

Fib. N.º \_\_\_\_\_  
Prog. N.º \_\_\_\_\_  
Aut. *Repositório*

REINALDO MILLER MARTINS

*Dep. da PNE  
Tomos 3200.*

RESERVATÓRIO HIDROPNEUMÁTICO  
EM TUBULAÇÕES DE RECALQUE

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À  
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP  
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO  
MESTRE EM ENGENHARIA

CONSULTA  
FD-805

SÃO PAULO-1980

REINALDO MILLER MARTINS  
ENG.MECÂNICO - MACKENZIE - 1969

RESERVATÓRIO HIDROPNEUMÁTICO  
EM TUBULAÇÕES DE RECALQUE

Dissertação apresentada à  
Escola Politécnica da USP  
para obtenção do Título  
Mestre em Engenharia.

Orientador : Prof.Dr. Edmundo Koelle  
Prof.Assistente Doutor  
do Departamento de  
Engenharia Mecânica da EPUSP.

São Paulo - 1980



i.

A Ana Maria  
Patricia  
Priscila  
Stella  
D. Angela

## AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus agradecimentos:

- Ao Prof.Dr. Edmundo Koelle, pela orientação na elaboração desta dissertação.
- Aos Engs. Paulo Takanori Katayama e Marcia Aparecida Garcia Tezan pela colaboração.



## RESUMO

A presente dissertação apresenta estudos sobre aplicação de Reservatórios Hidropneumáticos como proteção de instalações de recalque.

É desenvolvido inicialmente um modelo matemático representativo do comportamento do Reservatório Hidropneumático, considerando os efeitos dos conjuntos elevatórios e estudada uma instalação.

Baseado no modelo desenvolvido, é feita uma análise das transformações do gás no interior do Reservatório Hidropneumático, considerando Processo Politrópico e o Primeiro Princípio da Termodinâmica.

É estudada a influência da perda de carga na entrada do Reservatório Hidropneumático com o desenvolvimento de modelo matemático para Orifícios Diferenciais e Câmaras de Vórtice.

O modelo matemático é simplificado, desprezando-se os efeitos dos conjuntos elevatórios. É verificado o erro decorrente da simplificação em diferentes instalações.

São obtidas curvas adimensionais com a utilização do modelo matemático completo e o simplificado, em função da perda de carga no orifício diferencial, na tubulação principal e de parâmetros representativos do Reservatório Hidropneumático e da tubulação principal.

ABSTRACT

This dissertation presents studies on the use of Air Chambers as a protection for the installations of pump discharge lines.

At first it is developed a mathematical model representing the Air Chambers' behaviour, taking into consideration the effects of the Motor Pumps and after studying a installation.

Based on the developed model it is done an analysis of the transformation occurred in the gas inside the Air Chambers, taking into consideration the Politropic Process and the First Principle of Thermodynamics.

It is studied the influence of the head loss in the entrance of the Air Chambers with the development of the mathematical model for Diferential Orifices and Vortex Chamber.

The mathematical model is simplified and the effects of the motor pumps is neglected. The error occurred on the simplification of different installations is checked.

Adimensional curves are obtained with the use of the complete mathematic model and the simplified one, as function of the head loss in the differential orifices, in the main pipe and of parameters representative of the Air Chamber and the main pipe.



## ÍNDICE

	Pág.
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	xii
Nomenclatura .....	xiii
Capítulo I - Introdução .....	1
Capítulo II - Equacionamento do Escoamento Transiente.	10
Capítulo III- Descrição e Equacionamento das Condições de Contorno.....	23
3.1 - Condição de Contorno para Bomba de Fluxo.....	23
3.2 - Condição de Contorno para Inércia Concentrada	28
3.3 - Condição de Contorno para Reservatório Hidro- pneumático .....	29
3.4 - Condição de Contorno para Reservatório com - Nível Especificado .....	33
Capítulo IV - Um Exemplo de Aplicação .....	36
Capítulo V - Considerações Práticas Sobre Instalação do Reservatório Hidropneumático.....	53
Capítulo VI - Análise Termodinâmica .....	67
Capítulo VII- A Influência do Orifício Diferencial....	108
Capítulo VIII-Análise Matemática Através de Modelo Ma- temático, Desprezada a Influência dos - Conjuntos Elevatórios .....	128
Capítulo IX - Análise Adimensional de Instalação com - Reservatório Hidropneumático .....	136
Capítulo X - Conclusões e Recomendações .....	153

## Apêndices

Apêndice A - Listagem do Programa Utilizado no Capítulo III .....	157
Apêndice B - Listagem dos Programas Utilizados no Capítulo VI .....	159
Apêndice C - Listagem dos Programas Utilizados no Capítulo VII .....	162
Apêndice D - Listagem do Programa Utilizado - no Capítulo VIII .....	164
Apêndice E - Desenvolvimento Matemático para - Adimensionalização de Instalações Referentes ao Capítulo IX .....	167
Referências Bibliográficas .....	172



## LISTA DE FIGURAS

Pág.

2.1 - Solução pelo Método das Características (malha x,t) .....	14
3.1 - Curvas Adimensionais de Bomba Radial $C_N = 0,67$ .....	24
3.2 - Valores de WH(x) e WB(x) para Bomba com Coeficiente de Rotação $C_N = 0,67$ .....	24
3.3 - Inércia Concentrada .....	28
3.4 - RHO com Inércia Concentrada .....	30
3.5 - Separação de Colunas Conforme Modelo - Utilizado .....	35
4.1 - Instalação de Recalque .....	37
4.2 - Instalação de Recalque .....	38
4.3 - Instalação de Recalque .....	39
4.4 - Perfil da Tubulação Principal .....	40
4.5 - Linhas Piezométricas que Ocorrem sem - Presença do RHO .....	42
4.6 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima na Presença do RHO .....	43
5.1 - Comportamento da Carga Junto à Elevató- ria, Volume de Ar e Vazão do RHO em Fun- ção do Tempo .....	53
5.2 - Comportamento da Carga no Meio da Tubula- ção Principal .....	54

	Pág.
5.3 - Linhas Piezométricas Máximas e Mínimas para Diferentes Volumes Iniciais de Ar no Interior do RHO .....	55
5.4 - Variação do $H_{\max}$ Junto à Elevatória em Função do Volume Inicial .....	56
5.5 - Variação do $H_{\min}$ Junto à Elevatória em Função do Volume Inicial .....	57
5.6 - Fluxograma de Engenharia .....	61
5.7 - Diagrama Funcional dos Comandos .....	64
6.1 - Comparação entre a Transformação Politrópica e os Dados Experimentais (ref.18) .....	74
6.2 - Comparação entre a Transformação Politrópica e a "Rational Heat Transfer" (ref.18).....	76
6.3 - Diagrama p-V para as Transformações Conforme Modelo para Análise Termodinâmica do RHO ....	82
6.4 - Comportamento da Temperatura do Ar no RHO em Função do Tempo .....	82
6.5 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para Instalação do Capítulo IV Através do Modelo para Análise Termodinâmica .....	83
6.6 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima da Instalação do Capítulo IV, considerando Aproximação de Segunda Ordem.....	87
6.7 - Diagrama p-V para as Transformações Admitida Convecção Forçada para o Ar Externo .....	89
6.8 - Comportamento da Temperatura do Ar no RHO em Função do Tempo .....	90



6.9 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima da Instalação do Capítulo IV, considerando a Troca de Calor Através de Convecção Forçada .....	91
7.1 - Montagem do Orifício de Perda de Carga Diferencial Tipo "Orifício Diferencial" .....	109
7.2 - Montagem da Válvula de Retenção com o Obturador Provido de um Pequeno Orifício .....	109
7.3 - Detalhe do Estrangulamento - Sentido de Escoamento RHO - Tubulação Principal .....	110
7.4 - Detalhe do Estrangulamento - Sentido de Escoamento Tubulação Principal $\rightarrow$ RHO .....	111
7.5 - Coeficiente de Perda de Carga $C_L$ do Estrangulamento .....	112
7.6 - Coeficiente de Perda de Carga $C_{LL}$ do Estrangulamento .....	114
7.7 - RHO com Inércia Concentrada e Orifício Diferencial .....	115
7.8 - Linhas Piezométricas Máximas e Mínimas da Instalação Analisada no Capítulo IV .....	121
7.9 - Câmara de Vórtice em RHO .....	123
7.10- Linhas Piezométricas Máxima e Mínima da Instalação Analisada no Capítulo IV, provida de FERT .....	124
7.11- Detalhe do Estrangulamento para Análise de Cavitação .....	126
7.12- Números de Cavitação para Estrangulamento no Sentido RHO - Tubulação Principal .....	127

	Pág.
8.1 - Esquema de Instalação Representativa do Modelo Matemático Utilizado nos Capítulos Anteriores.	128
8.2 - Esquema de Instalação Representativa do Modelo Matemático, Desprezada a Influência dos Conjuntos Elevatórios .....	129
8.3 - Linhas Piezométricas Máximas e Mínimas da Instalação .....	135
9.1 - Linhas Piezométricas Máximas e Mínimas Adimensionais $\rho^* = 1,00$ , $\phi^* = 10$ , $K_f^* = 0,1$ , $K_{or}^* = 0,6$	140
9.2 - Linhas Piezométricas Máximas e Mínimas Adimensionais $\rho^* = 1,00$ , $\phi^* = 10$ , $K_f^* = 0,5$ , $K_{or}^* = 0,4$ .....	141
9.3 - Linhas Piezométricas Máximas e Mínimas Adimensionais $\rho^* = 1,00$ , $\phi^* = 10$ , $K_f^* = 0,8$ , $K_{or}^* = 0,1$ .....	142
9.4 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para $K_f^* = 0,1$ , $K_{or}^* = 0,1$ , $\rho^* = 0,5$ , $\phi^* = 3$ .....	145
9.5 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para $K_f^* = 0,1$ , $K_{or}^* = 0,1$ , $\rho^* = 2,0$ , $\phi^* = 40$ .....	146
9.6 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para $K_f^* = 0,1$ , $K_{or}^* = 0,1$ , $\rho^* = 1,0$ , $\phi^* = 40$ ....	147
9.7 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para $K_f^* = 0,1$ , $K_{or}^* = 0,1$ , $\rho^* = 1,0$ , $\phi^* = 3$ .....	148
9.8 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para $K_f^* = 0,1$ , $K_{or}^* = 0,1$ , $\rho^* = 0,5$ , $\phi^* = 3$ .....	149
9.9 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para $K_f^* = 0,1$ , $K_{or}^* = 0,1$ , $\rho^* = 1,0$ , $\phi^* = 40$ ....	150



- 9.10 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para  
 $K_f^* = 0,1$  ,  $K_{or}^* = 0,1$  ,  $\rho^* = 0,5$  ,  $\phi^* = 40 \dots$  151
- 9.11 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para  
 $K_f^* = 0,1$  ,  $K_{or}^* = 0,1$  ,  $\rho^* = 1,0$  ,  $\phi^* = 3 \dots$  152

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
4.1 - Bados e Resultados da Instalação Analisada pelo Método das Características.....	44
4.2 - Quadro Comparativo dos Resultados Obtidos com o Exemplo de Aplicação, para Volume Inicial de Ar Igual a 20 m <sup>3</sup> .....	52
6.1 - Potência Fornecida ao Líquido e Temperatura do Ar no Final do Intervalo .....	70
6.2 - Resultado do Processamento, Considerando Troca de Calor por Convecção Natural e Aproximação de Primeira Ordem .....	92
6.3 - Resultado do Processamento, Considerando Troca de Calor por Convecção Natural e Aproximação de Segunda Ordem .....	97
6.4 - Resultado do Processamento, Considerando Troca de Calor por Convecção Forçada e Aproximação de Primeira Ordem .....	102
6.5 - Quadro Comparativo dos Valores Encontrados com as Diferentes Hipóteses, Referentes à Instalação Analisada no Capítulo IV .....	107
8.1 - Comparação Entre o Modelo Matemático Completo e o Simplificado, Sob o Ponto de Vista de Processamento .....	133



## NOMENCLATURA

a	- celeridade	m/s
A	- área da seção transversal da tubulação principal	m <sup>2</sup>
A <sub>3</sub>	- área da seção transversal da inércia concentrada	m <sup>2</sup>
AT	- superfície de troca de calor do RHO	m <sup>2</sup>
C <sub>1</sub>	- vínculos da tubulação principal	
C <sub>0</sub>	- capacitância do RHO em regime permanente	m <sup>2</sup>
C <sub>P</sub>	- constante característica "mais"	
C <sub>M</sub>	- constante característica "menos"	
C <sub>N</sub>	- coeficiente de rotação da bomba	
C <sub>L</sub>	- coeficiente de perda de carga do orifício diferencial no sentido RHO - tubulação principal	
C <sub>LL</sub>	- coeficiente de perda de carga do orifício diferencial no sentido tubulação principal - RHO	
C <sub>P<sub>T</sub></sub>	- calor específico a pressão constante multiplicado pela massa de ar do RHO	J/°K
CDA	- coeficiente de vazão do orifício multiplicado pela área	m <sup>2</sup>
D	- diâmetro da tubulação principal	m
D <sub>3</sub>	- diâmetro da inércia concentrada	m
D <sub>e</sub>	- diâmetro de esfera	m
D <sub>r</sub>	- diâmetro do RHO	m
D <sub>M</sub>	- diâmetro menor do orifício diferencial	m
D <sub>MC</sub>	- diâmetro da seção contraída do orifício diferencial	m
E <sub>c</sub>	- energia cinética total da coluna líquida em regime permanente	kg.m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
e	- espessura de parede da tubulação principal	m
e	- base do logaritmo neperiano	

E	- módulo de elasticidade do material da tubulação principal	$N/m^2$
E(índice)	- indicação de saída do RHO	
f	- fator de atrito de Darcy-Weisbach da tubulação principal	
$f_3$	- fator de atrito de Darcy-Weisbach da inércia concentrada	
g	- aceleração da gravidade	$m/s^2$
Gr	- número de Grashoff	
H	- carga piezométrica instantânea	m
$H_p$	- carga H no instante considerado	m
$\bar{H}_A$	- carga piezométrica média absoluta no RHO	m
$H_A$	- carga piezométrica absoluta no RHO	m
$H_a$	- carga piezométrica complexa no RHO	m
$H_x$	- derivada parcial da carga instantânea na tubulação principal em relação à abscissa x	
$H_t$	- derivada parcial da carga instantânea na tubulação principal em relação ao tempo	
$H_1$	- carga instantânea no trecho 1	m
$H_{p1}$	- carga $H_1$ no instante considerado	m
$H_2$	- carga instantânea no trecho 2	m
$H_{p2}$	- carga $H_2$ no instante considerado	m
$H_4$	- carga instantânea no RHO	m
$H_{p4}$	- carga $H_4$ no instante considerado	m
$H_B$	- carga barométrica	m
$H_3$	- carga instantânea na inércia concentrada, junto ao orifício diferencial	m
$H_v$	- carga correspondente a pressão de vapor	m



$H_{P_3}$	- carga $H_3$ no instante considerado	m
$H^*$	- carga piezométrica absoluta	m
$H_H$	- carga piezométrica estática do bombeamento	m
$H_o$	- carga piezométrica do bombeamento em regime permanente	m
$H_{fo}$	- perda de carga na tubulação principal para regime permanente	m
$H_{or}$	- perda de carga no orifício junto ao RHO, para vazão de regime permanente entrando no RHO	m
$\Delta H$	- variação da carga piezométrica	m
$\Delta H_{43}$	- perda de carga no orifício diferencial, no sentido tubulação principal - RHO	m
$\Delta H_{34}$	- perda de carga no orifício diferencial, no sentido RHO - tubulação principal	m
$h'$	- carga piezométrica oscilatória instantânea do RHO	m
$h_p$	- pressão adimensional do RHO	
$h$	- carga piezométrica adimensional na bomba	
$h_c$	- coeficiente de transmissão de calor por convecção	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
$I$	- inércia total da tubulação principal	$s^2/m^2$
$i(\text{índice})$	- indicação do ponto considerado na tubulação principal	
$K$	- módulo de elasticidade volumétrica do líquido	$N/m^2$
$K_A$	- parâmetro representativo da perda de carga no orifício	
$K_1$	- parâmetro de perda de carga para tubulação principal e orifício	
$K_C$	- número de cavitação	

$K_f^*$	- parâmetro de perda de carga da tubulação principal	
$K_{or}^*$	- parâmetro de perda de carga do orifício	
$k$	- expoente da transformação adiabática	
$k_T$	- condutibilidade térmica do ar	W/m °C
$L$	- comprimento da tubulação principal	m
$L_1$	- comprimento do trecho 1	m
$L_2$	- comprimento do trecho 2	m
$L_3$	- comprimento da inércia concentrada	m
$n$	- expoente da transformação politrópica	
$N$	- número de divisões da tubulação principal	
$N_1$	- número de divisões do trecho 1	
$N_2$	- número de divisões do trecho 2	
$N_r$	- rotação instantânea da bomba	rd/s rpm
$N_{r_o}$	- rotação da bomba em regime permanente	rd/s
$Pr$	- número de Prandtl	
$P_{4_o}$	- pressão absoluta, de regime permanente no RHO	N/m <sup>2</sup>
$P_{4_H}$	- pressão absoluta estática no RHO	N/m <sup>2</sup>
$P_4$	- pressão absoluta instantânea no RHO	N/m <sup>2</sup>
$P_{4_{max}}$	- pressão absoluta máxima no RHO	N/m <sup>2</sup>
$P_{4_{min}}$	- pressão absoluta mínima no RHO	N/m <sup>2</sup>
$\Delta P_4 = P_4 - P_{4_o}$	- sobrepressão no RHO	N/m <sup>2</sup>
$Q$	- vazão instantânea	m <sup>3</sup> /s
$Q_p$	- vazão $Q$ no instante considerado	m <sup>3</sup> /s
$Q_o$	- vazão na tubulação principal de regime permanente	m <sup>3</sup> /s
$Q_1$	- vazão instantânea no trecho 1	m <sup>3</sup> /s
$Q_{PX}$	- vazão da coluna de montante da separação	m <sup>3</sup> /s



$Q_{P_1}$	- vazão $Q_1$ no instante considerado	$m^3/s$
$Q_2$	- vazão instantânea no trecho 2	$m^3/s$
$Q_{P_2}$	- vazão $Q_2$ no instante considerado	$m^3/s$
$Q_3$	- vazão instantânea na inércia concentrada	$m^3/s$
$Q_{P_3}$	- vazão $Q_3$ no instante considerado	$m^3/s$
$Q_a$	- vazão complexa do RHO	$m^3/s$
$Q_T$	- calor transferido pela massa de ar do RHO	J
$q = \frac{Q}{Q_0}$	- vazão adimensional na bomba	.
$q'$	- vazão oscilatória do RHO	$m^3/s$
Re	- número de Reynolds	
S(índice)	indicação de saída no RHO	
$T_0$	- temperatura absoluta inicial do ar no RHO	$^{\circ}K$
T	- temperatura absoluta	$^{\circ}K$
$\Delta T$	- intervalo de temperatura	$^{\circ}K$
$T_0$	- torque da bomba em regime permanente	N.m
T	- torque instantâneo da bomba	N.m
t	- tempo	s
$\Delta t$	- intervalo de tempo	s
V	- volume de ar instantâneo no RHO	$m^3$
$\bar{V}$	- volume médio de ar no RHO	$m^3$
$V_0$	- volume de ar no RHO em regime permanente	$m^3$
v	- volume oscilatório do ar no RHO	$m^3$
$V_0$	- velocidade na tubulação principal em regime permanente	m/s
V	- velocidade instantânea na tubulação principal	m/s
$V_3$	- velocidade instantânea na inércia concentrada	m/s

$V_M$	- velocidade instantânea referente a $D_M$	m/s
$V_t$	- derivada parcial da velocidade em relação ao tempo	
$V_x$	- derivada parcial da velocidade em relação à abscissa x	
x	- abscissa correspondente ao eixo da tubulação principal	
$\Delta x$	- elemento finito de comprimento ao longo do eixo da tubulação principal	
$\delta x$	- comprimento de um elemento de fluido na tubulação principal	
y	- abscissa das curvas da bomba	
W	- trabalho realizado pelo ar no RHO	J
$WR^2$	- efeito de inércia	$N.m^2$
WH	- adimensional da bomba	
WB	- adimensional da bomba	
Z	- cota do ponto médio do ar no RHO e da tubulação principal	m
$Z_1$	- cota da junção RHO - tubulação principal	m
$Z_x$	- derivada da cota em relação a x	
$Z_{i_0}$	- impedância de surto	$s/m^2$
$Z_{i_a}$	- impedância do RHO	$s/m^2$
$\alpha$	- ângulo de inclinação da tubulação principal	o
$\alpha = N/N_0$	rotação adimensional da bomba	
$\beta = T/T_0$	torque adimensional da bomba	
$\gamma$	- peso específico do líquido	$N/m^3$
$\mu$	- módulo de Poisson	



- $\rho$  - massa específica do líquido kg/m<sup>3</sup>
- $\rho^*$  - característica da tubulação principal
- $\sigma^*$  - característica do RHO
- $\psi$  - parâmetro do RHO
- $\omega$  - frequência s<sup>-1</sup>

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Neste trabalho é apresentado o estudo de Reservatórios Hidropneumáticos (RHO) em instalações de bombeamento de água.

Tal dispositivo compõe-se de um recipiente de forma esférica ou cilíndrica, ligado à tubulação principal, que contém na sua parte superior certa quantidade de gás e água na inferior. A finalidade principal do RHO é fornecer ou absorver energia através da expansão ou compressão do gás respectivamente.

Uma manobra qualquer num sistema hidráulico provoca escoamento transitório, com a vazão e pressão, num mesmo ponto, variando com o tempo. O RHO reduz a taxa de aumento ou diminuição de vazão, tornando a manobra mais lenta, atenuando dessa forma as pressões extremas que ocorrem durante o escoamento variável.

De modo geral, pode ser instalado junto às válvulas, ao longo da tubulação principal ou junto aos conjuntos elevatórios e possui em seu interior o próprio ar comprimido.

Uma das primeiras informações de aplicação do RHO está na referência | 1 |, onde Michaud em 1878 descrevia a sua utilização como proteção de sistemas hidráulicos | 2 |.

Joukowski também estudou o assunto, confirmando experimentalmente sua utilidade | 3 |. Admitindo transformação adiabática do ar, deduziu uma expressão para determinação do volume de ar, para que a sobrepressão não excedesse um certo valor. Essa expressão é função do diâmetro da tubulação principal, da velocidade de regime permanente, do período das ondas e das pressões estáticas e de regime permanente no RHO, a saber:

$$V = \frac{n\pi}{2} D^2 V_o \left( \frac{2L}{a} \right) \frac{p_{4o}^2}{p_{4H} \Delta p_4} \quad (1.1)$$



A validade da expressão (1.1) ficaria restrita a um valor  $\Delta p_4$  menor que uma atmosfera conforme o autor.

Allievi estudou o escoamento transitório estabelecendo as equações diferenciais e as resolveu, levando em consideração a compressibilidade do líquido e a deformação da tubulação | 4 |, de modo a elaborar um gráfico para determinação de sobrepressões em manobras de válvula | 5 |. Finalmente, adaptou o seu estudo para sistemas de recalque munidos de RHO | 6 |. Em seus estudos eliminou a perda de carga, desprezando dessa forma a dissipação de energia e considerou a transformação do ar isotérmica.

No período compreendido entre os estudos efetuados por Joukowski e Allievi e o advento do computador, o estudo sobre RHO dividiu-se em três grandes correntes.

Na primeira corrente situam-se os estudiosos que desprezaram os efeitos da compressibilidade do líquido e da deformação da tubulação, por considerarem sem grande importância. Esse modelo de estudo é considerado um "equacionamento de coluna rígida".

A equação diferencial ordinária, resultante do sistema de equações fundamentais, é:

$$\Delta H = - \frac{\Delta x}{gA} \frac{dQ}{dt} - \frac{8fQ^2}{\pi^2 D^5 g} \Delta x \quad (1.2)$$

A integração da equação (1.2), para um sistema provido de RHO e redução instantânea de vazão, fornece a seguinte relação para volume de ar | 7 | | 8 | :

$$V = E_c / p_{4_0} \left( -1 + \frac{p_{4_0}}{p_{4_{\min}}} - \ln \frac{p_{4_0}}{p_{4_{\min}}} \right) \quad (1.3)$$

Sendo:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho A L V_0^2 \quad (1.4)$$

Este estudo considera transformação isotérmica do ar, perdas de carga nulas e o volume de ar correspondente a pressões extremas.

A equação (1.3) é apresentada resolvida em forma de ábaco | 4 | - | 9 | ou gráfico | 7 | | 8 |.

Entretanto Dupont | 4 | recomenda a aplicação deste equacionamento em sistemas que apresentam vazão máxima 0,03 m<sup>3</sup>/s e comprimento de tubulação principal até 1.200 m. Além desses limites, os volumes de ar encontrados serão exageradamente grandes. Outros autores completaram o modelo matemático com a introdução de perda de carga | 8 | | 10 |.

Na segunda corrente situam-se os estudiosos que levaram em consideração os efeitos da compressibilidade da água e da deformação da tubulação. Esse modelo de estudo é considerado um "equacionamento de coluna elástica".

O grande impulso do modelo elástico se deu através da grande divulgação do método gráfico de Schneyder - Bergeron | 11 |.

Esse método pode levar em consideração ou não as perdas de carga, ao longo da tubulação e na entrada do RHO | 4 | | 11 |.

O método gráfico possibilita boa visão do fenômeno físico, apresentando vantagens didáticas e muitas vezes de análise.

Vários autores elaboraram ábacos característicos de RHO | 12 | - | 13 | | 14 |, para diferentes faixas de perdas de carga e de parâmetros hidráulicos.

Parmakian | 14 | apresenta ábacos para diferentes perdas de carga



definidas como percentagem da altura total quando o escoamento se dá desde a tubulação principal para o RHO, com vazão nominal. A percentagem fornecida engloba a perda distribuída ao longo da linha e a localizada na entrada do RHO.

Na terceira corrente situam-se os estudiosos que, baseados na equação da onda obtida por B.Riemann | 15 | em 1859, desenvolveram um equacionamento representativo do RHO. Esse tratamento foi feito - com auxílio da relação das transformações politrópicas e de parâmetros que definem o comportamento da tubulação e das condições de contorno, tais como a Capacitância, Inertância e a Impedância. Os resultados são representados em termos de:

$$h_p = p_4/p_{4_0} \quad (1.5)$$

A análise de RHO é feita com auxílio do parâmetro  $\Psi$ .

$$\Psi = Z_{i_0} \frac{Q_0 \gamma}{p_{4_0}} \quad (1.6)$$

Neste caso a impedância é:

$$Z_{i_0} = \sqrt{\frac{I}{C_0}} = \sqrt{I \left( \frac{n p_{4_0}}{\gamma \Psi_0} \right)} = Z_{i_0}(n) \quad (1.7)$$

O parâmetro adimensional do RHO fica:  
- para  $n = 1$  transformação isotérmica

$$\Psi = \sqrt{2 \left( \ln h_p + \frac{1}{h_p} - 1 \right)} \quad (1.8)$$

- para  $n \neq 1$  transformação não isotérmica

$$\Psi = \sqrt{2n} \left[ \frac{1}{n-1} h_p^{(n-1)/n} + \left( \frac{1}{h_p} \right)^{1/n} - \frac{1}{n-1} \right] \quad (1.9)$$

Pode-se traçar as funções (1.7) e (1.8) em gráficos ou aproximadamente:

$$\frac{p_{4\max}}{p_{4o}} = h_{p\max} \cong \exp \Psi \quad (1.10)$$

$$\frac{p_{4\min}}{p_{4o}} = h_{p\min} \cong \exp(-\Psi) \quad (1.11)$$

Os volumes de ar são:

$$\frac{v_{\max}}{v_o} = \left( \frac{1}{h_{p\min}} \right)^{1/n} \cong \exp \frac{\Psi}{n} \quad (1.12)$$

$$\frac{v_{\min}}{v_o} = \left( \frac{1}{h_{p\max}} \right)^{1/n} \cong \exp \left( - \frac{\Psi}{n} \right) \quad (1.13)$$

O estudo apresentado despreza as perdas de cargas, bem como considera a coluna líquida rígida baseando-se nas equações que regem o comportamento vibratório que caracteriza o transiente hidráulico.

Esse equacionamento deu origem à "Análise Linearizada de Escoamentos Oscilatórios" mostrada neste capítulo.



Após o início de utilização dos computadores para processamento dos cálculos, difundiu-se o método das características para solução de escoamentos variados, por apresentar grande facilidade de avaliação das vazões e pressões ao longo do tempo e da tubulação, bem como - simplicidade de representação dos mais variados equipamentos que - compõem o sistema | 16 | | 17 | .

O método das características associado à transformação politrópica do ar comprimido será utilizado no presente trabalho para análise - do comportamento hidráulico. A escolha foi feita tendo em vista a facilidade de elaboração de uma análise termodinâmica bem como da inclusão da perda de carga, mesmo de segunda ordem quando houver ne- cessidade.

Outro processo de análise de sistemas hidráulicos que desenvolveu - se junto à utilização dos computadores é o de "Análise Linearizada de Escoamentos Oscilatórios". Neste caso é obtida uma solução parti- cular das equações do escoamento transitório em termos dos parâme- tros da tubulação e das condições de contorno | 16 | | 17 | . Nesta - abordagem não são utilizadas equações diferenciais. Embora a solu- ção requeira o uso de aritmética complexa, o uso de um computador permite a análise de sistemas complexos com relativa simplificada- de.

As equações diferenciais são tomadas na forma simplificada, o ter- mo de atrito é linearizado, e as equações são resolvidas para uma oscilação harmônica.

O tratamento matemático é similar ao utilizado nos problemas de vi- bração e a variação de uma carga de pressão pode ser expressa co- mo:

$$\Delta H \cos \omega t = \operatorname{Re}(\Delta H e^{i\omega t}) \quad (1.14)$$

onde  $\operatorname{Re}$  = "parte real de"

Pode-se utilizar dois procedimentos normalmente nos estudos do escoamento:

- o método da impedância
- o método matricial

Considerando o método da impedância para abordagem da análise do RHO | 17 | com volume médio  $\bar{V}$  e volume oscilatório  $v' = V_a e^{i\omega t}$ , a vazão oscilatória desde o RHO é dada por  $q' = \frac{dv'}{dt} = i\omega V_a e^{i\omega t}$ . Pela transformação politrópica do volume do ar tem-se:

$$H_A \cdot V^n = C \quad (1.15)$$

onde:  $H_A = \bar{H}_A + h'$  ( $\bar{H}_A$  - carga de pressão absoluta média)

$$V = \bar{V} + v'$$

Substituindo os componentes médios e oscilatórios em (1.15) e linearizando:

$$h' = - \frac{n \bar{H}_A}{\bar{V}} v' \quad (1.16.a)$$

$$H_a = - \frac{n \bar{H}_A}{\bar{V}} V_a \quad (1.16.b)$$

A impedância do RHO é

$$Z_{i_a} = \frac{H_a}{Q_a} = \frac{i n \bar{H}_A}{\bar{V} \cdot \omega} \quad (1.17)$$

que mostra que a carga está defasada de  $90^\circ$  com a vazão.



Considerando o método das características e a transformação politrópica do ar, o presente trabalho visa equacionar o comportamento do RHO em situações transitórias do escoamento, bem como estabelecer parâmetros significativos que conduzirão a uma otimização do sistema hidráulico.

Será estabelecido um modelo matemático geral e, a partir deste, - chegar-se-á a um modelo matemático simplificado de oscilação de massa que, embora menos geral, levará a resultados satisfatórios.

O desempenho do RHO será analisado do ponto de vista termodinâmico; considerando-se o comportamento do ar nele contido. Serão focalizadas as simplificações admitidas no fenômeno térmico e suas implicações sobre o desempenho da instalação.

No desenvolvimento do trabalho, as conclusões parciais serão analisadas em função de parâmetros adimensionais visando a generalização dos resultados para utilização em novos sistemas e no desenvolvimento de novos projetos.

A resolução de uma dada instalação e a comparação dos resultados analíticos com os resultados consagrados pelo uso, indicados na bibliografia, permitirão a confirmação do modelo proposto para análise.

O estudo do RHO é justificado pela sua grande aplicabilidade como dispositivo de proteção às situações transientes nos sistemas hidráulicos. Embora a maior aplicação do RHO seja vinculada às instalações de bombeamento, atualmente verificam-se várias aplicações em instalações hidroelétricas | 18 |. Assim na Usina Hidrelétrica de Driva-Noruega | 18 |, uma Chaminé de Equilíbrio foi substituída por um RHO. Tal reservatório foi construído escavando-se a rocha no interior de uma montanha. O volume do reservatório, assim construído, da ordem de  $7000 \text{ m}^3$  permite acumular um volume de ar de aproximadamente  $5000 \text{ m}^3$  para as condições normais de operação. Como a rocha onde foi escavada a cavidade apresenta boa qualidade não há vazamentos de ar e a instalação opera com tal suces

so que, atualmente, está sendo construída outra unidade com volume de ar cerca de 10 vezes maior que o anterior.

Os RHO's aplicados a Usinas Hidrelétricas apresentam uma grande - faixa de operação levando à necessidade de um estudo pormenorizado do seu comportamento, tendo em vista a estabilidade operacional das turbinas.

No final do trabalho serão apresentados os resultados gerais, as - conclusões e as recomendações para o pré-dimensionamento do RHO.



## CAPÍTULO II - EQUACIONAMENTO DO ESCOAMENTO TRANSIENTE

O problema geral do escoamento transiente pode ser formulado conforme descrito abaixo | 19 |.

Numa tubulação elástica de diâmetro  $D$ , espessura  $e$ , cujo material possui módulo de elasticidade  $E$  e módulo de Poisson  $\mu$ , sujeita a vínculos de instalação  $c_1$ , escoam um líquido de peso específico  $\gamma$  e módulo de elasticidade volumétrico  $K_V$ . O escoamento submetido à ação da aceleração da gravidade e às forças de atrito deverá ser considerado unidimensional.

Se uma perturbação qualquer no escoamento permanente submetido a determinadas condições iniciais acarreta uma situação transitória deveremos determinar as funções  $P(x,t)$  ou  $H(x,t)$  e  $V(x,t)$  ou  $Q(x,t)$ , isto é, as pressões ou cargas e as velocidades ou vazões em dada secção da tubulação principal definida pela abscissa  $x$  e em cada instante  $t$ . São impostas condições hidráulicas operacionais para os equipamentos (bombas, RHO, reservatórios) durante a ocorrência da situação transitória.

A solução do problema transitório envolve, portanto, a determinação das variáveis dependentes  $P(x,t)$  e  $V(x,t)$  ou  $H(x,t)$  e  $Q(x,t)$  em função das variáveis independentes  $x$  e  $t$ .

Considerando a equação do movimento aplicada a um elemento de fluido na tubulação principal faz-se a somatória das forças (de pressão, de atrito e do campo gravitacional) que atuam sobre o elemento, igual à sua massa multiplicada pela aceleração:

$$\frac{p_x}{\rho} + VV_x + V_t + g \operatorname{sen} \alpha + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2.1)$$

ou em termos de carga:

$$gH_x + VV_x + V_t + \frac{f V|V|}{2D} = 0 \quad (2.2)$$

Na expressão (2.2) desprezou-se a variação de  $\rho$  com  $x$ , face a  $H_x$  e  $Z_x$ ; portanto a mesma é particularizada para líquidos.

Considerando a equação da continuidade aplicada a um volume de controle que contém um elemento de fluido de comprimento  $\delta x$ , obtém-se que o saldo dos fluxos de massa que entram e saem do volume de controle é igual à variação com o tempo, da massa contida no volume de controle:

$$VH_x + H_t - V\text{sen}\alpha + \frac{a^2}{g} V_x = 0 \quad (2.3)$$

Na expressão (2.2) o termo  $VV_x$  é desprezível face ao valor de  $V_t$  e na expressão (2.3)  $V\text{sen}\alpha$  e  $VH_x$  face a  $H_t$  e  $\frac{a^2}{g}V_x$ , como se pode observar na análise numérica abaixo.

Tomando uma tubulação com as características:

comprimento	$L = 600 \text{ m}$
fator de atrito	$f = 0,018$
diâmetro	$D = 0,5 \text{ m}$
celeridade	$a = 1.200 \text{ m/s}$
nº de divisões	$N = 5$

Com um reservatório a montante e válvula fechando-se a jusante, encontra-se os seguintes valores | 20 |:



tempo	X/L	=	0,6	0,8	TAU
0,800	H	=	279,94	306,93	0,239
	Q	=	0,264	0,219	
	V	=	1,344	1,115	
0,900	H	=	290,48	335,24	0,171
	Q	=	0,193	0,175	
	V	=	0,983	0,891	

Passando para diferenças finitas:

$$VH_x = V \left( \frac{\Delta H}{\Delta x} \right)_{t \text{ cte}} = 0,891 \cdot \left( \frac{335,24 - 290,48}{120} \right) = 0,33$$

$$V \text{sen} \alpha = 0,891 \cdot \text{sen} 60 = 0,771 \text{ (admitido } \alpha = 60^\circ)$$

$$H_t = \left( \frac{\Delta H}{\Delta t} \right)_{x \text{ cte}} = \left( \frac{335,24 - 306,93}{0,1} \right) = 283,1$$

$$\frac{a^2}{g} V_x = \frac{a^2}{g} \left( \frac{\Delta V}{\Delta x} \right)_{t \text{ cte}} = \frac{1.200^2}{9,806} \cdot \left( \frac{0,891 - 0,983}{120} \right) = 112,53$$

Então:

$$\left. \begin{array}{l} VH_x = 0,33 \\ V \text{sen} \alpha = 0,771 \end{array} \right\} \text{ desprezível em relação a } \left[ \begin{array}{l} H_t = 283,1 \\ \frac{a^2}{g} V_x = - 112,53 \end{array} \right.$$

$$V_t = \left( \frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_{x \text{ cte}} = \left( \frac{0,891 - 1,115}{0,1} \right) = - 2,24$$

$$V V_x = V \left( \frac{\Delta V}{\Delta x} \right)_{t \text{ cte}} = 0,891 \cdot \left( \frac{0,891 - 0,983}{120} \right) = -6,83 \cdot 10^{-4}$$

$$V V_x = -6,83 \cdot 10^{-4} \text{ desprezível em relação a } V_t = -2,24$$

Desta forma, os problemas transitórios poderão ser analisados com boa precisão através das duas equações:

$$L_1 = gH_x + V_t + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad (2.4)$$

$$L_2 = H_t + \frac{a^2}{g} V_x = 0 \quad (2.5)$$

As equações do movimento (2.4) e da continuidade (2.5) formam um par de equações diferenciais em derivadas parciais, do tipo hiperbólico, de primeira ordem e primeiro grau, nas quais as variáveis dependentes  $H$  e  $V$  deverão ser determinadas em função das variáveis independentes  $x$  e  $t$ .

Para a solução do sistema, está consagrada pela sua eficiência, a utilização do Método das Características. Neste método, as expressões (2.4) e (2.5) são transformadas em quatro equações diferenciais ordinárias equivalentes e válidas duas a duas, a saber:

$$\left. \begin{aligned} \frac{g}{a} \cdot \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f V|V|}{2D} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} = + a \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$



$$-\frac{g}{a} \cdot \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (2.9)$$

As equações diferenciais ordinárias (2.6) e (2.8) são submetidas à restrição de serem aplicáveis somente quando forem verificadas as condições (2.7) e (2.9) respectivamente.

As retas de coeficiente angular  $\frac{dx}{dt} = \pm a$  no plano  $(x,t)$  são chamadas "características" e nessas retas são válidas as equações (2.6) e (2.8) respectivamente.

A solução de um problema transiente numa instalação baseia-se na solução do sistema de equações (2.6) e (2.8) submetido às condições gerais de contorno do problema.

A tubulação é dividida em  $N$  trechos de extensão  $\Delta x$  como indicado na figura 2.1.

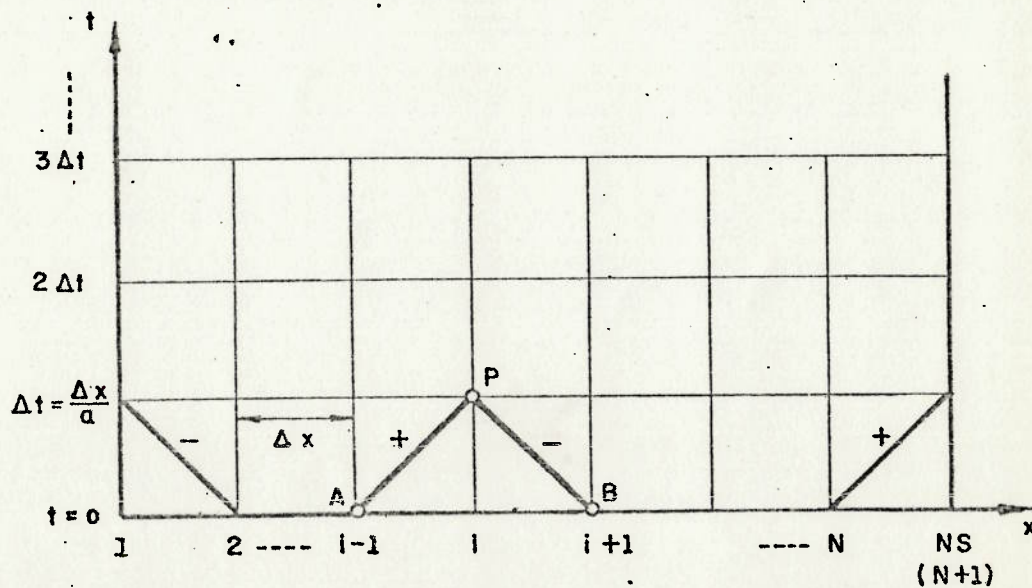


Figura 2.1- Solução pelo Método das Características (malha  $x,t$ )

Calcula-se o intervalo de tempo  $\Delta t = \frac{\Delta x}{a}$  e a equação (2.7) é satisfeita sobre a diagonal da malha de inclinação característica pela reta AP. Se as variáveis independentes H e V são conhecidas em A, então a equação (2.6), que é válida na reta característica (+), pode ser integrada entre os limites A e P e portanto escrita em termos das incógnitas V e H no ponto P.

A equação (2.9) é caracterizada pelas retas diagonais às malhas e de inclinação indicada pela reta BP de característica (-). A integração da equação (2.8), válida ao longo das retas de característica (-) estabelece uma segunda equação das variáveis H e V no ponto P.

Fazendo substituições das variáveis, rearranjando e integrando a equação (2.6) ao longo da reta (+) tem-se:

$$\int_{H_A}^{H_P} dH + \frac{a}{gA} \int_{Q_A}^{Q_P} dQ + \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_A}^{x_P} Q|Q|dx = 0 \quad (2.10)$$

A variação de Q com x no integrando do último termo não é conhecida a priori; então deverá ser feita uma aproximação para avaliar a integral. Normalmente, considera-se Q constante ao longo de x e com valor referente ao ponto A (inicial). A essa hipótese dá-se o nome de "aproximação de primeira ordem", que satisfaz a maioria dos problemas.

A equação (2.10) fica:

$$H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{f \Delta x}{2g DA^2} Q_A |Q_A| = 0 \quad (2.11)$$

Considerando a equação (2.8) tem-se:

$$H_P - H_B - \frac{a}{gA} (Q_P - Q_B) - \frac{f \Delta x}{2g DA^2} Q_B |Q_B| = 0 \quad (2.12)$$



Quando o termo de perda de carga é predominante no sistema, tem-se que considerar aproximação de segunda ordem | 17 |, pela inadequação da de primeira.

Esta situação acontece em longos oleodutos, em escoamentos de fluidos altamente viscosos no interior de tubos de pequeno diâmetro, ou no caso de escoamentos com velocidades muito altas.

A consequência do uso da aproximação de primeira ordem em casos onde ela não deveria ser usada é, geralmente, o resultado incorreto e em casos extremos, uma instabilidade na solução. A instabilidade é detectada facilmente, mas um cálculo incorreto levará a difícil verificação.

A análise da solução através de modelo de primeira ordem mostra - que | 21 | | 22 | pode ser encontrada uma condição necessária de estabilidade limitando o termo:

$$\frac{f \Delta t Q}{4DA} \leq 1 \quad (2.13)$$

Mesmo satisfeita a relação (2.13) poderá ocorrer valores incorretos. Normalmente em sistemas de baixa perda de carga o termo à esquerda de (2.13) permanece muito abaixo da unidade, nunca dando margem a dúvidas.

Nos sistemas de perda de carga predominante, integrando-se o termo dissipativo na equação (2.10) com aproximação de segunda ordem, a precisão da solução é sensivelmente melhorada, assim como garantida a estabilidade.

A integração de segunda ordem ao longo da reta (+), entre os pontos A e P e a correspondente ao longo da reta (-), entre os pontos B e P, fornece respectivamente:

$$H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \cdot \frac{1}{8} (Q_A + Q_P) \left| Q_A + Q_P \right| = 0 \quad (2.14)$$

$$H_P - H_A - \frac{a}{gA} (Q_P - Q_B) - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \cdot \frac{1}{8} (Q_B + Q_P) \left| Q_B + Q_P \right| = 0 \quad (2.15)$$

A solução das equações (2.14) e (2.15) é feita através do Método de Newton-Raphson, por aproximações sucessivas.

Estudo feito para comparar o comportamento das aproximações de primeira e segunda ordem em linhas longas | 23 | revela substancial aumento do tempo de processamento com a introdução do Método de Newton-Raphson bem como pequena variação das cargas encontradas.

A pequena discrepância encontrada entre as cargas com aproximação de primeira e de segunda ordem foi motivada pelas características da linha que quando comparadas ao critério de estabilidade (2.13) forneceu:

$$\begin{aligned} f &= 0,018 \\ \Delta t &= 0,833 \text{ s} \\ Q &= 0,205 \text{ m}^3/\text{s} \\ D &= 0,5 \text{ m} \\ A &= 0,196 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\frac{f\Delta t Q}{4DA} = \frac{0,018 \cdot 0,833 \cdot 0,205}{4 \cdot 0,5 \cdot 0,196} = 0,00784$$

valor muito menor que um, comprovando a adequação da aproximação de primeira ordem para o caso estudado em | 23 |.

Uma comparação entre a aplicação da aproximação de primeira ou de segunda ordem pode ser feita tomando-se por base um sistema com as seguintes características:



comprimento da tubulação principal	$L = 1.500 \text{ m}$
fator de atrito	$f = 0,020$
vazão	$Q = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
diâmetro	$D = 0,010 \text{ m}$
celeridade	$a = 1.200 \text{ m/s}$

Para uma análise com aproximação de primeira ordem, sem riscos de erros ou instabilidades, deve-se prever

$$\frac{f \Delta t Q}{4DA} \ll 1$$

por exemplo, subdividindo a tubulação em 500 partes.

Então:

$$\Delta x = \frac{1.500}{500} = .3 \text{ m} \quad \therefore \quad \Delta t = \frac{\Delta x}{a} = \frac{.3}{1.200} = 0,0025 \text{ s}$$

e:

$$\frac{f \Delta t Q}{4DA} = \frac{0,02 \cdot 0,0025 \cdot 2,35 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 0,010 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5}} = 0,037 \ll 1$$

Nota-se que o primeiro termo de (2.13) toma valor sensivelmente inferior à unidade, atendendo condição de estabilidade.

Analisando o mesmo sistema com a tubulação subdividida em 15 trechos tem-se:

$$\Delta x = \frac{1.500}{15} = 100 \text{ m} \quad \therefore \quad \Delta t = \frac{\Delta x}{a} = \frac{100}{1.200} = 0,083 \text{ s}$$

e:

$$\frac{f \Delta t Q}{4DA} = \frac{0,02 \cdot 0,083 \cdot 2,35 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 0,010 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5}} = 1,24 > 1$$

Nesta última análise conclui-se que o sistema, com a subdivisão em 15 trechos, leva à necessidade de aproximação de segunda ordem, na integração do termo de perda de carga.

Então o mesmo sistema pode enquadrar-se como próprio para aproximação de primeira ordem ou de segunda ordem, ao passar-se do infinitésimo às diferenças finitas.

Está evidente que o maior número de subdivisões torna o modelo discreto mais próximo do infinitésimo, aumentando a precisão da hipótese de vazão constante no intervalo considerado durante a integração do último termo de (2.10).

A resolução das equações (2.14) e (2.15) através do Método de Newton-Raphson é trabalhosa e consome tempo de processamento elevado quando comparada com a resolução das equações (2.11) e (2.12). Todavia, conforme visto no exemplo anterior, em cada instante considerado tem-se:

- a resolução das equações (2.11) e (2.12) nos 499 pontos interiores.
- a resolução das equações (2.14) e (2.15) nos 14 pontos interiores.

Finalmente, a comparação entre a aproximação de primeira ordem e a de segunda deverá ser conduzida levando-se em consideração as subdivisões necessárias, a variação das cargas encontradas, bem como os critérios de estabilidade.

No presente trabalho foi escolhido a aproximação de primeira ordem tendo em vista as características dos sistemas em relação ao critério de estabilidade (2.13).

Fazendo:

$$B = \frac{a}{gA} \quad e \quad R = \frac{f \Delta x}{2 \cdot gDA^2} \quad (2.16)$$



Resulta:

$$(+) H_P = H_A - B (Q_P - Q_A) - R Q_A |Q_A| \quad (2.17)$$

$$(-) H_P = H_B + B (Q_P + Q_B) + R Q_B |Q_B| \quad (2.18)$$

A solução de um problema transiente começa com uma condição de escoamento permanente no instante  $t = 0$ .

Assim,  $H$  e  $Q$  são valores iniciais conhecidos na reta  $t = 0$  - Figura 2.1.

A solução consiste na determinação dos valores de  $H$  e  $Q$  em cada nó da reta  $t = \Delta t$  e depois, nos nós da reta  $t = 2\Delta t$  etc, até que se cubra todo o intervalo de tempo em que se deseja investigar o fenômeno transitório.

