

DOUGLAS LAURIA

Eng. Mecânico, Escola de Engenharia Mauã, 1975.

O PROBLEMA DA SEPARAÇÃO DAS
COLUNAS LÍQUIDAS

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

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

São Paulo, 1979

A meus pais
A minha esposa
A Mariana

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Dr. Edmundo Koelle, pela orientação, apoio e incentivo não apenas ao trabalho, como também aos objetivos profissionais por nós delineados.

Ao Chefe do Departamento de Engenharia Mecânica da - Escola de Engenharia Mauá, Prof. Hélio Nanni.

Ao Vice-Chefe do Departamento de Engenharia Mecânica da E.E.M., Prof. Dimer Benatti.

Ao Prof. José Carlos Lauria, pela dedicada colaboração.

Aos Profs. Demetrio E. Baracat e Roberto Campanelli.

Aos Profs. do Departamento de Engenharia Mecânica da E.E.M.

Aos técnicos do Setor de Informática da E.E.M.

A meus queridos pais, Hermelino e Dita, pela formação moral recebida e por sua dedicação constante.

À minha esposa, Alice

À Mariana, nossa filha.

A todos, agradeço profundamente.

R E S U M O

A presente dissertação analisa a modelagem matemática para o estudo de escoamentos transitórios em condutos forçados, com enfoque especial para casos onde ocorre separação de coluna.

O equacionamento é apresentado de forma distinta para meios considerados homogêneos e heterogêneos. Deduz-se assim, conjuntos distintos de equações da continuidade e do movimento para ambos os meios.

O meio heterogêneo é analisado mais detalhadamente, estabelecendo-se as características de comportamento do gás e do vapor de líquido quando da separação de coluna. Propõe-se um método de cálculo da quantidade de vapor produzido quando da ocorrência daquele fenômeno.

Métodos numéricos de solução das equações diferenciais são apresentados e os resultados fornecidos através de simulação são apresentados e analisados.

A utilização de válvula de retenção como elemento de proteção contra sobrepressões é analisada.

ABSTRACT

This work deals with the mathematical modelling for the hydraulic transients in forced conducts, with special attention to cases where column separations occurs.

The equations are presented in distinct forms for homogeneous and for heterogeneous media. So, we get distinct continuity and motion equations for both cases.

The heterogeneous medium is analysed in detail, setting up the characteristics of gas and vapor behavior when column separation occurs. A calculation method is proposed for the quantity of produced vapor when the phenomena takes place.

Numerical methods for the differential equations are presented and the results obtained are analysed.

The use of check valves as a protection element against high pressures is also studied.

INDICE

Notação	vii
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiv
Introdução	
Capítulo I - Equações básicas do transitório.....	5
1.1 - Considerações sobre a celeridade.....	5
1.1.1 Presença de gás no meio líquido....	7
1.2 - Equação da Continuidade	11
1.3 - Equação do Movimento	20
Capítulo II - Transitório em meio heterogêneo.....	25
2.1 - Equação da Continuidade.....	26
2.1.1 Região de Separação	27
2.1.2 Região de golpe	30
2.2 - Equação do Movimento	31
Capítulo III - Estudo dos meios contendo gás e vapor	36
3.1 - Volume relativo de gás	36
3.2 - Volume relativo de vapor-produção de vapor	41
3.2.1 Mecanismo de vaporização.....	44
3.2.2 Vaporização por "flash".....	47

Capítulo IV - Meio homogêneo. Soluções Numéricas..	54
4.1 - a) Meio homogêneo	
b) Meio heterogêneo simplificado.....	55
4.1.1 Aproximação de primeira ordem.....	61
4.1.2 Aproximação de segunda ordem	62
4.2 - Condição de contorno externa	65
4.3 - Resultados numéricos.....	69
Capítulo V - Meio heterogêneo	106
5.1 - Método de diferenças finitas	108
Capítulo VI - Separação de coluna-métodos de cálculo	123
6.1 - Separação de coluna(Streeter-Wylie).....	123
6.1.1 Resultados Numéricos.....	126
6.2 - Separação de coluna(vaporização).....	156
6.3 - Válvula de retenção como sistema de prote ção.....	161
Capítulo VII - Comentários e sugestões para traba- lhos futuros	180
Apêndices	
Apêndice A - Método das características.....	183
Apêndice B - Método de Lax-Wendroff	196
Referências Bibliográficas	206

N O T A Ç Ã O

a	-	celeridade	(m/s)
A	-	área da secção transversal	(m ²)
C	-	constante	
D	-	diâmetro	(m)
E	-	módulo de elasticidade (Young) do material da tubulação	(N/m ²)(Pa)
e	-	espessura da tubulação	(m)
f	-	coeficiente de perda de carga	
F _v	-	função de vaporização	
F	-	fôrças	(N)
g	-	aceleração da gravidade	(m/s ²)
H	-	carga	(mca)
h	-	altura da região de vapor	(m)
HR	-	carga no reservatório	(mca)
K	-	módulo de elasticidade volumétrico	(N/m ²)(Pa)
L	-	comprimento	(m)
m	-	massa	(kg)
\bar{M}	-	massa molecular do vapor	(kg mol)
N	-	número de bôlhas de gás por unidade de massa de fluido	(m ³ /kg)
p	-	pressão	(N/m ²)(Pa)
\dot{P}	-	taxa de produção de vapor por unidade de volume	(kg/s.m ³)
P _r	-	perímetro da superfície de vaporização	(m)
Q	-	vazão	(m ³ /s)
Q	-	função genérica (Lax-Wendroff)	
R	-	raio	(m)
R	-	constante do gás perfeito	(N.m/kg.K)
\bar{R}	-	constante universal dos gases	(N.m/kg.mol.K)

t	- tempo	(s)
T	- temperatura	(K)
u	- velocidade	(m/s)
v	- volume específico	(m ³ /kg)
V	- velocidade	(m/s)
V	- volume	(m ³)
x	- coordenada	
y	- nível da superfície líquida durante evaporação	(m)
z	- cota	(m)

SÍMBOLOS GREGOS

α	-	volume relativo de gás	
β	-	volume relativo de vapor	
γ	-	pêso específico	(N/m ³)
Δ	-	variação finita	
ϵ	-	deformação	(m/m)
η	-	coeficiente politrôpico, função genérica	
θ	-	ângulo	(rad)
ν	-	coeficiente de Poisson	
ρ	-	massa específica	(kg/m ³)
σ	-	tensão superficial do líquido	(N/m)
σ	-	tensão	(N/m ²)(Pa)
τ	-	tensão de cisalhamento	(N/m ²)(Pa)

ÍNDICES INFERIORES

g	-	gás
l	-	líquido
m	-	mistura
v	-	vapor
o	-	regime permanente ou condições iniciais
e	-	equilíbrio
t	-	transversal
L	.	longitudinal

Lista de figuras

1 -	Volume de controle para equação da continuidade..	12
2 -	Sistema utilizado para equação do movimento.....	20
3 -	Forma final do sistema para equação do movimento-deformação das secções transversais	21
4 -	Curva de pressão de vapor para substância.pura...	44
5 -	Vaporização por flash	47
6 -	Comportamento da temperatura em função do tempo - durante flash.....	48
7 -	Caminho percorrido durante expansão do vapor entre dois instantes sucessivos.....	50
8 -	Diagrama de blocos para cálculo da vazão (Aprox. de segunda ordem).....	63
9 -	Pontos inicial e final para problema em estudo..	65
10 -	Lei de fechamento da válvula.....	69
11 -	Cargas ao longo da tubulação (Aprox. de primeira ordem).....	71
12 -	Cargas ao longo da tubulação (Aprox. de primeira ordem).....	72
13 -	Cargas ao longo da tubulação (Aprox. de segunda ordem).....	80
14 -	Cargas ao longo da tubulação (Aprox. de segunda ordem).....	81

15 - Cargas ao longo da tubulação (Aprox. primeira ordem, eq. completa).....	85
16 - Cargas ao longo da tubulação (Aprox. primeira ordem, eq. completa).....	86
17 - Lei de fechamento da válvula.....	90
18 - Cargas ao longo da tubulação (Aprox. primeira ordem)	93
19 - Cargas ao longo da tubulação (Aprox. segunda ordem)	98
20 - Cargas ao longo da tubulação (equação completa)....	102
21 - Separação de coluna	124
22 - Diagrama de blocos para cálculo durante separação de coluna (Streeter-Wylie).....	125
23 - Cargas ao longo da tubulação (separação).....	128-129
24 - Volume da cavidade durante separação de coluna (início do fenômeno).....	130-131
25 - Cargas ao longo da tubulação durante início de separação de coluna	132-133
26 - Volume da cavidade durante separação de coluna (final do fenômeno).....	134
27 - Cargas ao longo da tubulação durante fechamento da cavidade	135-136
28 - Cargas ao longo da tubulação - cavidade fechada...	137
29 - Caracterização da região separada	156

30 - Vaporização entre dois instantes consecutivos....	157
31 - Válvula de retenção como proteção contra efeitos de reunião de colunas separadas	162
32 - Estudo da válvula de retenção com furo.....	162
33.- Cargas ao longo da tubulação para válvula de retenção instalada	169
34 - Relação entre pressão e pressão em regime permanente em função da relação de diâmetros do furo da válvula e da tubulação.....	170

Lista de tabelas

1 - Valores da constante C para tubulação.....	6
2 - Celeridade a para líquidos com presença de $\alpha\%$ de gás	10
3 - Volume ocupado pelo vapor de água em tubulação	42
4 - Listagem dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação (Aprox. primeira ordem).....	73 - 78
5 - Listagem dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação (Aprox.de segunda ordem).....	82 - 84
6 - Listagem dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação (equação completa).....	87 - 89
7 - Listagem dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação (Aprox.de primeira ordem).....	94 - 97
8 - Listagem dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação (Aprox.de segunda ordem).....	99 - 101
9 - Listagem dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação (equação completa).....	103 - 105
10 - Listagem dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação (Lax-Wendroff).....	119 - 122
11 - Listagem dos valores de carga, vazão, pressão e volume de cavidade ao longo da tubulação - ($\alpha = 0,01\%$).....	138 - 143
12 - Listagem dos valores de carga, vazão, pressão e volume da cavidade ao longo da tubulação - ($\alpha = 0,1\%$).....	144 - 150

- 13 - Listagem dos valores de carga, vazão, pressão e volume de cavidade ao longo da tubulação - ($\alpha = 1,44\%$)..... 151 - 155
- 14 - Listagem dos valores máximos e mínimos das variáveis envolvidas no estudo de separação de coluna com válvula de retenção como proteção... 171 - 179

INTRODUÇÃO

O estudo das condições transitórias de escoamento levado a efeito desde a muito, sofreu um avanço considerável, em termos de soluções ao equacionamento obtido, após o advento dos processos numéricos de solução por computador digital.

Antes de tal evento as soluções eram obtidas a partir de métodos algébricos e gráficos [16,28], em que as equações diferenciais devem ser submetidas a simplificações para possibilitar a sua integração e conseqüente determinação de valores numéricos para cargas e vazões, em cada problema específico.

Tais métodos são válidos para linhas curtas, ou casos em que não há predominância de perda de energia por atrito - ao longo do conduto, pois o tratamento do termo dissipativo é pouco preciso. Nestes casos, os métodos numéricos para cálculo - com computador apresentam alternativas bastante amplas, para aplicação de aproximações de primeira, segunda ou ordens superiores para o termo dissipativo, oferecendo resultados mais precisos.

No que tange ao estudo da separação das colunas líquidas, fenômeno que ocorre quando da manutenção de certa região de escoamento a pressões iguais à de vapor de líquido, aqueles processos, algébrico e gráfico, revelam-se insuficientes para o estudo das cavidades geradas pela separação, como também para a determinação das condições de pressão quando do fechamento da cavidade.

Para o estudo das condições de separação de coluna - Streeter e Wylie [23,28] propõe um critério de cálculo baseado na hipótese da separação total das colunas líquidas. Tal método revela o inconveniente, segundo os autores, de apresentar resultados conservadores, i.é., submetidos a coeficientes de segurança relativamente elevados para as pressões originadas no fechamento da cavidade, quando da reunião das colunas líquidas separadas.

O fenômeno de separação de coluna tem sido estudado - com empenho por pesquisadores da Universidade Técnica de Delft,

Holanda, gerando um número significativo de publicações nessa área. Salientam-se os trabalhos de Kranenburg [103], Provoost [19] e Vreugdenhil [26], entre outros, trabalhos por nós estudados quando da preparação do presente.

Kranenburg realiza um estudo aprofundado do comportamento do gás presente no líquido recalcado como também das bolhas de vapor de líquido quando da separação de coluna em pontos isolados da tubulação, concluindo teórica e experimentalmente que, para instalações horizontais, as pressões geradas quando da reunião das colunas separadas não são significativas, dispensando-se assim equipamentos de proteção para a linha.

Provoost estende as conclusões de Kranenburg à linhas não horizontais submetidas a cargas estáticas baixas.

Paralelamente, têm-se estudado aspectos isolados peculiares ao fenômeno de separação de coluna, citando-se Keller e Zielke [7], Martin [15], Tullis [25], Winjugaarden e Vossers [27], entre outros.

O presente trabalho reúne os métodos de equacionamento e cálculo de escoamentos transitórios em condutos, para meios líquidos homogêneos e heterogêneos, estudando este caso mais profundamente para, em seguida, partir para a obtenção de resultados numéricos comparativos.

Assim, iniciamos o trabalho com a apresentação do equacionamento básico do transitório para meio homogêneo, deduzindo-se as equações da continuidade e do movimento. Neste caso, despreza-se a influência do gás presente no líquido para as equações citadas, admitindo sua ação apenas no sentido de reduzir a velocidade de propagação das perturbações no meio.

O capítulo II apresenta as equações da continuidade e do movimento para o meio heterogêneo. Nestas condições deduz-se equações da continuidade para a massa líquida, massa de vapor e massa de gás, separadamente, enquanto a equação do movimento é obtida apenas para a mistura líquida, gás, vapor, desprezando-se a equação do movimento para os meios de gás e de vapor.

No capítulo III estudamos os meios contendo gás e vapor de líquido, caracterizando o comportamento dos mesmos na região separada e não separada, visando aplicar os resultados às equações diferenciais do capítulo anterior.

Para o meio de vapor é proposto um método de cálculo que permite determinar a massa de vapor produzida durante a separação de coluna, como também o volume da cavidade gerada, definindo-se no final do capítulo as equações diferenciais para o meio heterogêneo.

O capítulo IV apresenta a integração das equações diferenciais do meio homogêneo pelo método das características. Neste capítulo apresentam-se gráficos e listagens para a solução numérica de um problema específico de transitórios, além de resultados comparativos entre os métodos de integração possíveis. Também são apresentados resultados comparativos para as duas propostas de aproximação do termo dissipativo, para uma linha curta (600 m) onde a perda de energia é pouco significativa e para uma linha longa (70 000 m) onde a dissipação de energia é predominante.

O método das características apresenta, para situações em que mais de duas equações comparecem (região de separação) o inconveniente de mais de duas retas características, tornando difícil sua aplicação.

Desta forma, ao estudarmos soluções para o meio heterogêneo, no capítulo V apresentamos as equações propostas para o meio baseados no esquema de cálculo desenvolvido por Lax e Wendroff [12] e utilizado por Kranenburg. Apresentam-se também os resultados numéricos para o problema da linha curta do capítulo IV.

O trabalho é encerrado com a aplicação do equacionamento a problemas de separação de coluna. No capítulo VI, estudamos tanto o método de cálculo das condições de separação proposto em [23,28] quanto aquele baseado no equacionamento deduzido nos capítulos II e III, em que é considerada a influência da massa de vapor produzida durante a separação de coluna.

Como apêndice ao trabalho, temos a apresentação da -
aplicação detalhada dos métodos das características e de Lax -
Wendroff às equações básicas do transitório.

CAPITULO I

EQUAÇÕES BÁSICAS DO TRANSITÓRIO

Neste capítulo apresentamos as equações básicas do transitório, dando ênfase às equações da continuidade e do movimento para transitório em meio homogêneo.

A partir da equação da continuidade obteremos uma expressão para a velocidade de propagação das perturbações de pressão no meio fluido (celeridade), verificando-se a influência de gás sobre a mesma.

A equação da energia não será considerada no cálculo do transitório, pois não estaremos interessados na determinação da variação de temperatura do fluido durante o transitório.

A obtenção das equações citadas será feita com detalhe suficiente para permitir o estudo do transitório em meio heterogêneo.

1.1 - Considerações sobre a celeridade

Como veremos na dedução da equação da continuidade, a expressão (1) abaixo exprime a velocidade de propagação das perturbações de pressão no meio fluido.

$$a = \left(\frac{K/\rho}{1 + K \frac{\Delta A}{A \cdot \Delta p}} \right)^{1/2} \quad (1)$$

O termo K/ρ é a velocidade sônica em tubulações indeformáveis.
O termo em denominador

$$1 + K \frac{\Delta A}{A \cdot \Delta p} \quad (2)$$

corrige a velocidade sônica K/ρ , computando as variações de área da secção transversal que ocorrem em tubulações deformáveis.

A avaliação do termo $\Delta A/A \Delta p$ deverá ser efetuada para dada concepção estrutural da tubulação. Apresentamos, na dedução da equação da continuidade o seu cálculo para uma tubulação de parede homogênea, onde obtivemos:

$$a = \left(\frac{K/\rho}{1 + \frac{KD}{Ee} C} \right)^{1/2} \quad (3)$$

A constante C , avaliada para três casos específicos de fixação da tubulação, encontrados na tabela (1) apresentada a seguir.

FIXAÇÃO	GERAL	$D/e \geq 25$
tubulações fixadas a montante ou jusante.	$\frac{2e}{D}(1+\nu) + \frac{D}{D+e} \left(1 - \frac{\nu}{2}\right)$	$1 - \frac{\nu}{2}$
tubulações impedidas de movimentos longitudinais.	$\frac{2e}{D}(1+\nu) + \frac{D}{D+e}(1-\nu^2)$	$1 - \nu^2$
tubulações com juntas de expansão entre as fixações.	$\frac{2e}{D}(1+\nu) + \frac{D}{D+e}$	1

Tabela 1) Valores da constante C para tubulações.

A simplificação para o caso em que ($e \leq D/25$) é verificado facilmente substituindo-se esta condição nas expressões gerais apresentadas na coluna central da tabela.

Gases presentes no meio líquido, devido a sua elevada compressibilidade alteram sensivelmente a celeridade do meio, atenuando as pressões geradas no transitório. A expressão da celeridade é obtida então definindo-se a massa específica e o módulo de elasticidade volumétrico da mistura.

1.1.1 - Presença de gás no meio líquido.

Para a massa específica da mistura líquido - gás, temos:

$$\rho_m = \rho_g \frac{V_g}{V} + \rho_l \frac{V_l}{V} \quad (4)$$

$$\text{Com } \alpha = \frac{V_g}{V} \quad (5)$$

$$\rho_m = \rho_g \alpha + \rho_l (1-\alpha) = \rho_l + \alpha(\rho_g - \rho_l) \quad (6)$$

Quando há presença de gás e vapor no líquido, a massa específica é:

$$\rho_m = \rho_g \frac{V_g}{V} + \rho_v \frac{V_v}{V} + \rho_l \frac{V_l}{V} \quad (7)$$

$$\text{Com } \frac{V_v}{V} = \beta, \text{ então,}$$

com o auxílio de (5)

$$\rho_m = \rho_g \alpha + \rho_v \beta + \rho_\ell (1 - \alpha - \beta) \quad (9)$$

$$\rho_m = \rho_\ell + \alpha (\rho_g - \rho_\ell) + \beta (\rho_v - \rho_\ell) \quad (10)$$

Para o m\u00f3dulo de elasticidade volum\u00e9trico, por defini\u00e7\u00e3o:

$$\left. \begin{aligned} K_\ell &= - \frac{\Delta p}{\frac{\Delta V_\ell}{V}} \\ K_g &= - \frac{\Delta p}{\frac{\Delta V_g}{\Delta V}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$V_m = V_\ell + V_g \quad (12)$$

$$\Delta V_m = \Delta V_\ell + \Delta V_g \quad (13)$$

$$K_m = - \frac{\Delta p}{\frac{\Delta V_m}{V_m}} \quad (14)$$

Substituindo (12), (13) em (14)

$$K_m = - \frac{\Delta p}{\frac{\Delta V_\ell + \Delta V_g}{V_\ell + V_g}} \quad (15)$$

Com (11) substituído em (15) e rearranjando os termos, obtemos:

$$K_m = \frac{K_l}{1 + \alpha \left(\frac{K_l}{K_g} - 1 \right)} \quad (16)$$

Considerando também a presença de vapor, por processo análogo, encontramos:

$$K_m = \frac{K_l}{1 + \alpha \left(\frac{K_l}{K_g} - 1 \right) + \beta \left(\frac{K_l}{K_v} - 1 \right)} \quad (17)$$

A expressão da celeridade a do líquido homogêneo ou da mistura, ainda pode ser tomada por (3), onde os valores da massa específica e do módulo de elasticidade volumétrico devem ser os espessos por (6) ou (7) e (16) ou (17), conforme o caso que se apresente.

Para evidenciar a influência de fluidos compressíveis na celeridade, mesmo quando tal presença ocorre em porcentagem muito pequena, calculemos a relação entre o módulo de elasticidade volumétrico em meio isento e o módulo de elasticidade volumétrico em meio onde ocorre a presença de gás.

O módulo de elasticidade volumétrico de um gás perfeito é dado por:

$$K = \rho R T = p \quad (18)$$

A substituição de (18) em (16) fornece

$$K_m = \frac{K_l}{1 + \alpha \left(\frac{K_l}{p} - 1 \right)} \quad (19)$$

Para água a 293 K, $K_l = 2,1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ e, adotando, por ser significativa, uma pressão de $p = 260 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ (abs) podemos calcular o módulo volumétrico da mistura.

$$(19) \quad K_m = \frac{K_l}{1 + \alpha \left(\frac{2,1 \cdot 10^9}{2,6 \cdot 10^6} - 1 \right)} \quad (20)$$

$$K_m = \frac{K_l}{1 + 8,066 \cdot 10^2 \cdot \alpha} \quad (21)$$

Tomando

$$1 + 8,066 \cdot 10^2 \cdot \alpha = F \quad (22)$$

Obtemos a tabela 2, apresentada a seguir, lembrando que

$$\frac{K_l}{K_m} = F \quad (23)$$

α (%)	0,01	0,05	0,1	0,5	1,0	1,44	5,0	10,0
F	1,080	1,403	1,807	5,033	9,066	12,61	41,33	81,66
$\left(\frac{K}{\rho}\right)_m^{1/2}$ (m/s)	1394	1224	1079	647	484	400	232	170
a (m/s)	1254	1126	1010	631	477	396	231	170

Tabela (2) - Celeridade a para líquidos com presença de gás em $\alpha\%$

Por outro lado, de (6), podemos desprezar o termo $\rho_g \cdot \alpha$ pois trabalhamos apenas com volumes pequenos de gás, além do fato de ser a massa específica dos gases muito menor que a dos líquidos. Assim,

$$(6) \quad \rho_m \cong \rho_l (1 - \alpha) \quad (24)$$

Podendo-se verificar que pequenas quantidades de gás pouco alteram a massa específica da mistura.

Verifica-se da tabela 2 apresentada, a grande redução provocada por pequenas porcentagens de gás sobre o módulo volumétrico da mistura.

Desde que a massa específica pouco influi, a redução do módulo volumétrico será responsável também pela redução da celeridade no meio, reduzindo assim as sobrepressões ocorrentes.

Conforme veremos adiante, alguns métodos de cálculo de pressões em transitórios, mesmo em caso de separação de coluna, limitam-se a considerar a presença de gás no meio líquido apenas na redução da celeridade.

Da tabela 2, podemos também verificar que para quantidades de gás acima de $\alpha = 10\%$, a atenuação da celeridade será tão acentuada, que as pressões geradas no transitório deixam de ser significativas, desaconselhando-se seu estudo.

1.2 - Equação da continuidade.

Na obtenção da equação da continuidade adota-se um volume de controle fixo à tubulação e que move-se com a mesma com uma velocidade u qualquer. Este volume não inercial adotado, foi inicialmente proposto por T.P. Propson podendo ser encontrado nas referências [23,9,13], e revela-se uma forma simples e elegante de determinação desta equação.

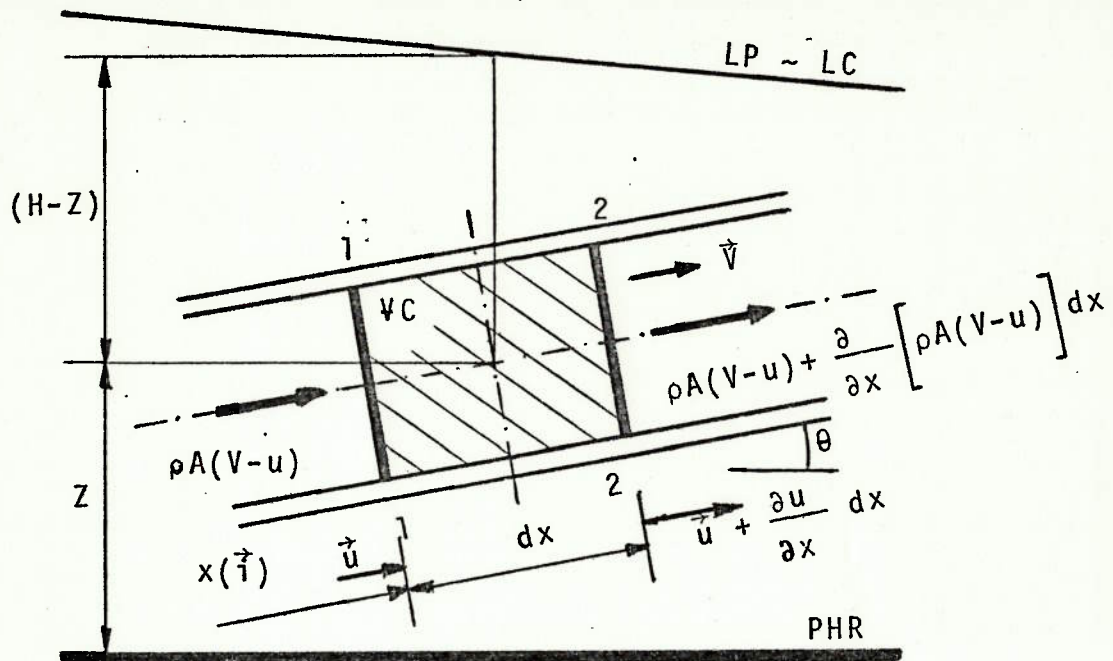


Fig. 1 - Volume de controle para equação da continuidade.

Para o VC da figura 1, consideraremos escoamento unidimensional ascendente, tornando a coordenada x paralela ao eixo da tubulação.

Em sua forma integral a equação da continuidade é expressa por:

$$\int_{sc} \rho (\vec{v} \times \vec{n}) dS + \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV = 0 \quad (25)$$

Esta equação impõe que o fluxo de massa resultante através das superfícies de controle é igual à taxa de variação de massa no interior do volume de controle. Considerando-se que o nosso volume de controle está animado de uma velocidade \vec{u} , devemos computar, além da variação local de massa representada

por $\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV$, também a variação convectiva de massa, expressa por $u \frac{\partial}{\partial x} \int_{VC} \rho dV$

Sabemos que a variação local somada à variação convectiva de uma determinada grandeza extensiva fornece a variação total desta grandeza, i.é :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{d\eta}{dt} \quad (26)$$

A equação da continuidade para o nosso volume de controle não inercial será:

$$(25) \quad \int_{SC} \rho (\vec{v} \times \vec{n}) dS + \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV = 0$$

A avaliação dos fluxos de massa através das superfícies de controle fornece:

$$\int_{11} \rho (\vec{v} \times \vec{n}) dS = - \rho A (V-u) \quad (27)$$

$$\int_{22} \rho (\vec{v} \times \vec{n}) dS = \rho A (V-u) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho A (V-u) \right] dx \quad (28)$$

onde (28) é obtida por expansão em série de Taylor até o 2º membro, do fluxo de massa que atravessa 2-2, afastado dx de 1-1. Os fluxos determinados em (27) e (28) encontram-se indicados na fig. 1.

A taxa de variação total da massa interna ao volume de controle \bar{e} :

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV = \frac{d}{dt} (\rho V) = \frac{d}{dt} (\rho A dx) \quad (29)$$

Expandindo (29)

$$\frac{d}{dt} (\rho A dx) = \rho A \frac{d}{dt} (dx) + \rho dx \frac{dA}{dt} + A dx \frac{d\rho}{dt} \quad (30)$$

A secção 1.1 está animada de velocidade u , enquanto a secção 2.2, distante dx de 1.1, tem sua velocidade, calculada por expansão em série de Taylor, igual a $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$.

Desta forma, a variação total do comprimento dx do V.C. é dado por: (ver fig.1)

$$\frac{d}{dt} (dx) = -u + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx = \frac{\partial u}{\partial x} dx \quad (31)$$

Substituindo (31) em (30) e esta mais (27) e (28) em (25), temos:

$$\begin{aligned} -\rho A(V-u) + \rho A(V-u) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho A(V-u) \right] dx + \rho A \frac{\partial u}{\partial x} dx + \rho dx \frac{dA}{dt} + \\ + A dx \frac{d\rho}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (32)$$

Simplificando e operando as derivações de (32), temos:

$$\begin{aligned} \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial A}{\partial x} + AV \frac{\partial \rho}{\partial x} - \rho A \frac{\partial u}{\partial x} - \rho u \frac{\partial A}{\partial x} - Au \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho A \frac{\partial u}{\partial x} + \\ + \rho \frac{dA}{dt} + A \frac{d\rho}{dt} \end{aligned} \quad (33)$$

Aplicando (26) em (33) e simplificando

$$\begin{aligned} \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + \rho \left[\frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x} \right] + A \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + V \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] - \\ - \rho u \frac{\partial A}{\partial x} + \rho u \frac{\partial A}{\partial x} - Au \frac{\partial \rho}{\partial x} + Au \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (34)$$

Reaplicando (26)

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (35)$$

Esta equação (35) é a equação da continuidade, válida para quaisquer fluidos em escoamento em quaisquer tubulações, visto estarem nela computados os efeitos de deformabilidade da tubulação $\left(\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right)$ e os de compressibilidade do meio $\left(\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \right)$.

A forma em que está apresentada a equação da continuidade não é conveniente para utilização em cálculos, pois torna-se difícil uma avaliação dos dois primeiros termos nela presentes, a cada instante do transitório.

A "compressibilidade do meio" pode ser calculada por:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{K} \frac{dp}{dt} \quad (36)$$

A avaliação de $\frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$ depende da concepção estrutural da tubulação e os vários casos possíveis podem ser encontrados na referência | 18 |.

No presente trabalho, apresentaremos apenas tal estudo aplicado a dutos cilíndricos de parede fina.

Neste caso,

$$\sigma_t = \frac{pD}{2e} \quad \rightarrow \quad \frac{d\sigma_t}{dt} = \frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} \quad (37)$$

Para a derivação da expressão σ_t , admitimos a variação total do diâmetro desprezível face à variação total de pressão.

A deformação transversal do duto cilíndrico é dada por:

$$\epsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_t - \nu \sigma_L) \quad (38)$$

A variação de área da secção transversal será:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{d\epsilon_t}{dt} \cdot \frac{D}{2} \cdot \pi D \quad (39)$$

de (38)

$$\frac{d\epsilon_t}{dt} = \frac{1}{E} \left(\frac{d\sigma_t}{dt} - \nu \frac{d\sigma_L}{dt} \right) \quad (40)$$

então:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{d\epsilon_t}{dt} \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{4}{\pi D^2} = 2 \frac{d\epsilon_t}{dt} \quad (41)$$

A equação da continuidade será, então, transformada para:

$$(35) \quad \frac{2}{E} \left(\frac{d\sigma_t}{dt} - \nu \frac{d\sigma_L}{dt} \right) + \frac{1}{K} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (42)$$

A tensão longitudinal σ_L está diretamente relacionada às condições de fixação da tubulação, podendo-se ter três casos típicos, conforme já indicado na tabela 1.

a) tubulações fixadas a montante ou jusante

$$\left\{ \frac{d\sigma_L}{dt} = \frac{dp}{dt} \frac{A}{\pi D e} = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_t}{dt} \right. \quad (43)$$

b) tubulações impedidas de movimentos longitudinais

$$\left\{ \frac{d\sigma_L}{dt} = \frac{\nu D}{2e} \frac{dp}{dt} = \nu \frac{d\sigma_t}{dt} \right. \quad (44)$$

c) tubulações com juntas de expansão entre fixações

$$\left\{ \frac{d\sigma_L}{dt} = 0 \right. \quad (45)$$

As expressões acima podem ser transformadas numa única, tal que

$$\frac{d\sigma_L}{dt} = C_1 \frac{d\sigma_t}{dt} \quad (46)$$

onde teremos:

$$(43) \quad C_1 = 1/2$$

$$(44) \quad C_1 = \nu$$

$$(45) \quad C_1 = 0$$

Substituindo (37) e (46) em (42):

$$\frac{2}{E} \left(\frac{D}{2e} - \nu C_1 \frac{D}{2e} + \frac{1}{K} \right) \frac{dp}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (47)$$

$$\frac{2\rho}{E} \left(\frac{D}{2e} (1-\nu C_1) + \frac{1}{K} \right) \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (48)$$

Tomando $(1-\nu C_1) = C$ identificamos a constante que aparece em (3).

Reagrupando termos da equação (48)

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} \left[\frac{\frac{KD}{Ee} + 1}{K/\rho} \right] + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (49)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (50)$$

Esta é a forma final da equação da continuidade, mantida a pressão p como uma das variáveis dependentes. Esta apresentação torna-se particularmente conveniente quando trabalhamos com gases escoando ou então presentes no meio líquido.

Podemos também apresentar a equação com a carga H como variável dependente, como segue:

$$p = \rho g (H-Z) \quad (51)$$

$$(51) \quad \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = g \left\{ \frac{(H-Z)}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{V \partial \rho}{\partial x} \right] + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{V \partial H}{\partial t} - \frac{\partial Z}{\partial t} - \frac{V \partial Z}{\partial x} \right\} \quad (52)$$

Não ocorrendo movimento da tubulação

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (53)$$

e

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \text{sen } \theta \quad (54)$$

A equação da continuidade será:

$$\frac{(H-Z)}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] + \frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} - v \text{sen} \theta + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (55)$$

Para líquidos, poderemos admitir a variação com o tempo de sua massa específica, desprezível face à variação de carga, sendo então a equação (55) simplificada para :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} - v \text{sen} \theta + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (56)$$

1.3 - Equação do movimento.

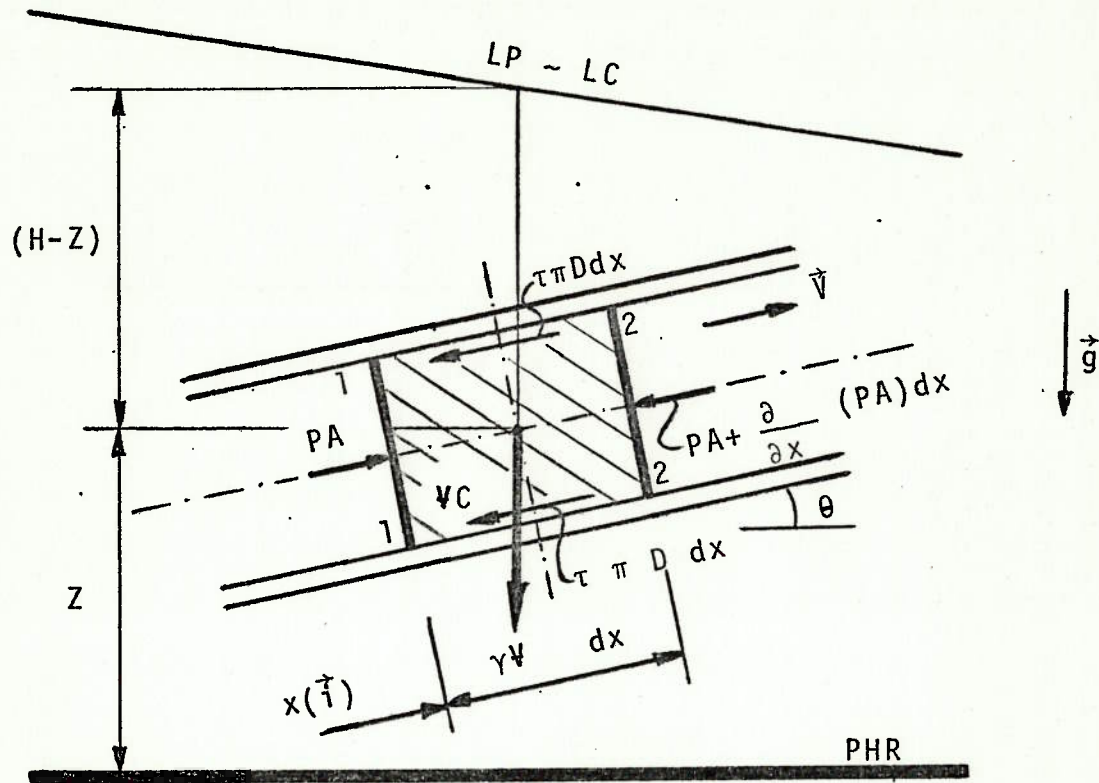


Fig. 2 - Sistema utilizado para equação do movimento.

Pela lei de Newton, sabemos que a somatoria das forças externas aplicadas ao sistema é igual à variação de quantidade de movimento do mesmo.

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \frac{d}{dt} (m \vec{v}) \quad (57)$$

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m \frac{d}{dt} \vec{v} \quad (58)$$

No sistema indicado na figura 2, a massa de fluido é submetida às seguintes forças externas:

a) força de campo gravitacional = $\rho V \vec{g}$

b) forças de contacto

b.1) pressão na face 1.1 = $p A \vec{i}$

b.2) pressão na face 2.2 = $\left[pA + \frac{\partial}{\partial x}(pA) dx \right] (-\vec{i})$

b.3) tensão de cisalhamento na parede da tubulação = $\tau \pi D dx (-\vec{i})$

b.4) Além destas forças, fáceis de serem visualizadas na fig. 2, devemos também computar os efeitos da força de pressão agente nas paredes laterais do VC, devido à variação de área das secções transversais entre 1-1 e 2-2, indicadas na figura abaixo.

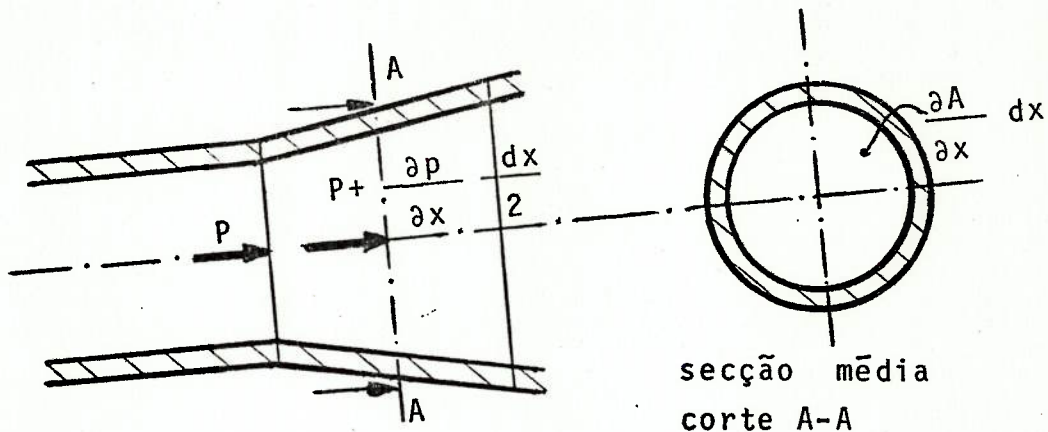


Fig.3 - Forma final do sistema para equação do movimento - deformação das secções transversais.

A força citada é expressa pelo produto da pressão na seção média do sistema pela variação da área da seção transversal da tubulação.

$$\left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \frac{\partial A}{\partial x} dx \quad (59)$$

A aplicação da equação (58), projetada na direção do versor (\vec{i}), nos oferece:

$$p \cdot A - \left[p \cdot A + \frac{\partial}{\partial x} (p \cdot A) dx \right] + \left[p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \right] \frac{\partial A}{\partial x} dx -$$

$$- \tau \pi D dx - \rho g A dx \sin \theta = \rho A dx \frac{dV}{dt} \quad (60)$$

Simplificando :

$$-A \frac{\partial p}{\partial x} - \tau \pi D - \rho g A \sin \theta = \rho A \frac{dV}{dt} \quad (61)$$

A tensão de cisalhamento τ é função do gradiente de velocidades a que o fluido está submetido, e, como consequência, em regime transitório, irá variar.

Para regime permanente, a tensão de cisalhamento em um duto, obtida em função do diferencial de pressão é dada por [22]:

$$\tau = \frac{\Delta p D}{4 L} \quad (62)$$

onde, pela equação de Darcy - Weissbach

$$\Delta p = \rho f_o \frac{L V^2}{2D} \quad (63)$$

então:

$$\tau = \frac{\rho f_o V^2}{8} \quad (64)$$

A equação (64), para regime permanente, será substituída em (61), regime transitório, mantendo-se o coeficiente f_0 constante, a partir de agora simplificada a notação para f .

Devido a possibilidade da ocorrência de escoamento ascendente ou descendente, o que provoca uma inversão no sinal da força devida às tensões de cisalhamento, o termo V^2 será expresso por $V \cdot |V|$, cobrindo-se assim ambas as possibilidades.

Retornando a (61) com a substituição de (64) e utilizando novamente (26),

$$A \frac{\partial p}{\partial x} + \rho f \frac{\pi D}{8} V|V| + \rho g A \sin \theta + \rho A \left[\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \right] = 0 \quad (65)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| + g \sin \theta + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (66)$$

Esta equação (66) é a equação do movimento em sua forma final, com a pressão p como uma das variáveis dependentes.

Com H como variável dependente, temos, (de (51), (53), (54)),

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{g}{\rho} \left[(H-Z) \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial Z}{\partial x} \right) - \sin \theta \right] = g \left[\frac{(H-Z)}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} - \sin \theta \right] \quad (67)$$

A equação do movimento será:

$$\frac{g}{\rho} (H-Z) \frac{\partial \rho}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad (68)$$

Para fluidos líquidos, considerados incompressíveis, em condições normais de pressão e temperatura, a equação é simplifi

cada para:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V |V| = 0 \quad (69)$$

O escoamento transitório em um conduto cilíndrico é regido pelas equações:

a) Continuidade

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (50)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} - V \operatorname{sen} \theta + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (56)$$

b) Movimento

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f}{2D} V |V| + g \operatorname{sen} \theta + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (66)$$

ou

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V |V| = 0 \quad (69)$$

A solução do problema possibilita a determinação dos valores de $H(x,t)$ ou $p(x,t)$ e $Q(x,t)$ ou $V(x,t)$, a partir da utilização das equações (a) e (b) acima, além das condições de contorno características a cada problema.

