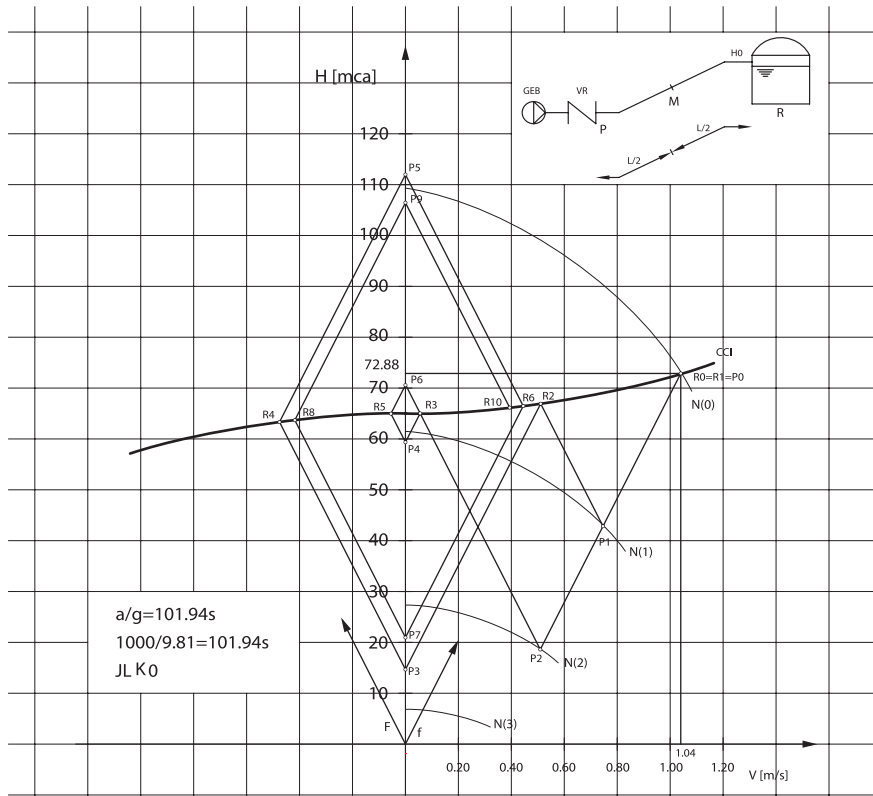


Fig. 2. Método gráfico. Variáveis dimensionais

Na Tabela 3 apresentam-se os valores numéricos dos resultados obtidos através da utilização do método gráfico.

Tabela 3. Método Gráfico. -Resultados obtidos

$i \cdot UT$	HP	VP	VR
	(m)	(m/s)	(m/s)
0	72.88	1.04	1.04
1	42.84	0.75	1.04
2	18.60	0.51	0.51
3	14.66	0	0.06
4	59.35	0	-0.48
5	111.99	0	-0.05
6	70.58	0	0.44
7	20.95	0	0.05
8	63.70	0	-0.42
9	111.99	0	-0.05

6.2. APLICAÇÃO INFORMÁTICA - CHCE

A aplicação informática desenvolvida neste trabalho desenvolveu o algoritmo descrito na Secção (4.1.). Foi utilizada a linguagem de programação PHP.

A sua estrutura procurou ser de utilização simples e intuitiva, conforme se mostra nas Figuras 3 e 4.

$H = AN^2 + BNQ + CQ^2$

A:

B:

C:

UT

1UT

2UT

3UT

4UT

5UT

H_0 [mca]:

Q_0 [l/s]:

D [mm]:

a [m/s]:

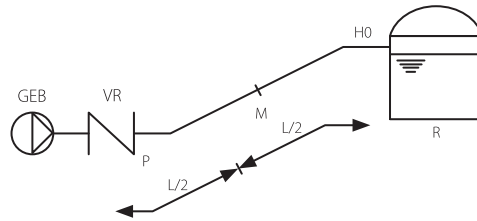
JL [mca]:

Fig. 3. CHCE. Introdução dos dados

i(UT)	H _p [mca]	v _p [m/s]	v _r [m/s]
0	72.88	1.04	1.04
1	42.82	0.74	1.04
2	18.66	0.51	0.51
3	15.06	0	0.05
4	59.66	0	-0.51
5	114.94	0	-0.05
6	70.34	0	0.47
7	18.34	0	0.05
8	59.70	0	-0.47
9	111.66	0	-0.05

