



ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS



**ABES ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

I SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Sistemas de Produção e Distribuição
de Água

GOLPE DE ARÍETE EM SISTEMAS ELEVATÓRIOS
COM CONDUTAS DE ASPIRAÇÃO LONGAS

A. BETÂMIO DE ALMEIDA

Doutor, Eng^o Civil, Prof. Aux. do I.S.T., Lisboa, Portugal
Membro do Centro de Estudos de Hidrossistemas (CEHIDRO) do I.S.T.

P. FALCÃO E CUNHA

Eng^o Civil, Ex-Assist. do I.S.T., Lisboa, Portugal
Membro do Centro de Estudos de Hidrossistemas (CEHIDRO) do I.S.T.

RESUMO

Na maioria dos casos correntes, os grupos electrobomba de uma conduta elevatória estão colocados perto do reservatório de montante. Nestas condições e para efeitos de análise do golpe de aríete, o comprimento da respectiva conduta de aspiração pode ser considerado nulo em comparação com o comprimento total da conduta elevatória. Em alguns casos, contudo, a conduta de aspiração pode ter um comprimento significativo e os efeitos do golpe de aríete podem ser diferentes. Este facto pode motivar o projectista a considerar diferentes localizações da central elevatória ou de bombeamento ao longo da conduta. A localização definitiva deverá ter em conta a atenuação das variações extremas de pressão ao longo da conduta, as características topográficas do perfil da conduta e outros condicionalismos por forma a ser obtida uma solução globalmente mais económica.

Na presente comunicação, após uma breve descrição do modelo matemático desenvolvido pelos autores, apresenta-se uma síntese dos principais resultados obtidos com a exploração sistemática do mesmo. Estes resultados referem-se às cotas piezométricas extremas junto dos grupos, sendo os mesmos apresentados em função de parâmetros adimensionais.

1. INTRODUÇÃO

A colocação dos grupos electrobomba numa secção intermédia da conduta elevatória pode revelar-se útil por diversas razões das quais se destaca, nesta comunicação, a referente à protecção contra o golpe de aríete (Figura 1). Pelo facto de a conduta de aspiração (trecho a montante dos grupos) ter um comprimento não desprezável, relativamente ao trecho da conduta elevatória a jusante dos grupos, os efeitos do golpe de aríete podem ser alterados de modo significativo.

Na situação clássica de análise do golpe de aríete (saída de serviço simultânea dos grupos), as características qualitativas do regime transitório num sistema conduta de aspiração longa, são as seguintes (Figura 2):

- na conduta de aspiração, a linha piezométrica começará por subir, em consequência da diminuição do caudal na respectiva extremidade de jusante (bombas);
- no trecho da conduta elevatória a jusante dos grupos, a linha piezométrica começará por baixar, em consequência da diminuição do caudal na respectiva extremidade de montante (bombas), tendendo as variações extremas de pressão neste trecho a serem inferiores às que ocorreriam no caso de a conduta de aspiração ter um comprimento nulo ($L_1 = 0$ na Figura 1);
- a variação das cotas piezométricas nas secções de aspiração e de compressão das bombas poderá proporcionar o escoamento através destas e alterar o instante de anulação do caudal ou de fechamento das válvulas de retenção;
- após o fechamento das válvulas de retenção, os regimes transitórios nos dois trechos da conduta elevatória ficam desacoplados, oscilando as linhas piezométricas respectivas em torno da posição de equilíbrio final.

Ao contrário do que acontece com o caso em que os grupos estão colocados junto do reservatório de montante, é muito escassa a bibliografia existente contendo informação útil relativa às variações de cota piezométrica nos sistemas elevatórios em consideração. Com algum interesse prático refere-se, contudo, uma comunicação de Lev Pavluch (PAVLUCH 1970).

A presente comunicação tem por objectivo principal a divulgação de alguns resultados obtidos a partir da exploração sistemática de um modelo matemático (modelo RESBOM) desenvolvido pelos autores no CEHIDRO. Os resultados apresentados referem-se às cotas piezométricas extremas junto dos grupos sendo utilizados parâmetros adimensionais. Em ALMEIDA e CUNHA 1983 e 1984 estão compilados ou comentados outros resultados, nomeadamente as variações de cota piezométrica em diferentes secções ao longo da conduta.