CAPÍTULO II

TRANSITÓRIO EM MEIO HETEROGÊNEO

As equações da continuidade e do movimento obtidas no capítulo anterior, (50) e (66) são válidas para quaisquer fluidos em escoamento, desde que tal fluido seja admitido homogêneo, estando ausentes do mesmo fluidos que alterem sensivelmente a propagação das perturbações de pressão geradas durante o transitório.

Misturas de fluidos diferentes, tipo líquido-gás, sofrem intensamente os efeitos do gás presente, pois os mesmos introduzem efeitos dissipativos bastante sensíveis na celeridade, como também exigem, a rigor, novas equações da continuidade e do movimento para a mistura, o que será introduzido no presente capítulo.

Além do estudo destas misturas heterogêneas, devemos também nos ater aos efeitos de baixas pressões a que podem ser submetidos trechos específicos da tubulação, gerando a formação de bolsões de gases e vapor de líquido.

O vapor de líquido produzido durante um intervalo de tempo qualquer somado aos gases presentes na coluna líquida passam a ocupar o topo do conduto, fazendo com que o escoamento líquido ocorra apenas em determinada região inferior da tubulação. O fenômeno foi verificado experimentalmente por Provoost [19], que inclusive mediu a altura de escoamento líquido transitório numa tubulação submetida à pressão de vapor.

A forma mais simples de cálculo deste fenômeno é conseguida considerando-se o meio incompressível e utilizando-se então as equações (56) e (69), admitindo ou não a influência do gás na redução da celeridade, o que significa calculá-la a partir apenas da equação (3) ou a partir de (3),(6) ou (10) e (16) ou (17).

Tal esquema de cálculo apresenta valores de pressões (ou cargas) e velocidades (ou vazões) muito acima daqueles que efetivamente ocorrem [28], levando-nos a resultados submetidos a coeficientes de segurança altos.

Novas formas de equacionamento, considerando-se a presença de gás em toda a linha, como também o comportamento do gás quando da ocorrência de separação de coluna e consequente formação de macro-bolhas, estão sendo pesquisadas. Além disso, deve-se também considerar o comportamento da água quando submetida à pressão de vapor para uma determinada temperatura. Nestas condições, é sabido que esta água vaporiza, contribuindo com seu vapor para a formação e desenvolvimento da macro-bolha.

2.1 - Equação da continuidade.

Para o escoamento de mistura líquido-gás, ou líquido-gás-vapor de líquido, devemos verificar a continuidade para a massa líquida, de gás e de vapor. A presença de vapor d'água no meio ocorre apenas na região de formação da bolha, ou de separação de coluna, chamada região de separação, enquanto o gás está presente em toda linha. Esta situação indica-nos que as equações da continuidade para a fase gás e gás-vapor serão distintas. Nesta dedução consideraremos o caso mais geral, i.é, a presença de gás e vapor, obtendo a equação da continuidade, tanto para a fase líquida quanto gasosa (vapor + gás), na região de separação.

Para a região em que não ocorre separação, chamada região de golpe, as equações serão obtidas desprezando-se os termos onde comparece a influência do vapor, a partir das equações para a região de separação. Neste parágrafo utilizaremos a figura (1).

2.1.1 - Região de separação.

a) Fase líquida.

A massa específica da fase líquida é:

$$(9) \quad \rho_l (1 - \alpha - \beta) \quad (70)$$

A equação da continuidade para esta fase impõe que o - fluxo líquido de massa através da superfície de controle somado à taxa de variação de massa no interior do ΨC deve ser igual a produção de vapor (perda de líquido)

Formalmente, temos, a partir de (25)

$$(27) \quad \int_{11} \rho (\vec{v} \times \vec{n}) dS = \rho_l (1 - \alpha - \beta) A (V - u) \quad (71)$$

$$(28) \quad \int_{22} \rho (\vec{v} \times \vec{n}) dS = \rho_l (1 - \alpha) A (v - u) + \frac{\partial}{\partial x} [A \rho_l (1 - \alpha - \beta) (V - u)] dx \quad (72)$$

$$(29) \quad \frac{d}{dt} \int_{\Psi C} \rho dV = \frac{d}{dt} [\rho_l (1 - \alpha - \beta) \Psi] = \frac{d}{dt} [\rho_l (1 - \alpha - \beta) A dx] \quad (73)$$

A equação da continuidade, já simplificada:

$$\frac{\partial}{\partial x} [\rho_l A (1 - \alpha - \beta) (V - u)] dx + \frac{d}{dt} [\rho_l (1 - \alpha - \beta) A dx] = - \dot{P}_v A dx \quad (74)$$

onde \dot{P}_v é a taxa de produção de vapor por unidade de volume, no interior do ΨC .

Desenvolvendo (74) de forma análoga a (33) e ordenando convenientemente os termos,

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho_\ell} \frac{d\rho_\ell}{dt} - \frac{1}{(1-\alpha-\beta)} \frac{d\alpha}{dt} - \frac{1}{(1-\alpha-\beta)} \frac{d\beta}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = - \frac{\dot{p}_v}{(1-\alpha-\beta)\rho_\ell} \quad (75)$$

Avaliando as parcelas $\frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$ e $\frac{1}{\rho_\ell} \frac{d\rho_\ell}{dt}$ pelo mesmo método usado em (35), teremos a equação da continuidade para a fase líquida

$$(75) \quad \frac{1}{a^2 \rho_\ell} \frac{dp}{dt} - \frac{1}{(1-\alpha-\beta)} \frac{d\alpha}{dt} - \frac{1}{(1-\alpha-\beta)} \frac{d\beta}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{-\dot{p}_v}{(1-\alpha-\beta)\rho_\ell} \quad (76)$$

A variável dependente p será mantida na equação por ser mais conveniente ao trabalharmos com gases.

b) Fase gasosa

Por razões de simplicidade e facilidade de associação com o fenômeno físico, deduziremos equações separadas para as fases de gás e de vapor, facilitando também a proposição das equações para a região de golpe.

Durante a dedução destas equações, aplicaremos a hipótese simplificadora de considerar as partículas de gás, vapor e líquido movendo-se com a mesma velocidade, i, \bar{e} , desprezando o es corregramento que eventualmente ocorre entre estas partículas.

b.1) gás.

A equação da continuidade para a massa de gás presente é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_g \alpha A(V-u) \right] dx + \frac{d}{dt} \left[\rho_g \alpha A dx \right] = \dot{P}_g A dx \quad (77)$$

Derivando e simplificando:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{1}{\rho_g} \frac{d\rho_g}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\dot{P}_g}{\rho_g \alpha} \quad (78)$$

Aplicando o mesmo procedimento usado para (75):

$$\frac{2}{E} \left[\frac{D}{2e} (1-\nu c_1) + \frac{1}{K_g} \right] \frac{dp}{dt} + \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\dot{P}_g}{\rho_g \alpha} \quad (79)$$

$$\frac{1}{a_g^2 \rho_g} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\dot{P}_g}{\rho_g \alpha} \quad (80)$$

onde para tubo de parede homogênea

$$a_g^2 = \frac{k_g / \rho_g}{1 + \frac{K_g D}{Ee}} \quad (81)$$

b.2) vapor.

A equação da continuidade para a fase de vapor é obtida de forma similar à equação para a fase de gás, assim, apresentaremos apenas a equação final.

$$\frac{1}{a_v^2 \rho_v} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dt} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\dot{P}_v}{\rho_v \beta} \quad (82)$$

com a_v^2 dado por (81) trocando o índice g por v

2.1.2) Região de golpe.

Nesta região temos apenas a presença de gás na coluna líquida, pois as pressões a que as várias secções que compõe esta região são sempre maiores que a pressão de vapor do líquido.

a) líquido.

Tomando $\beta = 0$, da equação (74), podemos obter a equação da continuidade.

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_l A(1-\alpha)(V-u) \right] dx + \frac{d}{dt} \left[\rho_l (1-\alpha) A dx \right] = 0 \quad (83)$$

Omitindo as várias passagens intermediárias,

$$\frac{1}{a_{\rho_l}^2} \frac{dp}{dt} - \frac{1}{1-\alpha} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (84)$$

b) gás

Para esta região a equação da continuidade para o gás é a mesma da região de separação, abaixo reescrita.

De (80)

$$\frac{1}{a_g^2 \rho_g} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\dot{P}_g}{\rho_g \alpha} \quad (85)$$

com a_g^2 dado por (81).

2.2 - Equação do movimento.

De forma similar à equação da continuidade, para o meio heterogêneo deveremos apresentar equações do movimento para cada uma das fases líquida, gás e vapor, possíveis de ocorrer nas várias secções do conduto em estudo.

As forças desenvolvidas tanto pela massa de gás quanto pela massa de vapor apresentam valores desprezíveis se comparadas com aquelas desenvolvidas pela fase líquida do escoamento. Desta forma desprezamos os efeitos do gás e do vapor, limitando o nosso estudo apenas à equação do movimento da fase líquida.

Se observarmos a dedução da equação do movimento para o meio homogêneo, (paragrafo 1.3), verificaremos que a massa específica do líquido não comparece nas derivadas aplicadas tanto em relação ao tempo t quanto com relação à coordenada x . Tal facto permite-nos afirmar que a equação do movimento para a fase líquida é a mesma equação (66) do meio homogêneo, substituída a massa específica ρ do líquido por

$$\rho_l (1 - \alpha) \quad \text{para a região de golpe}$$

ou
$$\rho_l (1 - \alpha - \beta) \quad \text{para a região de separação}$$

Teremos, então, a equação do movimento para cada uma das regiões, indicadas a seguir.

a) região de golpe.

$$(66) \quad \frac{1}{\rho_l (1-\alpha)} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| + g \operatorname{sen} \theta = 0 \quad (86)$$

b) região de separação.

$$(66) \quad \frac{1}{\rho_l (1-\alpha-\beta)} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| + g \operatorname{sen} \theta = 0 \quad (87)$$

Para que possamos resolver os sistemas de equações diferenciais de derivadas parciais obtidas, resta-nos ainda obter expressões que nos permitam avaliar, em cada instante do transitório, o volume relativo de gás α e suas derivadas; a produção de vapor \dot{P}_v e o respectivo volume de vapor β e suas derivadas; como função das variáveis dependentes p e V visando facilitar a integração da equação da continuidade.

Porém, antes de tal procedimento, justifica-se um resumo das várias equações obtidas para os diversos casos estudados. e que encerrará este capítulo.

Meio homogêneo

$$(50) \quad \frac{1}{a^2 \rho} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{continuidade})$$

$$(66) \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| + g \operatorname{sen} \theta = 0 \quad (\text{movimento})$$

com

$$(3) \quad a^2 = \frac{K/\rho}{1 + \frac{KD}{E} c} \quad (\text{celeridade})$$

Meio heterogêneo.

a) Continuidade

a.1) Região de separação.

$$(76) \quad \frac{1}{a^2 \rho_l} \frac{dp}{dt} - \frac{1}{(1-\alpha-\beta)} \frac{d\alpha}{dt} - \frac{1}{(1-\alpha-\beta)} \frac{d\beta}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{-\dot{P}_v}{(1-\alpha-\beta)\rho_l} \quad (\text{líquido})$$

$$(80) \quad \frac{1}{a_g^2 \rho_g} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\dot{P}_g}{\rho_g \alpha} \quad (\text{gás})$$

$$(82) \quad \frac{1}{a_v^2 \rho_v} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\dot{P}_v}{\rho_v \beta} \quad (\text{vapor})$$

a.2) Região de golpe

$$(84) \quad \frac{1}{a^2 \rho_l} \frac{dp}{dt} - \frac{1}{(1-\alpha)} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{líquido})$$

$$(85) \quad \frac{1}{a_g^2 \rho_g} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\dot{P}_g}{\rho_g \alpha} \quad (\text{g\bar{a}s})$$

$$\text{onde } a_i^2 = \frac{K_i / \rho_i}{1 + \frac{K_i D}{E e}} \quad i = g, v, l$$

b) Movimento

b.1) região de separação.

$$(87) \quad \frac{1}{\rho_l (1-\alpha-\beta)} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| + g \sin \theta = 0$$

b.2) região de golpe.

$$(86) \quad \frac{1}{\rho_l (1-\alpha)} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| + g \sin \theta = 0$$

Evidentemente, as equações para o meio homogêneo inicialmente indicadas são uma simplificação das equações para o meio heterogêneo, e, como tal deverão ser destas obtidas. Esta constatação é fácil de ser feita, bastando-nos, nas equações da continuidade e na equação do movimento para o meio heterogêneo, tomar os volumes relativos de gás e vapor, α e β , iguais a zero. Além destes, as produções de vapor e gás, P_v e P_g , também serão nulas.

Assim, com a imposição das condições já citadas, teremos para a fase líquida a equação da continuidade (76) ou (84) idênticas à equação (50) para o meio homogêneo, o mesmo ocorren-

do com a equação do movimento (87) ou (86) que se identifica a (66). As equações finais da continuidade (80) para a fase de gás e (82) para a de vapor, perdem o sentido ao admitirmos o meio homogêneo.

CAPÍTULO III

ESTUDO DOS MEIOS CONTENDO GÁS E VAPOR

3.1 - Volume relativo de gás (α)

O estudo do volume relativo de gás, α , será feito a partir das teorias de estabilidade e movimentos das bolhas de gás eventualmente presentes no meio líquido, teorias estas desenvolvidas a fundo em estudos de cavitação [8].

A aplicação de tais conceitos exige as simplificações abaixo tanto com relação à quantidade de bolhas presentes quanto com relação à forma de tais bolhas.

a) todas as bolhas são admitidas esféricas e de mesmo raio.

b) número de bolhas por unidade de massa de fluido em escoamento (N) constante. Esta simplificação implica na manutenção de um volume constante de gás por unidade de volume de fluido.

Com tais simplificações, α será dado por:

$$\frac{V_g}{m} = \frac{4}{3} \pi R^3 N \quad (88)$$

O volume específico do meio é:

$$\frac{V}{m} = \frac{1}{\rho_l} + \frac{4}{3} \pi R^3 N \quad (89)$$

$$\alpha = \frac{V_g}{V} = \frac{\frac{4}{3} \pi R^3 N}{\frac{1}{\rho_l} + \frac{4}{3} \pi R^3 N} \quad (90)$$

Conforme já mencionamos anteriormente, estudaremos apenas nos casos onde o volume de gás é muito pequeno se comparado ao de líquido, o que permite aproximar α para:

$$(82) \quad \alpha = \frac{4}{3} \pi R^3 N \rho_l \quad (91)$$

A variação total de α , $\frac{d\alpha}{dt}$ se obtida por simples derivação de (91) nos conduziria a expressões de difícil avaliação, do tipo $\frac{dR}{dt}$. Para contornar estes problemas, na região de separação, lançaremos mão da equação de equilíbrio para uma bolha de gás [8;10].

A equação de equilíbrio citada, impõe que:

$$p - p_v + \frac{2\sigma}{R} - p_g = 0 \quad (92)$$

onde as pressões são tomadas na escala absoluta e σ = tensão superficial do líquido (Pa)

Admitido o gás da bolha como perfeito,

$$p_g V = m R T \quad \text{ou} \quad p_g = \rho_g R T \quad (93)$$

$$p_g R^3 = \frac{3}{4\pi} m R T \quad (94)$$

com m e R constantes,

$$k = \frac{3}{4\pi} m R \quad (95)$$

$$(94) \quad p_g R^3 = K T \quad (96)$$

Com (96) substituída em (92)

$$p = p_v + \frac{kT}{R^3} - \frac{2\sigma}{R} \quad (97)$$

Da identidade:

$$\frac{d\alpha}{dp} = \frac{d\alpha}{dR} \cdot \frac{1}{\frac{dp}{dR}} \rightarrow d\alpha = \frac{d\alpha}{dR} \frac{1}{\frac{dp}{dR}} dp \quad (98)$$

obtemos a variação total de α , com as equações abaixo:

$$(91) \quad \frac{d\alpha}{dR} = 4\pi R^2 N \rho_\ell \quad (99)$$

$$(97) \quad \frac{dp}{dR} = \frac{1}{R} \left[\frac{2\sigma}{R} + \frac{k}{R^2} \frac{dT}{dR} - \frac{3kT}{R^3} \right] \quad (100)$$

A variação de α será dada por:

$$d\alpha = \frac{4\pi R^3 N_{p,2}}{\left[\frac{2\sigma}{R} - \frac{3kT}{R^3} + \frac{k}{R^2} \frac{dT}{dR} \right]} dp \quad (101)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{3\alpha}{\left[\frac{2\sigma}{R} - \frac{3kT}{R^3} + \frac{k}{R^2} \frac{dT}{dR} \right]} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (102)$$

Resta-nos ainda estudar a expressão $\frac{dT}{dR}$ ou, para melhor compreensão física, o inverso da expressão, $\frac{dR}{dT}$

Esta derivada exprime a variação do raio da bolha de gás, considerada esférica, em função da variação de temperatura consequente à troca de calor que pode ocorrer entre a bolha e o líquido que a envolve.

Trabalhos apresentados na Euromech 98 e sintetizados por Winjnngaarden e Vossers [27], indicam que os mecanismos de crescimento e colapso de bolhas de vapor diferem sensivelmente dos mecanismos para bolhas de gás.

Enquanto o comportamento das bolhas de vapor é basicamente comandado pelos efeitos de troca de calor, o comportamento das bolhas de gás é comandado por efeitos de inércia da massa gasosa e da massa líquida, e independendo da variação de temperatura. Tal fato é também verificado por Kranenburg [10]

$$\text{De (102)} \quad \frac{d\alpha}{dt} = \frac{3\alpha}{\left[\frac{2\sigma}{R} - \frac{3kT}{R^3} \right]} \frac{dp}{dt} \quad (103)$$

Keller e Zielke [7] mediram a variação do volume relativo de gás em meio líquido submetido a variações de pressão entre 2.0 - 0,1 bar.

De nosso interesse são os resultados obtidos com água não filtrada onde, verificaram aqueles pesquisadores que a variação do volume relativo de gás presente no líquido é praticamente nula, para a variação de pressão citada, quando a quantidade inicial de gás presente é igual ou menor a 1,44%, para Reynolds variando de $1,5 \cdot 10^5$ a $5,9 \cdot 10^5$.

Valores acima de 1,44%, como pode ser visto na tabela 2, provocam uma redução sensível na velocidade de propagação das ondas de pressão, fugindo ao nosso campo de interesse.

Desta forma, podemos admitir que, na região de golpe, dentro do nosso campo de estudo a variação do volume relativo de gás, α , é nula.

Retornando à equação da continuidade para a massa de gás na região de golpe (77) verificamos que o fluxo líquido de massa de gás, como também a taxa de variação de gás no interior do V.C são nulos, i.é, a equação da continuidade para a massa de gás pode ser abandonada.

Tais conclusões permitem também simplificar a equação da continuidade para a massa líquida na região de golpe (84) onde a variação $\frac{d\alpha}{dt}$ deve ser anulada.

Por outro lado, verifica-se experimentalmente que, na região de separação, a pressão permanece constante enquanto ocorre a formação e desenvolvimento da macro-bolha.

De (103), podemos concluir então que, também nesta região não ocorre variação do volume relativo de gás, i.é, $\frac{d\alpha}{dt}$ é nulo.

Na região de separação, o gás presente no líquido irá deslocar-se para o topo da tubulação, participando do preenchimento da cavidade formada. Mantendo-se α constante, a massa de gás será insuficiente para ocupar todo o volume da cavidade justificando-se assim a adoção do modelo de vaporização do líquido

presente na região, e que será estudado a seguir.

3.2 - Volume relativo de vapor Produção de vapor.

O meio heterogêneo que estudamos no presente capítulo é composto por líquido e uma porcentagem pequena de gás ou gases, conforme enfatizado anteriormente.

Durante a ocorrência do transitório, à pressões acima das de vaporização do líquido, teremos a manutenção do equilíbrio líquido-gás, podendo-se inclusive desprezar a equação da continuidade para a fase gasosa, em condições de pequena quantidade de gás presente ($\alpha \leq 1,44\%$).

À pressões muito baixas, além da variação do volume relativo de gás, teremos a ocorrência da vaporização de parte do líquido que escoar pela seção, que associado ao gás presente gerarão a macro-bolha que se alojará na parte superior da tubulação.

Neste caso, a vaporização de uma pequena massa de líquido irá ocupar um volume de tubulação muito pronunciado, visto que à temperatura de 293 K o volume específico do vapor saturado é muito alto.

Para situar a afirmação do parágrafo anterior, iremos fazer um pequeno estudo do volume ocupado pelo vapor naquelas condições.

À temperatura de 293 K a pressão de vapor correspondente é $p = 2,336 \cdot 10^3$ Pa (abs) e o respectivo volume específico do vapor é $v_v = 57,84$ kg/m³ *. Isto significa que a vaporiza-

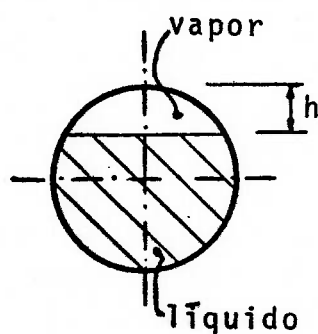
* Dados obtidos em: Silva, R.B. e outros. Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor 4^a ed. EPUSP.

ção de 1 kg de água líquida a $T = 293$ K e à pressão indicada, irá ocupar um volume de $57,84 \text{ m}^3$.

Na tabela 3, abaixo, apresentamos os comprimentos de tubulação ocupados por uma bolha de 1 kg de vapor de água às condições $p = 2,336 \cdot 10^3$ Pa (abs), $T = 293$ K, para vários diâmetros de tubulação usuais em instalações em que 100%, 50%, 30%, 20%, 10% e 5% da área da secção transversal da tubulação estão ocupados pela bolha. Indicam-se, na tabela, também as alturas h correspondentes à região hipoteticamente ocupada pelo vapor.

		1	2	3	4	5	6
D (m)	A (m^2)	$1 \times A$	$0,5 \times A$	$0,3 \times A$	$0,2 \times A$	$0,1 \times A$	$0,05 \times A$
		$h=D$	$h=D/2$	$h \approx D/3$	$h=D/4,2$	$h=D/8,2$	$h=D/3,0$
		L(m)	L(m)	L(m)	L(m)	L(m)	L(m)
0,2	0,0314	1842,0	3684,0	6140,0	9210,0	18420,0	36840,0
0,4	0,1256	460,5	921,0	1535,0	2302,5	4605,0	9210,0
0,6	0,2827	204,6	409,2	682,0	1023,0	2046,0	4092,0
0,8	0,5026	115,1	230,2	383,7	575,5	1151,0	2302,0
1,0	0,7854	73,64	147,3	245,5	368,2	736,4	1472,0
1,2	1,1310	51,14	102,3	170,5	255,8	511,5	1023,0

Tabela 3 - Volume ocupado pelo vapor de água em tubulação submetida à $p = 2,336 \cdot 10^3$ Pa e $T = 293$ K.



As medições levadas a efeito por Provoost [19] num ponto alto de um conduto de 1,8 m de diâmetro e 30.000 m de comprimento possibilitaram determinar o comportamento da altura h da macro bolha em função do tempo.

Das curvas $h = h(t)$ obtidas, verifica-se que durante a permanência do ponto alto à pressão de vapor, a altura h assume um valor praticamente constante ($h \approx D/8$) durante a maior parte do tempo de medida, passando por valores máximos e mínimos próximos a, respectivamente, $h \approx D/16$; $h \approx D/1,7$. O tempo de ocorrência destes valores extremos é praticamente insignificante se os compararmos com o tempo em que a altura da coluna de vapor se mantém próximo ao valor $D/8$.

Podemos ainda concluir que o valor $h = D/8$ independe da vazão, observando as curvas $h = h(t)$ apresentados para vazões iguais à vazão máxima e cerca de 90% desta.

Observando a coluna 5 da tabela 3, torna-se evidente que a massa de líquido vaporizada é bastante pequena, pois para apenas 1 kg de água líquida ($V = 1,0018 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$) vaporizada, deveremos dispor de comprimentos absurdos de tubulação para acomodar o vapor produzido (para $h \approx D/8$ e $D = 2 \text{ m}$, $L = 185 \text{ m}$).

A quantidade de vapor obtida, ou a massa líquida evaporada, está diretamente relacionada com a energia disponível para ser cedida ao líquido, sob forma de calor, energia cinética e de pressão, existentes na região de separação.

Conforme veremos adiante, a troca de calor desenvolve importante função na vaporização rápida de líquidos saturados.

O método de vaporização a ser em seguida proposto e utilizado em cálculos é aquele que mais se assemelha inclusive em intervalo de tempo de ocorrência do fenômeno transitório em estudo.

O método, chamado de "flash" pelos pesquisadores em cujas referências nos apoiamos, revela-se o mais adequado dos métodos de vaporização estudados, pois os demais, normalmente baseados apenas no fornecimento de calor, revelam uma inércia fazendo com que o tempo de desenvolvimento do fenômeno seja muito maior que o tempo de interesse do transitório.

3.4.1 - Mecanismo de vaporização.

A pressão de vapor de um líquido é uma característica de equilíbrio da substância, função da temperatura na qual a mesma é mantida e que apresenta uma curva semelhante à abaixo esquematizada (TBDC), única para cada substância.

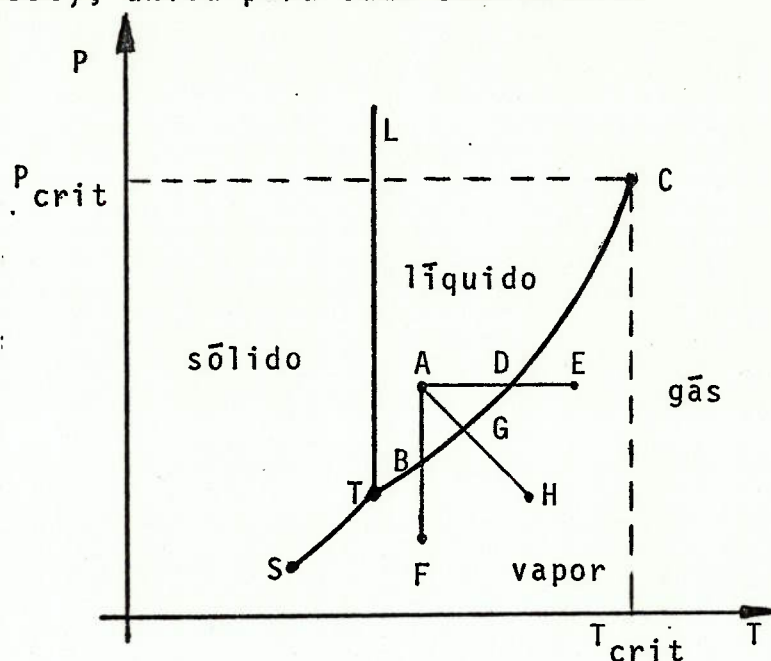


Fig. 4 - Curva de pressão de vapor para substância pura.

A curva de pressão de vapor (TBDC) separa as regiões em que a substância se apresenta apenas num único estado, ou seja, acima da curva (pto. A) temos apenas líquido presente, enquanto - abaixo da mesma encontramos apenas vapor de líquido (ptos. E, F, H). Sobre a curva, porém, os dois estados líquido e vapor ocorrem simultaneamente, podendo coexistir indefinidamente em quaisquer - proporções. O ponto T é chamado de ponto triplo, onde coexistem os estados sólido, líquido e vapor. O ponto C é o ponto crítico, ou estado crítico, no qual deixa de existir a distinção entre vapor e líquido e todas as propriedades se confundem. Substâncias submetidas a temperaturas acima da crítica passam ao estado gasoso, tornando-se impossível liquefazê-los, por maiores que sejam as pressões impostas.

A vaporização de uma substância qualquer a partir do estado líquido, ou sua condensação a partir do estado de vapor, pode ocorrer por três caminhos distintos, todos indicados na figura 5.

A primeira forma de vaporização é aquela que ocorre a pressão constante representada pela curva ADE. Neste processo, a energia fornecida ao líquido para vaporizá-lo ocorre sob a forma de fornecimento de calor.

Uma segunda forma de vaporização é aquela que pode ocorrer à temperatura constante representada pela curva ABF, em que a energia transferida aparece apenas sob forma de energia de pressão.

O terceiro tipo de vaporização utiliza-se de um processo misto das duas formas anteriormente citadas. Neste caso a energia fornecida ao líquido é feita tanto por troca de calor como por variação de pressão.- processo este indicado pela curva AGH.

Uma massa líquida, submetida inicialmente à pressão p_A e à temperatura T_A , ao passar por reduções sucessivas de pressão, manter-se-á líquida enquanto não for atingida a pressão p_B , chamada de pressão de vapor do líquido à temperatura $T_A (=T_B)$. Ao atingir a pressão p_B , inicia-se a formação de vapor de líquido, coexistindo ambos os estados.

A partir deste instante, podemos ter duas situações distintas.

Admitindo-se a presença de uma fronteira móvel para o sistema composto por líquido e a pequena parcela inicial de vapor formado, a manutenção da pressão e da temperatura constantes não irá impedir o prosseguimento do fenômeno de vaporização até o total desaparecimento do líquido presente. Esta situação ocorre devido à possibilidade do vapor dispor de um volume crescente, para se acomodar devido ao movimento da fronteira, mantendo-se assim constante o seu volume específico.

A segunda situação acontece quando o recipiente disponível não possui uma fronteira móvel, dispondo apenas de um volume definido para acomodar o vapor gerado. Neste caso, temos o de

envolvimento de uma acentuada produção de vapor ao iniciar-se o fenômeno. O aumento da massa de vapor mantido constante o volume para a sua acomodação, irá provocar uma redução na taxa de produção de vapor, visto tendermos rapidamente a uma situação em que o quociente entre o volume disponível e a massa de vapor deve igualar-se ao volume específico do vapor nas condições de pressão e temperatura de trabalho. Assim, após um intervalo de tempo determinado, atinge-se uma situação de equilíbrio onde a produção de vapor que continua a acontecer iguala-se à quantidade de líquido condensado, obtendo-se uma produção resultante de vapor igual a zero.

Um estudo microscópico, ou um estudo do comportamento das bolhas de vapor durante o processo de formação, crescimento e fuga da região líquida [2] indica-nos a ocorrência de variações de temperatura em pontos localizados, devido aos mecanismos de interação energética entre as fases líquida e vapor.

Retomando à primeira das situações indicadas, podemos afirmar que subseqüentes reduções de pressão irão transformar o vapor formado em vapor superaquecido.

Os extremos da curva, ponto crítico C e ponto triplo T, não nos interessam, pois o nosso estudo limita-se a água em temperaturas ao redor de 293 K. Também não nos interessam valores de pressão abaixo da pressão de vapor do líquido à temperatura de trabalho, pois jamais teremos a ocorrência da vaporização de toda a massa líquida.

3.4.2 - Vaporização por "Flash"

O processo chamado "flash" ocorre quando uma massa líquida é submetida a uma rápida descompressão a uma pressão abaixo da pressão de saturação correspondente à temperatura do líquido. Ocorre então uma intensa produção de vapor na superfície líquida e através da massa líquida, enquanto bolhas de vapor formam-se e crescem. O processo normalmente é completado em alguns décimos de segundo, atingindo-se então nova situação de equilíbrio.

No nosso caso, líquido inicialmente saturado escoava por uma tubulação sendo submetido a um processo de dissipação de energia que provoca uma diferença de pressão entre duas seções transversais próximas.

Em regiões pouco afastadas da seção inicial, na qual o líquido atinge seu ponto de vaporização, teremos uma situação em que a pressão de vapor é maior que a do meio circundante. A energia disponível, devido à perda de pressão, provoca a vaporização de uma pequena massa líquida num intervalo de tempo também pequeno, originando-se aí o nome do processo.

Tal processo tornar-se-á mais claro ao estudarmos a figura 5, onde encontramos um trecho de interesse da curva de pressão de vapor, e um trecho de conduto com duas seções transversais distantes entre si dx .

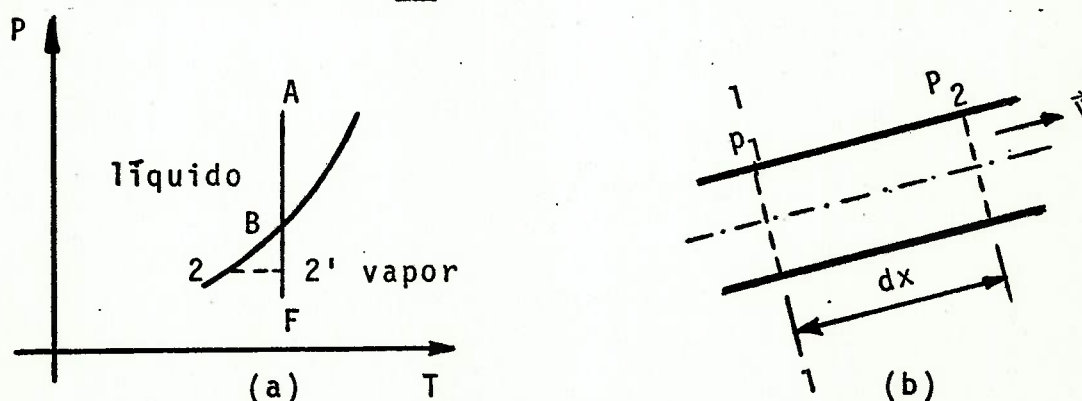


Fig. 5 - Vaporização por flash.

O processo descrito anteriormente pode ser resumido nos seguintes passos:

1) Na tubulação, a secção 1 (fig.5.b) é a primeira a ser submetida à pressão de vapor, i.e., $p_1 = p_B$. (fig.5.a)

2) Devido à dissipação de energia no escoamento, $p_2 < p_1$. À temperatura constante, teríamos o estado da massa fluida caracterizada pelo ponto 2' (fig.5.a).

3) A situação revela-se impossível, pois a existência de vapor superaquecido (pto.2') apenas ocorre sob condições nas quais toda a massa fluida já foi evaporada, inexistindo líquido na região.

4) A situação é caracterizada pelo ponto 2 (fig.5.a), onde $p_2 < p_1$ e $T_2 < T_1$.

5) A energia disponível é aproveitada para vaporizar parte do líquido, sendo restaurada pelo calor latente de vaporização característico do líquido, retomando a secção 2 às condições indicadas pelo ponto B da curva.

O comportamento da temperatura e conseqüentemente o da pressão, foram verificados experimentalmente por Delhaye e outros [2], obtendo-se o comportamento da temperatura, na interface entre uma bolha de vapor e o líquido envolvente, exposto em gráficos qualitativos semelhantes ao abaixo reproduzido.

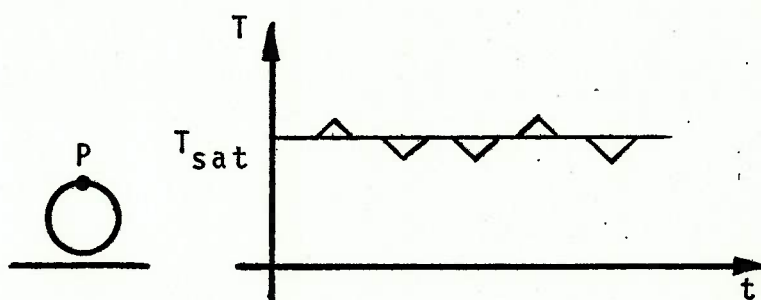


Fig.6 - Comportamento da temperatura em função do tempo (pto.P) durante "flash".

Experiências conduzidas por Hooper e outros [4 ; 5] indicaram que a pressão na superfície de um líquido em processo de vaporização por flash mantém um valor constante durante a maior parte do processo. Esta pressão de quasi-equilíbrio foi verificada independente da pressão acima da superfície líquida, e dependente apenas da temperatura do líquido anterior ao início do pro

cesso.

A existência desta pressão de quasi-equilíbrio é atribuída, entre outros fatores menos significativos | 5 | à alta taxa de produção de vapor através da superfície, resultante da também elevada taxa de fornecimento de calor para a superfície do líquido. Este fornecimento de calor é explicado pelo gradiente de temperatura que aparece na superfície do líquido, decorrente da rápida mudança na situação de equilíbrio (fig.5) correspondente à menor pressão de vapor.

A intensa vaporização causa um rápido aumento no volume específico do fluido, provocando o aparecimento de bolhas de vapor de líquido e que são intensamente acelerados para fora da superfície líquida provocando uma reação na mesma. Esta reação é a principal causadora do aparecimento da pressão de quasi-equilíbrio anteriormente citada.

Após determinado intervalo de tempo a troca de calor no meio líquido, que inicialmente acontecia por condução, passa a acontecer por convecção, caracterizando-se este segundo processo por um acréscimo de temperatura e conseqüente aumento na taxa de produção de vapor. O tempo em que tal mecanismo de troca de calor é mudado, chama-se tempo crítico.

Verificou-se, também, que o intervalo de tempo significativo para o estudo da massa evaporada, ou para o estudo do fenômeno chamado flash é de cerca de 100 a 150 mili-segundos, podendo-se atingir, no máximo, 500 mili-segundos. Além destes limites, de tempo atinge-se novas situações de equilíbrio.

Torna-se conveniente lembrar que estes resultados foram observados para os experimentos levados a efeito por Hooper e outros | 5 |, sob condições estacionárias, i.é, provocando-se apenas uma variação de pressão, e verificados para regime permanente.

Quando do escoamento em condutos o fenômeno permanece enquanto a região estiver submetida ao escoamento da fase líquida e conseqüente dissipação de energia, interessando-nos apenas enquanto não atingir o equilíbrio entre a taxa de produção de vapor e a taxa de condensação do mesmo.

As equações a seguir apresentadas, apesar de terem sido propostas por vários pesquisadores, a partir de hipóteses simplificadas a seguir expostas, encontram-se em [5]. Tais equações serão utilizadas em vista da proximidade entre os resultados através delas obtidos e os ensaios levados a efeito. Evidentemente estaremos induzidos a erros, pois tais equações foram propostas para situações em que ocorre apenas uma queda de pressão, ao invés da queda contínua que acontece durante o escoamento, mesmo transitório.

Um maior aprofundamento no estudo de tal método de vaporização em escoamentos transitórios justifica um trabalho específico.

Admitindo durante o período de flash a ocorrência de uma sucessão de estados de equilíbrio ao longo de caminhos politrópicos, acompanhados por uma expansão reversível de vapor, considerado gás perfeito; Abdelmessih [5] propõe o conjunto de equações abaixo para determinação da massa de vapor produzida, desprezando-se o efeito da mudança de mecanismo de troca de calor sobre a massa evaporada.

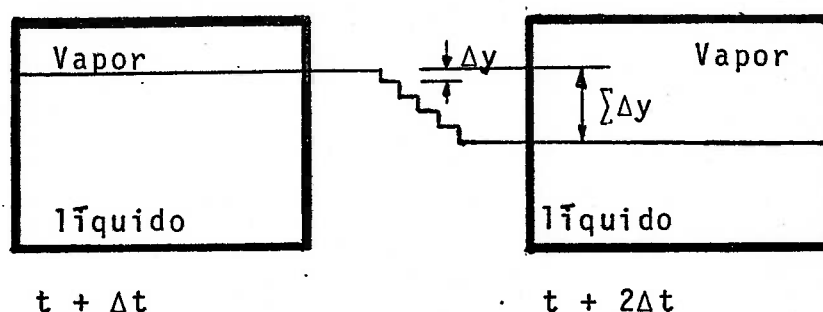


Fig.7 - Caminho percorrido durante expansão do vapor entre dois instantes sucessivos.

$$m_v(t) = \frac{p_r \sum \Delta y u_v(t) \cdot \Delta t}{v_v(t)} \quad (105)$$

$$u_v(t) = \left[\frac{2}{\eta + 1} \frac{\bar{R}}{\bar{M}} T_v(t) \right]^{1/2} \quad (106)$$

$$v_v(t+\Delta t) = \frac{v_{i_v} + A_v \cdot \sum \Delta y}{\sum m_v(t)} \quad (107)$$

$$T_v(t+\Delta t) = T_v(t) \left[\frac{v_v(t)}{v_v(t+\Delta t)} \right]^{n+1} \quad (108)$$

Ao se iniciar o processo, o volume disponível para acomodar o vapor \bar{v} é dado por:

$$v_{i_v} = \alpha \frac{\pi D^2}{4} L_v \quad (109)$$

Em instantes subsequentes, [5] apresenta curvas que nos permitem relacionar a altura de líquido evaporada em função do tempo, da massa inicial de líquido e da área disponível para evaporação, que nos permite obter dados para cálculo conforme veremos nos capítulos subsequentes.

O estudo dos meios de gás e vapor, feitos neste capítulo, permite-nos chegar a conclusões simplificadas a serem aplicadas ao equacionamento obtido nos capítulos anteriores.

Agora, ao final do capítulo, faremos um resumo destas conclusões e apresentaremos as equações citadas já simplificadas, para cada região de estudo.

a) Região de golpe.

(91) a.1) - $\beta = 0$

a.2) $\alpha = \frac{4}{3} \pi R^3 N \rho_l$

a.3) $\left[\begin{array}{l} \frac{d\alpha}{dt} = 0 \\ \dot{p}_v = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{para } \alpha \leq 1,44\% \\ \text{para } \alpha \leq 1,44\% \end{array}$

$$(84) \quad \frac{1}{a^2 \rho_\ell} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{continuidade para (84.a) fase líquida}).$$

$$(85) \quad \text{Irrelevante} \quad (\text{continuidade para fase de gás})$$

$$(86) \quad \frac{1}{\rho_\ell (1-\alpha)} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + v \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| + g \sin \theta = 0$$

(movimento)

b) Região de separação.

$$(91) \quad \text{b.1) } \alpha = \frac{4}{3} \pi R^3 N \rho_\ell$$

$$\text{b.2) } \begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = f \left(\frac{dp}{dt} \right) = 0 \\ \dot{p}_v = 0 \end{cases}$$

$$(105) \quad \text{b.3) } \dot{p}_v = \frac{m_v}{\Delta t} \cdot \frac{4}{\pi D^2 L_v} = \frac{4 \dot{m}_v}{\pi D^2 L_v} \quad (105.a)$$

$$(76) \quad \frac{1}{a^2 \rho_\ell} \frac{dp}{dt} - \frac{1}{(1-\alpha-\beta)} \frac{d\beta}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{-4 \dot{m}_v}{(1-\alpha-\beta) \pi D^2 \rho_\ell L_v} \quad (76.a)$$

$$(80) \quad \text{Irrelevante}$$

$$(82) \quad \frac{1}{a_v^2 \rho_v} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{4m_v \dot{V}}{\beta \pi D^2 \rho_v L_v} \quad (82.a)$$

$$(87) \quad \frac{1}{\rho_l(1-\alpha-\beta)} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + v \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| + g \sin\theta = 0$$

Podemos verificar que na região de golpe a simplificação aplicada conduz à equação da continuidade para o meio heterogêneo (84), idêntica àquela obtida para o meio homogêneo (50), enquanto a equação do movimento (86) difere daquela obtida para o meio homogêneo apenas pela introdução de $(1-\alpha)$ no denominador do primeiro termo de (86). Considerando-se que $(1-\alpha) \sim 1$, podemos afirmar que o transitório em meio heterogêneo na região de golpe, pode ser tratado como um fenômeno ocorrente em meio homogêneo.