Para um nó qualquer da malha, seção  $i$ , as duas equações de compatibilidade (2.17) e (2.18) são resolvidas simultaneamente nas variáveis  $Q_{P_i}$  e  $H_{P_i}$ . Assim são achados os valores de carga e vazão no final do intervalo de tempo considerado (índice  $P$ ).

Estas equações podem ser escritas na forma:

$$(+) H_{P_i} = C_P - BQ_{P_i} \quad (2.19)$$

$$(-) H_{P_i} = C_M + BQ_{P_i} \quad (2.20)$$

onde  $C_P$  e  $C_M$  são sempre constantes conhecidas quando tais equações são aplicadas:

$$C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1} |Q_{i-1}| \quad (2.21)$$

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} - RQ_{i+1} |Q_{i+1}| \quad (2.22)$$

Eliminando-se  $Q_{P_i}$  nas equações (2.19) e (2.20), resulta:

$$H_{P_i} = (C_P + C_M)/2 \quad (2.23)$$

e  $Q_{P_i}$  poderá ser determinado diretamente da equação (2.19) ou (2.20):

A notação indexada usada nas equações acima, útil para o desenvolvimento do cálculo computacional pode ser visualizada na Figura 2.1.

A seção  $i$  refere-se a qualquer nó da malha. Os valores indexados de  $H$  e  $Q$  em cada seção são sempre conhecidos no instante anterior, ou por ser o instante inicial, ou como resultado do cálculo no estágio anterior. As novas cargas e vazões no instante de cálculo considerado terão letra  $P$  como índice. O índice  $i$  caracteriza a seção interna do conduto.

Em alguns modelos matemáticos apresentados neste trabalho, a tubulação principal está dividida em dois trechos. O cálculo dos pontos interiores de ambos os trechos será feito tomando o cuidado de compatibilizar os intervalos do tempo  $\Delta t$ .

Então:

$$\Delta t = \frac{\Delta x_1}{a_1} = \frac{\Delta x_2}{a_2} \quad (2.24)$$

O primeiro trecho une o RHO aos conjuntos de bombeamento e o segundo trecho une o RHO ao reservatório de jusante.



Como o RHO está instalado junto à elevatória, para funcionamento - mais eficiente, considerou-se o trecho 1 tão pequeno quanto possível, fato que acarretou elevado número de subdivisões do trecho 2.

O método do Intervalo de Tempo Especificado não foi utilizado tendo em vista a grande diferença de comprimento entre os trechos.

Por outro lado, os modelos foram mantidos sem aproximações também porque oportunamente será feita uma simplificação eliminando o trecho 1 e reduzindo as subdivisões do trecho 2.

Por ocasião do estudo das condições de contorno será observado que tubulações extremamente curtas poderão ser equacionadas como Inércias Concentradas, tal como a ligação do RHO à tubulação principal. Todavia, a consideração em um nó de duas Inércias Concentradas, - uma unindo-o ao RHO e outra aos conjuntos de bombeamento, acarretará um problema de solução complexa.

Um problema complexo também ocorrerá se forem equacionados os conjuntos elevatórios junto ao nó com Inércia Concentrada.

Geralmente os programas processados com a presença de bomba terão 3 subdivisões no trecho 1 e um número superior a 100 no trecho 2.

Com o modelo simplificado o número de subdivisões do trecho único será aproximadamente 10.

O exame da Figura 2.1 mostra que os pontos 1 e  $NS = N+1$  passam a influenciar os pontos interiores após o primeiro intervalo de tempo  $\Delta t$  utilizado nos cálculos.

É portanto necessário, para obtenção da solução completa num instante qualquer, considerar o comportamento dos elementos que estão localizados nas extremidades dos trechos.

### CAPÍTULO III - DESCRIÇÃO E EQUACIONAMENTO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO.

#### 3.1 - Condição de Contorno para Bomba de Fluxo.

Para considerar o comportamento de uma bomba de fluxo é necessário conhecer as curvas características completas da máquina para todas as zonas de operação.

Marchal, Flesch e Suter | 24 | estudando curvas de bombas sugerem, para utilização em computador, aquelas levantadas conforme abaixo:

$$\frac{h}{\alpha^2 + q^2} \text{ vs } \left[ \pi + \text{tg}^{-1} \frac{q}{\alpha} \right] ; \quad \frac{\beta}{\alpha^2 + q^2} \text{ vs } \left[ \pi + \text{tg}^{-1} \frac{q}{\alpha} \right] \quad (3.1)$$

As relações mencionadas em (3.1) representarão mediante duas curvas todas as possibilidades operacionais de uma família de bombas Geometricamente Semelhantes.

A figura 3.1 é representação gráfica da curva característica de uma família de bombas com geometria definida pelo Coeficiente de Rotação:

$$C_N = \frac{N_r \sqrt{Q}}{[gH]^{3/4}} \quad (3.2)$$

Os modelos matemáticos utilizados consideram máquinas de fluxo radiais ( $C_N = 0,67$ ) e na figura 3.1 estão indicados:

$$WH = \frac{h}{\alpha^2 + q^2} ; \quad WB = \frac{\beta}{\alpha^2 + q^2} ; \quad y = \pi + \text{tg}^{-1} \frac{q}{\alpha} \quad (3.3)$$

Na figura 3.2 os primeiros 89 números são valores de WH e os restantes de WB.



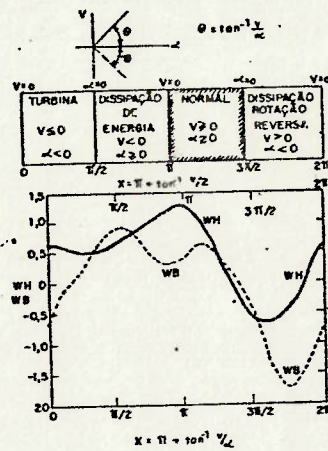


Figura 3.1 - Curvas Adimensionais de Bomba Radial  $C_N = 0,67$

0,634	0,643	0,646	0,640	0,629	0,613	0,595	0,575	0,552	0,533
0,516	0,505	0,504	0,510	0,512	0,522	0,539	0,559	0,580	0,601
0,630	0,662	0,692	0,722	0,753	0,782	0,808	0,832	0,857	0,879
0,904	0,930	0,959	0,996	1,027	1,060	1,096	1,124	1,165	1,204
1,238	1,258	1,271	1,282	1,288	1,281	1,260	1,225	1,172	1,107
1,031	0,942	0,842	0,733	0,617	0,500	0,368	0,240	0,125	0,011
-0,102	-0,168	-0,255	-0,342	-0,423	-0,494	-0,556	-0,620	-0,655	-0,670
-0,670	-0,660	-0,655	-0,640	-0,600	-0,570	-0,520	-0,470	-0,430	-0,360
-0,275	-0,160	-0,040	0,130	0,295	0,430	0,550	0,620	0,634	
-0,684	-0,547	-0,414	-0,292	-0,187	-0,105	-0,053	-0,012	0,042	0,097
0,156	0,227	0,300	0,371	0,444	0,522	0,596	0,672	0,730	0,763
0,797	0,837	0,865	0,883	0,886	0,877	0,859	0,838	0,804	0,750
0,703	0,645	0,583	0,520	0,454	0,408	0,370	0,343	0,331	0,329
0,338	0,354	0,372	0,405	0,450	0,486	0,520	0,552	0,579	0,603
0,616	0,617	0,606	0,582	0,546	0,500	0,432	0,360	0,288	0,214
0,123	0,037	-0,053	-0,161	-0,248	-0,314	-0,372	-0,580	-0,740	-0,680
-1,000	-1,120	-1,250	-1,370	-1,490	-1,590	-1,660	-1,690	-1,770	-1,650
-1,590	-1,520	-1,420	-1,320	-1,230	-1,100	-0,980	-0,820	-0,684	

Figura 3.2 - Valores de WH(x) e WB(x) para Bombas com Coeficiente de Rotação  $C_N = 0,67$ .

Para a determinação das condições transitórias nos vários pontos da instalação em consequência da interrupção do fornecimento de energia ao motor da bomba, deverão ser considerados três efeitos :

- a) Curvas características da bomba.
- b) Inércia do conjunto girante.
- c) Características do transitório.

Para cada instante de ocorrência do transitório, as condições de operação da bomba serão definidas pelos valores (WH, WB, y).

A altura e o torque serão:

$$H = H_0 \cdot h = H_0 \cdot (\alpha^2 + q^2) \cdot WH \quad (3.4)$$

$$T = T_0 \cdot \beta = T_0 \cdot (\alpha^2 + q^2) \cdot WB \quad (3.5)$$

Onde:

$$WH = WH(y) ; WB = WB(y) \text{ e } y = \pi + \text{tg}^{-1} \frac{q}{\alpha}$$

Para o cálculo através de computador deve-se determinar tais valores em cada instante, conhecidas evidentemente as características completas da bomba que está operando.

Admite-se um dado instante, no qual o valor de x seja conhecido - extrapolando-se, por exemplo, linearmente os valores de q e  $\alpha$  que ocorreram em dois instantes anteriores.

Pode-se então fazer uma estimativa preliminar do valor de y.

Os valores de WH(y) são tabelados e a variável inteira em programação (FORTRAN IV)  $I = \frac{y}{\Delta y} + 1$  permite localizar o ponto WH(I), WB(I), tabelados e  $\Delta y$  situados de y ( $\Delta y = \pi/44$ ). O ponto de abscissa (I+1) estará obviamente à direita de y. Define-se então, o intervalo onde o valor de y aproximado situa-se na tabela de valores.



- para o ponto I a abscissa é  $(I-1) \cdot \Delta y$  e tem-se  $WH(I)$  e  $WB(I)$ .

- para o ponto de abscissa  $(I+1)$  a abscissa é  $I \cdot \Delta y$  e tem-se  $WH(I+1)$  e  $WB(I+1)$ .

Uma reta unindo os pontos  $WH(I)$  e  $WH(I+1)$  aproximará o valor de  $WH(y)$  naquele intervalo.

Então a altura total será:

$$H = H_0 \cdot (\alpha^2 + q^2) \cdot (A_0 + A_1 \cdot y) \quad (3.6)$$

Onde:

$$A_1 = [WH(I + 1) - WH(I)] / \Delta y$$

$$A_0 = WH(I + 1) - I \cdot A_1 \cdot \Delta y$$

Analogamente, após encontrar  $WB(y)$  o torque será:

$$T = T_0 \cdot (\alpha^2 + q^2) \cdot (B_0 + B_1 \cdot y) \quad (3.7)$$

Onde:

$$B_1 = [WB(I + 1) - WB(I)] / \Delta y$$

$$B_0 = WB(I + 1) - I \cdot B_1 \cdot \Delta y$$

Então admitindo o valor de  $y$  pode-se através de (3.6) e (3.7) - calcular  $H$  e  $T$  naquele instante.

Tais valores deverão ser compatíveis com as outras condições: - inércia do conjunto girante e as características (+) e (-) do transitório.

A variação da rotação da bomba depende do torque resistente aplicado pela bomba e obtido a partir de suas curvas características.

Para torque resistente positivo, tem-se a equação:

$$T = - \frac{WR^2}{g} \frac{dN_r}{dt} \quad (3.8)$$

Onde o momento de inércia é  $\frac{WR^2}{g}$

Tomando o torque médio para o intervalo de tempo  $\Delta t$ , e definindo-se:

$$C_{31} = \frac{WR^2}{g} \frac{N_{r0}}{T_0} \frac{\pi}{15 \cdot \Delta t} \quad (3.9)$$

Resulta:

$$\beta + \beta_0 - C_{31}(\alpha_0 - \alpha) = 0 \quad (3.10)$$

Na expressão (3.10) o índice "o" refere-se ao início do intervalo de tempo  $\Delta t$  e a mesma deverá ser satisfeita para todos os instantes do transitório.

Nos programas desenvolvidos neste trabalho, as máquinas de fluxo - estão sempre localizadas a montante do trecho em análise, são providas de tubulação de sucção de comprimento desprezível, sob o ponto de vista de transientes hidráulicos.

Portanto, deve-se compatibilizar as equações ora desenvolvidas para a bomba com a equação sob a reta (-) do trecho de jusante(2.20).



### 3.2 Condição de Contorno para Inércia Concentrada.

O RHO está conectado ao sistema principal através de uma tubulação curta como se indica na figura 3.3. Considera-se no modelo matemático a tubulação 3 como uma inércia concentrada, isto é, um trecho rígido de tubulação e, o líquido nele contido suposto incompressível será considerado como um bloco solidificado de massa definida.

Da equação do movimento aplicada ao elemento resulta:

$$F - F_4 - F_f = \frac{\gamma A_3 L_3}{g} \frac{dV}{dt} \quad (3.11)$$

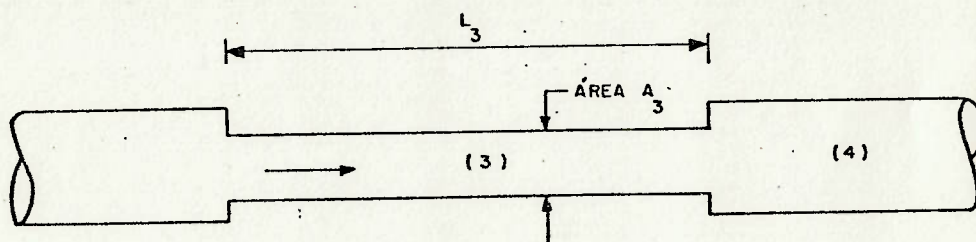


Figura 3.3 - Inércia Concentrada.

Onde  $F$  e  $F_4$  são as forças de pressão e  $F_f$  é a força de atrito, conforme figura 3.3.

Para a integração dessa equação diferencial a aproximação de primeira ordem é adequada | 17 | para  $F_f$ . Da integração de (3.11) resulta:

$$H_p - H_{p_4} = C_1 + C_2 Q_{p_3} \quad (3.12)$$

Onde:

$$C_1 = H_4 - H + \frac{f_3 L_3}{g D_3 A_3^2} Q_3 |Q_3| - C_2 Q_3 \quad (3.13)$$

$$C_2 = \frac{2 L_3}{g A_3 t} \quad (3.14)$$

A equação (3.12) nas incógnitas  $H_p$ ,  $H_{p_4}$  e  $Q_{p_3}$  é resolvida utilizando-se as equações de compatibilidade sobre as retas características (+) e (-) na junção com a tubulação principal, a equação da continuidade e a equação de estado do ar comprimido.

### 3.3 Condição de Contorno para RHO

O RHO é ligado à tubulação principal através de uma inércia concentrada e conexão em forma de tê, dividindo-a em dois trechos, um a montante e outro a jusante do RHO. Neste estudo a tubulação de montante receberá o índice 1 e a de jusante o índice 2.

A compressibilidade do líquido no interior do RHO é desprezível face à compressibilidade do ar e desprezam-se o atrito e a inércia.

O gás comprime-se de acordo com a lei:

$$H_A \cdot v^n = C = \text{cte.} \quad (3.15)$$

Onde  $H_A = H_{p_4} + H_B - Z$  é a pressão absoluta do ar e  $H_B$  é a pressão barométrica.



Uma vez que tem-se as equações matemáticas que governam o escoamento na tubulação principal, pode-se aplicá-las no equacionamento do RHO.

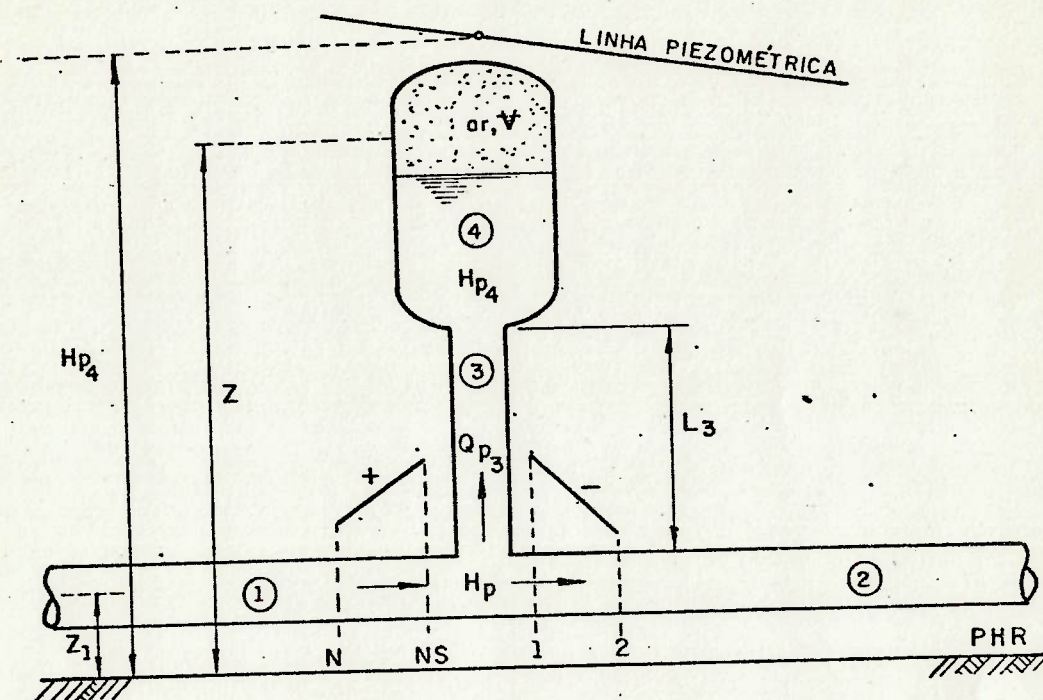


Figura 3.4 - RHO com inércia concentrada.

Considerando a figura 3.4, pode-se admitir aproximadamente que o volume  $V$ , no instante  $(t+\Delta t)$  será obtido pelo valor do volume  $V$  no instante anterior pela expressão:

$$V_{(t+\Delta t)} = V - \frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t \quad (3.16)$$

Substituindo o valor de  $H_A$  e (3.16) em (3.15) tem-se:

$$(H_{P4} + H_B - Z) \left( V - \frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t \right)^n = C \quad (3.17)$$

Pela equação da continuidade:

$$Q_{P_{1,NS}} = Q_{P_3} + Q_{P_{2,1}} \quad (3.18)$$

As equações de compatibilidade nas retas (+) e (-) e as equações - (2.5), (2.8) e (2.9) formam um sistema de cinco equações a cinco incógnitas, a saber:

$$H_P - H_{P_4} = C_1 + C_2 Q_{P_3} \quad (3.19)$$

$$(H_{P_4} + H_B - Z) \cdot \left( V - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right)^n = C \quad (3.20)$$

$$Q_{P_{1,NS}} = Q_{P_3} + Q_{P_{2,1}} \quad (3.21)$$

$$H_{P_{1,NS}} = C_{P_1} - B_1 Q_{P_{1,NS}} \quad (3.22)$$

$$H_{P_{2,1}} = C_{M_2} + B_2 Q_{P_{2,1}} \quad (3.23)$$

Sendo:

$$H_P = H_{P_{1,NS}} = H_{P_{2,1}}$$

Resolvendo o sistema tem-se | 19 |:

$$F_1 = \left\{ \left[ \frac{1}{(B_1 + B_2)} (B_2 C_{P_1} - B_1 B_2 Q_{P_3} + B_1 C_{M_2}) - C_1 + \right. \right. \\ \left. \left. - C_2 Q_{P_3} \right] + H_B - Z \right\} \cdot \left\{ V - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right\}^n + \\ - C = 0 \quad (3.24)$$



A equação (3.24), não linear na variável  $Q_p$  é resolvida utilizando-se o Método de Newton-Raphson. Determina-se uma correção  $\Delta Q$  da vazão para um valor inicial estimado de  $Q_{p3}$  através da expressão:

$$F_1 + \left( \frac{dF_1}{dQ_{p3}} \right) Q_{p3} \cdot \Delta Q = 0 \quad (3.25)$$

Onde:

$$\frac{dF_1}{dQ_{p3}} = \left[ - \frac{B_1 B_2}{(B_1 + B_2)} - C_2 \right] \cdot \left[ V - \frac{Q_{p3} + Q_3}{2} \Delta t \right]^n +$$

$$- \frac{1}{2} \cdot \frac{n \Delta t C}{\left( V - \frac{Q_{p3} + Q_3}{2} \Delta t \right)} \quad (3.26)$$

A constante  $C$  é definida pela equação (3.15) usando-se os valores iniciais.

O expoente  $n$  da equação (3.15) poderá ser considerado constante e igual a 1,2, tendo em vista que espera-se um processo politrópico para a transformação do ar no interior do RHO. No Capítulo VI será mostrado que o expoente  $n$  varia durante o transiente, quando será analisado o seu comportamento.

Utilizando-se o processo de Newton-Raphson [19] determina-se a vazão  $Q_p$  no instante considerado adotando-se o valor inicial para  $Q_{p3}$  em cada instante pela extrapolação linear dos valores obtidos nos dois instantes anteriores.

Conhecidos os valores referentes ao instantes  $t + \Delta t$ , pode-se, através de (3.16) calcular o novo volume do ar no interior do RHO, lembrando que o volume de água que entra ou sai do interior do tanque é:

$$\frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t \quad (3.27)$$

onde a vazão tomada é a média no intervalo de tempo considerado.

Em linguagem FORTRAN IV, o processo obedece ao programa do APÊNDICE A.

### 3.4 Condição de Contorno para Reservatório com Nível Especificado.

Num reservatório de grandes dimensões o seu nível  $H_R$  - definido com relação ao referencial arbitrário nos cálculos - poderá ser considerado constante durante a ocorrência do escoamento transiente. Daí, tem-se, para um reservatório situado na extremidade de jusante:

$$H_{P_{NS}} = H_R \quad (3.28)$$

$$Q_{P_{NS}} = \frac{C_P - H_{P_{NS}}}{B} \quad (3.29)$$

com:

$$C_P = H_N + BQ_N - R Q_N |Q_N| \quad (3.30)$$

Neste caso simples de condição de contorno observa-se claramente a compatibilização da característica hidráulica da extremidade da tubulação principal com a Reta Característica (+), dada pela equação (3.29).



ção (3.29).

### 3.5 Condição de Contorno para a Separação de Coluna.

Durante a fase de sub pressão do fenômeno transiente, eventualmente a carga piezométrica poderá baixar a ponto de atingir a pressão de vapor no interior da tubulação. Tal fenômeno, chamado "separação de colunas", de natureza complexa, tem sido estudado exaustivamente por diversos pesquisadores | 17 | |23|.

No presente trabalho pretende-se utilizar o modelo matemático de Streeter e Wylie | 17 | para demonstrar o comportamento de uma instalação sem dispositivo de proteção. Tal modelo considera as hipóteses de ausência de matéria na região separada e de separação total das colunas líquidas levando a resultados conservadores no que diz respeito as pressões geradas pelo choque das colunas ao rejuntarem.

Então, sob o ponto de vista de equacionamento, a cavidade onde ocorre a pressão de vapor é considerada uma condição de contorno, pois ali deixa de propagar-se a perturbação de pressão de acordo com as equações referentes aos pontos interiores, conforme figura 3.5.

Enquanto a separação estiver ocorrendo, serão analisados um trecho de montante com superfície livre sujeita à pressão de vapor e deslocamento proporcional à vazão obtida pela compatibilização com a reta característica (+). Um trecho de jusante será tratado de modo análogo, porém compatibilizado com a reta característica (-).

Para processamento em computador a condição de contorno obedece ao programa do APÊNDICE A.

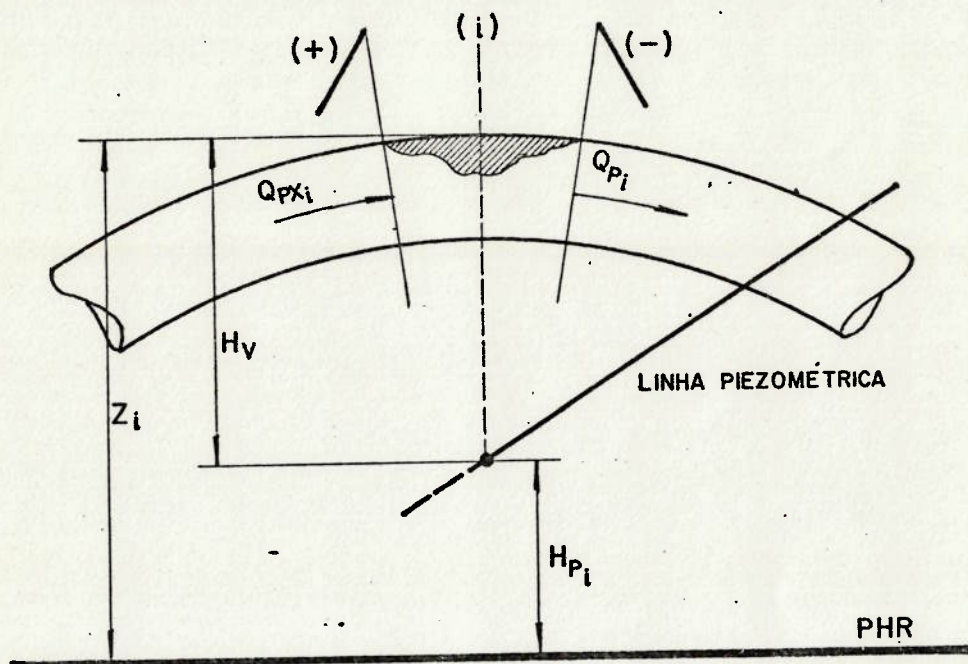


Figura 3.5 - Separação de Colunas Conforme Modelo Utilizado



## CAPÍTULO IV - UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Como exemplo será analisada a instalação de recalque mostrada nas figuras 4.14.2 e 4.3, cujas características seguem abaixo:

## Tubulação Principal

comprimento	2.660	m
diâmetro	900	mm
velocidade	1,69	m/s
altura estática	92,4	m
perda de carga	7,6	m
coeficiente de perda de carga	0,018	
material	f <sup>o</sup> f <sup>o</sup> dúctil série K-9	
módulo de elasticidade do material	1,66 x 10 <sup>11</sup>	Pa

## Bomba

tipo	bipartida horizontal com dupla sucção	
velocidade	123,57	rd/s
rendimento	82,5	%
potência consumida	639	kW
altura total	100	m
vazão	0,538	m <sup>3</sup> /s
momento de inércia	2,41	Kg m <sup>2</sup>
acoplamento	luva elástica	

## Motor Elétrico

tipo	assíncrono	
potência	735	kW
momento de inércia	7,06	Kg m <sup>2</sup>
tensão	4,16	kV

A figura 4.4 apresenta o perfil da tubulação principal. O fenômeno transiente, advindo com a interrupção de energia aos grupos mo to-bombas, será analisado inicialmente considerando a instalação







sem RHO. As linhas piezométricas são aquelas mostradas na figura 4.5. Nota-se a ocorrência de separação de colunas na fase de subpressão e posterior choque de colunas.

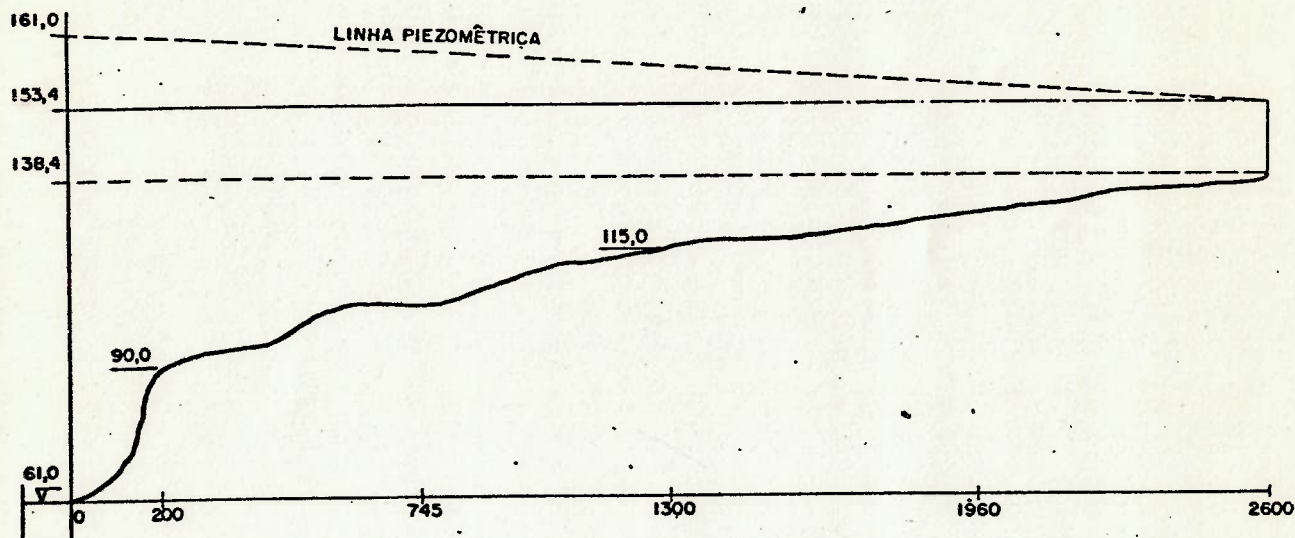


Figura 4.4 - Perfil da tubulação principal

As pressões geradas são elevadas. Já na Figura 4.6 são apresentadas as linhas piezométricas, considerando-se instalado junto a estação elevatória um RHO com volume inicial de  $20 \text{ m}^3$  de ar.

Nota-se que as pressões desenvolvidas são moderadas permitindo a utilização de equipamentos e materiais de linha normal de fabricação.

Da Tabela 4.1 observa-se que o RHO com uma quantidade especificada de ar proporciona a expansão do ar, expulsando certa quantidade de água que escoará do RHO para a tubulação principal. Essa quantidade de água evitará uma despressurização acentuada não permitindo a ocorrência de pressão de vapor e conseqüentemente separação da coluna.

Durante a fase de sobrepressão, o ar expandido no interior do RHO



será comprimido pela água que escoar para seu interior.

Deve-se considerar na instalação a existência, junto aos conjuntos elevatórios, de válvulas de retenção. É importante que as mesmas fechem num pequeno intervalo de tempo para evitar a inversão do escoamento na carcaça da bomba, uma vez que observa-se a parada total da bomba já no primeiro intervalo de tempo, 2,488 segundos - após o início do fenômeno. Esse efeito poderá ser obtido com a adição de um contrapeso para acelerar o fechamento.

O escoamento reverso na carcaça da bomba poderá ser evitado através de válvulas de controle com fechamento programado.

A tabela 4.1 apresenta os dados da instalação analisada, bem como os valores de cargas, pressões e vazões ao longo da tubulação principal, junto à bomba e o RHO, durante o transiente. Agora pretende-se utilizar alguns equacionamentos daqueles apresentados no Capítulo I, para verificar o comportamento da instalação. Em primeiro lugar será utilizado o "equacionamento de coluna rígida" conforme Vibert | 9 |.

O método de Vibert é adequado para cálculo das pressões junto à elevatória, assim como os volumes do ar no RHO.

Tomando os dados da tabela 4.1 tem-se:

- comprimento da tubulação principal	2660 m
- área da secção transversal	0,636 m <sup>2</sup>
- volume da tubulação principal	1691,76 m <sup>3</sup>
- vazão de regime permanente	1,075 m <sup>3</sup> /s
- velocidade de regime permanente	1,69 m/s
- altura estática	92,4 m
- altura total (admitir perdas nulas)	92,4 m

Partindo da análise da coluna de água na tubulação principal como um sólido e lembrando que o trabalho das forças externas e internas é igual à variação da energia cinética, chega-se à expressão

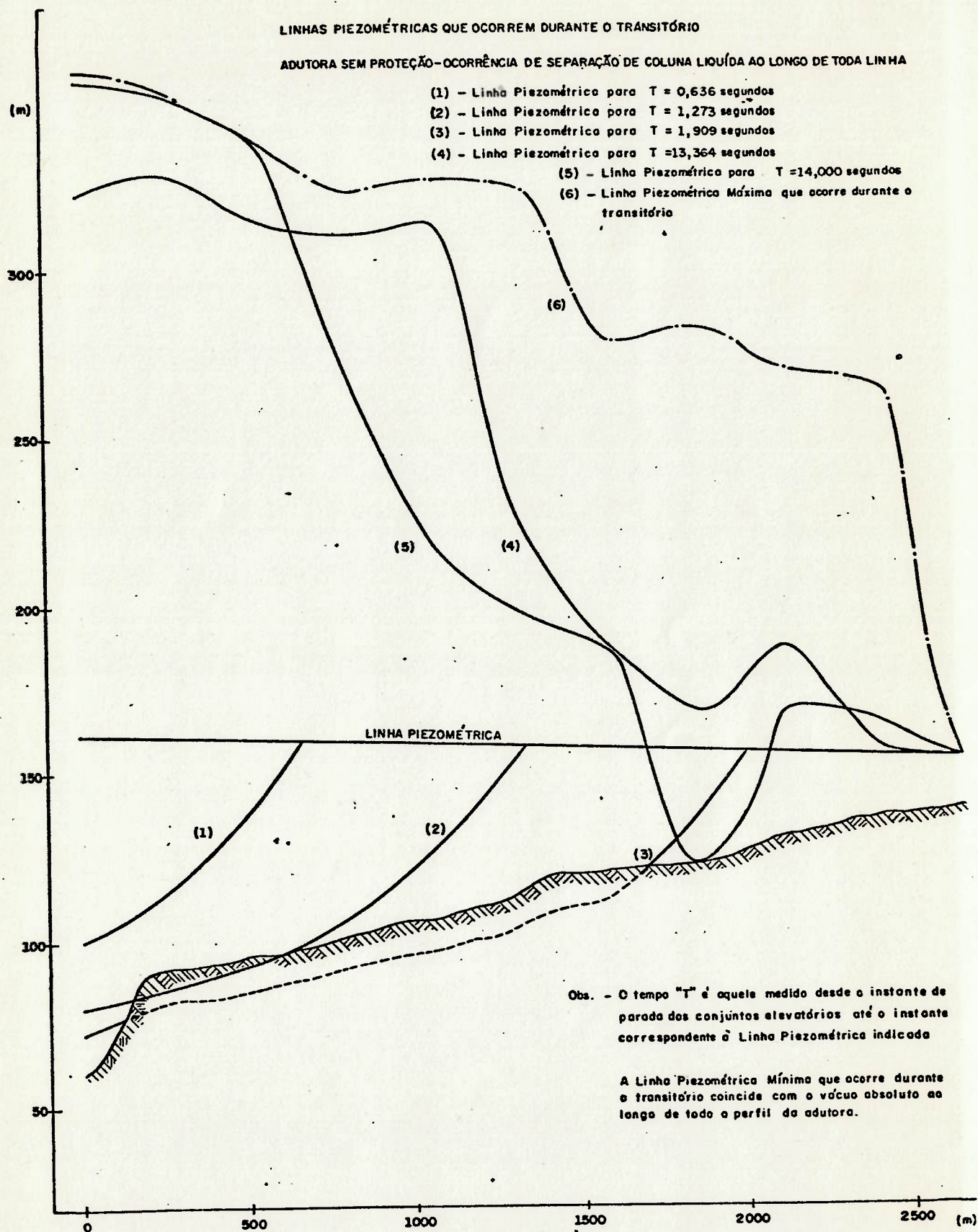


Figura 4.5 - Linhas Piezométricas que ocorrem sem Presença do RHO.



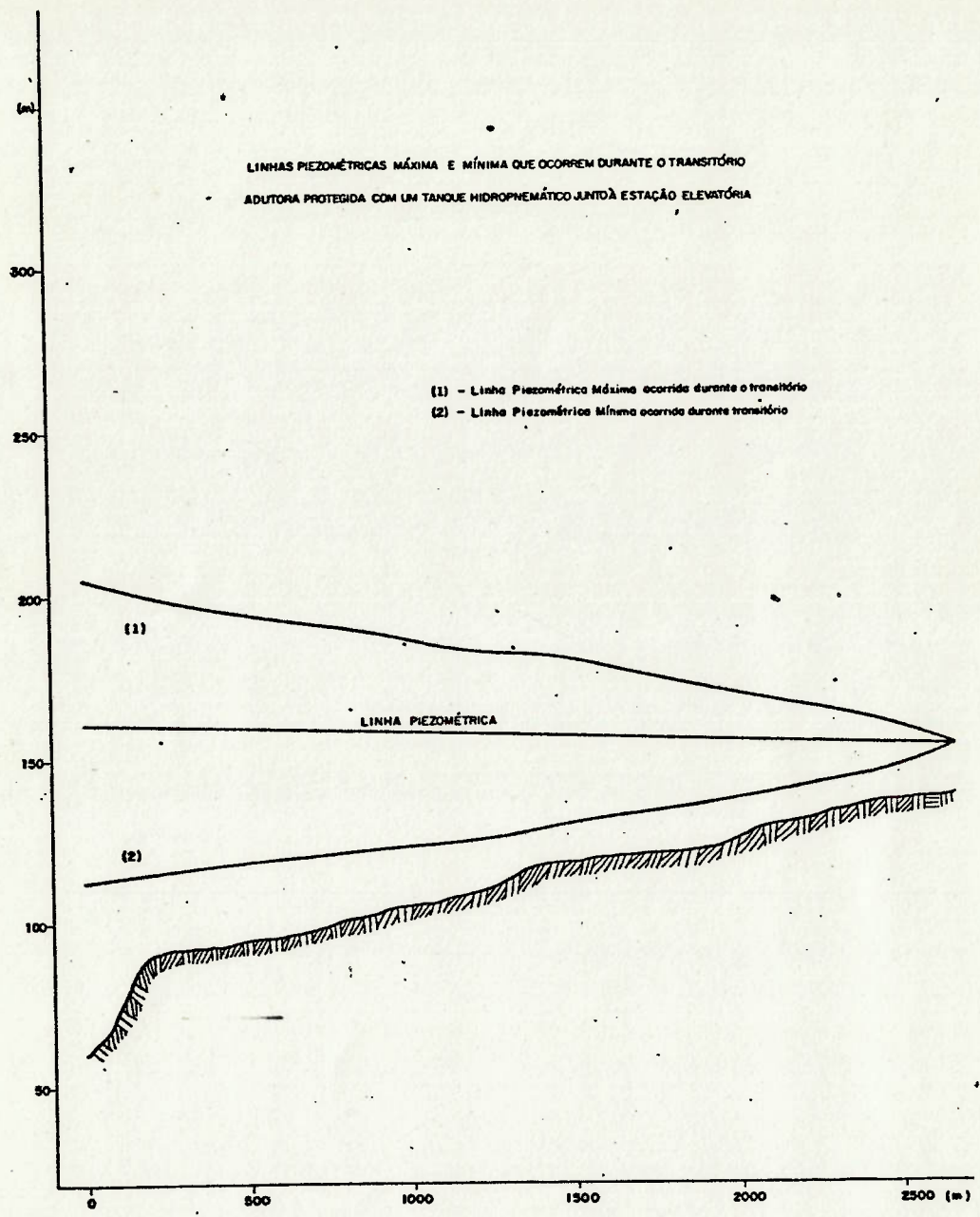


Figura 4.6 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima na Presença do RHO.





M=CARGAS(M), P=PRESSOES(CA), U=VAZES(M3/S)

TEMP.	ALPHA	VOLUME	OCMBA	TANQUE	X/LM	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0
0.000	1.000	20.000	ME	161.00	160.82	160.82	160.00	159.30	158.50	157.78	157.02	156.26	155.50	154.74	153.98	153.22
			PE	101.00	93.32	99.82	68.56	64.30	57.04	50.78	40.02	38.26	33.00	24.24	17.98	-0.18
			CE	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077
2.448	0.000	22.035	ME	148.65	149.54	149.19	149.89	150.46	152.21	153.33	153.06	151.39	151.82	150.05	151.02	153.40
			PE	88.65	82.04	88.19	58.19	55.86	50.71	46.33	36.06	31.39	29.32	19.55	15.02	0.00
			CE	0.000	-1.008	1.009	1.015	1.026	1.038	1.049	1.052	1.046	1.053	1.047	1.057	1.076
4.076	0.000	24.462	ME	138.69	138.75	138.68	141.97	143.91	143.23	144.69	140.10	145.08	147.32	149.72	151.67	153.40
			PE	78.69	71.27	77.68	50.07	48.91	41.73	37.69	27.10	25.08	24.42	19.22	15.67	0.00
			CE	0.000	-0.947	0.948	0.936	0.932	0.944	0.943	0.955	0.958	0.955	0.949	0.945	0.945
7.464	0.000	26.604	ME	130.63	131.01	132.23	134.79	136.23	137.66	140.36	140.43	146.48	145.60	146.99	149.50	153.40
			PE	78.63	63.51	71.23	43.29	41.23	36.16	33.38	27.63	24.68	23.10	16.49	13.56	0.00
			CE	0.000	-0.793	0.799	0.794	0.794	0.794	0.801	0.817	0.808	0.806	0.806	0.814	0.830
9.452	0.000	28.360	ME	125.49	125.60	125.62	129.88	133.01	135.96	136.61	137.15	141.58	140.51	146.62	149.29	153.40
			PE	67.49	58.10	64.82	38.38	36.01	33.56	29.61	20.15	21.58	22.01	16.12	13.29	0.00
			CE	0.000	-0.642	0.643	0.630	0.626	0.629	0.635	0.646	0.632	0.627	0.631	0.637	0.642
12.440	0.000	29.691	ME	118.44	122.00	120.90	125.48	129.80	132.54	135.19	139.14	141.46	142.23	145.41	149.53	153.40
			PE	57.44	50.50	59.90	31.98	30.80	31.64	28.19	27.14	21.40	19.73	14.91	13.53	0.00
			CE	0.000	-0.422	0.436	0.435	0.438	0.441	0.441	0.452	0.452	0.441	0.445	0.455	0.465
14.928	0.000	30.582	ME	120.85	119.87	120.84	124.52	128.52	131.36	131.61	134.64	139.70	143.51	146.49	149.84	153.40
			PE	67.85	52.37	59.27	32.94	33.52	30.86	24.01	17.04	14.70	21.01	15.99	13.84	0.00
			CE	0.000	-0.264	0.262	0.254	0.260	0.238	0.248	0.250	0.245	0.249	0.251	0.242	0.238
17.416	0.000	30.991	ME	119.38	119.00	119.56	122.24	125.67	130.31	132.97	134.18	141.60	141.33	144.66	149.31	153.40
			PE	59.34	51.50	58.56	30.74	30.67	28.81	25.97	21.18	21.60	18.83	14.16	13.31	0.00
			CE	0.000	-0.032	0.035	0.034	0.043	0.051	0.041	0.046	0.047	0.034	0.042	0.056	0.063
19.904	0.000	30.757	ME	117.90	119.35	119.06	122.54	127.40	131.73	132.48	135.55	139.55	141.30	146.30	150.73	153.40
			PE	57.90	51.85	58.06	31.04	32.40	30.23	25.88	18.55	19.55	14.80	14.80	14.73	0.00
			CE	0.000	0.153	-0.142	-0.153	-0.165	-0.167	-0.149	-0.151	-0.163	-0.159	-0.164	-0.168	-0.167
22.392	0.000	30.126	ME	121.49	120.49	121.56	124.16	127.64	131.85	135.44	137.82	140.79	142.00	146.24	150.96	153.40
			PE	61.89	53.39	60.56	32.66	32.64	30.35	28.44	20.42	20.79	19.56	15.74	14.96	0.00
			CE	0.000	0.344	-0.354	-0.355	-0.358	-0.357	-0.351	-0.350	-0.346	-0.362	-0.360	-0.349	-0.344
24.880	0.000	29.032	ME	124.98	123.75	124.27	127.17	131.25	134.11	134.58	138.10	140.44	143.03	146.63	150.14	153.40
			PE	64.98	56.25	63.27	35.67	36.25	32.61	27.58	21.10	20.44	20.93	16.13	14.14	0.00
			CE	0.000	0.400	-0.510	-0.512	-0.527	-0.536	-0.526	-0.529	-0.528	-0.537	-0.544	-0.541	-0.536
27.368	0.000	27.582	ME	127.09	128.04	128.09	131.21	133.15	137.72	139.91	141.68	144.04	143.92	145.82	149.98	153.40
			PE	67.09	60.54	67.09	39.71	38.15	35.22	32.91	24.68	24.04	21.42	15.32	13.98	0.00
			CE	0.000	0.669	-0.673	-0.679	-0.690	-0.681	-0.671	-0.676	-0.680	-0.694	-0.690	-0.675	-0.670
29.856	0.000	25.730	ME	134.13	134.00	133.90	136.52	140.44	141.96	140.77	141.95	143.51	146.95	149.92	150.70	153.40
			PE	74.13	66.50	72.97	45.62	45.44	40.46	33.77	24.95	23.51	24.45	19.42	14.76	0.00
			CE	0.000	0.773	-0.765	-0.775	-0.791	-0.796	-0.790	-0.793	-0.790	-0.798	-0.810	-0.806	-0.803
32.344	0.000	23.710	ME	141.47	141.83	141.28	144.16	145.46	145.16	147.76	148.22	148.43	148.13	149.80	152.42	153.40
			PE	81.47	74.33	80.28	52.66	50.40	43.66	30.76	31.22	29.43	25.63	19.30	16.42	0.00
			CE	0.000	0.833	-0.848	-0.850	-0.851	-0.858	-0.855	-0.864	-0.867	-0.869	-0.863	-0.855	-0.855
34.833	0.000	21.041	ME	152.51	151.75	152.13	151.36	152.44	153.52	152.95	152.12	151.07	152.63	151.69	151.88	153.40

Tabela 4.1 - continuação

37.321	0.000	19.559	ME	97.51	86.25	91.13	59.86	57.84	52.02	45.95	35.12	31.07	30.13	21.19	15.88	0.00	
			PE	0.000	0.840	-0.833	-0.844	-0.860	-0.869	-0.870	-0.873	-0.873	-0.862	-0.879	-0.884	-0.890	
			CE	0.000	0.811	-0.800	-0.806	-0.800	-0.817	-0.812	-0.815	-0.826	-0.831	-0.826	-0.816	-0.813	
39.609	0.000	17.735	ME	175.96	176.78	176.05	173.74	172.01	170.83	167.97	163.63	160.67	160.15	158.21	156.40	153.40	
			PE	115.96	109.28	115.45	82.24	77.41	69.33	67.67	46.63	40.67	37.65	27.71	20.10	0.00	
			CE	0.000	0.643	-0.653	-0.660	-0.679	-0.693	-0.697	-0.694	-0.701	-0.712	-0.707	-0.709	-0.715	
42.297	0.000	16.307	ME	189.60	189.37	189.19	184.45	182.53	179.23	176.81	173.05	167.61	163.34	159.98	159.98	153.40	
			PE	124.69	121.87	124.19	93.35	87.53	77.73	69.61	56.95	47.61	40.84	29.48	20.98	0.00	
			CE	0.000	0.478	-0.486	-0.490	-0.488	-0.503	-0.502	-0.501	-0.510	-0.515	-0.511	-0.503	-0.502	
44.745	0.000	15.407	ME	152.07	148.63	148.23	141.45	140.00	145.61	140.70	135.37	131.17	126.77	121.33	118.59	113.40	
			PE	132.07	131.13	137.23	102.35	95.00	84.11	73.70	58.37	51.17	44.77	30.83	22.59	0.00	
			CE	0.000	0.233	-0.228	-0.235	-0.247	-0.256	-0.256	-0.246	-0.251	-0.262	-0.262	-0.266	-0.267	
37.273	0.000	15.146	ME	201.24	201.54	201.40	195.95	193.31	188.93	183.11	176.27	172.26	167.58	163.37	158.80	153.40	
			PE	141.28	134.04	140.40	104.45	94.31	87.43	76.11	61.27	52.26	45.08	32.87	22.80	0.00	
			CE	0.000	-0.027	0.021	0.020	0.028	0.030	0.034	0.034	0.020	0.031	0.040	0.040	0.040	
40.761	0.000	15.541	ME	140.81	147.18	146.17	141.67	138.97	135.74	130.25	124.47	120.27	116.30	112.29	108.29	103.40	
			PE	130.41	129.68	135.17	100.37	93.07	84.26	73.05	57.47	50.27	42.87	30.40	22.29	0.00	
			CE	0.000	-0.299	0.294	0.300	0.302	0.297	0.295	0.307	0.310	0.308	0.302	0.306	0.306	
52.249	0.000	16.581	ME	189.97	187.14	187.69	183.05	180.46	177.96	174.60	171.54	166.19	162.11	159.64	157.19	153.40	
			PE	129.97	119.64	125.89	91.05	86.46	76.46	67.60	54.54	46.19	30.61	20.14	14.19	0.00	
			CE	0.000	-0.504	0.505	0.504	0.510	0.523	0.530	0.534	0.528	0.544	0.545	0.542	0.542	
54.737	0.000	17.990	ME	176.91	174.76	175.37	172.18	170.43	169.64	167.22	162.72	160.67	158.90	157.45	156.07	153.40	
			PE	116.91	107.26	114.37	80.68	75.03	64.18	60.22	45.72	40.67	36.40	26.95	20.07	0.00	
			CE	0.000	-0.657	0.659	0.665	0.668	0.669	0.672	0.682	0.685	0.688	0.681	0.684	0.686	
57.225	0.000	19.716	ME	161.19	162.60	161.91	161.71	160.88	161.02	160.15	158.70	155.47	154.20	154.96	155.07	153.40	
			PE	101.19	95.10	100.91	70.21	65.84	59.52	53.15	41.70	35.47	31.70	24.46	19.07	0.00	
			CE	0.000	-0.731	0.726	0.730	0.729	0.745	0.748	0.749	0.746	0.750	0.758	0.767	0.769	
50.713	0.000	21.532	ME	152.77	152.11	152.25	151.87	152.37	153.52	153.67	152.22	151.82	152.02	153.39	152.45	153.40	
			PE	97.77	84.81	91.25	60.37	57.37	52.02	46.67	35.22	31.82	29.52	22.89	16.45	0.00	
			CE	0.000	-0.742	0.740	0.745	0.739	0.733	0.738	0.751	0.756	0.760	0.752	0.751	0.755	
62.201	0.000	23.201	ME	144.54	143.65	143.92	145.70	145.28	146.92	147.82	148.32	149.68	149.97	151.44	152.38	153.40	
			PE	84.54	76.15	82.92	54.20	50.24	45.42	40.82	31.32	28.68	27.47	20.94	16.34	0.00	
			CE	0.000	-0.674	0.678	0.679	0.682	0.682	0.692	0.693	0.691	0.693	0.700	0.700	0.712	
64.649	0.000	24.868	ME	135.41	137.17	136.51	138.47	140.59	142.01	143.86	145.41	145.99	147.58	150.57	151.05	153.40	
			PE	75.01	69.67	75.51	46.97	45.59	41.41	37.86	28.41	25.99	25.08	20.07	15.05	0.00	
			CE	0.000	-0.592	0.595	0.597	0.595	0.593	0.595	0.598	0.598	0.602	0.601	0.603	0.605	
67.177	0.000	26.185	ME	131.18	132.42	131.60	134.70	136.27	139.81	142.04	142.32	143.54	146.68	149.70	151.45	153.40	
			PE	71.18	64.92	70.60	43.20	41.27	38.31	35.04	25.32	23.54	24.18	19.20	15.45	0.00	
			CE	0.000	-0.453	0.463	0.466	0.470	0.475	0.475	0.472	0.474	0.479	0.485	0.484	0.482	
69.645	0.000	27.177	ME	130.72	129.17	129.70	131.82	133.78	136.57	139.58	141.99	143.01	145.09	148.99	151.30	153.40	
			PE	70.72	61.57	68.70	40.32	38.78	35.07	32.58	24.99	23.01	22.59	18.49	15.30	0.00	
			CE	0.000	-0.335	0.334	0.337	0.339	0.332	0.326	0.332	0.338	0.337	0.335	0.335	0.327	
72.153	0.000	27.812	ME	127.93	127.22	127.59	129.56	132.14	136.15	139.66	141.99	144.77	148.23	150.93	153.40		

Tabela 4.1 - continuação





apropriada para cálculo do RHO da instalação.