2. MODELO MATEMÁTICO

2.1 - Hipóteses básicas

Na elaboração do modelo RESBOM admitiram-se as seguintes hipóteses:

- conduta elevatória única e uniforme (diâmetro, espessura, material e celeridade constantes ao longo de todo o comprimento);
- saída de serviço simultânea dos grupos electrobomba podendo os mesmos ser substituídos por um grupo equivalente;
- ausência de dispositivos especiais de protecção à excepção das válvulas de

retenção colocadas imediatamente a jusante dos grupos e de eventuais volantes de inércia acoplados a estes;

- fechamento instantâneo das válvulas de retenção no instante da anulação do caudal nas bombas, admitindo-se que as mesmas não reabrem.

Na dedução das equações básicas do modelo matemático admitiram-se ainda as seguintes hipóteses:

- escoamento puramente turbulento e unidimensional nas condutas, sendo desprezáveis a altura cinética e as perdas de carga localizadas e admitindo-se, em cada secção da conduta, a distribuição uniforme das velocidades;
- validade, durante os regimes transitórios, das curvas características e das fórmulas para cálculo das perdas de carga utilizadas em regime permanente (hipótese de comportamento quasi-estacionário);
- comportamento reológico elástico e linear do líquido (água) e da conduta, não sendo considerados os eventuais efeitos de cavitação ou de rotura da coluna líquida.

2.2 - Equações básicas

As equações básicas, válidas na modelação dos transitórios hidráulicos ao longo da conduta, são as seguintes:

- Equação do Balanço da Quantidade de Movimento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gS \frac{\partial H}{\partial x} + RQ |Q| = 0 \quad (1)$$

- Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

em que Q = caudal, H = cota piezométrica, S = área da secção transversal da conduta, R = coeficiente de perda de carga contínua, c = celeridade das ondas elásticas, g = aceleração da gravidade, x = distância ao longo do eixo da conduta e t = tempo. Na resolução numérica do sistema de equações (1) e (2) utiliza-se o método das características, na modalidade de malha computacional prefirida com Δt constante, em conjunto com o método explícito de diferenças finitas. Da aplicação deste método misto resultam as seguintes duas famílias de equações (ALMEIDA 1981):

- Equações C^+

$$(H_p - H_E) + \frac{c}{gS} (Q_p - Q_E) + RQ_E |Q_E| (x_p - x_E) = 0 \quad (3)$$

$$x_p - x_E = + c \Delta t \quad (4)$$

- Equações C^-

$$(H_p - H_D) - \frac{c}{gS} (Q_p - Q_D) + RQ_D |Q_D| (x_p - x_D) = 0 \quad (5)$$

$$x_p - x_D = -c \Delta t \quad (6)$$

em que os índices indicam os pontos da malha computacional no plano (x, t) a

que dizem respeito os valores (Figura 3). No caso de ser escolhido um passo de cálculo temporal tal que $\Delta x > c \Delta t$, os valores de Q e de H correspondentes aos pontos E e D são obtidos por interpolação linear a partir dos valores nos nós A, B e C (Figura 3). A resolução das equações (3) e (5) permite obter de forma explícita os valores de Q_p e de H_p nas secções internas das condutas e em cada instante de cálculo.

2.3 - Modelação dos grupos electrobomba

A obtenção de soluções numéricas do sistema de equações básicas exige a caracterização matemática das condições de fronteira e o conhecimento das condições iniciais. No caso em análise houve que considerar dois tipos de condições de fronteira (Figura 3): grupo electrobomba equivalente (na extremidade de montante ou numa secção intermédia da conduta elevatória) e reservatórios de grandes dimensões (nas extremidades de montante e de jusante da conduta elevatória).

Em regime permanente, a caracterização do grupo electrobomba equivalente a n bombas iguais e colocadas em paralelo é feita unicamente com a equação da curva característica das bombas a qual se admite ser, no modelo RESBOM, do seguinte tipo:

$$H_b = AN^2 + BNQ_b/n - CQ_b^2/n^2 \quad (7)$$

em que H_b = altura de elevação nas bombas (diferenças entre as cotas piezométricas imediatamente a montante e a jusante das bombas), Q_b = caudal no grupo equivalente, N = velocidade do grupo equivalente (em r.p.m.), A, B, C = coeficientes da curva característica de cada bomba.