Na região de separação verificamos que não existe a variação do volume relativo de gás α , o que permite, além de simplificar a equação da continuidade para o meio líquido, reduzir o número de equações de quatro para três, o que facilita quando da integração numérica das equações.

CAPITULO IV

MEIO HOMOGENEO. CONDIÇÕES DE CONTORNO.
SIMPLIFICAÇÕES. SOLUÇÕES NUMÉRICAS.

Nos capítulos precedentes deduzimos as equações que regem o escoamento transitório em dutos, tanto para fluidos homogêneos como para heterogêneos, compressíveis ou não, submetendo-se tais equações apenas à restrição do escoamento ocorrer em dutos cilíndricos, de parede fina ou parede grossa. Para dutos não cilíndricos podemos nos reportar a Wylie e Streeter [28].

Estabelecidas as equações de derivadas parciais, sua solução irá nos possibilitar a determinação das pressões (ou cargas) e velocidades (ou vazões) ao longo da tubulação em cada instante do transitório.

Evidentemente, cada um dos três conjuntos de equações deduzidos irá apresentar uma solução própria, i.é, valores numéricos para as variáveis dependentes p , V ; afetados por um erro maior ou menor, em função da precisão de modelagem do fenômeno.

Porém, exigindo tais equações métodos numéricos de solução, devemos, como engenheiros, definir claramente uma fronteira até a qual o preço da solução, i.é, o tempo de uso do computador digital justifica a precisão obtida.

Neste capítulo, iremos estudar as condições de contorno internas, i.é, aquelas que independem da fonte geradora do transitório, como também as simplificações possíveis de ser feitas nos vários conjuntos de equações, além dos métodos numéricos a ser aplicados para integração de tais equações.

Ao final do capítulo, apresentaremos uma condição de contorno externa simples, para que nos seja possível efetuar cálculos com as várias formas de integração que serão propostas e

assim comparar os resultados numéricos obtidos.

Este procedimento torna-se necessário neste capítulo, - pois nos possibilitará aplicar as simplificações que se revelarem convenientes ao meio heterogêneo.

Por outro lado, justifica-se o estudo mais aprofundado do meio homogêneo pela possibilidade de utilização de seu equacionamento à região de golpe em meio heterogêneo.

4.1 - (a) Meio homogêneo

(b) Meio heterogêneo simplificado

Para ambos os casos, a solução será idêntica visto que a) difere de b) apenas no tratamento dado à celeridade. Em vista desta grandeza não participar das derivadas, além de independer das variáveis x e t com relação às quais será feita a integração, ambos os problemas se equivalem.

A utilização do método das características justifica-se em face à facilidade e simplicidade que oferece com relação aos métodos de diferenças finitas para problemas simples. Ainda nestes dois casos trabalharemos com a variável H (carga) e Q (vazão), ao invés de p (pressão) e V (velocidade).

As equações a serem estudadas e resolvidas são:

$$(56) \quad g \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} - V \operatorname{sen} \theta + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$(69) \quad g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V |V| = 0$$

Para efeito de comparação, adotaremos duas soluções distintas, uma completa, sem simplificações, outra conforme simpli-

ficações abaixo:

a) Em (56) $V \frac{\partial H}{\partial x}$ e $V \sin \theta$ são verificados desprezíveis em face aos demais $\frac{\partial V}{\partial x}$ termos presentes.

b) Em (69) $V \frac{\partial V}{\partial x}$ também é desprezível face aos demais valores.

Resultam então as equações abaixo para o problema simplificado:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (110)$$

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{2D} V |V| = 0 \quad (111)$$

A aplicação do método das características ao sistema de duas equações de derivadas parciais acima, permite obter um conjunto de quatro equações de derivadas totais a serem verificadas duas a duas, e que permitirão a sua integração e consequente solução numérica [9, 20, 28]

Inicialmente, somaremos (110) e (111) multiplicada por um número λ , a ser determinado.

$$\lambda \frac{\partial H}{\partial t} + \lambda \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{2D} V |V| = 0 \quad (112)$$

Ordenando convenientemente,

$$\lambda \left[\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{g}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial V}{\partial t} + \lambda \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{f}{2D} V |V| = 0 \quad (113)$$

A simples observação de (113) nos indica que se:

$$\frac{g}{\lambda} = \lambda \frac{a^2}{g} = \frac{dx}{dt} \quad (114)$$

o antigo sistema de derivadas parciais transforma-se numa única equação de derivadas totais, ver (26).

Resolvendo:

$$\frac{g}{\lambda} = \lambda \frac{a^2}{g} \quad (115)$$

$$\lambda = \pm \frac{g}{a} \quad (116)$$

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (117)$$

Substituindo (116) em (113),

$$\lambda \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad (118)$$

Teremos então duas equações a partir da substituição de (116) em (117), válidas cada qual sobre a reta $\frac{dx}{dt}$ correspondente, também chamadas retas características.

$$\left[\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad (119) \right.$$

$$\left. \frac{dx}{dt} = a \quad (120) \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V |V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{array} \right. \quad (121) \quad (122)$$

A aplicação do método anteriormente utilizado às equações completas (56) e (69) conduz:

$$\left[\begin{array}{l} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V |V| - \frac{g}{a} V \text{ sen } \theta = 0 \\ \frac{dx}{dt} = (V+a) \end{array} \right. \quad (123) \quad (124)$$

$$\left[\begin{array}{l} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V |V| + \frac{g}{a} V \text{ sen } \theta = 0 \\ \frac{dx}{dt} = (V-a) \end{array} \right. \quad (125) \quad (126)$$

As equações acima (123) a (126) diferem de (119) a (122) apenas no termo $(\frac{g}{a} V \text{ sen } \theta)$ presente, e que houvera sido desprezado, e na inclinação das retas características, que neste caso correspondem a $(V \pm a)$ e naquele a $(\pm a)$.

Lembrando que V é a velocidade de escoamento em cada uma das secções de estudo, e que estamos trabalhando com baixos valores de velocidade (escoamento líquido), o termo $\frac{g}{a} V \text{ sen } \theta$ torna-se efetivamente desprezível face a $\frac{g}{a}$, podendo-se aproximar $(V \pm a)$ para $\pm a$.

Para exemplificar, admitindo uma celeridade de 600 m/s e velocidade de 6 m/s, lembrando que 600 m/s é uma celeridade baixa, verifica-se que o erro introduzido ao se desprezar V em (124)

ou (126), é de $\pm 1\%$, bastante aceitável. Tal aproximação será verificada ao compararmos os resultados obtidos para ambos os métodos de cálculo.

A integração das equações será feita introduzindo-se a área A da secção transversal da tubulação para substituir a velocidade V pela vazão Q , conforme |9,28|

$$(119) \quad \frac{dH}{dt} + \frac{a}{Ag} \frac{dQ}{dt} + \frac{a}{g} \frac{f}{2DA^2} Q|Q| = 0 \quad (127)$$

$$(120) \quad dx = a dt$$

$$\int_{H_1}^{H_2} dH + \frac{a}{Ag} \int_{Q_1}^{Q_2} dQ + \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_1}^{x_2} Q|Q| dx = 0 \quad (128)$$

Enquanto para a equação completa

$$(123) \quad \int_{H_1}^{H_2} dH + \frac{a}{Ag} \int_{Q_1}^{Q_2} dQ + \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_1}^{x_2} Q|Q| dx - \frac{g}{A} \operatorname{sen} \theta \int_{x_1}^{x_2} Q dx = 0 \quad (129)$$

A menos do 3º membro de (128) ou do 3º e 4º membros de (129) o que exigirá uma função específica que relacione Q com a coordenada x , os demais podem ser integrados entre os extremos convenientes. Tais extremos serão determinados ao estabelecermos o método de cálculo a utilizar, no apêndice A.

Desconhecida a priori, a função $Q = Q(x)$ pode ser aproximada por duas formas. Para casos em que a perda de carga por atrito na instalação for pouco significativa, i.é, não predominante, admitimos em primeira aproximação $Q = \text{constante}$, tal que:

$$\int_{x_1}^{x_2} Q|Q| dx = Q_1|Q_1| (x_2 - x_1) \quad (130)$$

$$\int_{x_1}^{x_2} Q dx = Q_1(x_2 - x_1) \quad (131)$$

Uma segunda aproximação é obtida tomando-se $Q = Kx$,
daí:

$$\int_{x_1}^{x_2} Q|Q| dx \cong \frac{1}{4} (Q_2+Q_1)|Q_2+Q_1|(x_2-x_1) \quad (132)$$

introduzindo-se neste caso um erro, com relação à solução correta, proporcional a $\left(\frac{x_2 - x_1}{12}\right)^3$

$$\int_{x_1}^{x_2} Q dx = \frac{1}{2} (Q_2+Q_1) (x_2-x_1) \quad (133)$$

sendo esta a solução correta.

As equações finais sobre as respectivas retas características serão:

$$(116) \quad \pm (H_2 - H_1) + \frac{a}{g} (Q_2 - Q_1) + F(x) \cdot \frac{f}{2gDA^2} = 0 \quad (134)$$

$$(117) \quad \Delta x = \pm a \Delta t \quad (135)$$

$$(129) \quad \pm (H_2 - H_1) + \frac{a}{Ag} (Q_2 - Q_1) + \frac{f}{2gDA^2} F(x) \pm \frac{g}{A} \sin \theta G(x) = 0 \quad (136)$$

$$(124) - (126) \quad \Delta x = (V \pm a)\Delta t \quad (137)$$

onde

$F(x)$ é dado por (130) ou (132)

$G(x)$ é dado por (131) ou (133)

Os sinais \pm indicam a validade da equação sobre as retas características de inclinação (+) e (-) respectivamente.

Um estudo comparativo entre as várias opções de cálculo possíveis será feito para justificar a utilização de um dos mētodos com relação aos demais.

No apêndice (A-I), encontramos o mētodo das caracte-rísticas aplicado para as equações para programação em computador.

A aplicação de tal mētodo leva-nos aos resultados abaixo resumidos:

4.1.1) Aproximação de 1ª ordem - Equação simplificada

$$(A-19) \quad HP(i) = \frac{1}{2} (CP + CM) \quad (138)$$

$$(A-17) \quad QP(i) = \frac{CP - HP(i)}{B} \quad (139)$$

$$(A-18) \quad QP(i) = \frac{HP(i) - CM}{B} \quad (140)$$

$$(A-15) \quad CP = H(i-1) + B \cdot Q(i-1) - R[Q(i-1) \cdot |Q(i-1)|] \quad (141)$$

$$(A-16) \quad CM = H(i+1) - B \cdot Q(i+1) + R[Q(i+1) \cdot |Q(i+1)|] \quad (142)$$

Tais equações são válidas para todos os pontos da tubulação, excetuados os correspondentes ao início e final da mesma, onde, além de condições de contorno externas valem respectivamente (141) - (139) e (142)-(140).

4.1.2) Aproximação de segunda ordem.

Aplicado ao método de Newton-Rophson [ap.A-1], o cálculo de $QP(i)$ deve ser feito por aproximações sucessivas ao valor admitido correto: onde k é o número de tentativas a ser feitas para obter o valor correto, através de:

$$QP(k+1) = QP(k) - \frac{E[QP(k)]}{E'[QP(k)]} \quad (143)$$

$$\begin{aligned} (A-22) \quad E = & \left[H(i+1) - H(i-1) \right] + B \left[2 \cdot QP(i) - Q(i+1) - Q(i-1) \right] + \\ & + \frac{R}{4} \left\{ \left[QP(i) + Q(i+1) \right] \cdot \left[|QP(i) + Q(i+1)| \right] + \left[QP(i) + Q(i-1) \right] \cdot \right. \\ & \left. \cdot \left[|QP(i) + Q(i-1)| \right] \right\} \quad (144) \end{aligned}$$

$$(A-27) \quad E' = 2B + \frac{R}{2} \left[|QP(i) + Q(i+1)| + |QP(i) + Q(i-1)| \right] \quad (145)$$

O método de cálculo de $QP(i,k)$ por aproximações sucessivas é resumido no diagrama de blocos abaixo.

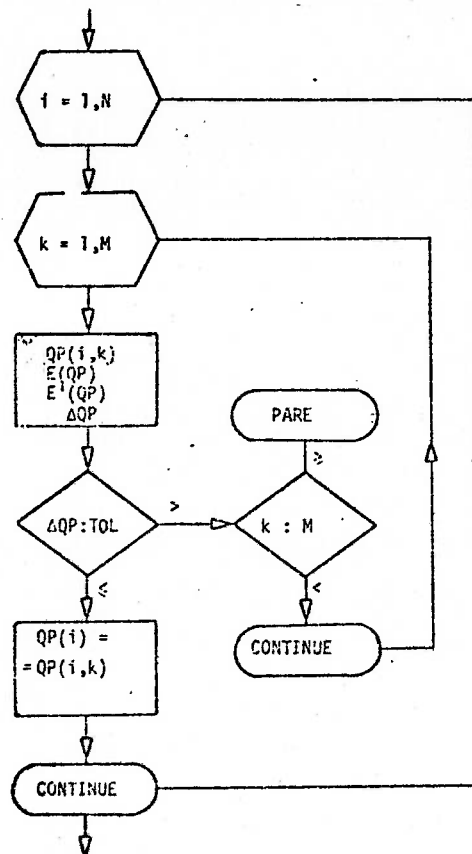


Fig. 8 - Diagrama de blocos para cálculo da vazão (QP)
(Aprox. de 2^a ordem).

A carga na secção é calculada através das equações (146) ou (147) abaixo:

$$(A-20) \quad HP(i) = H(i-1) - B \left[QP(i) - Q(i-1) \right] - \frac{R}{4} \left\{ \left[QP(i) + Q(i-1) \right] \cdot \left[|QP(i) + Q(i-1)| \right] \right\} \quad (146)$$

$$(A-21) \quad HP(i) = H(i+1) + B \left[QP(i) - Q(i+1) \right] + \frac{R}{4} \left\{ \left[QP(i) + Q(i+1) \right] \cdot \left[|QP(i) + Q(i+1)| \right] \right\} \quad (147)$$

Para a equação completa, onde $\frac{dx}{dt} = v \pm a$, a aplicação

do método do intervalo de tempo especificado nos conduz, para a equação completa com aproximação de primeira ordem às equações abaixo, tomados para caso em que a celeridade e o diâmetro da tubulação são constantes.

$$(A-57) \quad HP(i) = CP - BR \cdot QP(i) \quad (148)$$

$$(A-58) \quad HP(i) = CM + BR \cdot QP(i) \quad (149)$$

$$(A-59) \quad CP = HR(i) + BR \cdot QR(i) \left[1 + CC \cdot STG(I) - RR |QR(i)| \right] \quad (150)$$

$$(A-60) \quad CM = HS(i) - BR \cdot QS(i) \left[1 - CC \cdot STG(I) - RR |QS(i)| \right] \quad (151)$$

$$(A-53) \quad QR(i) = \{Q(i) - CSI [Q(i) - Q(i-1)]\} \cdot \left\{ 1 + \frac{DEL}{A} [Q(i) - Q(i-1)] \right\}^{-1} \quad (152)$$

$$(A-54) \quad QS(i) = \{Q(i) - CSI [Q(i) - Q(i+1)]\} \cdot \left\{ 1 + \frac{DEL}{A} [Q(i) - Q(i+1)] \right\}^{-1} \quad (153)$$

$$(A-55) \quad HR(i) = H(i) - \left[\frac{QP(i) \cdot DEL}{A} + CSI \right] \cdot [H(i) - H(i-1)] \quad (154)$$

$$(A-56) \quad HS(i) = H(i) + \left[\frac{QS(i) \cdot DEL}{A} - CSI \right] \cdot [H(i) - H(i+1)] \quad (155)$$

$$(A-37) \quad DEL = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad ; \quad CSI = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot a \quad (156)$$

4.2 - Condição de contorno externa.

A condição de contorno externa que apresentaremos a seguir será utilizada para comparação dos resultados obtidos em função da aplicação das várias aproximações sugeridas para as integrações de (130) a (133), além das simplificações propostas ao início de 4.1), como também para a relaxação de (124) e (125), transformando-as em (120) e (122) respectivamente.

A condição de contorno citada será representada pelo estudo do transitório em uma tubulação submetida a um escoamento por gravidade alimentado por um reservatório mantido a nível constante, enquanto ao final da linha temos uma válvula sendo fechada cuja lei de fechamento é uma função do tempo t .

Sendo as equações anteriormente obtidas pelo método das características válidas para os chamados pontos internos da tubulação, resta-nos agora definir as condições de carga e vazão nos pontos inicial e final do conduto, chamados de (1) e (NS) na figura 9 abaixo.

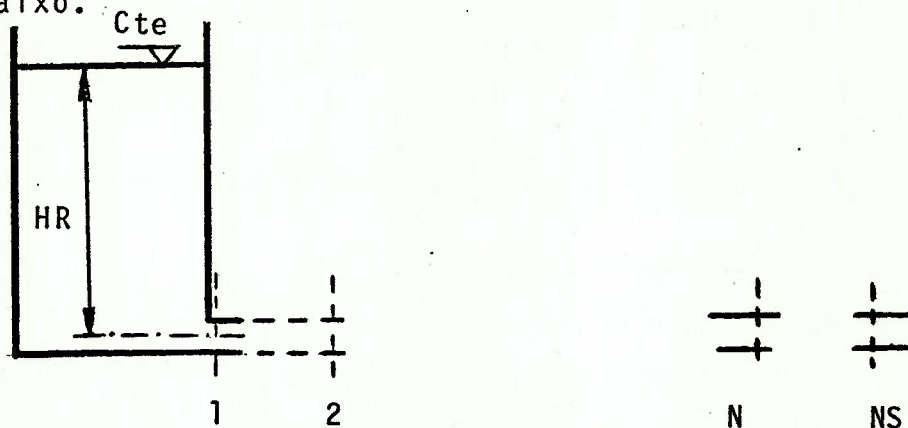


Fig. 9 - Pontos inicial e final para problema em estudo.

A primeira seção de cálculo (1) tem sua carga facilmente determinada, pois desprezaremos as perdas locais face à perda distribuída que ocorre ao longo da tubulação.

$$H(1) = HR \quad (157)$$

em qualquer instante do transitório.

A vazão na secção inicial pode ser calculada de várias formas diferentes, em função das aproximações usadas como também da utilização das equações completas ou simplificadas.

$$(140) \quad QP(1) = \frac{HR - CM}{B} \quad (158)$$

Para a aproximação de segunda ordem o cálculo de $QP(1)$ segue o roteiro proposto no apêndice A, válida apenas a equação - (A-21).

A vazão que se estabelece através de uma válvula pode ser escrita [9] na forma

$$Q = (C_d A_v) \sqrt{2g H} \quad (159)$$

Em regime permanente

$$Q_o = (C_d A_v)_o \sqrt{2g H_o} \quad (160)$$

A vazão Q , em qualquer instante pode ser estabelecida em função da vazão em regime permanente

$$Q = \frac{Q_o}{\sqrt{H_o}} \left[\frac{C_d A_v}{(C_d A_v)_o} \right] \sqrt{H} \quad (161)$$

onde

$$\tau = \frac{(C_d A_v)}{(C_d A_v)_o} \quad (162)$$

indica a condição de abertura da válvula, i.é, τ corresponde à lei de fechamento da válvula.

$$Q = \frac{Q_0}{\sqrt{H_0}} \tau \sqrt{H} \quad (163)$$

Com a válvula operando no final da linha, teremos, aplicada a notação característica ao método das características:

$$QP(NS) = \frac{Q_0}{\sqrt{H_0}} \tau \sqrt{HP(NS)} \quad (164)$$

A carga $HP(NS)$, dada por:

$$(139) \quad HP(NS) = CP - B \cdot QP(NS) \quad (165)$$

Então:

$$(164) \quad QP(NS) = -B \cdot CV + \sqrt{(B \cdot CV)^2 + 2 \cdot CV \cdot CP} \quad (166)$$

onde:

$$CV = \frac{(Q_0 \cdot \tau)^2}{2 \cdot H_0} \quad (167)$$

$$\tau = \left(1 - \frac{t}{t_F} \right)^{EM} \quad (168)$$

t - instante de cálculo

t_F - tempo de fechamento da válvula

A carga ao final da linha é calculada por (165).

Para a aproximação de 2ª ordem, no ponto (1), teremos:

$$HP(1) = H(1) = HR \quad (169)$$

Além de (A-21)

$$HP(1) = H(2) + B [QP(1) - Q(2)] + \frac{R}{4} \{ [QP(1) + Q(2)] \cdot [|QP(1) + Q(2)|] \} \quad (170)$$

Para aplicação do método de Newton - Raphson conforme parágrafo A-1 do apêndice A, teremos:

$$E = H(2) - HR + B [QP(1) - Q(2)] + \frac{R}{4} \{ [QP(1) + Q(2)] \cdot [|QP(1) + Q(2)|] \} \quad (171)$$

$$E' = \frac{dE}{d[QP(1)]} = B + \frac{R}{2} [|QP(1) + Q(2)|] \quad (172)$$

Ao final da linha, ponto (NS), são válidas as equações:

$$(A-20) \quad HP(NS) = H(N) - B [QP(NS) - Q(N)] - \frac{R}{4} \{ [QP(NS) + Q(N)] \cdot [|QP(NS) + Q(N)|] \} \quad (173)$$

$$(164) \quad \overline{QP(NS)}^2 = \frac{H_0}{Q_0^2 \tau^2} HP(NS) \quad (174)$$

Com (167) em (174)

$$HP(NS) = \frac{\overline{QP(NS)}^2}{2 \cdot CV} \quad (175)$$

$$E = H(N) - \frac{\overline{QP(NS)}^2}{2 \cdot CV} - B [QP(NS) - Q(N)] - \frac{R}{4} \{ [QP(NS) + Q(N)] \cdot [|QP(NS) + Q(N)|] \} \quad (176)$$

$$E' = \frac{dE}{d[QP(NS)]} = - \frac{QP(NS)}{CV} - B - \frac{R}{2} \left[|QP(NS) + Q(N)| \right] \quad (177)$$

4.3) Resultados numéricos.

A solução de problemas numéricos através das três alternativas distintas de aplicação do método das características, vistas nos parágrafos anteriores deste capítulo, será agora apresentada.

O problema a ser resolvido é o de um reservatório mantido a nível constante ao início da linha, enquanto ocorre o fechamento de uma válvula ao final da mesma.

A lei de fechamento da válvula é dada por:

$$(168) \quad \tau = \left(1 - \frac{t}{t_F} \right)^{EM} \quad (178)$$

gerando a curva de fechamento abaixo.

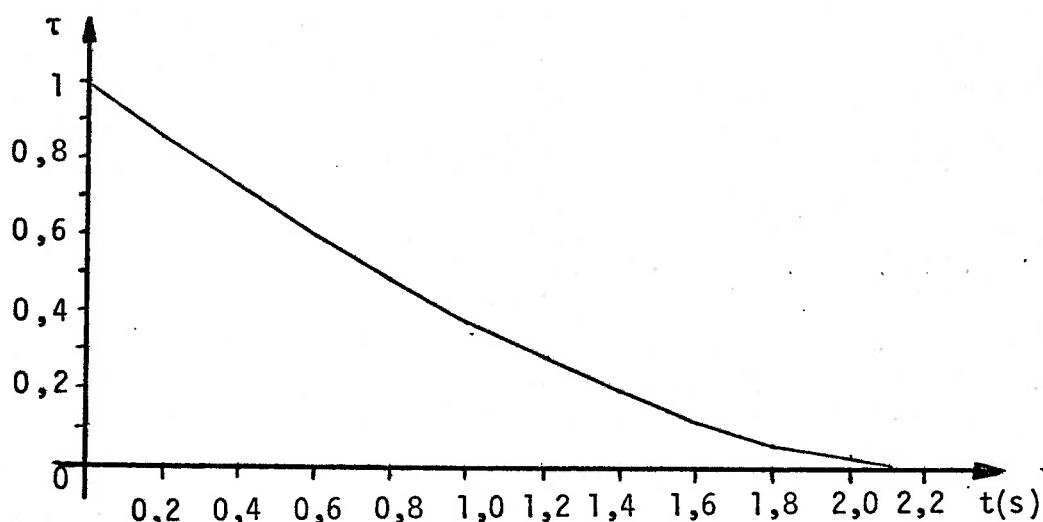


Fig. 10 - Lei de fechamento da válvula.

As demais características do problema, são:

L - comprimento da tubulação	600,0m
D - diâmetro da tubulação	0,5m
a - celeridade	1200,0m
t _F - tempo de fechamento da válvula	2,1s
f - coef. de perda de carga distribuída	0,018
g - aceleração da gravidade	9,806m/s ²

EM - expoente da lei de fechamento da válvula	1,5
N - número de sub-divisões da tubulação	10
HR - nível do reservatório mantido cte.	150 m

O cálculo dos incrementos de tempo Δt , para aplicação do método do intervalo de tempo especificado, sem interpolações, como também para sua aproximação de segunda ordem, leva-nos a $\Delta t = 0,05$ s.

Para a solução completa, obtida através do método do intervalo de tempo especificado, com interpolações, tomando $\zeta = 0,9$ o valor do incremento de tempo é $\Delta t = 0,045$ s.

As constantes B e R, assumem os valores respectivos de $623 \text{ s} \cdot \text{m}^{-2}$ e $2,85 \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-5}$.

A seguir, apresentaremos uma série de figuras e tabelas que representam o comportamento das cargas e vazões durante o intervalo de cálculo do transitório, correspondente a 2,65 segundos, para cada um dos três métodos de cálculo citados.

Torna-se conveniente citar que o problema resolvido é o mesmo encontrado na referência [28], pois objetivamos comparar os nossos resultados com aqueles já confirmados por Wiley e Streeter, para o caso de aplicação do método do intervalo especificado.

Os resultados para os demais métodos não são encontrados na referência citada.

As curvas apresentadas nas figuras 11 e 12 foram obtidas através da utilização do método do intervalo de tempo especificado, aproximação de primeira ordem. A figura 11 caracteriza o transitório a partir do regime permanente ($t = 0,0$ s) até atingirmos a máxima carga ao final da linha ($t = 1,1$ s).

A partir deste instante a onda refletida para o início da linha provoca reduções sucessivas de carga nas várias secções de cálculo, a excessão do início da linha (reservatório), verificada tal afirmação na figura 12.

A tabela 4 apresenta a listagem emitida pelo computador, indicando cargas e vazões ao longo da linha e nos sucessivos instantes de cálculo, até a interrupção de operação.

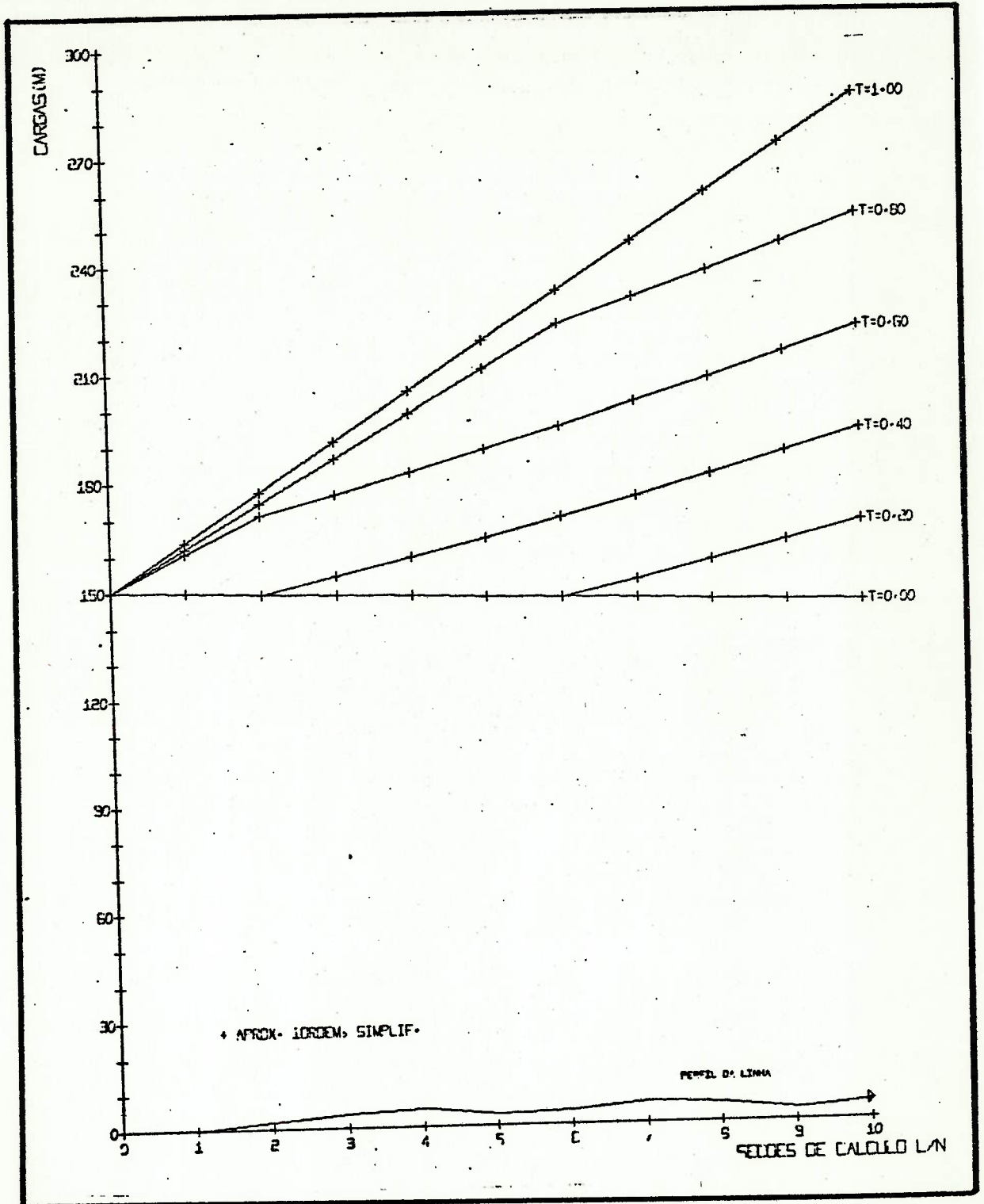


Fig. 11 - Cargas ao longo da tubulação-aprox. 1ª ordem

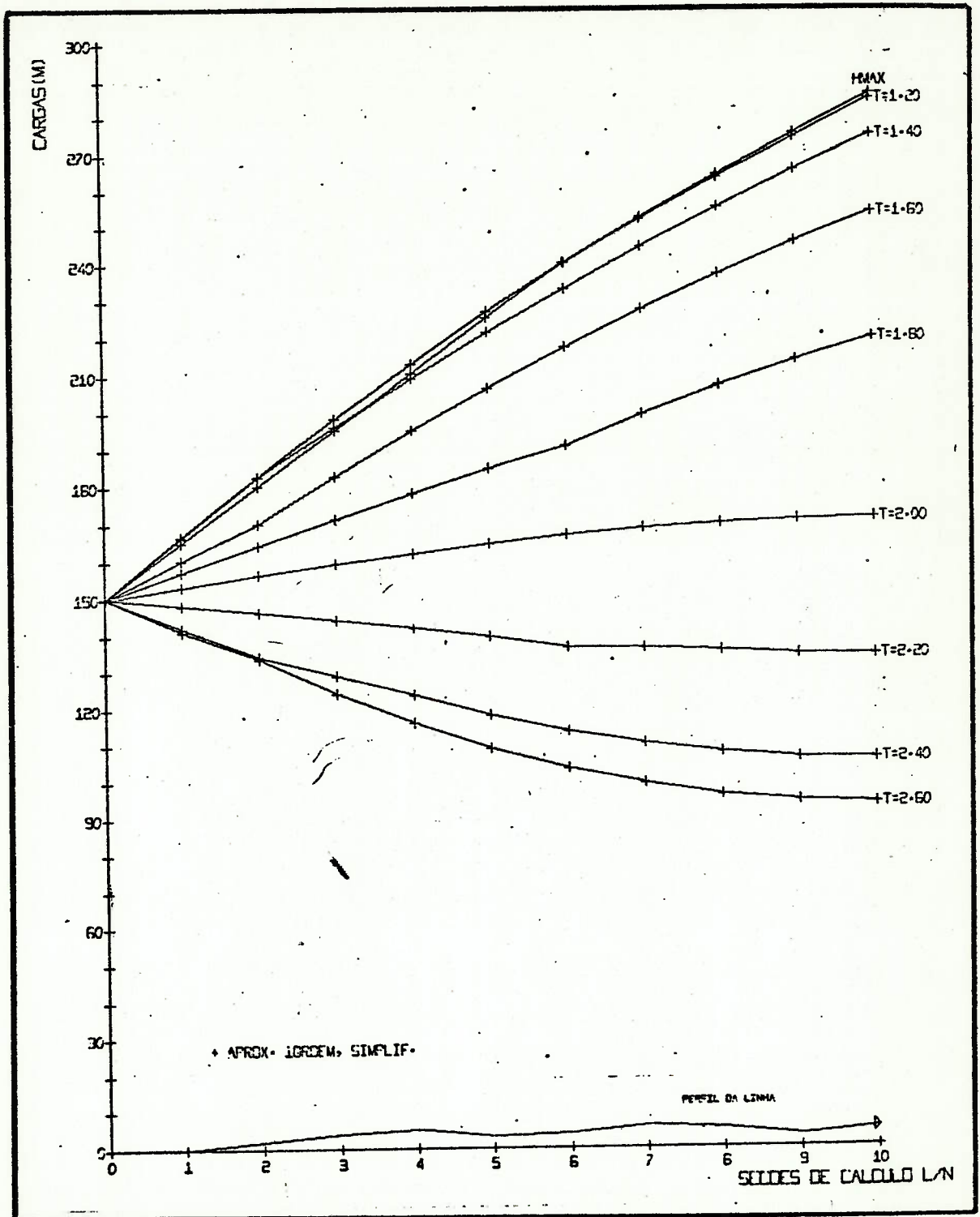


Fig.12 - Continuação da fig. 11

A, XL, D, F, HR, = .120E+04 .600E+03 .500E+00 .180E-01 .150E+03
 MVAL, CA, CDA, = .143E+03 .477E+00 .900E-02 .477E+00 .900E-02
 TF, EM, G, TH, X, = .210E+01 .150E+01 .981E+01 .570E+01
 DT, B, R, = .500E-01 .623E+03 .286E+01

Nº IPR, NN= 10 1 0

ARC(1)= .33E-01 .33E-01 .67E-01 .50E-01 0. .17E-01 .33E-01 .50E-01 .83E-01 .24E+00 0.

CARGAS E VAZÕES AO LONGO DA TUBULACAO

TEMPO X/L	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.	TAU
0.000 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	144.79	144.14	143.49	1.000
G=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	
C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.050 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	144.79	144.14	143.49	0.964
G=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	
C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.100 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	144.79	144.14	143.49	0.929
G=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	
C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.150 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	150.07	154.91	159.95	0.895
G=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	0.460	0.451	
C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.200 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	150.71	155.53	160.57	165.61	0.861
G=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	0.460	0.451	0.442	
C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.250 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	151.35	156.16	161.19	166.42	171.67	0.827
G=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	0.460	0.451	0.442	0.432	
C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.300 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	151.99	156.79	161.80	167.02	172.46	178.11	0.794
G=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	0.460	0.451	0.442	0.432	0.422	
C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.350 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	152.63	157.42	162.42	167.63	173.05	178.69	184.55	0.761
G=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	0.460	0.451	0.442	0.432	0.422	
C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.400 H=	150.00	149.35	148.70	153.27	158.05	163.04	168.23	173.64	179.27	185.11	191.17	0.728
G=	0.477	0.477	0.477	0.469	0.460	0.451	0.442	0.432	0.422	0.412	0.401	
C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.450 H=	150.00	149.35	153.91	158.67	163.65	168.83	174.24	179.85	185.68	191.72	197.99	0.696
G=	0.477	0.477	0.469	0.460	0.451	0.442	0.432	0.422	0.412	0.402	0.391	
C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Tabela 4 - Listagens dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação-aprox. 1ª ordem

0.550	H=	150.00	159.93	168.89	170.04	175.42	181.01	186.82	192.84	199.08	205.52	212.19	0.634
	G=	0.451	0.460	0.451	0.442	0.433	0.423	0.412	0.402	0.391	0.380	0.368	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.600	H=	150.00	160.32	170.65	176.02	181.59	187.39	193.39	199.62	206.05	212.70	219.56	0.604
	G=	0.444	0.443	0.442	0.433	0.423	0.413	0.402	0.391	0.380	0.368	0.357	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.650	H=	150.00	160.72	171.44	182.17	187.95	193.95	200.16	206.58	213.22	220.06	227.11	0.574
	G=	0.426	0.425	0.425	0.423	0.413	0.402	0.391	0.380	0.369	0.357	0.345	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.700	H=	150.00	161.12	172.23	183.36	194.50	200.71	207.12	213.74	220.57	227.61	234.83	0.544
	G=	0.407	0.407	0.406	0.405	0.402	0.391	0.380	0.369	0.357	0.345	0.332	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.750	H=	150.00	161.52	173.04	184.56	196.10	207.55	214.26	221.08	228.10	235.32	242.73	0.515
	G=	0.389	0.388	0.387	0.386	0.383	0.380	0.369	0.357	0.345	0.333	0.320	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.800	H=	150.00	161.92	173.84	185.77	197.70	209.64	221.58	228.60	235.80	243.20	250.78	0.487
	G=	0.369	0.368	0.368	0.366	0.364	0.361	0.357	0.345	0.333	0.320	0.307	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.850	H=	150.00	162.32	174.65	186.98	199.30	211.63	223.96	236.28	243.67	251.24	259.98	0.459
	G=	0.349	0.349	0.348	0.346	0.344	0.341	0.337	0.333	0.321	0.308	0.295	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.900	H=	150.00	162.73	175.46	188.18	200.90	213.62	226.32	239.02	251.70	259.43	267.32	0.432
	G=	0.328	0.328	0.327	0.325	0.323	0.320	0.317	0.313	0.308	0.295	0.281	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.950	H=	150.00	163.13	176.26	189.38	202.49	215.59	228.67	241.73	254.76	267.75	275.79	0.405
	G=	0.307	0.307	0.306	0.304	0.302	0.299	0.296	0.292	0.287	0.282	0.268	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.000	H=	150.00	163.53	177.05	190.56	204.06	217.54	230.99	244.40	257.78	271.11	284.37	0.379
	G=	0.285	0.285	0.284	0.282	0.280	0.277	0.274	0.270	0.265	0.260	0.255	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.050	H=	150.00	163.92	177.83	191.73	205.61	219.45	233.27	247.03	260.74	274.39	288.95	0.354
	G=	0.263	0.263	0.262	0.260	0.258	0.255	0.252	0.248	0.243	0.238	0.236	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.100	H=	150.00	164.30	178.59	192.87	207.12	221.33	235.49	249.60	263.63	277.58	285.05	0.329
	G=	0.240	0.240	0.239	0.237	0.235	0.232	0.229	0.225	0.221	0.221	0.221	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.150	H=	150.00	164.68	179.34	193.98	208.59	223.15	237.66	252.09	266.43	279.29	288.65	0.304
	G=	0.216	0.216	0.215	0.214	0.212	0.209	0.206	0.202	0.203	0.204	0.205	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.200	H=	150.00	165.04	180.06	195.06	210.02	224.92	239.74	254.49	269.15	273.50	283.70	0.281
	G=	0.192	0.192	0.191	0.190	0.188	0.185	0.182	0.184	0.185	0.187	0.188	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Tabela 4 - Continuação

1.300	H=	150.00	165.72	181.42	197.08	212.68	225.21	237.27	248.82	259.82	270.26	280.08	0.235
	Q=	0.143	0.142	0.142	0.140	0.139	0.141	0.144	0.147	0.150	0.153	0.157	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.350	H=	150.00	166.03	182.04	198.00	210.91	223.35	235.29	246.69	257.52	267.74	277.33	0.213
	Q=	0.117	0.117	0.116	0.115	0.118	0.121	0.125	0.129	0.133	0.137	0.142	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.400	H=	150.00	166.32	182.61	195.87	208.67	220.98	232.77	243.99	254.61	264.60	273.91	0.192
	Q=	0.091	0.091	0.090	0.094	0.098	0.102	0.106	0.111	0.116	0.121	0.127	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.450	H=	150.00	166.58	180.15	193.28	205.95	218.09	229.69	240.69	251.07	260.78	269.79	0.172
	Q=	0.055	0.064	0.069	0.073	0.078	0.083	0.088	0.093	0.099	0.106	0.113	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.500	H=	150.00	163.63	177.26	190.23	202.71	214.65	226.02	236.77	246.87	256.27	264.94	0.153
	Q=	0.038	0.042	0.047	0.052	0.058	0.064	0.070	0.076	0.083	0.091	0.099	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.550	H=	150.00	160.67	173.91	186.68	198.94	210.64	221.74	232.20	241.98	251.03	259.33	0.134
	Q=	0.020	0.021	0.026	0.032	0.038	0.045	0.052	0.060	0.068	0.077	0.086	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.600	H=	150.00	160.68	170.10	182.62	194.62	206.03	216.82	226.95	236.37	245.04	252.93	0.116
	Q=	0.034	0.034	0.036	0.042	0.049	0.057	0.065	0.074	0.084	0.093	0.104	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.650	H=	150.00	159.43	168.79	178.03	189.71	200.80	211.24	220.99	230.02	238.27	245.72	0.099
	Q=	0.012	0.012	0.010	0.007	0.001	0.009	0.019	0.028	0.039	0.050	0.062	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.700	H=	150.00	158.71	167.36	175.88	184.22	194.92	204.97	214.31	222.90	230.69	237.65	0.083
	Q=	0.027	0.026	0.024	0.021	0.017	0.008	0.003	0.014	0.025	0.038	0.051	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.750	H=	150.00	157.93	165.80	173.54	181.09	188.39	198.00	206.88	214.99	222.28	228.72	0.068
	Q=	0.040	0.039	0.038	0.034	0.030	0.024	0.012	0.000	0.013	0.026	0.041	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.800	H=	150.00	157.09	164.12	171.01	177.72	184.17	190.20	198.67	206.26	213.01	218.89	0.054
	Q=	0.052	0.051	0.049	0.046	0.041	0.035	0.027	0.014	0.001	0.016	0.032	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.850	H=	150.00	156.18	162.30	168.29	174.09	179.63	184.84	189.68	196.70	202.87	208.14	0.041
	Q=	0.063	0.062	0.060	0.056	0.051	0.044	0.036	0.026	0.010	0.006	0.024	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.900	H=	150.00	155.21	160.36	165.38	170.20	174.77	179.01	182.87	186.29	191.83	196.46	0.029
	Q=	0.072	0.071	0.069	0.065	0.059	0.052	0.043	0.033	0.020	0.003	0.016	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	
1.950	H=	150.00	154.18	158.29	162.27	166.06	169.59	172.80	175.63	178.01	179.88	183.81	0.019
	Q=	0.080	0.079	0.076	0.072	0.066	0.058	0.049	0.038	0.025	0.010	0.010	
	C=	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	

Tabela 4 - Continuação.