Fig. 4. CHCE. Saída de resultados

Choque Hidráulico em Conduas Elevatórias



Na Tabela 4 apresentam-se os resultados obtidos com a utilização da aplicação informática desenvolvida (CHCE).

i • UT	HP (m)	VP (m/s)	VR (m/s)
0	72.88	1.04	1.04
1	42.82	0.74	1.04
2	18.66	0.51	0.51
3	15.06	0	0.05
4	59.66	0	-0.51
5	114.94	0	-0.05
6	70.34	0	0.47
7	18.34	0	0.05
8	59.70	0	-0.47
9	111.66	0	-0.05

Tabela 4. CHCE. -Resultados obtidos

7. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Na Tabela 5 apresenta-se o estudo comparativo dos resultados obtidos por via gráfica com os obtidos através da aplicação CHCE.

Tabela 5. -Comparação de resultados obtidos. [X_r = (X_g / X_c)]

i	Gráfico	CHCE	Gr/Chce	Gráfico	CHCE	Gr/Chce	Gráfico	CHCE	Gr/Chce
	HP g (m)	HP c (m)	HP r	VP g (m/s)	VP c (m/s)	VP r	VR g (m/s)	VR c (m/s)	VR r
0	72.88	72.88	1.00	1.04	1.04	1.00	1.04	1.04	1.00
1	42.84	42.82	1.00	0.75	0.74	1.01	1.04	1.04	1.00
2	18.60	18.66	1.00	0.51	0.51	1.00	0.51	0.51	1.00
3	14.66	15.06	0.97	0	0	-	0.06	0.05	1.20
4	59.35	59.66	0.99	0	0	-	-0.48	-0.51	0.94
5	111.99	114.94	0.97	0	0	-	-0.05	-0.05	1.00
6	70.58	70.34	1.00	0	0	-	0.44	0.47	0.94
7	20.95	18.34	1.14	0	0	-	0.05	0.05	1.00
8	63.70	59.70	1.07	0	0	-	-0.42	-0.47	0.89
9	111.99	111.66	1.00	0	0	-	-0.05	-0.05	1.00

8. CONCLUSÕES

- i) O objectivo desta primeira abordagem consiste na determinação dos valores extremos da pressão nos pontos mais desfavoráveis. Nesta fase avalia-se o comportamento das condutas sem dispositivos de protecção.
- ii) A análise das secções (P) e (M), permite numa primeira fase, o traçado aproximado das envolventes das pressões máximas e das pressões mínimas, pois são estas pressões que poderão condicionar o bom funcionamento da conduta elevatória.
- iii) As pressões mínimas ou depressões são as mais gravosas, podendo criar-se condições de ocorrência da cavitação, fenómeno que a longo prazo poderá provocar a rotura da conduta.
- iv) As pressões máximas poderão ter como consequência a necessidade de uma escolha criteriosa do material da conduta, de modo a que nunca se ultrapassem os valores da pressão nominal do material da conduta.
- v) A aplicação informática desenvolvida e testada neste trabalho (CHCE) substitui com vantagens evidentes o método gráfico.
- vi) Essas vantagens traduzem-se em:
 - Maior rapidez do cálculo;
 - Maior precisão numérica do modelo matemático utilizado;
 - Possibilidade de fazer a quantificação dos valores das pressões máximas e mínimas em várias secções da conduta elevatória.

AGRADECIMENTOS

O Autor agradece ao Professor Doutor Malafaya-Baptista, por todo o apoio, incentivo e partilha do conhecimento, contribuindo para a publicação deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- BETÂMIO AMEIDA, A. (1981). *Regimes Hidráulicos Transitórios em Conduitas Elevatórias*. TESE DE DOUTORAMENTO, IST, LISBOA.
- FERREIRA SILVA, JÚLIO. (2001). *Choque Hidráulico em Sistemas Elevatórios*. Guimarães.
- LENCASTRE, A. (1969). *Manual de Hidráulica Geral*. Lisboa, Técnica.
- MALAFAYA-BAPTISTA, M. (1987). *Choque Hidráulico em Conduitas Elevatórias*. Porto, Laboratório de Hidráulica, FEUP.
- STREETER, V.L. AND WYLIE, E.B. (1967). *Hydraulic Transients*. McGraw-Hill.