Desligados os motores eléctricos e iniciado o regime transitório, as equações que caracterizam o comportamento dos grupos são as seguintes:

- Curva característica das bombas (equação (7))

- Binário resistente nos grupos (negativo)

$$T_r = T_H + T_a = T_H (1 + K_a) \quad (8)$$

- Binário resistente hidráulico:

$$T_H = - \frac{60}{2\pi} \gamma Q_b H_b / (\eta_H N) \quad (9)$$

- Equação das massas girantes:

$$\gamma Q_b H_b = - \left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 \left(\frac{PD^2}{4g}\right) \left(\frac{\eta_H}{1 + K_a}\right) N \frac{dN}{dt} \quad (10)$$

em que T_H, T_a = binários hidráulico e de atrito, γ = peso volúmico da água, η_H = rendimento da bomba, K_a = coeficiente de atrito e $PD^2 = 4gI$, sendo I o momento de inércia polar das massas girantes. No modelo RESBOM a determinação do valor de N é feita do seguinte modo (Figura 1):

- no intervalo de tempo T_E (tempo de reflexão elástica total do sistema = $2L_3/c$) após a saída de serviço dos grupos electrobomba segue-se um modelo conceptual de tipo exponencial baseado numa solução exacta aproximada (ALMEIDA 1981);

- para tempos de simulação do regime transitório superiores a T_E procede-se

à integração numérica da equação das massas girantes de acordo com uma técnica de previsão-correcção baseado no método de diferenças finitas.

Da conjugação das equações do método das características (equações (3) e (5)) com as equações (7) a (10) obtém-se a seguinte expressão para o caudal instantâneo na bomba equivalente:

$$Q_b = (Y + \sqrt{Y^2 + 4 C^* X})/2/C^* \quad (11)$$

sendo:

$$C^* = C'/n^2 \quad (12)$$

$$Y = BN/n - 2c/(gS) \quad (13)$$

$$X = C1 - C2 - AN^2 \quad (14)$$

$$C1 = H_E + \left(\frac{c}{gS} - R|Q_E|\right) \cdot Q_E \quad (15)$$

$$C2 = H_D - \left(\frac{c}{gS} - R|Q_D|\right) \cdot Q_D \quad (16)$$

A partir da expressão (11), o modelo detecta automaticamente a inversão de sentido do caudal Q_b e torna esta grandeza nula. Determinado o valor de Q_b em cada instante de cálculo, os valores das cotas piezométricas imediatamente a montante e a jusante dos grupos são obtidos a partir das equações (3) e (5).

3. PARÂMETROS ADIMENSIONAIS

Na exploração sistemática de um modelo, matemático ou físico, é conveniente ter em conta a análise dimensional, tendo em vista a caracterização dos sistemas e das condições de cálculo por parâmetros adimensionais. A utilização adequada destes parâmetros permite uma generalização racional dos resultados obtidos por via das simulações numéricas e uma apreciável redução no número de cálculos a efectuar. Após selecção das grandezas que caracterizam o fenómeno hidráulico em análise e aplicação do teorema de Vaschy-Buckingham, obtiveram-se os seguintes parâmetros adimensionais fundamentais (ALMEIDA e CUNHA 1984):

- Parâmetro característico da conduta:

$$\rho = \frac{\lambda c}{\lambda g} = \frac{c V_o}{g H_{bo}} \quad (17)$$

- Coeficiente de compensação energética:

$$\lambda = \frac{E_g}{E_c} \quad (18)$$

sendo:

$$E_g = \frac{PD^2 N_o^2}{7 \cdot 153} \quad \text{e} \quad E_c = 0,5 \rho S L_3 V_o^2 \quad (19)$$

- Parâmetro do comprimento da conduta de aspiração:

$$\lambda_B = \frac{L_1}{L_3} \quad (20)$$

- Parâmetros da variação de cota piezométrica (λ_{HM} e λ_{Hm}):

$$\lambda_H = \frac{\Delta H}{H_{bo}} \quad (21)$$

- Parâmetro da perda de carga:

$$\lambda_{\Delta} = \frac{\Delta H_o}{H_{bo}} \quad (22)$$

indicando o índice o que o valor corresponde ao regime permanente inicial.

4. METODOLOGIA SEGUIDA NA EXPLORAÇÃO DO MODELO

Na exploração sistemática já efectuada com o modelo RESBOM fizeram-se variar os valores dos parâmetros λ_B , λ e $\bar{\rho}$:

- consideraram-se oito posições para o grupo electrobomba equivalentes (valores de λ_B compreendidos entre 0 e 0,7);
- para cada valor de λ_B consideraram-se 11 valores para o PD² sendo o valor mínimo 300 N.m² e os restantes obtidos por sucessivas duplicações (valores de λ compreendidos entre 0,025 e 26,5);
- para cada par de valores de λ_B e λ fez-se variar o valor da celeridade entre 300 m/s e 1000 m/s o que corresponde a considerar oito valores para o parâmetro $\bar{\rho}$ (valores de $\bar{\rho}$ compreendidos entre 1,3 e 4,3).