2.600	H=	150.00	142.93	135.93	129.05	122.37	117.10	113.19	107.89	104.11	101.85	101.10	0.000
	Q=	0.052	0.051	0.049	0.046	0.041	0.036	0.032	0.024	0.016	0.008	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.650	H=	150.00	143.64	137.74	131.77	125.99	120.47	116.42	113.80	109.85	107.49	106.70	0.000
	Q=	0.053	0.062	0.060	0.056	0.051	0.044	0.037	0.031	0.021	0.010	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.900	H=	150.00	144.61	139.66	134.67	129.67	125.31	121.08	118.38	117.17	114.70	113.88	0.000
	Q=	0.072	0.071	0.069	0.065	0.059	0.052	0.043	0.034	0.026	0.013	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.950	H=	150.00	145.64	141.74	137.77	134.00	130.47	127.27	124.45	123.23	123.56	122.70	0.000
	Q=	0.079	0.078	0.078	0.072	0.066	0.058	0.049	0.037	0.027	0.016	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3.000	H=	150.00	146.93	143.93	141.06	138.38	135.95	133.84	132.12	130.84	131.23	133.24	0.000
	Q=	0.035	0.064	0.061	0.077	0.071	0.062	0.053	0.041	0.027	0.014	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3.050	H=	150.00	148.09	146.25	144.54	143.01	141.75	140.60	140.23	140.11	140.52	139.76	0.000
	Q=	0.039	0.068	0.065	0.080	0.074	0.065	0.055	0.042	0.028	0.012	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3.100	H=	150.00	149.32	148.70	148.20	147.90	147.65	148.13	148.79	149.91	148.64	147.60	0.000
	Q=	0.031	0.090	0.087	0.082	0.075	0.066	0.055	0.042	0.027	0.014	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3.150	H=	150.00	150.60	151.27	152.06	153.04	154.28	155.84	157.80	157.31	157.18	157.53	0.000
	Q=	0.071	0.090	0.087	0.082	0.074	0.065	0.053	0.039	0.028	0.015	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3.200	H=	150.00	151.95	153.96	156.10	158.43	161.02	163.95	164.37	165.07	166.20	166.57	0.000
	Q=	0.039	0.068	0.065	0.079	0.071	0.061	0.049	0.039	0.028	0.014	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3.250	H=	150.00	153.36	156.78	160.33	164.08	168.10	169.54	171.22	173.25	174.46	174.87	0.000
	Q=	0.035	0.064	0.060	0.074	0.066	0.056	0.048	0.038	0.025	0.013	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3.300	H=	150.00	154.63	159.72	164.76	169.99	172.60	175.37	178.42	180.60	181.91	182.35	0.000
	Q=	0.078	0.077	0.073	0.067	0.059	0.053	0.044	0.034	0.023	0.011	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3.350	H=	150.00	156.37	162.60	169.39	173.27	177.26	181.47	184.75	187.09	188.49	188.96	0.000
	Q=	0.059	0.068	0.064	0.058	0.054	0.047	0.038	0.029	0.020	0.010	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3.400	H=	150.00	157.97	166.03	171.32	176.65	182.15	186.64	190.14	192.64	194.14	194.64	0.000
	Q=	0.058	0.057	0.053	0.051	0.046	0.039	0.032	0.025	0.017	0.008	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3.450	H=	150.00	159.66	166.49	173.29	180.19	186.03	190.61	194.53	197.19	198.78	199.31	0.000
	Q=	0.044	0.042	0.041	0.036	0.031	0.026	0.021	0.016	0.010	0.005	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Tabela 4 - Continuação

3.550	H= 150.00	157.26	167.39	176.30	184.02	190.55	195.90	200.06	203.03	204.81	205.41	0.000
	G= 0.016	0.015	0.016	0.016	0.015	0.013	0.011	0.009	0.006	0.003	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.600	H= 150.00	158.67	166.64	176.05	184.19	191.07	196.70	201.07	204.20	206.08	206.70	0.000
	G= 0.030	0.002	0.000	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.650	H= 150.00	159.38	167.53	174.53	183.09	190.33	196.24	200.84	204.12	206.09	206.75	0.000
	G= -0.012	-0.012	-0.013	-0.009	-0.009	-0.007	-0.005	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.700	H= 150.00	158.66	167.26	174.58	180.67	188.27	194.47	199.29	202.73	204.79	205.48	0.000
	G= -0.027	-0.026	-0.024	-0.023	-0.022	-0.018	-0.014	-0.010	-0.006	-0.003	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.750	H= 150.00	157.89	165.71	173.40	179.75	184.61	191.32	196.36	199.96	202.12	202.84	0.000
	G= -0.040	-0.039	-0.037	-0.034	-0.031	-0.029	-0.023	-0.017	-0.011	-0.005	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.800	H= 150.00	157.65	164.03	170.88	177.55	182.80	186.70	191.99	195.75	198.00	198.75	0.000
	G= -0.052	-0.051	-0.049	-0.046	-0.041	-0.036	-0.032	-0.024	-0.016	-0.008	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.850	H= 150.00	156.14	162.22	168.17	173.93	179.44	183.48	186.09	190.03	192.39	193.17	0.000
	G= -0.062	-0.062	-0.059	-0.056	-0.050	-0.044	-0.037	-0.031	-0.021	-0.010	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.900	H= 150.00	155.18	160.29	165.27	170.07	174.61	178.63	181.52	182.73	185.20	186.02	0.000
	G= -0.072	-0.071	-0.068	-0.064	-0.059	-0.052	-0.043	-0.034	-0.026	-0.013	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.950	H= 150.00	154.15	158.23	162.18	165.95	169.46	172.66	175.47	176.69	176.37	177.23	0.000
	G= -0.079	-0.078	-0.076	-0.071	-0.065	-0.058	-0.048	-0.037	-0.026	-0.015	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.000	H= 150.00	153.05	156.04	158.91	161.58	164.00	166.10	167.83	169.11	168.72	166.71	0.000
	G= -0.085	-0.084	-0.081	-0.077	-0.070	-0.062	-0.052	-0.041	-0.027	-0.014	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.050	H= 150.00	151.90	153.73	155.44	156.96	158.23	159.18	159.74	159.86	159.45	160.21	0.000
	G= -0.039	-0.038	-0.035	-0.030	-0.024	-0.017	-0.010	-0.002	-0.008	-0.012	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.100	H= 150.00	150.68	151.30	151.79	152.09	152.14	151.87	151.21	150.09	151.35	152.20	0.000
	G= -0.091	-0.090	-0.087	-0.082	-0.075	-0.066	-0.055	-0.042	-0.027	-0.014	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.150	H= 150.00	149.40	148.74	147.95	146.97	145.74	144.18	142.22	142.71	142.84	142.49	0.000
	G= -0.091	-0.090	-0.087	-0.081	-0.074	-0.065	-0.053	-0.039	-0.028	-0.015	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.200	H= 150.00	148.06	146.06	143.92	141.60	139.01	136.09	135.68	134.97	133.85	133.48	0.000
	G= -0.089	-0.088	-0.084	-0.079	-0.071	-0.061	-0.049	-0.039	-0.028	-0.014	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabela 4 - Continuação

5.050	H=	150.30	148.11	146.28	144.50	143.06	141.80	140.85	140.29	140.17	140.57	139.81	0.000
	Q=	0.039	0.063	0.085	0.080	0.073	0.065	0.054	0.042	0.028	0.012	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.100	H=	150.30	149.32	148.71	148.22	147.92	147.87	148.14	148.79	149.91	148.65	147.81	0.000
	Q=	0.031	0.090	0.087	0.062	0.075	0.066	0.055	0.042	0.027	0.014	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.150	H=	150.30	150.60	151.26	152.04	153.02	154.25	155.80	157.76	157.27	157.14	157.49	0.000
	Q=	0.031	0.090	0.086	0.081	0.074	0.064	0.053	0.039	0.028	0.015	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.200	H=	150.30	151.93	153.93	156.05	158.37	160.95	163.86	164.28	164.99	166.11	166.48	0.000
	Q=	0.039	0.067	0.084	0.079	0.071	0.061	0.049	0.039	0.028	0.014	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.250	H=	150.30	153.33	156.73	160.25	163.98	167.98	169.42	171.09	173.11	174.32	174.73	0.000
	Q=	0.034	0.063	0.080	0.074	0.066	0.056	0.047	0.037	0.025	0.013	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.300	H=	150.30	154.79	159.65	164.65	169.86	172.45	175.21	178.25	180.43	181.73	182.17	0.000
	Q=	0.078	0.077	0.073	0.067	0.059	0.052	0.044	0.033	0.022	0.011	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.350	H=	150.30	156.32	162.72	169.26	173.12	177.09	181.28	184.54	186.87	188.27	188.74	0.000
	Q=	0.069	0.068	0.064	0.058	0.053	0.047	0.038	0.029	0.019	0.010	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.400	H=	150.30	157.82	165.93	171.18	176.49	181.95	186.42	189.90	192.38	193.88	194.37	0.000
	Q=	0.037	0.058	0.052	0.050	0.046	0.039	0.032	0.024	0.016	0.008	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.450	H=	150.30	159.60	166.39	173.15	180.01	185.81	190.56	194.26	196.90	198.48	199.01	0.000
	Q=	0.043	0.042	0.043	0.041	0.036	0.031	0.025	0.019	0.013	0.007	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.500	H=	150.30	158.47	166.83	175.21	182.48	188.62	193.67	197.57	200.36	202.64	202.60	0.000
	Q=	0.027	0.030	0.030	0.028	0.026	0.022	0.018	0.014	0.010	0.005	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.550	H=	150.30	157.22	167.29	176.15	183.83	190.32	195.63	199.75	202.70	204.47	205.06	0.000
	Q=	0.016	0.015	0.016	0.016	0.015	0.013	0.011	0.009	0.006	0.003	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.600	H=	150.30	158.82	166.55	175.90	183.99	190.83	196.42	200.76	203.87	205.73	206.35	0.000
	Q=	0.033	0.002	0.000	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.650	H=	150.00	159.33	167.44	174.39	182.91	190.09	195.97	200.53	203.79	205.74	206.39	0.000
	Q=	-0.012	-0.011	-0.012	-0.009	-0.007	-0.005	-0.003	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO

X/L*	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
H=	150.30	166.58	182.61	198.00	212.68	226.60	239.74	252.09	263.03	274.58	285.05
Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477
V=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabela 4 - Final.

Mantida a mesma sistemática de traçado de curvas e de listagem de resultados, as figuras 13 e 14 apresentam os resultados obtidos com a aplicação da aproximação de segunda ordem para a forma simplificada de equacionamento. Estas figuras são complementadas pela tabela 5.

Os cálculos efetuados com o método do intervalo de tempo especificado com interpolações são encontrados nas figuras 15 e 16 e na tabela 6.

Verifica-se, analisando as tabelas e gráficos apresentados, que as várias formas alternativas de cálculo evidenciam valores semelhantes, apesar das diferenças sensíveis entre os métodos de integração utilizados.

Para os valores máximos ao final da linha e tempo de cálculo do transitório completo, temos:

	tempo(s)	cargas (m)
- aproximação de primeira ordem-	47	285,04
- aproximação de segunda ordem -	105	286,33
- equação completa	64	284,26

Dos valores acima indicados e do estudo das tabelas e gráficos apresentados, verifica-se que a utilização da aproximação de primeira ordem justifica-se devido tanto à rapidez de cálculo e conseqüente redução de custo de processamento, quanto à precisão de resultados. Comparados à aproximação de segunda ordem, que é a proposta mais próxima à realidade física para a função $Q = Q(x)$, os resultados oferecidos por aquele método revelam-se bastante aceitáveis.

A sensibilidade de cada método específico, no que diz respeito à detecção da transitoriedade do escoamento, é praticamente idêntica, chegando-se a esta conclusão através da observação dos vários gráficos disponíveis.

O estudo de linhas longas, porém, não nos permite tais simplificações, conforme veremos nos gráficos e tabelas que seguem, onde o problema do reservatório a nível constante alimentando um contudo ao final do qual uma válvula é fechada é resolvido para as condições a seguir especificadas.

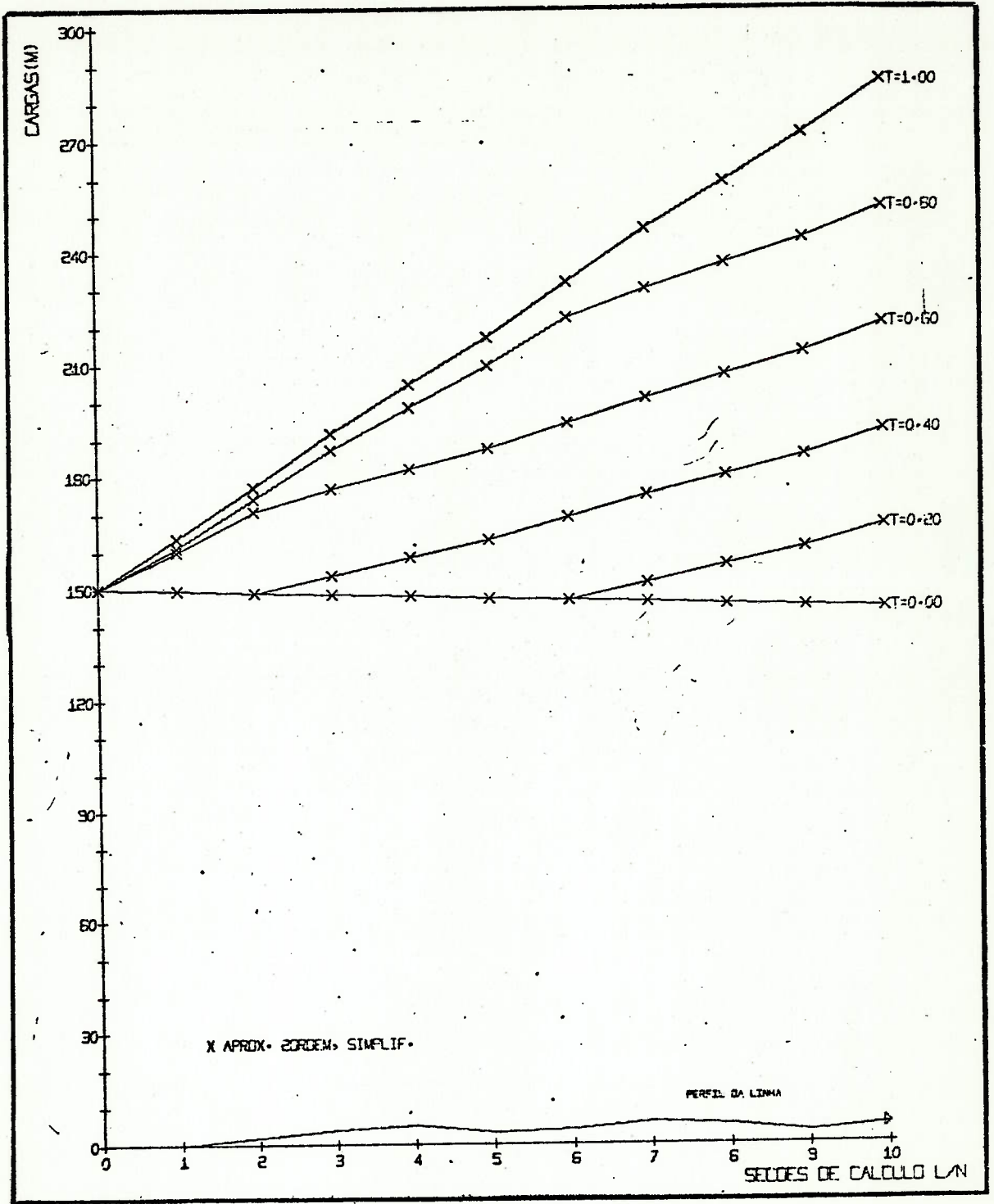


Fig.13 - Cargas ao longo da tubulação - aprox. 2ª ordem

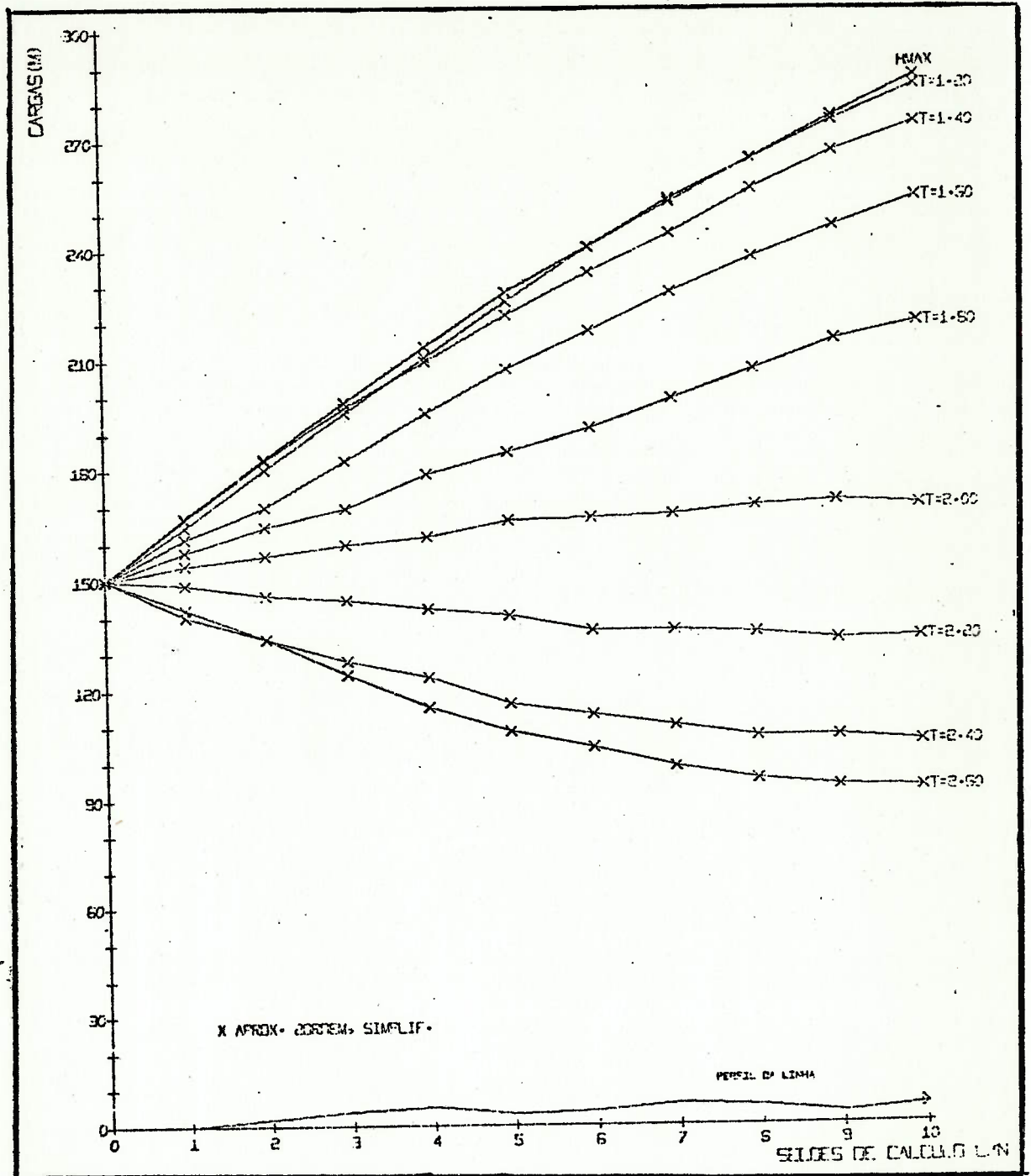


Fig.14 - Cargas ao longo da tubulação - aprox. 2ª ordem

A, XL, D, F, HR, = .120E+04 .500E+03 .500E+00 .180E-01 .150E+03 HVAL, OA, CDA, = .143E+03 .477E+00 .900E-02 TF, EP, G, THAX, = .210E+01 .150E+01 .981E+01 .570E+01 DT, BR = .500E-01 .623E+03 .286E+01 N, IPR, MN = 10 1 1												
ARC(1) = .33E-01 .33E-01 .67E-01 .50E-01 0. .17E-01 .33E-01 .50E-01 .83E-01 .24E+00 0.												
CARGAS E VAZÕES AO LONGO DA TUBULACAO												
TEMPO X/L =	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0	TAU
0.000	H= 150.20	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	144.79	144.14	143.49	1.000
	C= 0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.050	H= 150.20	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	144.79	144.14	143.49	0.864
	C= 0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.100	H= 150.20	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	144.79	144.14	143.49	0.929
	C= 0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.150	H= 150.20	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	150.06	154.69	159.37	0.895
	C= 0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	0.461	0.452	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.200	H= 150.20	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	150.69	155.32	159.99	165.84	0.861
	C= 0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	0.461	0.452	0.442	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.250	H= 150.20	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	151.33	155.95	160.61	166.44	172.32	0.827
	C= 0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	0.461	0.452	0.442	0.431	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.300	H= 150.20	149.35	148.70	148.05	147.40	151.97	156.58	161.22	167.05	172.91	178.15	0.794
	C= 0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	0.461	0.452	0.442	0.432	0.422	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.350	H= 150.20	149.35	148.70	148.05	152.61	157.20	161.84	167.65	173.51	178.73	183.99	0.761
	C= 0.477	0.477	0.477	0.477	0.469	0.461	0.452	0.442	0.432	0.422	0.413	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.400	H= 150.20	149.35	148.70	153.25	157.83	162.46	168.25	174.10	179.31	184.56	191.22	0.728
	C= 0.477	0.477	0.477	0.469	0.461	0.452	0.442	0.432	0.422	0.413	0.401	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.450	H= 150.00	149.35	153.89	158.46	163.07	168.86	174.69	179.89	185.13	191.78	198.47	0.696
	C= 0.477	0.477	0.469	0.461	0.452	0.442	0.432	0.422	0.413	0.402	0.390	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Tabela 5 - Listagem dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação - aprox. 2ª ordem.

0.550	H= 150.30	159.72	164.31	170.07	175.68	181.05	186.27	192.89	199.56	205.60	211.68	0.634
	G= 0.461	0.461	0.452	0.432	0.412	0.423	0.413	0.402	0.390	0.380	0.369	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.600	H= 150.30	159.76	170.67	176.47	181.63	186.84	193.45	200.10	206.13	212.20	219.65	0.604
	G= 0.444	0.444	0.442	0.432	0.423	0.414	0.402	0.390	0.380	0.369	0.357	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.650	H= 150.30	16.95	171.91	182.21	187.41	194.00	200.65	208.66	212.72	220.16	227.64	0.574
	G= 0.428	0.426	0.424	0.414	0.402	0.402	0.391	0.380	0.370	0.357	0.344	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.700	H= 150.30	162.14	172.49	182.63	194.56	201.19	207.19	213.24	220.66	228.13	234.95	0.544
	G= 0.437	0.407	0.406	0.402	0.402	0.391	0.380	0.370	0.357	0.344	0.333	
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.750	H= 150.30	161.64	173.06	184.83	196.60	207.72	213.76	221.17	228.63	235.43	242.26	0.515
	G= 0.337	0.369	0.389	0.386	0.383	0.381	0.370	0.357	0.345	0.333	0.321	
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.800	H= 150.30	160.92	173.87	186.82	197.99	209.15	221.68	229.12	235.92	242.75	250.91	0.487
	G= 0.371	0.369	0.368	0.366	0.364	0.362	0.358	0.345	0.333	0.321	0.308	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.850	H= 150.30	163.00	174.66	186.53	199.37	211.93	224.50	236.40	243.22	251.37	259.56	0.459
	G= 0.351	0.349	0.346	0.347	0.346	0.341	0.337	0.333	0.322	0.308	0.294	
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.900	H= 150.30	163.29	175.48	187.22	200.97	214.71	226.65	238.59	251.63	260.01	267.48	0.432
	G= 0.328	0.329	0.329	0.326	0.323	0.321	0.317	0.314	0.308	0.294	0.282	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.950	H= 150.30	162.39	176.29	190.19	202.57	215.20	228.78	242.07	255.36	267.91	275.41	0.405
	G= 0.307	0.307	0.308	0.305	0.301	0.300	0.298	0.292	0.286	0.282	0.269	
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.000	H= 150.30	163.45	177.10	191.19	204.11	216.63	231.09	245.55	258.15	270.74	284.55	0.379
	G= 0.287	0.265	0.263	0.263	0.262	0.258	0.254	0.250	0.246	0.241	0.225	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.050	H= 150.30	164.51	177.90	191.05	205.69	220.33	233.40	246.74	260.92	274.76	285.16	0.354
	G= 0.263	0.263	0.262	0.260	0.256	0.256	0.251	0.249	0.245	0.239	0.238	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.100	H= 150.30	164.45	178.70	192.86	207.23	222.06	235.67	248.76	263.78	275.35	285.76	0.329
	G= 0.240	0.240	0.240	0.238	0.234	0.233	0.231	0.226	0.221	0.222	0.221	
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.150	H= 150.30	164.38	179.40	194.65	208.76	222.57	237.81	253.04	263.18	274.77	286.34	0.304
	G= 0.216	0.216	0.216	0.215	0.212	0.209	0.208	0.203	0.202	0.203	0.204	
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.200	H= 150.30	164.30	180.09	195.30	210.28	225.02	239.93	252.23	263.70	274.16	283.88	0.281
	G= 0.192	0.193	0.191	0.190	0.185	0.185	0.181	0.185	0.185	0.184	0.188	
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.250	H= 150.30	165.47	180.78	195.94	211.56	227.46	238.93	250.60	263.22	272.62	281.41	0.258

Tabela 5 - Continuação

5.100	H= 150.00	148.46	148.78	149.11	147.59	146.56	145.33	150.18	149.48	150.43	149.17	0.000
	Q= 0.072	0.092	0.088	0.079	0.073	0.069	0.055	0.042	0.027	0.016	0.000	0.000
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.150	H= 150.00	150.62	152.68	152.88	151.05	152.07	157.16	156.07	158.60	157.65	160.10	0.000
	Q= 0.035	0.091	0.085	0.082	0.076	0.066	0.052	0.038	0.029	0.014	0.000	0.000
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.200	H= 150.00	154.52	154.72	154.61	157.36	161.65	162.88	165.13	164.44	168.75	166.53	0.000
	Q= 0.070	0.068	0.085	0.082	0.074	0.059	0.049	0.039	0.025	0.012	0.000	0.000
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.250	H= 150.00	153.49	156.77	159.20	165.21	168.17	170.20	171.17	175.28	173.00	176.44	0.000
	Q= 0.081	0.085	0.084	0.077	0.065	0.057	0.045	0.035	0.023	0.011	0.000	0.000
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.300	H= 150.00	152.25	158.58	167.05	170.00	173.76	176.46	179.76	179.99	182.97	179.71	0.000
	Q= 0.079	0.077	0.076	0.068	0.060	0.051	0.044	0.030	0.021	0.010	0.000	0.000
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.350	H= 150.00	155.08	162.52	169.97	175.60	178.29	183.31	185.28	187.45	186.81	189.50	0.000
	Q= 0.073	0.071	0.060	0.058	0.054	0.047	0.036	0.030	0.018	0.010	0.000	0.000
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.400	H= 150.00	160.27	166.47	171.07	177.66	185.15	187.11	191.00	192.10	193.98	193.17	0.000
	Q= 0.063	0.057	0.052	0.047	0.046	0.039	0.033	0.023	0.019	0.007	0.000	0.000
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.450	H= 150.00	161.39	168.82	174.17	180.62	187.07	192.84	193.93	197.53	198.45	198.46	0.000
	Q= 0.040	0.044	0.043	0.040	0.031	0.031	0.026	0.022	0.013	0.008	0.000	0.000
	C= 0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.500	H= 150.00	158.55	169.08	178.37	183.58	188.31	193.03	199.36	200.28	202.01	203.74	0.000
	Q= 0.026	0.027	0.032	0.028	0.025	0.019	0.020	0.016	0.011	0.006	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.550	H= 150.00	157.69	168.09	178.49	186.05	190.14	194.84	199.87	203.84	205.57	205.57	0.000
	Q= 0.013	0.014	0.011	0.017	0.015	0.014	0.009	0.010	0.009	0.003	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.600	H= 150.00	159.55	167.10	175.78	185.30	192.58	196.38	199.31	204.93	207.40	207.19	0.000
	Q= 0.031	0.002	-0.001	-0.001	0.006	0.005	0.004	0.001	0.002	0.003	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.650	H= 150.00	159.41	166.88	173.92	182.31	191.80	197.06	201.44	203.17	206.76	209.23	0.000
	Q= -0.018	-0.014	-0.014	-0.012	-0.005	-0.005	-0.002	-0.004	-0.005	-0.001	0.000	0.000
	C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO

X/L=	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0
H=	150.00	167.63	182.84	198.20	212.83	227.46	239.93	253.04	263.78	275.35	286.34
Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477
V=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabela 5 - Final.

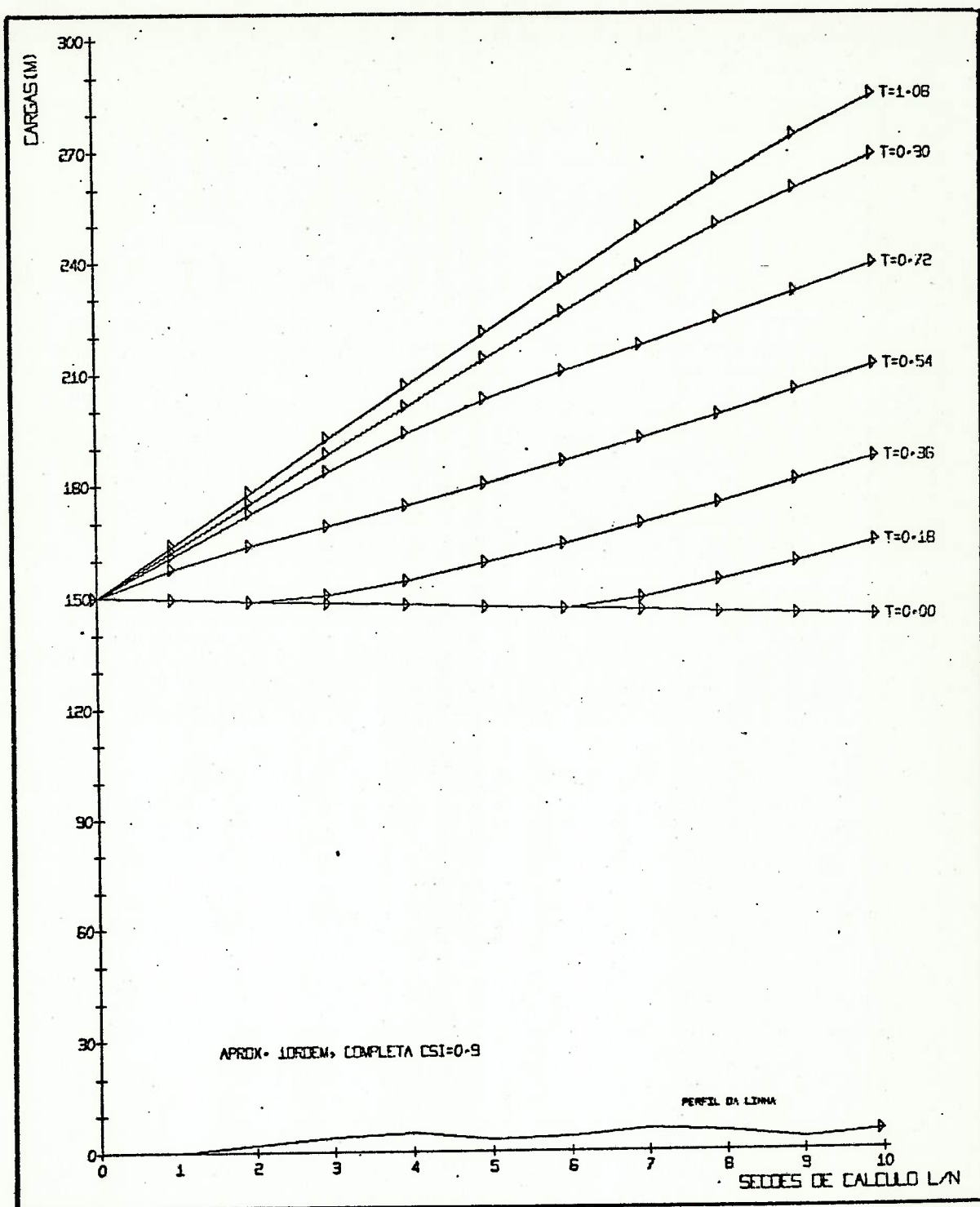


Fig. 15 - Cargas ao longo da tubulação - equação completa.

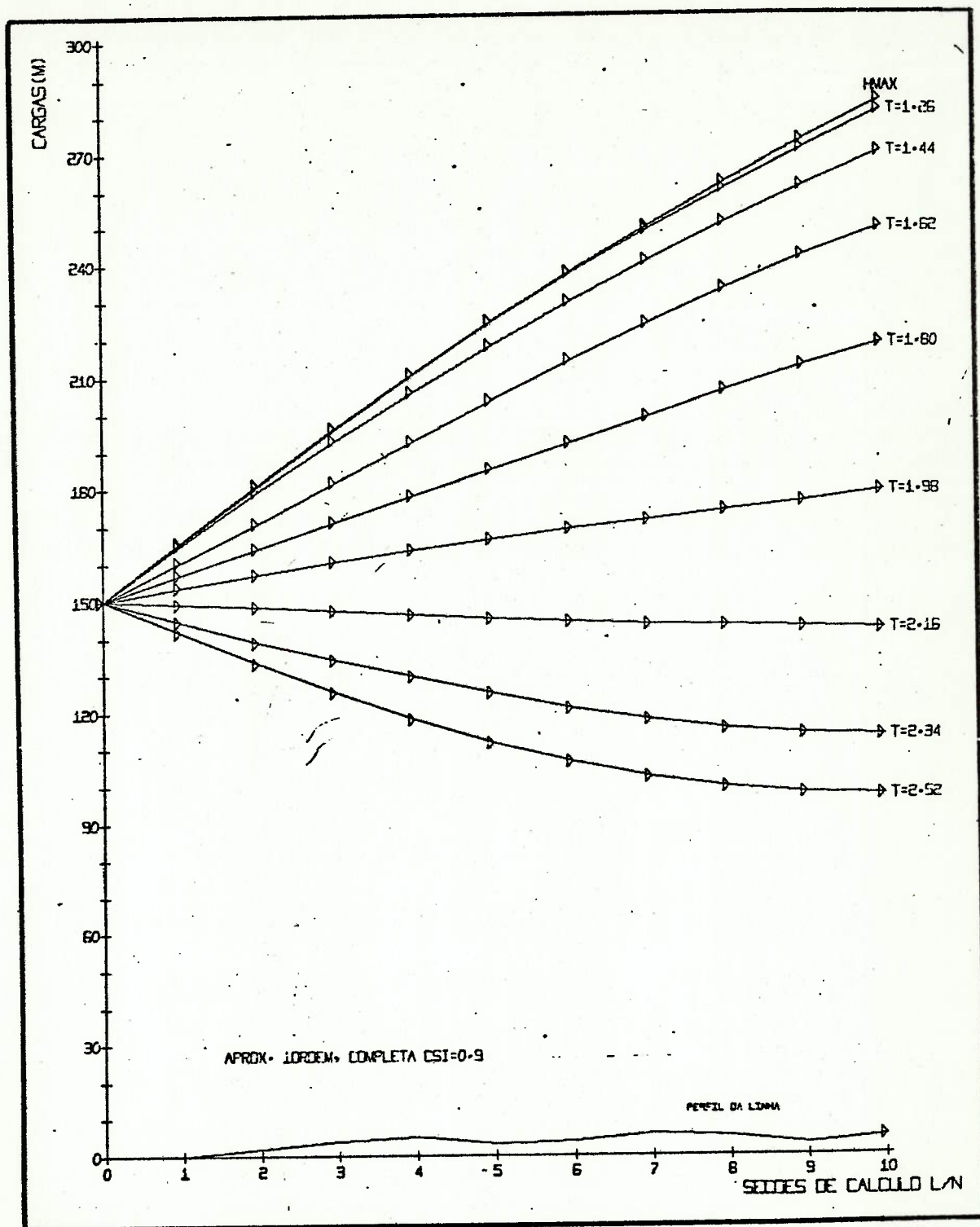


Fig. 16 - Continuação.

CARGAS E VAZÕES AO LONGO DA TUBULAÇÃO												
TEMPO X/L	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.	TAU
0.000	H= 150.30 Q= 0.477 C= 0.030	149.35 0.477 0.000	148.70 0.477 0.000	148.05 0.477 0.000	147.40 0.477 0.000	146.74 0.477 0.000	146.09 0.477 0.000	145.44 0.477 0.000	144.79 0.477 0.000	144.14 0.477 0.000	143.49 0.477 0.000	1.000
0.045	H= 150.30 Q= 0.477 C= 0.030	149.35 0.477 0.000	148.70 0.477 0.000	148.05 0.477 0.000	147.40 0.477 0.000	146.74 0.477 0.000	146.09 0.477 0.000	145.44 0.477 0.000	144.79 0.477 0.000	144.14 0.477 0.000	143.49 0.477 0.000	0.968
0.090	H= 150.30 Q= 0.477 C= 0.030	149.35 0.477 0.000	148.70 0.477 0.000	148.05 0.477 0.000	147.40 0.477 0.000	146.74 0.477 0.000	146.09 0.477 0.000	145.44 0.477 0.000	144.79 0.477 0.000	144.14 0.477 0.000	143.49 0.477 0.000	0.936
0.135	H= 150.30 Q= 0.477 C= 0.030	149.35 0.477 0.000	148.70 0.477 0.000	148.05 0.477 0.000	147.40 0.477 0.000	146.74 0.477 0.000	146.09 0.477 0.000	145.44 0.477 0.000	144.79 0.477 0.000	144.14 0.477 0.000	143.49 0.477 0.000	0.905
0.180	H= 150.30 Q= 0.477 C= 0.030	149.35 0.477 0.000	148.70 0.477 0.000	148.05 0.477 0.000	147.40 0.477 0.000	146.74 0.477 0.000	146.09 0.477 0.000	145.44 0.477 0.000	144.79 0.477 0.000	144.14 0.477 0.000	143.49 0.477 0.000	0.874
0.225	H= 150.30 Q= 0.477 C= 0.030	149.35 0.477 0.000	148.70 0.477 0.000	148.05 0.477 0.000	147.40 0.477 0.000	146.74 0.477 0.000	146.09 0.477 0.000	145.44 0.477 0.000	144.79 0.477 0.000	144.14 0.477 0.000	143.49 0.477 0.000	0.844
0.270	H= 150.30 Q= 0.477 C= 0.030	149.35 0.477 0.000	148.70 0.477 0.000	148.05 0.477 0.000	147.40 0.477 0.000	146.74 0.477 0.000	146.09 0.477 0.000	145.44 0.477 0.000	144.79 0.477 0.000	144.14 0.477 0.000	143.49 0.477 0.000	0.813
0.315	H= 150.30 Q= 0.477 C= 0.030	149.35 0.477 0.000	148.70 0.477 0.000	148.05 0.477 0.000	147.40 0.477 0.000	146.74 0.477 0.000	146.09 0.477 0.000	145.44 0.477 0.000	144.79 0.477 0.000	144.14 0.477 0.000	143.49 0.477 0.000	0.784
0.360	H= 150.30 Q= 0.477 C= 0.030	149.35 0.477 0.000	148.70 0.477 0.000	148.05 0.477 0.000	147.40 0.477 0.000	146.74 0.477 0.000	146.09 0.477 0.000	145.44 0.477 0.000	144.79 0.477 0.000	144.14 0.477 0.000	143.49 0.477 0.000	0.754
0.405	H= 150.30 Q= 0.477 C= 0.030	149.35 0.477 0.000	148.70 0.477 0.000	148.05 0.477 0.000	147.40 0.477 0.000	146.74 0.477 0.000	146.09 0.477 0.000	145.44 0.477 0.000	144.79 0.477 0.000	144.14 0.477 0.000	143.49 0.477 0.000	0.725

Tabela 6 - Listagens dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação - equação completa.

0.455	H	150.00	158.95	163.79	168.92	174.28	179.83	185.64	191.64	197.86	204.29	0.668
	G	0.432	0.451	0.472	0.493	0.514	0.535	0.556	0.577	0.598	0.619	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.540	H	150.00	157.62	163.66	168.95	174.28	179.82	185.57	191.54	197.73	204.13	0.640
	G	0.452	0.459	0.453	0.444	0.434	0.425	0.414	0.404	0.393	0.382	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.585	H	150.00	159.36	167.68	174.28	179.79	185.51	191.45	197.60	203.97	210.55	0.613
	G	0.448	0.447	0.443	0.435	0.426	0.416	0.405	0.394	0.383	0.372	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.630	H	150.00	160.28	170.05	178.58	185.46	191.36	197.48	203.82	210.37	217.12	0.586
	G	0.432	0.432	0.430	0.425	0.417	0.406	0.396	0.384	0.373	0.361	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.675	H	150.00	160.63	171.46	181.87	190.22	197.37	203.67	210.18	216.91	223.84	0.559
	G	0.416	0.416	0.415	0.411	0.406	0.397	0.386	0.374	0.363	0.351	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.720	H	150.00	161.24	172.82	183.36	193.61	202.57	210.01	216.70	223.60	230.70	0.533
	G	0.430	0.399	0.398	0.396	0.392	0.385	0.376	0.364	0.352	0.340	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.765	H	150.00	161.62	173.22	184.74	195.97	206.47	215.64	223.36	230.43	237.69	0.507
	G	0.382	0.382	0.381	0.379	0.376	0.372	0.364	0.354	0.341	0.329	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.810	H	150.00	161.98	173.96	185.92	197.78	209.30	220.02	229.39	237.40	244.82	0.481
	G	0.355	0.364	0.353	0.362	0.359	0.356	0.350	0.342	0.331	0.318	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.855	H	150.00	162.35	174.69	187.03	199.34	211.52	223.31	234.24	243.81	252.08	0.456
	G	0.347	0.346	0.345	0.344	0.341	0.338	0.334	0.327	0.318	0.306	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.900	H	150.00	162.71	175.42	188.12	200.61	213.46	225.94	237.97	249.09	258.84	0.432
	G	0.328	0.328	0.327	0.325	0.323	0.320	0.316	0.311	0.304	0.294	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.945	H	150.00	163.07	176.14	189.20	202.25	215.28	228.24	240.99	253.24	264.51	0.408
	G	0.339	0.309	0.308	0.306	0.304	0.301	0.297	0.293	0.287	0.279	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.990	H	150.00	163.43	176.85	190.27	203.67	217.05	230.39	243.63	256.62	268.78	0.384
	G	0.299	0.269	0.268	0.266	0.264	0.261	0.257	0.254	0.249	0.246	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.035	H	150.00	163.78	177.56	191.32	205.06	218.78	232.47	246.08	259.33	271.60	0.361
	G	0.269	0.269	0.268	0.267	0.266	0.265	0.262	0.258	0.254	0.246	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.080	H	150.00	164.13	178.25	192.36	206.44	220.48	234.49	248.22	261.23	273.16	0.339
	G	0.249	0.249	0.248	0.246	0.244	0.241	0.238	0.234	0.231	0.227	
	C	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Tabela 6 - Continuação.