A expressão é, admitindo transformação isotérmica:

$$V_o = \frac{V_o^2 \gamma}{2g p_{4o}} \frac{L A}{\left[ \frac{p_{4o}}{p_{4min}} - 1 - \ln \frac{p_{4o}}{p_{4min}} \right]} \quad (4.1)$$

ou

$$V_o = \frac{V_o^2 \gamma}{2g p_{4o}} \frac{L A}{\left[ \frac{p_{4o}}{p_{4max}} - 1 - \ln \frac{p_{4o}}{p_{4max}} \right]} \quad (4.2)$$

Vibert preparou (4.1) e (4.2) para determinação do volume de ar no RHO em regime permanente em função de cargas máxima ou mínima, absolutas, adequadas para o perfil da tubulação principal ou as limitações estruturais dos tubos ou equipamentos. ;

Nesta verificação vai-se considerar o volume inicial do ar no RHO igual ao utilizado para processamento da tabela 4.1.

Rearranjando as expressões (4.1) e (4.2) tem-se:

$$\frac{p_{4o}}{p_{4min}} - \ln \frac{p_{4o}}{p_{4min}} = 1 + \frac{V_o^2 L A \gamma}{2g p_{4o} V_o} \quad (4.3)$$



$$\frac{p_{4_o}}{p_{4_{\max}}} - \ln \frac{p_{4_o}}{p_{4_{\max}}} = 1 + \frac{V_o^2 L A \gamma}{2g p_{4_o} V_o} \quad (4.4)$$

Resolvendo, por tentativas, (4.3) e (4.4), para  $V_o = 20 \text{ m}^3$ , tem-se:

$$p_{4_{\min}} = 59.9800 \text{ N/m}^2$$

$$p_{4_{\max}} = 165.9800 \text{ N/m}^2$$

Para uma sobrepressão máxima igual à encontrada na tabela 4.1 deve-se prever o volume inicial de ar abaixo

$$V_o = \frac{V_o^2 \gamma}{2g p_{4_o}} \frac{L A}{\left[ \frac{p_{4_o}}{p_{4_{\max}}} - \ln \frac{p_{4_o}}{p_{4_{\max}}} - i \right]} \quad (4.5)$$

$$\text{Então } V_o = 27,43 \text{ m}^3$$

O volume encontrado por este método é 37% superior ao encontrado pelo método das características e transformação politrópica do ar com  $n = 1,2$ . Deve-se notar que o sistema analisado apresenta baixo percentual de perda de carga em relação à altura estática, fator que deve atenuar o desvio.

A divergência encontrada também é proveniente do fato de ter sido desprezada a influência da celeridade da perturbação de pressão, bem como o momento de inércia dos conjuntos de bombeamento.

Para completar a análise comparativa toma-se o equacionamento proposto por Streeter [15], baseado no parâmetro  $\psi$ .

Considerando transformação politrópica, com  $n = 1,2$ , encontra-se

$$I = \frac{L}{g A} = 426,774 \text{ s}^2/\text{m}^2$$

$$C_o = \frac{V_o \gamma}{n p_{4_o}} = 0,176 \text{ m}^2$$

$$z_{i_o} = \sqrt{\frac{I}{C_o}} = 49,2428 \text{ m}^{-2} \text{ s}$$

$$\psi = \frac{z_{i_o} \cdot Q_o}{\frac{p_{4_o}}{\gamma}} = 0,56$$

Então

$$h_{p_{\max}} = \frac{p_{4_{\max}}}{p_{4_o}} = \exp \psi$$

$$h_{p_{\max}} = 1,75$$

$$p_{\max} = 165 \cdot 9800 \text{ N/m}^2$$

$$h_{p_{\min}} = \frac{p_{4_{\min}}}{p_{4_o}} = \exp(-\psi)$$

$$h_{p_{\min}} = 0,57$$

$$p_{\min} = 54 \cdot 9800 \text{ N/m}^2$$

$$\frac{V_{\max}}{V_o} = \left( \frac{1}{h_{p_{\min}}} \right)^{1/n}$$

$$V_{\max} = 31,95 \text{ m}^3$$

$$\frac{V_{\min}}{V_o} = \left( \frac{1}{h_{p_{\max}}} \right)^{1/n}$$

$$V_{\min} = 12,55 \text{ m}^3$$

Para uma sobrepressão máxima igual à encontrada na tabela 4.1 deve-se prever o volume inicial de ar abaixo



$$v_o = \frac{n I Q_o \gamma}{\psi^2 p_{4_o}} = 24,29 \text{ m}^3$$

com  $h_{p_{\max}} = 1,63$  e  $\psi = 0,49$

O volume encontrado por este método é 21% superior ao encontrado pelo método das características e transformação politrópica do ar com  $n = 1,2$ .

Valem para estes resultados os mesmos comentários efetuados para aqueles obtidos pelo método proposto por Vibert.

A tabela 4.2 apresenta um resumo dos resultados obtidos pelos três métodos aplicados neste Capítulo.

Tabela 4.2 - Quadro Comparativo dos Resultados Obtidos com o Exemplo de Aplicação, para Volume Inicial de Ar Igual a  $20 \text{ m}^3$ .

Item	Cálculo Feito Conforme		
	Vibert  ref.9	Streeter  ref.15	Modelo Capít- tulo II e III
Sobrepessão máxima junto a bomba (mca abs)	165,00	165,00	153,24
Subpessão mínima junto a bomba (m.c.a. abs)	59,00	54,00	64,71
Volume máximo no RHO ( $\text{m}^3$ )	32,00	31,95	30,91
Volume mínimo no RHO ( $\text{m}^3$ )	11,44	12,55	15,14



## CAPÍTULO V - CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS SOBRE A INSTALAÇÃO DO RHO

Analisando o comportamento do RHO estudado no Capítulo IV observa-se que o movimento do líquido dentro da tubulação é oscilatório havendo uma correlação entre a carga e a vazão de saída do RHO.

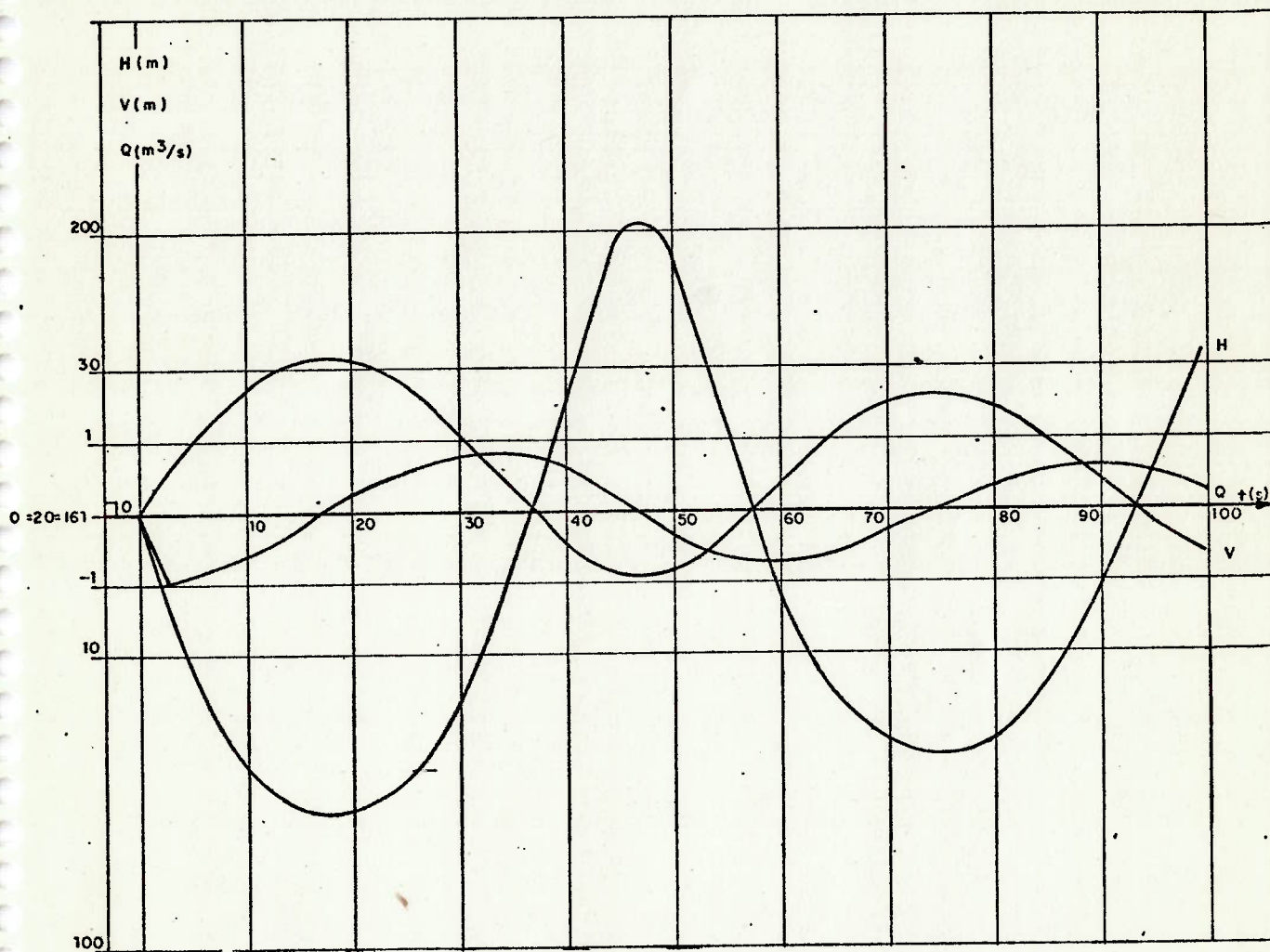


Figura 5.1 - Comportamento da Carga junto à Elevatória, Volume de Ar e Vazão do RHO em função do tempo.

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram, respectivamente, o comportamento da carga e do volume do ar no interior do RHO em função do tempo, - junto à elevatória e no meio da tubulação principal. Observa-se o amortecimento da oscilação com o tempo, registrando a influência do atrito na Inércia Concentrada e ao longo da tubulação principal.

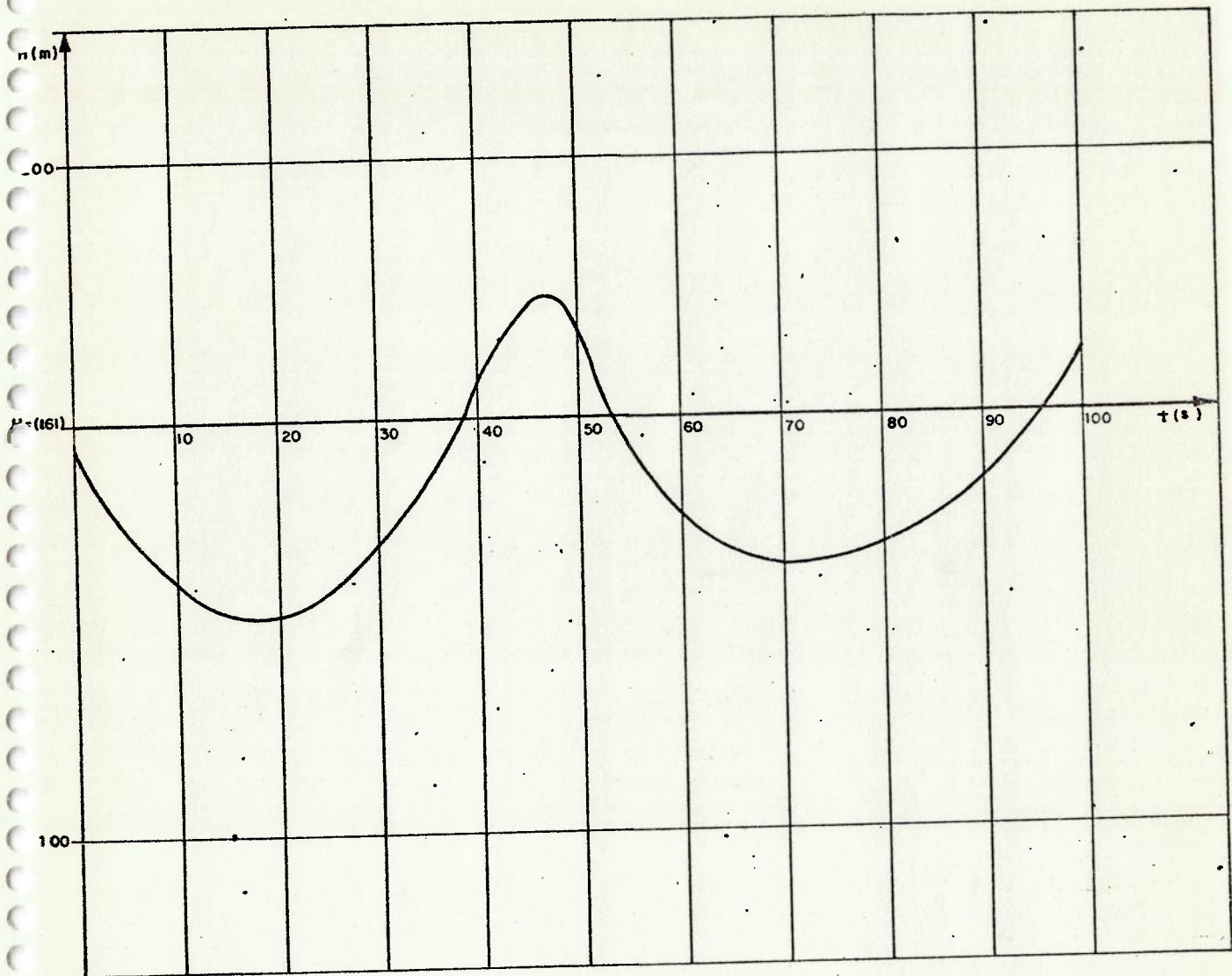


Figura 5.2 - Comportamento da Carga no meio da tubulação principal.

Repetindo o processamento do exemplo do Capítulo IV para diferentes volumes iniciais de ar observa-se o comportamento descrito na Figura 5.3.

A partir dos gráficos da Figura 5.3 pode-se construir a evolução das cargas piezométricas máximas e mínimas mostrada nas Figuras 5.4 e 5.5.



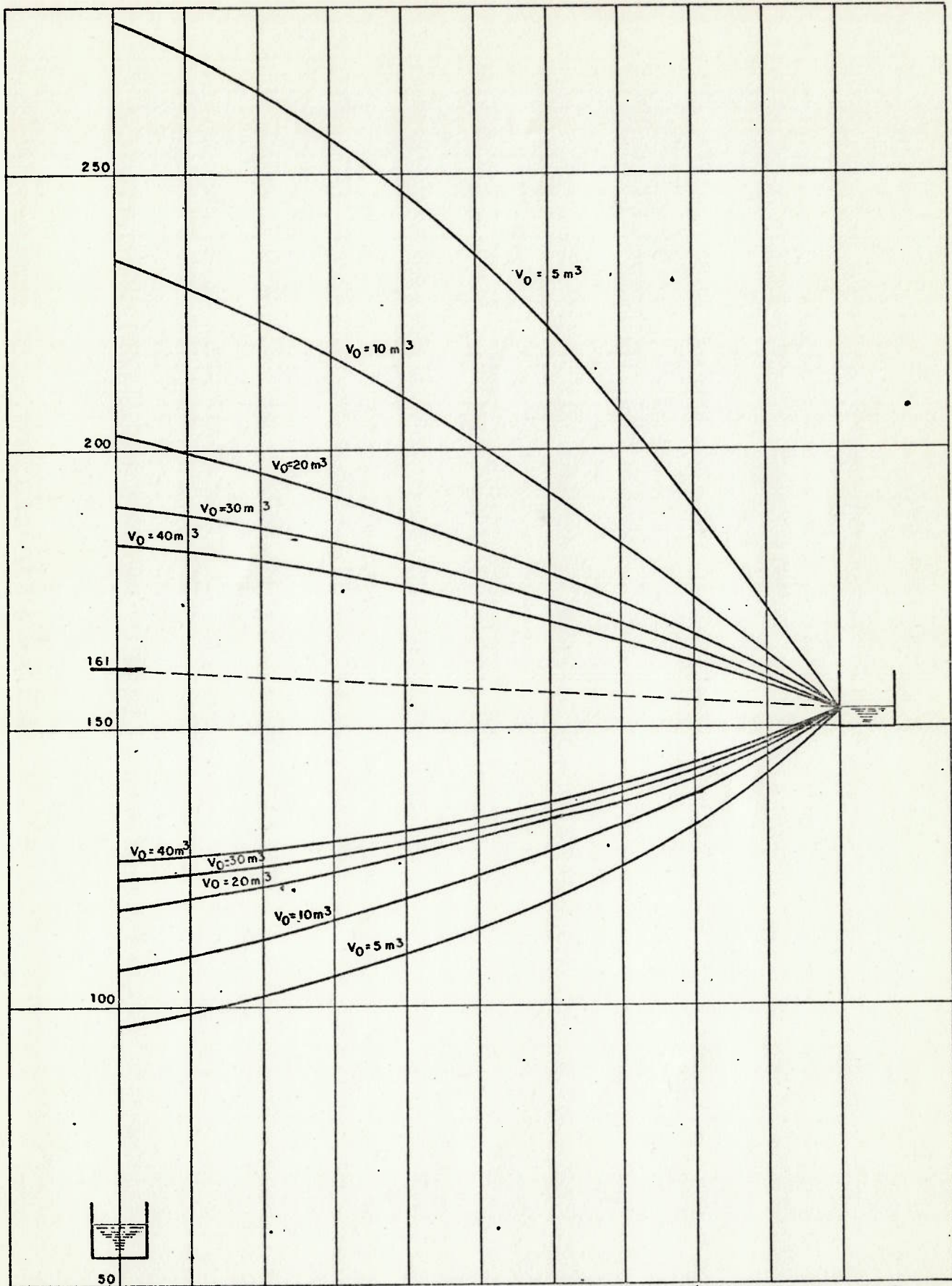


Figura 5.3 - Linhas piezométricas máximas e mínimas para diferentes volumes iniciais de ar no interior do RHO.

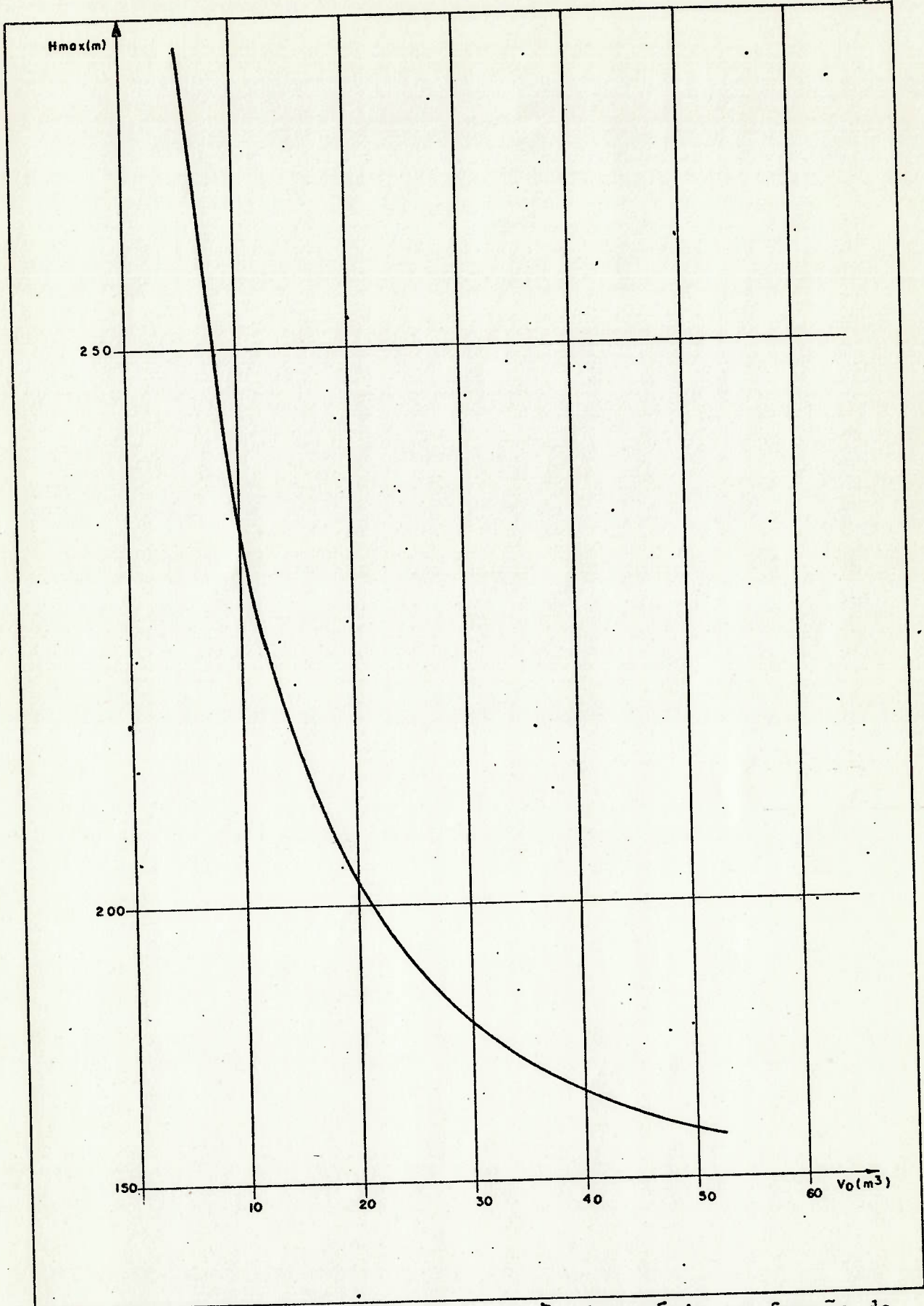


Figura 5.4 - Variação do  $H_{\max}$  junto à elevatória em função do volume inicial.



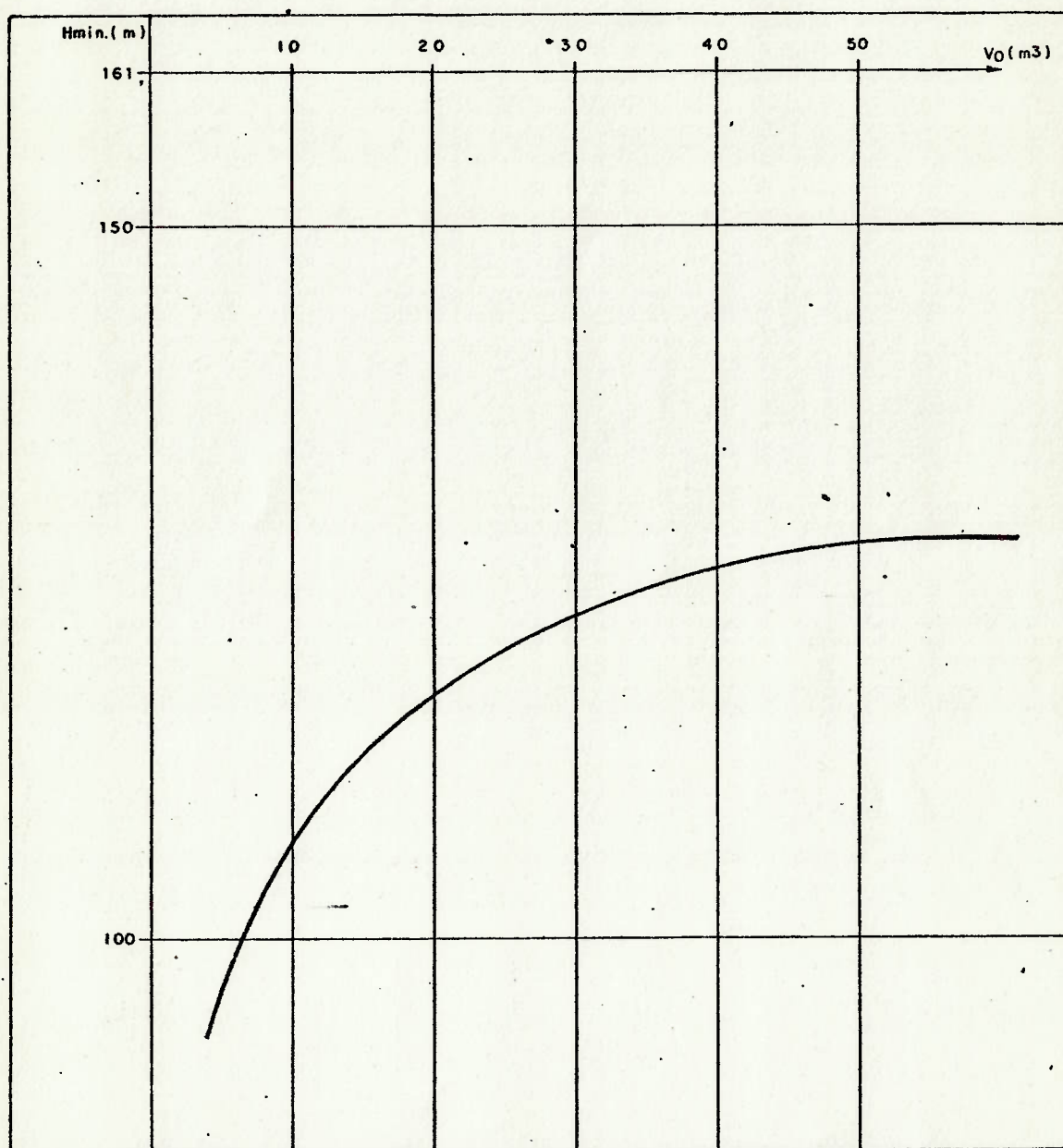


Figura 5.5 - Variação do  $H_{min}$  junto à elevatória em função do volume inicial.

O aumento do volume inicial de ar reduz sensivelmente a variação da carga piezométrica para os volumes pequenos, deixando de influir no processo de forma acentuada quando a curva tende para um valor aproximadamente constante.

No exemplo analisado, o volume inicial limite, que acarretou redução de oscilação sensível é aproximadamente  $20 \text{ m}^3$ . Tal valor representa 1,2 % do volume da linha.

Em instalações convencionais deve-se evitar de escolher volume inicial superior ao encontrado em termos percentuais conforme se observa nas Figuras 5.4 e 5.5.

Somente em casos extremos de controle de sub ou sobrepressão deverá ser escolhida alternativa de volumes superiores aos mencionados no parágrafo anterior.

O aumento do volume do RHO até o valor mencionado trará como consequência a redução do custo da tubulação principal e dos equipamentos bem como a variação das características do RHO, conforme descrito abaixo:

- o volume total aumenta levando a um diâmetro maior e consequente aumento da espessura da chapa, para resistir aos esforços sollicitantes.
- a oscilação de pressão diminui levando a uma redução da espessura da chapa para resistir os esforços sollicitantes.

Um estudo completo da otimização do volume do RHO em função das pressões geradas não é objetivo deste trabalho, pois implicaria, além dos parâmetros mencionados, no aparecimento de novas variáveis, tais como relação entre diâmetro e comprimento do vaso de pressão, geometria dos tampos, força provocada pelo vento, tamanho de chapas disponíveis no mercado, quantidade de vasos com iguais características e disponibilidade de equipamentos para uma dada pressão.



Para eliminar a influência das forças dos ventos pode-se instalar grandes RHO's na posição horizontal.

Quando um mesmo RHO for fabricado de modo repetitivo grande número de vezes, pode-se executar ferramentas de conformação para confecção dos mesmos na forma esférica, proporcionando grande economia motivada pela redução do peso do equipamento.

Outro fator de fundamental importância é o grau de industrialização do país. Nos Estados Unidos da América existem alguns fabricantes de RHO, que fornecem projetos hidráulicos, mecânico do vaso de pressão e de instrumentação, bem como instruções de operação e manutenção da unidade, de forma padronizada.

Para fabricação, montagem e operação do sistema analisado no Capítulo IV foi previsto, conforme Figura 5.6, o seguinte:

- Um RHO (V-301), com capacidade de  $50 \text{ m}^3$ , fabricado em chapa de aço, instalado sobre saia metálica, fixada ao piso por meio de chumbadores, com boca de visita no costado, 2 válvulas de segurança reguladas para abrir à pressão de 200 mca, equipado com válvula de saída de ar de emergência na parte inferior tipo ventosa, indicador de nível tipo tubular, eletrodos detectores de níveis para sinalização ótica e acústica dos níveis, tubulações de drenagem do RHO interligada ao sistema de drenagem da elevatória.

O RHO foi fabricado, em chapa de aço carbono ASTM - A285 Gr C, conforme normas ASME Section V e VIII; submetido a tratamento térmico de alívio de tensões e apresenta espessura de parede de 25,4 mm no costado e 12,7 mm nas extremidades, que são de forma semi-esférica. As soldas foram executadas por processos e soldadores qualificados conforme normas ASME - Section IX e o controle foi executado através de radiografia parcial no costado e total nas extremidades.

A pressão máxima de trabalho considerada foi  $1568 \text{ kN/m}^2$  e a de teste foi  $2646 \text{ kN/m}^2$  para uma pressão normal de operação de  $980 \text{ kN/m}^2$ .

- Dois compressores (C.201 e C.202) alternativos, duplo estágio, - com resfriamento a ar, montado sobre reservatório horizontal com - capacidade de 536 litros, acionados por motor elétrico de 5,5 kW, com um deslocamento efetivo de  $0,011 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $80,63 \text{ rd/s}$  e à pressão de trabalho de  $1235 \text{ kN/m}^2$ .

Dimensionado para serviço intermitente, tendo como função manter o nível de água no intervalo operacional no RHO.

A tubulação de descarga dos compressores interliga-se para alimentação do RHO, dispondo para cada compressor de um sistema de válvula de contorno e válvulas solenóide, VS-201 e VS-202, permitindo o bloqueio ou admissão de ar no RHO:

É prevista uma terceira válvula solenóide VS-203 com a função de - descarregar para atmosfera o excesso de ar do RHO.

- Sistema elétrico de alarme para controle de níveis.

O sistema é composto de 5 eletrodos detectores que através do contato físico com a superfície da água interna ao RHO, permitirão a sinalização ótica e sonora no quadro de comando e sinalização, bem como a atuação automática do sistema de injeção de ar comprimido.

Os eletrodos de nível são denominados a seguir LA 213, LA 214, LA 215, LA 216 sendo seus respectivos níveis 64,420 64,720 - 65,120 65,320 e um eletrodo comum de terra "E" no nível 62,720.

Para evitar eventual falsa manobra, decorrente da oscilação do nível, durante um transiente hidráulico, previu-se temporizadores - que só permitirão que seja dado o sinal sonoro e visual na persistência da situação.



O alarme sonoro será desativado, toda vez que atuar, através do silenciador no quadro de comando.

- Sistema automático de injeção de ar

O sistema compreende 3 válvulas solenóide, dois compressores de alta pressão interligados ao RHO e indicadores visuais de nível (LI - 202 e 203) para leitura direta do nível, abrangendo o campo de variação operacional.

O presente sistema prevê ainda os equipamentos de segurança para os seguintes eventos:

- a - proteção contra sinais oriundos das oscilações provenientes dos transientes hidráulicos (temporizadores).
- b - proteção contra sobrepressão de operação (válvulas de segurança PSV - 205/206).
- c - proteção contra entrada de ar na tubulação principal (ventosa - de expulsão de ar VQV - 204).

- Descrição funcional.

Supondo-se uma condição de equilíbrio inicial no interior do RHO, serão analisadas as várias condições que o sistema se propõe detectar e normalizar, de acordo com os esquemas propostos nas figuras 5.6 e 5.7.

Nesta condição, o nível de água está logo acima do nível baixo (H2) e admitindo-se que este se eleve por qualquer motivo e atinja o nível (H1), esta situação será detectada pelo eletrodo LA 215 que energizará o relé temporizado d 3(0-60") linha 12, que após seu ciclo, energizará o relé temporizado d 12(0-60') linha 26, que por sua vez atuará sobre o relé d 10, linha 22 que se auto-retém e introduz ar no tanque atuando sobre a válvula SV-201 ou SV-202.

Se o nível não foi restabelecido pela primeira introdução de ar e ocorra o tempo definido pelo relé d 12, este atuará sobre o relé -

d 11, linha 24, que por sua vez se auto-retém atuando a segunda válvula, SV-201 ou SV-202, introduzindo a reserva de ar no RHO, sinalizando sobre h 6, linha 47 e alarme na linha 34.

Com a introdução da reserva do ar, o nível deverá baixar; caso isto não aconteça por algum motivo, água atingirá o nível alto máximo (G1).

Esta situação será detectada pelo eletrodo LA 216 que energizará o relé temporizado d 6 (0-60"), que atuará o relé d 13 linha 27. Este por sua vez, sinaliza sobre h 8 linha 50 e alarme na linha 37, indicando que deve ser desligado de imediato a estação elevatória.

Se a primeira ou segunda injeção de ar no RHO for suficiente, e o nível de água baixar atingindo o nível baixo (H2), será detectado pelo eletrodo LA 214 que desenergizará o relé d 4 linha 14, que por sua vez, atua sobre o relé temporizado d 5 (0-60"). O relé d 5, depois de completar seu ciclo, atua sobre o relé temporizado d 14 (0-5 ') linha 28. Este por sua vez atuará sobre os relés d 10 e d 11 linhas 22 e 24, dando fim à introdução de ar e sinalizando h 3 na linha 42. Após seu ciclo, o relé d 14 atuará sobre o relé d 16 linha 38, que atua a válvula SV-203, linha 31, dando alívio de ar à atmosfera e sinalizando h 5 linha 45 e alarme linha 32.

Com o alívio de ar à atmosfera, o nível da água tende a subir, atingindo o nível H2, que será detectada pelo eletrodo LA 214, energizando o relé d 4 linha 14, atuante no relé d 5, que por sua vez, atua no relé d 14 linha 28. O relé d 14 desativa o relé d 16 e a volta à condição de equilíbrio inicial.

Se o nível continuar baixando, por algum motivo (por exemplo: defeito no bloqueio de uma das válvulas SV 201 e SV 202) e atingir o nível baixo mínimo (G2), será detectado pelo eletrodo LA 213 que atua o relé d 7 linha 19 desenergizando-o. Este ativa o relé temporizado d 8 (0-60") linha 20, que após seu ciclo atua o relé d 9 linha 21 e este, por sua vez, sinaliza h 7 linha 48 e atua o alarme linha 33 indicando que deverá ser desligado de imediato a estação elevatória.



Foi previsto no diagrama funcional do sistema, o botão 64 linha 54 para teste de lâmpadas e funcionamento alternado dos compressores, por uma chave comutadora, que atua sobre as válvulas SV-201 e SV-202. O silenciamento das buzinas BZ1 linha 32 e BZ2 linha 33 será efetuado pelo botão b3 linha 34.

Desse modo, qualquer oscilação do nível da água será constantemente detectado nos dois sentidos, de modo a prover condições de segurança quando ocorrer o transiente hidráulico.

Observa-se que os blocos temporizados somente completam seu ciclo se as condições detectadas permanecerem, voltando à sua condição de repouso se o sinal for transitório.

A simbologia referente ao controle operacional descrito neste capítulo é auto explicativa e diverge da adotada no resto do trabalho.

## CAPÍTULO VI - ANÁLISE TERMODINÂMICA

Para obter-se uma análise quantitativa da transferência de energia do ar para o líquido, é razoável tomar como base o comportamento termodinâmico da massa de ar, uma vez que, tem-se uma expansão e compressão de um gás, admitidas politrópicas neste trabalho.

Tomando o trabalho elementar do processo politrópico tem-se:

$$dW = (H_4 + H_B - Z) \cdot dV \quad (6.1)$$

Lembrando que

$$(H_4 + H_B - Z) \cdot V^n = C \quad (6.2)$$

Substituindo (6.2) em (6.1)

$$dW = C \frac{dV}{V^n} \quad (6.3)$$

Integrando a expressão (6.3), lembrando que a aproximação será válida, desde que se admita uma transformação quase estática com regime uniforme na massa de ar do RHO, obtêm-se:

$${}_1W_2 = \frac{C}{1-n} \left[ V_2^{1-n} - V_1^{1-n} \right] \quad (6.4)$$

Para uma aplicação, consideram-se os intervalos de tempo do processo mostrados na Figura 4.7.

Então a potência fornecida ao líquido será:



$$\frac{1^W_2}{\Delta t} = \frac{C}{\Delta t(1-n)} \left[ v_2^{1-n} - v_1^{1-n} \right] \quad (6.5)$$

Uma análise mais completa do fenômeno, que ocorre no interior do RHO, deve incluir a variação de temperatura, que é substancial.

O calor transferido, para o processo politrópico, é dado pela expressão:

$$\frac{dQ_T}{dt} = -p_4 \frac{(k-n)}{(k-1)} \frac{dV}{dt} \quad (6.6)$$

A dificuldade consiste em avaliar o mecanismo de transferência de calor, que inclui uma parcela de convecção natural, uma parcela de convecção forçada e uma parcela de calor latente quando a temperatura no interior do RHO excede as temperaturas de vaporização ou solidificação da água. Tendo em vista essa dificuldade, Graze, Schubert e Forrest | 18 |, | 25 | sugerem uma análise simplificada considerando somente a transferência de calor através da convecção natural dada por:

$$\frac{dQ_T}{dt} = AT \cdot 1,4 \cdot [\Delta T]^{1/3} \Delta T \quad (6.7)$$

Substituindo o valor de  $dQ_T/dt$  de (6.6) em (6.7) tem-se:

$$-p_4 \frac{(k-n)}{(k-1)} \frac{dV}{dt} = AT \cdot 1,4 \cdot [\Delta T]^{1/3} \Delta T \quad (6.8)$$

Passando do infinitésimo para as diferenças finitas

$$-p_4 \frac{(k-n)}{(k-1)} \frac{\Delta V}{\Delta t} = AT \cdot 1,4 \cdot [\Delta T]^{1/3} \cdot \Delta T \quad (6.9)$$

Fazendo:

$$p_{4M} = \frac{p_{41} + p_{42}}{2} \quad (6.10)$$

O valor de  $\Delta T$  fica

$$\Delta T = \left[ \frac{p_{4M}^{(k-n)}}{(k-1) \cdot AT \cdot 1,4} \frac{\Delta V}{\Delta t} \right]^{3/4} \quad (6.11)$$

Para o intervalo de tempo considerado, a temperatura encontrada deve ser compatível com a variação de temperatura para o processo politrópico:

$$\Delta T = T_1 \left[ \left( \frac{p_{42}}{p_{41}} \right)^{\left(1 - \frac{1}{n}\right)} - 1 \right] \quad (6.12)$$

Desta forma, podemos calcular a variação de temperatura da massa de ar e comparar os resultados da formulação politrópica com a troca de calor por convecção natural.

A tabela 6.1 apresenta a potência fornecida ao líquido pelo ar e a temperatura correspondente da massa de ar, para o expoente  $n$  constante e igual a 1,2. Os valores são os obtidos no exemplo analisado no Capítulo IV.



Tabela 6.1 - Potência Fornecida ao Líquido e Temperatura do Ar no Final do Intervalo.

Coluna 1 Intervalo de Tempo (s)	Coluna 2 Potência Forne- cida ao Líquido (kW)	Coluna 3 Variação de Tem- peratura do In- tervalo (conf. 6.11) ( $^{\circ}\text{K}$ )	Coluna 4 Variação de Temperatura do Intervalo (conf.6.12) ( $^{\circ}\text{K}$ )
0 - 2,488	790,646	896,26	5,71
4,976	779,137		
7,464	560,634		
9,952	422,242		
12,440	263,401		
14,928	155,379		
17,416	22,581		
19,904	- 75,763		
22,392	- 200,459		
24,880	- 293,354		

A coluna 2 da tabela 6.1 mostra, aproximadamente, a função do RHO, no que se refere à troca de energia ar-água. Durante a fase de expansão do ar, a potência é positiva, isto é, o ar fornece energia ao líquido e na fase de compressão a potência é negativa, com a água fornecendo energia ao ar.

Porém, para as colunas 3 e 4, a tabela 6.1 deixa de ter sentido - no primeiro intervalo mostrando que a transformação politrópica, com expoente  $n = 1,2$ , não representa o fenômeno térmico.

A variação de temperatura, calculada pela expressão (6.11), deveria ser compatível com aquela calculada através de (6.12).

Isto é, o calor trocado por convecção deveria coincidir com o calor do processo politrópico. Assim:

$$\left[ \frac{P_{4M}^{(k-n)}}{(k-1) \cdot AT:1,4} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \right]^{3/4} = T_1 \left[ \left( \frac{P_{42}}{P_{41}} \right)^{\left(1 - \frac{1}{n}\right)} - 1 \right] \quad (6.13)$$

Uma análise preliminar mostra que a diferença de temperatura encontrada na coluna 3 é substancialmente superior à da coluna 4. Então, pode-se prever que as temperaturas convergirão para uma única, quando  $n$  tender para  $k$ . A transformação inicial tenderá para uma adiabática.

Para encontrar-se um valor de  $n$ , correspondente ao início do processo termodinâmico, deve-se resolver a equação (6.13).

Fazendo a resolução da equação (6.13) por tentativas obtêm-se:

Valor de $n$	1º membro	2º membro
1,2	897	5,79
1,3	533	7,99
1,35	317	8,82
1,39	94	9,69
1,399	16	9,85
1,3995	10	9,86

Praticamente, no início do fenômeno, tem-se uma transformação adiabática.

De fato, ensaios feitos por Graze, Schubert, Forrest, | 18 | mostram que a relação entre a pressão do ar ( $p$ ) e o volume ( $V$ ), não pode ser descrita adequadamente pela equação politrópica,  $p \cdot V^n = C$ , onde  $n$  é um valor constante para uma instalação específica.

Betâmio de Almeida e Hipólito | 2 | calcularam os valores de  $n$ , que ocorrem durante o fenômeno, baseados em ensaios feitos por Pistilli | 26 | e encontraram valores variando desde 1,33 até 1,00.



Nos casos em que se deseja conhecer somente os valores extremos de volume e de pressão do fenômeno, como ocorre normalmente em instalações de bombeamento, pode-se utilizar:

- $n = 1,4$  para estabelecer a pressão mínima
- $n = 1,0$  para estabelecer o volume máximo.

Contudo, | 18 | a conduta acima muitas vezes leva a resultados antieconômicos, no que se refere ao volume máximo de ar e frequentemente leva a um falso coeficiente de segurança, pois a subpressão toma valores inferiores aos previstos.

Graze desenvolveu uma teoria a respeito do comportamento termodinâmico do RHO |18||25| |27| à qual chamou "Rational Heat Transfer" (RHT).

Nela o autor procura compatibilizar o comportamento do ar como gás perfeito ( $pV/T = \text{cte}$ ), com a transferência de calor, a fim de analisar o fenômeno de forma contínua e não mais simplesmente determinar os extremos.

Em ensaios observou-se que a temperatura no interior do RHO atinge valores inferiores à temperatura de solidificação da água, então, o calor latente não pode ser desprezado, porém o seu estudo é de natureza complexa e o autor não apresentou um equacionamento adequado para esta parcela de calor trocado.

A própria convecção natural proposta para uma análise simplificada, equação (6.7), representa o fenômeno de maneira aproximada.

Por exemplo, T.Yuge |28| propõe para vasos esféricos a expressão:

$$h_c = \frac{k_T}{D_e} \left[ 2 + 0,45 (Gr_{D_e} Pr)^{1/4} \right] \quad (6.14)$$

Portanto, o fato do RHO ter forma esférica ou cilíndrica, na posição vertical ou horizontal, implica em variação da quantidade de calor trocada por convecção natural.

O termo de transferência de calor será substancialmente alterado para sistemas onde o RHO está instalado ao tempo em local sujeito a ventos predominantes, através do mecanismo de convecção forçada. Pode-se considerar a influência sensível desse fenômeno, quando o adimensional

$$\frac{Gr}{Re^2} \quad (6.15)$$

toma valores baixos.

No caso de cilindros, horizontais e verticais [32], o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção forçada externa será

$$h_c = \frac{k_T}{D_r} (0,43 + 0,50 Re^{0,5}) Pr^{0,38} \quad p/ 1 < Re < 10^3 \quad (6.16)$$

$$h_c = \frac{k_T}{D_r} 0,25 Re^{0,6} Pr^{0,38} \quad p/ 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5 \quad (6.17)$$

Quando o RHO tiver forma esférica [33], a expressão (6.14), para convecção forçada, fica

$$h_c = \frac{k_T}{D_e} 0,37 (Re)^{0,6} \quad 17 < Re < 70000 \quad (6.18)$$

Nos valores levantados experimentalmente por Graze observa-se, confirmando a solução da expressão (6.13), que no início do processo, a transformação aproxima-se da adiabática, com  $n = 1,4$ .

Nos instantes seguintes o expoente  $n$  sofrerá variação desde 1,4 até 1,0.



A figura 6.1 mostra a variação do expoente da transformação politrópica em relação aos ensaios.

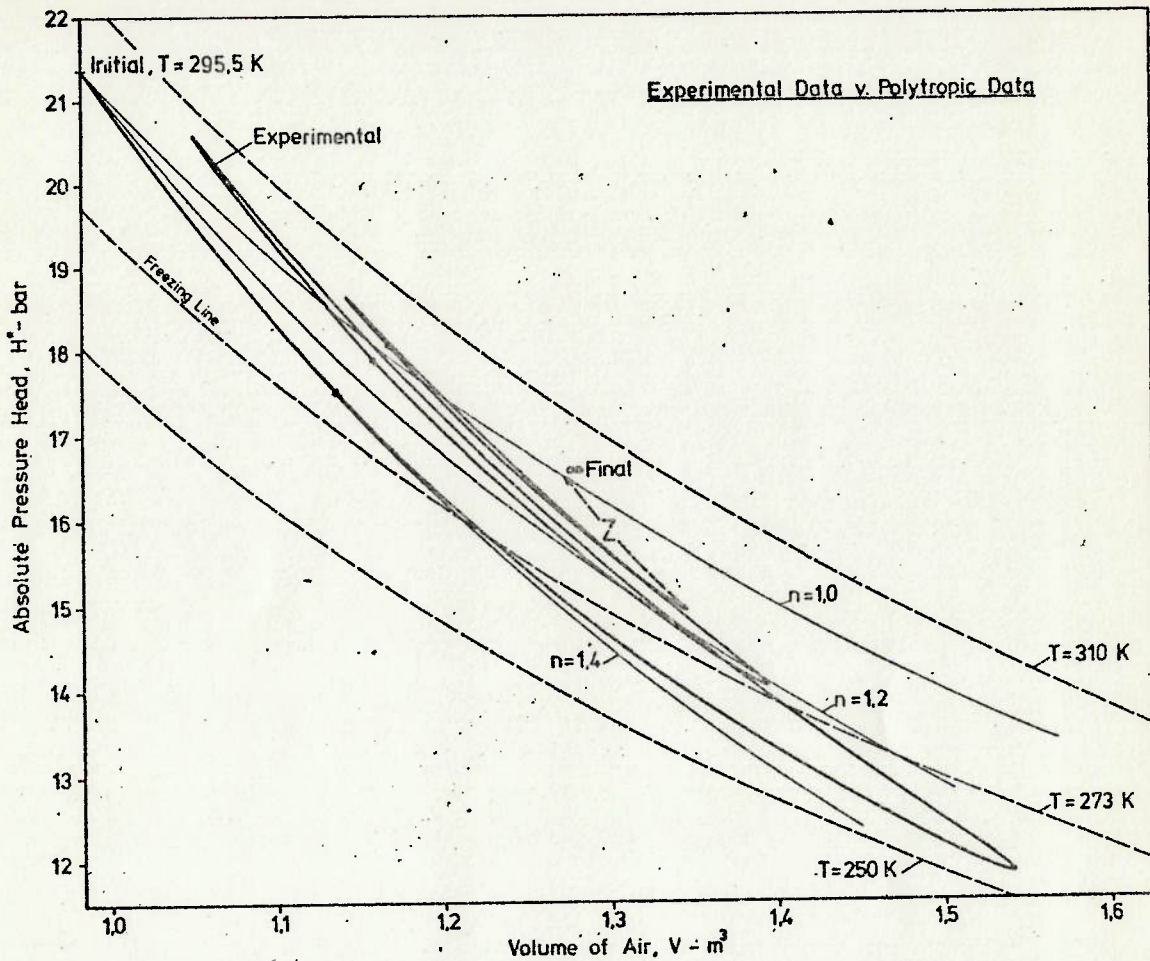


Figura 6.1 - Comparação entre a Transformação Politrópica e os Dados Experimentais (ref. 18).