As variações dos parâmetros são efectuadas de modo automático de acordo com as instruções de um programa adicional do modelo RESBOM. Foram também executados alguns cálculos de sensibilidade para avaliação dos efeitos, nos resultados, de diferentes valores do passo de cálculo Δt e da perda de carga inicial (influência de λ_{Δ}). No âmbito do presente trabalho executaram-se cerca de 1500 simulações numéricas. A bomba modelada é do tipo centrífugo com $N_s = 78$ r.p.m..

5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

O estudo efectuado teve por objectivo principal a obtenção das variações extremas da cota piezométrica ao longo da conduta elevatória, do tempo de anulação do caudal nas bombas e da velocidade residual de rotação dos grupos no instante de fechamento da válvula de retenção. Na presente comunicação apresenta-se, unicamente, uma súmula de resultados referentes às variações de cotas piezométricas junto dos grupos. Os resultados completos da exploração sistemática são apresentados em ALMEIDA e CUNHA 1983 e 1984.

As variações extremas da cota piezométrica são apresentados, sob a forma adimensional, pelos parâmetros λ_H cujos valores, em cada secção de cálculo, são obtidos do seguinte modo (Figura 1):

- Secções a jusante do grupo electrobomba:

$$\lambda_{HM} = \Delta H_M / H_{bo} = (H_M - Z_J) / H_{bo} \quad (23)$$

$$\lambda_{Hm} = \Delta H_m / H_{bo} = (H_m - Z_j) / H_{bo}$$

- Secções a montante do grupo electrobomba:

$$\lambda_{HM} = \Delta H_M / H_{bo} = (H_M - Z_M) / H_{bo} \quad (24)$$

$$\lambda_{Hm} = \Delta H_m / H_{bo} = (H_m - Z_M) / H_{bo}$$

em que H_M = cota piezométrica máxima, H_m = cota piezométrica mínima, Z_M = cota

do nível de água no reservatório de montante, Z_j = cota do nível de água no reservatório de jusante e H_{bo} = altura total de elevação inicial. Nas Figuras 4 e 5 indicam-se os valores de λ_{HM} e de λ_{Hm} , respectivamente a montante e a jusante dos grupos, para cinco valores de λ ($\lambda = 0,4, 0,8, 1,6, 3,3$ e $6,6$) e para diferentes valores de λ_B (diferentes localizações do grupo electrobomba equivalente) mantendo-se constante o valor de $\bar{\rho}$ ($\bar{\rho} = 0,3$). Por seu turno, nas Figuras 6 e 7 indicam-se os valores de λ_{HM} e de λ_{Hm} nas mesmas secções de cálculo anteriores mas em função do parâmetro $\bar{\rho}$, para três valores de λ ($\lambda = 0,4, 1,6$ e $6,6$) e para três valores de λ_B ($\lambda_B = 0,2, 0,3$ e $0,4$).

Dos resultados obtidos podem retirar-se, entre outras, as seguintes conclusões (Figuras 4 a 7):

- para valores de λ superiores a três, os efeitos elásticos deixam de ser significativos (influência do parâmetro $\bar{\rho}$) passando as envolventes dos valores extremos de λ_H a serem lineares (comportamento como coluna rígida);
- para valores de λ inferiores a três, a influência de $\bar{\rho}$ faz-se sentir de forma oscilatória nos valores de λ_{HM} a jusante do grupo e de λ_{Hm} a montante do grupo;
- em termos práticos e para valores de $\bar{\rho}$ superiores a dois, os efeitos elásticos deixam de ter influência relevante em λ_H para $\lambda > 0,8$ e as envolventes passam a ser quase lineares para $\lambda > 1,6$;
- para elevados valores de λ , os valores de λ_{Hm} correspondentes às mesmas secções de cálculo a jusante do grupo tendem a ser os mesmos qualquer que seja o valor de λ_B ;
- a ocorrência de cotas piezométricas no grupo possibilitando o funcionamento de um "by-pass", para protecção contra o golpe de aríete, é muito difícil (e.g. para $\lambda_B = 0$ tal só ocorre para $\bar{\rho} < 0,21$).