		.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.
5.220	M=	150.30	152.43	154.82	157.13	159.31	161.33	163.15	164.70	165.90	166.66	166.92
	Q=	0.079	0.078	0.075	0.071	0.064	0.056	0.047	0.036	0.025	0.012	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.265	M=	150.30	153.51	156.93	160.21	163.30	166.13	168.64	170.75	172.35	173.35	173.69
	Q=	0.075	0.074	0.071	0.067	0.060	0.053	0.044	0.034	0.023	0.012	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.310	M=	150.30	154.51	158.92	163.13	167.07	170.65	173.79	176.37	178.29	179.49	179.89
	Q=	0.059	0.068	0.066	0.061	0.056	0.048	0.040	0.031	0.021	0.011	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.355	M=	150.30	155.43	160.74	165.82	170.54	174.80	178.47	181.44	183.63	184.97	185.42
	Q=	0.052	0.061	0.059	0.055	0.049	0.043	0.035	0.027	0.018	0.009	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.400	M=	150.30	156.25	162.37	168.21	173.62	178.46	182.58	185.87	188.27	189.73	190.22
	Q=	0.033	0.052	0.050	0.047	0.042	0.037	0.030	0.023	0.016	0.008	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.445	M=	150.30	156.96	163.77	170.25	176.22	181.52	186.00	189.57	192.14	193.70	194.22
	Q=	0.043	0.043	0.041	0.038	0.035	0.030	0.025	0.019	0.013	0.006	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.490	M=	150.30	157.55	164.90	171.87	178.27	183.92	188.68	192.45	195.17	196.82	197.37
	Q=	0.033	0.032	0.031	0.029	0.026	0.023	0.019	0.014	0.010	0.005	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.535	M=	150.30	157.97	165.72	173.02	179.70	185.58	190.54	194.48	197.33	199.05	199.62
	Q=	0.022	0.021	0.020	0.019	0.017	0.015	0.012	0.009	0.006	0.003	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.580	M=	150.30	158.21	166.17	173.66	180.48	186.650	191.58	195.62	198.56	200.34	200.94
	Q=	0.010	0.010	0.009	0.009	0.008	0.007	0.006	0.004	0.003	0.002	0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.625	M=	150.30	158.24	166.24	173.76	180.61	186.66	191.77	195.87	198.86	200.68	201.29
	Q=	-0.032	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.000	-0.000	-0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.670	M=	150.30	158.08	165.92	173.32	180.08	186.06	191.14	195.22	198.20	200.03	200.64
	Q=	-0.014	-0.014	-0.013	-0.012	-0.011	-0.009	-0.008	-0.006	-0.004	-0.002	-0.000
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO

Tabela 6 - Final.

A lei de fechamento da válvula foi alterada, introduzindo-se um gradiente de fechamento mais severo que o do problema para a linha curta.

- lei de fechamento da válvula

$$(168) \quad \tau = \left(1 - \frac{t}{t_F} \right)^{1,0} \quad (179)$$

gerando a curva abaixo

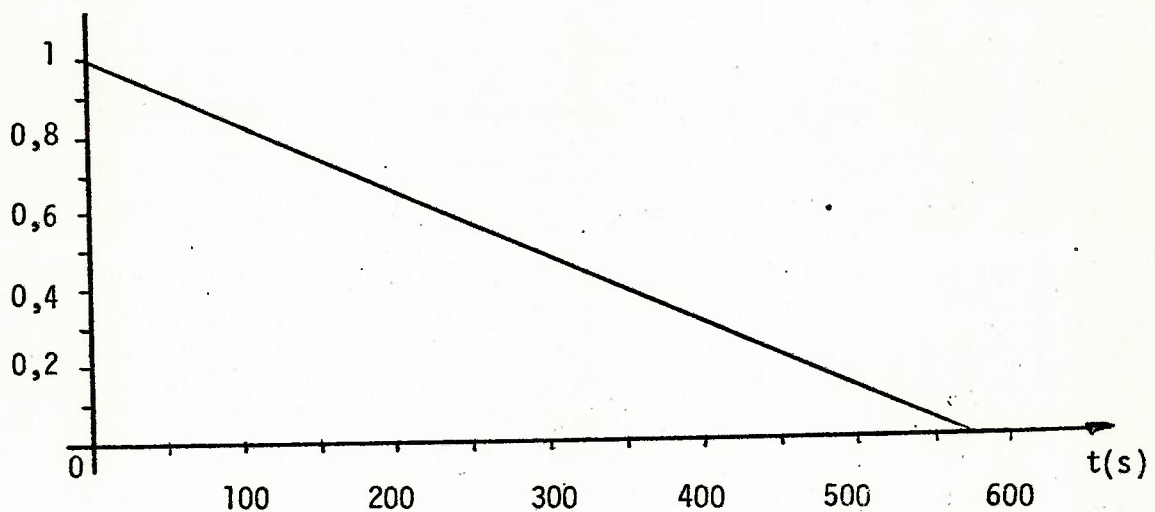


Fig. 17 - Lei de fechamento da válvula.

As demais características do problema, são:

L-comprimento da tubulação	70.000,0m
D-diâmetro da tubulação	0,5m
a-celeridade	1.200,0m/s
t_F -tempo de fechamento da válvula	583,0s
f-coeficiente de perda de carga distribuída	0,018
EM-expoente da lei de fechamento da válvula	1,0
N-número de sub-divisões da tubulação	70
HR-nível do reservatório	150 m

$$\left. \begin{array}{l} \Delta t = 0,833 \text{ s} \\ \Delta t = 0,75 \text{ s} \\ \text{CSI} = 0,9 \end{array} \right\} \text{equação completa}$$

A figura 18 oferece-nos o comportamento das cargas durante o transitório, a intervalos regulares, até o tempo limite de 918,3 s. A tabela 7 complementa a figura 18, apresentando a listagem dos valores transitórios a cada três intervalos de tempo de cálculo, conseguidos através da equação simplificada com aproximação de primeira ordem.

A aplicação da aproximação de segunda ordem conduz-nos aos valores indicados na figura 19 e na tabela 8.

A equação completa, mantido $CSI = 0,9$, fornece a configuração encontrada na figura 20 e tabela 9.

Com relação aos valores máximos de cargas transitórias e tempo de processamento, verifica-se que ainda a aproximação de primeira ordem é a mais conveniente, seguida da equação completa; como verificamos no resumo abaixo.

	tempo(s)	cargas (m)
- aproximação de primeira ordem	100	191,23
- aproximação de segunda ordem	170	194,69
- equação completa	160	191,19

No que tange à sensibilidade de cálculos, o que evidentemente justifica o maior tempo de processamento, a aproximação de segunda ordem revela-se mais precisa, verificando-se nos gráficos tal afirmação.

A aproximação de primeira ordem e a equação completa apresentam curvas que, até o tempo de 434 s, indicam a ocorrência de sucessivas situações de "regime permanente", sem qualquer indicação da efetiva transitoriedade do movimento, ou da interação entre as várias secções durante o retorno da perturbação gerada ao final da linha. Nestes casos as linhas de carga apresentam configurações alinhadas, sem as irregularidades próprias do regime transitório. Devemos frisar que para $t = 434$ s, resta a fechar apenas 20% da secção transversal da válvula.

A aproximação de segunda ordem, por outro lado, revela-se mais precisa em função da caracterização do movimento transitório com clara indicação das variações de carga entre as várias

secções de cálculo.

A superposição das figuras 18 e 19, obtidas com as aproximações de primeira e segunda ordem, respectivamente, indicam - que as curvas da figura 18, nada mais são que a média das curvas da figura 19, em cada instante de registro.

Justifica-se então a utilização da aproximação de primeira ordem também para o cálculo de transitório em linhas longas, quando o interesse está diretamente voltado a valores máximos ou médios, e não ao comportamento transitorio em cada seção, a cada instante.

Verifica-se também, pelos gráficos e listagens, que, sistemas em que a perda de carga é predominante, o estado de equilíbrio é atingido rapidamente, ocorrendo um número menor de variações de carga ao redor do equilíbrio.

Para a linha longa, verifica-se que a propagação das turbações é sensivelmente atenuada em função da dissipação de energia ao longo do conduto.

Acompanhando o transitório na figura 18, verifica-se que o valor máximo de uma linha de carga é registrado em $t = 629.31$ s, gerando uma carga $H \approx 200$ m. Em instantes subsequentes temos a redução contínua das cargas, até o instante $t = 724,36$ s, $H = 110$ m, em que voltamos a ter cargas crescentes. O número de oscilações ao redor da carga de equilíbrio, $H = 150$ m, é atenuado, podendo-se verificar que o valor máximo registrado ocorre em $t = 821,62$ s, $H = 180$ m, o mínimo em $t = 966.61$ s, $H \approx 122$ m, tendendo-se rapidamente ao equilíbrio, o que pode ser constatado nas listagens.

O mesmo não ocorre para a linha curta, de mesmo perfil que a longa, em que, a partir de $t = 1,1$ s, temos reduções sucessivas de carga até a ocorrência de separação de coluna na face da válvula, o que verificamos na listagem e ao que voltaremos posteriormente.

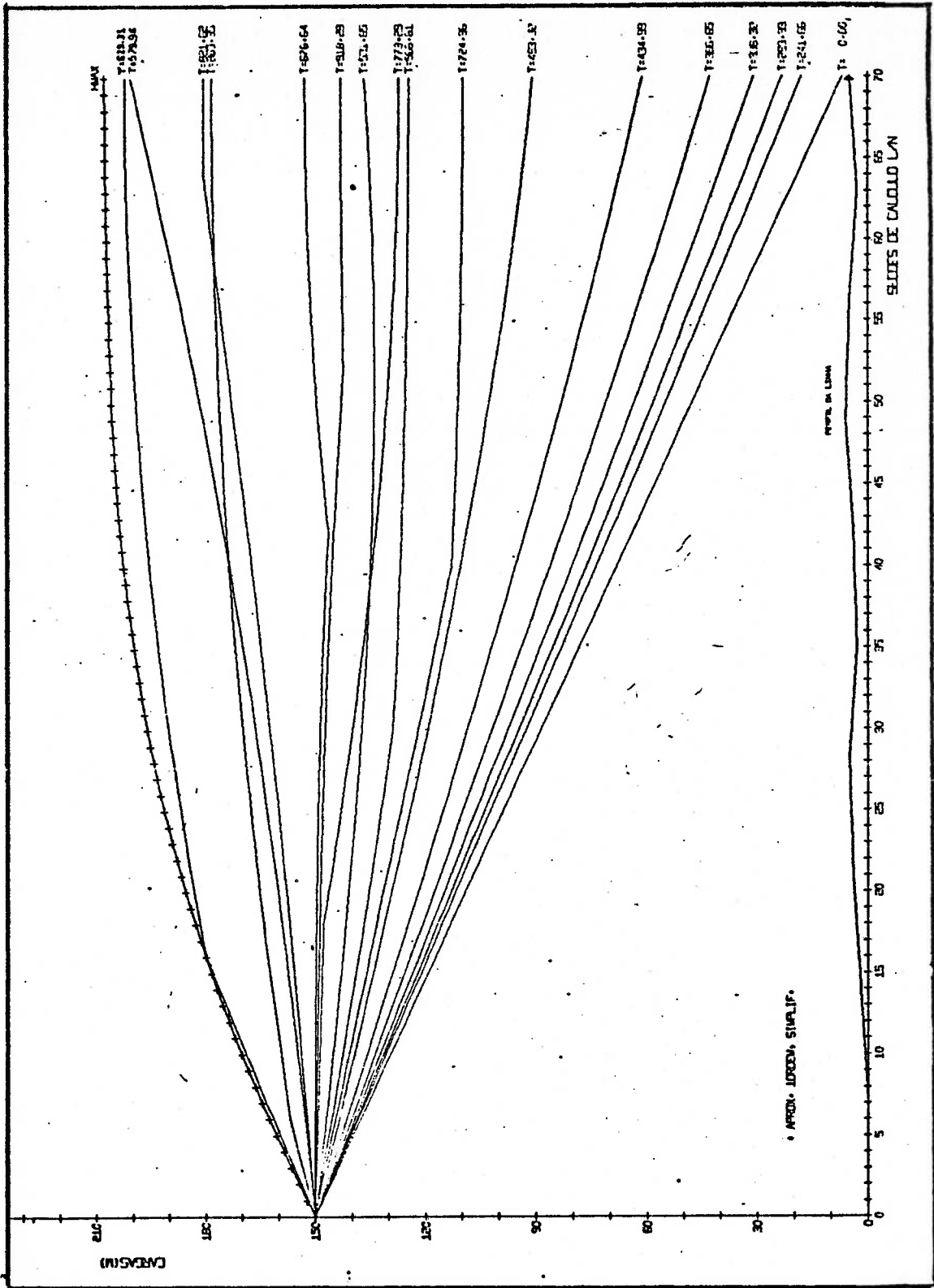


Fig.18 - Cargas ao longo da tubulação - aprox. 1ª ordem.

A*XL*Q,F,HR* = .120E+04 .700E+05 .500E+00 .180E-01 .150E+03 HVAL*Q,CDA* = .076E+01 .207E+00 .180E-01 TP,EM*G,IMAX* = .583E+03 .150E+01 .981E+01 .120E+04 DT,B,R = .833E+00 .623E+03 .476E+02												
N, IPR, NH = 70 5 0												
ARCC(1) = 0. .29E-03 .57E-03 .43E-03 0. .14E-03 .29E-03 .43E-03 .71E-03 .71E-03 0.												
CARGAS E VAZÕES AO LONGO DA TUBULACAO												
TEMPO X/L =	0.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0	TAU
0.00 H =	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.09	6.76	1.000
0.00 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
4.17 H =	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.09	6.90	0.59
4.17 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
8.33 H =	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.16	7.03	0.979
8.33 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
12.50 H =	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.43	21.28	7.18	0.960
12.50 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
16.67 H =	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.54	21.41	7.32	0.957
16.67 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
20.83 H =	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.61	35.65	21.54	7.47	0.947
20.83 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	
25.00 H =	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.09	49.91	35.77	21.67	7.63	0.936
25.00 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	
29.17 H =	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.18	50.01	35.89	21.81	7.79	0.926
29.17 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	
33.33 H =	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.46	64.27	50.12	36.01	21.96	7.95	0.916
33.33 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	
37.50 H =	150.00	135.68	121.35	107.03	92.75	78.54	64.37	50.23	36.14	22.11	8.12	0.905
37.50 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	
41.67 H =	150.00	135.68	121.35	107.04	92.82	78.62	64.47	50.35	36.28	22.26	8.30	0.895
41.67 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	0.205	
45.83 H =	150.00	135.68	121.35	107.10	92.89	78.71	64.57	50.47	36.42	22.42	8.48	0.884
45.83 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	0.205	
50.00 H =	150.00	135.68	121.40	107.17	92.97	78.81	64.68	50.60	36.56	22.58	8.67	0.874
50.00 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	0.206	0.205	
54.17 H =	150.00	135.70	121.45	107.24	93.05	78.90	64.79	50.73	36.71	22.75	8.86	0.864
54.17 Q =	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.205	0.205	0.205	

Tabela 7 - Listagens dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação - aprox. 1ª ordem.

558.33	H= 150.20	155.11	160.16	165.09	169.82	174.31	178.49	182.29	185.60	188.58	190.95	0.009
	Q= 0.021	0.020	0.020	0.019	0.018	0.017	0.015	0.014	0.012	0.011	0.010	
562.50	H= 150.30	155.25	160.43	165.47	170.30	174.85	179.05	182.84	186.17	188.98	191.21	0.007
	Q= 0.014	0.014	0.014	0.013	0.012	0.012	0.010	0.009	0.009	0.008	0.007	
566.67	H= 150.30	155.35	160.63	165.75	170.63	175.20	179.40	183.15	186.40	189.09	191.15	0.005
	Q= 0.038	0.008	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	
570.83	H= 150.30	155.42	160.74	165.90	170.80	175.37	179.52	183.20	186.34	188.88	190.75	0.003
	Q= 0.032	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	
575.00	H= 150.30	155.43	160.77	165.92	170.80	175.32	179.40	182.98	185.98	188.33	189.96	0.002
	Q= -0.034	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	-0.000	0.002	
579.17	H= 150.30	155.40	160.70	165.80	170.62	175.05	179.02	182.46	185.28	187.41	188.74	0.001
	Q= -0.010	-0.010	-0.010	-0.010	-0.009	-0.008	-0.007	-0.006	-0.004	-0.002	0.001	
583.33	H= 150.00	155.32	160.53	165.54	170.24	174.55	178.37	181.63	184.24	186.09	186.97	0.000
	Q= -0.016	-0.016	-0.016	-0.015	-0.014	-0.013	-0.012	-0.010	-0.007	-0.004	0.000	
587.50	H= 150.30	155.18	160.26	165.12	169.67	173.91	177.44	180.48	182.81	184.29	184.59	0.000
	Q= -0.022	-0.022	-0.022	-0.021	-0.019	-0.018	-0.015	-0.013	-0.010	-0.005	0.000	
591.67	H= 150.30	155.00	159.89	164.56	168.90	172.82	176.22	179.98	182.97	185.83	187.01	0.000
	Q= -0.028	-0.028	-0.027	-0.026	-0.024	-0.022	-0.019	-0.016	-0.011	-0.006	0.000	
595.83	H= 150.30	154.76	159.41	163.83	167.93	171.59	174.69	177.11	178.55	179.08	179.25	0.000
	Q= -0.033	-0.033	-0.032	-0.031	-0.028	-0.026	-0.022	-0.018	-0.013	-0.006	0.000	
600.00	H= 150.30	154.47	158.83	162.96	166.76	170.10	172.85	174.60	175.67	176.16	176.32	0.000
	Q= -0.038	-0.038	-0.037	-0.035	-0.032	-0.029	-0.025	-0.020	-0.013	-0.007	0.000	
604.17	H= 150.30	154.14	158.16	161.95	165.38	168.34	170.64	171.89	172.65	173.09	173.23	0.000
	Q= -0.042	-0.042	-0.041	-0.039	-0.036	-0.032	-0.027	-0.021	-0.014	-0.007	0.000	
608.33	H= 150.30	153.75	157.38	160.78	163.81	166.30	167.90	168.84	169.50	169.86	170.00	0.000
	Q= -0.046	-0.046	-0.044	-0.042	-0.039	-0.034	-0.029	-0.022	-0.015	-0.007	0.000	
612.50	H= 150.30	153.32	156.52	159.47	162.01	163.88	164.91	165.70	166.24	166.56	166.65	0.000
	Q= -0.049	-0.049	-0.047	-0.045	-0.041	-0.036	-0.029	-0.022	-0.015	-0.008	0.000	
616.67	H= 150.30	152.65	155.56	158.00	159.95	161.04	161.86	162.48	162.91	163.14	163.21	0.000
	Q= -0.052	-0.051	-0.050	-0.047	-0.043	-0.037	-0.030	-0.023	-0.015	-0.008	0.000	
620.83	H= 150.30	152.32	154.50	156.34	157.45	158.19	158.78	159.22	159.51	159.64	159.71	0.000
	Q= -0.034	-0.033	-0.031	-0.028	-0.024	-0.019	-0.013	-0.007	-0.001	0.000	0.000	
625.00	H= 150.30	151.75	153.32	154.36	154.89	155.34	155.70	155.94	156.09	156.15	156.17	0.000
	Q= -0.055	-0.055	-0.052	-0.049	-0.043	-0.037	-0.030	-0.023	-0.016	-0.008	0.000	
629.17	H= 150.30	151.11	151.95	152.18	152.37	152.53	152.63	152.67	152.67	152.64	152.62	0.000
	Q= -0.056	-0.055	-0.053	-0.048	-0.043	-0.037	-0.030	-0.023	-0.016	-0.008	0.000	
633.33	H= 150.30	150.37	150.25	150.07	149.92	149.77	149.60	149.43	149.27	149.15	149.10	0.000
	Q= -0.055	-0.055	-0.052	-0.047	-0.042	-0.036	-0.030	-0.023	-0.016	-0.008	0.000	
637.50	H= 150.30	149.37	148.64	148.05	147.54	147.07	146.64	146.25	145.93	145.71	145.63	0.000
	Q= -0.054	-0.053	-0.050	-0.046	-0.041	-0.036	-0.029	-0.022	-0.015	-0.008	0.000	

Tabela 7 - Continuação.

1058.33	H=	150.00	152.64	155.21	157.67	159.95	162.00	163.78	165.24	166.32	166.85	166.99	0.000
	G=	-0.015	-0.014	-0.014	-0.013	-0.012	-0.010	-0.009	-0.007	-0.005	-0.003	0.000	
1062.50	H=	150.00	152.45	154.85	157.15	159.30	161.26	162.95	164.32	165.23	165.65	165.79	0.000
	G=	-0.017	-0.017	-0.017	-0.015	-0.014	-0.012	-0.010	-0.008	-0.006	-0.003	0.000	
1066.67	H=	150.00	152.24	154.44	156.56	158.56	160.39	161.96	163.18	163.88	164.31	164.45	0.000
	G=	-0.020	-0.020	-0.019	-0.018	-0.016	-0.014	-0.012	-0.009	-0.006	-0.003	0.000	
1070.83	H=	150.00	152.01	153.99	155.92	157.74	159.40	160.81	161.76	162.42	162.82	162.96	0.000
	G=	-0.022	-0.022	-0.021	-0.020	-0.018	-0.016	-0.014	-0.010	-0.007	-0.003	0.000	
1075.00	H=	150.00	151.77	153.53	155.23	156.85	158.30	159.41	160.22	160.83	161.21	161.33	0.000
	G=	-0.024	-0.024	-0.023	-0.022	-0.020	-0.018	-0.015	-0.011	-0.008	-0.004	0.000	
1079.17	H=	150.00	151.53	153.05	154.52	155.89	157.05	157.88	158.59	159.13	159.47	159.58	0.000
	G=	-0.026	-0.026	-0.025	-0.023	-0.021	-0.019	-0.016	-0.012	-0.008	-0.004	0.000	
1083.33	H=	150.00	151.29	152.55	153.76	154.85	155.63	156.31	156.89	157.34	157.62	157.71	0.000
	G=	-0.027	-0.027	-0.026	-0.025	-0.023	-0.020	-0.016	-0.013	-0.008	-0.004	0.000	
1087.50	H=	150.00	151.03	152.04	152.96	153.64	154.19	154.70	155.14	155.47	155.68	155.75	0.000
	G=	-0.028	-0.028	-0.027	-0.026	-0.023	-0.020	-0.017	-0.013	-0.009	-0.004	0.000	
1091.67	H=	150.00	150.77	151.50	152.05	152.41	152.76	153.08	153.35	153.55	153.68	153.71	0.000
	G=	-0.029	-0.029	-0.028	-0.026	-0.024	-0.021	-0.017	-0.013	-0.009	-0.005	0.000	
1095.83	H=	150.00	150.49	150.89	151.05	151.19	151.34	151.46	151.55	151.61	151.64	151.65	0.000
	G=	-0.029	-0.029	-0.028	-0.026	-0.024	-0.021	-0.017	-0.013	-0.009	-0.005	0.000	
1100.00	H=	150.00	150.18	150.14	150.07	150.00	149.92	149.84	149.75	149.66	149.60	149.57	0.000
	G=	-0.030	-0.029	-0.028	-0.026	-0.023	-0.021	-0.017	-0.013	-0.009	-0.005	0.000	
1104.17	H=	150.00	149.74	149.41	149.11	148.82	148.53	148.23	147.96	147.74	147.58	147.53	0.000
	G=	-0.029	-0.029	-0.027	-0.025	-0.023	-0.020	-0.017	-0.013	-0.009	-0.005	0.000	
1108.33	H=	150.00	149.28	148.71	148.18	147.66	147.15	146.66	146.22	145.86	145.63	145.54	0.000
	G=	-0.028	-0.028	-0.027	-0.025	-0.022	-0.020	-0.016	-0.013	-0.009	-0.004	0.000	
1112.50	H=	150.00	148.90	148.04	147.27	146.53	145.81	145.13	144.54	144.06	143.75	143.64	0.000
	G=	-0.027	-0.027	-0.025	-0.024	-0.021	-0.019	-0.016	-0.012	-0.008	-0.004	0.000	
1116.67	H=	150.00	148.67	147.43	146.39	145.42	144.51	143.66	142.93	142.36	141.99	141.86	0.000
	G=	-0.025	-0.025	-0.024	-0.023	-0.020	-0.018	-0.015	-0.011	-0.008	-0.004	0.000	
1120.83	H=	150.00	148.47	146.94	145.56	144.36	143.26	142.27	141.42	140.77	140.35	140.21	0.000
	G=	-0.023	-0.023	-0.022	-0.021	-0.019	-0.016	-0.014	-0.010	-0.007	-0.004	0.000	
1125.00	H=	150.00	148.27	146.54	144.82	143.36	142.08	140.96	140.02	139.31	138.86	138.71	0.000
	G=	-0.021	-0.021	-0.020	-0.019	-0.017	-0.015	-0.012	-0.009	-0.006	-0.003	0.000	
1129.17	H=	150.00	148.07	146.15	144.25	142.66	140.99	139.75	138.74	137.99	137.52	137.36	0.000
	G=	-0.019	-0.019	-0.018	-0.017	-0.016	-0.014	-0.011	-0.008	-0.006	-0.003	0.000	
1133.33	H=	150.00	147.88	145.78	143.73	141.75	140.03	138.68	137.60	136.82	136.34	136.18	0.000
	G=	-0.017	-0.016	-0.016	-0.015	-0.014	-0.012	-0.010	-0.007	-0.005	-0.002	0.000	
1137.50	H=	150.00	147.70	145.43	143.25	141.18	139.26	137.75	136.62	135.81	135.33	135.16	0.000
	G=	-0.014	-0.014	-0.013	-0.012	-0.011	-0.010	-0.008	-0.006	-0.004	-0.002	0.000	

Tabela 7 - Continuação.

1141.67	H= 150.30 G= -0.011	147.24 -0.011	145.13 -0.011	142.83 -0.010	140.68 -0.009	138.72 -0.008	137.02 -0.007	135.81 -0.005	134.97 -0.003	134.48 -0.002	134.31 0.000	0.000
1145.83	H= 150.30 G= -0.038	147.41 -0.008	144.89 -0.008	142.99 -0.007	140.28 -0.006	138.30 -0.006	136.56 -0.005	135.18 -0.004	134.31 -0.003	133.80 -0.001	133.63 0.000	0.000
1150.00	H= 150.30 G= -0.005	147.31 -0.005	144.71 -0.005	142.25 -0.004	140.01 -0.004	138.01 -0.003	136.28 -0.003	134.83 -0.003	133.83 -0.002	133.29 -0.001	133.12 0.000	0.000
1154.17	H= 150.00 G= -0.032	147.26 -0.002	144.61 -0.002	142.12 -0.002	139.85 -0.002	137.85 -0.001	136.13 -0.001	134.71 -0.001	133.58 -0.001	132.97 -0.001	132.78 0.000	0.000
1158.33	H= 150.30 G= 0.031	147.25 0.001	144.59 0.001	142.10 0.001	139.84 0.001	137.84 0.001	136.14 0.001	134.73 0.000	133.62 0.000	132.86 -0.000	132.64 0.000	0.000
1162.50	H= 150.30 G= 0.004	147.29 0.004	144.66 0.004	142.20 0.004	139.96 0.003	137.98 0.003	136.30 0.002	134.91 0.002	133.82 0.001	133.04 0.001	132.71 0.000	0.000
1166.67	H= 150.30 G= 0.007	147.37 0.007	144.81 0.007	142.41 0.006	140.21 0.006	138.27 0.005	136.61 0.004	135.24 0.003	134.18 0.002	133.45 0.001	133.11 0.000	0.000
1170.83	H= 150.30 G= 0.010	147.49 0.010	145.04 0.010	142.73 0.009	140.60 0.008	138.70 0.007	137.07 0.006	135.72 0.005	134.70 0.003	134.05 0.002	133.89 0.000	0.000
1175.00	H= 150.30 G= 0.013	147.64 0.013	145.33 0.012	143.14 0.011	141.10 0.010	139.26 0.009	137.67 0.008	136.37 0.006	135.41 0.004	134.92 0.002	134.80 0.000	0.000
1179.17	H= 150.30 G= 0.016	147.62 0.015	145.68 0.015	143.62 0.014	141.70 0.012	139.94 0.011	138.42 0.009	137.18 0.007	136.36 0.005	135.97 0.002	135.83 0.000	0.000
1183.33	H= 150.30 G= 0.018	148.02 0.016	146.06 0.017	144.17 0.016	142.38 0.014	140.74 0.013	139.31 0.011	138.19 0.008	137.54 0.006	137.14 0.003	137.01 0.000	0.000
1187.50	H= 150.30 G= 0.021	148.23 0.020	146.47 0.019	144.76 0.018	143.13 0.016	141.63 0.014	140.35 0.012	139.46 0.009	138.83 0.006	138.45 0.003	138.32 0.000	0.000
1191.67	H= 150.30 G= 0.022	148.44 0.021	146.90 0.021	145.38 0.021	143.94 0.018	142.62 0.016	141.59 0.013	140.83 0.010	140.25 0.007	139.88 0.003	139.76 0.000	0.000
1195.83	H= 150.30 G= 0.023	148.66 0.023	147.33 0.022	146.03 0.021	144.80 0.019	143.74 0.017	142.96 0.014	142.28 0.011	141.76 0.007	141.43 0.004	141.32 0.000	0.000
1200.00	H= 150.30 G= 0.024	148.68 0.024	147.77 0.023	146.70 0.022	145.73 0.020	145.00 0.018	144.36 0.015	143.80 0.011	143.37 0.008	143.09 0.004	143.00 0.000	0.000

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO

X/L=	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.
H=	150.30	155.43	160.77	165.93	170.82	175.37	179.52	183.22	186.41	189.09	191.23
G=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207

Tabela 7 - Final.

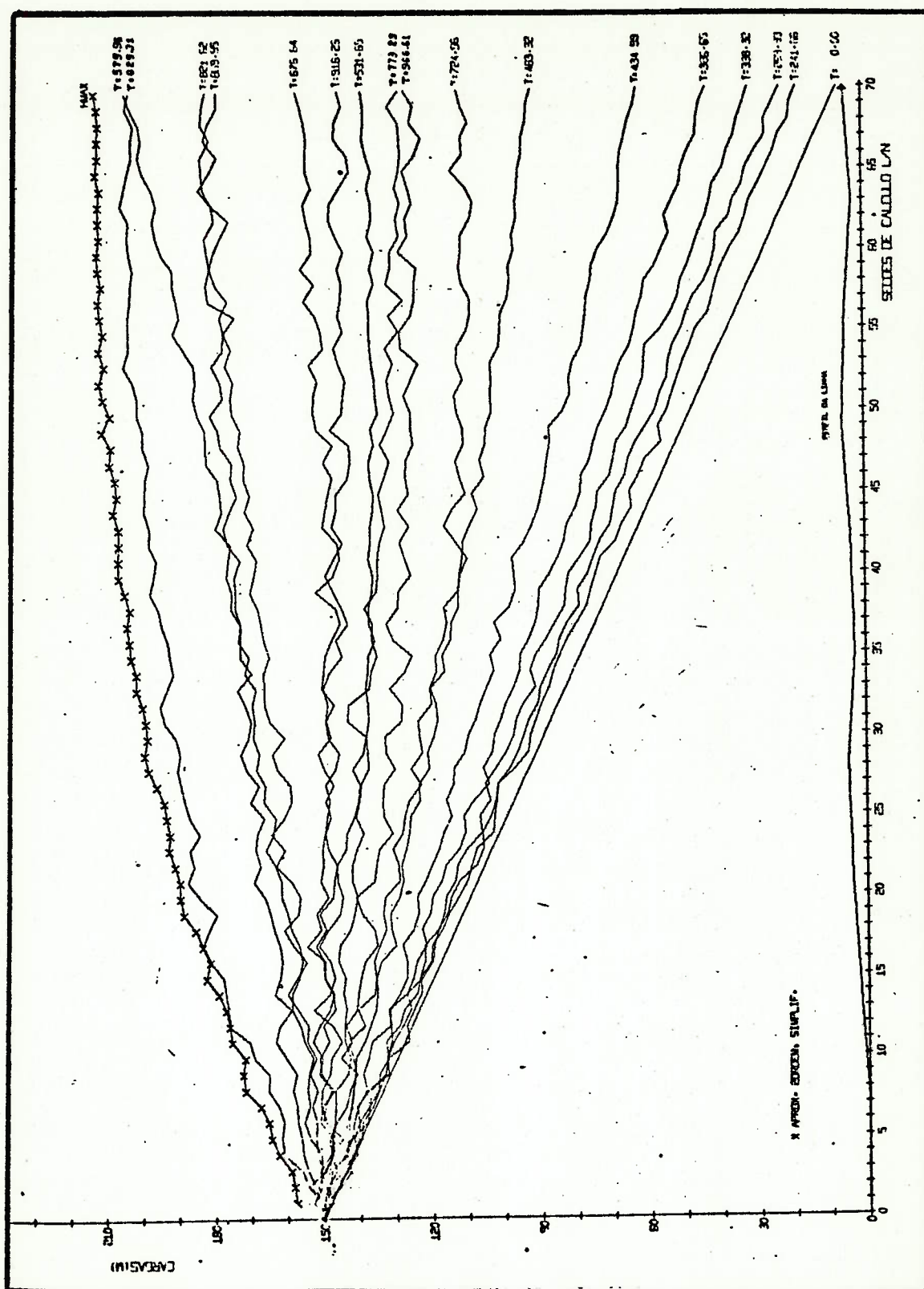


Fig.19 - Cargas ao longo da tubulação - aprox. 2^a ordem.

AXLECF, NHE= .120E+04 .70E+05 .500E+00 .180E+01 .150E+03
 HVAL, GACDAS= .07E+01 .207E+00 .180E+01 .180E+01 .180E+01
 TFLM, GSTMAX= .50E+01 .150E+01 .981E+01 .120E+04
 DTABR = .633E+00 .623E+03 .476E+02

N, IPR, NN= 70 5 1

ARC(I)= 0. .29E-03 .57E-03 .43E-03 0. .14E-03 .29E-03 .43E-03 .71E-03 .71E-03 0.

CARGAS E VAZÕES AO LONGO DA TUBULAÇÃO

TEMPO, X/L=	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.	TAU
0.00 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.09	6.76	1.000
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
4.17 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.09	6.76	0.989
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
8.33 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.09	6.76	0.979
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
12.50 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.09	6.76	0.968
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
16.67 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.09	6.76	0.957
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
20.83 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.09	6.76	0.947
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
25.00 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.09	6.76	0.936
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
29.17 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	22.35	7.78	0.926
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.205	0.206	
33.33 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.94	8.56	0.916
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.205	
37.50 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	50.66	36.13	21.58	8.12	0.905
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.207	0.206	
41.67 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	50.33	36.76	22.25	7.72	0.895
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.205	0.206	0.206	
45.83 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.55	50.04	36.41	22.96	8.47	0.884
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.205	0.205	
50.00 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.78	65.06	50.58	36.09	22.57	9.27	0.874
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	0.205	0.204	
54.17 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.55	64.78	51.16	36.70	22.23	8.85	0.864
0=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.205	0.206	0.206	0.205	

Tabela 8 - Listagens dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação - aprox. 2^{ta} ordem.

716.67	H=	150.30	144.79	141.58	139.02	135.16	133.54	130.31	130.05	130.94	126.48	126.44	0.000
	Q=	0.035	0.031	0.029	0.024	0.028	0.029	0.016	0.014	0.012	0.005	0.000	
720.63	H=	150.30	146.86	142.37	141.19	136.85	134.07	132.99	134.92	132.05	129.39	129.26	0.000
	Q=	0.035	0.033	0.033	0.031	0.030	0.026	0.020	0.016	0.013	0.001	0.000	
725.60	H=	150.30	147.11	143.88	140.90	141.20	135.99	134.52	135.44	135.48	132.54	133.67	0.000
	Q=	0.037	0.037	0.034	0.034	0.029	0.034	0.025	0.020	0.006	0.008	0.000	
729.17	H=	150.30	148.62	145.36	140.12	139.03	142.61	136.99	137.65	133.22	137.78	135.26	0.000
	Q=	0.040	0.042	0.040	0.036	0.030	0.030	0.023	0.020	0.011	0.011	0.000	
733.33	H=	150.30	145.38	145.63	143.62	140.92	141.47	138.10	140.77	137.11	140.41	142.68	0.000
	Q=	0.041	0.043	0.038	0.037	0.032	0.032	0.021	0.024	0.012	0.008	0.000	
737.50	H=	150.30	143.47	145.75	146.12	143.62	147.16	141.93	143.12	144.04	140.67	143.81	0.000
	Q=	0.044	0.039	0.041	0.041	0.036	0.030	0.024	0.022	0.012	0.010	0.000	
741.67	H=	150.30	151.80	149.56	147.58	145.03	147.92	140.58	146.76	143.26	145.28	143.15	0.000
	Q=	0.048	0.046	0.039	0.038	0.030	0.028	0.031	0.023	0.012	0.008	0.000	
745.83	H=	150.30	150.26	146.97	148.28	147.31	148.10	146.44	148.82	145.98	146.46	150.86	0.000
	Q=	0.050	0.049	0.042	0.040	0.039	0.034	0.025	0.015	0.011	0.009	0.000	
750.00	H=	150.30	150.78	150.14	150.13	150.96	150.63	148.05	151.10	150.94	150.22	149.61	0.000
	Q=	0.048	0.045	0.039	0.041	0.035	0.030	0.027	0.017	0.014	0.007	0.000	
754.17	H=	150.30	149.54	151.76	153.63	150.94	151.10	152.33	152.04	153.60	153.72	156.30	0.000
	Q=	0.051	0.041	0.043	0.033	0.036	0.031	0.025	0.018	0.012	0.007	0.000	
758.33	H=	150.30	151.65	151.97	153.48	151.65	153.55	158.44	154.44	155.55	153.38	160.60	0.000
	Q=	0.039	0.042	0.044	0.039	0.036	0.030	0.022	0.023	0.009	0.006	0.000	
762.50	H=	150.30	150.78	152.36	152.65	157.25	158.24	157.59	155.43	160.44	155.63	160.71	0.000
	Q=	0.036	0.040	0.039	0.034	0.034	0.024	0.020	0.019	0.008	0.007	0.000	
766.67	H=	150.30	153.51	154.14	156.48	155.51	160.14	157.52	160.85	163.37	161.16	165.35	0.000
	Q=	0.032	0.040	0.036	0.032	0.035	0.024	0.014	0.014	0.011	0.006	0.000	
770.83	H=	150.30	146.28	152.17	153.73	158.00	160.42	162.72	162.00	164.87	160.68	165.02	0.000
	Q=	0.026	0.036	0.030	0.029	0.026	0.027	0.024	0.016	0.008	0.003	0.000	
775.00	H=	150.30	153.25	157.68	157.59	159.42	165.85	165.42	161.52	165.53	167.34	168.88	0.000
	Q=	0.035	0.033	0.025	0.029	0.030	0.020	0.021	0.016	0.011	0.006	0.000	
779.17	H=	150.30	150.89	157.23	156.70	160.42	162.80	166.77	166.67	167.92	167.75	168.73	0.000
	Q=	0.025	0.029	0.025	0.025	0.024	0.024	0.016	0.011	0.010	0.006	0.000	
783.33	H=	150.30	153.18	154.41	160.40	163.26	168.33	164.55	168.81	167.97	170.10	170.17	0.000
	Q=	0.025	0.026	0.018	0.020	0.018	0.018	0.015	0.013	0.009	0.004	0.000	
787.50	H=	150.30	158.79	155.78	160.74	162.02	166.63	167.53	168.14	172.95	172.86	171.93	0.000
	Q=	0.021	0.022	0.020	0.018	0.018	0.010	0.014	0.015	0.006	0.001	0.000	
791.67	H=	150.30	154.47	156.62	162.65	162.60	167.24	167.01	169.60	170.54	173.69	172.69	0.000
	Q=	0.036	0.013	0.017	0.012	0.016	0.007	0.012	0.010	0.004	0.006	0.000	
795.83	H=	150.30	158.23	158.33	161.85	165.18	167.48	171.56	171.72	172.29	170.96	174.75	0.000
	Q=	0.038	0.011	0.005	0.009	0.008	0.002	0.009	0.006	0.005	0.010	0.000	

Tabela 8 - Continuação

1133.33	H= 150.20	148.64	146.26	143.61	143.21	140.96	142.63	136.99	135.40	137.14	134.50	0.000
	C= -0.025	-0.018	-0.015	-0.015	-0.010	-0.012	-0.018	-0.006	-0.009	-0.001	0.000	
1137.50	H= 150.30	147.93	146.32	140.62	140.09	139.32	141.19	135.40	132.51	136.60	136.93	0.000
	C= -0.016	-0.012	-0.015	-0.016	-0.013	-0.009	-0.010	-0.012	-0.004	-0.001	0.000	
1141.67	H= 150.30	145.89	145.93	139.75	141.30	137.88	138.41	136.75	135.35	132.19	134.85	0.000
	C= 0.033	-0.011	-0.015	-0.009	-0.010	-0.005	-0.009	-0.004	0.002	0.001	0.000	
1145.83	H= 150.30	145.05	144.12	138.86	140.67	136.47	134.96	133.32	135.31	133.98	136.34	0.000
	C= -0.038	-0.014	-0.007	-0.007	-0.005	0.001	-0.005	-0.004	-0.002	-0.005	0.000	
1150.00	H= 150.30	148.94	145.27	142.45	139.39	137.00	139.13	138.54	133.97	131.66	131.40	0.000
	C= -0.011	-0.005	-0.005	-0.006	-0.005	-0.004	-0.008	-0.002	0.001	0.007	0.000	
1154.17	H= 150.30	145.91	143.28	144.72	140.16	136.44	133.53	134.83	136.71	132.21	132.97	0.000
	C= -0.032	0.003	-0.003	0.004	-0.000	0.004	-0.003	-0.004	-0.001	-0.002	0.000	
1158.33	H= 150.30	149.66	140.56	139.97	138.39	138.53	137.56	130.97	138.88	133.22	132.66	0.000
	C= -0.034	0.000	0.001	0.005	-0.003	0.003	-0.004	0.005	-0.001	0.003	0.000	
1162.50	H= 150.30	151.11	145.33	143.25	138.98	134.29	137.08	133.45	133.81	134.35	133.30	0.000
	C= 0.033	-0.005	0.004	0.004	0.002	0.000	0.000	0.006	0.001	0.005	0.000	
1166.67	H= 150.30	149.64	148.16	138.87	142.71	139.03	137.92	133.74	131.44	133.78	132.53	0.000
	C= 0.010	0.003	0.002	0.006	0.003	0.002	0.004	0.009	-0.001	-0.003	0.000	
1170.83	H= 150.30	147.14	148.24	139.54	138.36	142.90	135.80	136.14	134.53	133.08	134.67	0.000
	C= 0.015	0.007	0.011	0.008	0.014	0.014	0.005	0.000	-0.000	0.001	0.000	
1175.00	H= 150.30	147.13	146.38	143.53	141.06	140.52	132.75	137.66	132.78	134.20	137.08	0.000
	C= 0.022	0.015	0.013	0.012	0.009	0.007	0.006	0.003	0.002	0.005	0.000	
1179.17	H= 150.30	149.61	147.60	141.88	138.07	137.59	140.49	138.22	138.25	134.63	134.34	0.000
	C= 0.016	0.010	0.010	0.014	0.016	0.009	0.009	0.006	0.001	0.002	0.000	
1183.33	H= 150.30	147.37	146.87	147.04	144.68	141.62	139.59	139.14	140.47	136.03	139.01	0.003
	C= 0.022	0.018	0.016	0.012	0.018	0.011	0.012	0.003	0.010	0.007	0.000	
1187.50	H= 150.30	149.65	145.25	149.09	141.79	140.35	142.35	139.22	138.48	136.08	140.28	0.009
	C= 0.025	0.015	0.028	0.016	0.012	0.012	0.012	0.003	0.007	0.000	0.000	
1191.67	H= 150.30	150.33	145.31	143.25	138.66	143.02	143.36	139.42	140.98	138.59	134.38	0.000
	C= 0.024	0.018	0.025	0.022	0.012	0.014	0.008	0.013	0.007	0.002	0.000	
1195.83	H= 150.30	147.61	146.76	142.73	145.68	144.87	141.38	139.63	141.28	143.59	140.82	0.000
	C= 0.017	0.019	0.028	0.018	0.012	0.017	0.016	0.016	0.002	0.002	0.000	
1200.00	H= 150.30	151.33	151.46	147.81	144.70	147.10	143.36	145.49	140.93	142.82	151.29	0.000
	C= 0.025	0.029	0.021	0.019	0.020	0.019	0.012	0.014	0.006	0.006	0.000	

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO

X/L=	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.
H=	150.00	158.79	163.14	168.99	173.64	178.40	181.87	185.75	187.99	191.93	194.69
C=	0.212	0.209	0.210	0.209	0.208	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207

Tabela 8 - Final.