Em substituição à transformação politrópica, equação (6.2), Graze deduziu a expressão:

$$\frac{d p_4}{dt} = - k \frac{p_4}{V} \frac{dV}{dt} - \frac{(k-1)}{V} \frac{d Q_T}{dt} \quad (6.19)$$

A expressão (6.19) baseada na "Rational Heat Transfer", quando comparada com os ensaios | 18 | também não representa os valores extremos, mas pode fornecer o comportamento do RHO nas situações intermediárias, aproximadamente.

Entretanto, o termo de troca de calor, envolvendo mudança de estado (líquido-sólido) continua acarretando complexidade substancial no equacionamento da RHT.

A análise baseada na teoria de Graze é feita assumindo apropriadamente o termo de transmissão de calor de (6.19), e combinando a mesma com as demais equações do escoamento, derivadas da equação da continuidade e da quantidade de movimento. A resolução do sistema poderá ser obtida utilizando-se o Método das Características.

A figura 6.2 apresenta o comportamento da RHT, em relação ao equacionamento politrópico, mostrando a variação do expoente  $n$  durante o cálculo.

Conclui-se que, a variação de temperatura do ar no RHO é bem representada pela RHT, porém, uma limitação importante diz respeito ao volume máximo que se distancia de forma apreciável, em relação à RHT.

Quanto à oscilação de pressão não se observa divergência apreciável.

O autor da RHT julga importante considerar o calor latente, para diminuir as divergências encontradas em relação aos ensaios de campo.

Finalmente conclui-se que, o estudo termodinâmico assume grande importância no caso de RHO para usinas hidrelétricas, onde a regulação das turbinas é fundamental, bem como, em sistemas convencionais de abastecimento de água, onde o controle é feito através de bombas de velocidade variável.



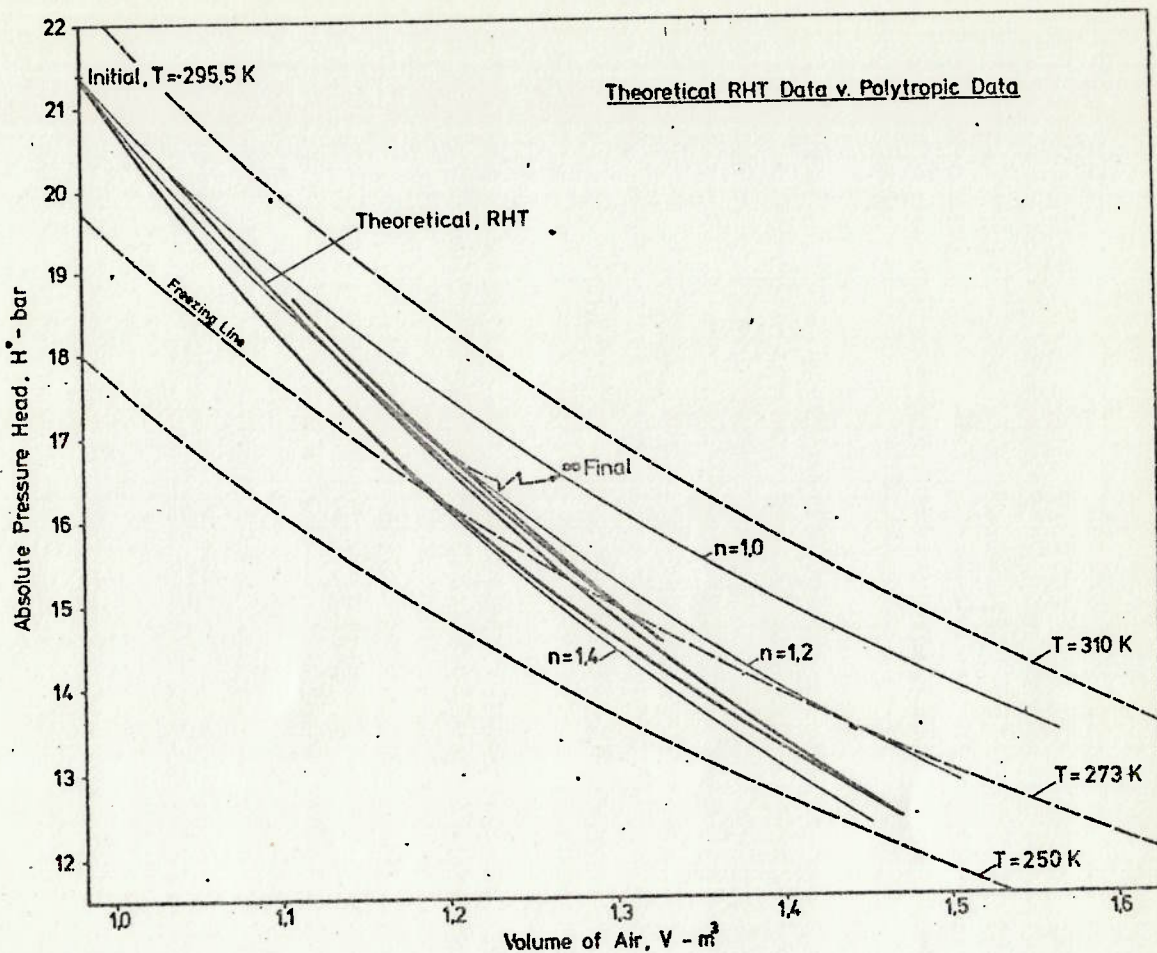


Figura 6.2 - Comparação entre a Transformação Politrópica e a "Rational Heat Transfer" (ref. 18).

Em substituição à expressão (6.19), pode-se equacionar o comportamento termodinâmico do RHO, considerando o ar, no seu interior como gás perfeito, com auxílio da relação

$$\frac{d Q_T}{dt} = \frac{d}{dt} (C_{p_T} T) - v \frac{d p_4}{dt} \quad (6.20)$$

e do método das características aplicado à tubulação principal. Monta-se um novo sistema de equações que rege a condição de contorno junto ao RHO. O calor trocado poderá ser representado, de forma simplificada, pelo termo de convecção natural dado por:

$$\frac{d Q_T}{dt} = 1,4 \cdot AT (\Delta T)^{1/3} \Delta T \quad (6.21)$$

As demais equações do sistema são

$$\frac{p_{4_0} v_0}{T_0} = \frac{p_4 v}{T} = C' \quad (6.22)$$

$$Q_{P_{1,NS}} = Q_{P_3} + Q_{P_{2,1}} \quad (6.23)$$

$$H_P - H_{P_4} = C_1 + C_2 Q_{P_3} \quad (6.24)$$

$$H_{P_{1,NS}} = C_{P_1} - B_1 Q_{P_{1,NS}} \quad (6.25)$$

$$H_{P_{2,1}} = C_{M_2} + B_2 Q_{P_{2,1}} \quad (6.26)$$

Substituindo (6.21) e (6.22) em (6.20):

$$1,4 \cdot AT \cdot \left( \frac{p_4 v}{C'} - T_0 \right)^{4/3} = \frac{d}{dt} \left( C_{P_T} \frac{p_4 v}{C'} \right) - v \frac{d p_4}{dt} \quad (6.27)$$

Rearranjando :

$$1,4 \cdot AT \cdot \frac{\left( \frac{p_4 v}{C'} - T_0 \right)^{4/3}}{p_4 v} dt = \frac{C_{P_T}}{C'} \frac{dv}{v} + \left[ \frac{C_{P_T}}{C'} - 1 \right] \frac{dp_4}{p_4} \quad (6.28)$$

Integrando para o intervalo de tempo, de tal modo que

$$\frac{\Delta x}{a} = \Delta t$$



mantendo

$$\frac{\left(\frac{p_4 V}{C'} - T_0\right)^{4/3}}{p_4 V} \quad (6.29)$$

e  $C_{P_T}$  constantes:

$$1,4 \cdot AT \frac{\left(\frac{p_{4_1} V_1}{C'} - T_0\right)^{4/3}}{p_{4_1} V_1} \Delta t = \frac{C_{P_T}}{C'} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} + \left[ \frac{C_{P_T}}{C'} - 1 \right] \int_{p_{4_1}}^{p_{4_2}} \frac{dp_4}{p_4} \quad (6.30)$$

Faz-se (6.29) constante durante o intervalo de tempo, pois desconhece-se a lei de variação da expressão com o tempo. O valor assumido é aquele correspondente ao início do intervalo considerado. Essa hipótese corresponde a uma aproximação de primeira ordem para (6.29); poderia também ser feita hipótese para aproximação de segunda ordem e tomar os valores de  $p_4$  e  $V$  médios em relação ao intervalo considerado.

A expressão (6.30) fica:

$$1,4 \cdot AT \frac{\left(\frac{p_{4_1} V_1}{C'} - T_0\right)^{4/3}}{p_{4_1} V_1} \Delta t = \frac{C_{P_T}}{C'} \ln \frac{V_2}{V_1} + \left[ \frac{C_{P_T}}{C'} - 1 \right] \ln \frac{p_{4_2}}{p_{4_1}} \quad (6.31)$$

Fazendo

$$p_{4_1} = (H_4 + H_B - Z) \gamma$$

$$p_{4_2} = (H_{P_4} + H_B - Z) \cdot \gamma$$

$$V_1 = V$$

$$V_2 = V_{(t+\Delta t)} = V - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t$$

Tem-se

$$1,4 \cdot AT \frac{\left[ \frac{\gamma(H_4 + H_B - Z)V}{C'} - T_0 \right]^{4/3}}{\gamma(H_4 + H_B - Z)V} \Delta t = \left( \frac{C_{PT}}{C'} \right) \ln \left[ \frac{V - \frac{Q_{P3} + Q_3}{2} \Delta t}{V} \right] +$$

$$+ \left( \frac{C_{PT}}{C'} - 1 \right) \ln \left[ \frac{(H_{P4} + H_B - Z)}{(H_4 + H_B - Z)} \right] \quad (6.32)$$

Lembrando que

$$H_{P4} = \frac{1}{B_1 + B_2} (B_2 C_{P1} - B_1 B_2 Q_{P3} + B_1 C_{M2}) - C_1 - C_2 Q_{P3}$$

e rearranjando o primeiro termo de (6.32) para permitir a discussão do sinal do calor trocado entre o RHO e o ar ambiente, tem-se

$$J_1 = 1,4 \cdot AT \frac{\left[ T_0 - \frac{\gamma(H_4 + H_B - Z)V}{C'} \right]^{1/3} \left| \left[ \frac{\gamma(H_4 + H_B - Z)V}{C'} - T_0 \right] \right|}{\gamma(H_4 + H_B - Z)V} \Delta t$$

$$J_2 = \frac{C_{PT}}{C'}$$

$$J_3 = \left( \frac{C_{PT}}{C'} - 1 \right)$$

A expressão (6.32) fica:



$$J_1 = J_2 \ln \left[ \frac{V - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t}{V} \right] + J_3 \ln \left[ \frac{(H_{P_4} + H_B - Z)}{(H_4 + H_B - Z)} \right] \quad (6.33)$$

Rearranjando:

$$e^{J_1} = \left[ \frac{2V - (Q_{P_3} + Q_3) \Delta t}{2V} \right]^{J_2} \cdot \left\{ \frac{\frac{1}{B_1 + B_2} (B_2 C_{P_1} - B_1 B_2 Q_{P_3} + B_1 C_{M_2}) +}{(H_4 +} \right. \\ \left. \frac{- C_1 - C_2 Q_{P_3}}{+ H_B - Z)} + H_B - Z \right\}^{J_3} \quad (6.34)$$

A expressão (6.34) é não linear em  $Q_{P_3}$ , portanto pode-se aplicar o método de Newton-Raphson para a sua resolução

$$F_1 = \left\{ \frac{2V - (Q_{P_3} + Q_3) \Delta t}{2V} \right\}^{J_2} \cdot \left\{ \frac{\frac{1}{B_1 + B_2} (B_2 C_{P_1} - B_1 B_2 Q_{P_3} + B_1 C_{M_2}) +}{(H_4 +} \right. \\ \left. \frac{- C_1 - C_2 Q_{P_3}}{+ H_B - Z)} + H_B - Z \right\}^{J_3} - e^{J_1} \quad (6.35)$$

$$\frac{dF_1}{dQ_{P_3}} = \left\{ \frac{2V - (Q_{P_3} + Q_3) \Delta t}{2V} \right\}^{J_2} \cdot J_3 \cdot \left\{ \frac{\frac{1}{B_1 + B_2} (B_2 C_{P_1} - B_1 B_2 Q_{P_3} + B_1 C_{M_2}) +}{(H_4 +} \right. \\ \left. \frac{- C_1 - C_2 Q_{P_3}}{+ H_B - Z)} + H_B - Z \right\}^{J_3 - 1} \cdot \left\{ \frac{- \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2} - C_2}{(H_4 + H_B - Z)} \right\} +$$

$$-\left\{ \frac{\left[ \frac{1}{B_1+B_2} (B_2 C_{P1} - B_1 B_2 Q_{P3} + B_1 C_{M2}) - C_1 - C_2 Q_{P3} \right] + H_B - Z}{(H_4 + H_B - Z)} \right\}^{J_3} \cdot J_2 \cdot \left\{ \frac{2V - (Q_{P3} + Q_3) \Delta t}{2V} \right\}^{J_2 - 1} \left( \frac{\Delta t}{2V} \right) \quad (6.36)$$

A complementação da resolução do sistema, após a determinação de  $Q_{P3}$ , é similar àquela efetuada no Capítulo III.

A variação de temperatura do ar no interior do RHO obedece a "lei dos gases perfeitos" dada por (6.22).

A figura 6.3 apresenta o diagrama p-V para as transformações conforme o modelo proposto através do sistema (6.20) a (6.26), a figura 6.4 apresenta a evolução em função do tempo da temperatura da massa de ar no interior do RHO e a figura 6.5 apresenta as linhas piezométricas para uma instalação com as mesmas características da analisada no Capítulo IV.

Em linguagem FORTRAN IV, o processo obedece ao programa do APÊNDICE B.

Fazendo a análise com aproximação de segunda ordem, a expressão (6.31) fica

$$1,4 \cdot AT \left\{ \frac{\left[ \frac{P_{41} + P_{42}}{2} \right] \cdot \left( \frac{V_1 + V_2}{2} \right)}{C'} - T_0 \right\}^{4/3} \Delta t =$$

$$= \frac{C_{PT}}{C'} \ln \frac{V_2}{V_1} + \left[ \frac{C_{PT}}{C'} - 1 \right] \ln \frac{P_{42}}{P_{41}} \quad (6.37)$$



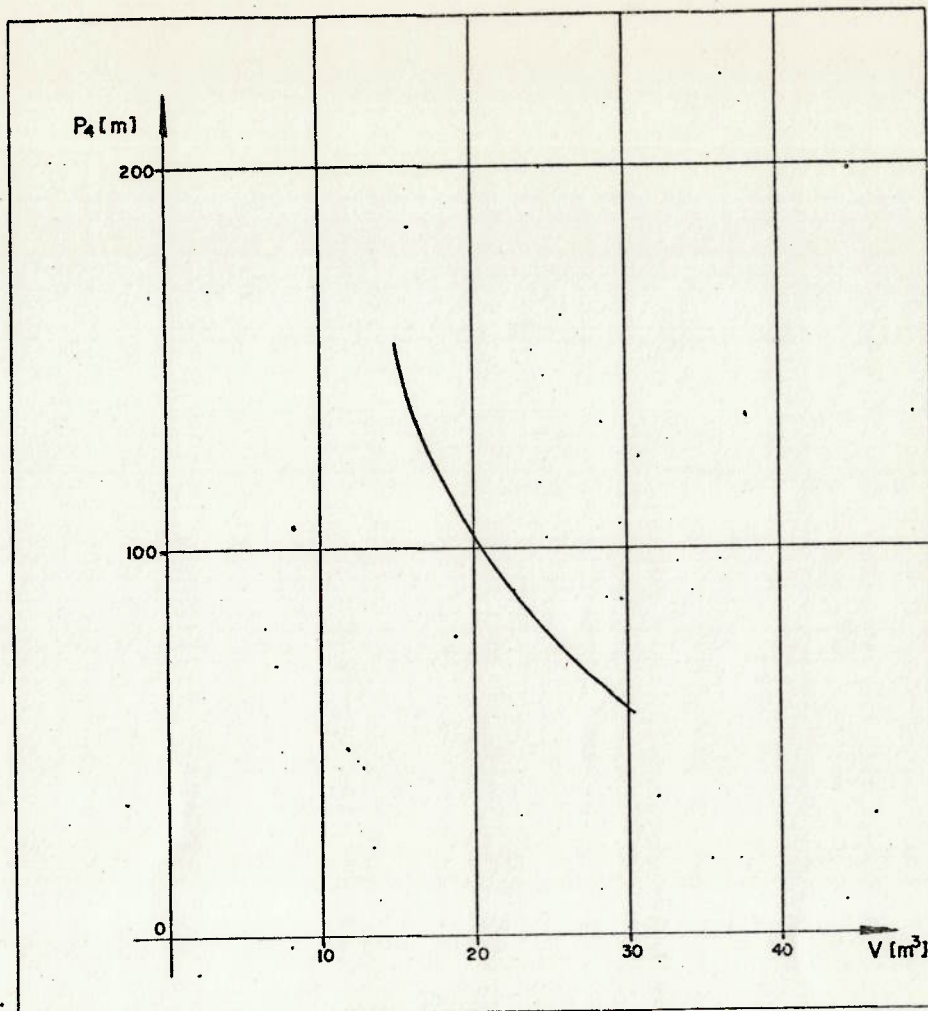


Figura 6.3 - Diagrama p-V para as transformações conforme modelo para Análise Termodinâmica do RHO.

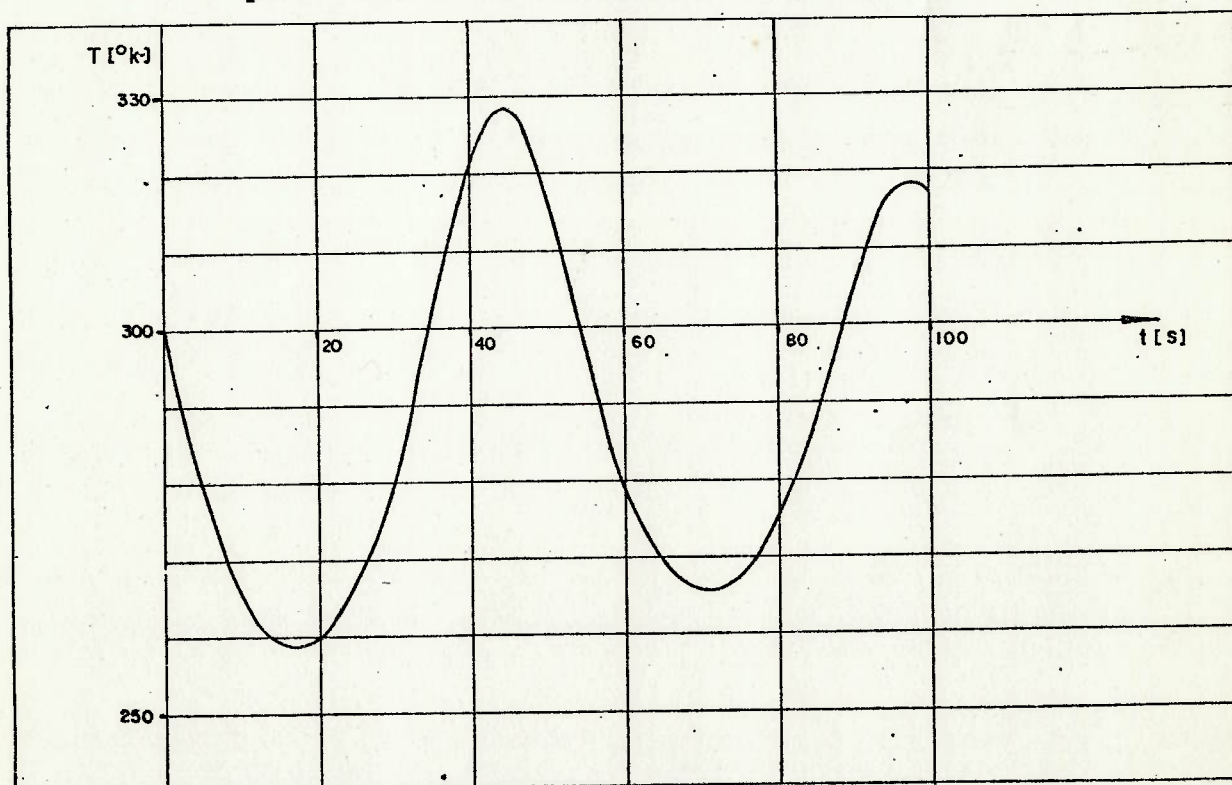


Figura 6.4 - Comportamento da temperatura do ar no RHO em função do tempo.

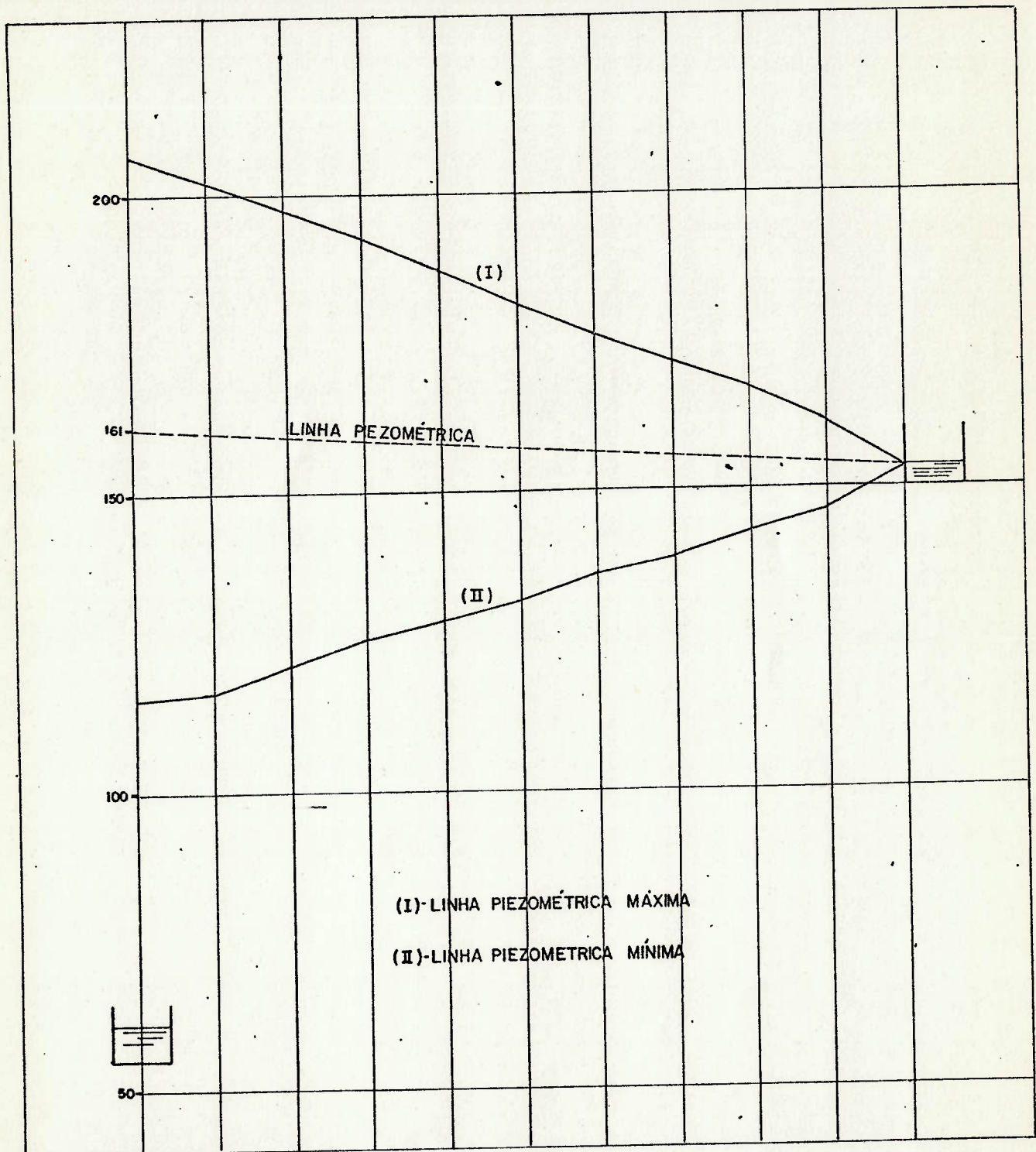


Figura 6.5 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para instalação do Capítulo IV através do modelo para Análise Termodinâmica.



Fazendo

$$\frac{P_{41} + P_{42}}{2} = \gamma \left[ \left( \frac{H_4 + H_{P4}}{2} \right) + H_B - Z \right]$$

$$\frac{V_1 + V_2}{2} = V - (Q_{P3} + Q_3) \frac{\Delta t}{4}$$

$$J'_{1=1,4} \cdot \Delta t \left\{ \frac{(J_{11})^{1/3} \cdot |J_{11}|}{\gamma \left[ \left( \frac{H_4 + H_{P4}}{2} \right) + H_B - Z \right] \cdot \left[ V - (Q_{P3} + Q_3) \frac{\Delta t}{4} \right]} \right\} \Delta t$$

$$J_{11} = T_0 - \frac{\gamma \left[ \left( \frac{H_4 + H_{P4}}{2} \right) + H_B - Z \right] \cdot \left[ V - (Q_{P3} + Q_3) \frac{\Delta t}{4} \right]}{C'}$$

$$J_{12} = \gamma \left[ \left( \frac{H_{P4} + H_4}{2} \right) + H_B - Z \right] \cdot \left[ V - (Q_{P3} + Q_3) \frac{\Delta t}{4} \right]$$

$$J_2 = \frac{C_{P,T}}{C'}$$

$$J_3 = \left( \frac{C_{P,T}}{C'} - 1 \right)$$

Tem-se uma expressão semelhante a (6.34) que também é não linear em  $Q_{P3}$ , portanto pode-se aplicar o método de Newton-Raphson para sua resolução. Toma-se como  $F_1$  expressão da forma (6.35) considerando somente o novo valor de  $J_1$ .

A expressão (6.36) fica acrescida do termo correspondente a deriva da de  $e^{J_1}$ , pois contém  $Q_{P_3}$ , ou seja

$$\frac{d}{dQ_{P_3}} \left[ e^{J_1} \right] = - e^{J_1} \frac{dJ_1}{dQ_{P_3}} \quad (6.38)$$

com

$$\frac{dJ_1}{dQ_{P_3}} = 1,4 \cdot AT \left\{ \frac{4}{3} \frac{(J_{11})^{1/3}}{J_{12}} \frac{dJ_{11}}{dQ_{P_3}} - \frac{(J_{11})^{1/3}}{(J_{12})} \frac{|J_{11}|}{|J_{12}|} \frac{dJ_{12}}{dQ_{P_3}} \right\} \Delta t$$

$$\frac{dJ_{11}}{dQ_{P_3}} = + \frac{\gamma}{C'} \left[ \left( \frac{H_4 + H_{P_4}}{2} \right) + H_B - Z \right] \frac{\Delta t}{4} + \frac{\gamma}{C'} \left[ v - (Q_{P_3} + Q_3) \frac{\Delta t}{4} \right]$$

$$\cdot \left[ \frac{B_1 B_2}{2(B_1 + B_2)} + \frac{C_2}{2} \right]$$

$$\frac{dJ_{12}}{dQ_{P_3}} = -\gamma \left[ \left( \frac{H_4 + H_{P_4}}{2} \right) + H_B - Z \right] \frac{\Delta t}{4} - \gamma \left[ v - (Q_{P_3} + Q_3) \frac{\Delta t}{4} \right]$$

$$\cdot \left[ \frac{B_1 B_2}{2(B_1 + B_2)} + \frac{C_2}{2} \right]$$

Pode-se assim montar a expressão correspondente a  $F_1$  e  $\frac{dF_1}{dQ_{P_3}}$  para aplicação do Método de Newton-Raphson na análise termodinâmica com aproximação de segunda ordem.



A figura 6.6 mostra as linhas piezométricas, com aproximação de segunda ordem, para uma instalação com as mesmas características daquela mostrada na figura 6.5.

Observa-se desvio da ordem de 0,4%. Desprezível portanto, não justificando o modelo matemático mais elaborado. Nota-se que o pequeno desvio deve-se, em parte, ao intervalo de tempo considerado no processamento do programa, proveniente de um alto número de divisões da tubulação principal.

Em linguagem FORTRAN IV, o processo obedece ao programa do APÊNDICE B.

Para uma análise da influência do termo correspondente ao calor trocado entre o RHO e o ar ambiente, vão ser considerados: instalação semelhante à do Capítulo IV, aproximação de primeira ordem e ventos predominantes.

Neste caso deve-se considerar as expressões (6.16) e (6.17), e será desprezada a troca de calor por convecção natural.

Numa análise do fenômeno físico, nota-se que, quando a temperatura do ar no interior do RHO se aproxima da temperatura ambiente, tem-se a troca predominante por convecção forçada e quando existe grande diferença de temperatura entre o ambiente e o RHO, a convecção natural passa a influenciar o fenômeno.

Para um vento predominante de 1,08 m/s tem-se:

$$Re = 1,997 \times 10^5$$

$$Pr = 0,708$$

admitindo-se o ar externo a 300 °K.

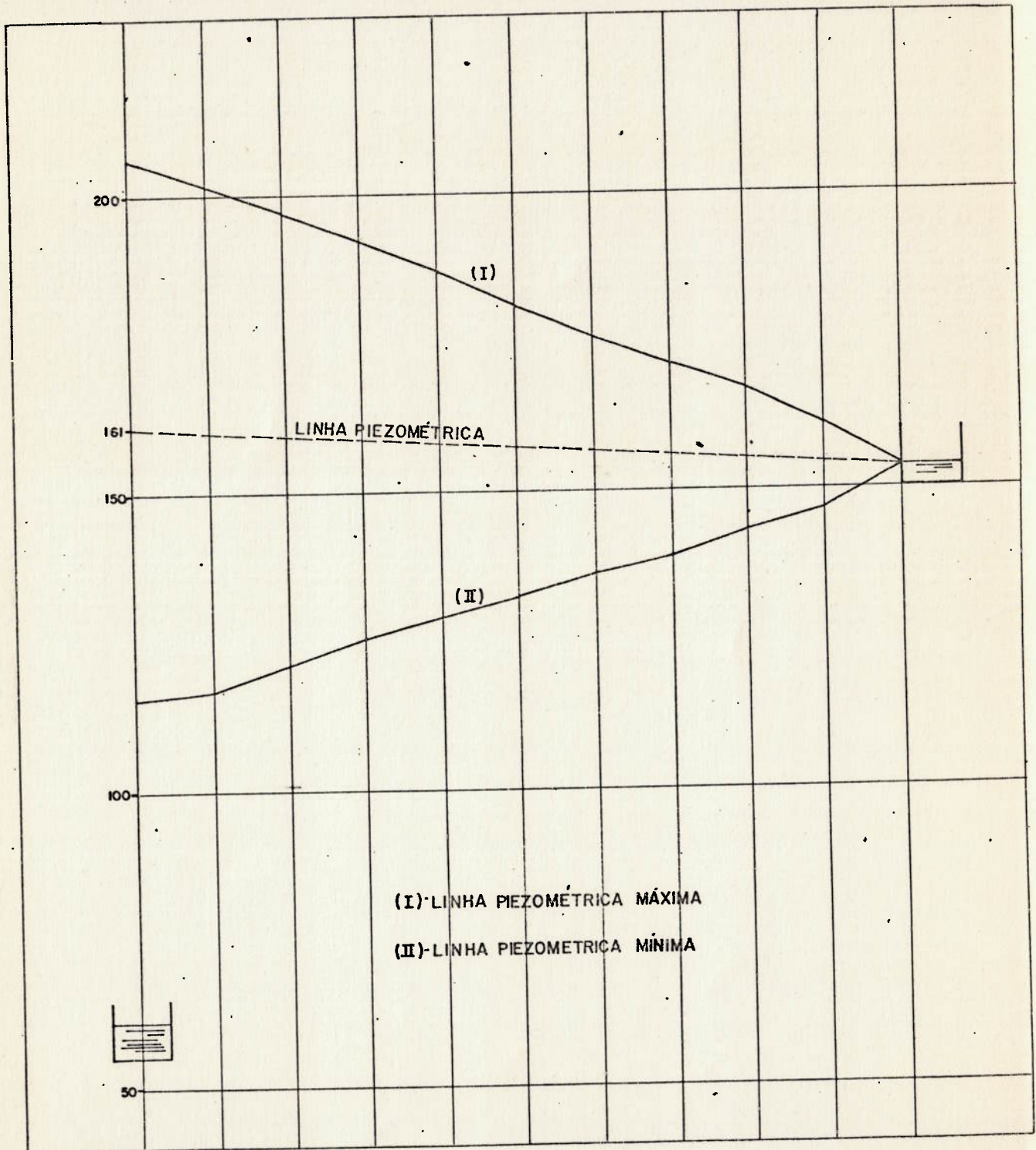


Figura 6.6 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima da Instalação do Capítulo IV, considerando aproximação de segunda ordem.



Deve-se, portanto, ser utilizada a expressão (6.17) que é recomendada para  $10^3 < Re < 2 \times 10^5$ . O termo correspondente à troca de calor fica

$$\frac{d Q_T}{dt} = \frac{k_T}{D_r} (0,43 + 0,50 Re^{0,5}) Pr^{0,38} \cdot \Delta T \cdot \Delta T \quad (6.39)$$

Substituindo os valores

$$\frac{d Q_T}{dt} = 64,843 \cdot \Delta T \quad (6.40)$$

Levando a expressão (6.40) em (6.34) tem-se

$$e J_1'' = \left[ \frac{2V - (Q_{P_3} + Q_3) \Delta t}{2V} \right]^{J_2} \cdot \left\{ \frac{\left[ \frac{1}{B_1 + B_2} (B_2 C_{P_1} - B_1 B_2 Q_{P_3} + B_1 C_{M_2}) + \right.}{(H_4 + \right.} \\ \left. \left. - C_1 - C_2 Q_{P_3} \right] + H_B - Z \quad J_3}{+ H_B - Z) \right\} \quad (6.41)$$

$$\text{Com } J_1'' = 64,843 \frac{\left[ \frac{\gamma (H_4 + H_B - Z) V}{C'} \right]}{\gamma (H_4 + H_B - Z) V} \Delta t$$

A expressão (6.41) é não linear em  $Q_{P_3}$ , portanto pode-se aplicar o método de Newton-Raphson para a sua resolução.

A função  $F_1$  é similar à expressão (6.35), porém com o termo  $J_1$  substituído por  $J_1''$ .

A função  $\frac{dF_1}{dQ_{P_3}}$  é similar a (6.36), não havendo qualquer variação.

As figuras 6.7; 6.8 apresentam respectivamente o diagrama p-V e a evolução da temperatura em função do tempo da massa de ar do RHO A figura 6.9 mostra as linhas piezométricas da instalação analisada.

Em linguagem FORTRAN IV, o processo obedece ao programa do APÊNDICE B.

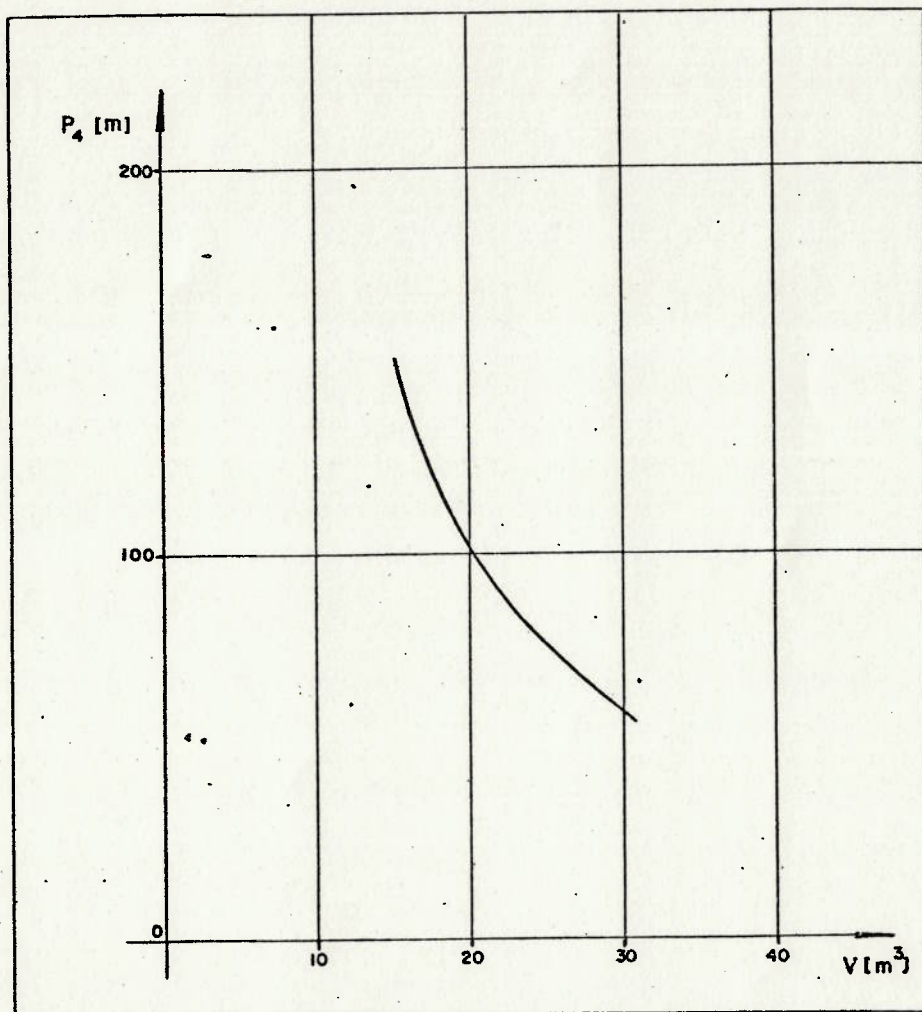


Figura 6.7 - Diagrama p-V para as transformações Admitida Convecção Forçada para o Ar Externo.



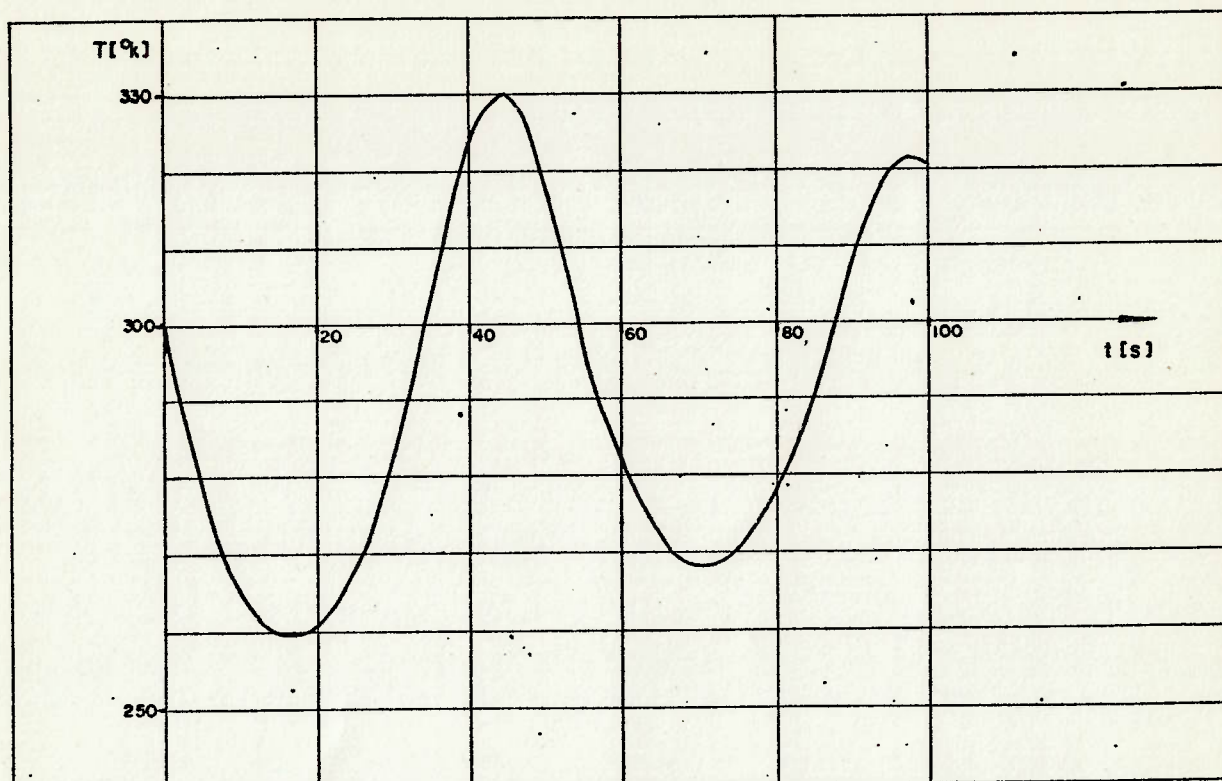


Figura 6.8 - Comportamento da temperatura do Ar no RHO em função do tempo.

A tabela 6.2 mostra o resultado do processamento, considerando a troca de calor por convecção natural e aproximação de primeira ordem para integração.

A tabela 6.3 mostra o resultado do processamento, considerando convecção natural, e aproximação da segunda ordem para integração.

A tabela 6.4 mostra o resultado do processamento, considerando a troca de calor por convecção forçada e aproximação de primeira ordem para integração.

A tabela 6.5 mostra os valores encontrados para as diferentes hipóteses adotadas representativas das transformações do ar no interior do RHO.

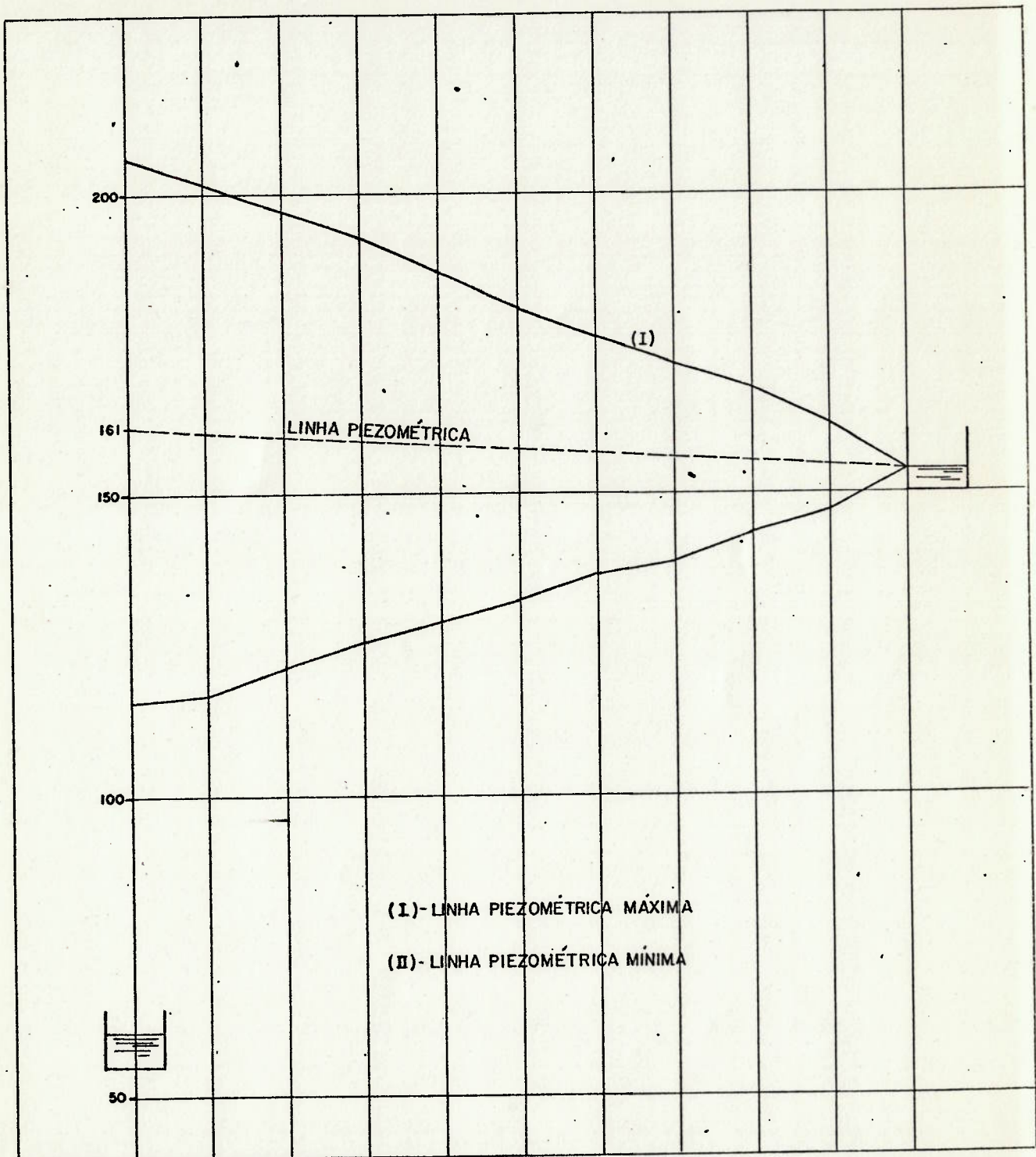


Figura 6.9 - Linha Piezométrica Máxima e Mínima da instalação do Capítulo IV, considerando a troca de calor através de Convecção Forçada.



Tabela 6.2 - Resultado do processamento, considerando troca de calor por convecção natural e aproximação de primeira ordem.