Do ponto de vista prático, é possível encontrar uma regra de redistribuição de valores de λ_H nas secções adjacentes aos grupos, válida para elevados valores de λ ($\lambda > 2,5$): o valor de λ_{HM} na secção de jusante dos grupos no caso de $\lambda_B = 0$ é igual à soma, em valor absoluto, dos valores de λ_{HM} e de λ_{Hm} correspondentes, respectivamente, às secções de jusante e de montante dos grupos no caso de $\lambda_B \neq 0$ e, de modo equivalente, o valor de λ_{Hm} na secção de jusante dos grupos para $\lambda_B = 0$ é igual à soma, em valor absoluto, dos valores de λ_{HM} e de λ_{Hm} correspondentes, respectivamente, às secções de montante e de jusante do grupo no caso de $\lambda_B \neq 0$.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem ao projectista fazer uma primeira avaliação dos efeitos, no golpe de aríete, de diferentes comprimentos da conduta de aspiração (diferentes valores de λ_B) e proceder a dimensionamentos preliminares de volantes de inércia (diferentes valores de λ). Os parâmetros adimensionais seleccionados e utilizados no presente estudo são adequados à caracterização dos regimes transitórios em sistemas elevatórios do tipo em causa.

É de referir que na escolha do comprimento da conduta de aspiração há que atender às condições de funcionamento em regime permanente, em particular no que concerne a ocorrência da cavitação na conduta e nas bombas.

7. AGRADECIMENTO

O presente trabalho foi realizado no CEHIDRO para a Direcção Geral do Saneamento Básico (Lisboa, Portugal) cujo apoio a estudos relativos a regimes transitórios se regista. Os autores agradecem a colaboração prestada no início do estudo pelo Eng^o Alexandre Borga do CEHIDRO.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A.B.; - Regimes Hidráulicos Transitórios em Conduitas Elevatórias. Tese de Doutoramento, IST, 1981
- ALMEIDA, A.B.; CUNHA; P.F. - Golpe de Aríete em Conduitas Elevatória. Análise dos Efeitos de Conduitas de Aspiração Longas. CEHIDRO, 1983
- ALMEIDA, A.B.; CUNHA, P.F. - Simulação Computacional do Golpe de Aríete em Sistemas Elevatórios com Conduitas de Aspiração Longas. Para publicação na revista TÉCNICA, 1984
- PAVLUCH, L. - Suction Line Effects on Transients in Centrifugal Pump Schemes. IARH, Sym. 1970, paper J2, 1970.

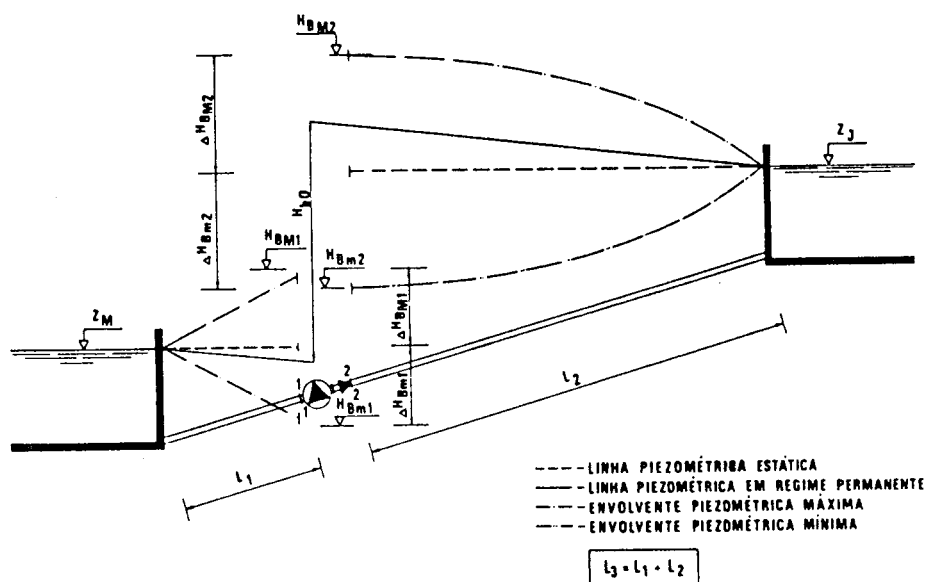


FIGURA 1 - Esquema geral de uma conduta elevatória com a bomba em secção intermédia.