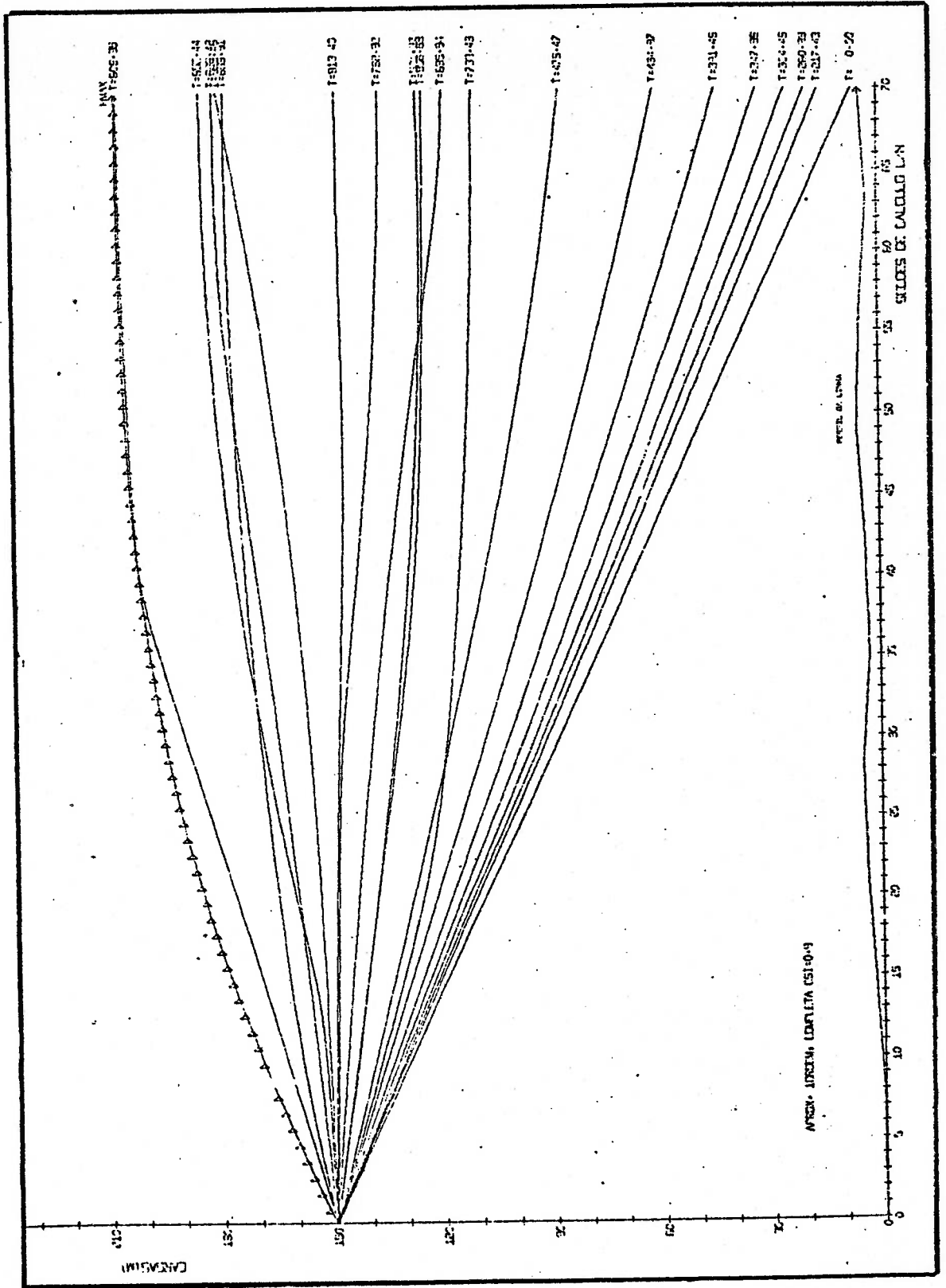


Fig.20 - Cargas ao longo da tubulação - equação completa

A, XL, D, f, HRA = .120E+04 .700E+05 .500E+00 .180E+01 .150E+03
 MVAL, GACDAA = .678E+01 .207E+00 .190E+01 .120E+04
 TF, CP, G, TMAX = .583E+03 .150E+01 .981E+01 .120E+04
 DT, BAR = .750E+00 .623E+03 .476E+02
 N, IPR, NN = 70 5 2
 ARC(1) = 0. .29E-03 .57E-03 .43E-03 0. .14E-03 .29E-03 .43E-03 .71E-03 .71E-03 0.

CARGAS E VAZÕES AO LONGO DA TUBULACAO

TEMPO X/L =	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.	TAU
0.00 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.09	6.76	1.000
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
3.75 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.09	6.88	0.990
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
7.50 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.41	21.13	7.01	0.981
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
11.25 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.42	21.24	7.13	0.971
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
15.00 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.73	35.50	21.36	7.26	0.962
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	
18.75 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.77	35.60	21.47	7.40	0.952
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	
22.50 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.06	49.85	35.70	21.59	7.53	0.943
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	
26.25 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.38	64.12	49.94	35.80	21.71	7.68	0.933
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	
30.00 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.40	64.20	50.04	35.91	21.84	7.82	0.924
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	
33.75 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.71	78.47	64.28	50.13	36.03	21.97	7.97	0.914
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	
37.50 H=	150.00	135.68	121.35	107.03	92.75	78.54	64.37	50.23	36.14	22.11	8.12	0.905
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	
41.25 H=	150.00	135.68	121.35	107.04	92.81	78.62	64.46	50.34	36.27	22.24	8.28	0.896
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	
45.00 H=	150.00	135.68	121.36	107.09	92.88	78.70	64.55	50.45	36.39	22.39	8.44	0.887
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	0.205	
48.75 H=	150.00	135.68	121.38	107.15	92.95	78.78	64.65	50.56	36.52	22.53	8.61	0.877
0=	0.237	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	0.205	

Tabela 9 - Listagens dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação - equação completa.

652.50	H= 150.00	147.04	144.23	141.89	139.94	138.31	136.91	135.76	134.90	134.36	134.16	0.000
	G= -0.042	-0.042	-0.041	-0.038	-0.034	-0.030	-0.025	-0.019	-0.013	-0.006	0.000	
656.25	H= 150.00	146.81	143.65	140.74	138.39	136.43	134.76	133.46	132.48	131.87	131.66	0.000
	G= -0.038	-0.038	-0.037	-0.035	-0.032	-0.028	-0.023	-0.018	-0.012	-0.006	0.000	
660.00	H= 150.00	146.58	143.18	139.67	137.01	134.71	132.83	131.33	130.23	129.55	129.32	0.000
	G= -0.034	-0.034	-0.033	-0.032	-0.029	-0.026	-0.021	-0.016	-0.011	-0.006	0.000	
663.75	H= 150.00	146.36	142.75	139.21	135.69	133.20	131.06	129.39	128.17	127.43	127.18	0.000
	G= -0.030	-0.030	-0.029	-0.028	-0.026	-0.023	-0.019	-0.015	-0.010	-0.005	0.000	
667.50	H= 150.00	146.15	142.35	138.63	135.07	131.93	129.50	127.65	126.32	125.51	125.24	0.000
	G= -0.026	-0.026	-0.025	-0.024	-0.023	-0.020	-0.017	-0.013	-0.009	-0.005	0.000	
671.25	H= 150.00	145.97	142.00	138.13	134.42	130.99	128.20	126.14	124.70	123.63	123.54	0.000
	G= -0.022	-0.022	-0.021	-0.020	-0.019	-0.017	-0.015	-0.011	-0.008	-0.004	0.000	
675.00	H= 150.00	145.61	141.69	137.70	133.89	130.33	127.21	124.90	123.32	122.38	122.07	0.000
	G= -0.018	-0.017	-0.017	-0.016	-0.015	-0.014	-0.012	-0.010	-0.007	-0.003	0.000	
678.75	H= 150.00	145.69	141.44	137.35	133.46	129.85	126.58	123.96	122.21	121.20	120.87	0.000
	G= -0.013	-0.013	-0.012	-0.012	-0.011	-0.010	-0.009	-0.007	-0.005	-0.003	0.000	
682.50	H= 150.00	145.59	141.26	137.09	133.15	129.51	126.22	123.40	121.41	120.30	119.94	0.000
	G= -0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.007	-0.006	-0.006	-0.005	-0.004	-0.002	0.000	
686.25	H= 150.00	145.53	141.14	136.93	132.96	129.32	126.04	123.20	120.98	119.71	119.31	0.000
	G= -0.004	-0.004	-0.004	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.002	-0.002	-0.001	0.000	
690.00	H= 150.00	145.50	141.09	136.87	132.91	129.28	126.04	123.24	120.95	119.46	119.01	0.000
	G= 0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	-0.000	-0.000	0.000	
693.75	H= 150.00	145.51	141.12	136.92	132.99	129.40	126.22	123.49	121.26	119.67	119.09	0.000
	G= 0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.001	0.000	
697.50	H= 150.00	145.57	141.23	137.08	133.21	129.69	126.59	123.95	121.82	120.29	119.65	0.000
	G= 0.010	0.010	0.010	0.009	0.009	0.008	0.007	0.005	0.004	0.002	0.000	
701.25	H= 150.00	145.66	141.41	137.36	133.58	130.15	127.14	124.61	122.62	121.27	120.77	0.000
	G= 0.015	0.014	0.014	0.013	0.012	0.011	0.010	0.008	0.006	0.003	0.000	
705.00	H= 150.00	145.79	141.68	137.75	134.09	130.76	127.89	125.50	123.68	122.60	122.31	0.000
	G= 0.019	0.019	0.018	0.017	0.016	0.014	0.012	0.010	0.007	0.004	0.000	
708.75	H= 150.00	145.96	142.01	138.24	134.74	131.58	128.84	126.62	125.04	124.26	124.06	0.000
	G= 0.023	0.023	0.022	0.021	0.019	0.017	0.015	0.012	0.009	0.005	0.000	
712.50	H= 150.00	146.16	142.41	138.84	135.52	132.54	129.99	127.99	126.73	126.15	125.98	0.000
	G= 0.027	0.027	0.026	0.024	0.023	0.020	0.017	0.014	0.010	0.005	0.000	
716.25	H= 150.00	146.40	142.88	139.53	136.42	133.66	131.34	129.66	128.62	128.19	128.03	0.000
	G= 0.030	0.030	0.029	0.028	0.026	0.023	0.019	0.015	0.010	0.005	0.000	
720.00	H= 150.00	146.66	143.41	140.31	137.45	134.95	132.94	131.62	130.82	130.36	130.21	0.000
	G= 0.034	0.033	0.032	0.031	0.028	0.025	0.021	0.016	0.011	0.006	0.000	
723.75	H= 150.00	146.95	143.98	141.17	138.61	136.41	134.81	133.77	133.07	132.66	132.52	0.000
	G= 0.037	0.036	0.035	0.033	0.031	0.027	0.023	0.017	0.012	0.006	0.000	

Tabela 9 - Continuação

1166.25	H= 150.30 Q= 0.037	147.46 0.007	144.87 0.007	142.89 0.006	140.31 0.005	138.38 0.005	136.72 0.004	135.36 0.003	134.33 0.002	133.66 0.001	133.42 0.000	0.000
1170.00	H= 150.30 Q= 0.010	147.49 0.009	145.06 0.009	142.75 0.008	140.63 0.008	138.74 0.007	137.12 0.005	135.79 0.004	134.80 0.003	134.18 0.002	133.96 0.000	0.000
1173.75	H= 150.30 Q= 0.012	147.62 0.012	145.30 0.011	143.09 0.011	141.05 0.010	139.21 0.008	137.64 0.007	136.35 0.005	135.42 0.004	134.66 0.002	134.68 0.000	0.000
1177.50	H= 150.30 Q= 0.014	147.77 0.014	145.59 0.014	143.50 0.013	141.55 0.011	139.79 0.010	138.27 0.008	137.06 0.007	136.20 0.005	135.71 0.002	135.55 0.000	0.000
1181.25	H= 150.30 Q= 0.017	147.94 0.016	145.91 0.016	143.96 0.015	142.12 0.013	140.46 0.012	139.03 0.010	137.91 0.008	137.13 0.005	136.69 0.003	136.54 0.000	0.000
1185.00	H= 150.30 Q= 0.019	148.12 0.018	146.26 0.018	144.46 0.016	142.76 0.015	141.22 0.013	139.91 0.011	138.89 0.008	138.19 0.006	137.79 0.003	137.65 0.000	0.000
1188.75	H= 150.30 Q= 0.020	148.30 0.020	146.63 0.019	145.00 0.018	143.46 0.017	142.07 0.014	140.91 0.012	140.01 0.009	139.38 0.006	139.00 0.003	138.87 0.000	0.000
1192.50	H= 150.30 Q= 0.022	148.50 0.021	147.01 0.021	145.57 0.020	144.21 0.018	143.00 0.016	142.00 0.013	141.22 0.010	140.66 0.007	140.31 0.003	140.19 0.000	0.000
1196.25	H= 150.30 Q= 0.023	148.70 0.023	147.41 0.022	146.16 0.021	144.81 0.019	143.61 0.017	143.18 0.014	142.52 0.011	142.02 0.007	141.71 0.004	141.61 0.000	0.000
1200.00	H= 150.30 Q= 0.024	148.90 0.024	147.81 0.023	146.79 0.022	145.87 0.020	145.08 0.017	144.42 0.014	143.87 0.011	143.46 0.008	143.20 0.004	143.11 0.000	0.000

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO

X/L=	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.
H=	150.00	155.42	160.75	165.90	170.79	175.34	179.48	183.17	186.37	189.05	191.19
Q=	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207

Tabela 9 - Final.

CAPÍTULO V

MEIO HETEROGÊNEO

As equações para o meio heterogêneo, apresentadas em sua forma final no capítulo III, serão aqui estudadas para posterior aplicação dos métodos convenientes de integração com objetivo de obter resultados numéricos para o transitório.

Os métodos a serem utilizados devem, além de possibilitar a determinação das cargas (ou pressões) e vazões (ou velocidades) em cada instante do transitório e em cada seção de cálculo, permitir a perfeita caracterização das ondas de choque que eventualmente se desenvolvam durante o fenômeno de reunião das colunas líquidas separadas.

O método das características na forma em que foi estudado até o momento, não se revela conveniente, quando da ocorrência das ondas de choque anteriormente citadas. Nesta situação, referindo-nos à geometria da malha de características (fig.A-1), as retas se interceptam antes do ponto P de cálculo, gerando erros sensíveis nos resultados numéricos.

Pode-se, assim, utilizar o método das características em sua terceira forma, chamada malha característica, em que o intervalo de tempo Δt torna-se função do ponto de cálculo, mantendo-se o número de subdivisões N pré-fixado e constante. A malha gerada por tal método de cálculo se caracteriza por uma aparência irregular, diferindo da forma da malha de características dos métodos de intervalo de tempo especificado.

Trabalhos recentes, a partir de Kranenburg | 10 |, têm abandonado o método das características em favor de métodos de diferenças finitas baseados nos trabalhos de Lax | 11 | e Lax-Wendroff | 12 |, por se revelarem mais convenientes ao tratarmos

com ondas de choque. No presente trabalho adotaremos a mesma sistemática.

Encerramos o capítulo III, verificando que na região de golpe do transitório em meio heterogêneo, as equações para a situação homogênea podem ser aplicadas, corrigindo-se apenas o valor da celeridade em função do volume de gás presente no meio.

Situações em que existe a certeza da não ocorrência de pressões iguais à de vapor do líquido, i.é., em que não ocorre separação da coluna líquida, podem ser tratadas como o foi o meio homogêneo.

Porém, a dificuldade em se caracterizar claramente a fronteira entre a região de golpe e a de separação, não nos permite estudar a região de golpe na forma simplificada.

Na região de golpe, as equações a serem verificadas são:

- continuidade para fase líquida

$$(84) \quad \frac{1}{a^2 \rho_l} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

- movimento

$$(86) \quad \frac{1}{\rho_l(1-\alpha)} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| + g \sin \theta = 0$$

Para a região de separação tem-se:

- continuidade para fase líquida

$$(76) \quad \frac{1}{a^2 \rho_l} \frac{dp}{dt} - \frac{1}{(1-\alpha-\beta)} \frac{d\beta}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{-4 \dot{m}_v}{(1-\alpha-\beta)\pi D^2 \rho_l L_v} = F_v$$

- continuidade para fase vapor

$$(82) \quad \frac{1}{a_v^2 \rho_v} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dt} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{4\dot{m}_v}{\beta \pi D^2 \rho_v L_v} = F'_v$$

- movimento

$$(87) \quad \frac{1}{\rho_\ell(1-\alpha-\beta)} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{f}{2D} v|v| + g \sin \theta = 0$$

5.1) Método de diferenças finitas.

O procedimento a ser aplicado, desenvolvido inicialmente por Lax [11] e complementado por Lax e Wendroff [12], oferece a possibilidade do tratamento de ondas de choque e outras formas de descontinuidades, de maneira bastante objetiva, desde que as equações representativas do fenômeno possam ser escritas na chamada forma conservativa.

Adotando a notação de Lax e Wendroff, as equações a serem estudadas, (76), (82), (87), em suas respectivas formas conservativas são representadas por:

$$\frac{\partial}{\partial t} Q_{j1} + \frac{\partial}{\partial x} Q_{j2} = Q_{j3} \quad (178)$$

onde $j = 1, 2, 3$ e Q_{j1} ; Q_{j2} ; Q_{j3} são funções das variáveis dependentes p, V, β .

Voltando ao nosso estudo, a equação da continuidade para a fase líquida, na região de separação, é :

$$(76) \quad \frac{1}{a^2 \rho_l} \left[\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{1}{(1-\alpha-\beta)} \left[\frac{\partial}{\partial t} (1-\alpha-\beta) + V \frac{\partial}{\partial x} (1-\alpha-\beta) \right] + \frac{\partial V}{\partial x} = - F_V \quad (179)$$

Considerando-se que, para os problemas com que comumente nos defrontamos, temos:

$$\frac{p}{a^2 \rho_l} \ll 1 \quad (180)$$

e que, como verificado no capítulo III,

$$\alpha = \text{constante} \quad (181)$$

a forma conservativa da equação (179) é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ (1-\alpha-\beta) \left[1 + \frac{p}{a^2 \rho_l} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (1-\alpha-\beta) V \left[1 + \frac{p}{a^2 \rho_l} \right] \right\} = \\ = - F_V (1-\alpha-\beta) \end{aligned} \quad (182)$$

O simples desenvolvimento de (182) submetida às restrições (180) e (181), conduz-nos facilmente a (179).

A partir das conclusões do parágrafo 3.1), podemos simplificar a equação da continuidade (82) da fase de vapor para:

$$\frac{1}{\beta} \left[\frac{\partial \beta}{\partial t} + V \frac{\partial \beta}{\partial x} \right] + \frac{\partial V}{\partial x} = F'_V \quad (183)$$

A forma conservativa de (183) é, então,

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (V \cdot \beta) = F'_V \cdot \beta \quad (184)$$

A equação do movimento é dada por:

$$(87) \quad \frac{1}{\rho_l(1-\alpha-\beta)} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = - \frac{f}{2D} V|V| - g \operatorname{sen} \theta \quad (185)$$

A forma conservativa de (185) é :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ (1-\alpha-\beta)V \left[1 + \frac{p}{a^2 \rho_l} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (1-\alpha-\beta)V^2 \left[1 + \frac{p}{a^2 \rho_l} \right] + \frac{p}{\rho_l} \right\} = \\ = (F'_V \cdot V - \frac{f}{2D} V|V| - g \cdot \operatorname{sen} \theta)(1-\alpha-\beta) \end{aligned} \quad (186)$$

Onde (186) é submetida às restrições:

$$(180) \quad \frac{p}{a^2 \rho_l} \ll 1$$

$$(181) \quad \alpha = \text{constante}$$

Desenvolvendo (186) :

$$\begin{aligned} & v \frac{\partial}{\partial t} (1-\alpha-\beta) + (1-\alpha-\beta) \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{(1-\alpha-\beta)}{a^2 \rho_\ell} v \frac{\partial p}{\partial t} + v^2 \frac{\partial}{\partial x} (1-\alpha-\beta) + \\ & + 2v(1-\alpha-\beta) \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{-v^2(1-\alpha-\beta)}{a^2 \rho_\ell} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_\ell} \frac{\partial p}{\partial x} = \\ & = (F_v \cdot v - \frac{f}{2D} v|v| - g \text{ sen } \theta) (1 - \alpha - \beta) \end{aligned} \quad (187)$$

Em (187) identificamos as expressões:

$$\begin{aligned} (179) \quad & \frac{(1-\alpha-\beta)v}{a^2 \rho_\ell} \left[\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} \right] + v \left[\frac{\partial}{\partial t} (1-\alpha-\beta) + v \frac{\partial}{\partial x} (1-\alpha-\beta) \right] + \\ & + v(1-\alpha-\beta) \frac{\partial v}{\partial x} = - F_v \cdot v (1-\alpha-\beta) \end{aligned} \quad (188)$$

$$\begin{aligned} e \quad & (1-\alpha-\beta) \left[\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho_\ell} \frac{\partial p}{\partial x} = (1-\alpha-\beta) \left[- \frac{f}{2D} v|v| - g \text{ sen } \theta \right] \end{aligned} \quad (189)$$

Substituindo em (187) o segundo membro de (188) e efetuando as simplificações possíveis, obtemos (189), que corresponde à equação do movimento na forma não conservativa (185).

O estudo da região de golpe pode ser feito através das equações conservativas propostas anteriormente (186), (182), deixando (184) de comparecer, visto que nesta região $\beta = 0$. Para tal, basta-nos impôr as condições resumidas ao final do capítulo 3).

$$a.1) \beta = 0$$

$$a.2) \alpha = \frac{4}{3} \pi R^3 N \rho_\ell$$

$$a.3) \left[\begin{array}{ll} \frac{d\alpha}{dt} = 0 & \text{para } \alpha < 1,44\% \\ \dot{p}_v = 0 \rightarrow F_v = 0 & \text{para } \alpha < 1,44\% \end{array} \right.$$

As equações conservativas para as quais deveremos propor o método de diferenças finitas para sua integração e consequente solução numérica são:

$$(182) \quad \frac{\partial}{\partial t} \left\{ (1-\alpha-\beta) \left[1 + \frac{p^-}{a^2 \rho_\ell} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (1-\alpha-\beta) V \left[1 + \frac{p}{a^2 \rho_\ell} \right] \right\} = \\ = -F_v (1-\alpha-\beta)$$

$$(184) \quad \frac{\partial \beta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (V \cdot \beta) = F'_v \beta$$

$$(186) \quad \frac{\partial}{\partial t} \left\{ (1-\alpha-\beta) V \left[1 + \frac{p}{a^2 \rho_\ell} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (1-\alpha-\beta) V^2 \left[1 + \frac{p}{a^2 \rho_\ell} \right] + \frac{p}{\rho_\ell} \right\} = \\ = (F_v \cdot V - \frac{f}{2D} V |V| - g \text{ sen } \theta) (1-\alpha-\beta)$$

Submetidas às condições de contorno

- região de golpe

$\alpha = \text{constante}$

$F_v = 0$

$\beta = 0$

- região de separação

$\alpha = \text{constante}$

$p = \text{constante}$

O método de Lax - Wendroff [12] desenvolvido no apêndice B deste trabalho conduz-nos à integração das equações conservativas anteriormente deduzidas segundo o esquema de diferenças finitas a seguir exposto.

O método é também chamado de método dos dois passos - ("two steps") devido à proposta de integração feita pelos autores, visando contornar os problemas apresentados pelo método inicialmente proposto por Lax [11].

As equações apresentam formas distintas para as regiões de golpe e de separação, sendo apresentadas separadamente.

- região de golpe

A equação da continuidade para a fase líquida, em sua forma conservativa (182), gera as seguintes equações de diferenças finitas:

primeiro passo:

$$(B-37) \quad P1(i+1) = \frac{1}{2} \{ P0(i+2) + P0(i) \} - ARL \{ V0(i+2) \left[1 + \frac{P0(i+2)}{ALR} \right] - V0(i) \left[1 + \frac{P0(i)}{ALR} \right] \} \quad (190)$$

- segundo passo:

$$(B-38) \quad P2(i) = P0(i) - ARL \{ V1(i+1) \left[1 + \frac{P1(i+1)}{ALR} \right] - V1(i-1) \cdot \left[1 + \frac{P1(i-1)}{ALR} \right] \} \quad (191)$$

A equação do movimento (186) oferece as equações de diferenças finitas abaixo.

- primeiro passo

$$\begin{aligned}
 \text{(B-39)} \quad V1(i+1) = & \left\{ \frac{1}{2} \{V0(i+2) \left[1 + \frac{P0(i+2)}{ALR} \right] + V0(i) \left[1 + \frac{P0(i)}{ALR} \right] \} - \right. \\
 & - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left\{ \left[V0(i+2) \right]^2 \left[1 + \frac{P0(i+2)}{ALR} \right] + \frac{P0(i+2)}{ALF} - \left[V0(i) \right]^2 \left[1 + \frac{P0(i)}{ALR} \right] - \right. \\
 & - \frac{P0(i)}{ALF} \left. \left. \right\} + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \left[-\frac{f}{2D} V0(i+2) |V0(i+2)| - g \cdot STG(i+2) \right] + \right. \\
 & \left. \left. + \left[-\frac{f}{2D} V0(i) |V0(i)| - g \cdot STG(i) \right] \right\} \right\} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{P1(i+1)}{ALR}} \right] \quad (192)
 \end{aligned}$$

segundo passo

$$\begin{aligned}
 \text{(B-40)} \quad V2(i) = & \left\{ V0(i) \left[1 + \frac{P0(i)}{ALR} \right] - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ \left[V1(i+1) \right]^2 \left[1 + \frac{P1(i+1)}{ALR} \right] + \right. \right. \\
 & + \frac{P1(i+1)}{ALF} - \left[V1(i-1) \right]^2 \left[1 + \frac{P1(i-1)}{ALR} \right] - \frac{P1(i-1)}{ALF} \left. \left. \right\} + \Delta t \left\{ \right. \\
 & \left[-\frac{f}{2D} V1(i+1) |V1(i+1)| - g \cdot STG(i+1) \right] + \left[-\frac{f}{2D} V1(i-1) |V1(i-1)| - \right. \\
 & \left. \left. - g \cdot STG(i-1) \right] \right\} \right\} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{P2(i)}{ALR}} \right] \quad (193)
 \end{aligned}$$

Além das equações do movimento e da continuidade para o meio líquido, devemos incluir, para a região de separação, a equação da continuidade para o meio de vapor. As equações que serão expostas a seguir apresentam uma forma mais complexa que as equações (190) a (193) visto ocorrer agora a presença dos volumes relativos de gás e vapor no equacionamento.

A equação da continuidade para o meio líquido será:

- primeiro passo

$$\begin{aligned}
 (B-25) \quad & \left\{ \left[A-B1(i+1) \right] \left[1 + \frac{P1(i+1)}{ALR} \right] \right\} = \frac{1}{2} \left\{ \left[A-B0(i+2) \right] \left[1 + \frac{P0(i+2)}{ALR} \right] + \right. \\
 & \left. \left[A-B0(i) \right] \left[1 + \frac{P0(i)}{ALR} \right] \right\} - \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta x} \left\{ V0(i+2) \left[A-B0(i+2) \right] \left[1 + \frac{P0(i+2)}{ALR} \right] - \right. \\
 & \left. - V0(i) \left[A-B0(i) \right] \left[1 + \frac{P0(i)}{ALR} \right] \right\} + \frac{\Delta t}{2} \left\{ -FV0(i+2) \left[A-B0(i+2) \right] - \right. \\
 & \left. - FV0(i) \left[A-B0(i) \right] \right\} \tag{194}
 \end{aligned}$$

- segundo passo

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \left[A-B2(i) \right] \left[1 + \frac{P2(i)}{ALR} \right] \right\} = \left\{ \left[A-B0(i) \right] \left[1 + \frac{P0(i)}{ALR} \right] \right\} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ V1(i+1) \cdot \right. \\
 & \left. \left[A-B1(i+1) \right] \left[1 + \frac{P1(i+1)}{ALR} \right] - V1(i-1) \left[A-B1(i-1) \right] \left[1 + \frac{P1(i-1)}{ALR} \right] \right\} + \\
 & + \Delta t \left\{ -FV1(i+1) \left[A-B1(i+1) \right] - FV1(i-1) \cdot \left[A-B1(i-1) \right] \right\} \tag{195}
 \end{aligned}$$

Para o meio de vapor, temos:

- primeiro passo

$$(B-30) \quad B1(i+1) = \frac{1}{2} \left[B0(i+2) + B0(i) \right] - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \{ V0(i+2) \cdot B0(i+2) - V0(i) \cdot B0(i) \} + \frac{\Delta t}{2} \{ FV0(i+2) B0(i+2) + FV0(i) B0(i) \} \quad (196)$$

- segundo passo

$$(B-31) \quad B2(i) = B0(i) - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ V1(i+1) \cdot B1(i+1) - V1(i-1) \cdot B1(i-1) \} + \{ FV1(i+1) \cdot B1(i+1) + FV1(i-1) \cdot B1(i-1) \} \quad (197)$$

A equação do movimento fornece:

- primeiro passo

$$(B-35) \{ V1(i+1) [A - B1(i+1)] \left[1 + \frac{P1(i+1)}{ALR} \right] \} = \frac{1}{2} \{ V0(i+2) [A - B0(i+2)] \left[1 + \frac{P0(i+2)}{ALR} \right] + V0(i) [A - B0(i)] \left[1 + \frac{P0(i)}{ALR} \right] \} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \{ [V0(i+2)]^2 [A - B0(i+2)] \left[1 + \frac{P0(i+2)}{ALR} \right] + \frac{P0(i+2)}{\rho_l} - [V0(i)]^2 [A - B0(i)] \left[1 + \frac{P0(i)}{ALR} \right] - \frac{P0(i)}{\rho_l} \} + \frac{\Delta t}{2} \{ [+ FV0(i+2) \cdot V0(i+2) - \frac{f}{2D} V0(i+2) |V0(i+2)| - g STG(i+2)] + [FV0(i) \cdot V0(i) - \frac{f}{2D} V0(i) |V0(i)| - g STG(i)] \} \quad (198)$$

- segundo passo

$$\begin{aligned}
 (B-36) \{V_2(i) [A-B_2(i)] \left[1 + \frac{P_2(i)}{ALR} \right] \} &= \{V_0(i) [A-B_0(i)] \left[1 + \frac{P_0(i)}{ALR} \right] \} - \\
 - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ [V_1(i+1)]^2 [A-B_1(i+1)] \left[1 + \frac{P_1(i+1)}{ALR} \right] &+ \frac{P_1(i+1)}{\rho_L} - \\
 - [V_1(i-1)]^2 [A-B_1(i-1)] \left[1 + \frac{P_1(i-1)}{ALR} \right] - \frac{P_1(i-1)}{\rho_L} \} &+ \Delta t \{ FV_1(i+1) \cdot \\
 \cdot V_1(i+1) - \frac{f}{2D} V_1(i+1) |V_1(i+1)| - g \text{STG}(i+1) \} [A-B_1(i+1)] &+ \\
 + \left[FV_1(i-1) \cdot V_1(i-1) - \frac{f}{2D} V_1(i-1) |V_1(i-1)| - g \text{STG}(i-1) \right] [A-B_1(i-1)] \} &
 \end{aligned}$$

(199)

Onde:

$P_0(i)$ = pressão no ponto i , no instante t

$P_1(i)$ = pressão no ponto i , no instante $t + \Delta t$

$P_2(i)$ = pressão no ponto i , no instante $t + 2\Delta t$

$\beta = B$, volume relativo de vapor

V = velocidade.

$A = (1-\alpha)$

$ALR = a^2 \cdot \rho_L$

$ALF = A \cdot \rho_L$

$\text{STG}(i) = \frac{\text{sen } \theta(i)}{a^2 \cdot \rho_L \cdot \Delta t}$

$ARL = \frac{2 \cdot \Delta x}{a^2 \cdot \rho_L \cdot \Delta t}$

$FV = F_v$

(200)

Os valores de V_1 , B_1 , P_1 , calculados no primeiro passo, instante $t + \Delta t$ do transitório, são apenas valores de apoio nos cálculos de V_2 , B_2 e P_2 , que, efetivamente são os valores característicos do transitório no instante $t + 2\Delta t$.

De forma semelhante ao método das características, os cálculos iniciam-se com o conhecimento prévio das condições de escoamento no instante $t = 0$, regime permanente no nosso caso, onde as variáveis indexadas assumem o dígito 0, i.é, $V_0(i)$, $P_0(i)$, $B_0(i)$, etc., calculando-se a seguir as variáveis no instante $t + \Delta t$, dígito 1, $P_1(i)$, $V_1(i)$, $B_1(i)$, que servirão de ponte para a determinação dos valores de pressões, velocidades, etc., no instante $t + 2\Delta t$, dígito 2, $P_2(i)$, $V_2(i)$, etc.

Ao final da sequência de cálculo, substituímos os valores caracterizados pelo dígito 0 por aqueles de dígito 2, prosseguindo nos cálculos, agora com P_2 calculado no instante $t + 4\Delta t$.

A tabela 10 apresenta a listagem dos valores emitidos pelo computador para a solução do problema proposto no capítulo anterior, linha curta.

Verifica-se que os valores de cargas máximas são compatíveis com aqueles obtidos pelo método das características, porém uma análise dos valores de vazão a cada instante indica variações sensíveis.

Uma análise do equacionamento indica que os valores numéricos operados durante os cálculos caracterizam-se por serem, ou muito pequenos, ex. $P(i)/ALR$ ou muito grandes, ALR . Ao realizar o produto destes valores temos uma consequente perda de precisão, mais sensivelmente detectada no cálculo das velocidades, ou vazões.

Uma nova abordagem do assunto exigirá o estudo de métodos que permitam contornar tais imprecisões.

A, XL, D, F, HRZ .120E+04 .600E+03 .500E+00 .180E-01 .150E+03
 HVAL, GA, CDA, TF, EMW .143E+03 .477E+00 .900E-02 .210E+01 .150E+01
 G, TMAX, DT, B, N, IPR, ROL= .981E+01 .570E+01 .500E-01 .180E-01 10 .100E+04

ARC(1)= .33E-01 .33E-01 .67E-01 .50E-01 0. .17E-01 .33E-01 .50E-01 .63E-01 .24E+00 0.

CARGAS E VAZÕES AO LONGO DA TUBULACAO

TEMPO X/L=	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.	TAU
0.000 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	144.79	144.14	143.49	1.000
0.000 Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477
0.050 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	144.79	144.14	143.49	0.964
0.050 Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.468
0.100 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	144.79	144.14	143.49	0.929
0.100 Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.470	0.460
0.150 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	145.44	144.79	144.14	143.49	0.895
0.150 Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.470	0.461	0.451
0.200 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	146.09	150.28	155.32	160.76	165.73	0.861
0.200 Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.470	0.461	0.452	0.442	0.827
0.250 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	146.74	150.71	155.74	161.18	166.61	172.01	0.827
0.250 Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.471	0.462	0.452	0.443	0.432	0.794
0.300 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	147.40	151.15	156.17	161.60	167.03	172.87	178.27	0.794
0.300 Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.471	0.462	0.453	0.443	0.433	0.422	0.761
0.350 H=	150.00	149.35	148.70	148.05	151.58	156.59	162.02	167.44	173.28	179.10	184.94	0.761
0.350 Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.471	0.462	0.453	0.443	0.434	0.423	0.412	0.728
0.400 H=	150.00	149.35	148.70	152.02	157.01	162.44	167.85	173.69	179.50	185.75	191.57	0.728
0.400 Q=	0.477	0.477	0.477	0.472	0.463	0.454	0.444	0.434	0.424	0.413	0.402	0.696
0.450 H=	150.00	149.35	152.45	157.44	162.86	168.27	174.10	179.91	186.15	192.36	198.64	0.696
0.450 Q=	0.477	0.477	0.472	0.463	0.454	0.444	0.435	0.424	0.414	0.403	0.391	0.665
0.500 H=	150.00	152.89	157.86	163.28	168.68	174.51	180.31	186.55	192.75	199.40	205.65	0.665
0.500 Q=	0.466	0.472	0.463	0.454	0.445	0.435	0.425	0.414	0.403	0.392	0.380	0.634
0.550 H=	150.00	154.75	163.70	169.10	174.92	180.72	186.95	193.15	199.79	206.39	213.10	0.634
0.550 Q=	0.449	0.458	0.455	0.445	0.435	0.425	0.415	0.404	0.393	0.381	0.369	0.604
0.600 H=	150.00	155.01	165.97	175.33	181.12	187.35	193.54	200.18	206.77	213.82	220.47	0.604
0.600 Q=	0.431	0.440	0.440	0.436	0.425	0.415	0.404	0.393	0.382	0.370	0.357	0.574
0.650 H=	150.00	155.23	166.63	177.97	187.94	193.94	200.57	207.16	214.20	221.16	228.29	0.574
0.650 Q=	0.412	0.422	0.421	0.420	0.415	0.404	0.394	0.382	0.370	0.358	0.346	0.544
0.700 H=	150.00	155.48	167.24	179.04	190.78	200.96	207.54	214.57	221.54	228.96	236.00	0.544
0.700 Q=	0.412	0.422	0.421	0.420	0.415	0.404	0.394	0.382	0.370	0.358	0.346	0.544

Tabela 10 - Listagens dos valores de carga e vazão ao longo da tubulação - método Lax-Wendroff

1.750	H=	150.00	153.43	160.31	167.03	173.68	180.07	186.26	192.91	200.95	209.03	214.43	0.060
	Q=	-0.042	-0.037	-0.035	-0.032	-0.028	-0.022	-0.015	-0.005	0.009	0.024	0.040	
1.800	H=	150.00	153.00	158.90	164.77	170.43	175.94	181.13	186.08	191.41	196.10	203.75	0.054
	Q=	-0.052	-0.047	-0.046	-0.042	-0.038	-0.032	-0.024	-0.015	-0.003	0.014	0.031	
1.850	H=	150.00	152.48	157.46	162.29	167.03	171.49	175.76	179.63	183.23	187.14	192.37	0.041
	Q=	-0.060	-0.056	-0.054	-0.051	-0.046	-0.040	-0.031	-0.022	-0.010	0.004	0.023	
1.900	H=	150.00	151.99	155.86	159.72	163.33	166.85	170.00	172.91	175.36	177.50	179.88	0.029
	Q=	-0.066	-0.063	-0.061	-0.058	-0.053	-0.046	-0.037	-0.027	-0.015	-0.001	0.016	
1.950	H=	150.00	151.40	154.25	156.93	159.54	161.85	164.00	165.73	167.18	168.10	170.58	0.019
	Q=	-0.071	-0.068	-0.067	-0.063	-0.058	-0.050	-0.041	-0.030	-0.018	-0.003	0.010	
2.000	H=	150.00	150.87	152.47	154.08	155.44	156.69	157.59	158.27	158.46	160.26	162.82	0.010
	Q=	-0.073	-0.072	-0.070	-0.066	-0.061	-0.053	-0.043	-0.032	-0.019	-0.007	0.005	
2.050	H=	150.00	150.21	150.70	150.98	151.23	151.17	150.96	150.32	151.35	151.18	154.99	0.004
	Q=	-0.074	-0.074	-0.072	-0.068	-0.062	-0.054	-0.044	-0.032	-0.021	-0.010	0.002	
2.100	H=	150.00	149.63	148.72	147.85	146.71	145.50	143.91	144.04	145.04	146.09	146.84	0.000
	Q=	-0.073	-0.073	-0.071	-0.067	-0.061	-0.053	-0.042	-0.033	-0.023	-0.012	0.000	
2.150	H=	150.00	148.90	146.79	144.46	142.13	139.45	138.58	138.62	138.78	138.70	138.31	0.000
	Q=	-0.069	-0.071	-0.069	-0.064	-0.058	-0.049	-0.041	-0.034	-0.024	-0.013	0.000	
2.200	H=	150.00	148.28	144.64	141.07	137.20	135.21	134.17	133.32	132.28	131.01	130.55	0.000
	Q=	-0.064	-0.066	-0.064	-0.060	-0.053	-0.047	-0.041	-0.033	-0.023	-0.012	0.000	
2.250	H=	150.00	147.48	142.56	137.38	134.15	131.92	129.94	127.83	125.55	124.14	123.70	0.000
	Q=	-0.056	-0.060	-0.057	-0.052	-0.049	-0.044	-0.038	-0.031	-0.020	-0.010	0.000	
2.300	H=	150.00	146.82	140.22	135.64	132.10	128.89	125.37	122.17	119.48	118.24	117.72	0.000
	Q=	-0.045	-0.050	-0.048	-0.044	-0.044	-0.040	-0.034	-0.026	-0.017	-0.009	0.000	
2.350	H=	150.00	145.94	139.90	134.94	130.38	125.76	121.11	117.43	114.86	113.26	112.78	0.000
	Q=	-0.032	-0.039	-0.039	-0.039	-0.038	-0.034	-0.028	-0.021	-0.014	-0.007	0.000	
2.400	H=	150.00	147.15	140.66	134.64	128.60	122.60	117.61	113.81	111.01	109.40	108.91	0.000
	Q=	-0.023	-0.028	-0.030	-0.031	-0.029	-0.025	-0.021	-0.016	-0.011	-0.005	0.000	
2.450	H=	150.00	147.57	141.89	134.32	126.87	120.45	115.30	111.19	108.35	106.56	106.03	0.000
	Q=	-0.015	-0.019	-0.019	-0.020	-0.016	-0.016	-0.013	-0.010	-0.007	-0.004	0.000	
2.500	H=	150.00	147.17	141.23	134.12	126.18	119.56	114.04	109.64	106.74	104.97	104.31	0.000
	Q=	-0.006	-0.011	-0.009	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.005	-0.003	-0.002	0.000	
2.550	H=	150.00	146.49	139.40	133.09	126.81	119.76	114.10	109.58	106.46	104.49	103.91	0.000
	Q=	0.005	-0.001	0.002	0.004	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	
2.600	H=	150.00	145.74	138.35	132.09	126.67	121.35	115.30	110.72	107.33	105.40	104.67	0.000
	Q=	0.019	0.012	0.012	0.013	0.014	0.014	0.010	0.008	0.005	0.002	0.000	
2.650	H=	150.00	146.12	138.43	131.93	126.63	122.21	117.97	113.05	109.66	107.51	106.89	0.000
	Q=	0.031	0.025	0.024	0.023	0.022	0.022	0.019	0.014	0.009	0.005	0.000	
2.700	H=	150.00	146.57	139.70	132.97	127.47	123.25	119.96	116.91	113.23	111.15	110.35	0.000