TEMP.	ALPHA	VOLUME AT(P3)	BCMSA (M)	TANQUE (M)	X/L	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0
M=CARGAS(M),P=PRESSOES(MCA),Q=VAZIOES(M3/S)																
0.600	1.000	20.000	M= 161.00	160.82	160.06	159.30	158.54	157.78	157.02	156.26	155.50	154.74	153.98	153.22	152.46	151.70
			P= 101.00	93.32	99.82	68.30	57.04	50.78	40.02	36.26	33.00	24.24	17.98	10.18	1.077	1.077
			Q= 1.077	0.000	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077
TEMP,KELVIN = 300.0000																
2.424	0.000	23.026	M= 147.39	148.24	147.91	148.73	149.63	151.28	152.63	152.74	151.08	150.00	151.01	153.40	151.01	153.40
			P= 87.39	80.74	86.91	57.23	54.80	49.78	45.63	35.74	31.08	19.50	13.01	0.00	1.057	1.076
			Q= 0.000	-1.000	1.002	1.009	1.019	1.032	1.045	1.050	1.044	1.047	1.057	1.076	1.057	1.076
TEMP,KELVIN = 289.9341																
4.976	0.000	24.425	M= 136.38	136.03	136.37	139.75	141.03	141.37	143.06	142.67	142.03	140.60	149.26	151.43	153.40	153.40
			P= 76.38	69.93	75.37	48.25	46.81	39.87	36.06	25.67	24.03	18.10	18.76	15.43	0.00	0.00
			Q= 0.000	-0.934	0.935	0.923	0.919	0.931	0.930	0.942	0.944	0.940	0.934	0.931	0.931	0.931
TEMP,KELVIN = 279.4677																
7.464	0.000	25.514	M= 131.55	128.15	129.30	132.22	134.01	135.84	132.81	143.30	143.77	144.95	144.61	149.39	153.40	153.40
			P= 71.55	60.65	68.30	40.72	39.07	34.34	31.81	24.30	23.77	22.45	16.11	13.39	0.00	0.00
			Q= 0.000	-0.764	0.758	0.764	0.761	0.765	0.772	0.779	0.781	0.779	0.780	0.780	0.780	0.780
TEMP,KELVIN = 271.3646																
9.552	0.000	26.127	M= 122.47	122.55	122.59	127.04	130.37	132.70	134.55	135.53	140.23	143.45	145.86	148.91	153.40	153.40
			P= 62.47	55.05	61.59	35.44	35.37	31.70	27.55	18.53	20.23	20.95	15.36	12.91	0.00	0.00
			Q= 0.000	-0.600	0.601	0.598	0.594	0.587	0.593	0.602	0.588	0.583	0.586	0.592	0.596	0.596
TEMP,KELVIN = 265.4271																
12.440	0.000	26.385	M= 115.83	118.96	118.02	122.47	127.43	130.58	133.45	137.86	140.48	141.54	145.00	148.33	153.40	153.40
			P= 55.83	51.48	57.02	31.37	32.48	29.08	26.45	20.86	20.48	19.04	14.50	13.33	0.00	0.00
			Q= 0.000	-0.360	0.375	0.374	0.377	0.378	0.361	0.393	0.393	0.383	0.387	0.397	0.407	0.407
TEMP,KELVIN = 261.3884																
14.524	0.000	30.068	M= 119.00	117.07	117.46	121.92	126.13	129.25	130.05	132.08	138.41	142.42	145.85	149.58	153.40	153.40
			P= 58.00	49.57	56.46	30.32	31.13	27.75	23.05	15.96	18.41	19.92	15.35	13.58	0.00	0.00
			Q= 0.000	-0.191	0.189	0.181	0.173	0.165	0.173	0.175	0.169	0.173	0.174	0.165	0.161	0.161
TEMP,KELVIN = 259.1006																
17.616	0.000	30.226	M= 117.07	116.61	117.21	120.13	123.81	128.75	131.87	137.17	140.69	140.78	144.33	149.16	153.40	153.40
			P= 57.07	49.11	56.21	28.63	28.81	27.25	24.87	20.17	20.69	18.28	13.83	13.16	0.00	0.00
			Q= 0.000	0.058	-0.055	-0.056	-0.041	-0.040	-0.049	-0.044	-0.042	-0.055	-0.047	-0.033	-0.026	-0.026
TEMP,KELVIN = 258.4453																
19.604	0.000	25.843	M= 116.35	117.59	117.39	120.91	125.41	130.71	131.14	134.46	138.60	140.75	145.90	150.49	153.40	153.40





Tabela 6.2 - Continuação

42.597	0.000	19.423	H = 202.53	203.33	203.05	197.50	193.95	189.34	185.50	180.39	173.98	167.86	163.00	158.50	153.40
			P = 142.53	135.83	142.05	106.70	98.95	87.84	78.50	63.39	53.58	45.36	32.50	22.50	0.00
			Q = 0.000	0.226	-0.233	-0.234	-0.231	-0.242	-0.239	-0.236	-0.244	-0.247	-0.242	-0.234	-0.232
			TEMP. KELVIN = 326.9799												
44.785	0.000	15.224	H = 205.31	205.25	205.45	200.19	195.87	190.76	185.11	179.05	174.18	169.07	162.90	159.32	153.40
			P = 145.31	139.35	144.43	108.49	100.87	89.26	78.11	62.05	54.18	46.57	32.40	23.32	0.00
			Q = 0.000	-0.073	0.079	0.077	0.069	0.063	0.067	0.079	0.077	0.067	0.068	0.065	0.064
			TEMP. KELVIN = 328.3569												
47.271	0.000	15.744	H = 193.97	199.23	199.06	193.84	191.36	187.22	181.69	177.20	171.39	166.87	162.86	158.55	153.40
			P = 139.97	131.73	139.06	102.14	96.16	85.72	74.69	60.20	51.39	44.37	32.36	22.55	0.00
			Q = 0.000	-0.340	0.335	0.340	0.349	0.360	0.368	0.372	0.361	0.364	0.377	0.386	0.387
			TEMP. KELVIN = 324.3560												
49.761	0.000	14.879	H = 164.19	186.69	185.54	182.14	160.15	174.00	174.12	168.81	165.80	162.02	159.07	157.18	153.40
			P = 124.19	119.99	124.54	90.44	85.16	76.50	67.12	51.81	45.80	39.52	28.57	21.18	0.00
			Q = 0.000	-0.572	0.569	0.579	0.584	0.582	0.583	0.596	0.600	0.604	0.600	0.594	0.598
			TEMP. KELVIN = 316.3738												
52.649	0.000	13.463	H = 174.42	171.76	172.51	169.44	168.07	167.06	165.17	163.74	159.98	157.48	156.57	155.66	153.40
			P = 114.42	104.28	111.51	78.14	73.07	65.96	58.17	46.74	39.98	34.98	26.07	19.66	0.00
			Q = 0.000	-0.695	0.695	0.696	0.701	0.719	0.727	0.732	0.728	0.735	0.744	0.746	0.744
			TEMP. KELVIN = 306.4465												
54.737	0.000	21.270	H = 160.31	159.27	158.91	157.13	157.11	157.91	157.13	154.17	154.03	153.85	154.10	154.26	153.40
			P = 100.31	93.77	97.91	63.43	62.11	56.41	50.13	37.37	34.03	31.35	23.60	18.26	0.00
			Q = 0.000	-0.753	0.754	0.761	0.763	0.764	0.767	0.776	0.778	0.780	0.773	0.776	0.787
			TEMP. KELVIN = 296.4890												
57.225	0.000	22.111	H = 145.67	147.13	146.58	147.99	148.52	150.25	150.85	151.01	149.83	149.71	151.89	153.48	153.40
			P = 85.87	79.63	85.58	56.39	53.52	48.75	43.85	34.01	29.43	27.21	21.39	17.48	0.00
			Q = 0.000	-0.728	0.723	0.726	0.725	0.741	0.743	0.745	0.742	0.745	0.753	0.761	0.764
			TEMP. KELVIN = 287.8850												
59.713	0.000	23.818	H = 159.25	139.57	138.79	139.79	141.63	143.99	145.43	145.34	146.41	147.92	150.69	151.11	153.40
			P = 79.25	71.07	77.79	48.29	46.63	42.49	38.43	28.34	26.41	25.42	20.19	15.11	0.00
			Q = 0.000	-0.679	0.657	0.661	0.651	0.668	0.651	0.663	0.666	0.669	0.661	0.660	0.663
			TEMP. KELVIN = 279.9511												
62.601	0.000	25.283	H = 133.29	132.29	132.58	135.58	136.30	139.13	141.12	142.60	144.26	146.63	149.19	151.24	153.40
			P = 73.29	64.79	71.58	44.08	41.30	37.63	34.12	25.80	24.26	24.13	18.69	15.74	0.00

0 = 0.000	-0.522	0.525	0.526	0.529	0.537	0.537	0.537	0.537	0.537	0.537	0.544	0.552	0.555	
TEMP.,KELVIN = 274.0032														
64.683	0.000	24.416	M = 125.42	127.98	127.44	130.27	133.26	136.43	139.28	140.79	142.32	144.76	148.09	153.40
			P = 65.42	60.48	64.44	38.77	38.26	34.93	32.28	23.79	22.32	22.26	18.19	0.00
			Q = 0.000	-0.389	0.391	0.392	0.399	0.397	0.387	0.360	0.369	0.392	0.369	0.392
TEMP.,KELVIN = 269.6648														
67.177	0.000	27.174	M = 124.28	125.31	124.68	128.39	130.69	134.91	137.84	138.85	140.81	144.60	148.33	153.40
			P = 64.28	57.61	63.68	36.99	35.63	33.41	30.84	21.85	20.81	22.10	17.83	0.00
			Q = 0.000	-0.207	0.216	0.219	0.222	0.226	0.226	0.224	0.224	0.229	0.235	0.233
TEMP.,KELVIN = 266.8396														
69.684	0.000	27.518	M = 125.68	124.14	124.70	127.26	129.75	133.07	136.55	139.40	140.96	143.55	147.99	153.40
			P = 65.68	55.64	63.70	35.78	34.75	31.57	29.55	22.40	20.96	21.05	17.49	0.00
			Q = 0.000	-0.062	0.060	0.042	0.063	0.054	0.047	0.052	0.058	0.056	0.053	0.044
TEMP.,KELVIN = 265.5083														
72.153	0.000	27.443	M = 125.04	124.35	124.74	126.99	129.85	134.13	137.37	138.64	140.90	143.93	147.68	153.40
			P = 65.04	56.85	63.74	35.59	34.85	32.43	30.37	21.64	20.90	21.43	17.18	0.00
			Q = 0.000	0.126	-0.127	-0.171	-0.120	-0.116	-0.112	-0.119	-0.128	-0.124	-0.112	-0.111
TEMP.,KELVIN = 265.6172														
74.641	0.000	25.944	M = 125.53	125.98	125.96	128.30	131.35	135.28	138.21	140.04	141.99	143.90	147.76	153.40
			P = 65.53	58.48	64.96	36.40	36.35	33.78	31.21	23.04	21.39	21.40	17.26	0.00
			Q = 0.000	0.277	-0.273	-0.275	-0.276	-0.247	-0.291	-0.285	-0.278	-0.288	-0.292	-0.296
TEMP.,KELVIN = 267.2030														
77.129	0.000	24.065	M = 130.38	129.07	129.63	131.79	134.08	137.37	139.02	140.47	142.78	145.53	148.98	153.40
			P = 70.36	61.57	68.63	40.29	39.98	35.87	32.02	23.87	22.78	23.03	18.48	0.00
			Q = 0.000	0.423	-0.433	-0.430	-0.431	-0.435	-0.430	-0.437	-0.440	-0.437	-0.429	-0.432
TEMP.,KELVIN = 270.2271														
79.617	0.000	24.851	M = 134.89	133.76	134.25	135.41	137.37	140.59	142.37	143.90	145.17	146.98	147.87	151.09
			P = 74.89	66.28	73.25	43.91	42.37	39.09	35.37	26.90	25.17	24.68	17.37	0.00
			Q = 0.000	0.533	-0.537	-0.539	-0.542	-0.550	-0.559	-0.561	-0.555	-0.559	-0.564	-0.565
TEMP.,KELVIN = 274.7208														
82.104	0.000	23.394	M = 140.51	140.22	140.17	141.04	144.35	148.00	149.94	146.47	147.44	148.48	150.74	153.40
			P = 80.51	72.72	79.17	49.54	48.35	43.38	38.94	29.47	27.44	25.98	20.24	0.00
			Q = 0.000	0.637	-0.630	-0.637	-0.636	-0.634	-0.635	-0.645	-0.646	-0.642	-0.639	-0.637
TEMP.,KELVIN = 280.5770														



84.591	C.000	21.728	M = 149.31	146.51	148.66	148.89	149.33	150.60	151.18	150.81	150.38	151.35	151.88	153.78	153.80	
			PM = 89.31	81.01	87.66	57.39	58.33	49.10	44.18	33.61	30.38	28.85	21.38	17.78	0.100	
			C = 0.000	0.650	-0.646	-0.655	-0.662	-0.671	-0.678	-0.685	-0.680	-0.680	-0.682	-0.691	-0.691	
			TEMP.,KELVIN = 267.6773													
87.681	C.000	25.172	M = 159.67	159.66	158.89	157.34	157.94	157.41	157.03	155.68	154.41	154.54	154.72	154.01	153.40	
			PM = 99.67	90.96	97.69	65.84	62.98	58.01	50.03	38.68	34.41	32.04	24.22	18.01	0.100	
			C = 0.000	0.632	-0.641	-0.647	-0.646	-0.640	-0.650	-0.670	-0.667	-0.663	-0.661	-0.660	-0.659	
			TEMP.,KELVIN = 295.6201													
89.569	C.000	18.674	M = 168.89	169.53	169.51	167.63	165.31	164.36	164.10	162.83	159.09	157.44	155.59	155.16	153.40	
			PM = 109.89	102.03	108.51	76.13	70.33	62.66	57.10	45.43	39.09	34.94	25.09	19.16	0.100	
			C = 0.000	0.553	-0.548	-0.556	-0.566	-0.575	-0.581	-0.586	-0.587	-0.586	-0.590	-0.597	-0.593	
			TEMP.,KELVIN = 323.8233													
92.657	C.000	17.451	M = 180.56	180.23	180.34	177.84	175.64	172.90	170.17	165.83	163.10	162.02	159.83	156.31	153.40	
			PM = 120.56	112.73	119.34	85.94	80.64	71.40	63.17	48.83	43.10	39.52	29.33	20.31	0.100	
			C = 0.000	0.420	-0.421	-0.433	-0.434	-0.434	-0.442	-0.447	-0.448	-0.447	-0.446	-0.444	-0.442	
			TEMP.,KELVIN = 311.1847													
96.545	C.000	14.623	M = 186.77	188.54	187.66	184.86	181.27	177.69	175.30	171.66	167.13	163.36	160.09	156.99	153.40	
			PM = 126.77	121.04	126.66	93.66	86.17	76.19	68.30	54.86	47.13	40.88	29.59	20.44	0.100	
			C = 0.000	0.225	-0.232	-0.233	-0.236	-0.246	-0.255	-0.257	-0.255	-0.253	-0.256	-0.263	-0.256	
			TEMP.,KELVIN = 316.5409													
97.633	C.000	14.293	M = 191.67	192.09	191.51	188.42	184.42	181.36	177.26	172.42	168.66	165.68	161.29	156.90	153.40	
			PM = 131.47	124.59	130.51	96.92	89.42	79.76	70.26	55.62	48.66	43.18	30.79	20.90	0.100	
			C = 0.000	0.023	-0.027	-0.031	-0.031	-0.027	-0.026	-0.029	-0.031	-0.032	-0.021	-0.023	-0.027	
			TEMP.,KELVIN = 318.7134													
99.529	C.000	14.493	M = 169.69	169.86	169.72	165.96	162.39	178.40	175.92	172.86	167.92	163.84	160.56	156.79	153.40	
			PM = 129.69	122.36	128.72	94.48	87.39	77.30	68.92	55.56	47.92	41.34	30.06	20.79	0.100	
			C = 0.000	-0.160	0.190	0.192	0.199	0.198	0.193	0.198	0.199	0.203	0.204	0.198	0.200	
			TEMP.,KELVIN = 317.2590													
			VOLUME	BCUBA	TANQUE	VALORES EXTREMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO										
			AR(M3)	(M)	X/L =	.0	.1	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0		
			MAX = 30.219	MMAX = 208.61	206.17	206.53	202.36	197.15	192.57	187.15	181.19	176.03	171.27	167.16	161.08	153.40
			MIN = 15.221	MMIN = 113.36	116.59	115.63	116.68	121.16	125.75	128.07	131.99	136.12	138.79	143.00	146.65	153.40
			MAX = 143.61	138.67	145.53	110.46	102.35	91.07	80.15	64.19	56.03	48.77	36.66	25.08	0.100	
			MIN = 53.359	25.825	54.027	25.154	26.156	23.752	21.869	14.992	16.118	16.289	12.504	10.653	-0.175	





P =	56.55	50.26	56.56	29.57	30.94	28.84	24.24	17.57	18.67	19.30	15.44	14.50	0.00			
Q =	0.000	0.248	-0.236	-0.246	-0.261	-0.264	-0.247	-0.249	-0.262	-0.258	-0.265	-0.266	-0.267			
TEMP.KELVIN = 260.3646																
M =	22.392	0.000	28.988	121.06	120.22	120.85	123.59	127.14	131.48	135.11	137.20	140.74	142.09	146.27	150.96	153.40
P =	61.06	52.72	59.85	32.09	32.14	29.95	28.11	20.20	20.74	19.59	15.77	14.96	0.00	0.00	0.00	0.00
Q =	0.000	0.446	-0.456	-0.458	-0.461	-0.459	-0.454	-0.453	-0.449	-0.404	-0.462	-0.451	-0.445			
TEMP.KELVIN = 263.1279																
M =	24.680	0.000	27.647	125.27	124.35	124.76	127.54	131.54	134.32	134.73	138.24	140.56	143.52	146.75	150.14	153.40
P =	65.27	54.85	63.76	36.04	36.54	32.82	27.73	21.24	20.56	21.02	16.25	14.14	0.00	0.00	0.00	0.00
Q =	0.000	0.506	-0.605	-0.608	-0.624	-0.634	-0.625	-0.629	-0.628	-0.637	-0.643	-0.643	-0.638			
TEMP.KELVIN = 267.5809																
M =	27.368	0.000	25.935	129.40	130.35	130.36	133.31	135.04	138.20	141.31	142.90	145.14	144.85	146.49	150.33	153.40
P =	69.40	62.85	69.36	41.81	40.34	36.70	34.31	25.90	25.14	22.35	15.99	14.33	0.00	0.00	0.00	0.00
Q =	0.000	0.753	-0.756	-0.743	-0.775	-0.767	-0.757	-0.762	-0.766	-0.779	-0.776	-0.762	-0.757			
TEMP.KELVIN = 273.7286																
M =	29.856	0.000	23.949	138.78	138.60	138.58	140.30	143.82	144.85	149.31	148.15	145.22	148.32	150.71	151.13	153.40
P =	78.78	71.10	77.58	49.00	48.82	43.35	36.31	27.15	25.22	25.82	20.21	15.13	0.00	0.00	0.00	0.00
Q =	0.000	0.827	-0.820	-0.831	-0.846	-0.854	-0.849	-0.854	-0.852	-0.862	-0.874	-0.870	-0.868			
TEMP.KELVIN = 281.5859																
M =	32.344	0.000	21.839	148.67	149.33	148.76	150.78	151.34	150.44	152.37	152.02	151.50	150.49	151.42	153.24	153.40
P =	88.67	81.83	87.76	39.28	39.28	36.94	35.37	35.02	31.50	27.99	20.92	17.24	0.00	0.00	0.00	0.00
Q =	0.000	0.852	-0.866	-0.869	-0.872	-0.880	-0.877	-0.887	-0.891	-0.893	-0.887	-0.890	-0.879			
TEMP.KELVIN = 290.9669																
M =	34.833	0.000	19.755	163.39	162.63	162.94	161.06	160.99	160.90	159.24	157.39	155.23	155.76	153.87	153.02	153.40
P =	103.39	95.13	101.94	69.56	69.99	59.40	52.24	40.39	35.23	33.26	23.37	17.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Q =	0.000	0.799	-0.794	-0.806	-0.824	-0.835	-0.837	-0.842	-0.843	-0.853	-0.852	-0.857	-0.864			
TEMP.KELVIN = 301.5257																
M =	37.321	0.000	17.893	178.53	177.65	177.77	175.73	173.20	170.17	169.54	166.73	162.27	159.41	158.14	156.80	153.40
P =	118.53	110.15	116.77	84.23	84.23	78.20	68.67	62.54	49.73	42.27	36.91	27.64	20.80	0.00	0.00	0.00
Q =	0.000	0.704	-0.694	-0.702	-0.706	-0.714	-0.710	-0.718	-0.724	-0.730	-0.726	-0.716	-0.713			
TEMP.KELVIN = 312.3188																
M =	39.809	0.000	16.431	191.35	192.31	191.84	187.71	184.90	181.75	177.34	171.52	167.00	164.86	161.27	157.00	153.40
P =	131.35	124.81	130.84	96.21	89.90	80.25	70.34	54.52	47.00	42.38	30.77	21.70	0.00	0.00	0.00	0.00
Q =	0.000	0.460	-0.469	-0.476	-0.494	-0.509	-0.513	-0.510	-0.516	-0.525	-0.527	-0.527	-0.527	-0.527	-0.527	-0.527
TEMP.KELVIN = 321.9251																

42.297	0.000	13.549	H = 201.93	202.73	202.45	195.96	193.46	188.91	185.13	180.07	173.32	167.87	162.87	158.43	153.40
			P = 141.93	135.23	141.45	103.46	98.46	87.41	78.13	63.67	53.32	45.17	32.37	22.43	0.00
			Q = 0.000	0.227	-0.234	-0.236	-0.233	-0.243	-0.221	-0.237	-0.245	-0.249	-0.244	-0.235	-0.234
			TEMP.KELVIN = 328.2909												
44.785	0.000	15.383	H = 204.83	205.37	204.95	195.95	195.16	170.41	184.81	178.80	173.08	168.02	162.79	159.27	153.40
			P = 144.83	137.87	143.95	108.45	100.48	88.91	77.81	61.80	53.98	46.42	32.59	23.27	0.00
			Q = 0.000	-0.068	0.075	0.073	0.055	0.058	0.062	0.075	0.072	0.062	0.063	0.060	0.059
			TEMP.KELVIN = 329.8442												
47.273	0.000	15.850	H = 198.77	199.02	198.86	193.66	191.20	187.08	181.56	177.09	171.30	166.01	162.82	158.54	153.40
			P = 138.77	131.52	137.86	102.16	94.20	85.58	74.56	60.09	51.30	44.21	32.32	22.54	0.00
			Q = 0.000	-0.334	0.329	0.333	0.343	0.354	0.361	0.365	0.354	0.357	0.370	0.380	0.380
			TEMP.KELVIN = 326.0715												
49.761	0.000	18.970	H = 164.27	164.50	165.62	162.22	160.27	178.07	174.18	168.85	165.83	162.05	159.09	157.19	153.40
			P = 124.27	119.06	124.62	90.72	83.27	76.57	67.18	51.85	45.83	39.53	26.59	21.19	0.00
			Q = 0.000	-0.566	0.563	0.573	0.577	0.575	0.576	0.590	0.594	0.597	0.593	0.587	0.591
			TEMP.KELVIN = 318.2938												
52.249	0.000	16.540	H = 174.71	172.06	172.79	169.90	168.30	167.27	165.35	163.89	160.10	157.57	156.63	155.69	153.40
			P = 114.71	104.56	111.79	78.40	73.30	65.77	58.35	46.09	40.10	35.07	26.13	19.69	0.00
			Q = 0.000	-0.690	0.690	0.691	0.699	0.714	0.722	0.727	0.723	0.730	0.739	0.741	0.738
			TEMP.KELVIN = 308.4906												
54.737	0.000	26.337	H = 160.68	158.64	159.28	157.66	157.44	158.17	157.36	154.56	154.18	153.96	154.18	154.30	153.40
			P = 100.68	91.14	98.28	66.16	62.44	56.67	50.36	37.56	34.18	31.46	23.88	18.30	0.00
			Q = 0.000	-0.750	0.751	0.758	0.760	0.761	0.764	0.773	0.775	0.777	0.770	0.773	0.764
			TEMP.KELVIN = 298.5686												
57.225	0.000	22.174	H = 146.26	147.53	146.97	148.25	148.84	150.53	151.09	151.21	149.58	149.82	151.97	153.52	153.40
			P = 86.26	80.03	85.97	56.75	53.84	49.03	44.09	34.21	29.58	27.32	21.47	17.52	0.00
			Q = 0.000	-0.727	0.722	0.725	0.725	0.741	0.743	0.744	0.741	0.745	0.753	0.761	0.763
			TEMP.KELVIN = 289.5848												
59.713	0.000	23.683	H = 139.65	138.96	139.18	140.14	141.92	144.27	145.67	145.54	146.56	146.03	150.77	151.15	153.40
			P = 79.65	71.46	78.18	48.64	46.92	42.77	38.67	28.54	26.56	25.53	20.27	15.15	0.00
			Q = 0.000	-0.661	0.659	0.662	0.656	0.649	0.653	0.664	0.668	0.671	0.662	0.661	0.665
			TEMP.KELVIN = 282.0802												
62.201	0.000	25.355	H = 133.67	132.67	132.96	135.92	136.60	139.39	141.35	142.08	144.41	146.74	149.26	151.28	153.40
			P = 73.67	65.17	71.96	44.42	41.60	37.89	34.35	25.98	24.41	24.24	18.76	15.28	0.00



Tabela 6.3 - Continuação

0°	0.000	-0.526	0.528	0.529	0.532	0.531	0.531	0.531	0.539	0.541	0.548	0.556	0.559	
	TEMP. KELVIN = 276.1757													
64.689	0.000	26.500	M = 126.77	129.33	127.60	130.59	131.54	136.68	139.49	140.97	142.46	144.07	148.76	153.40
			P = 66.77	60.83	66.80	39.09	38.54	35.18	32.49	23.97	22.46	22.37	18.26	14.18
			Q = 0.000	-0.395	0.397	0.398	0.396	-0.392	0.393	0.395	0.395	0.398	0.397	0.398
	TEMP. KELVIN = 271.8930													
67.177	0.000	27.275	M = 124.61	125.64	125.00	128.69	130.94	135.14	138.04	139.01	140.94	144.70	148.39	153.40
			P = 64.61	58.14	64.00	37.19	35.94	33.64	31.04	22.01	20.94	22.20	17.89	14.63
			Q = 0.000	-0.215	0.224	0.226	0.230	0.234	0.234	0.231	0.232	0.237	0.243	0.242
	TEMP. KELVIN = 269.1319													
69.685	0.000	27.640	M = 125.97	124.43	125.00	127.55	129.98	133.26	136.73	139.55	141.08	143.64	148.05	153.40
			P = 65.97	56.93	64.00	36.05	34.96	31.78	29.73	23.55	21.08	21.14	17.55	14.79
			Q = 0.000	-0.072	0.070	0.072	0.073	0.064	0.057	0.062	0.067	0.065	0.063	0.062
	TEMP. KELVIN = 267.8674													
72.153	0.000	27.890	M = 125.28	124.60	124.98	127.21	130.04	134.30	137.82	138.76	141.00	144.00	147.73	153.40
			P = 65.28	57.10	63.98	35.71	35.04	32.80	30.52	21.76	21.00	21.50	17.23	14.68
			Q = 0.000	0.115	-0.116	-0.110	-0.109	-0.107	-0.101	-0.100	-0.117	-0.113	-0.101	-0.099
	TEMP. KELVIN = 266.0389													
74.641	0.000	27.120	M = 125.71	126.16	126.14	128.46	131.50	135.42	138.33	140.14	141.46	143.96	147.79	153.40
			P = 65.71	58.66	65.14	36.96	36.50	33.92	31.33	23.14	21.46	21.46	17.29	14.88
			Q = 0.000	0.265	-0.261	-0.262	-0.264	-0.275	-0.279	-0.273	-0.266	-0.276	-0.280	-0.279
	TEMP. KELVIN = 269.6758													
77.129	0.000	26.272	M = 130.48	129.16	129.72	131.88	135.06	137.44	139.08	140.51	142.82	145.56	149.00	153.40
			P = 70.48	61.66	68.72	40.38	40.06	35.94	32.08	23.51	22.82	23.06	18.50	15.56
			Q = 0.000	0.410	-0.420	-0.416	-0.418	-0.422	-0.417	-0.425	-0.427	-0.424	-0.416	-0.419
	TEMP. KELVIN = 272.7321													
79.617	0.000	25.088	M = 134.86	133.75	134.22	135.38	137.34	140.57	142.36	143.89	145.16	146.98	147.86	153.40
			P = 74.86	66.25	73.22	43.88	41.34	39.07	35.36	26.89	25.16	24.48	17.36	15.09
			Q = 0.000	0.521	-0.524	-0.527	-0.530	-0.538	-0.507	-0.549	-0.543	-0.547	-0.551	-0.552
	TEMP. KELVIN = 277.2317													
82.105	0.000	23.660	M = 140.31	140.01	139.97	140.86	144.19	144.74	145.82	146.37	147.36	148.42	150.70	153.40
			P = 80.31	72.51	78.97	49.36	48.19	43.24	38.82	29.37	27.36	25.92	20.20	16.37
			Q = 0.000	0.626	-0.619	-0.626	-0.625	-0.623	-0.624	-0.634	-0.635	-0.631	-0.628	-0.627
	TEMP. KELVIN = 283.0612													

Tabela 6.3 - Continuação

84.593	0.000	22.078	M = 148.88	148.87	148.23	148.50	148.98	150.30	150.93	150.39	150.21	151.22	151.80	153.75	153.40		
			P = 88.88	80.57	87.23	57.00	53.98	48.80	43.93	33.39	30.21	28.72	21.30	17.75	0.00		
			Q = 0.000	0.642	-0.640	-0.646	-0.654	-0.662	-0.669	-0.676	-0.671	-0.671	-0.673	-0.682	-0.682		
			TEMP.KELVIN = 290.1000														
87.081	0.000	20.478	M = 158.96	157.74	159.16	156.69	157.41	157.01	156.01	155.92	154.12	154.38	154.59	153.94	153.40		
			P = 98.96	90.24	97.16	85.19	82.41	55.31	49.61	36.32	34.12	31.83	24.09	17.94	0.00		
			Q = 0.000	0.628	-0.636	-0.643	-0.641	-0.645	-0.653	-0.665	-0.662	-0.657	-0.656	-0.655	-0.654		
			TEMP.KELVIN = 297.9547														
89.569	0.000	18.985	M = 167.86	168.52	168.51	166.73	164.52	163.65	163.50	162.02	158.68	157.13	155.38	155.06	153.40		
			P = 107.88	101.02	107.51	75.23	69.52	62.15	56.50	45.02	38.68	34.83	24.88	19.06	0.00		
			Q = 0.000	0.553	-0.549	-0.557	-0.567	-0.575	-0.581	-0.586	-0.587	-0.586	-0.590	-0.590	-0.593		
			TEMP.KELVIN = 306.0754														
92.057	0.000	17.752	M = 179.37	179.04	179.16	176.37	174.68	172.06	169.44	165.22	162.61	161.66	159.59	156.19	153.40		
			P = 119.37	111.54	118.16	84.87	79.68	70.56	62.44	48.22	42.01	39.16	29.09	20.19	0.00		
			Q = 0.000	0.427	-0.428	-0.440	-0.440	-0.441	-0.449	-0.453	-0.455	-0.454	-0.453	-0.450	-0.448		
			TEMP.KELVIN = 313.4500														
94.545	0.000	16.896	M = 185.63	187.40	186.53	183.94	180.45	176.88	174.60	171.27	166.66	163.02	159.65	156.87	153.40		
			P = 125.83	119.90	125.53	92.44	85.45	75.38	67.60	54.27	46.66	40.52	29.35	20.87	0.00		
			Q = 0.000	0.238	-0.245	-0.246	-0.249	-0.259	-0.268	-0.271	-0.266	-0.267	-0.270	-0.274	-0.269		
			TEMP.KELVIN = 318.9905														
97.033	0.000	16.530	M = 190.71	191.32	190.75	187.73	184.30	180.81	176.79	172.22	168.34	165.45	161.14	156.82	153.40		
			P = 130.71	123.82	129.75	96.23	89.30	79.31	69.79	55.22	48.34	42.95	30.64	20.82	0.00		
			Q = 0.000	0.041	-0.045	-0.050	-0.046	-0.045	-0.048	-0.050	-0.051	-0.046	-0.040	-0.042	-0.047		
			TEMP.KELVIN = 321.4939														
99.522	0.000	16.681	M = 189.53	189.69	189.56	185.83	182.25	178.68	175.01	172.48	167.85	163.79	160.53	156.77	153.40		
			P = 129.53	122.19	128.56	94.33	87.23	77.18	68.81	53.48	47.85	41.29	30.03	20.77	0.00		
			Q = 0.000	-0.160	0.169	0.171	0.178	0.177	0.171	0.175	0.177	0.181	0.181	0.175	0.178		
			TEMP.KELVIN = 320.4611														
			VOLUME	BOMBA													
			AR(M3)	(M)	TANQUE	(M)	X/L = 0	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09	.10
			MAX = 30.231	MMAX = 208.06	205.64	205.97	201.96	197.00	192.21	186.85	180.93	175.81	171.10	167.05	161.02	153.40	
			MIN = 15.422	MMIN = 113.52	116.73	115.77	116.80	121.27	125.37	128.94	132.05	136.17	138.83	143.03	146.66	153.40	
			PHAX = 148.06	138.14	144.97	110.46	102.00	90.71	79.85	63.93	55.81	48.60	36.55	25.02	0.00		
			PHIN = 53.516	25.825	54.767	23.309	26.200	23.849	21.937	15.055	16.160	16.325	12.534	10.663	-0.175		



Tabela 6.4 - Resultado do processamento, considerando troca de calor por convecção forçada e aproximação de primeira ordem.

TEMP.	ALPHA	VOLUME	BOUSA	LANQUE	H=CARGAS(W)	P=PRESSOES(MCA)	Q=VAZDES(M3/S)	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0			
(M)	(M)	AR(M3)	(M)	(M)	X/L= .0															
0.000	0.000	20.000	M= 161.00	160.82	160.82	160.06	159.31	158.54	157.78	157.02	156.26	155.50	154.74	153.98	153.22	152.46	151.70	150.94		
			P= 31.00	43.32	99.82	68.56	64.31	57.04	50.78	40.02	30.26	33.00	24.24	17.98	-0.18	1.077	1.077	1.077	1.077	
			Q= 1.077	0.000	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	
			TEMP.KELVIN = 300.0000																	
2.488	0.000	22.026	M= 147.40	146.24	147.92	146.73	149.61	151.28	152.63	152.74	151.08	151.64	150.00	151.01	153.40	151.01	153.40	151.01	153.40	
			P= 87.40	80.74	86.82	57.23	54.81	49.78	45.63	35.74	31.08	29.14	19.50	15.01	0.00	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077
			Q= 0.000	-1.000	1.002	1.009	1.019	1.032	1.045	1.050	1.044	1.052	1.047	1.057	1.076	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077
			TEMP.KELVIN = 289.9543																	
4.976	0.000	24.425	M= 136.40	136.46	136.39	139.77	141.85	141.39	143.08	142.69	144.04	146.61	149.26	151.44	153.40	149.26	151.44	153.40	153.40	
			P= 76.40	68.96	75.39	48.27	46.83	39.89	36.08	25.69	24.04	24.11	18.76	15.44	0.00	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077
			Q= 0.000	-0.934	0.935	0.923	0.919	0.931	0.930	0.942	0.944	0.940	0.934	0.931	0.931	0.931	0.931	0.931	0.931	0.931
			TEMP.KELVIN = 279.5649																	
7.464	0.000	26.517	M= 131.60	128.21	129.36	132.27	134.11	135.87	138.84	143.33	143.79	144.67	146.62	149.39	153.40	146.62	149.39	153.40	153.40	
			P= 71.60	60.71	68.36	40.77	39.11	34.37	31.84	26.33	23.79	22.47	16.12	13.39	0.00	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077
			Q= 0.000	-0.764	0.759	0.764	0.761	0.766	0.773	0.789	0.782	0.780	0.781	0.788	0.804	0.781	0.788	0.788	0.804	0.804
			TEMP.KELVIN = 271.5828																	
9.952	0.000	28.189	M= 122.55	122.64	122.67	127.11	130.41	132.76	134.60	135.57	140.26	143.46	145.88	148.91	153.40	143.46	145.88	153.40	153.40	
			P= 62.55	55.14	61.67	35.61	35.44	31.26	27.60	18.57	20.22	20.98	15.38	12.91	0.00	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077
			Q= 0.000	-0.601	0.602	0.589	0.585	0.587	0.593	0.603	0.589	0.583	0.587	0.593	0.597	0.587	0.583	0.587	0.597	0.597
			TEMP.KELVIN = 265.7975																	
12.440	0.000	29.390	M= 115.95	119.09	118.14	122.98	127.57	130.66	133.52	137.92	140.52	141.57	145.02	149.34	153.40	145.02	149.34	153.40	153.40	
			P= 55.95	51.59	57.14	31.46	32.57	29.16	26.52	20.92	20.52	19.07	14.52	13.34	0.00	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077
			Q= 0.000	-0.362	0.377	0.375	0.379	0.379	0.382	0.394	0.394	0.384	0.388	0.398	0.408	0.388	0.398	0.408	0.408	0.408
			TEMP.KELVIN = 261.9324																	
14.928	0.000	30.077	M= 118.15	117.22	117.61	121.96	126.25	129.35	130.14	133.05	136.47	142.47	145.88	149.60	153.40	145.88	149.60	153.40	153.40	
			P= 58.15	49.72	50.61	30.46	31.25	27.85	23.14	16.05	18.47	19.97	15.38	13.60	0.00	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077
			Q= 0.000	-0.194	0.191	0.193	0.173	0.167	0.175	0.177	0.171	0.175	0.176	0.167	0.163	0.167	0.167	0.167	0.163	0.163
			TEMP.KELVIN = 259.8304																	
17.416	0.000	30.241	M= 117.24	116.79	117.39	120.29	123.95	128.07	131.57	137.26	140.76	140.83	144.36	149.18	153.40	144.36	149.18	153.40	153.40	
			P= 57.24	49.29	50.39	28.79	28.95	27.37	24.97	20.26	20.76	18.33	13.86	13.10	0.00	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077
			Q= 0.000	0.055	-0.052	-0.053	-0.045	-0.037	-0.046	-0.041	-0.039	-0.052	-0.044	-0.030	-0.023	-0.044	-0.030	-0.023	-0.023	-0.023
			TEMP.KELVIN = 259.3656																	
19.904	0.000	29.868	M= 116.59	117.60	117.59	121.10	125.97	130.36	131.26	134.58	138.68	140.61	145.94	150.51	153.40	145.94	150.51	153.40	153.40	

P = 56.59	50.30	56.59	29.60	30.97	26.86	24.26	17.58	18.68	18.31	15.44	14.51	0.00			
Q = 0.000	0.247	-0.236	-0.247	-0.260	-0.264	-0.246	-0.249	-0.261	-0.258	-0.264	-0.267	-0.266			
TEMP.KELVIN = 260.5439															
22.392	0.000	29.994	H = 121.10	120.26	120.66	123.63	127.17	131.51	135.13	137.22	140.76	142.10	146.27	150.96	153.40
P = 61.10	52.76	59.88	32.13	30.01	28.13	20.22	20.76	19.00	19.00	15.77	14.96	0.00			
Q = 0.000	0.445	-0.455	-0.457	-0.460	-0.458	-0.453	-0.453	-0.448	-0.454	-0.462	-0.450	-0.445			
TEMP.KELVIN = 263.3351															
24.680	0.000	27.655	H = 125.31	124.39	124.60	127.57	131.57	134.35	134.75	136.26	140.57	143.54	146.76	150.15	153.40
P = 65.31	56.69	63.80	36.07	34.57	32.85	27.75	21.26	20.57	21.04	16.26	14.15	0.00			
Q = 0.000	0.505	-0.604	-0.607	-0.623	-0.633	-0.624	-0.628	-0.627	-0.636	-0.644	-0.642	-0.637			
TEMP.KELVIN = 267.8202															
27.368	0.000	25.946	H = 129.44	130.39	130.40	133.34	135.07	138.23	141.33	142.91	145.14	144.86	146.49	150.33	153.40
P = 69.64	62.89	69.40	41.84	40.01	36.73	34.33	25.91	25.16	22.36	15.99	14.33	0.00			
Q = 0.000	0.751	-0.755	-0.762	-0.774	-0.746	-0.756	-0.761	-0.765	-0.778	-0.775	-0.761	-0.756			
TEMP.KELVIN = 273.9782															
29.856	0.000	23.963	H = 138.81	138.63	138.60	140.53	143.61	144.87	143.33	144.16	145.24	148.33	150.72	151.13	153.40
P = 78.21	71.13	77.60	49.03	48.81	43.37	36.33	27.16	25.24	25.83	20.22	15.13	0.00			
Q = 0.000	0.826	-0.819	-0.830	-0.847	-0.853	-0.848	-0.853	-0.851	-0.861	-0.872	-0.869	-0.867			
TEMP.KELVIN = 281.8456															
32.304	0.000	21.856	H = 148.68	149.34	148.77	150.79	151.31	150.45	152.38	152.03	151.51	150.49	151.42	153.24	153.40
P = 88.68	81.84	87.77	59.29	56.35	48.95	45.38	35.03	31.51	27.99	20.92	17.24	0.00			
Q = 0.000	0.850	-0.864	-0.868	-0.871	-0.878	-0.876	-0.886	-0.889	-0.891	-0.886	-0.878	-0.878			
TEMP.KELVIN = 291.2262															
34.633	0.000	19.775	H = 163.37	162.61	162.92	161.04	160.97	160.89	159.23	157.38	155.22	155.75	153.87	153.02	153.40
P = 103.37	95.11	101.62	69.54	65.97	59.39	52.23	40.38	35.22	32.25	23.37	17.02	0.00			
Q = 0.000	0.798	-0.792	-0.805	-0.823	-0.834	-0.836	-0.841	-0.841	-0.852	-0.850	-0.856	-0.862			
TEMP.KELVIN = 301.7724															
37.321	0.000	17.916	H = 178.47	177.59	177.70	175.07	173.14	170.12	169.50	166.70	162.25	159.39	158.13	156.79	153.40
P = 118.67	110.09	116.70	84.17	78.14	68.62	62.50	49.70	42.25	36.89	27.63	20.79	0.00			
Q = 0.000	0.703	-0.693	-0.701	-0.705	-0.713	-0.710	-0.713	-0.724	-0.729	-0.725	-0.715	-0.712			
TEMP.KELVIN = 312.5416															
39.800	0.000	16.454	H = 191.24	192.20	191.73	187.41	184.81	181.67	177.27	171.46	166.95	164.82	161.25	157.69	153.40
P = 131.24	124.70	130.73	96.11	89.81	80.17	70.27	54.46	46.95	42.32	30.75	21.69	0.00			
Q = 0.000	0.460	-0.469	-0.476	-0.494	-0.509	-0.512	-0.510	-0.517	-0.530	-0.525	-0.527	-0.533			
TEMP.KELVIN = 322.1181															



Tabela 6.4 - Continuação

42.297	0.000	15.572	H = 201.79	202.59	202.31	194.82	193.35	188.80	185.04	180.00	173.26	167.63	162.84	158.42	153.40
			P = 141.79	135.09	141.31	105.32	98.35	87.30	78.04	63.00	53.26	45.13	32.34	22.42	0.00
			Q = 0.000	0.227	-0.235	-0.236	-0.233	-0.244	-0.241	-0.237	-0.245	-0.249	-0.244	-0.236	-0.234
			TEMP. KELVIN = 328.4588												
44.785	0.000	15.364	H = 204.70	205.23	204.81	199.83	195.37	190.31	184.72	178.73	173.92	168.08	162.76	159.26	153.40
			P = 144.70	137.73	143.81	108.33	100.37	88.81	77.72	61.73	53.92	46.36	32.26	23.26	0.00
			Q = 0.000	-0.067	0.073	0.072	0.063	0.057	0.061	0.073	0.071	0.061	0.062	0.059	0.058
			TEMP. KELVIN = 330.0019												
47.273	0.000	15.867	H = 198.68	198.94	198.76	193.58	191.13	187.02	181.51	177.05	171.27	166.79	162.81	158.53	153.40
			P = 138.68	131.44	137.78	102.08	96.13	85.52	74.51	60.05	51.27	44.29	32.31	22.53	0.00
			Q = 0.000	-0.332	0.327	0.332	0.341	0.352	0.359	0.363	0.352	0.355	0.368	0.378	0.378
			TEMP. KELVIN = 326.2364												
49.761	0.000	16.982	H = 184.25	186.55	185.60	182.20	180.25	178.06	174.17	168.84	165.83	162.04	159.09	157.19	153.40
			P = 124.25	119.05	124.60	90.70	85.25	76.56	67.17	51.84	45.83	39.54	28.59	21.19	0.00
			Q = 0.000	-0.584	0.561	0.571	0.575	0.573	0.574	0.587	0.591	0.595	0.591	0.585	0.589
			TEMP. KELVIN = 318.4763												
52.249	0.000	18.546	H = 174.74	172.09	172.82	169.93	168.32	167.29	165.37	163.90	160.11	157.58	156.64	155.70	153.40
			P = 114.74	104.59	111.82	78.43	73.32	65.79	58.37	46.90	40.11	35.08	26.14	19.70	0.00
			Q = 0.000	-0.688	0.688	0.689	0.697	0.712	0.720	0.725	0.720	0.728	0.737	0.739	0.736
			TEMP. KELVIN = 308.6924												
54.737	0.000	20.341	H = 160.74	156.69	159.34	157.71	157.49	158.22	157.40	154.59	154.20	153.98	154.19	154.31	153.40
			P = 100.74	91.19	98.34	66.21	62.89	56.72	50.40	37.59	34.20	31.48	23.69	18.31	0.00
			Q = 0.000	-0.748	0.750	0.756	0.758	0.759	0.762	0.772	0.773	0.776	0.768	0.772	0.782
			TEMP. KELVIN = 298.7877												
57.225	0.000	22.173	H = 146.33	147.60	147.05	148.31	148.90	150.59	151.14	151.25	149.61	149.84	151.99	153.53	153.40
			P = 86.33	80.10	86.05	56.41	53.90	49.09	44.14	34.25	29.61	27.34	21.49	17.53	0.00
			Q = 0.000	-0.726	0.721	0.724	0.724	0.739	0.742	0.743	0.740	0.743	0.751	0.760	0.762
			TEMP. KELVIN = 289.8193												
59.713	0.000	23.880	H = 139.73	139.04	139.26	140.21	141.98	144.33	145.72	145.58	146.59	148.06	150.79	151.15	153.40
			P = 79.73	71.54	78.28	48.71	46.98	42.83	38.72	28.58	26.59	25.56	20.29	15.15	0.00
			Q = 0.000	-0.660	0.658	0.662	0.655	0.649	0.652	0.664	0.667	0.671	0.662	0.661	0.664
			TEMP. KELVIN = 282.3295												
62.201	0.000	25.351	H = 133.75	132.75	133.04	135.99	136.67	139.45	141.40	143.03	144.44	146.77	149.28	151.29	153.40
			P = 73.75	65.25	72.04	44.49	41.67	37.95	34.40	26.03	24.44	24.27	18.78	15.29	0.00

Tabela 6.4 - Continuação

0 = 0.000	-0.525	0.528	0.529	0.532	0.541	0.541	0.540	0.539	0.541	0.540	0.556	0.559			
TEMP, KELVIN = 276.4403															
64.669	0.000	26.496	H = 1.6.85	128.42	127.88	130.66	133.60	136.74	139.54	141.01	142.49	144.69	148.78	150.19	153.40
			P = 66.65	60.92	66.88	39.16	38.60	35.24	32.54	24.01	22.49	22.39	18.26	14.19	0.00
			Q = 0.000	-0.395	0.398	0.398	0.396	0.393	0.394	0.396	0.395	0.398	0.396	0.397	0.396
TEMP, KELVIN = 272.1737															
67.177	0.000	27.273	H = 124.66	125.72	125.08	128.76	131.01	135.20	138.09	139.05	140.97	144.73	148.41	150.83	153.40
			P = 64.68	58.22	64.08	37.26	36.01	33.78	31.09	22.05	20.97	22.23	17.91	14.83	0.00
			Q = 0.000	-0.216	0.225	0.227	0.230	0.234	0.234	0.232	0.233	0.237	0.244	0.243	0.241
TEMP, KELVIN = 269.4292															
69.665	0.000	27.640	H = 126.05	124.51	125.07	127.41	130.04	133.33	136.77	139.59	141.11	143.66	148.07	150.60	153.40
			P = 66.05	57.01	64.07	36.11	35.04	31.83	29.77	22.59	21.11	21.14	17.57	14.80	0.00
			Q = -0.000	-0.073	0.071	0.073	0.074	0.065	0.058	0.063	0.069	0.067	0.064	-0.064	0.055
TEMP, KELVIN = 266.1809															
72.153	0.000	27.594	H = 125.36	124.67	125.06	127.28	130.10	134.35	137.56	138.60	141.03	144.82	147.74	150.69	153.40
			P = 65.36	57.17	64.09	35.78	35.10	32.85	30.56	21.60	21.03	21.52	17.24	14.69	0.00
			Q = 0.000	0.113	-0.114	-0.108	-0.107	-0.105	-0.099	-0.107	-0.115	-0.111	-0.099	-0.097	-0.098
TEMP, KELVIN = 268.3671															
74.641	0.000	27.129	H = 125.77	124.23	124.20	128.42	131.55	135.46	138.37	140.17	141.99	143.97	147.81	150.69	153.40
			P = 65.77	58.73	65.20	37.02	36.55	33.96	31.37	23.17	21.49	21.47	17.31	14.89	0.00
			Q = 0.000	0.263	-0.259	-0.260	-0.262	-0.272	-0.277	-0.271	-0.263	-0.274	-0.276	-0.277	-0.282
TEMP, KELVIN = 270.0156															
77.129	0.000	26.286	H = 130.53	129.21	129.72	131.93	135.11	137.48	139.11	140.54	142.84	145.57	149.01	151.57	153.40
			P = 70.53	61.71	68.78	40.43	40.11	35.98	32.11	23.54	22.84	23.07	18.51	15.57	0.00
			Q = 0.000	0.408	-0.418	-0.416	-0.416	-0.420	-0.415	-0.422	-0.425	-0.422	-0.414	-0.415	-0.417
TEMP, KELVIN = 273.0792															
79.617	0.000	25.108	H = 134.90	133.78	134.26	135.41	137.37	140.60	142.38	143.91	145.18	146.99	147.86	151.09	153.40
			P = 74.50	66.28	73.26	43.01	42.37	39.10	35.38	26.91	25.18	24.49	17.36	15.09	0.00
			Q = 0.000	0.518	-0.522	-0.525	-0.527	-0.535	-0.544	-0.546	-0.540	-0.544	-0.549	-0.548	-0.550
TEMP, KELVIN = 277.5798															
82.105	0.000	23.686	H = 140.31	140.02	139.98	140.86	144.20	144.75	145.82	146.37	147.37	148.42	150.71	152.37	153.40
			P = 80.31	72.52	78.98	49.36	49.20	43.25	38.62	29.37	27.37	25.92	20.21	16.37	0.00
			Q = 0.000	0.624	-0.616	-0.623	-0.623	-0.620	-0.621	-0.631	-0.633	-0.628	-0.625	-0.625	-0.623
TEMP, KELVIN = 283.6024															



Tabela 6.4 - Continuação

84.593	0.000	22.110	H = 148.65	148.04	148.20	148.47	148.96	150.28	150.91	150.38	150.20	151.21	151.79	153.74	153.40	
			P = 88.85	80.54	87.20	56.07	53.96	48.78	43.91	33.38	30.20	28.71	21.89	17.74	0.00	
			Q = 0.000	0.644	-0.638	-0.644	-0.651	-0.660	-0.666	-0.674	-0.669	-0.669	-0.671	-0.679	-0.680	
			TEMP. KELVIN = 290.4254													
87.081	0.000	20.515	H = 158.88	157.66	158.10	156.62	157.35	156.96	156.56	155.28	154.09	154.30	154.87	153.94	153.40	
			P = 98.68	90.16	97.10	65.12	62.35	55.46	49.54	38.28	34.09	31.80	24.07	17.94	0.00	
			Q = 0.000	0.626	-0.635	-0.641	-0.639	-0.643	-0.651	-0.663	-0.660	-0.655	-0.654	-0.653	-0.652	
			TEMP. KELVIN = 298.2557													
89.569	0.000	19.026	H = 167.74	168.38	168.37	166.60	168.41	163.55	163.42	161.96	158.83	157.09	155.35	155.04	153.40	
			P = 107.74	100.88	107.37	75.10	69.41	62.05	56.42	44.96	38.63	34.59	24.65	19.04	0.00	
			Q = 0.000	0.552	-0.548	-0.556	-0.566	-0.574	-0.580	-0.585	-0.586	-0.584	-0.589	-0.596	-0.591	
			TEMP. KELVIN = 306.3468													
92.057	0.000	17.794	H = 179.18	178.85	178.97	176.20	178.53	171.93	169.33	165.12	162.53	161.60	159.55	156.17	153.40	
			P = 119.18	111.35	117.97	84.70	79.53	70.43	62.33	48.12	42.53	39.10	29.05	20.17	0.00	
			Q = 0.000	0.427	-0.428	-0.440	-0.440	-0.441	-0.449	-0.453	-0.458	-0.454	-0.453	-0.450	-0.448	
			TEMP. KELVIN = 313.7019													
94.545	0.000	16.939	H = 165.41	167.18	166.31	163.74	160.27	176.72	174.47	171.16	166.57	162.95	159.60	156.85	153.40	
			P = 125.41	119.68	125.31	92.424	85.27	75.22	67.47	54.16	46.57	40.85	29.30	20.85	0.00	
			Q = 0.000	0.239	-0.240	-0.247	-0.250	-0.260	-0.269	-0.272	-0.270	-0.268	-0.271	-0.278	-0.270	
			TEMP. KELVIN = 319.2196													
97.033	0.000	16.567	H = 190.51	191.13	190.55	187.55	184.14	180.67	176.66	172.12	168.26	165.39	161.10	156.80	153.40	
			P = 130.51	123.63	129.55	96.05	89.14	79.17	69.60	55.12	48.26	42.89	30.60	20.60	0.00	
			Q = 0.000	0.044	-0.047	-0.052	-0.048	-0.047	-0.051	-0.053	-0.054	-0.048	-0.043	-0.045	-0.049	
			TEMP. KELVIN = 321.7296													
99.522	0.000	14.711	H = 189.40	189.57	189.43	185.71	182.14	178.59	175.74	172.41	167.80	163.75	160.50	156.75	153.40	
			P = 129.40	122.67	128.43	94.21	87.14	77.09	68.74	55.41	47.80	41.25	30.00	20.75	0.00	
			Q = 0.000	-0.157	0.168	0.168	0.174	0.173	0.168	0.172	0.174	0.177	0.178	0.172	0.174	
			TEMP. KELVIN = 320.7258													
			VALORES EXTREMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO													
			VOLUME	BOVBA	TANQUE											
			ARCM3	(M)	(M)	X/L	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
			MAX = 30.293	P MAX = 207.91	205.50	205.83	201.84	198.89	192.12	186.76	180.87	175.75	171.05	167.02	161.01	153.40
			MIN = 15.344	P MIN = 113.55	116.76	115.79	116.93	121.29	123.39	128.95	132.07	136.19	138.83	143.04	146.66	153.40
			P MAX = 147.91	138.00	144.83	110.34	101.89	90.62	79.76	63.87	55.73	48.55	36.52	25.01	0.00	
			P MIN = 53.549	25.825	54.794	25.326	26.287	23.891	21.951	15.067	16.177	16.332	12.540	10.465	-0.175	

Tabela 6.5 - Quadro comparativo dos valores encontrados com as diferentes hipóteses, referentes à instalação analisada no Capítulo IV.