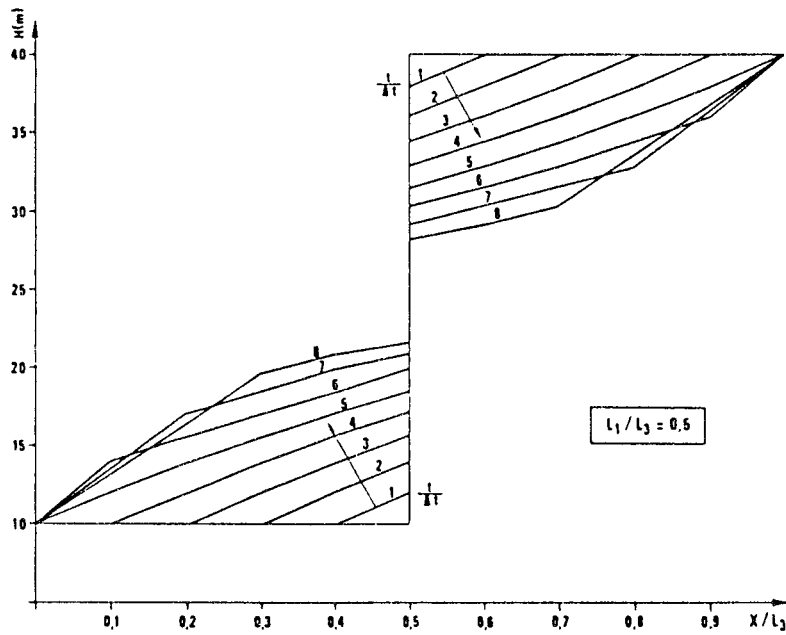


FIGURA 2 - Evolução da linha piezométrica após saída de serviço dos grupos (sem perda de carga)

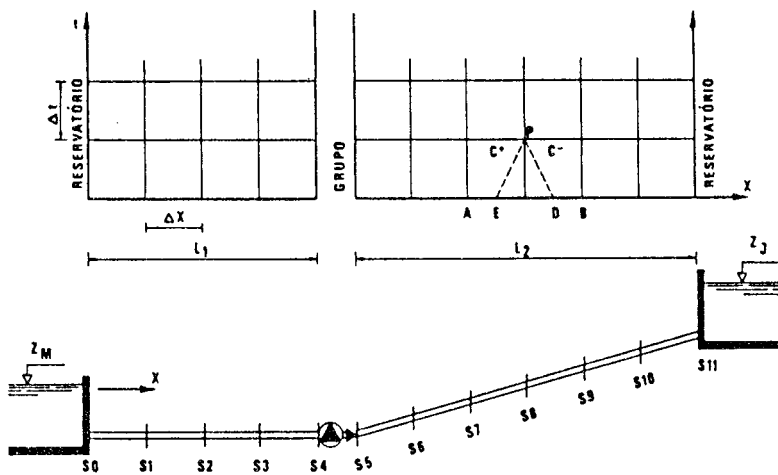


FIGURA 3 - Modelação matemática (método das características). Discretização e tipos de fronteira

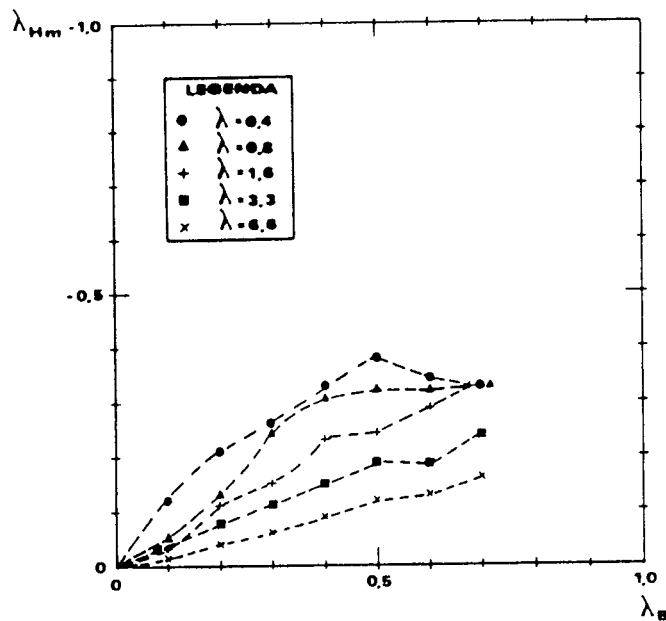
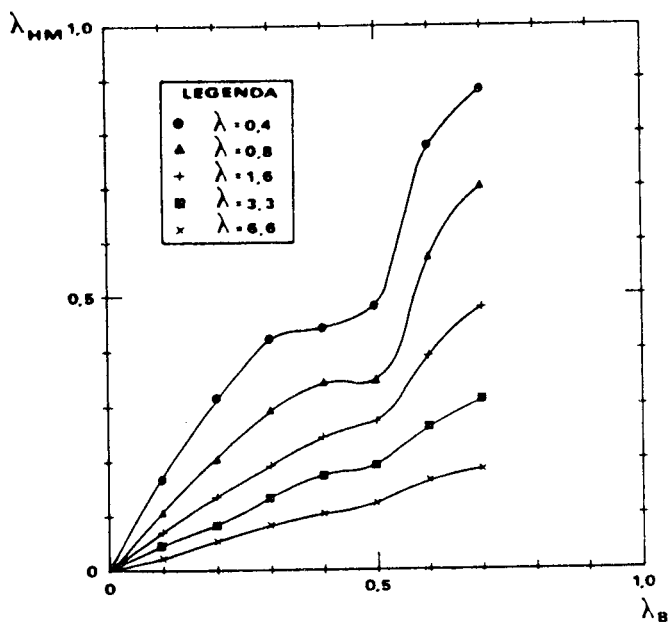