Tabela 10 - Continuação

3.750	M=	150.00	152.47	157.44	162.25	166.99	171.45	174.57	176.30	177.00	177.32	178.19	0.000
	G=	-0.060	-0.056	-0.054	-0.051	-0.046	-0.039	-0.033	-0.027	-0.020	-0.012	0.000	
3.800	M=	150.00	151.99	155.84	159.69	163.31	166.81	169.96	171.74	172.05	171.29	170.08	0.000
	G=	-0.066	-0.063	-0.061	-0.058	-0.053	-0.046	-0.037	-0.029	-0.020	-0.011	0.000	
3.850	M=	150.00	151.40	154.24	156.90	159.51	161.83	163.98	165.71	166.03	164.81	164.38	0.000
	G=	-0.070	-0.068	-0.066	-0.063	-0.057	-0.050	-0.041	-0.030	-0.020	-0.008	0.000	
3.900	M=	150.00	150.87	152.46	154.07	155.42	156.68	157.58	158.27	158.47	159.13	159.53	0.000
	G=	-0.073	-0.072	-0.070	-0.066	-0.060	-0.053	-0.043	-0.032	-0.019	-0.008	0.000	
3.950	M=	150.00	150.21	150.70	150.98	151.24	151.18	150.98	150.34	151.36	153.19	153.87	0.000
	G=	-0.074	-0.074	-0.072	-0.068	-0.062	-0.054	-0.044	-0.032	-0.021	-0.010	0.000	
4.000	M=	150.00	149.64	148.73	147.87	146.74	145.53	143.94	144.07	145.06	146.11	146.86	0.000
	G=	-0.073	-0.073	-0.071	-0.067	-0.061	-0.052	-0.042	-0.033	-0.023	-0.012	0.000	
4.050	M=	150.00	148.91	146.81	144.49	142.17	139.50	136.63	138.66	138.81	138.73	138.34	0.000
	G=	-0.069	-0.071	-0.069	-0.064	-0.058	-0.049	-0.041	-0.033	-0.024	-0.013	0.000	
4.100	M=	150.00	148.29	144.67	141.11	137.26	135.26	134.22	133.37	132.32	131.05	130.60	0.000
	G=	-0.064	-0.066	-0.064	-0.060	-0.053	-0.047	-0.041	-0.033	-0.023	-0.012	0.000	
4.150	M=	150.00	147.49	142.59	137.43	134.21	131.97	130.00	127.89	125.60	124.19	123.75	0.000
	G=	-0.055	-0.059	-0.057	-0.052	-0.048	-0.044	-0.038	-0.030	-0.020	-0.010	0.000	
4.200	M=	150.00	146.83	140.26	135.69	132.15	128.95	125.64	122.24	119.75	118.31	117.79	0.000
	G=	-0.045	-0.050	-0.048	-0.046	-0.044	-0.040	-0.034	-0.026	-0.017	-0.009	0.000	
4.250	M=	150.00	145.96	139.93	134.98	130.43	125.82	121.19	117.51	114.94	113.35	112.86	0.000
	G=	-0.032	-0.039	-0.039	-0.039	-0.038	-0.034	-0.028	-0.021	-0.014	-0.007	0.000	
4.300	M=	150.00	147.15	140.67	134.67	128.65	122.67	117.69	113.89	111.10	109.50	109.91	0.000
	G=	-0.023	-0.028	-0.030	-0.031	-0.029	-0.025	-0.021	-0.016	-0.011	-0.005	0.000	
4.350	M=	150.00	147.57	141.90	134.34	126.91	120.51	115.37	111.28	108.44	106.66	106.13	0.000
	G=	-0.015	-0.019	-0.019	-0.020	-0.018	-0.016	-0.013	-0.010	-0.007	-0.004	0.000	
4.400	M=	150.00	147.17	141.24	134.13	126.21	119.61	114.11	109.92	106.84	105.08	104.42	0.000
	G=	-0.006	-0.011	-0.009	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.005	-0.003	-0.002	0.000	
4.450	M=	150.00	146.50	139.41	133.11	126.84	119.80	114.16	109.67	106.56	104.60	104.02	0.000
	G=	0.005	-0.001	0.002	0.004	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	
4.500	M=	150.00	145.74	138.36	132.12	126.70	121.39	115.36	110.80	107.42	105.50	104.77	0.000
	G=	0.019	0.012	0.012	0.013	0.014	0.014	0.010	0.007	0.005	0.002	0.000	
4.550	M=	150.00	146.13	138.45	131.96	126.67	122.26	118.03	113.12	109.74	107.60	106.98	0.000
	G=	0.031	0.025	0.024	0.023	0.022	0.021	0.019	0.014	0.009	0.005	0.000	
4.600	M=	150.00	146.58	139.72	133.00	127.52	123.30	120.02	116.97	113.30	111.22	110.93	0.000
	G=	0.042	0.037	0.035	0.032	0.030	0.028	0.025	0.021	0.014	0.007	0.000	
4.650	M=	150.00	147.01	141.13	135.28	129.63	125.27	122.25	120.19	118.45	116.12	115.97	0.000
	G=	0.052	0.047	0.045	0.042	0.039	0.033	0.029	0.025	0.018	0.009	0.000	
4.700	M=	150.00	147.53	142.57	137.76	133.03	128.58	125.45	123.73	123.02	122.69	121.82	0.000

Tabela 10 - Continuação

4.900	H=	150.00	149.79	149.30	149.02	148.76	148.82	149.02	149.65	148.63	146.89	146.12	0.000
	Q=	0.074	0.73	0.071	0.067	0.062	0.054	0.044	0.032	0.021	0.010	0.000	
4.950	H=	150.00	150.36	151.26	152.12	153.25	154.46	156.05	155.92	154.93	153.88	153.13	0.000
	Q=	0.073	0.073	0.071	0.067	0.061	0.052	0.042	0.033	0.023	0.012	0.000	
5.000	H=	150.00	151.09	153.18	155.50	157.82	160.48	161.35	161.32	161.17	161.26	161.64	0.000
	Q=	0.069	0.071	0.069	0.064	0.058	0.049	0.041	0.033	0.024	0.013	0.000	
5.050	H=	150.00	151.70	155.32	158.87	162.72	164.71	165.76	166.61	167.65	168.93	169.38	0.000
	Q=	0.063	0.066	0.064	0.059	0.053	0.047	0.041	0.033	0.023	0.012	0.000	
5.100	H=	150.00	152.50	157.39	162.54	165.77	168.00	169.97	172.08	174.37	175.78	176.22	0.000
	Q=	0.055	0.059	0.057	0.052	0.048	0.044	0.038	0.030	0.020	0.010	0.000	
5.150	H=	150.00	153.16	159.72	164.29	167.82	171.02	174.32	177.73	180.21	181.66	182.18	0.000
	Q=	0.045	0.050	0.048	0.046	0.044	0.040	0.034	0.026	0.017	0.009	0.000	
5.200	H=	150.00	154.00	160.06	165.00	169.54	174.15	178.78	182.45	185.02	186.61	187.10	0.000
	Q=	0.032	0.039	0.039	0.039	0.038	0.034	0.028	0.021	0.014	0.007	0.000	
5.250	H=	150.00	152.85	159.32	165.31	171.33	177.30	182.28	186.07	188.65	190.45	191.04	0.000
	Q=	0.023	0.028	0.030	0.031	0.029	0.025	0.021	0.016	0.011	0.005	0.000	
5.300	H=	150.00	152.43	158.10	163.64	173.07	179.46	184.59	188.68	191.51	193.29	193.81	0.000
	Q=	0.015	0.019	0.019	0.020	0.018	0.016	0.013	0.010	0.007	0.004	0.000	
5.350	H=	150.00	152.82	158.75	165.66	173.77	180.36	185.86	190.03	193.11	194.87	195.53	0.000
	Q=	0.006	0.011	0.009	0.007	0.007	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002	0.000	
5.400	H=	150.00	153.50	160.58	166.88	173.15	180.17	185.80	190.29	193.39	195.35	195.92	0.000
	Q=	-0.005	0.001	-0.002	-0.004	-0.005	-0.003	-0.002	-0.001	-0.001	-0.000	0.000	
5.450	H=	150.00	154.26	161.63	167.87	173.28	178.59	184.60	189.16	192.53	194.45	195.17	0.000
	Q=	-0.019	-0.012	-0.012	-0.013	-0.014	-0.014	-0.010	-0.007	-0.005	-0.002	0.000	
5.500	H=	150.00	153.47	161.55	168.03	173.31	177.71	181.95	186.85	190.22	192.35	192.97	0.000
	Q=	-0.031	-0.025	-0.024	-0.023	-0.022	-0.021	-0.019	-0.014	-0.009	-0.005	0.000	
5.550	H=	150.00	153.42	160.27	166.99	172.46	176.67	179.95	183.00	186.67	188.74	189.54	0.000
	Q=	-0.042	-0.037	-0.035	-0.032	-0.030	-0.028	-0.025	-0.021	-0.014	-0.007	0.000	
5.600	H=	150.00	152.98	158.86	164.71	170.35	174.70	177.73	179.78	181.53	183.85	184.51	0.000
	Q=	-0.052	-0.047	-0.045	-0.042	-0.038	-0.033	-0.029	-0.025	-0.018	-0.009	0.000	
5.650	H=	150.00	152.46	157.42	162.22	166.95	171.40	174.53	176.25	176.96	177.29	178.16	0.000
	Q=	-0.059	-0.056	-0.054	-0.051	-0.046	-0.039	-0.033	-0.027	-0.020	-0.012	0.000	

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO

X/L=	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.
H=	150.00	158.41	174.74	190.46	205.49	219.79	233.31	246.21	258.56	270.12	280.77
Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477

Tabela 10 - Final.

CAPÍTULO VI

SEPARAÇÃO DE COLUNA

MÉTODO DE CÁLCULO

A região separada, será estudada de duas formas distintas, inicialmente apresentaremos o método tradicional de cálculo, proposto por Streeter e Wylie [23,28] em que a região separada é admitida isenta de matéria. A seguir, aplicaremos o método apresentado no capítulo III, para estudar a região de separação computando-se os efeitos de vaporização do líquido presente.

6.1) Separação de coluna. (Streeter-Wylie)

A separação de coluna para os presentes métodos de cálculo é feita, conforme já frisado, admitindo-se ausência de matéria na região separada e como uma condição de contorno interna do problema, método este proposto por Streeter e Wylie [23], método chamado vapor-líquido.

Com este método as condições de vazão e carga na região separada, tanto quanto o volume da cavidade formada são calculados, admitida celeridade constante, em função das diferentes velocidades que ocorrem nos dois sentidos possíveis da secção de cálculo. O volume da cavidade é determinada admitindo-se que na região submetida à pressão de vapor não ocorra escoamento líquido. Tais hipóteses simplificadoras implicam em resultados conservadores, i.é., muito acima do real. Tal esquema de cálculo apresenta bons resultados para casos em que a posição da cavidade é perfeitamente definida, pelo menos para o primeiro fechamento de cavidade.

A rotina para cálculo das condições de separação de coluna pelo método em questão pode ser encontrada nas referências -

|28,9|, já codificadas para uso em computador digital.

O procedimento a ser tomado para a obtenção desta rotina será agora por nós exposto,

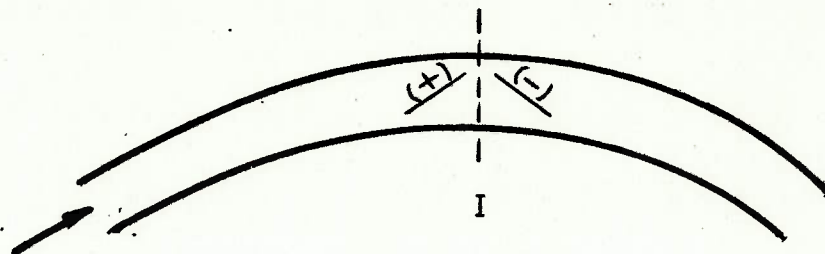


Fig.21 - Separação de coluna.

Admitida a seção I da fig. 21 como aquela em que irá ocorrer a separação de coluna, a aplicação do método das características nos permite calcular as condições em I a partir das retas (+) e (-) da figura (ver apêndice A).

De (138) calculamos a carga de pressão de vapor do líquido à temperatura de trabalho. Caso a carga for maior que a de vapor, os cálculos prosseguem normalmente seguindo o parágrafo 3.1.a)b); caso contrário, admitida carga constante e igual à de vapor do líquido, definimos duas velocidades distintas na seção QPP e QP, calculadas respectivamente por (139) e (140).

O volume da cavidade é então calculado pela diferença entre a vazão que adentra a seção e aquela que sai da mesma no intervalo de tempo Δt , somada algebricamente ao volume da cavidade existente no tempo anterior de cálculo.

$$V(i,t) = V(i,t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2} \{ QP(i,t) + QP(i,t-\Delta t) - [QPP(i,t) + QPP(i,t-\Delta t)] \} \quad (201)$$

Ao desaparecer a cavidade devido à onda de sobre pressão refletida num ponto extremo da tubulação, i.é, quando $V(i,t) = 0$, o cálculo da carga na seção é feito por (138)

$$HP(i,t) = \frac{a}{2g A} \Delta Q \tag{202}$$

Verifica-se do esquema de cálculo proposto para separação de coluna, que efetivamente pouca importância têm para os resultados finais, os mecanismos de troca de calor, variação de volume de bolha de gás presente, etc., levando-se inevitavelmente a valores irrealis. A vantagem de tal método restringe-se à sua simplicidade e facilidade de aplicação, conforme diagrama de blocos abaixo,

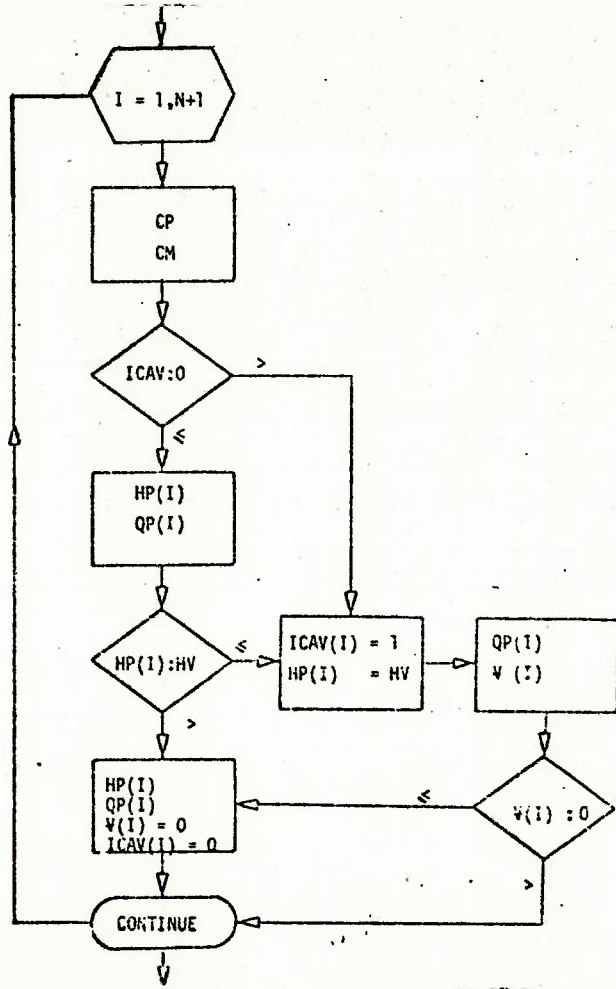


Fig. 22 - Diagrama de blocos para cálculo durante separação de coluna.

Alterando o perfil da linha e reduzindo a carga no reservatório para HR = 65m, temos o aparecimento de separação de coluna para o problema do capítulo IV.

6.1.1) Resultados Numéricos

As figuras seguintes, 23 a 28, nos apresentam o comportamento das várias secções do conduto submetidos à pressão de vapor em tempos característicos de interesse.

Inicialmente temos o desenvolvimento do transitório a partir do regime permanente, com o crescimento das cargas ao longo da linha, seguido da queda destas mesmas cargas, até o instante $t = 2,50$ s em que ocorre o início da separação de coluna.

A partir deste instante temos as figuras, compostas por cargas e volumes de cavidade em vários intervalos de tempo.

Assim, verificamos inicialmente que a separação de coluna acontece em vários pontos da linha, e o volume das cavidades passa então a crescer. Em alguns pontos, verifica-se que o tempo de vida da cavidade é pequeno podendo-se observar as consequências do fechamento da cavidade nos gráficos de carga para os mesmos instantes de cálculo.

Após alguns instantes, resta apenas a cavidade do ponto mais alto da linha, se desenvolvendo. O volume desta cavidade atinge o seu valor máximo em $t = 3,15$ s, para então iniciar o fechamento, em função das vazões e cargas que ocorrem nos pontos vizinhos, ocorrência que pode ser acompanhada na tabela

As curvas das figuras 26 a 28 apresentam o comportamento do volume da cavidade e das cargas nas secções do conduto nos instantes que antecedem o fechamento da cavidade.

Verifica-se que as reduções contínuas de volume da cavidade no ponto alto da linha gera situações que permitem o aparecimento de cavidades nos pontos próximos que caracterizam-se por uma vida curta e provocam, quando de seu desaparecimento, gradientes de pressão que tendem a acelerar o processo de desaparecimento das cavidades circundantes.

Ao tempo de $4,35$ s, acontece o desaparecimento da cavidade no ponto alto, podendo-se verificar que ao longo de toda a linha as pressões estão acima da pressão de vapor notando-se no ponto alto o aumento brusco de pressão, gerando um gradiente de $919,0 \text{ N/m}^2 \cdot \text{s}$

Este pico de pressão acaba por provocar, no final da linha uma redução de pressão que induz o aparecimento de uma cavidade de vida curta, $0,05$ s e cujo fechamento gera um gradiente de pressão de $2721,2 \text{ N/s} \cdot \text{m}^2$.

A partir deste instante, as cargas apresentam um comportamento crescente, porém seus valores não atingem os máximos alcançados durante o processo de fechamento da válvula, evidenciando-se o amortecimento das frentes de onda perturbadas.

O fenômeno de reflexão de ondas torna-se a repetir levando a novas situações de separação de coluna, particularmente no ponto alto do conduto, gerando, porém, cavidades menores e, após o fechamento das cavidades, os valores máximos de pressões ou cargas assumem valores menores.

Verifica-se que, a cada ciclo a atenuação gerada pela dissipação de energia no conduto provoca oscilações mais próximas do ponto de equilíbrio, que corresponde a carga constante e igual à do reservatório em toda a linha, para enfim, cessar o transitório.

Os ciclos posteriores ao desaparecimento das cavidades em $t = 4,45$ s não são apresentados.

As tabelas 12 e 13 apresentam os resultados numéricos - para o mesmo problema citado, considerando-se agora $\alpha = 0,1\% \rightarrow a = 1000$ m/s e $\alpha = 1,44\% \rightarrow a = 400$ m/s, para o primeiro ciclo de separação de coluna na linha, como também os valores máximos.

De importante, além do maior tempo de vida das cavidades para celeridade decrescente, o que implica em maior volume destas cavidades, verificamos que o valor máximo ocorrido para transitório em meio com $\alpha = 1,44\%$ não acontece durante o fechamento da válvula como nos casos anteriores. Neste caso o valor máximo de carga nos pontos próximos ao ponto alto aparecem como consequência do fechamento da cavidade no mesmo, durante o primeiro ciclo de separação

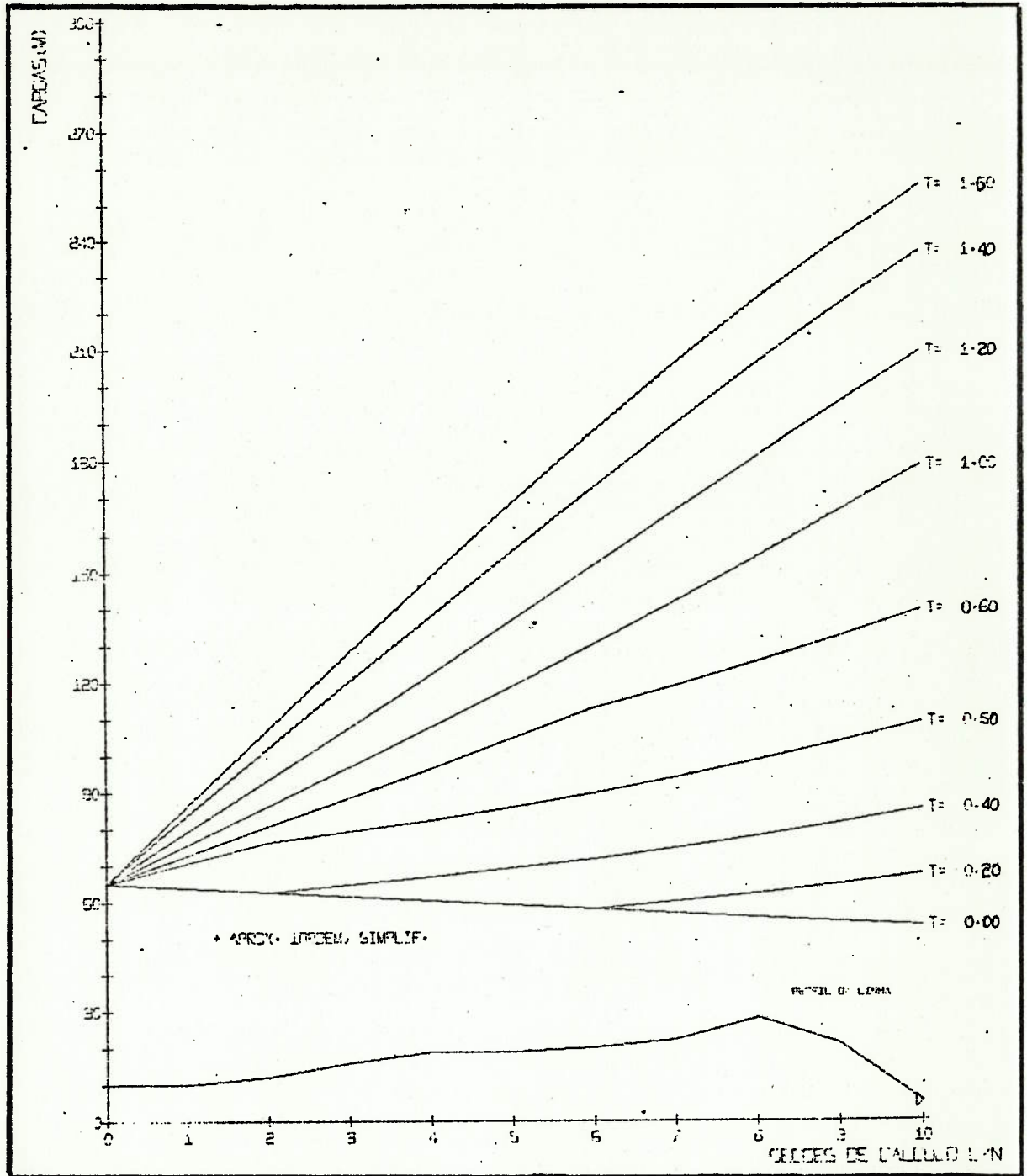


Fig.23 - Cargas ao longo da tubulação - separação

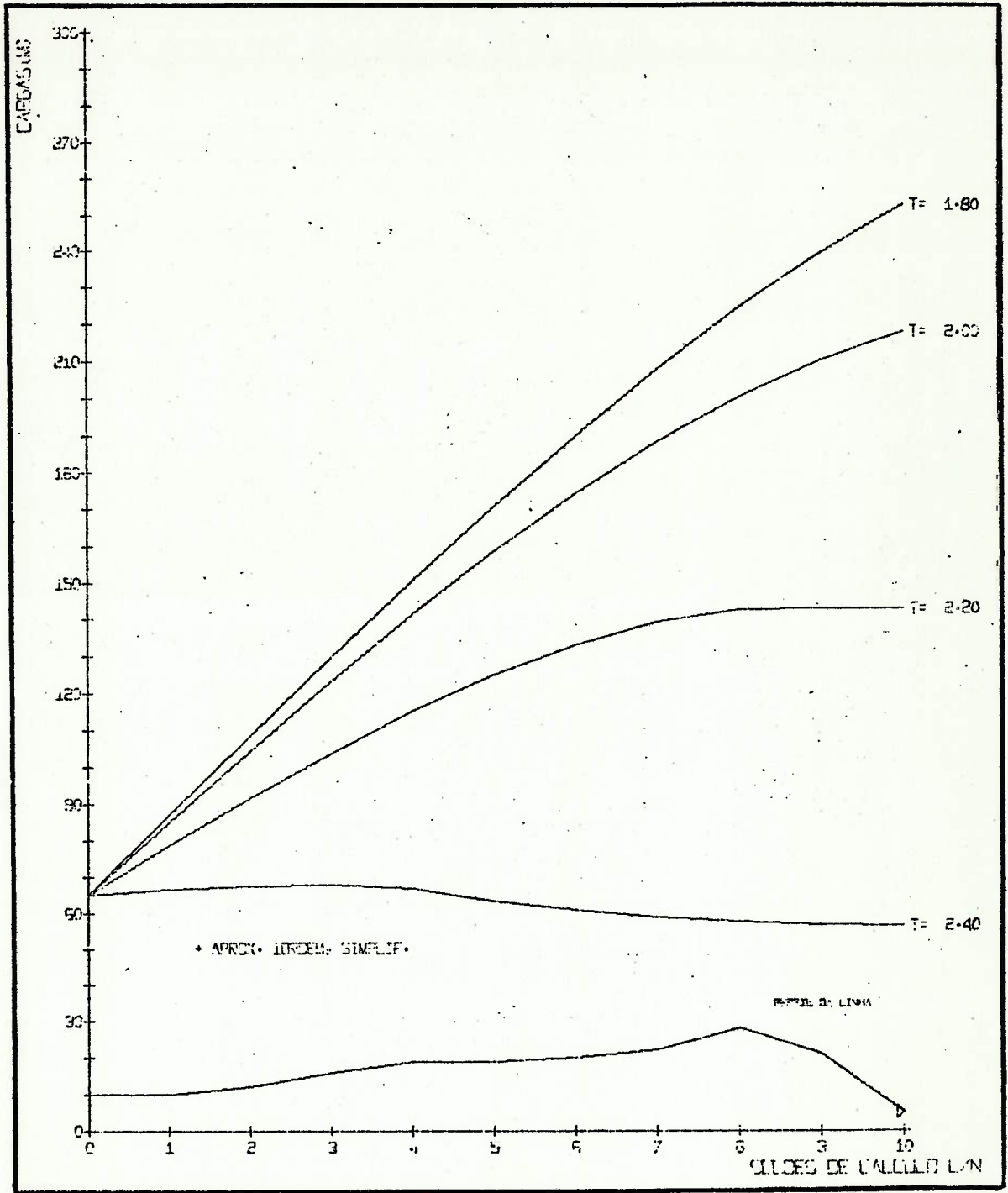


Fig. 23 - continuação

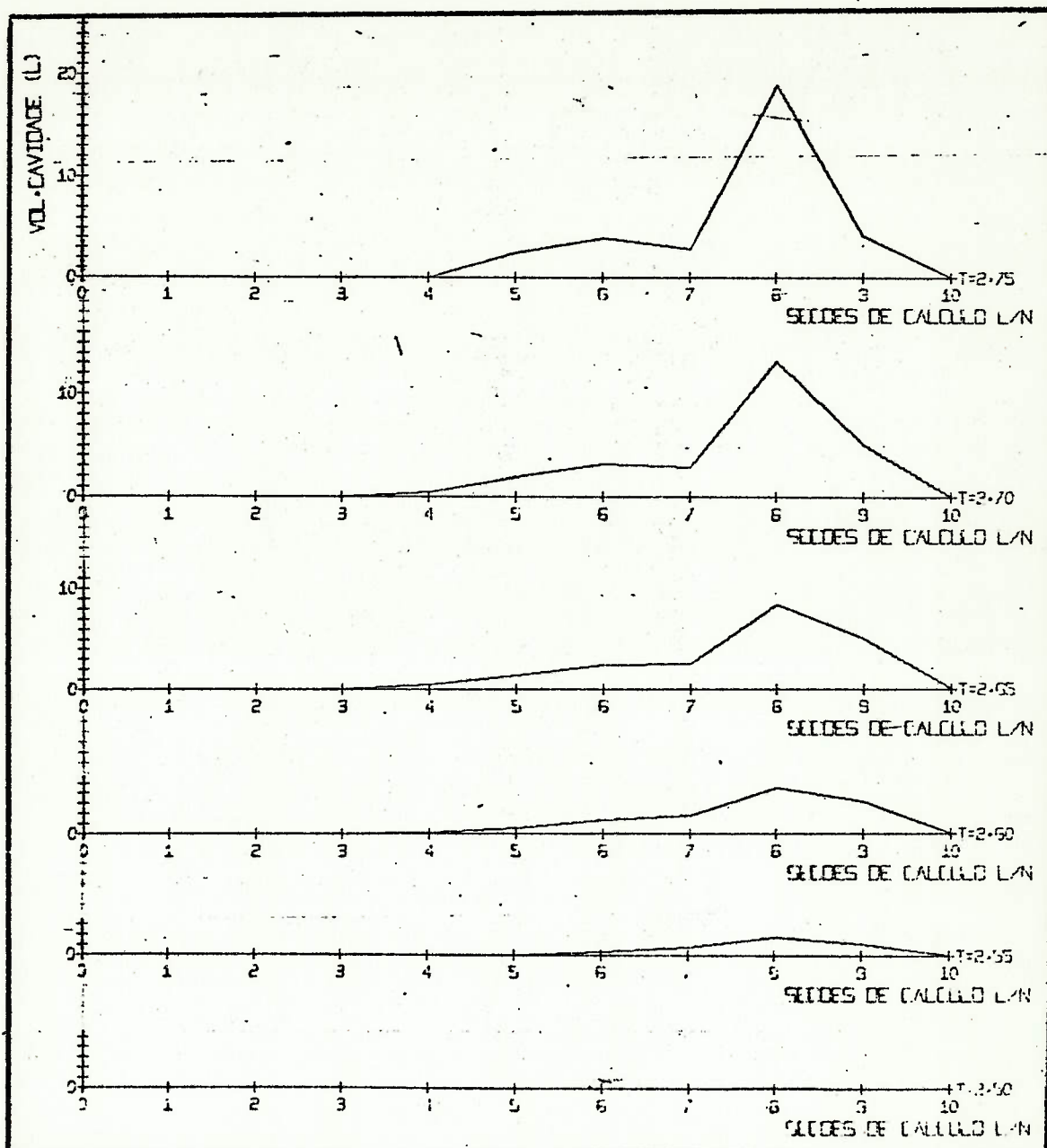


Fig. 24 - Volume da cavidade durante separação de coluna
(início do fenômeno)

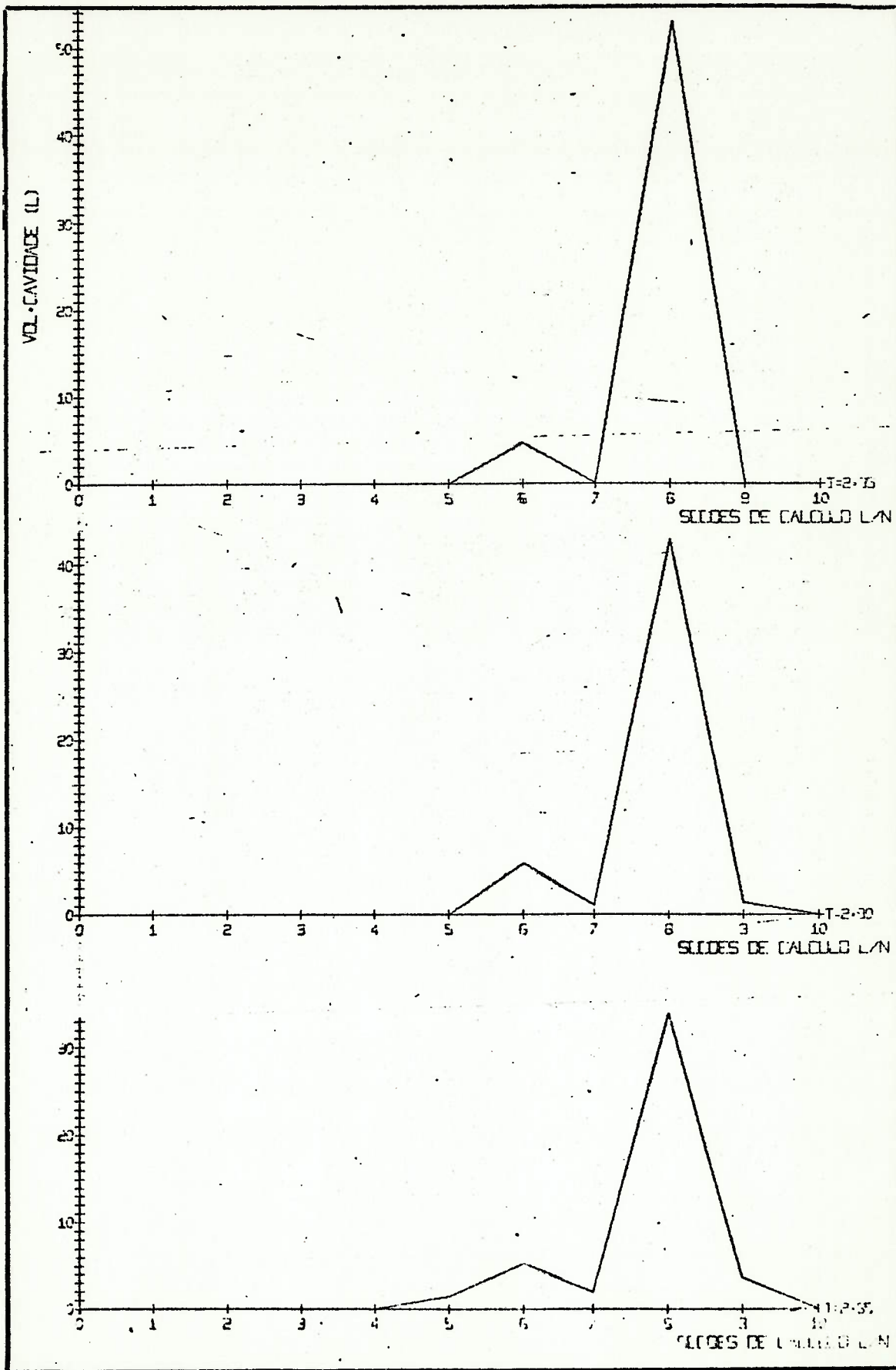


Fig. 24 - continuação.

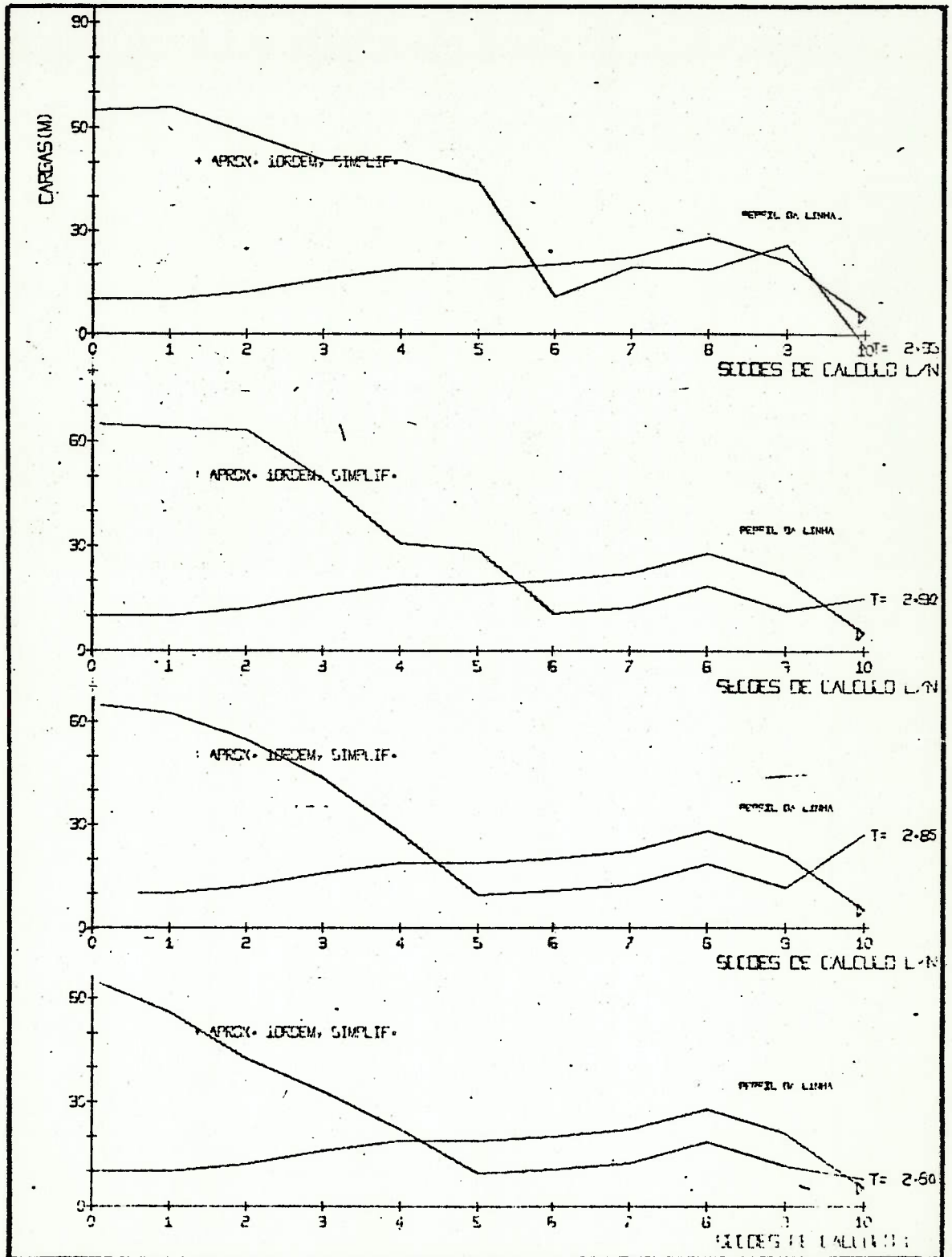


Fig. 25 - Cargas ao longo da tubulação durante início de separação de coluna.