Item	Processamento feito			
	Transformação Politrópica (n=1,2)	Conforme		
		1º Princípio da Termodinâmica		
		Convecção Natural - aprox. de 1ª ordem.	Convecção Natural - aprox. de 2ª ordem.	Convecção Forçada - aprox. de 1ª ordem.
Sobrepresão máxima junto à bomba (mca efet)	143,74	148,61	148,06	147,91
Sobrepresão máxima no meio da linha (mca efet)	62,61	64,19	63,93	63,87
Subpressão mínima junto à bomba (mca efet)	55,21	53,36	53,51	53,55
Subpressão mínima no meio da linha (mca efet)	16,10	14,99	15,05	15,07
Volume máximo de ar no RHO (m <sup>3</sup> )	30,91	30,24	30,25	30,25
Volume mínimo de ar no RHO (m <sup>3</sup> )	15,14	15,20	15,32	15,34
Temperatura mínima do ar no RHO (°K)	-	258,44	259,22	259,36
Temperatura máxima do ar no RHO (°K)	-	328,35	329,84	330,00
Período da oscilação de massa (s)	58	54	54	54



## CAPÍTULO VII - A INFLUÊNCIA DO ORIFÍCIO DIFERENCIAL

Uma perda de carga acentuada junto ao RHO, quando o escoamento se dá desde a tubulação principal para o mesmo, provocará uma dissipação de energia cujo reflexo mais importante será uma redução - sensível na pressão máxima desenvolvida durante o transiente. Este fenômeno é decorrente do fato que o ar comprimido somente absorve parte da energia hidráulica do líquido, sendo uma parcela - sensível transformada em perda de carga.

Um estrangulamento na tubulação realizará essa função e poderá - ser constituído de:

- uma placa de orifício
- um elemento de tubulação provido de um estrangulamento tipo - "Orifício Diferencial"
- uma válvula de retenção com o obturador provido de pequeno orifício.

O elemento de tubulação provido de estrangulamento tipo "Orifício Diferencial" montado como mostra a Figura 7.1, teoricamente, permite obter uma perda de carga quatro vezes superior, considerando o coeficiente de contração do orifício como sendo 0,5 , quando a água está entrando no RHO |4| |6| |13|.

A válvula de retenção provida de um pequeno orifício no obturador permite um grande diferencial de perda de carga pois, no sentido RHO - tubulação principal, ela permite a passagem do líquido em - toda a secção da válvula aberta e, no sentido contrário, o escoamento se processará somente pelo pequeno orifício do obturador , conforme Figura 7.2.

Normalmente, os dispositivos de estrangulamento são dispostos na tubulação que liga o RHO à tubulação principal, que em nosso modelo matemático está representada por uma inércia concentrada. Eles são montados entre flanges para eventuais ajustes.

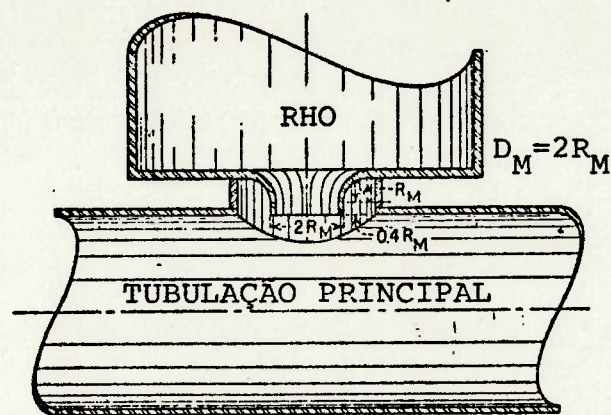


Figura 7.1 - Montagem do orifício de perda de carga diferencial tipo "Orifício Diferencial" [13].

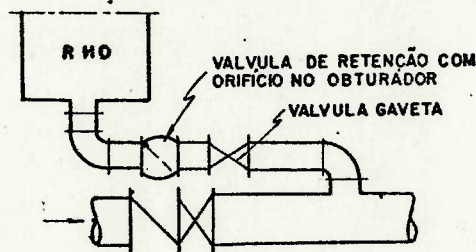


Figura 7.2 - Montagem da válvula de retenção com o obturador provido de um pequeno orifício.

No desenvolvimento que se segue, vamos considerar um elemento de estrangulamento composto de um tubo tipo "Orifício Diferencial" conforme mostram as Figuras 7.3 e 7.4, onde estão indicados o escoamento RHO-tubulação principal e o inverso respectivamente.



Será estimada uma velocidade  $V_{ES}$ , no estrangulamento de saída da água do RHO, em função da velocidade final  $V$  da água na tubulação principal, para o intervalo de tempo considerado. Será estimada, da mesma forma, a velocidade  $V_{3E}$  de entrada da água no RHO.

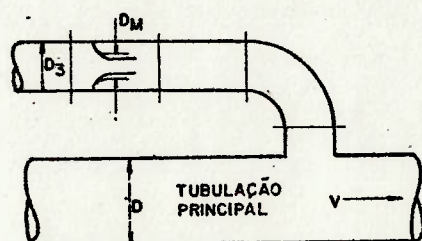


Figura 7.3 - Detalhe do estrangulamento - Sentido de Escoamento RHO - tubulação principal.

Na saída da água do RHO, considerando o orifício diferencial com um coeficiente de vazão da ordem de 0,92 | 4 |, a relação das velocidades  $V_{3S}/V$  é igual à relação do inverso dos quadrados dos diâmetros:

$$\frac{V_{3S}}{V} = \frac{D^2}{D_{MCS}^2} = \frac{D^2}{(0,92 \cdot E_M)^2} = K_A \quad (7.1)$$

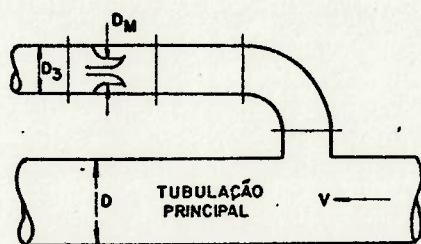


Figura 7.4 - Detalhe do estrangulamento - Sentido de Escoamento tubulação principal - RHO:

Para um bom desempenho do orifício diferencial deve-se encontrar - um valor de  $D_M$ , tal que  $K_A$  fique compreendido entre 15 e 20 | 4 |. A perda de carga  $\Delta H_{43}$  da água que está saindo do RHO é estimada - em função da relação  $M_S$ , entre as seções do escoamento contraído (diâmetro  $D_{MCS}$ ) e da tubulação de diâmetro  $D_3$ . Na Figura 7.5 determina-se o coeficiente  $C_L$ , conforme norma AFNOR-X-10-102, por - exemplo | 4 |.

Tem-se então:

$$\Delta H_{43} = \frac{V_M^2}{2g} C_L \quad (7.2)$$

No retorno da água para dentro do RHO, o orifício de estrangulamento funciona com um coeficiente de contração de 0,5 | 4 |.



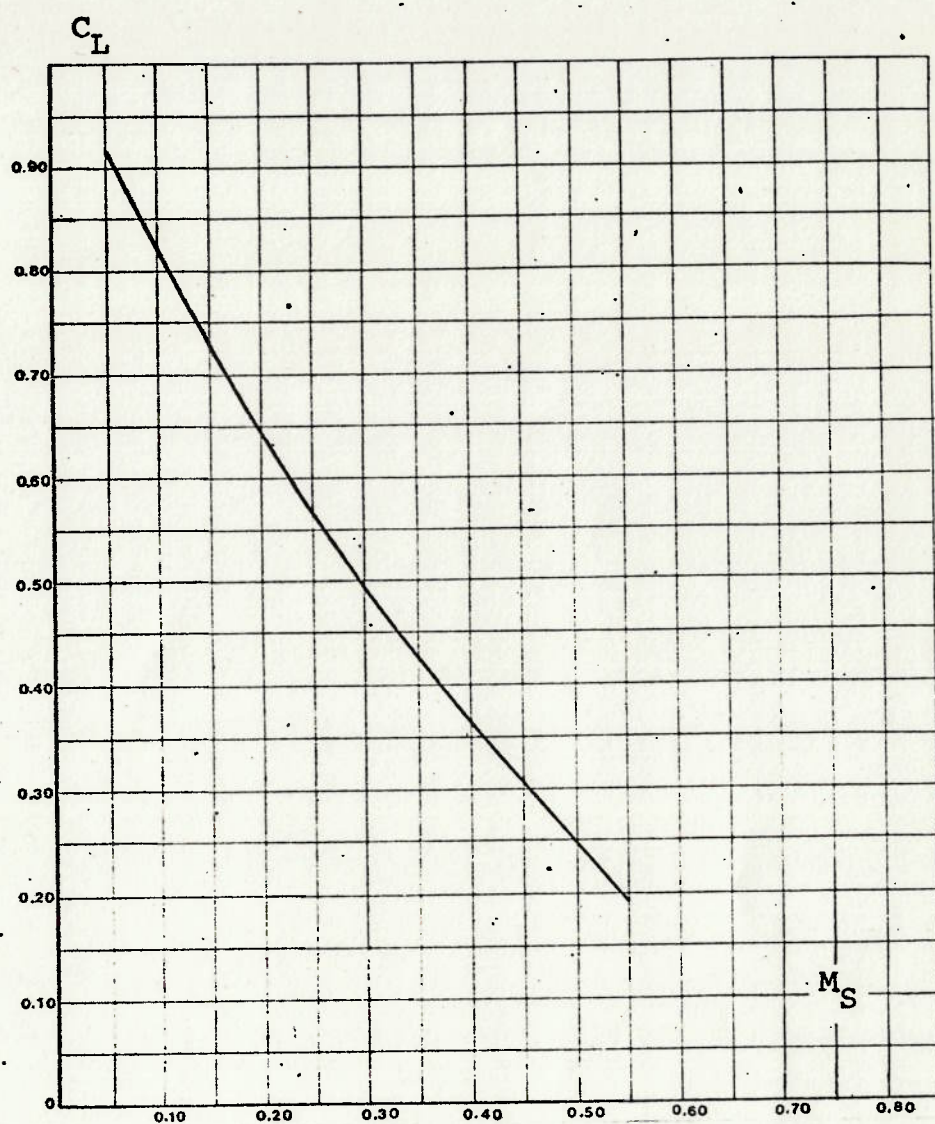


Figura 7.5 - Coeficiente de Perda de Carga  $C_L$  do Estrangulamento  
| 4 |.

Como anteriormente, a relação das velocidades  $V_{3E}/V$  da água no local do estrangulamento e na tubulação principal respectivamente é igual ao inverso da relação das seções, conforme Figura 7.4.

$$\frac{V_{3E}}{V} = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{0,5 \frac{\pi D_M^2}{4}} = \frac{2 D^2}{D_M^2} = K_{AL} \quad (7.3)$$

O escoamento através do orifício, no sentido inverso, pela seção de diâmetro  $D_M$  é contraído; em seguida, para uma seção de diâmetro menor ( $D_{MCE}$ ). No estrangulamento,  $K_{AL}$  é então ligado a  $K_A$ . Estabelece-se para tal orifício, que  $K_{AL}$  é aproximadamente igual  $1,7 K_A$  | 4 |.

A perda de carga  $\Delta H_{34}$ , no retorno da água para o RHO é estimada em função da nova relação  $M_E$  entre a seção do escoamento contraída  $\frac{1}{2} \pi \frac{D_M^2}{4}$  e a tubulação de diâmetro  $D_3$ .

É suficiente ler sobre a Figura 7.6 o novo coeficiente  $C_{LL}$  e tem-se:

$$\Delta H_{34} = \frac{V_M^2}{2g} C_{LL} \quad (7.4)$$

Para utilização de dados de orifícios em processamentos numéricos através de computador digital, as curvas indicadas nas Figuras - 7.5 e 7.6, deverão ser utilizadas, Das duas formas possíveis, tabela de valores (para possibilitar interpolação durante o processamento) ou ajuste de curvas, foi dada preferência à segunda.

Numa aproximação pelo Método dos Mínimos Quadrados as funções que representam as curvas são:

$$C_L = 1,010 - 2,029 M_S + 0,9507 M_S^2 \quad (7.5)$$

$$C_{LL} = 2,922 - 4,649 M_E + 1,596 M_E^2 \quad (7.6)$$



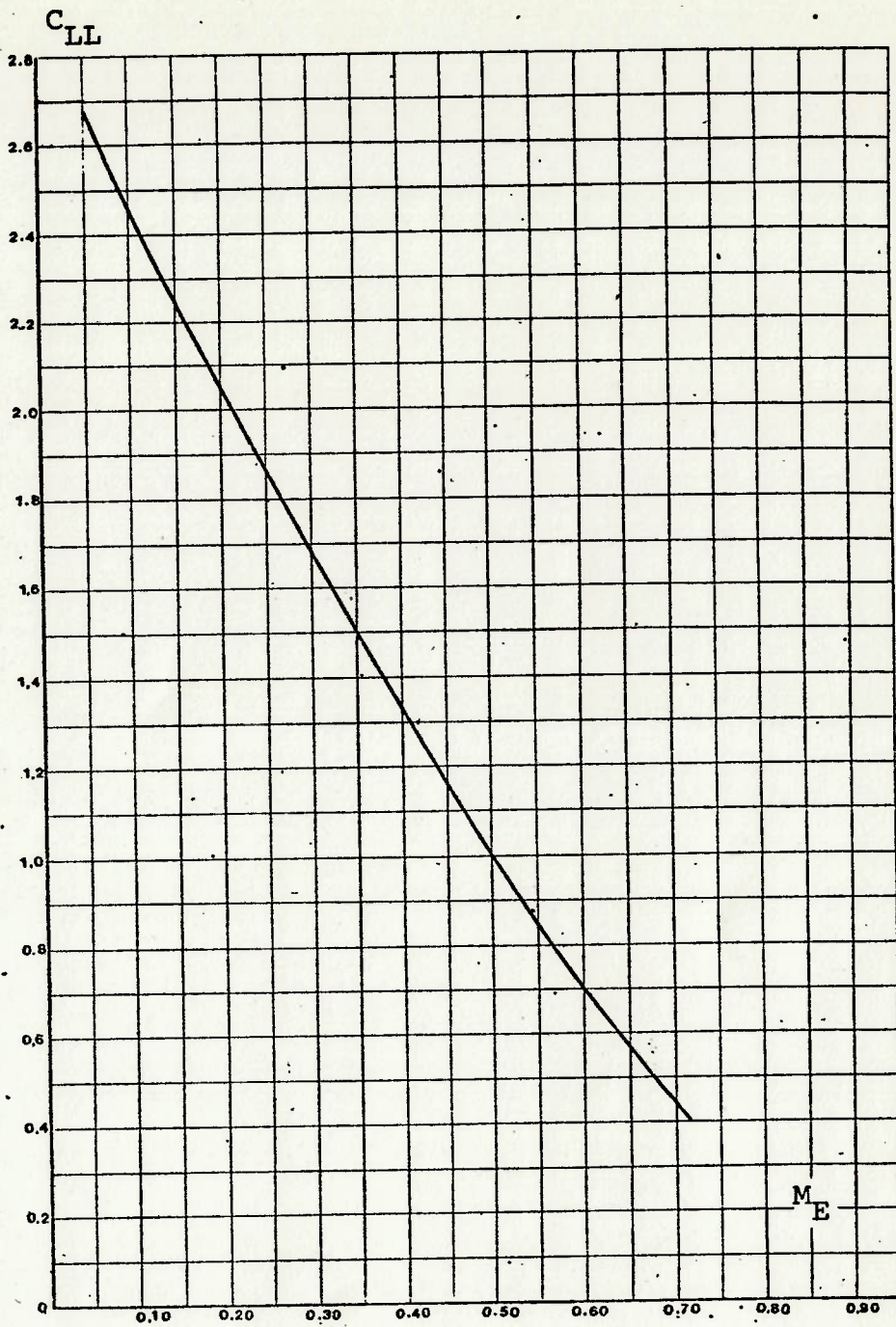


Figura 7.6 - Coeficiente de Perda de Carga  $C_{LL}$  do Estrangulamento. | 4 |

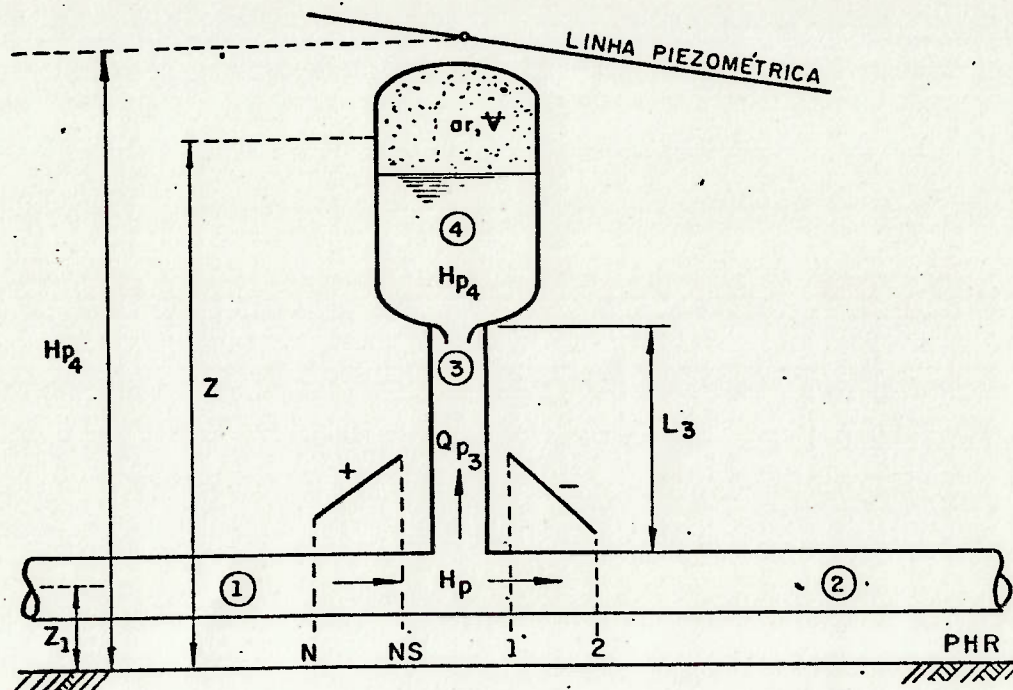


Figura 7.7 - RHO com Inércia Concentrada e Orifício Diferencial.

No esquema mostrado na figura 7.7, o equacionamento da inércia - concentrada fica limitado ao trecho compreendido entre o orifício de perda de carga diferencial e a tubulação principal:

$$H_p - H_{p_3} = C_1 + C_2 Q_{p_3} \quad (7.7)$$

onde:

$$C_1 = H_3 - H + \frac{f_3 L_3}{g D_3 A_3^2} Q_3 |Q_3| - C_2 Q_3 \quad (7.8)$$



$$C_2 = \frac{2 L_3}{g A_3 \Delta t} \quad (7.9)$$

O RHO será equacionado através da expressão:

$$(H_{P_4} + H_B - Z) \cdot \left( V - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right)^n = C \quad (7.10)$$

Pela equação da continuidade

$$Q_{P_{1,NS}} = Q_{P_3} + Q_{P_{2,1}} \quad (7.11)$$

Introduzindo o orifício com perda de carga diferencial tem-se:

$$H_{P_3} = H_{P_4} + \frac{Q_{P_3}^2}{(CDA)_E^2 \cdot 2g} \quad (7.12)$$

O termo CDA é o coeficiente de vazão do orifício multiplicado pela área do mesmo.

A expressão (7.12) vale quando  $Q_{P_3}$  é positivo, ou seja água está entrando no RHO.

Com a vazão  $Q_{P_3}$  em sentido inverso, a expressão fica:

$$H_{P_4} = H_{P_3} + \frac{Q_{P_3}^2}{(CDA)_S^2 \cdot 2g} \quad (7.13)$$

Nota-se que a expressão (7.2) é equivalente à expressão (7.13) e a expressão (7.4) é equivalente à expressão (7.12).

Dessa forma, pode-se encontrar uma relação funcional entre os coeficientes de perda de carga localizada do orifício diferencial e os CDA's do mesmo orifício, proporcionando assim a utilização das funções (7.5) e (7.6) levantadas experimentalmente e contidas na norma AFNOR-X-10-102.

Comparando as expressões (7.2) e (7.13) tem-se:

$$(CDA)_S = \frac{0,7854}{\sqrt{C_L}} D_M^2 \quad (7.14)$$

A expressão (7.14) representa o  $(CDA)_S$  do orifício e observa-se que ele é função do diâmetro e do coeficiente de perda de carga do mesmo.

Da mesma forma comparando as expressões (7.4) e (7.12) tem-se:

$$(CDA)_E = \frac{0,7854}{\sqrt{C_{LL}}} D_M^2 \quad (7.15)$$

A expressão (7.15) representa o  $(CDA)_E$  no sentido de entrada de água no RHO e também é função do diâmetro e do coeficiente de perda de carga do orifício.

Com todos os elementos mostrados acima, pode-se agora montar um sistema de equações para representar o modelo matemático da condição de contorno no nó correspondente à junção do RHO à tubulação principal:

$$H_P - H_{P_3} = C_1 + C_2 Q_{P_3} \quad (7.16)$$

onde  $C_1$  e  $C_2$  representam os valores encontrados nas equações (7.8) e (7.9).



$$(H_{P_4} + H_B - Z) \cdot \left( V - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right)^n = C \quad (7.17)$$

$$Q_{P_{1,NS}} = Q_{P_3} + Q_{P_{2,1}} \quad (7.18)$$

$$H_{P_{1,NS}} = C_{P_1} - B_1 Q_{P_{1,NS}} \quad (7.19)$$

$$H_{P_{2,1}} = C_{M_2} + B_2 Q_{P_{2,1}} \quad (7.20)$$

sendo:

$$H_P = H_{P_{1,NS}} = H_{P_{2,1}}$$

$$H_{P_3} = H_{P_4} + \frac{Q_{P_3}^2}{(CDA)_E^2 2g} \quad (7.21)$$

A equação (7.21) tem sua validade restrita à fase de entrada de água no RHO ( $Q_{P_3} > 0$ ).

$$H_{P_4} = H_{P_3} + \frac{Q_{P_3}^2}{(CDA)_S^2 2g} \quad (7.22)$$

a equação (7.22) tem sua validade restrita à fase de saída de água do RHO ( $Q_{P_3} \leq 0$ ).

Resolvendo-se o sistema tem-se:

$$- Q_{P_3} \leq 0$$

$$F_1 = \left\{ \left[ \frac{1}{B_1 + B_2} (B_2 C_{P_1} - B_1 B_2 Q_{P_3} + B_1 C_{M_2}) - C_1 + \right. \right. \\ \left. \left. - C_2 Q_{P_3} + \frac{C_L \cdot Q_{P_3}^2}{2g \cdot 0,6168 \cdot D_M^4} \right] + H_B - Z \right\} \cdot \\ \cdot \left\{ v - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right\}^n - C = 0 \quad (7.23)$$

A constante  $C$  é definida pela equação (7.17) usando-se os valores iniciais, onde  $H_B$  é a pressão barométrica.

A equação (7.23) é similar à equação (3.24) encontrada sem a presença de orifício, e é não linear em  $Q_{P_3}$ .

Novamente o método de Newton-Raphson poderá ser utilizado na solução do problema fazendo:

$$\frac{dF_1}{d Q_{P_3}} = \left[ - \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2} - C_2 + \frac{Q_{P_3}}{g} \frac{C_L}{0,6168 \cdot D_M^4} \right] \\ \cdot \left[ v - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right]^n - \frac{1}{2} \cdot \frac{n \cdot \Delta t \cdot C}{\left( v - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right)} \quad (7.24)$$

$$- Q_{P_3} > 0$$

$$F_1 = \left\{ \left[ \frac{1}{B_1 + B_2} (B_2 C_{P_1} - B_1 B_2 Q_{P_3} + B_1 C_{M_2}) - C_1 - C_2 Q_{P_3} + \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{C_{LL} \cdot Q_{P_3}^2}{2g \cdot 0,6168 \cdot D_M^4} \right] + H_B - Z \right\} \cdot \left\{ v - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right\}^n + \\ - C = 0 \quad (7.25)$$



Da mesma forma, obtem-se solução de (7.25) através do Método de Newton-Raphson, com:

$$\frac{dF_1}{dQ_{P_3}} = \left[ - \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2} - C_2 - \frac{Q_{P_3}}{g} \frac{C_{LL}}{0,6168 \cdot D_M^4} \right]$$

$$\left[ v - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta \right]^n = \frac{1}{2} \frac{n \cdot \Delta t \cdot C}{\left( v - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right)} \quad (7.26)$$

Uma vez conhecido o valor de  $Q_{P_3}$ , no final de cada intervalo de tempo do processamento há condições de completar a resolução do sistema, de maneira similar à mostrada no Capítulo III.

A rotina para utilização em computador na linguagem Fortran IV está no APÊNDICE C.

O comportamento do orifício diferencial foi abordado por Evans e Crawford | 13 | através de um parâmetro,  $K_1$ , definido de tal forma que  $K_1 H_H^*$  seja a perda de carga total, para escoamento com vazão  $Q_0$ , no sentido tubulação principal RHO.

Num dado sistema, o orifício diferencial deverá acarretar perda de tal forma que complete a perda provocada pela tubulação principal.

Conforme | 13 |, valores de  $K_1$  superiores a 0,7 são desnecessários. Tendo em vista a grande resistência ao escoamento desde o RHO à tubulação principal, serão necessários grandes RHO para controlar subpressões, ao passo que as sobrepressões não serão sensivelmente reduzidas. As subpressões podem ser controladas com maior eficiência através do uso de RHO menores, apresentando menor estrangulamento.

A Figura 7.8 apresenta os valores de subpressão e sobrepressão pa-

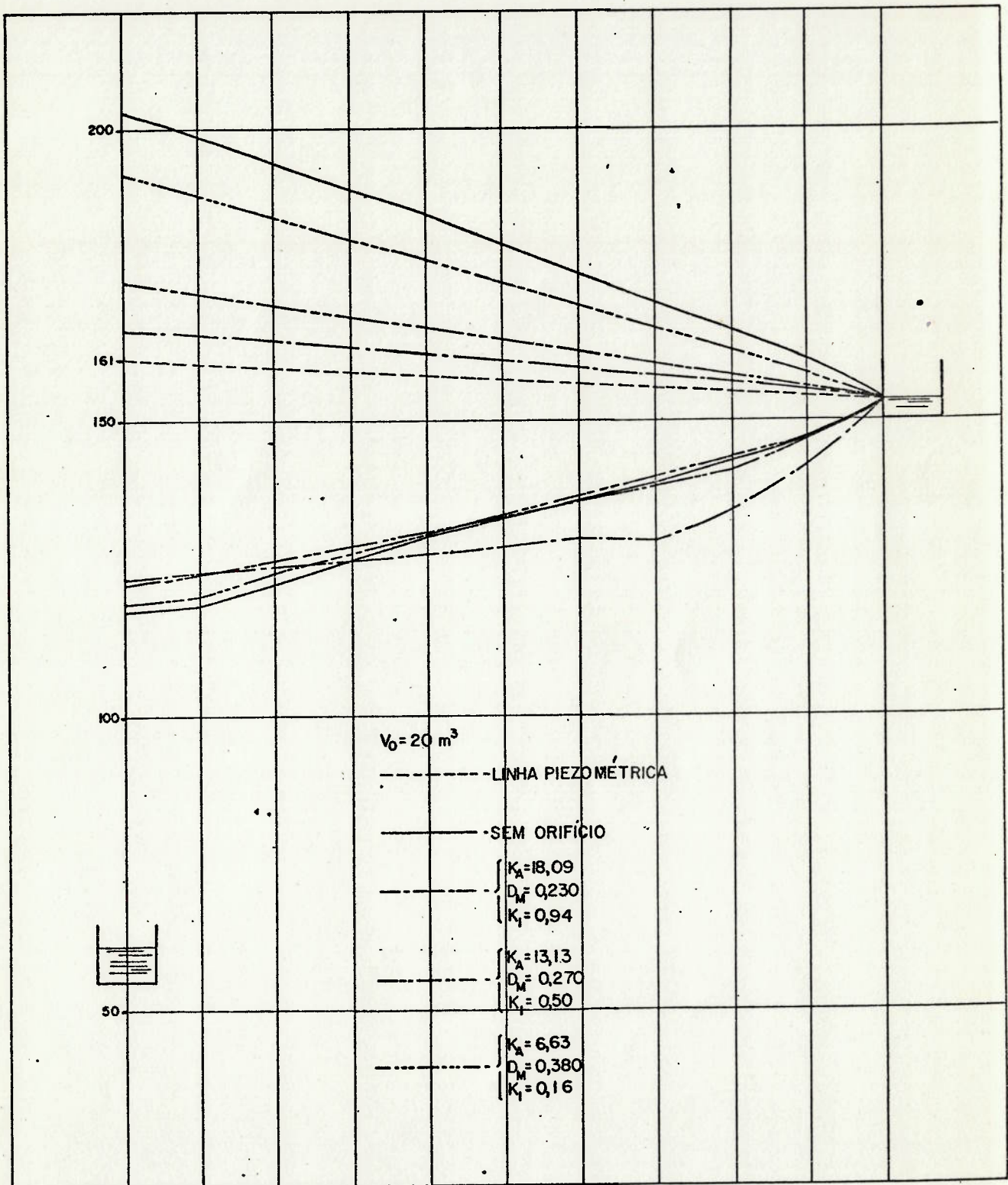


Figura 7.8 - Linhas Piezométricas Máximas e Mínimas da Instalação Analisada no Capítulo IV.



ra a instalação analisada no Capítulo IV, com vários orifícios diferenciais.

A afirmação de Evans e Crawford de que o volume aumenta, com  $K_1$  elevado, quando deseja-se controlar a subpressão, se aplica a orifícios similares ao estudado por Bergeron | 6 | e tratado neste trabalho.

Todavia, estudos feitos por Thoma | 34 | a respeito de freio hidráulico, levam a equipamentos que quando montados na entrada do RHO apresentam perda de carga diferencial elevada, por exemplo, - de 1:10 ou 1:15.

$$\frac{\text{perda de carga para } Q \text{ entrar no RHO}}{\text{perda de carga para } Q \text{ sair do RHO}} = \frac{10}{1} \quad \text{ou} \quad \frac{15}{1}$$

Fabricantes utilizam dispositivos com princípio de funcionamento semelhante ao mencionado em | 34 | e com isso conseguem, com baixa perda de carga na saída da água do RHO, alimentar a tubulação principal e, com o escoamento no sentido inverso, evitar o aparecimento de elevadas pressões no sistema.

Uma válvula de retenção entre o RHO e a Tubulação principal poderá eventualmente proporcionar essa situação, quando o obturador está provido de um orifício. Entretanto, as válvulas de retenção comuns não apresentam comportamento satisfatório uma vez que podem falhar completamente no momento da operação, pois emperram ou então fecham muito rapidamente, acentuando o problema de sobrepressão.

O dispositivo estudado por Thoma | 34 |, apresentado por Heim não apresenta peças móveis e consiste basicamente de uma câmara espiral de vórtice, com conexões tangencial e axial, Figura 7.9.

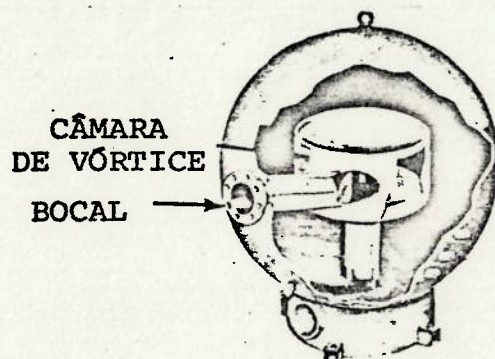


Figura 7.9 - Câmara de Vórtice em RHO

O dispositivo oferece uma grande resistência, quando a água entra na conexão tangencial, resultando no aparecimento de um vórtice. O escoamento no sentido contrário vence pequena oposição.

Analisando a instalação do Capítulo IV, provida de um "Freio de Escoamento Reverso de Thoma" (FERT) com relação de perda de carga 1:10 e equivalente a um orifício de 0,25 m, no sentido RHO - tubulação principal observa-se que a perda de carga no FERT é:

sentido de escoamento	perda de carga para vazão nominal (m)
RHO - tubulação principal	17,97
tubulação principal-RHO	179,70

A Figura 7.10 mostra as linhas piezométricas máxima e mínima da instalação, onde se observa que a carga máxima não ultrapassou a carga de regime permanente e a carga mínima manteve-se.



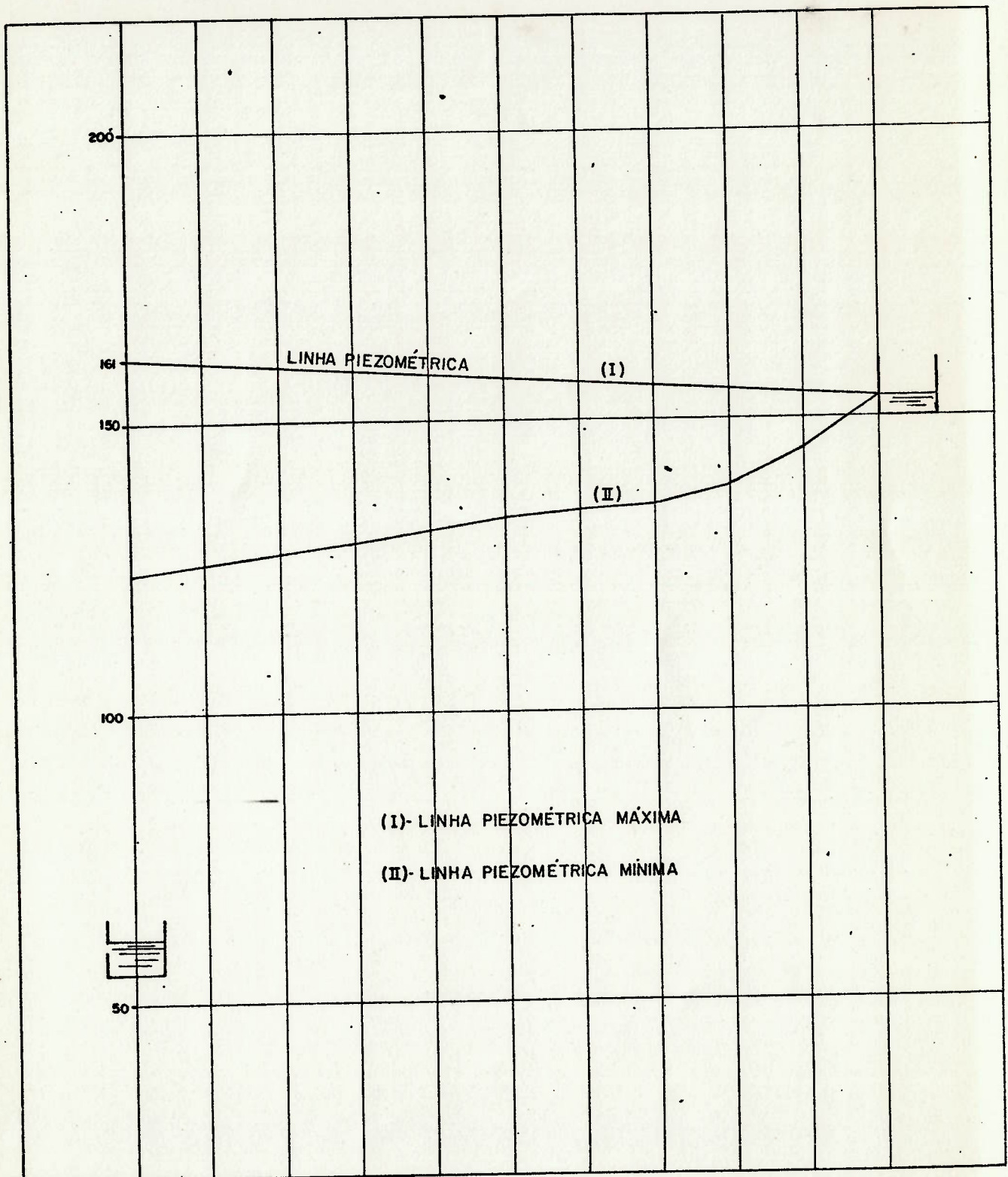


Figura 7.10 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima da Instalação Analisada no Capítulo IV, provida de FERT.

A possibilidade de ocorrência do fenômeno de cavitação no estrangulamento à saída do RHO deve ser analisada para evitar o bloqueio do escoamento e conseqüente comprometimento da pressurização da tubulação principal, quando a água está saindo do RHO.

Neste estudo será considerada a cavitação no orifício diferencial.

A cavitação no Freio de Escoamento Reverso de Thoma é função do projeto de cada disposição merecendo estudo específico.

Por outro lado, a cavitação durante o escoamento no sentido desde a tubulação principal para o RHO não traz preocupação, uma vez que o equipamento com perda diferencial deve apresentar grande dissipação nesse sentido.

O detalhe do estrangulamento estudado está na Figura 7.11. No sentido de escoamento para alimentação da tubulação principal pode ocorrer cavitação considerável sem ocorrência de vibração ou danos para os materiais, a menos da limitação de vazão.

Certas combinações de velocidades e de pressões num estrangulamento poderão induzir a cavitação.

Assim, os estrangulamentos deverão ser investigados no que se refere ao potencial de cavitação, analisando-se o gradiente de pressão através do mesmo.

A cavitação no estrangulamento tomará lugar no seio do fluido e os danos materiais não aparecerão ainda que a mesma seja severa.

A relação entre os diâmetros  $D_3$  e  $D_M$  tem influência marcante na perda de carga e no potencial de cavitação.

A Figura 7.12 apresenta vários ensaios de cavitação para estrangulamento | 35 |.



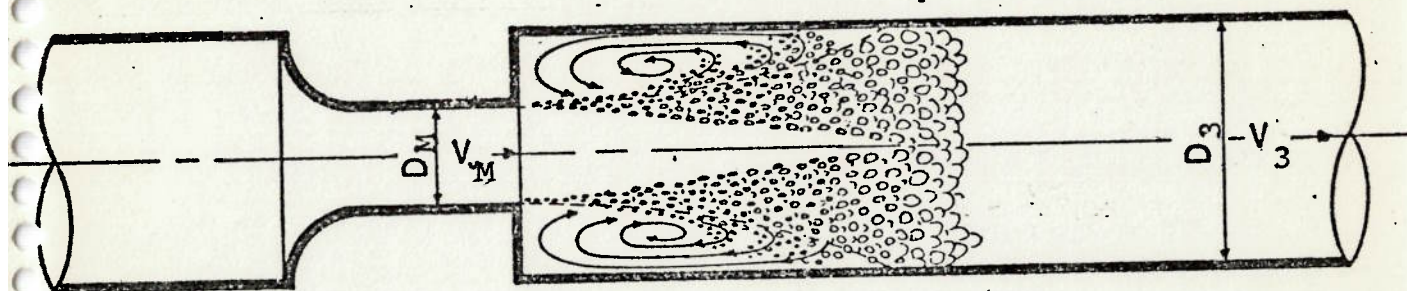


Figura 7.11 - Detalhes do estrangulamento para análise de cavitação.

O estudo a seguir refere-se ao exemplo mostrado no Capítulo IV.

Para  $M_S = 0,167$ , encontra-se o Número de Cavitação limite na Figura 7.12 igual a 1,35. Calculando os valores do Número de Cavitação para cada intervalo de tempo, observa-se valor mínimo igual a 5,78, superior ao encontrado para ocorrência de cavitação incipiente no estrangulamento.

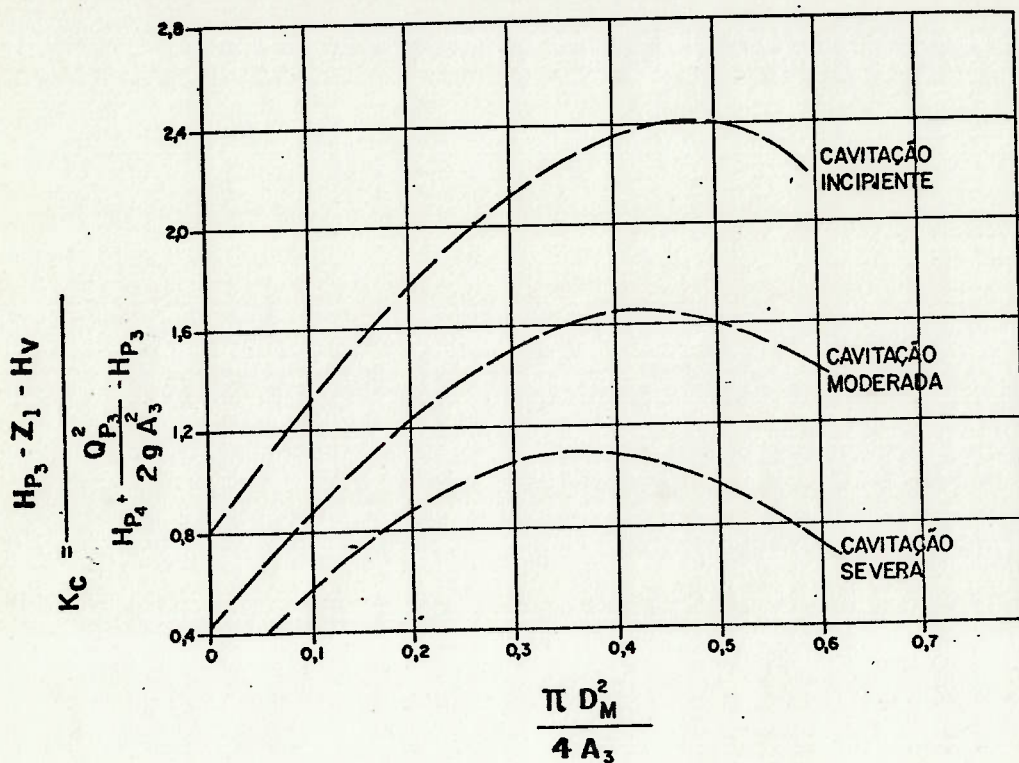


Figura 7.12 - Números de Cavitação para Estrangulamento no sentido RHO - tubulação principal.

De modo geral, pode-se calcular o Número de Cavitação para cada intervalo, após o cálculo das alturas e vazões, mantendo sempre um controle da cavitação do estrangulamento.

O APÊNDICE C apresenta o programa para verificação de cavitação em computador.



CAPÍTULO VIII - ANÁLISE ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO,  
DESPREZADA A INFLUÊNCIA DOS CONJUNTOS  
ELEVATÓRIOS.

Pelo estudo feito anteriormente conclui-se que a influência das bombas, na presença do RHO, é desprezível, pois, o mesmo evita a depressurização repentina da tubulação principal, logo após a falta de energia.

Como consequência, a carga a jusante da válvula de retenção fica maior que a carga fornecida pela bomba. Desta forma, o RHO elimina a influência dos conjuntos elevatórios, pelo fechamento da válvula de retenção.

A Figura 8.1 apresenta um esquema do modelo matemático adotado nos Capítulos anteriores.

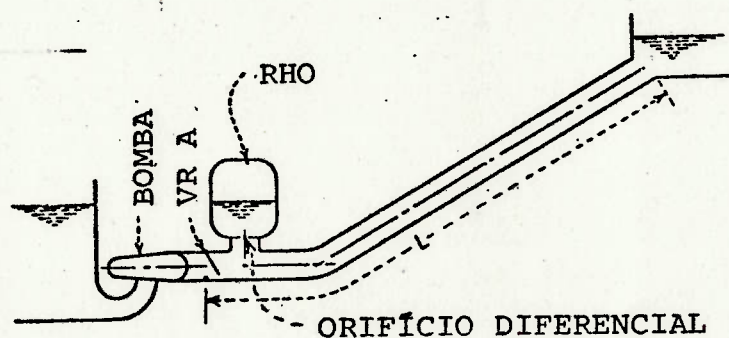


Figura 8.1 - Esquema de Instalação Representativa do Modelo Matemático Utilizado nos Capítulos Anteriores.

Visando eliminar a bomba do modelo matemático, tendo em vista simplificar o processamento, passa-se a adotar o esquema mostrado na Figura 8.2.

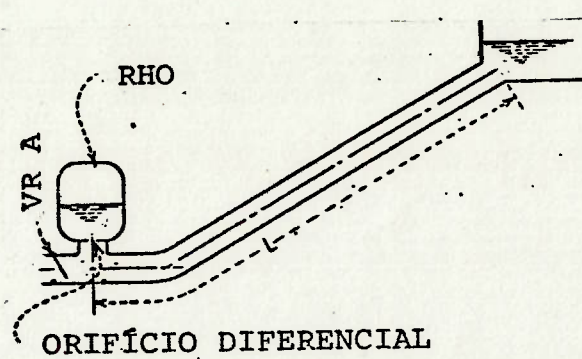


Figura 8.2 - Esquema de Instalação Representativa do Modelo Matemático, Desprezada a Influência dos Conjuntos Elevatórios.

No modelo matemático que representa o esquema apresentado na Figura 8.2, calcula-se as características do sistema de recalque e estabelece-se o regime permanente.

No início do transiente, considera-se instantâneo o fechamento da válvula de retenção "A" e nula a vazão entre a bomba e o ponto de junção do RHO com a tubulação principal.

Tem-se o escoamento oscilatório entre o RHO e o reservatório aberto.

O sistema de equações referente ao equacionamento do RHO fica:

$$H_P - H_{P_3} = C_1 + C_2 Q_{P_3} \quad (8.1)$$



$$(H_{P_4} + H_B - Z) \left( V - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right)^n = C \quad (8.2)$$

$$Q_{P_3} = - Q_{P_{2,1}} \quad (8.3)$$

$$H_{P_{2,1}} = C_{M_1} + B_2 \cdot Q_{P_{2,1}} \quad (8.4)$$

Sendo:

$$H_P = H_{P_{2,1}}$$

$$H_{P_3} = H_{P_4} + \frac{Q_{P_3}^2}{(CDA)_E^2 \cdot 2g} \quad (8.5)$$

A equação (8.5) considera entrada de água no RHO ( $Q_{P_3} > 0$ )

$$H_{P_4} = H_{P_3} + \frac{Q_{P_3}^2}{(CDA)_S^2 \cdot 2g} \quad (8.6)$$

A equação (8.6) considera a saída de água do RHO ( $Q_{P_3} < 0$ ). Resolvendo o sistema simplificado, obedecendo a mesma conduta mostrada nos Capítulos anteriores tem-se:

$$- Q_{P_3} \leq 0$$

$$F_1 = \left\{ \left[ C_{M_2} - B_2 Q_{P_3} - C_1 - C_2 Q_{P_3} + \frac{C_L \cdot Q_{P_3}^2}{2g \cdot 0,6168 \cdot D_M^4} \right] + \right. \\ \left. + H_B - Z \right\} \cdot \left\{ V - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right\}^n - C = 0 \quad (8.7)$$

$$\frac{dF_1}{dQ_{P_3}} = \left[ -B_2 - C_2 - \frac{C_L \cdot Q_{P_3}}{0,6168 \cdot D_M^4 \cdot g} \right] \cdot \left[ v - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right]^n - \frac{1}{2} \cdot \frac{n \Delta t C'}{Q_{P_3} + Q_3} \cdot \left( v - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right) \quad (8.8)$$

$$- Q_{P_3} > 0$$

$$F_1 = \left\{ \left[ C_{M_2} - B_2 Q_{P_3} - C_1 Q_{P_3} - \frac{C_{LL} \cdot Q_{P_3}^2}{0,6168 \cdot D_M^4 \cdot 2g} \right] + H_B - Z \right\} \cdot \left[ v - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right]^n - C = 0 \quad (8.9)$$

$$\frac{dF_1}{dQ_{P_3}} = \left[ -B_2 - C_2 - \frac{C_{LL} \cdot Q_{P_3}}{0,6168 \cdot D_M^4 \cdot g} \right] \cdot \left[ v - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right]^n - \frac{1}{2} \cdot \frac{n \Delta t C}{Q_{P_3} + Q_3} \cdot \left( v - \frac{Q_{P_3} + Q_3}{2} \Delta t \right) \quad (8.10)$$

Aplicando o Método de Newton-Raphson às expressões (8.7), (8.8) - (8.9) e (8.10), determina-se o valor de  $Q_{P_3}$  para o intervalo de tempo considerado.

A partir do valor de  $Q_{P_3}$  é imediata a solução do sistema (8.1) a (8.6).



O APÊNDICE D apresenta o programa para processamento do modelo simplificado.

No programa foi suprimido o índice das variáveis, pois, o sistema fica reduzido a um único trecho.