FIGURA 4 - Valores de λ_{HM} e λ_{Hm} na secção imediatamente a montante do grupo para diferentes valores de λ_B e λ ($\bar{\rho} = 3,0$ e $\lambda_{\Delta} = 0,1$)

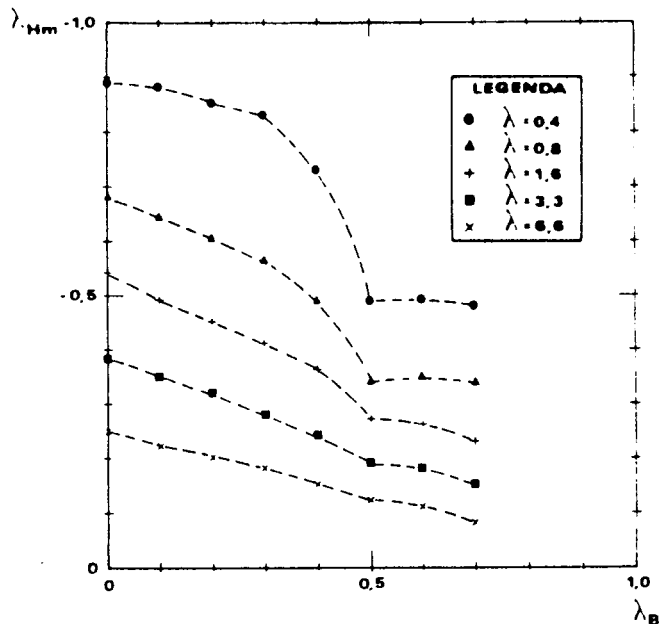
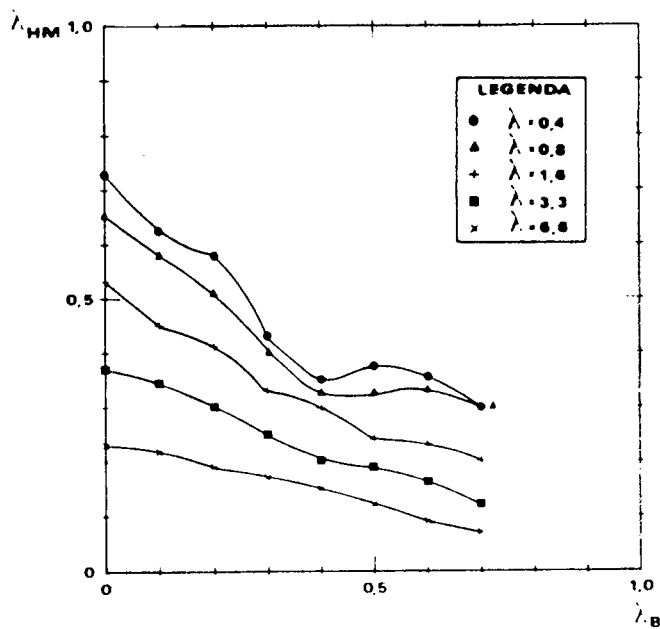


FIGURA 5 - Valores de λ_{HM} e λ_{Hm} na secção imediatamente a jusante do grupo para diferentes valores de λ_B e λ ($\bar{\rho} = 3,0$ e $\lambda_{\Delta} = 0,1$)