Na Figura 8.3 está a análise comparativa do modelo matemático, utilizando os valores da instalação do Capítulo IV.

A comparação dos resultados encontrados mostra pequena divergência entre o modelo simplificado, o modelo completo e outras referências da bibliografia.

Fica mostrado aqui, o tratamento através do Método das Características de uma oscilação em tubo "U".

Sob o ponto de vista de processamento de dados, o modelo simplificado apresenta redução sensível nos custos, conforme tabela 8.1.

Analisando a figura 8.3 conclui-se que o modelo simplificado se aproxima dos valores fornecidos pela bibliografia de forma mais acentuada que o modelo completo, com influência dos conjuntos eletrovatórios.

Esse fato deve-se às hipóteses apontadas na bibliografia que coincidem com as feitas no equacionamento apresentado neste Capítulo. Como era esperado, a consideração do momento de inércia das partes girantes, como apresentado no Capítulo VII atenua a oscilação de pressão.

A aplicação do modelo simplificado aqui apresentado, e os disponíveis na bibliografia podem ser utilizados sem restrições em sistemas comuns, pois são conservativos.

As limitações para uso do modelo simplificado poderão aparecer em linhas não comuns, quando o momento de inércia das partes girantes influenciarem o fenômeno de forma acentuada ou quando houver

Tabela 8.1 - Comparação Entre o Modelo Matemático Completo e o Simplificado, Sob o Ponto de Vista de Processamento.

Parâmetros de Processamento	Modelo Matemático Completo (Fig.8.1)	Modelo Matemático Simplificado(Fig.8.2)
Deck	276 cartões	150 cartões
Tempo de compilação	4.6 segundos	3.1 segundos
Memorias requeridas	2662 palavras	849 palavras
Memorias indexadas	1528 palavras	110 palavras
Dados de Entrada	165	34
Tempo de processamento (média)	400 segundos	30 segundos
Custo médio	Cr\$ 1.110,00	Cr\$ 116,00

OBS.: - O tempo de processamento varia de acordo com os dados da linha.

- Os dados acima referem-se a mesma linha de recalque com intervalo de tempo de 100 segundos para verificação do transiente.



grande resistência para saída de água do RHO. Conforme apresentado na figura 8.3, há uma divergência entre os modelos da ordem de 5,5%, junto aos conjuntos elevatórios.

A grande divergência entre os modelos reside entre o ponto médio da tubulação principal e o reservatório. Nota-se que a hipótese de parada instantânea dos conjuntos elevatórios conduz a grandes oscilações que se propagam até aproximadamente a extremidade oposta da tubulação principal. Essa distorção não ocorre quando da análise com o modelo matemático completo.

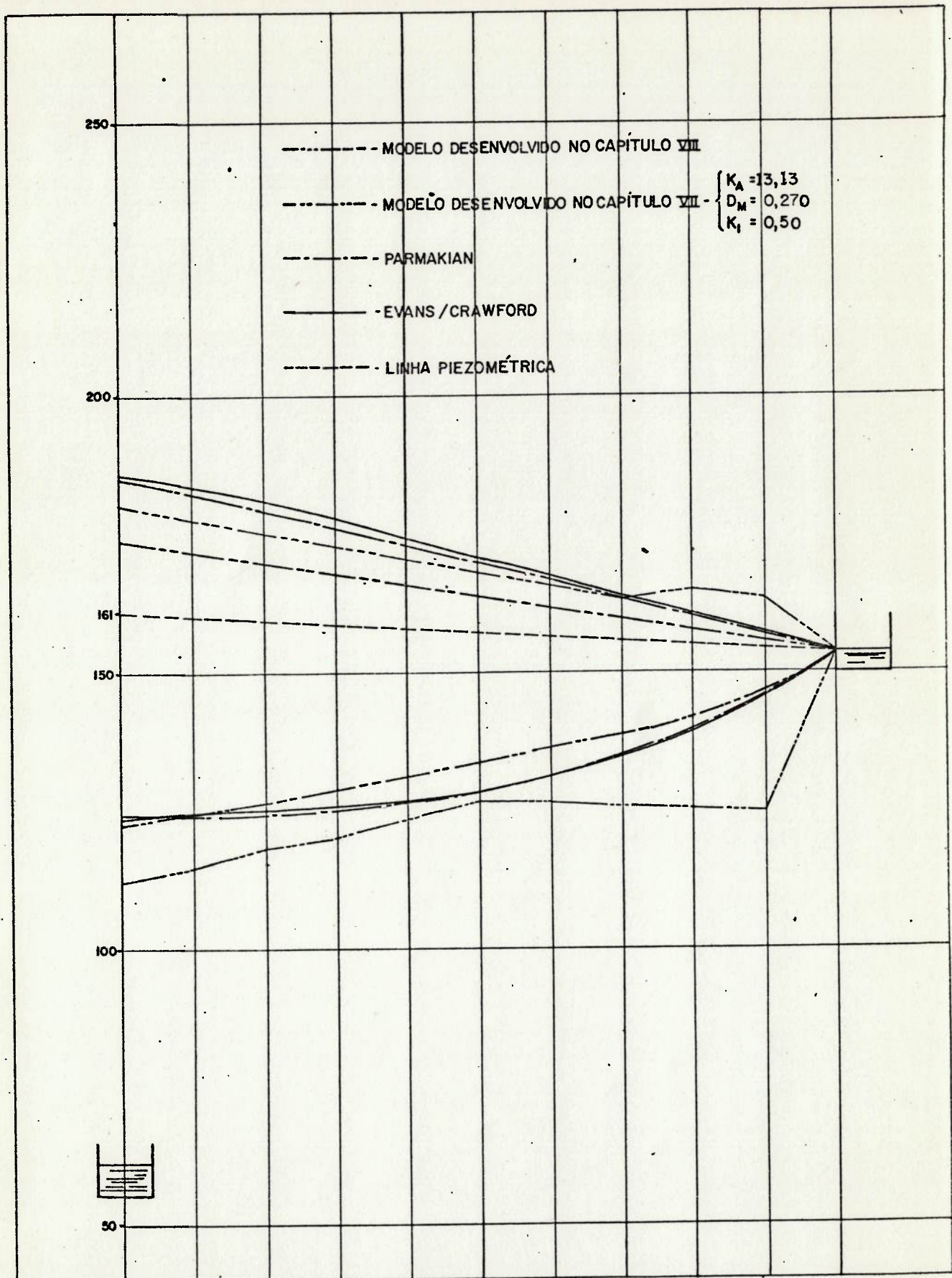


Figura 8.3 - Linhas Piezométricas Máximas e Mínimas da Instalação.



## CAPÍTULO IX - ANÁLISE ADIMENSIONAL DE INSTALAÇÕES COM RHO

Allievi | 6 | | 13 | mostrou que os transientes hidráulicos, numa tubulação principal provida de RHO, dependem de dois parâmetros,  $\rho^*$  e  $\sigma^*$ , na ausência de perda de carga.

A característica  $\rho^*$  é adimensional e uma função da relação entre a energia cinética de regime permanente e a energia potencial, - em um comprimento unitário da tubulação principal:

$$\rho^* = \frac{a V_o}{2g H_H^*} \quad (9.1)$$

O adimensional dado em (9.1) é chamado de característica da tubulação principal.

A característica  $\sigma^*$ , para um sistema de recalque com RHO é

$$\sigma^* = \frac{2g V_o H_H^*}{AL V_o^2} \quad (9.2)$$

A expressão (9.2) apresenta a relação entre a energia piezométrica do ar no interior do RHO e a energia cinética da água na tubulação principal, ambas referidas ao regime permanente.

A resistência oposta pelo atrito gera a necessidade de inclusão - de mais um parâmetro,  $K_1$ , conforme definido no Capítulo anterior | 13 |.

Para utilização do método gráfico | 13 | | 14 |, Evans, Crawford e Parmakian sugerem o desenvolvimento de uma combinação, entre (9.1) e (9.2), para expressar os resultados em função dos próprios parâmetros.

A expressão resultante deverá mostrar a relação entre  $\sigma^*$ ,  $\rho^*$ , a vazão na tubulação principal e o volume de ar no RHO a saber:

$$2\phi^* = 2\rho^* \sigma^* = \frac{4V_o a}{Q_o L} \quad (9.3)$$

Parmakian | 14 | utilizou

$$\phi^* = \frac{2V_o a}{Q_o L} \quad (9.4)$$

A perda de carga é inserida na análise através do parâmetro  $K_1$ , - definido no Capítulo VII | 13 | |14 |.

Tais pesquisadores assumiram que toda a perda de carga atua na extremidade da tubulação principal junto à bomba.

Na análise feita neste trabalho considerou-se separadamente o atrito na tubulação principal, na inércia concentrada e no orifício diferencial, para tornar possível quantificar a influência de cada um no comportamento do sistema.

Observa-se que a adoção do parâmetro  $K_1$  alto leva a RHO de tamanho acima do necessário quando a subpressão entre o meio da linha e o reservatório é o ponto crítico.

Neste estudo considera-se também o parâmetro  $K_A$ , representativo da dissipação de energia no orifício diferencial |4|, mencionado no Capítulo VII.

Ruus |36| recomenda, para utilização em computador, os parâmetros abaixo:

- parâmetro da tubulação principal:



$$\rho^* = \frac{a V_o}{2g H_o^*} \quad (9.5)$$

- parâmetro do RHO:

$$\sigma^* = \frac{2g V_o H_o^*}{AL V_o^2} \quad (9.6)$$

- adimensional de perda de carga na tubulação principal:

$$K_f^* = \frac{H_{fo}}{H_o^*} \quad (9.7)$$

- adimensional de perda de carga no orifício:

$$K_{or}^* = \frac{H_{or}}{H_o^*} \quad (9.8)$$

Os adimensionais  $K_f^*$  e  $K_{or}^*$  permitem uma fácil comparação entre os efeitos da perda de carga na tubulação principal e no orifício.

Utilizando os modelos matemáticos desenvolvidos nos Capítulos VII e VIII levanta-se curvas adimensionais para prever o comportamento de instalações.

As figuras 9.1, 9.2 e 9.3 mostram linhas piezométricas máximas e mínimas adimensionais, em função dos parâmetros apresentados.

Os valores encontrados com a utilização dos modelos matemáticos - ora propostos são comparados, demonstrando que o modelo simplificado não levou a erros significativos.

Desta forma, pode-se manusear o modelo simplificado para avaliação preliminar do RHO, antes mesmo da definição dos conjuntos elevatórios, a fim de compatibilizar o comportamento hidráulico com o estrutural.

Analisando o comportamento dos transientes hidráulicos nas figuras 9.1, 9.2 e 9.3 tem-se que o atrito na tubulação principal reduz sensivelmente a máxima sobrepressão ao longo da mesma. A maior percentagem de redução se encontra na extremidade da bomba, e a menor, na extremidade do reservatório.

O atrito reduz a máxima subpressão nos pontos ao longo da tubulação principal, na faixa de interesse prático. Essa redução é substancial, exceto nos casos de valores altos de  $\rho^*$  combinados com baixos valores de  $\sigma^*$  | 36 | |37|.

A resistência do orifício reduz substancialmente a máxima sobrepressão em qualquer ponto ao longo da tubulação principal. Isto é particularmente observado na extremidade da bomba, nos casos onde o atrito na tubulação principal é baixo ou inexistente.

O orifício causa um grande aumento na subpressão, no meio da tubulação principal de perda de carga desprezível. Para grandes valores de  $\rho^*$  e  $\sigma^*$  a máxima subpressão, em tais sistemas, no meio da linha aproxima-se daquela obtida na extremidade da bomba | 36 |.

O atrito, na tubulação principal, modifica substancialmente esse efeito indesejável da resistência do orifício, na subpressão no meio da linha.

Nota-se que um orifício é frequentemente um meio ineficaz de reduzir a oscilação de pressão. Orifício acentuadamente assimétrico, como apresentado no Capítulo VII, o FERT, deverá ser utilizado para produzir uma redução sensível na sobrepressão, sem acarretar simultaneamente aumento da subpressão.



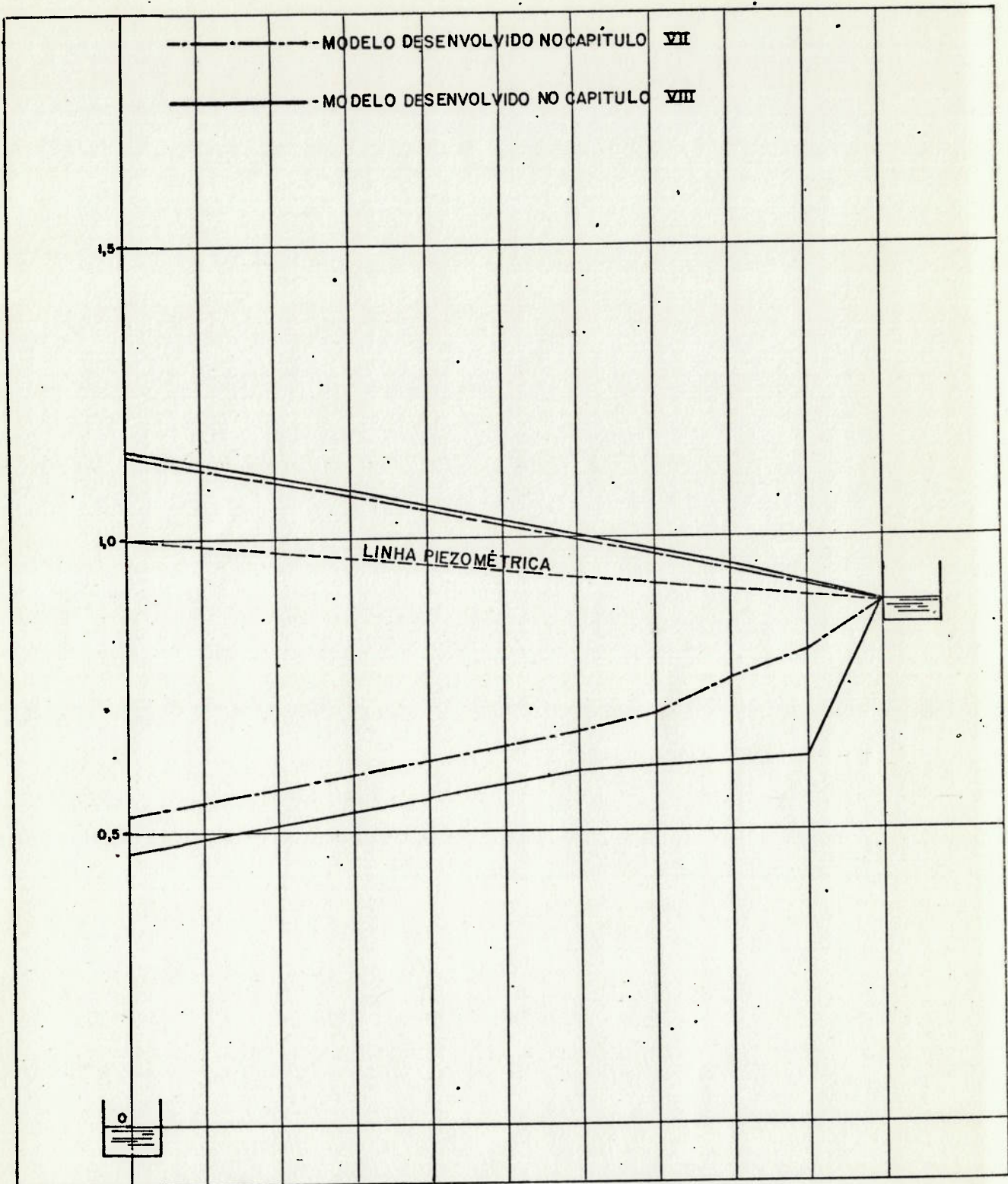


Figura 9.1 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima Adimensionais  
 $\rho^* = 1,00$  ,  $\phi^* = 10$  ,  $K_f^* = 0,1$  ,  $K_{or}^* = 0,6$

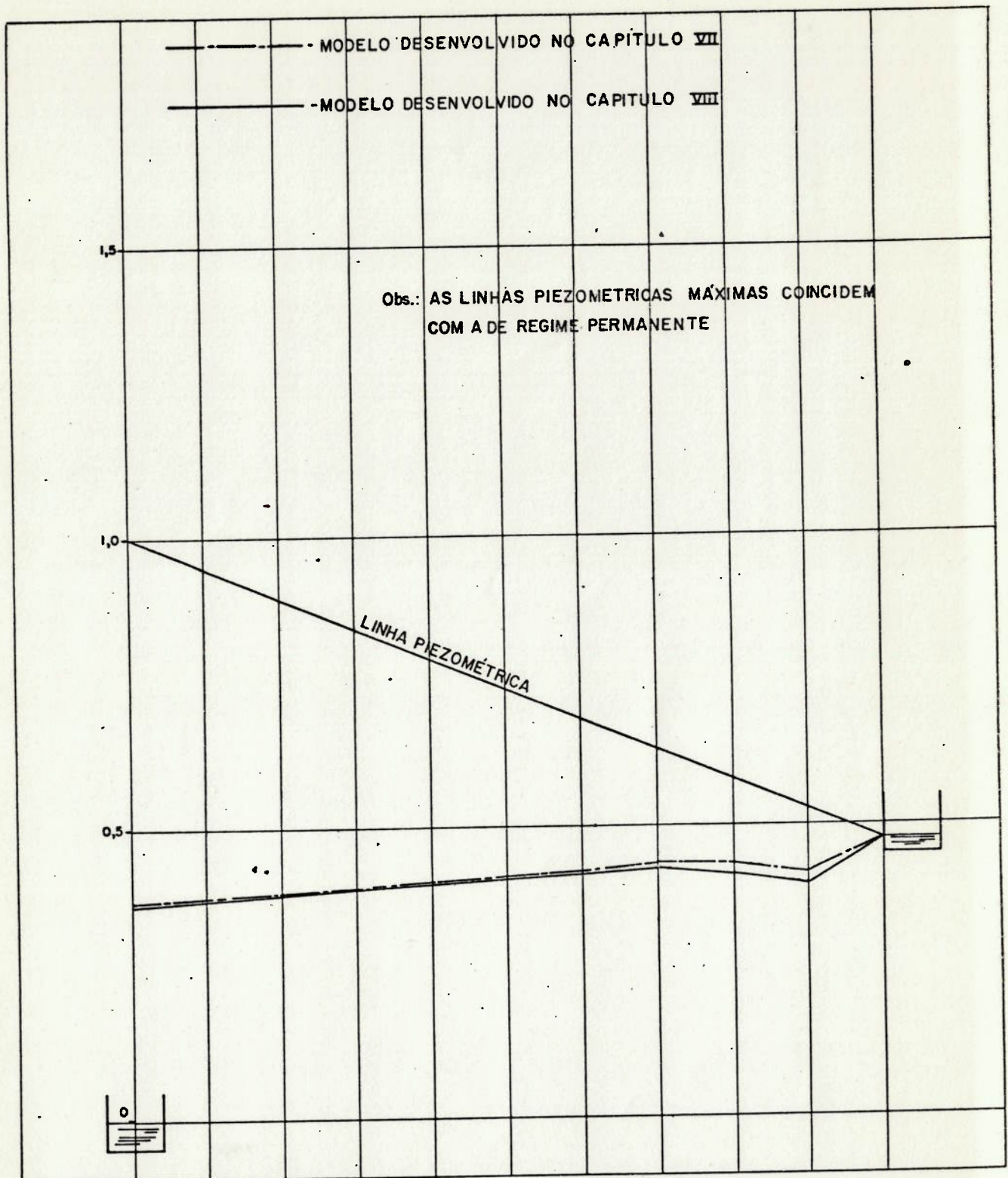


Figura 9.2 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima Adimensionais  
 $\rho^* = 1,00$  ,  $\phi^* = 10$  ,  $K_f^* = 0,5$  ,  $K_{or}^* = 0,4$



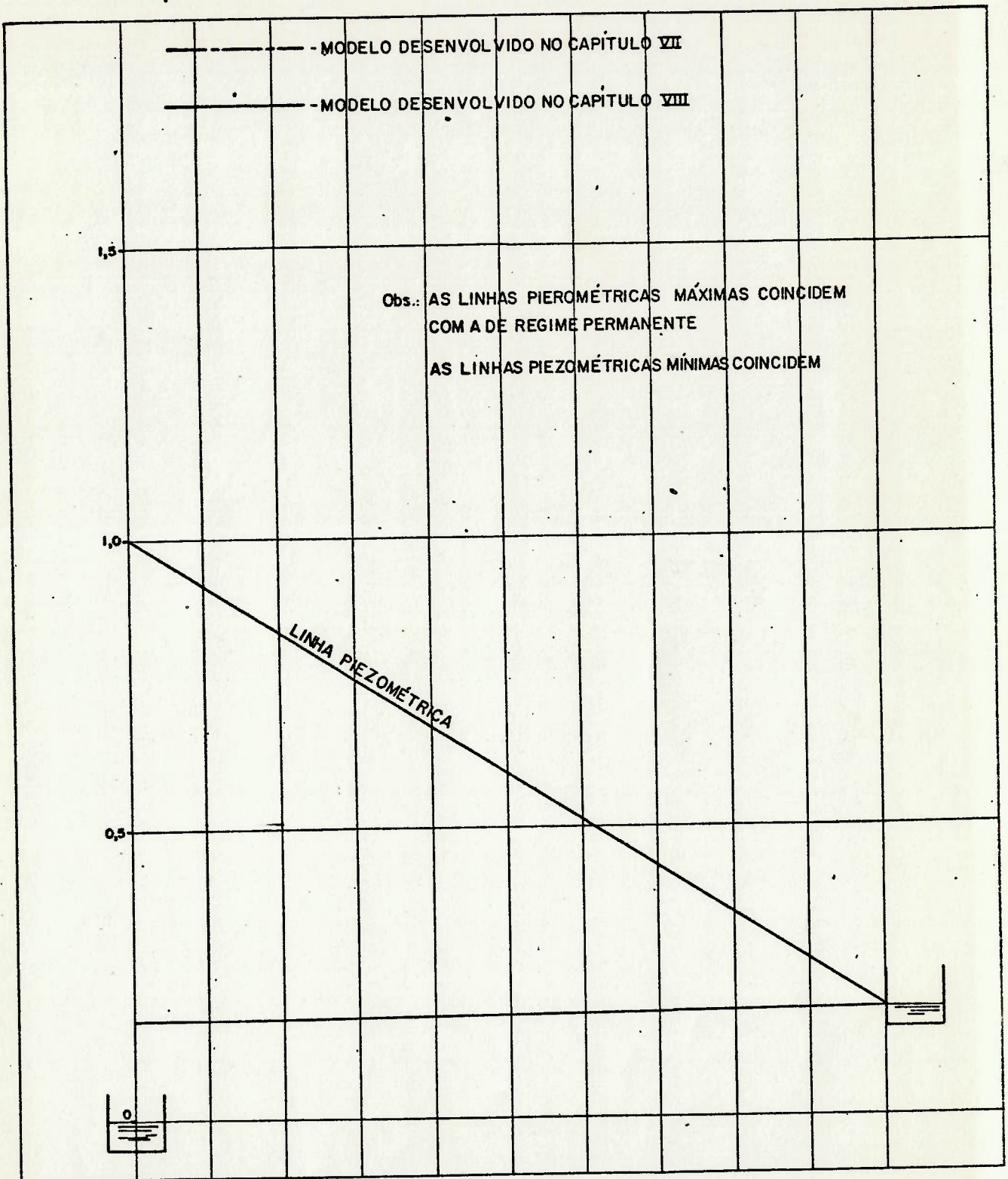


Figura 9.3 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima Adimensionais  
 $\rho^* = 1,00$  ,  $\phi^* = 10$  ,  $K_f^* = 0,8$  ,  $K_{or}^* = 0,1$

Um orifício com grande resistência ao escoamento para o interior do RHO, para reduzir a sobrepressão, é desejável para todos os casos com perda de carga limitada na linha.

Por outro lado, deseja-se resistência pequena ou nula ao escoamento para o exterior do RHO.

Para atender estes requisitos usa-se orifícios diferenciais, como foi feito nos Capítulos VII e VIII.

Dispositivos especiais, como o FERT, são projetados para aumentar a resistência ao escoamento para o interior do RHO, enquanto acarreta resistência nula ou quase nula ao que sai do RHO.

O orifício diferencial, utilizado nos Capítulos VII e VIII, apresenta relação prática entre a resistência para o escoamento entrar no RHO e a resistência para o que sai de 2,5:1.

Para aumentar essa relação, poderá ser utilizada uma válvula de retenção entre o RHO e a tubulação principal, provida de um "by pass" de menor diâmetro ou de um orifício no obturador como mostrado no Capítulo VII.

Para reduzir a sobrepressão em pequenas instalações com baixa perda de carga, pode tornar-se econômico aumentar o tamanho do RHO ou instalar uma válvula de alívio, em lugar de instalar um orifício diferencial.

Em grandes instalações, um RHO sem orifício pode tornar-se mais interessante, nos casos onde o seu dimensionamento é determinado pela subpressão permitida entre o meio da tubulação principal e o reservatório.



A seguir serão apresentadas instalações com diferentes características adimensionais, a fim de mostrar o comportamento das linhas piezométricas máximas e mínimas.

A figura 9.4 mostra instalação de baixa perda de carga, no orifício diferencial e na tubulação principal, com baixos valores de  $\rho^*$  e  $\phi^*$ .

A figura 9.5 mostra, mantendo-se a instalação, o comportamento para altos valores de  $\rho^*$  e  $\phi^*$ ; a figura 9.6 corresponde a baixo valor de  $\rho^*$  com alto valor de  $\phi^*$  e a figura 9.7 corresponde a alto valor de  $\rho^*$  com baixo valor de  $\phi^*$ .

A figura 9.8 mostra instalação com perda de carga média no orifício diferencial e baixa perda de carga na tubulação principal, com baixos valores de  $\rho^*$  e  $\phi^*$ .

A figura 9.9 mostra, mantendo-se a instalação, o comportamento para altos valores de  $\rho^*$  e  $\phi^*$ ; a figura 9.10 corresponde a baixo valor de  $\rho^*$  com alto valor de  $\phi^*$  e a figura 9.11 corresponde a alto valor de  $\rho^*$  com baixo valor de  $\phi^*$ .

As curvas levantadas nas figuras 9.4 a 9.11 foram obtidas através do modelo matemático simplificado desenvolvido no Capítulo VIII.

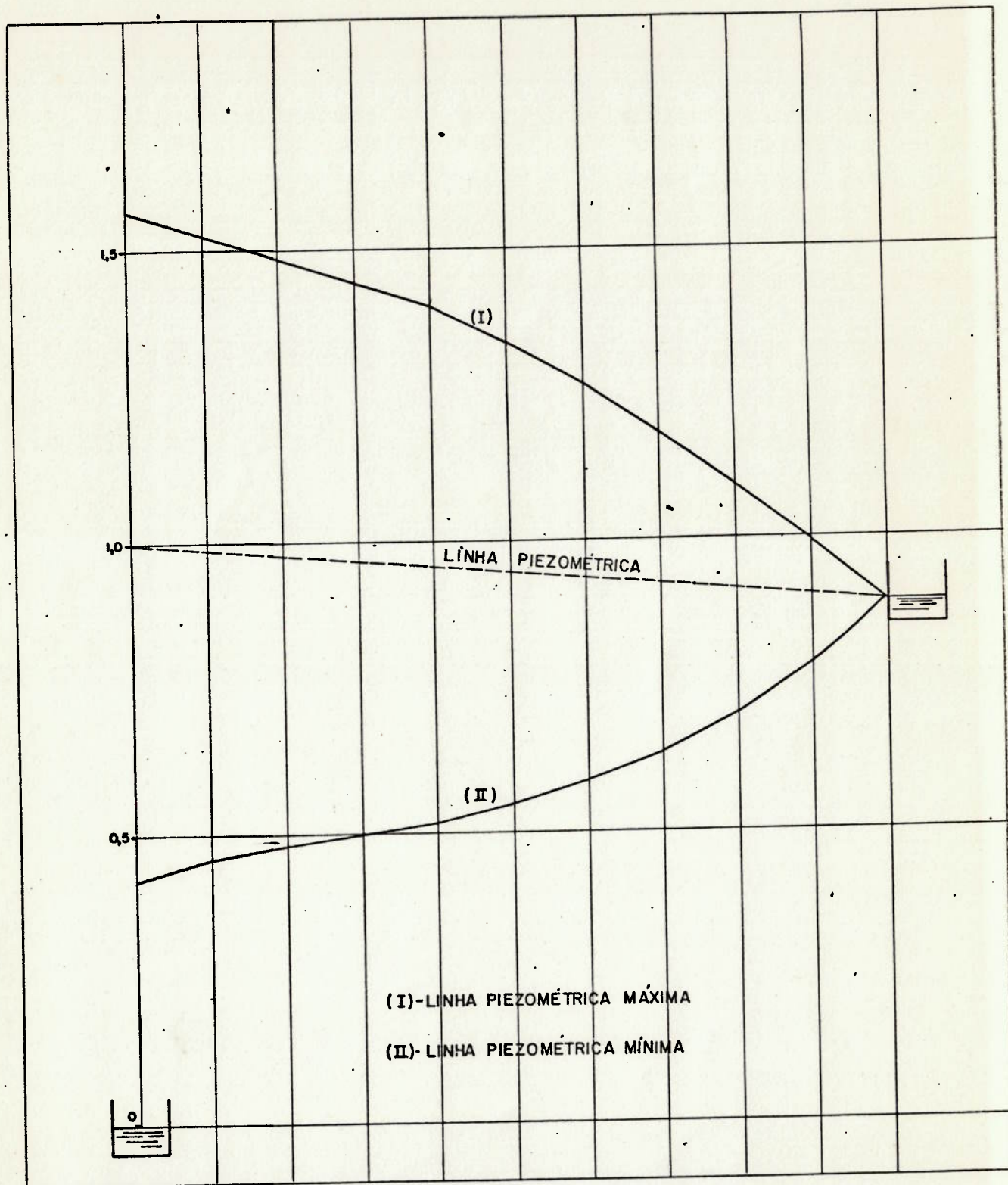


Figura 9.4 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para  
 $K_f^* = 0,1$  ;  $K_{or}^* = 0,1$  ;  $\rho^* = 0,5$  ;  $\phi^* = 3$



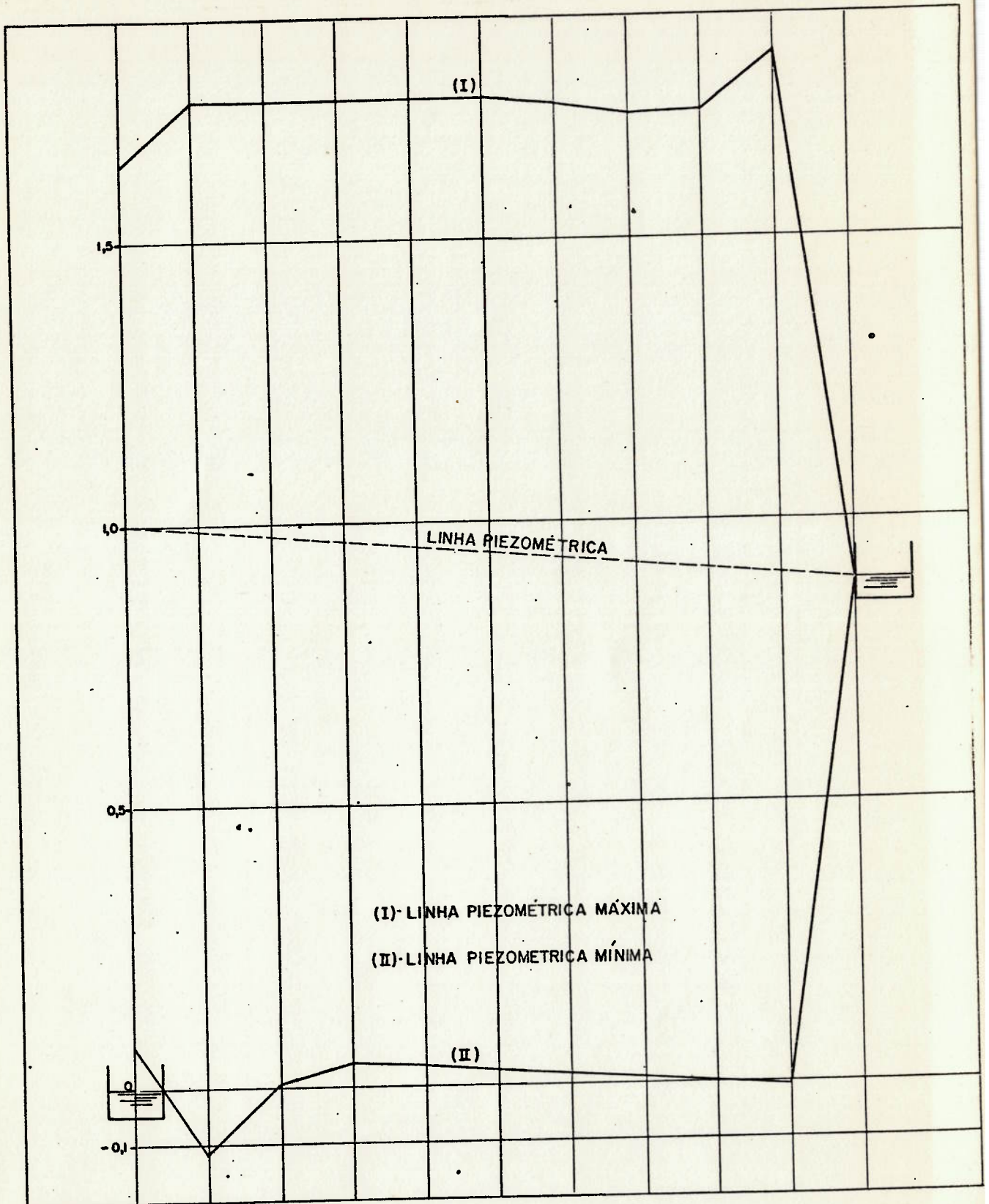


Figura 9.5 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para  
 $K_f^* = 0,1$  ;  $K_{or}^* = 0,1$  ;  $\rho^* = 2,0$  ;  $\phi^* = 40$

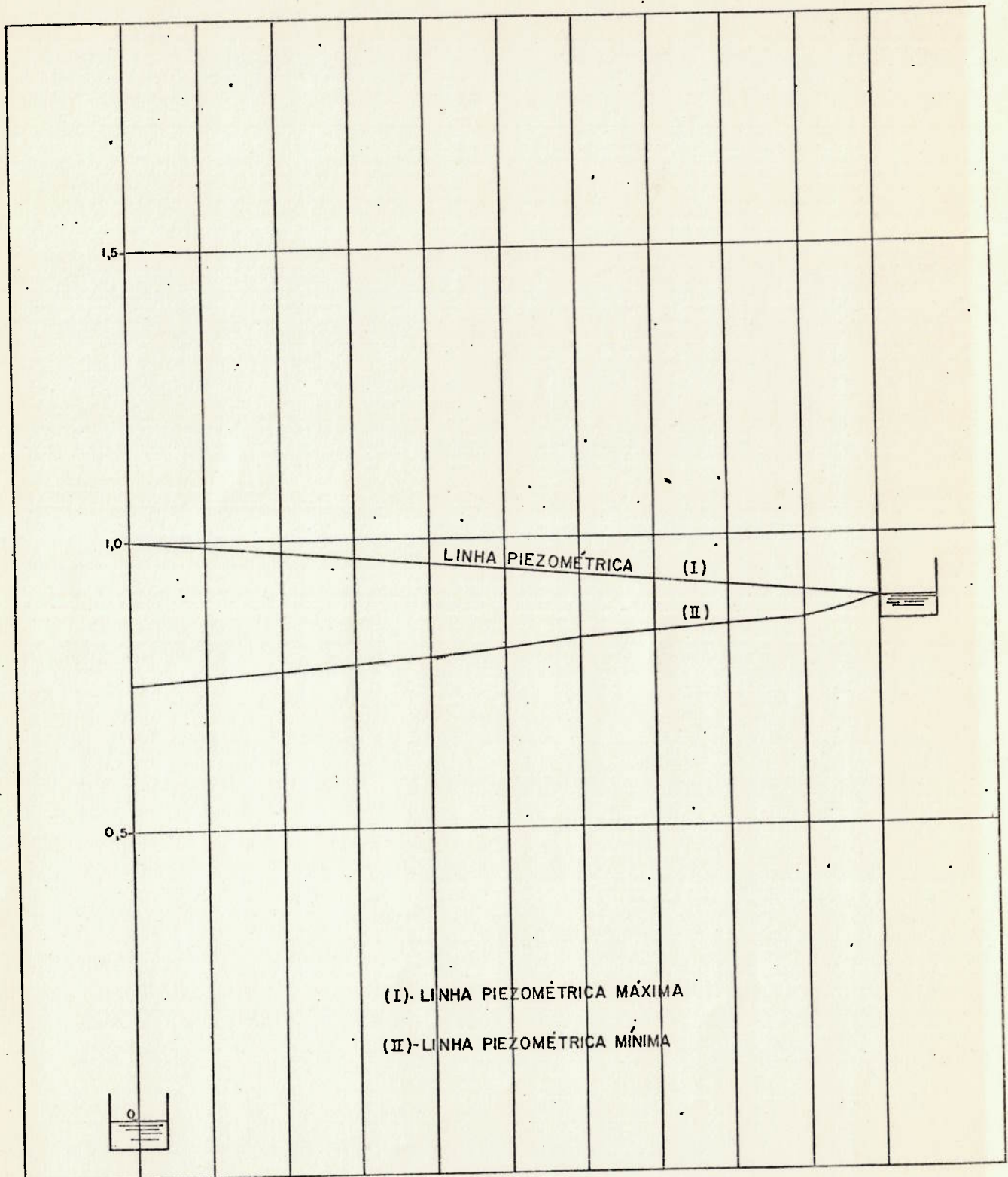


Figura 9.6 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para  
 $K_f^* = 0,1$  ;  $K_{or}^* = 0,1$ ;  $\rho^* = 0,5$  ;  $\phi^* = 40$



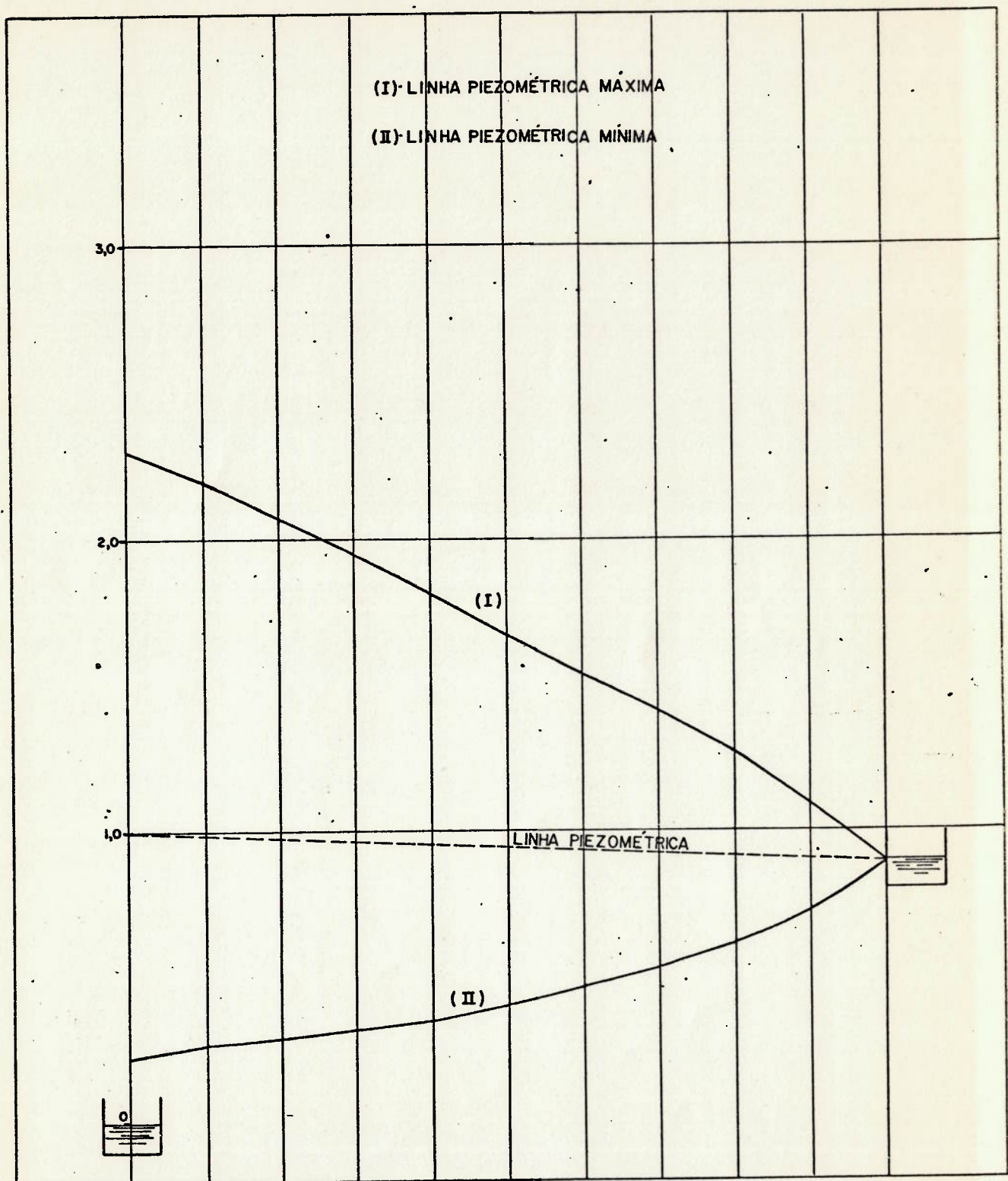


Figura 9.7 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para  
 $K_f^* = 0,1$  ;  $K_{or}^* = 0,1$  ;  $\rho^* = 1,0$  ;  $\phi^* = 3$

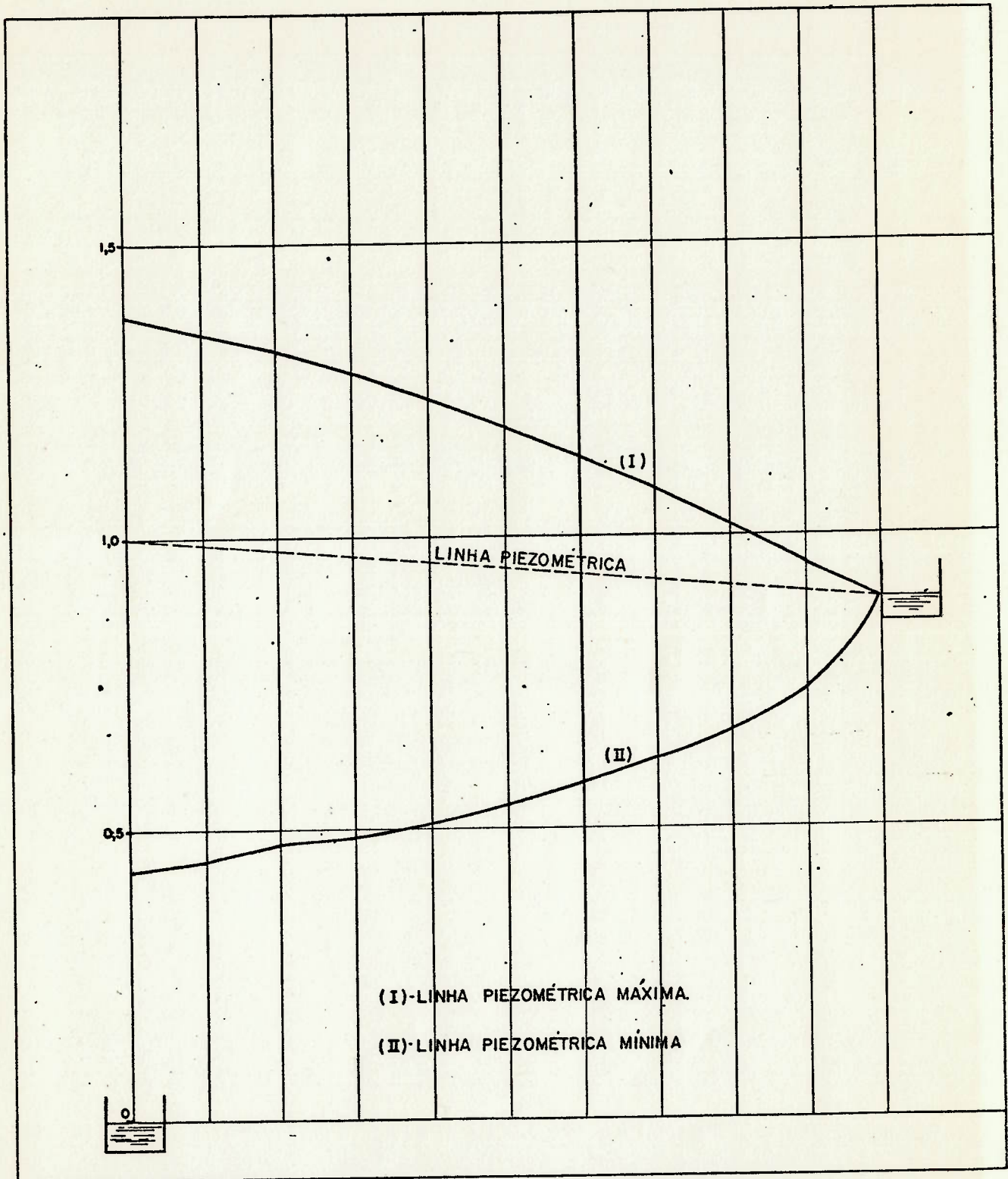


Figura 9.8 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para  
 $K_f^* = 0,1$  ;  $K_{or}^* = 0,4$  ;  $\rho^* = 0,5$  ;  $\phi^* = 3$



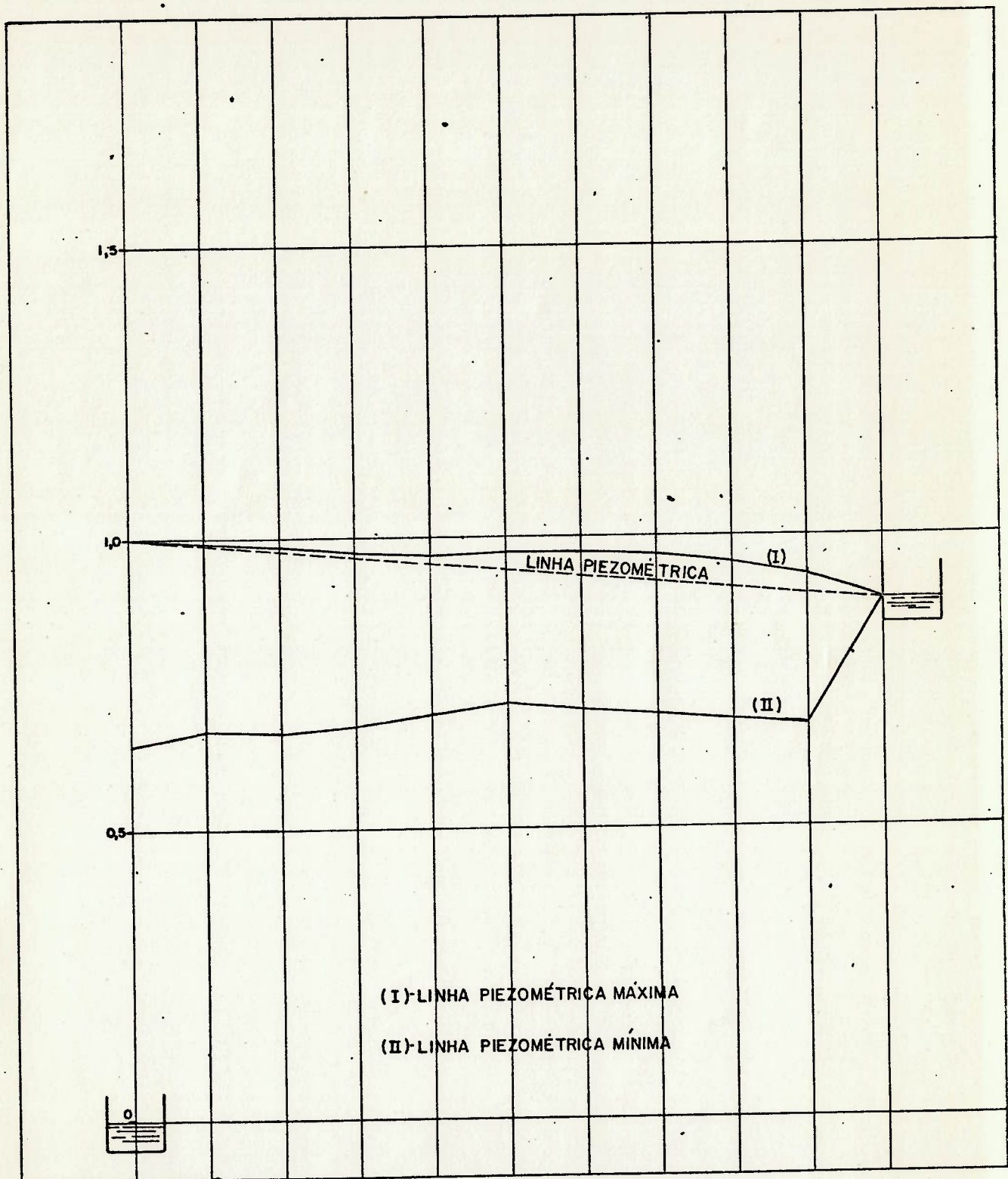


Figura 9.9 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para  
 $K_f^* = 0,1$  ;  $K_{or}^* = 0,4$  ;  $\rho^* = 1,0$  ;  $\varnothing^* = 40$

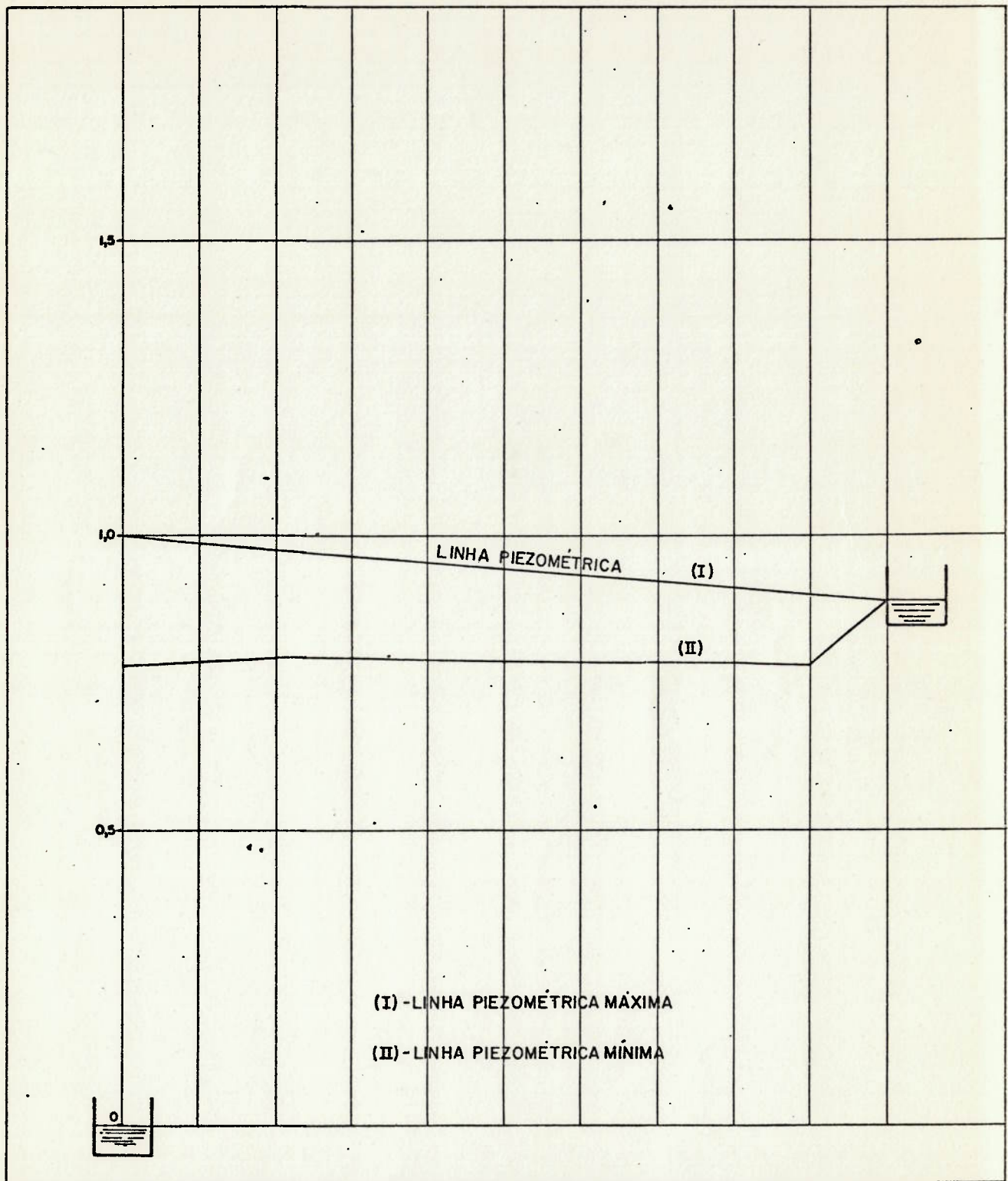


Figura 9.10 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para  
 $K_f^* = 0,1$  ;  $K_{or}^* = 0,4$  ;  $\rho^* = 0,5$  ;  $\phi^* = 40$



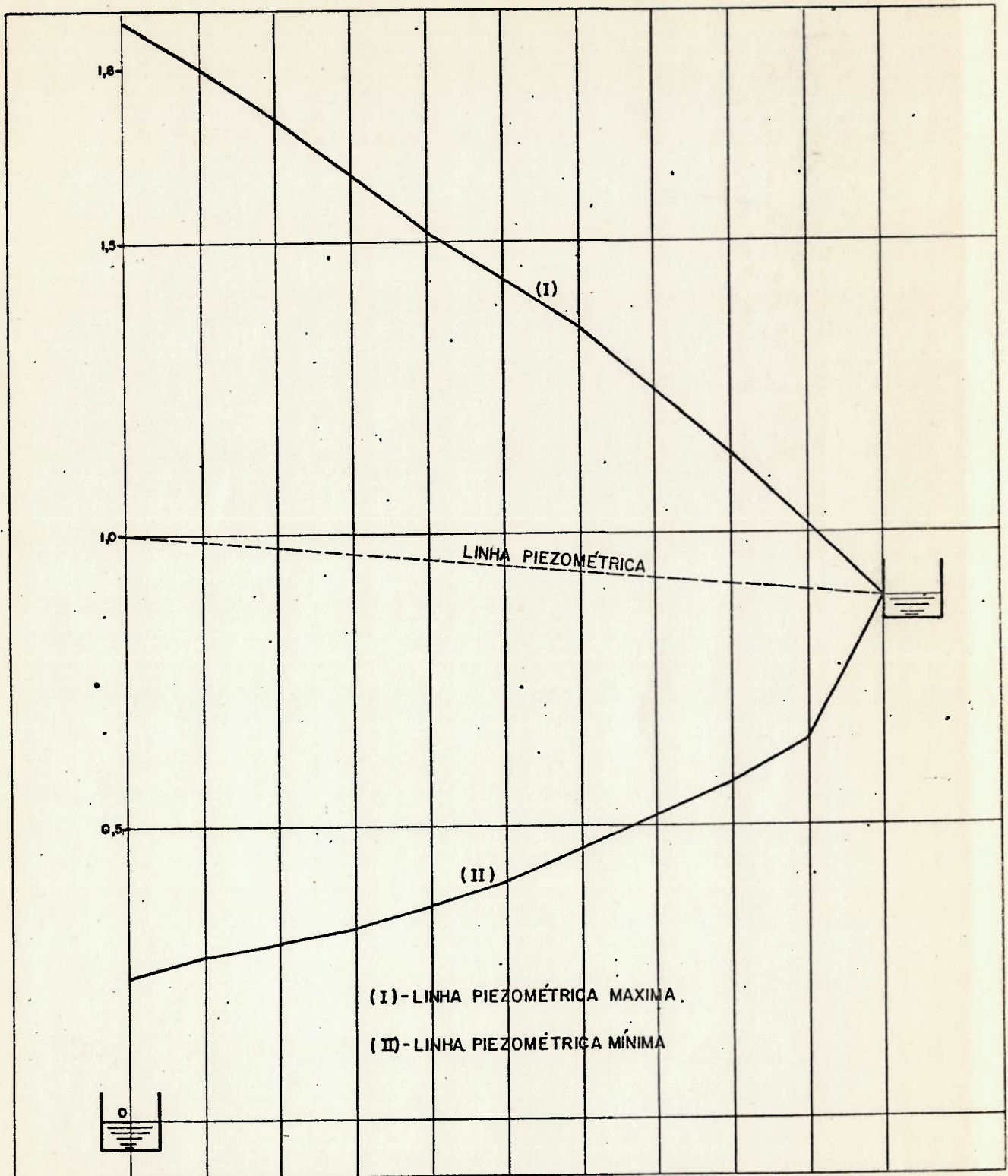


Figura 9.11 - Linhas Piezométricas Máxima e Mínima para  
 $K_f^* = 0,1$  ;  $K_{or}^* = 0,4$  ;  $\rho^* = 1,0$  ;  $\phi^* = 3$

## CAPÍTULO X - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após a elaboração da presente dissertação pode-se concluir:

- Há vários métodos de abordagem para equacionamento do RHO em recalques de água, porém aquele que propicia melhor acompanhamento do fenômeno ao longo do tempo e ao longo da tubulação principal é o das características. Tal método também oferece ferramentas suficientes para inclusão, na análise, das perdas de carga distribuída e localizada bem como do fenômeno térmico.
- O estudo de sistemas de bombeamento de água através do método das características pode ser feito com aproximação de primeira ordem no termo de perda de carga. Isto se deve ao atendimento da condição de estabilidade para todas instalações, com manipulação somente do número de divisões da tubulação a ser analisada, tendo em vista as limitações práticas do comprimento da tubulação principal e da velocidade do líquido.
- A análise da instalação do Capítulo IV pelos métodos propostos por Vibert | 9 | e por Streeter | 15 | apresentam resultados conservadores em relação ao Método das Características por desprezarem a influência da celeridade da perturbação de pressão, do momento de inércia dos conjuntos de bombeamento e da perda de carga em toda a instalação. Observa-se que os equacionamentos mencionados são simplificados em relação ao modelo matemático desenvolvido nos Capítulos II e III.  
Porém, a pequena divergência encontrada é consequência da baixa perda de carga da instalação analisada.
- Quanto maior o volume inicial de ar do RHO tanto menor será a oscilação de pressão durante o escoamento variado. Em sistemas comuns, uma redução sensível das variações de pressão se observa para volumes de ar da ordem de 1,0 a 2,0% do volume da tubulação principal.  
Acima desse limite, o RHO passa a influenciar de forma constante o fenômeno transiente.



- Uma análise termodinâmica mostra que a transformação politrópica com expoente  $n$  constante não representa o fenômeno que toma lugar no RHO.

O Primeiro Princípio da Termodinâmica dá uma visão total do processo, inclusive em seus trechos intermediários, bastando para tanto estimar convenientemente o termo de troca de calor. Essa análise torna-se fundamental em usinas hidrelétricas, onde a regulação das turbinas é fundamental, bem como em sistemas de bombeamento, onde o controle é feito com bombas de velocidade variável. Nesses casos há necessidade de conhecer os pontos intermediários do processo, além dos extremos.

No sistema particular analisado neste trabalho considerando transformação politrópica e o primeiro princípio da termodinâmica, verificou-se divergência desprezível dos valores extremos do escoamento transiente, embora os valores intermediários mostrem maiores desvios.

- A expressão utilizada por Graze para análise de RHO é uma forma modificada do Primeiro Princípio da Termodinâmica aplicado a sistemas.

- Aproximação de segunda ordem na integração da expressão derivada do Primeiro Princípio da Termodinâmica não levou a resultados significativamente diferentes daqueles obtidos com aproximação de primeira ordem, bem como daqueles obtidos através de convecção forçada.

No primeiro caso, o fato é consequência do pequeno intervalo de tempo considerado no processamento, resultante de um grande número de divisões a que foi submetida a tubulação principal.

No segundo caso, é consequência da baixa velocidade considerada para a convecção forçada.

- A oscilação de temperatura do RHO é sensível, com amplitude aproximada de  $70^{\circ}\text{K}$ . Nota-se que a temperatura mínima é inferior à de solidificação da água, acarretando necessidade de inclusão do termo de calor latente, correspondente à mudança de estado da água em contato com o ar.

- O efeito da perda de carga distribuída na tubulação principal sobre o escoamento transiente é significativamente diverso do efeito da perda de carga no orifício junto ao RHO.
- A perda de carga distribuída reduz a sobrepressão ao longo da tubulação principal considerando o RHO provido ou não de um orifício.
- Um orifício acentuadamente assimétrico é utilizado para proporcionar substancial redução da sobrepressão sem abaixar a linha de subpressão.
- O orifício diferencial estudado neste trabalho (figura 7.1) não apresenta grande potencial de cavitação, quando o escoamento se dá no sentido RHO - tubulação principal.
- O modelo matemático simplificado não apresenta grandes divergências do completo, no trecho compreendido entre a estação elevatória e o ponto médio da tubulação principal, podendo portanto ser utilizado para predimensionamento do RHO, antes mesmo da escolha dos conjuntos de bombeamento.  
A divergência maior entre os modelos é verificada em sistemas de baixa perda de carga com RHO provido de orifício diferencial.  
Desta forma, devem ser encaradas com restrições as observações a respeito dos valores de sub e sobrepressão, no trecho compreendido entre o ponto médio da tubulação principal e o reservatório com nível especificado, quando a análise for feita através do modelo simplificado.

Para uma conduta futura, a respeito do comportamento de RHO recomenda-se:

- Equacionar a quantidade de calor, de modo a incluir a troca por convecção natural e forçada do ar, e por mudança de estado da água.  
Observa-se que haverá necessidade de um estudo abordando os diferentes tipos de troca de calor em conjunto, levando em



consideração diferentes geometrias de RHO.

- Desenvolver modelo matemático considerando um gradiente de temperatura do ar no interior do RHO, para estudar os desvios de uma distribuição não uniforme em relação aos outros equacionamentos.
- Montar uma instalação piloto a fim de, através de ensaios, - aferir os modelos matemáticos desenvolvidos, bem como analisar as simplificações em comparação com a realidade física. A instalação deverá oferecer condições para registro das características hidráulicas e térmicas dos fluidos.
- Fazer estudos sobre Câmara de Vórtice, visando abordar o fenômeno da cavitação bem como a perda de carga diferencial em função de sua geometria.
- Desenvolver condições de estabilidade e limites de aplicação, para aproximação de primeira e segunda ordem, na integração da expressão derivada do Primeiro Princípio da Termodinâmica, tendo em vista o intervalo de tempo considerado e as características da instalação.

## APÊNDICE A

## LISTAGEM DOS PROGRAMAS UTILIZADOS NO CAPÍTULO III

## A.1 CÁLCULO DO RHO CONSIDERADA A INFLUÊNCIA DOS CONJUNTOS ELEVATÓRIOS E A PRESENÇA DE INÉRCIA CONCENTRADA.

```

C      CONDIÇÕES DE CONTORNO JUNTO AO TANQUE HIDROPNEUMÁTICO-SEM ORIFÍCIO
C      E COM INÉRCIA CONCENTRADA
65    C02=2.*L3/(G*AR3*DT)
      C01=H4-H2(1)+F3*L3/(G*D3*AR3*AR3)*Q3*ABS(Q3)-C02*Q3
      CM2=H2(2)-Q2(2)*(B-R2*ABS(Q2(2)))
      CP1=H1(N1)+Q1(N1)*(B-R1*ABS(Q1(N1)))
      DO 51 I=1,KIT
      VV=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
      IF(VV.LT.VPEQ) VP=VPEQ
      F1=(((1./(B+B))*(B*CP1-B*B*QP3+B*CM2))-C01-C02*QP3)+HB-Z)*(VP**EN)-
      *C
      DFDO=((-B*B/(B+B)-C02)*(VP**EN))- .5*(EN*DT*C/VP)
      DQ=-F1/DFDO
51    QP3=QP3+DQ
      VV=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
      IF(VV.LT.0.) VV=0
      QP2(1)=1/(B+B)*(CP1-B*QP3-CM2)
      QP1(NS1)=QP3+QP2(1)
      HP1(NS1)=CP1-B*QP1(NS1)
      HP2(1)=HP1(NS1)
      HP=HP2(1)
      HP4=HP-C01-C02*QP3
      DO 28 I=1,NS1
      H1(I)=HP1(I)
      Q1(I)=QP1(I)
28    P1(I)=H1(I)-EL1(I)
      DO 11 I=1,NS2
      H2(I)=HP2(I)
      Q2(I)=QP2(I)
11    P2(I)=H2(I)-EL2(I)
      H=HP
      Q3=QP3
      H4=HP4
      P4=H4-Z

```



## A.2 - CÁLCULO DOS PONTOS INTERIORES COM SEPARAÇÃO DE COLUNA.

```

HP(NS)=ELR
C CALCULO DOS PONTOS INTERIORES COM SEPARAÇÃO DE COLUNA
DO 44 I=2,N
CP=H(I-1)+ Q(I-1)*(E-R*ABS(Q(I-1)))
IF(ICA(I+1).EQ.1) CM=H(I+1)-QPX(I+1)*(B-R*ABS(QPX(I+1)))
IF(ICA(I+1).EQ.0) CM=H(I+1)-Q(I+1)*(B-R*ABS(Q(I+1)))
IF(ICA(I).EQ.1) GO TO 43
HP(I)=.5*(CP+CM)
IF((HP(I)-EL(I)).LT.HV) GO TO 42
QP(I)=(CP-HP(I))/B
GO TO 44
42 HP(I)=EL(I)+HV
ICA(I)=1
QPX(I)=Q(I)
43 QP(I)=(HP(I)-CM)/B
QP(I)=(CP+HP(I))/B
VCAV(I)=VCAV(I)+.5*LT*(Q(I)+QP(I)-QPP(I)-QPX(I))
QPX(I)=QPP(I)
IF(VCAV(I).GT.0) GO TO 44
ICA(I)=0
VCAV(I)=0
HP(I)=.5*(CP+CM)
QP(I)=(CP-HP(I))/B
44 CONTINUE
C INDICES DE CONTORNO A MONTANTE COM SEPARAÇÃO DE COLUNA
IF(Q(1).GT.0) GO TO 78
KB=1
V=0
AL=0
110 IF(ICA(2).EQ.1) CM=H(2)-QPX(2)*(B-R*ABS(QPX(2)))
IF(ICA(2).EQ.0) CM=H(2)-Q(2)*(B-R*ABS(Q(2)))
IF(ICA(1).EQ.1) GO TO 130
HP(1)=CM
IF((HP(1)-EL(1)).LT.HV) GO TO 120
QP(1)=0
GO TO 65
120 HP(1)=EL(1)+HV
ICA(1)=1
QPX(1)=0
130 QP(1)=(HP(1)-CM)/B
QP(1)=0
VCAV(1)=VCAV(1)+.5*LT*(Q(1)+QP(1)-QPP(1)-QPX(1))
QPX(1)=QPP(1)
IF(VCAV(1).GT.0) GO TO 65
ICA(1)=0
VCAV(1)=0
QP(1)=0
HP(1)=CM
GO TO 65
78 CONTINUE
IF(VB.EQ.1) GO TO 110

```

## APÊNDICE B

## LISTAGEM DOS PROGRAMAS UTILIZADOS NO CAPÍTULO VI

CÁLCULO DO RHO CONSIDERADA A INFLUÊNCIA DOS CONJUNTOS ELEVATÓRIOS, A PRESENÇA DE INÉRCIA CONCENTRADA E O FENÔMENO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.

## B.1 TROCA DE CALOR POR CONVECÇÃO NATURAL E APROXIMAÇÃO DE PRIMEIRA ORDEM.

```

C  CONDIÇÕES DE CONTORNO JUNTO AO TANQUE HIDROPNEUMÁTICO-SEM ORIFÍCIO
C  E COM INÉRCIA CONCENTRADA
65  C02=2.*L3/(G*AR3*DT)
    C01=H4-H2(1)+F3*L3/(G*D3*AR3*AR3)*Q3*ABS(Q3)-C02*Q3
    CM2=H2(2)-Q2(2)*(B-H2*ABS(Q2(2)))
    CP1=H1(NS1)+S1(NS1)*(B-R1*ABS(Q1(NS1)))
    XC1=H4+HB-Z
    D0 51 I=1,KIT
    VP=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
    IF(VP.LT.VPEQ) VP=VPEQ
    XC2=1./(B+B)*(B*CP1-B*B*QP3+B*CM2)-C01-C02*QP3+HB-Z
    XC3=(T0-(GAMA*XC1)*VP)/CLI
    J1=64.343*DT*(T0-(GAMA*XC1*VP)/CLI)/(GAMA*XC1*VP)
    F1=((2.*VP-(QP3+Q3)*DT)/(2.*VP)**JE2*(XC2/XC1)**J3-EXP(J1)
    DFDQ=((2.*VF-(QP3+Q3)*DT)/(2.*VP)**JE2*J3*(XC2/XC1)**(J3-1.)*
    *(B*B/(B+B)-C02)/XC1)+(XC2/XC1)**J3*JE2*((2.*VP-(QP3+Q3)*DT)/
    *(2.*VP)**(JE2-1.))*(-DT/(2.*VP))
    DQ=-F1/DFDQ
51  QP3=QP3+DQ
    VV=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
    IF(VV.LT.0.) VV=0
    QP2(1)=1/(B+B)*(CP1-B*QP3-CM2)
    QP1(NS1)=QP3+QP2(1)
    HP1(NS1)=CP1-B*QP1(NS1)
    HP2(1)=HP1(NS1)
    HP=HP2(1)
    HP4=HP-C01-C02*QP3
    D0 28 I=1,NS1
    H1(I)=HP1(I)
    Q1(I)=QP1(I)
28  P1(I)=H1(I)*EL1(I)
    D0 11 I=1,NS2
    H2(I)=HP2(I)
    Q2(I)=QP2(I)
11  P2(I)=H2(I)*EL2(I)
    H=HP
    Q3=QP3
    H4=HP4
    P4=H4-Z
    TK=(GAMA*(H4+HB-Z)*VP)/CLI

```



B.2 TROCA DE CALOR POR CONVECÇÃO NATURAL E APROXIMAÇÃO DE SEGUNDA ORDEM.

```

C      CONDIÇÕES DE CONTORNO JUNTO AO TANQUE HIDROPNEUMÁTICO-SEM ORIFÍCIO
C      E COM INÉRCIA CONCENTRADA
65     C02=2.*L3/(G*AR3*DT)
        C01=H4-H2(1)+F3*L3/(G*D3*AR3*AR3)*Q3*ABS(Q3)-C02*Q3
        CM2=H2(2)-Q2(2)*(B-R2*ABS(Q2(2)))
        CP1=H1(N1)+Q1(N1)*(B-R1*ABS(Q1(N1)))
        XC1=H4+HB-Z
        DO 51 I=1,KIT
        VP=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
        IF(VP.LT.VPEQ) VP=VPEQ
        HP4=1./(B+B)*(B*CP1-B*B*QP3+B*CM2)-C01-C02*QP3
        J12=GAMA*(0.5*(HP4+H4)+HB-Z)*(VP-(QP3+Q3)*DT*0.25)
        J11=T0-J12/CLI
        XC2=1./(B+B)*(B*CP1-B*B*QP3+B*CM2)-C01-C02*QP3+HB-Z
        XJ13=ABS(J11)/J11*ABS(J11)**E3
        J1=1.4*ATT*DT*XJ13*ABS(J11)/J12
        DJ12=-GAMA*((H4+XC2+HB-Z)*0.125*DT-(VP-(QP3+Q3)*DT*0.25)*(B*B/
        * (2.*(B+B))+C02/2.))
        DJ11=-DJ12/CLI
        DJL1=1.4*ATT*DT*(XJ13/J12)*(4.*DJ11/3.-ABS(J11/J12)*DJ12)
        F1=((2.*VP-(QP3+Q3)*DT)/(2.*VP))**JE2*(XC2/XC1)**J3-EXP(J1)
        DFDQ=((2.*VP-(QP3+Q3)*DT)/(2.*VP))**JE2*J3*(XC2/XC1)**(J3-1.)*
        *((-B*B/(B+B)-C02)/XC1)+(XC2/XC1)**J3*JE2*((2.*VP-(QP3+Q3)*DT)/
        *(2.*VP))**((JE2-1.)*(-DT/(2.*VP)))
        DFDQ=DFDQ-EXP(J1)*DJL1
51     DQ=-F1/DFDQ
        QP3=QP3+DQ
        VV=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
        IF(VV.LT.0.) VV=0
        QP2(1)=1/(B+B)*(CP1-B*QP3-CM2)
        QP1(NS1)=QP3+QP2(1)
        HP1(NS1)=CP1-B*QP1(NS1)
        HP2(1)=HP1(NS1)
        HP=HP2(1)
        HP4=HP-C01-C02*QP3
        DO 28 I=1,NS1
        H1(I)=HP1(I)
        Q1(I)=QP1(I)
28     P1(I)=H1(I)-EL1(I)
        DO 11 I=1,NS2
        H2(I)=HP2(I)
        Q2(I)=QP2(I)
11     P2(I)=H2(I)-EL2(I)
        H=HP
        Q3=QP3
        H4=HP4
        P4=H4-Z
        TK=(GAMA*(HP4+HB-Z)*VP)/CLI

```

B.3 TROCA DE CALOR POR CONVECÇÃO FORÇADA E APROXIMAÇÃO DE PRIMEIRA ORDEM.

```

C   CONDIÇÕES DE CONTORNO JUNTO AO TANQUE, HIDROPNEUMÁTICO-SEM ORIFÍCIO
C   E COM INÉRCIA CONCENTRADA
65  C02=2.*L3/(G*AR3*DT)
    C01=H4-H2(1)+F3*L3/(G*D3*AR3*AR3)*Q3*ABS(Q3)-C02*Q3
    CM2=H2(2)-Q2(2)*(B-R2*ABS(Q2(2)))
    CP1=H1(N1)+G1(N1)*(E-R1*ABS(Q1(N1)))
    XC1=H4+HB-Z
    DO 51 I=1,KIT
    VP=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
    IF(VP.LT.VPEQ) VP=VPEQ
    XC2=1./((B+B)*(B*CP1-B*B*QP3+B*CM2))-C01-C02*QP3+HB-Z
    XC3=(T0-(GAMA*XC1)*VP)/CLI
    J1=64.343*DT*(T0-(GAMA*XC1*VP)/CLI)/(GAMA*XC1*VP)
    F1=((2.*VP-(QP3+Q3)*DT)/(2.*VP))*JE2*(XC2/XC1)**J3-EXP(J1)
    DFDQ=((2.*VP-(QP3+Q3)*DT)/(2.*VP))*JE2*J3*(XC2/XC1)**(J3-1.)*
    *((-B*B/(B+B)-C02)/XC1)+(XC2/XC1)**J3*JE2*((2.*VP-(QP3+Q3)*DT)/
    *(2.*VP))*((JE2-1.)*(-DT/(2.*VP)))
    DQ=-F1/DFDQ
51  QP3=QP3+DQ
    VV=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
    IF(VV.LT.0.) VV=0
    QP2(1)=1./((B+B)*(CP1-B*QP3-CM2))
    QP1(NS1)=QP3+QP2(1)
    HP1(NS1)=CP1-B*QP1(NS1)
    HP2(1)=HP1(NS1)
    HP=HP2(1)
    HP4=HP-C01-C02*QP3
    DO 28 I=1,NS1
    H1(I)=HP1(I)
    Q1(I)=QP1(I)
28  P1(I)=H1(I)-EL1(I)
    DO 11 I=1,NS2
    H2(I)=HP2(I)
    Q2(I)=QP2(I)
11  P2(I)=H2(I)-EL2(I)
    H=HP
    Q3=QP3
    H4=HP4
    P4=H4-Z
    TK=(GAMA*(HP4+HB-Z)*VP)/CLI

```



## APÊNDICE C

## LISTAGEM DOS PROGRAMAS UTILIZADOS NO CAPÍTULO VII

## C.1 CÁLCULO DO RHO CONSIDERADA A INFLUÊNCIA DOS CONJUNTOS ELEVATÓRIOS, A PRESENÇA DE INÉRCIA CONCENTRADA E ORIFÍCIO DIFERENCIAL.

```

C   CONDIÇÕES DE CONTO RNO JUNTO AO TANQUE HIDROPNEUMÁTICO COM ORIFÍCIO
C   COM PERDA DE CARGA DIFERENCIAL E INÉRCIA CONCENTRADA
65  C02=2.*L3/(G*AR3*DT)
    C01=H3-H2(1)+F3*L3/(G*D3*AR3*AR3)*Q3*ABS(Q3)-C02*Q3
    CM2=H2(2)-Q2(2)*(B-R2*ABS(Q2(2)))
    CP1=H1(N1)+Q1(N1)*(B-R1*ABS(Q1(N1)))
    DO 51 I=1,KIT
    VP=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
    IF(VP.LT.VPEQ) VP=VPEQ
    F1=((1./(B+B))*(B*CP1-B*B*QP3+B*CM2))-C01-C02*QP3
    *- (QP3*ABS(QP3)*CL)/(2.*G*.6168*DM**4.)+HB-Z)*(VP**EN)-C
    DFDQ=((-B*R/(B+B)-C02)-(QP3*CL)/(G*.6168*DM**4.)
    *)*(VP**EN)-0.5*(EN*DT*C/VP)
    DQ=-F1/DFDQ
51  QP3=QP3+DQ
    IF(QP3)53,53,52
53  VV=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
    IF(VV.LT.0.) VV=0
    QP2(1)=1/(B+B)*(CP1-B*QP3-CM2)
    QP1(NS1)=QP3+QP2(1)
    HP1(NS1)=CP1-B*QP1(NS1)
    HP2(1)=HP1(NS1)
    HP=HP2(1)
    HP3=HP-C01-C02*QP3
    HP4=HP3+(QP3*QP3*CL)/(G*.6168*DM**4.*2.*G)
    GO TO 54
52  CM2=H2(2)-Q2(2)*(B-R2*ABS(Q2(2)))
    CP1=H1(N1)+Q1(N1)*(B-R1*ABS(Q1(N1)))
    DO 61 I=1,KIT
    VP=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
    IF(VP.LT.VPEQ) VP=VPEQ
    F1=((1./(B+B))*(B*CP1-B*B*QP3+B*CM2))-C01-C02*QP3
    *- (QP3*ABS(QP3)*CLL)/(2.*G*.6168*DM**4.)+HB-Z)*(VP**EN)-C
    DFDQ=((-B*R/(B+B)-C02)-(QP3*CLL)/(G*.6168*DM**4.)
    *)*(VP**EN)-0.5*(EN*DT*C/VP)
    DQ=-F1/DFDQ
61  QP3=QP3+DQ
    VV=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
    IF(VV.LT.0.) VV=0
    QP2(1)=1/(B+B)*(CP1-B*QP3-CM2)
    QP1(NS1)=QP3+QP2(1)
    HP1(NS1)=CP1-B*QP1(NS1)
    HP2(1)=HP1(NS1)
    HP=HP2(1)
    HP3=HP-C01-C02*QP3
    HP4=HP3-(QP3*QP3*CLL)/(2*G*.6168*DM**4.)
54  CONTINUE
    DO 28 I=1,NS1

    H1(I)=HP1(I)
    Q1(I)=QP1(I)
28  P1(I)=H1(I)-FL1(I)
    DO 11 I=1,NS2
    H2(I)=HP2(I)
    Q2(I)=QP2(I)
11  P2(I)=H2(I)-EL2(I)
    H=HP
    Q3=QP3
    H3=HP3
    H4=HP4

```

## C.2 VERIFICAÇÃO DO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO NO ORIFÍCIO DIFERENCIAL.

```

C      CONDIÇÕES DE CONTO RNO JUNTO AO TANQUE HIDROPNEUMÁTICO COM ORIFÍCIO
C      COM PERDA DE CARGA DIFERENCIAL E INÉRCIA CONCENTRADA
65     C02=2.*L3/(G*AR3*DT)
        C01=H3-H2(1)+F3*L3/(G*D3*AR3*AR3)+Q3*ABS(Q3)-C02*Q3
        CM2=H2(2)-Q2(2)*(B-R2+ABS(Q2(2)))
        CP1=H1(N1)+Q1(N1)*(B-R1+ABS(Q1(N1)))
        DO 51 I=1,KIT
        VP=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
        IF(VP.LT.VPEQ) VP=VPEQ
        F1=((1./(B+B))*(B*CP1-B*B*QP3+B*CM2))-C01-C02*QP3
        *(QP3*ABS(QP3)*CL)/(2.*G*.6168*DM**4.)+HB-Z)*(VP**EN)-C
        DFDQ=((-B*B/(B+B)-C02)-(QP3*CL)/(G*.6168*DM**4.)
        *)*(VP**EN)*0.5*(EN*DT*C/VP)
        DQ=-F1/DFDQ
51     QP3=QP3+DQ
        IF(QP3)53,53,52
53     VV=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
        IF(VV.LT.0.) VV=0
        QP2(1)=1/(B+B)*(CP1-B*QP3-CM2)
        QP1(NS1)=QP3+QP2(1)
        HP1(NS1)=CP1-B*QP1(NS1)
        HP2(1)=HP1(NS1)
        HP=HP2(1)
        HP3=HP-C01-C02*QP3
        HP4=HP3+(QP3*QP3*CL)/(2.*G*.6168*DM**4.*2.*G.)
        IF(QP3*GT.-0.5) GO TO 54
        CAVIT=(HP3-Z)-HV)/(HP4+QP3*QP3/(2.*G*AR3**2.))-HP3
        IF(CAVIM.LE.CAVIT) GO TO 257
        CAVIM=CAVIT
        ICA=2
        GO TO 54
52     CM2=H2(2)-Q2(2)*(B-R2+ABS(Q2(2)))
        CP1=H1(N1)+Q1(N1)*(B-R1+ABS(Q1(N1)))
        DO 61 I=1,KIT
        VP=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
        IF(VP.LT.VPEQ) VP=VPEQ
        F1=((1./(B+B))*(B*CP1-B*B*QP3+B*CM2))-C01-C02*QP3
        *(QP3*ABS(QP3)*CL)/(2.*G*.6168*DM**4.)+HB-Z)*(VP**EN)-C
        DFDQ=((-B*B/(B+B)-C02)-(QP3*CL)/(G*.6168*DM**4.)
        *)*(VP**EN)*0.5*(EN*DT*C/VP)
        DQ=-F1/DFDQ
61     QP3=QP3+DQ
        VV=VV-DT*.5*(QP3+Q3)
        IF(VV.LT.0.) VV=0
        QP2(1)=1/(B+B)*(CP1-B*QP3-CM2)
        QP1(NS1)=QP3+QP2(1)
        HP1(NS1)=CP1-B*QP1(NS1)
        HP2(1)=HP1(NS1)
        HP=HP2(1)
        HP3=HP-C01-C02*QP3
        HP4=HP3-(QP3*QP3*CL)/(2.*G*.6168*DM**4.)
257    ICA=1
54     CONTINUE
        DO 28 I=1,NS1
        H1(I)=HP1(I)
        Q1(I)=QP1(I)
28     P1(I)=H1(I)*EL1(I)
        DO 11 I=1,NS2
        H2(I)=HP2(I)
        Q2(I)=QP2(I)
11     P2(I)=H2(I)*EL2(I)
        H=HP
        Q3=QP3
        H3=HP3
        H4=HP4
        P4=H4-2

```









```

54  MP3=HP3*(OP3+OP3=CLL)/(2.*G+.618*DM**4.)
    CONTINUE
    DO 28 I=1,NS
      M(I)=M(I)
      C(I)=CP(I)
28  P(I)=M(I)-FL(I)
      O3=OP3
      H3=HP3
      W3=WP3
      PA=HA-Z

```

```

C  REENCAD DO VALORES EXTREMOS DO TRANSITORIO
    DO 104 I=1,NS
      IF(M(I).GE.HMAX(I)) HMAX(I)=M(I)
      IF(M(I).LT.HMIN(I)) HMIN(I)=M(I)
      IF(P(I).GE.PMAX(I)) PMAX(I)=P(I)
      IF(P(I).LT.PMIN(I)) PMIN(I)=P(I)
104  IF(H4.GE.HMAX4) HMAX4=H4
      IF(H4.LT.HMIN4) HMIN4=H4
      IF(P4.GE.PMAX4) PMAX4=P4
      IF(P4.LT.PMIN4) PMIN4=P4
      IF(VV.GE.VVMAX) VVMAX=VV
      IF(VV.LT.VVMIN) VVMIN=VV
      IF(T.GT.TV) WRITE(6,102)

```

```

102  FORMAT('//////40X',VALORES EXTREMOS DO TRANSITORIO',//
112X,'VOLUME',11X,'TANGUE',12X,'AR(M3)',20X,'(M)',
22X,'X/L= .0 .1 .2 .3 .4 .5 .6 .
.7 .8 .9 1.0')
      IF(T.LT.TV) GO TO 105
      WRITE(6,103)VVMAX,HMAX4,(HMAX(I),I=1,NS),VVMIN,
      HMIN4,(HMIN(I),I=1,NS),PMAX4,(PMAX(I),I=1,NS),
      PMIN4,(PMIN(I),I=1,NS)
103  FORMAT(1H,7X,'MAX=',F8.3,1X,'HMAX=',12F8.2/3X,'MIN=',F8.3,
10X,'HMIN=',12F8.2/3X,'PMAX=',12F8.2/3X,'PMIN=',12F8.2)
      GO TO 10
105  IF(K/JFF=JPR=EQ,K) GO TO 16
      GO TO 17
99  STOP
    END

```

```

C 0021012A10
C 0021013011
C 0021013011
C 0021013110
C 0021013312
C 0021013514
C 0021013E12
C 0021013C11
C 0021013C10
C 0021013C15
C 0021013E15
C 0021013E15
C 0021014C10
C 0021014510
C 0021014A10
C 0021014F10
C 0021015011
C 0021015E12
C 0021015A13
C 0021015C14
C 0021015E15
C 0021016110
C 0021016311
C 0021016E12
C 0021016E12
C 0021016E12
C 0021016E12
E 0021016E12
E 0021016E12
E 0021016914
C 0021017715
C 0021018E15
C 0021019412
C 0021019412
C 0021019412
C 0021019415
C 0021019711
E 0021019714
C 0021019E13

```

0021019A10 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT 0021000A  
0021019C11 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT AT 00210000  
SEGMENT 002 IS 0181 LONG

FORMAT SEGMENT IS 0097 LONG  
START OF SEGMENT 008  
SEGMENT 008 IS 0020 LONG

NO ERRORS DETECTED. NUMBER OF CARDS = 156.  
COMPILATION TIME = 9 SECONDS ELAPSED, 2.73 SECONDS PROCESSING.  
D2 STACK SIZE = 16 WORDS. FILESIZE = 140 WORDS. ESTIMATED CORE STORAGE REQUIREMENT = 849 WORDS.  
TOTAL PROGRAM CODE = 314 WORDS. ARRAY STORAGE = 110 WORDS.  
NUMBER OF PROGRAM SEGMENTS = 8. NUMBER OF DISK SEGMENTS = 16.  
PROGRAM CODE FILE = (137PWC)REINLOAD UN PACK.  
COMPILE COMPILED ON 08/04/78 (FORTRAN UN PACK).

## APÊNDICE E

## DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO PARA ADIMENSIONALIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO

Apresenta-se a seguir o desenvolvimento efetuado para levantar as curvas adimensionais apresentadas no Capítulo IX.

Fixando os valores do diâmetro da tubulação principal ( $D = 900\text{mm}$ ), da inércia concentrada ( $D_3 = 900\text{mm}$ ), do comprimento da inércia concentrada ( $L_3 = 8\text{ m}$ ), da celeridade ( $a = 1045\text{ m/s}$ ), dos fatores de atrito ( $f_1 = f_3 = 0,018$ ), da altura estática ( $H_H = 92,4\text{ m}$ ), da pressão atmosférica ( $H_B = 9,5\text{ m}$ ) e das funções para estabelecer a perda de carga apresentadas no Capítulo VII, pode-se impor condições para as demais características da instalação a fim de encontrar instalações com adimensionais desejados.

O parâmetro da tubulação principal será:

$$\rho^* = \frac{a V_o}{2g H_o^*} = \frac{a Q_o}{2g A H_o^*} = 83,778 \frac{Q_o}{H_o^*} \quad (\text{E.1})$$

o parâmetro  $\phi^*$  será:

$$\phi^* = \frac{2V_o a}{Q_o L^*} = \frac{2090 \cdot V_o}{Q_o L^*} \quad (\text{E.2})$$

A altura total será:

$$H_o = H_H + f \frac{L^*}{D^5} \frac{8Q_o^2}{\pi^2 g} = 92,4 + 25,19 \cdot 10^{-4} \cdot L Q_o^2 \quad (\text{E.3})$$

ou em termos absolutos

$$H_o^* = 101,9 + 25,19 \cdot 10^{-4} L^* \cdot Q_o^2 \quad (\text{E.4})$$



onde

$$H_{fo} = 25,10^{-4} L^* \cdot Q_o^2 \quad (E.5)$$

Como exemplo deve-se encontrar uma instalação com as seguintes características adimensionais

$$- \rho^* = 0,5$$

$$- \phi^* = 10$$

$$- K_f^* = 0,1$$

$$- K_{or}^* = 0,4$$

$$\text{Para } K_f^* = 0,1 \quad \therefore \frac{H_{fo}}{H_o^*} = 0,1$$

Substituindo os valores

$$\frac{H_{fo}}{H_o^*} = \frac{25,19 \cdot 10^{-4} \cdot L^* \cdot Q_o^2}{101,9 + 25,19 \cdot 10^{-4} L^* \cdot Q_o^2} = 0,1 \quad (E.6)$$

Resolvendo (E.6)

$$(L^* \cdot Q_o^2) = 4495 \quad (E.7)$$

Substituindo (E.7) em (E.4) :

$$H_o^* = 101,9 + 25,19 \cdot 10^{-4} \cdot 4495$$

$$H_o^* = 113,22 \text{ m ou } H_o = 103,72 \quad (E.8)$$

Substituindo (E.8) em (E.1) para  $\rho^* = 0,5$

$$\rho^* = 8,3778 \cdot 10^7 \frac{Q_o}{H_o^*}$$

$$Q_o = \frac{0,5 \cdot 113,22}{83,778} = 0,675$$

$$Q_o = 0,675 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{E.9})$$

O comprimento da tubulação principal é imediato

$$L^* = \frac{4495}{Q_o^2} = \frac{4495}{0,675^2} = 9856,8$$

$$L^* = 9856,8 \text{ m}$$

Com  $L^* = L + L_3$

$$L = 9848,8 \text{ m} \quad (\text{E.10})$$

Considerando o modelo matemático simplificado, com um trecho de tubulação somente, tem-se o resumo da linha

$$H_o = 103,72 \text{ m}$$

$$Q_o = 0,675 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L = 9848,8 \text{ m}$$

Por outro lado, as características do RHO são

$$V_o = \frac{\phi^* Q_o L}{2090} = \frac{10 \cdot 0,675 \cdot 9848,8}{2090}$$

$$V_o = 31,81 \text{ m}^3 \quad (\text{E.11})$$

As características do orifício são

$$K_{or}^* = 0,4 \quad \therefore \frac{H_{or}}{H_o^*} = 0,4$$



Como  $H_o^* = 113,22 \text{ m}$

$$H_{or} = K_{or}^* \cdot H_o^* = 45,22$$

$$H_{or} = 45,22 \text{ m} \quad (\text{E.12})$$

Lembrando que (E.12) é a perda de carga provocada pelo orifício na entrada do RHO, quando a vazão nominal está entrando no mesmo, tem-se

$$M_E = 0,5 \frac{D_M^2}{D_3^2} \quad (\text{E.13})$$

$$C_{LL} = 2,922 - 4,649 M_E + 1,596 M_E^2 \quad (\text{E.14})$$

$$\Delta H_{34} = C_{LL} \frac{8 Q_o^2}{\pi^2 D_M^4 g} \quad (\text{E.15})$$

Substituindo (E.13) e (E.14) em (E.15)

$$\Delta H_{34} = (2,922 - 4,649 M_E + 1,596 M_E^2) \frac{8 Q_o^2}{\pi^2 D_M^4 g} \quad (\text{E.16})$$

$$e \quad \Delta H_{34} = \left[ 2,922 - 4,649 \left( 0,5 \frac{D_M^2}{D_3^2} \right) + 1,596 \left( 0,5 \frac{D_M^2}{D_3^2} \right)^2 \right] \cdot \frac{8 Q_o^2}{\pi^2 D_M^4 g} \quad (\text{E.17})$$

Resolvendo (E.17) para  $D_3 = 0,9 \text{ m}$ ,  $\Delta H_{34} = 45,22 \text{ m}$  e  $Q_o = 0,675 \text{ m}^3/\text{s}$  tem-se

$$- 2869,9342 D_M^4 - 6,8629 D_M^2 + 6,9879 = 0 \quad (\text{E.18})$$

Resolvendo (E.18) fazendo

$$D_M^2 = 0,04816 \quad \text{ou} \quad D_M = 0,219 \text{ m} \quad (\text{E.19})$$

Após a determinação das características da tubulação principal, do RHO e do orifício diferencial deve-se verificar a condição de estabilidade dos cálculos a serem efetuados.

No exemplo, a tubulação principal será dividida em 10 trechos e a perda de carga será tratada com aproximação de primeira ordem.

Nessas condições deve-se ter

$$\frac{\Delta t \cdot f \cdot Q_0}{4 DA} \ll 1 \quad (\text{E.20})$$

$$\Delta t = \frac{984,88}{1045} = 0,942 \text{ s}$$

Substituindo os valores

$$\frac{0,942 \cdot 0,018 \cdot 0,675}{4 \cdot 0,9 \cdot 0,636} = 0,00499 \ll 1$$

Dessa forma está satisfeita a condição de estabilidade para o método de análise do sistema.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- |1| - Michaud, J. - "Coups de Béliet dans les Conduites" - Bulletin de la Societ  Vandoise des Ingénieurs et des Architectes, Lausanne, 1878.
- |2| - Almeida, A.B. e Hipólito, J. - "Análise do Golpe de Ariete em Conduitas Munidas de Reservatórios de Ar Comprimido - Utiliza o do Método das Características" - LNEC, Lisboa, 1978.
- |3| - Joukowski, N.E. - "Water Hammer" - Journal of American Water Works Association, Vol.24, 1904.
- |4| - Dupont, A. - "Hydraulique Urbaine" - Tome II - Eyrolles, Paris, 1974.
- |5| - American Water Works Association - "Steel Pipe Design and Installation" - M-11, New York, 1964.
- |6| - Allievi, L. - "Air Chambers for Discharge Pipes" - Transaction ASME, Vol.59, Nov. 1937.
- |7| - Evangelisti, G. - "L'Impiego delle Camera d'Aria per Attenuare i Colpi d'Ariete nelle Condotte Elevatorie" - L'Elettrotecnica, Vol.XXII, n  7, Apr. 1937.
- |8| - Sliosberg, P. - "Calcul des Reservoirs d'Air" - La Houille Blanche, n  3, 1952.
- |9| - Vibert, A. - "La Protection des Conduites de Refoulement contre les Surpressions" - La Genie Civil - Tome CXXVII - n  6 - Mars 1950.
- |10| - Combes, G. e Borot, R. - "Nouvel Abaque pour le Calcul de Reservoirs d'Air Tenu Compte de Pertes de Charge" - La Houille Blanche, n  5, Oct., Nov., 1952.

- |11| - Bergeron, L. - "Du Coup de Béliet en Hydraulique au Coup de Foudre en Electricité" - Dunod, Paris, 1950.
- |12| - Dubin, L. e' Gueneau, A. - "Determination des Dimensions Caracteristiques d'un Reservoir d'Air sur une Installation Elevatoire" - La Houille Blanche, n° 6, 1955.
- |13| - Evans, W.E. e Crawford, C.C. - "Design Charts for Air Chambers on Pump Lines" - Transaction ASCE, Vol.119, 1954.
- |14| - Parmakian, J. - "Waterhammer Analysis", Dover, New York, 1963.
- |15| - Streeter, V. - "Handbook of Fluid Dynamics" - McGraw-Hill, New York, 1961.
- |16| - Streeter, V. - "Hydraulic Transients" - McGraw-Hill, New York, 1967.
- |17| - Wylie, B. e Streeter, V. - "Fluid Transients" - McGraw-Hill, New York, 1978.
- |18| - Graze, H.R., Schubert, J. e Forrest, J.A. - "Analysis of Field Measurement of Air Chamber Installations" - 2<sup>nd</sup> International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, 1976.
- |19| - Martins, R.M. - "Transitórios Hidráulicos - Proteção de Instalação de Recalque Através de Tanque Hidropneumático" - 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental, ABES, Manaus, 1979.
- |20| - Koelle, E. - "Transitórios Hidráulicos" - EPUSP, S. Paulo, 1977.
- |21| - Ludwig, M. e Johnson, S.P. - "Prediction of Surge Pressures in Long Oil Transmission Lines" - Proc. API, Division of Transportation, Vol.30, n° 5, 1950.



- |22| - O'Brien, G.G., Hyman, M.A. e Kaplan, S. - "A Study of the Numerical Solution of Partial Differential Equations" - J. Mathematical Physics, vol. 29, 1951.
- |23| - Lauria, D. - "O Problema da Separação das Colunas Líquidas" - EPUSP, São Paulo, 1979.
- |24| - Marchal, M., Flesh, G. e Suter, P. - "The Calculation of Waterhammer Problems by Means of the Digital Computer" - Proc. Int. Sym. Waterhammer Pumped Storage Projects, ASME, Chicago, 1965.
- |25| - Graze, H.R. - "A Rational Thermodynamic Equation for Air Chamber Design" - Third Australian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics, Institution of Engineers, Australia, 1968.
- |26| - Pistilli, G. - "Condotta Elevatorio Munite di Camera d'Aria Ricerca Sperimentali Primi Risultati" - Università di Napoli, 1962.
- |27| - Graze, H.R. - "A Rational Approach to the Thermodynamic Behavior of Air Chambers", Thesis (Ph.D), University of Melbourne, 1967.
- |28| - Yuge, T. - "Experiments on Heat Transfer from Spheres Including Natural and Forced Convection" - ASME - Trans. ser. C., J. Heat Transfer, 1960.
- |29| - Sparrow, E.M. e Gregg, J.L. - "Buoyancy Effects in Forced Convection Flow and Heat Transfer" - Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics, Sec. E, Vol. 81, 1959.
- |30| - Mori, Y. - "Buoyancy Effects in Forced Laminar Convection Flow Over a Horizontal Flat Plate", Trans. ASME, Journal of Heat Transfer, Sec. C., Vol. 83, 1961.

- |31| - Acrivos, A. - "Combined Laminar Free and Forced Convection Heat Transfer in External Flows", AIChE Journal, Vol. 4, 1968
- |32| - Eckert, E.R. e Drake, R.M. - "Analysis of Heat and Mass Transfer", McGraw-Hill, New York, 1972
- |33| - Mc Adams, W.H. - "Heat Transmission" - McGraw-Hill, New York, 1954.
- |34| - Heim, R. - "An Investigation of the Theoric Counterflow Brake" - Thesis Submitted for His Doctor's Degree - Munich Hydraulic Institute
- |35| - Tullis, J.P. - "Control of Flow in Closed Conduits" - Colorado State University, 1970.
- |36| - Ruus, E. - "Charts for Water Hammer in Pipelines with Air Chambers" - Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 4, n° 3, September 1977.
- |37| Chaudhry, M.H. - "Applied Hydraulic Transients" - Van Nostrand Reinhold, New York, 1979.