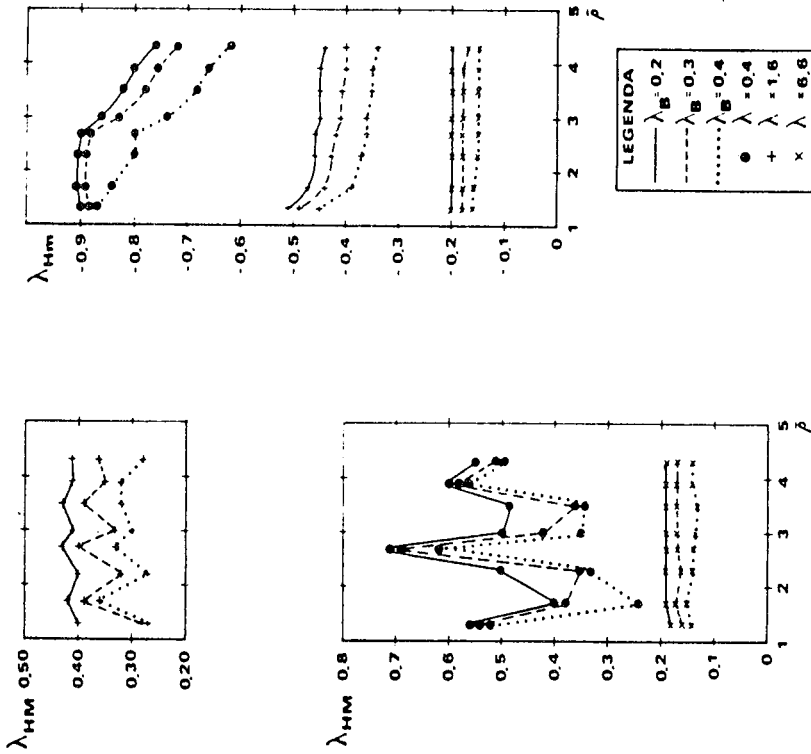


FIGURA 7 - Valores de λ_{HM} e λ_{HM} na secção imediatamente a jusante do grupo para diferentes valores de $\bar{\rho}$, λ_B e λ ($\lambda_\Delta = 0,1$)

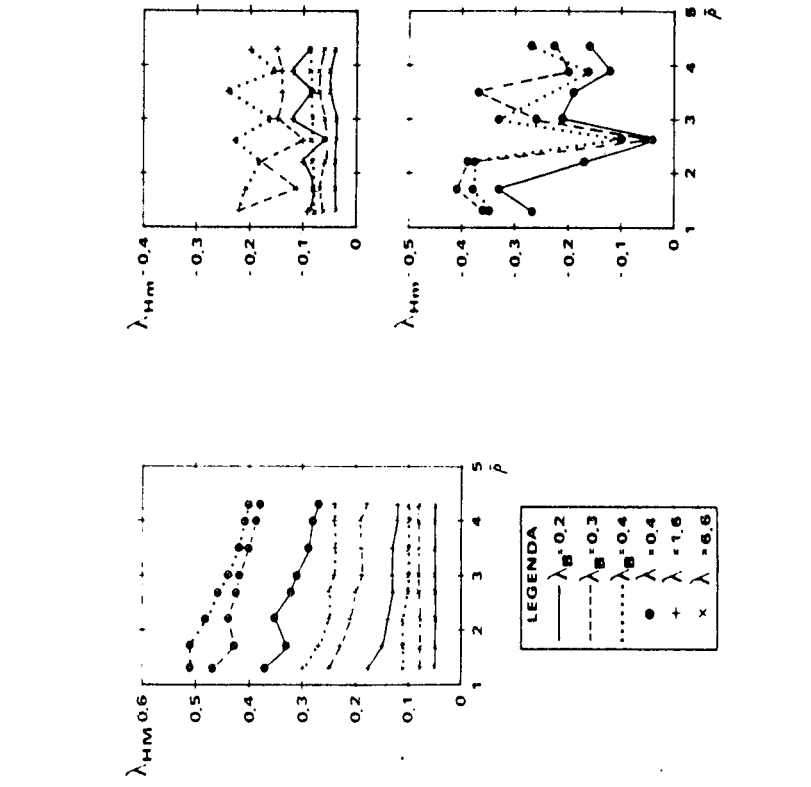


FIGURA 6 - Valores de λ_{HM} e λ_{HM} na secção imediatamente a montante do grupo para diferentes valores de $\bar{\rho}$, λ_B e λ ($\lambda_\Delta = 0,1$)