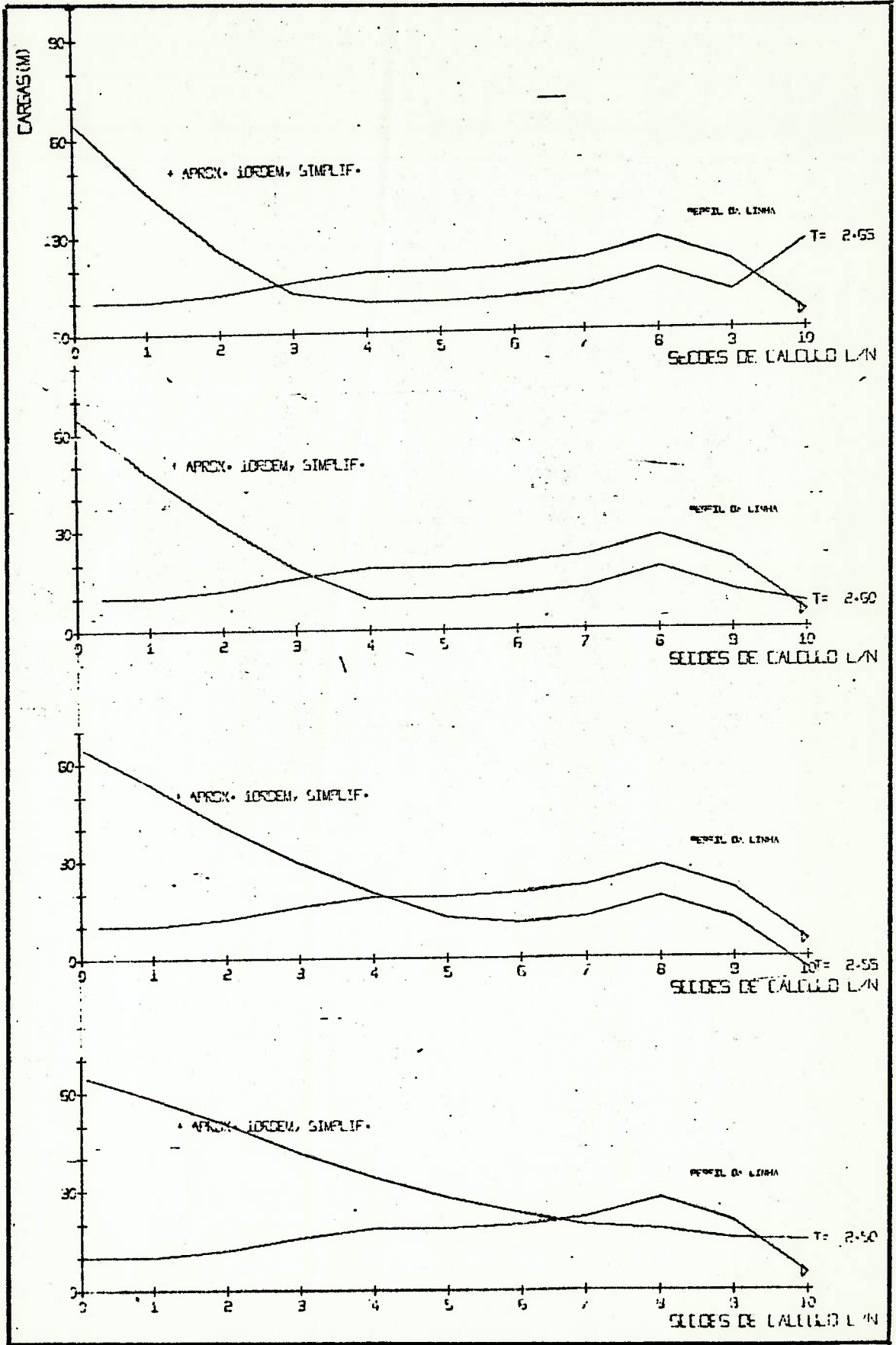


Fig. 25 - continuação

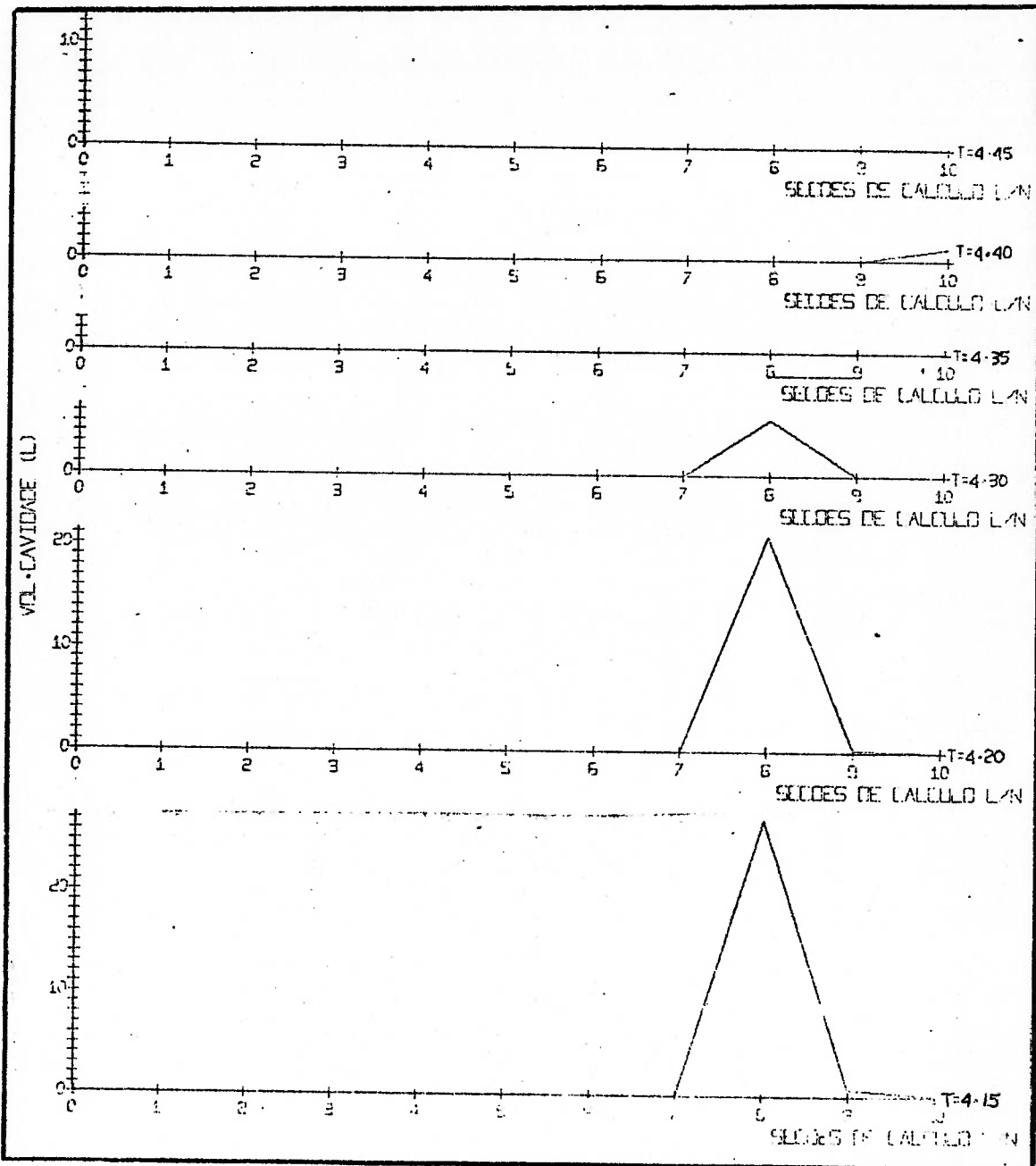


Fig. 26 - Volume da cavidade durante separação de coluna (final do fenômeno)

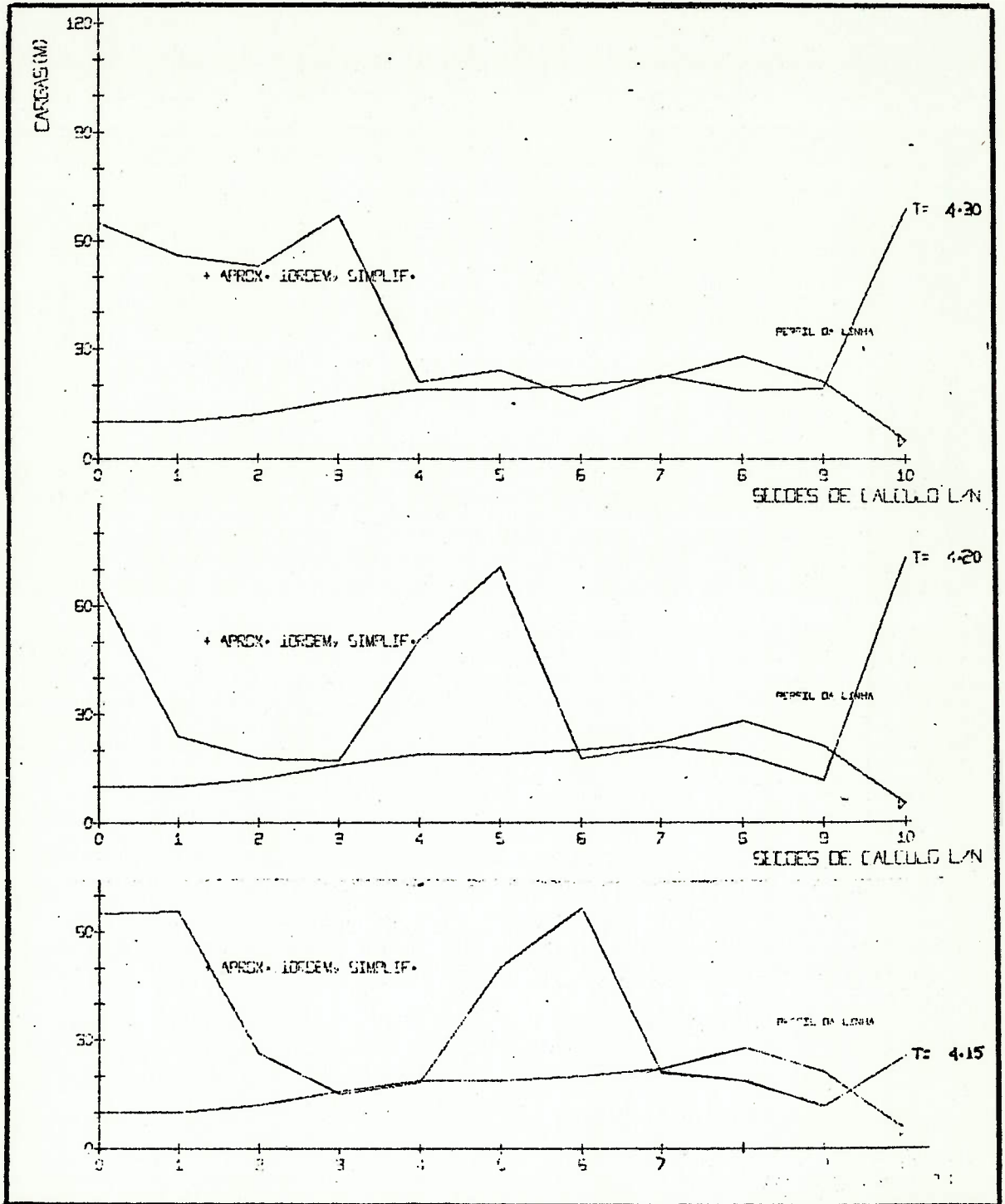


Fig. 27 - Cargas ao longo da tubulação durante o fechamento da cavidade.

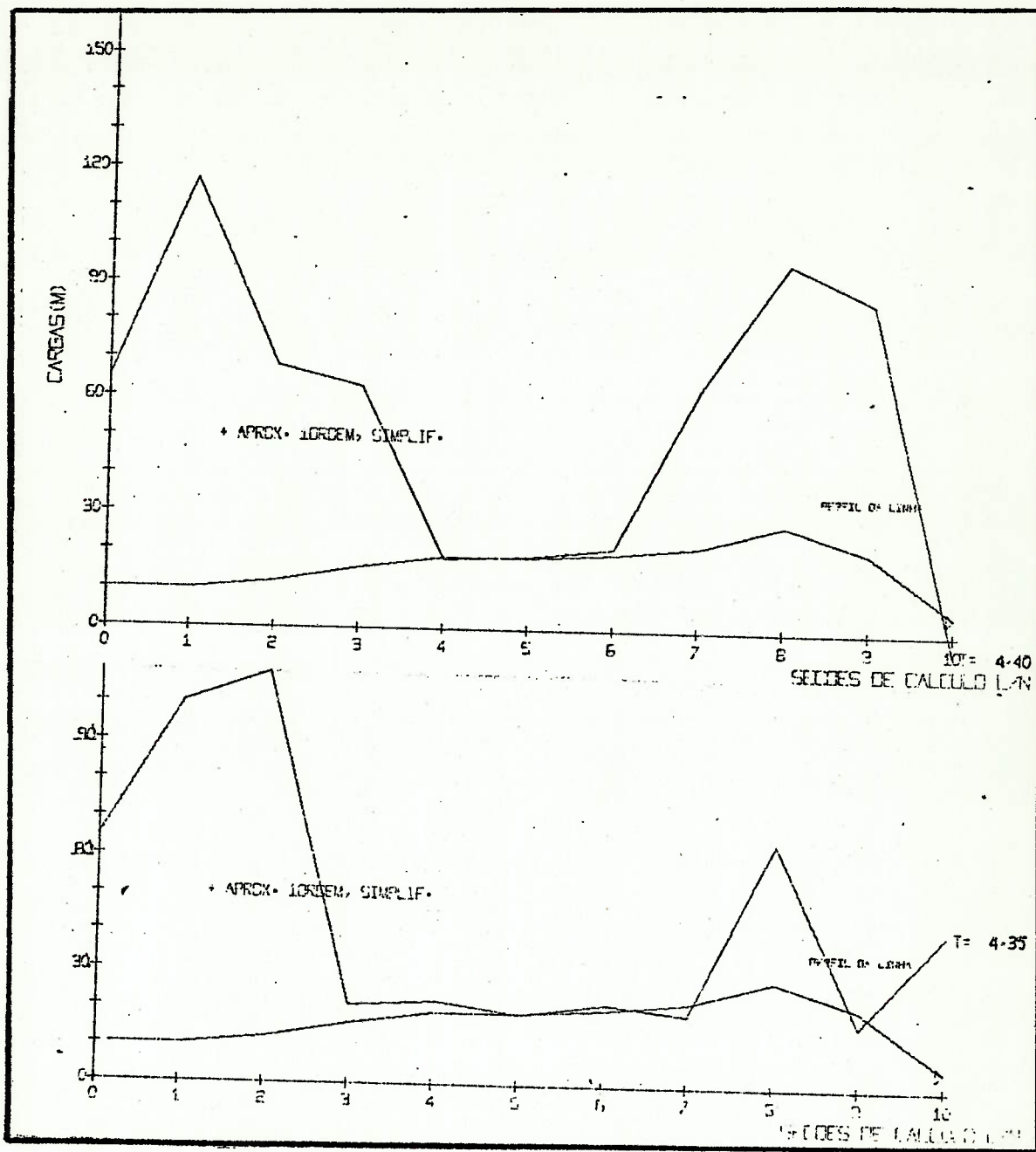


Fig. 27 - continuação

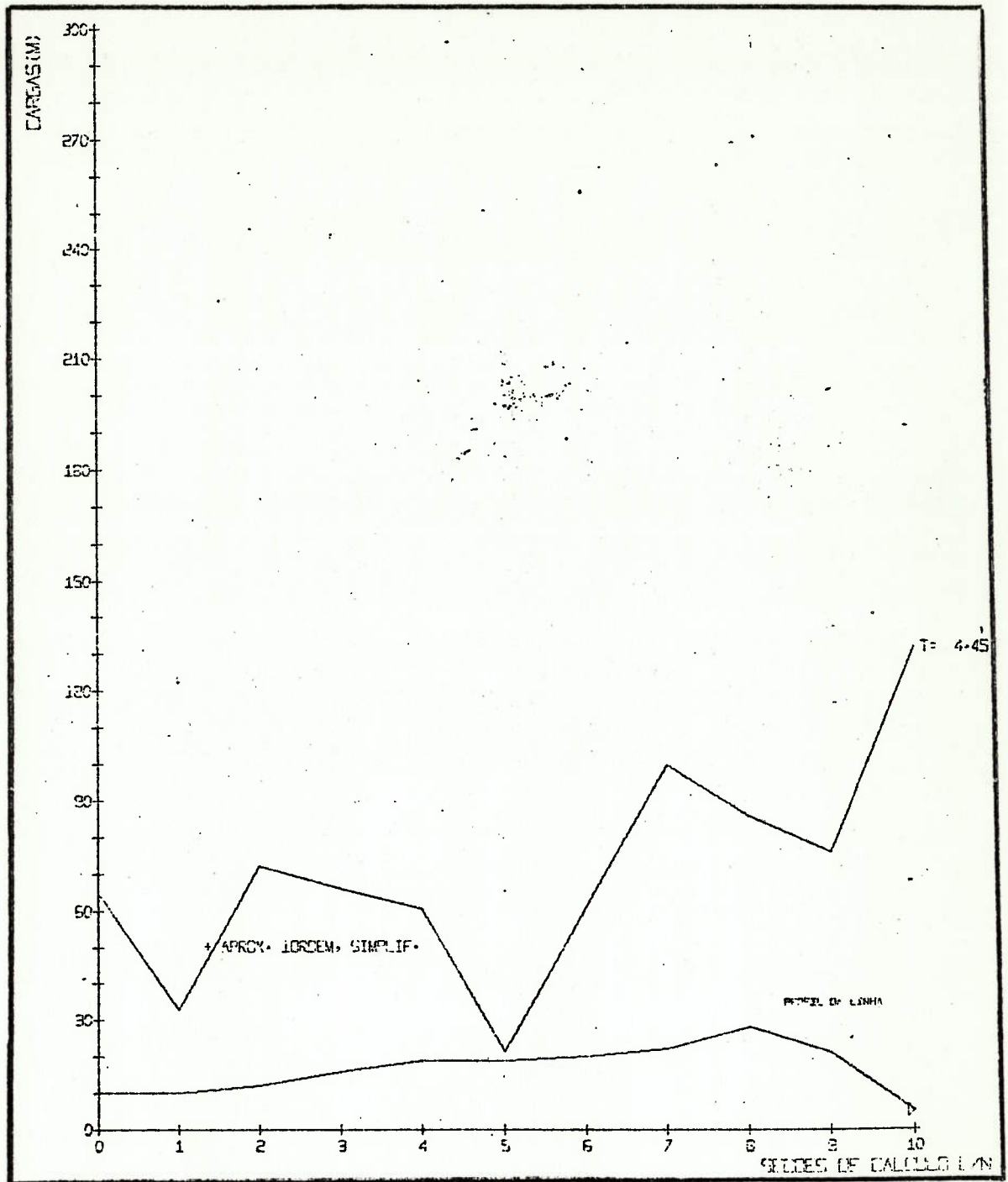


Fig. 28 - Cargas ao longo da tubulação, cavidade fechada.

2.350	M=	65.00	69.99	74.98	78.97	80.93	81.84	80.02	78.85	78.06	77.60	77.45	0.000
	C=	-0.235	-0.222	-0.224	-0.210	-0.191	-0.166	-0.135	-0.102	-0.069	-0.034	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	P=	55.00	59.99	62.98	62.91	61.93	62.84	60.02	56.85	50.06	56.60	72.45	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
2.400	M=	65.00	66.38	67.27	67.59	66.27	62.93	60.36	56.45	57.13	56.36	56.11	0.000
	C=	-0.230	-0.227	-0.227	-0.212	-0.191	-0.162	-0.132	-0.100	-0.067	-0.034	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	P=	55.00	56.38	55.27	51.59	47.27	43.93	40.36	36.45	29.13	35.36	51.11	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
2.450	M=	65.00	62.28	59.44	55.35	49.62	45.01	41.38	39.66	36.76	35.65	35.27	0.000
	C=	-0.239	-0.235	-0.205	-0.208	-0.183	-0.158	-0.127	-0.097	-0.065	-0.033	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	P=	55.00	52.28	47.44	39.35	30.92	26.01	21.38	16.66	8.76	14.65	30.27	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
2.500	M=	65.00	58.07	50.38	41.69	34.12	28.10	23.34	19.72	18.50	15.68	15.19	0.000
	C=	-0.231	-0.227	-0.216	-0.174	-0.149	-0.124	-0.107	-0.074	-0.027	-0.031	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	P=	55.00	48.07	38.38	25.49	15.12	9.10	3.34	-2.28	-9.50	-5.32	10.19	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
2.550	M=	65.00	53.11	40.15	29.18	20.00	12.47	10.50	12.50	18.50	11.50	-3.91	0.000
	C=	-0.216	-0.211	-0.198	-0.182	-0.162	-0.139	-0.107	-0.074	-0.027	-0.036	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000
	P=	55.00	43.11	28.15	13.18	1.00	-6.53	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-8.91	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
2.600	M=	65.00	47.08	31.92	18.67	9.50	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	7.81	0.000
	C=	-0.192	-0.187	-0.177	-0.164	-0.144	-0.122	-0.107	-0.100	-0.038	0.025	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.005	0.003	0.000	0.000
	P=	55.00	37.08	19.92	2.67	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	2.81	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
2.650	M=	65.00	43.62	25.61	12.25	9.50	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	26.00	0.000
	C=	-0.158	-0.156	-0.152	-0.145	-0.145	-0.137	-0.114	-0.093	-0.004	0.006	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.008	0.005	0.000	0.000
	P=	55.00	33.62	13.61	-3.75	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	21.50	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
2.700	M=	65.00	43.53	24.16	16.45	9.50	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	15.19	0.000
	C=	-0.124	-0.123	-0.126	-0.138	-0.143	-0.125	-0.114	-0.119	-0.015	-0.025	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.003	0.013	0.005	0.000	0.000
	P=	55.00	33.53	12.16	0.45	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	10.19	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
2.750	M=	65.00	45.34	34.36	21.40	15.13	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	-3.90	0.000
	C=	-0.099	-0.092	-0.109	-0.122	-0.135	-0.140	-0.120	-0.113	0.018	-0.006	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.004	0.003	0.019	0.004	0.000	0.000
	P=	55.00	35.34	22.36	5.40	-3.87	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-8.90	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
2.800	M=	65.00	55.62	42.57	33.03	22.19	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	7.81	0.000
	C=	-0.060	-0.074	-0.106	-0.106	-0.123	-0.128	-0.120	-0.138	0.007	0.023	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.005	0.003	0.026	0.004	0.000	0.000
	P=	55.00	45.62	30.57	17.03	3.19	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	2.81	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000

Tabela 11 - Listagem dos valores de carga, vazão, pressão e volume da cavidade ao longo da tubulação ($\alpha = 0,01\%$)

2.650	M=	65.30	54.48	43.35	27.40	9.50	10.50	12.50	16.50	11.50	26.90	0.000
	C=	-0.059	-0.072	-0.089	0.097	-0.143	-0.126	-0.132	0.040	0.066	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.001	0.005	0.002	0.034	0.004	0.000	
	P=	55.30	42.48	27.35	8.40	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	21.90	
	IC=	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	
2.900	M=	65.30	63.00	48.84	30.66	28.96	10.50	12.50	16.50	11.50	15.19	0.000
	C=	-0.052	-0.057	-0.063	-0.068	-0.100	-0.126	-0.158	0.030	-0.025	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.001	0.043	0.001	0.000	
	P=	55.30	51.00	32.84	11.66	9.96	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	10.19	
	IC=	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	
2.950	M=	65.30	58.02	50.30	50.39	44.35	10.50	19.20	18.50	26.05	-3.90	0.000
	C=	-0.055	-0.053	-0.037	-0.065	-0.090	-0.133	-0.140	0.063	0.017	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.053	0.000	0.000	
	P=	55.30	55.77	46.02	31.39	25.35	-9.50	-2.80	-9.50	5.05	-6.90	
	IC=	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
3.000	M=	65.30	53.08	59.56	63.98	31.94	10.50	25.25	18.50	26.90	36.92	0.000
	C=	-0.054	-0.052	-0.021	-0.059	-0.036	-0.154	-0.156	0.005	0.049	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.062	0.000	0.000	
	P=	55.30	41.08	43.56	44.98	12.94	-9.50	3.25	-9.50	5.90	31.92	
	IC=	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
3.050	M=	65.30	60.90	66.76	41.11	30.14	66.05	12.50	18.50	29.36	57.70	0.000
	C=	-0.037	-0.034	-0.054	-0.021	-0.004	-0.021	-0.148	0.036	-0.012	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.070	0.000	0.000	
	P=	55.30	48.90	50.76	22.11	11.14	46.05	-9.50	-9.50	8.36	52.70	
	IC=	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
3.100	M=	65.30	65.98	42.45	32.92	75.21	68.11	59.28	18.50	49.29	21.81	0.000
	C=	-0.013	-0.039	-0.019	0.000	-0.076	-0.056	-0.080	-0.030	-0.013	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.078	0.000	0.000	
	P=	55.30	53.98	26.45	13.92	56.21	48.01	37.28	-9.50	28.29	16.81	
	IC=	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
3.150	M=	65.30	78.07	49.09	76.55	71.58	68.44	72.09	18.50	11.50	40.89	0.000
	C=	-0.042	-0.035	-0.010	-0.074	-0.062	-0.065	-0.072	-0.063	-0.017	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.080	0.000	0.000	
	P=	55.30	68.07	38.09	57.55	52.58	48.44	50.09	-9.50	-9.50	35.89	
	IC=	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
3.200	M=	65.30	48.55	82.18	70.80	69.78	74.85	27.67	18.50	11.50	1.19	0.000
	C=	-0.057	0.012	0.019	-0.063	-0.063	-0.067	0.001	-0.007	-0.047	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.078	0.000	0.000	
	P=	55.30	38.55	66.18	51.80	50.78	54.65	5.67	-9.50	-9.50	-3.81	
	IC=	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
3.250	M=	65.30	31.17	80.63	75.42	74.08	29.01	21.28	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	0.017	-0.003	-0.067	-0.054	-0.068	0.003	0.019	-0.040	0.017	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.076	0.001	0.000	
	P=	55.30	21.17	68.63	67.49	55.08	9.01	-0.72	-9.50	-9.50	0.001	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
3.300	M=	65.30	99.07	69.82	86.76	34.65	20.51	19.65	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	0.051	-0.037	-0.065	-0.056	0.012	0.017	0.017	0.015	0.004	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.075	0.002	0.000	
	P=	55.30	89.07	57.82	57.87	67.76	0.51	-2.15	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	

Tabela 11 - continuação

3.350	M=	65.30	103.64	92.31	73.09	33.11	33.19	25.48	17.73	18.50	11.50	14.12	0.000
	C=	-0.092	-0.011	-0.027	-0.070	0.009	0.038	0.026	0.022	-0.018	0.068	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.074	0.004	0.000	
	Pa	55.30	93.64	80.31	57.09	14.11	14.19	5.48	-4.27	-9.50	-9.50	9.12	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
3.400	M=	65.30	58.25	106.91	51.55	19.53	23.94	30.41	24.14	18.50	11.50	53.79	0.000
	C=	-0.073	-0.081	-0.016	0.039	0.016	0.024	0.042	0.029	0.038	-0.004	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.073	0.005	0.000	
	Pa	55.30	48.25	94.91	35.55	0.53	4.94	10.41	2.14	-9.50	-9.50	46.79	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
3.450	M=	65.30	68.28	17.50	53.35	42.38	16.76	22.60	31.18	18.50	11.50	8.88	0.000
	C=	-0.070	-0.078	-0.016	0.070	0.054	0.020	0.026	0.041	0.005	-0.068	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.073	0.002	0.000	
	Pa	55.30	58.28	5.50	37.35	23.38	-2.24	2.60	9.18	-9.50	-9.50	3.88	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
3.500	M=	65.30	24.26	14.73	8.34	50.57	41.03	17.53	16.96	18.50	15.10	-4.50	0.000
	C=	-0.033	-0.005	0.008	-0.001	0.075	0.056	0.019	0.035	0.060	0.010	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.072	0.000	0.001	
	Pa	55.30	14.26	2.73	-7.66	31.57	22.03	-2.47	-5.04	-9.50	-5.90	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
3.550	M=	65.30	11.47	15.10	11.96	9.50	51.33	35.40	12.50	18.50	38.92	-4.50	0.000
	C=	0.030	0.003	0.010	0.013	0.005	0.073	0.065	0.052	0.015	0.028	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.071	0.000	0.001	
	Pa	55.30	1.47	3.10	-4.04	-9.50	32.33	15.40	-9.50	-9.50	17.92	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	
3.600	M=	65.30	55.63	8.69	16.26	9.50	9.50	46.29	36.93	18.50	11.50	56.06	0.000
	C=	0.039	0.075	0.000	0.008	0.006	0.023	0.081	0.062	-0.005	0.007	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.070	0.001	0.000	
	Pa	55.30	45.63	-3.31	0.26	-9.50	-9.50	26.29	14.93	-9.50	-9.50	51.06	
	IC=	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	
3.650	M=	65.30	62.22	56.99	6.50	13.75	9.50	11.04	44.64	18.50	11.50	53.31	0.000
	C=	0.090	0.093	0.073	0.012	0.012	0.022	0.021	0.084	0.038	-0.072	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.067	0.000	0.000	
	Pa	55.30	52.22	44.99	-9.50	-5.25	-9.50	-8.96	22.64	-9.50	-9.50	46.31	
	IC=	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	
3.700	M=	65.30	66.15	60.01	54.47	9.73	9.50	10.50	12.50	18.50	47.71	-4.50	0.000
	C=	0.098	0.088	0.097	0.077	0.007	0.018	0.029	0.082	0.017	-0.009	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.063	0.000	0.001	
	Pa	55.30	56.15	48.01	38.47	-9.27	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	26.71	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	
3.750	M=	65.30	62.79	63.63	62.96	50.22	9.50	10.50	12.50	18.50	26.63	-4.50	0.000
	Ca	0.036	0.101	0.092	0.092	0.064	0.019	0.015	0.116	-0.056	0.004	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.005	0.057	0.000	0.000	
	Pa	55.30	52.79	51.63	46.96	31.22	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	5.63	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	
3.800	M=	65.30	62.48	65.74	59.37	62.72	51.36	10.50	12.50	18.50	11.50	29.22	0.000
	Ca	0.135	0.090	0.096	0.099	0.092	0.082	0.023	0.063	-0.009	0.100	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.051	0.004	0.000	
	Pa	55.30	52.48	53.74	43.37	43.72	32.36	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	24.22	
	IC=	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	

Tabela 11 - continuação

3.850	M=	65.30	67.94	58.22	65.50	60.52	59.91	53.82	12.50	10.50	11.50	74.07	0.000
	Q=	0.034	0.100	0.097	0.097	0.097	0.097	0.078	0.097	-0.033	-0.028	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.046	0.006	0.000	
	P=	55.00	57.94	46.22	49.50	41.52	40.91	33.82	-9.50	-9.50	-9.50	69.07	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	
3.900	M=	65.30	60.74	67.70	59.37	62.69	62.96	60.26	12.50	18.50	11.50	-4.50	0.000
	Q=	0.035	0.101	0.100	0.095	0.101	0.093	0.095	0.044	0.014	-0.100	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.042	0.004	0.000	
	P=	55.00	50.74	55.70	43.37	43.69	43.96	40.26	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	
3.950	M=	65.30	64.76	61.88	64.90	61.02	63.04	21.67	12.50	18.50	11.50	-4.50	0.000
	Q=	0.138	0.095	0.099	0.105	0.091	0.101	0.159	0.078	-0.011	0.023	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.039	0.002	0.002	
	P=	55.00	54.76	49.88	48.90	42.02	44.04	1.67	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
4.000	M=	65.30	66.14	61.96	64.33	65.24	20.54	15.31	12.50	18.50	11.50	-4.50	0.000
	Q=	0.096	0.106	0.100	0.095	0.104	0.157	0.177	0.024	0.036	-0.049	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.037	0.000	0.003	
	P=	55.00	56.14	49.96	48.33	46.24	1.54	-4.69	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
4.050	M=	65.30	62.20	68.58	62.30	23.08	17.54	11.38	50.92	18.50	11.50	-4.50	0.000
	Q=	0.134	0.100	0.102	0.099	0.161	0.181	0.172	0.120	0.012	0.047	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.002	
	P=	55.00	52.20	56.58	46.30	4.08	-1.46	-8.62	28.92	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
4.100	M=	65.30	67.44	62.54	27.35	14.63	13.92	53.12	63.86	18.50	17.56	-4.50	0.000
	Q=	0.135	0.100	0.100	0.168	0.176	0.178	0.123	0.087	0.058	0.013	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.001	
	P=	55.00	57.44	50.54	11.35	-4.37	-5.08	33.12	41.86	-9.50	-3.14	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
4.150	M=	65.30	65.34	26.24	14.90	18.20	50.19	66.37	20.73	18.50	11.50	25.71	0.000
	Q=	0.096	0.104	0.166	0.176	0.152	0.119	0.091	0.175	0.014	0.039	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.001	0.000	
	P=	55.00	55.34	14.24	-1.10	-0.80	31.19	46.37	-1.27	-9.50	-9.50	20.71	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
4.200	M=	65.30	23.82	17.73	17.10	50.44	70.61	17.82	21.03	18.50	11.50	72.90	0.000
	Q=	0.134	0.162	0.180	0.161	0.119	0.098	0.170	0.184	0.081	-0.023	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000	0.000	
	P=	55.00	13.82	5.73	1.10	31.44	51.61	-2.18	-0.97	-9.50	-9.50	67.90	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
4.250	M=	65.30	17.42	14.69	53.24	69.47	18.09	25.30	15.60	18.50	70.90	-2.71	0.000
	Q=	0.238	0.160	0.176	0.123	0.096	0.171	0.174	0.174	0.036	-0.003	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.000	0.000	
	P=	55.00	7.42	2.69	37.24	50.47	-0.91	5.30	-6.40	-9.50	49.90	-7.71	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
4.300	M=	65.30	55.64	52.91	67.03	20.91	24.19	15.87	22.77	18.50	19.14	68.90	0.000
	Q=	0.236	0.242	0.123	0.092	0.175	0.169	0.174	0.175	-0.087	0.035	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	
	P=	55.00	45.64	40.91	51.03	1.91	5.19	-4.13	0.77	-9.50	-1.86	63.90	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	

Tabela 11 - continuação

4.350	M=	65.30	100.41	106.11	20.60	21.76	18.69	21.66	18.77	64.45	16.51	40.98	0.000
	C=	0.257	0.199	0.158	0.175	0.165	0.179	0.173	0.169	0.108	-0.064	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	90.41	96.11	4.60	2.78	-0.31	1.66	-3.23	36.45	-4.49	35.98	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.400	M=	65.30	117.21	68.09	62.86	18.38	19.25	21.59	63.32	96.57	66.28	-4.50	0.000
	C=	0.192	0.173	0.251	0.231	0.178	0.169	0.174	0.106	0.044	0.073	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	107.21	56.09	46.84	-0.62	0.25	1.59	41.32	68.57	65.28	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.450	M=	65.30	32.74	72.00	65.83	60.30	21.27	60.89	99.35	85.14	75.54	131.56	0.000
	C=	0.039	0.194	0.245	0.254	0.235	0.173	0.102	0.049	0.071	0.078	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	22.74	60.00	49.83	41.30	2.27	40.69	77.35	57.14	54.56	126.56	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.500	M=	65.30	19.66	30.51	69.43	68.67	101.87	99.00	82.70	78.34	130.41	124.24	0.000
	C=	0.245	0.161	0.197	0.249	0.249	0.168	0.048	0.067	0.083	-0.002	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	9.66	18.51	53.43	49.67	82.87	79.00	60.70	50.34	109.41	119.24	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.550	M=	65.30	62.74	17.34	33.39	110.95	146.31	123.64	77.99	127.97	127.01	129.27	0.000
	C=	0.234	0.248	0.165	0.192	0.182	0.124	0.133	0.082	-0.006	0.004	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	52.74	3.34	17.39	91.95	127.31	103.64	55.99	99.97	106.01	124.27	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.600	M=	65.30	62.44	65.58	58.87	111.00	132.70	125.29	168.89	126.66	126.82	129.79	0.000
	C=	0.252	0.237	0.244	0.098	0.067	0.147	0.158	0.060	0.004	-0.064	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	52.44	53.58	42.87	92.00	113.70	105.29	144.89	98.66	105.62	124.79	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.650	M=	65.30	67.83	103.91	143.12	80.64	90.01	177.92	173.92	167.74	129.43	124.38	0.000
	C=	0.241	0.247	0.171	0.119	0.063	0.101	0.074	0.080	0.062	-0.061	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	57.83	91.91	127.12	61.64	71.01	157.92	151.92	139.74	108.43	119.38	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.700	M=	65.30	106.42	145.30	125.64	122.12	125.87	138.63	176.77	176.69	165.29	129.08	0.000
	C=	0.242	0.174	0.122	0.136	0.153	-0.009	0.023	0.076	0.075	0.066	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	96.42	133.30	109.64	103.12	106.87	118.63	154.77	148.69	144.29	124.08	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.750	M=	65.30	142.40	128.14	124.32	170.84	170.71	124.72	141.41	174.32	176.32	206.18	0.000
	C=	0.138	0.118	0.140	0.156	0.063	0.075	-0.007	0.019	0.000	0.076	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	132.40	116.14	108.32	151.84	151.71	104.72	119.41	146.32	155.32	201.18	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.800	M=	65.30	86.73	121.43	173.31	172.88	169.68	173.48	122.28	141.05	215.20	223.56	0.000
	C=	-0.037	0.073	0.151	0.067	0.078	0.065	0.070	-0.003	0.019	0.014	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	76.73	109.43	157.31	153.08	150.68	153.48	100.28	113.05	194.20	218.56	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabela 11 - continuação

9.350	H=	65.30	60.50	58.80	54.27	52.17	52.10	49.80	64.25	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	-0.055	0.039	-0.040	-0.078	0.000	0.000	-0.022	-0.076	-0.048	-0.037	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	58.20	46.80	16.27	33.17	63.68	79.08	42.25	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
9.400	H=	65.30	23.48	75.06	101.17	16.20	58.15	125.77	29.59	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	0.034	0.012	0.028	-0.014	-0.088	0.023	0.059	0.059	0.004	0.009	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	
	P=	55.30	13.48	53.06	85.17	-2.80	39.15	105.77	7.59	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
9.450	H=	65.30	71.78	65.85	58.99	107.14	59.30	10.50	80.02	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	0.078	0.023	-0.056	0.054	-0.009	-0.084	0.059	0.097	-0.025	0.015	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.061	0.002	0.001	
	P=	55.30	61.78	53.85	42.99	88.14	40.30	-5.50	58.02	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	
9.500	H=	65.30	107.35	55.72	71.83	102.07	59.49	10.50	12.50	18.50	11.50	20.63	0.000
	C=	0.012	0.010	0.049	-0.066	-0.015	0.067	-0.015	0.097	0.026	0.060	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.054	0.003	0.000	
	P=	55.30	97.35	43.72	55.83	83.07	40.49	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	15.63	
	IC=	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	
9.550	H=	65.30	46.54	113.33	98.79	24.19	53.27	10.50	12.50	16.50	11.50	49.01	0.000
	C=	-0.058	0.038	0.001	-0.020	0.011	0.063	0.052	0.165	-0.003	-0.015	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.007	0.047	0.004	0.000	
	P=	55.30	38.54	101.33	82.79	5.19	34.27	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	44.01	
	IC=	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	
9.600	H=	65.30	70.98	92.01	65.69	50.00	9.50	56.34	12.50	18.50	11.50	2.37	0.000
	C=	0.054	-0.067	-0.031	0.077	0.058	0.144	0.055	0.078	0.049	-0.060	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.013	0.042	0.001	0.000	
	P=	55.30	60.98	80.01	49.69	31.00	-9.50	38.34	-9.50	-9.50	-9.50	-2.63	
	IC=	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	
9.650	H=	65.30	108.06	23.35	43.22	50.99	9.50	40.63	12.50	18.50	25.64	-4.50	0.000
	C=	-0.077	-0.005	0.009	0.047	0.101	-0.023	0.094	0.166	0.020	0.037	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.015	0.037	0.000	0.001	
	P=	55.30	98.06	11.35	27.22	31.99	-9.50	20.63	-9.50	-9.50	4.64	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO

X/L=	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.
H=	65.30	142.40	180.66	188.53	190.56	186.99	219.58	222.49	243.15	251.01	256.64
C=	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
V=	0.030	0.001	0.001	0.003	0.012	0.012	0.023	0.017	0.080	0.006	0.003

Tabela 11 - continuação

2.220	H=	65.00	83.10	100.79	117.66	133.29	147.27	156.12	168.30	174.73	176.57	177.19	0.000
	C=	-0.210	-0.209	-0.203	-0.194	-0.182	-0.165	-0.144	-0.118	-0.083	-0.042	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	73.10	88.79	101.66	114.29	128.27	139.12	146.30	146.73	155.57	172.19	
	IC=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.260	H=	65.00	81.09	96.74	111.49	124.68	136.42	145.52	151.08	152.62	154.42	155.01	0.000
	C=	-0.243	-0.241	-0.235	-0.224	-0.208	-0.188	-0.162	-0.126	-0.088	-0.044	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	71.09	84.74	95.49	105.88	117.42	125.52	129.08	124.62	133.42	150.01	
	IC=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.340	H=	65.00	78.04	91.80	103.97	114.63	123.16	128.40	129.66	130.79	131.07	131.65	0.000
	C=	-0.272	-0.269	-0.261	-0.248	-0.229	-0.205	-0.172	-0.131	-0.089	-0.046	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	68.64	79.80	87.97	95.63	104.16	108.40	107.66	102.79	110.07	126.65	
	IC=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.400	H=	65.00	73.72	85.90	94.97	102.28	106.65	107.53	108.14	108.34	108.63	107.14	0.000
	C=	-0.235	-0.232	-0.223	-0.207	-0.184	-0.154	-0.117	-0.073	-0.030	0.000	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	65.72	73.90	78.97	83.28	87.65	87.53	86.14	80.34	87.03	102.14	
	IC=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.460	H=	65.00	72.26	79.91	84.23	87.02	86.70	86.42	86.04	85.41	84.42	84.42	0.000
	C=	-0.312	-0.308	-0.298	-0.279	-0.251	-0.214	-0.175	-0.133	-0.089	-0.044	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	62.26	68.91	68.23	68.02	67.70	66.42	64.04	57.41	63.42	79.42	
	IC=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.520	H=	65.00	68.62	70.62	71.00	68.69	66.84	65.25	63.72	62.14	61.61	61.70	0.000
	C=	-0.322	-0.318	-0.305	-0.282	-0.249	-0.212	-0.173	-0.131	-0.087	-0.044	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	58.20	58.62	55.00	49.69	47.84	45.25	41.72	34.14	40.61	56.70	
	IC=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.560	H=	65.00	63.38	60.32	55.13	50.87	47.29	44.19	41.38	40.15	39.44	39.20	0.000
	C=	-0.323	-0.318	-0.302	-0.274	-0.243	-0.207	-0.168	-0.127	-0.085	-0.043	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	53.38	48.32	39.13	31.67	28.29	24.19	19.36	12.15	18.44	34.20	
	IC=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.640	H=	65.00	57.14	47.92	40.24	33.77	28.25	23.46	20.64	18.69	17.55	17.17	0.000
	C=	-0.315	-0.308	-0.288	-0.263	-0.233	-0.199	-0.161	-0.123	-0.083	-0.042	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	47.14	35.92	24.24	14.77	9.25	3.46	-1.36	-9.31	-3.45	12.17	
	IC=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.700	H=	65.00	49.57	37.09	26.60	17.67	9.98	10.50	12.50	18.50	11.50	4.10	0.000
	C=	-0.292	-0.284	-0.268	-0.246	-0.219	-0.187	-0.142	-0.095	-0.040	-0.011	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000	
	P=	55.00	39.57	25.09	10.60	-1.33	-9.02	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2.760	H=	65.00	44.57	28.28	14.55	9.50	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	5.83	0.000
	C=	-0.254	-0.253	-0.243	-0.225	-0.188	-0.166	-0.133	-0.103	-0.055	0.030	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003	0.003	0.006	0.005	0.000	
	P=	55.00	34.57	16.28	-1.45	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	0.83	
	IC=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Tabela 12 - Listagem dos valores de carga, vazão, pressão e volume da cavidade ao longo da tubulação ($\alpha = 0,1\%$)

2.820	M=	65.00	43.72	22.45	11.20	9.50	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	27.10	0.000
	C=	-0.214	-0.213	-0.202	-0.210	-0.203	-0.189	-0.150	-0.118	-0.013	0.011	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.005	0.005	0.012	0.008	0.000	
	P=	55.00	33.72	10.45	-4.80	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	22.10	
	IC=	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	
2.660	M=	65.00	42.48	26.64	17.39	9.50	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	17.17	0.000
	C=	-0.172	-0.170	-0.180	-0.199	-0.187	-0.170	-0.151	-0.153	-0.028	0.030	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.006	0.005	0.019	0.009	0.000	
	P=	55.00	32.48	14.64	1.39	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	12.17	
	IC=	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	
2.940	M=	65.00	47.91	37.41	24.91	9.50	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	-4.09	0.000
	C=	-0.127	-0.138	-0.160	-0.176	-0.202	-0.193	-0.157	-0.141	0.014	-0.011	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.004	0.008	0.008	0.027	0.008	0.000	
	P=	55.00	37.91	25.41	8.93	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.09	
	IC=	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	
3.000	M=	65.00	59.91	46.19	29.50	9.50	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	5.83	0.000
	C=	-0.135	-0.117	-0.135	-0.145	-0.187	-0.173	-0.158	-0.176	-0.001	0.030	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.005	0.009	0.006	0.037	0.009	0.000	
	P=	55.00	49.91	34.19	13.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	0.83	
	IC=	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	
3.060	M=	65.00	63.26	52.00	30.75	34.27	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	27.09	0.000
	C=	-0.107	-0.102	-0.102	-0.105	-0.154	-0.196	-0.165	-0.163	0.041	0.011	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.011	0.005	0.048	0.009	0.000	
	P=	55.00	53.26	40.00	14.75	15.27	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	22.09	
	IC=	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	
3.120	M=	65.00	57.68	47.63	56.74	41.21	9.50	10.50	12.50	18.50	11.50	17.17	0.000
	C=	-0.099	-0.092	-0.072	-0.111	-0.125	-0.177	-0.166	-0.199	0.025	-0.030	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.012	0.004	0.061	0.006	0.000	
	P=	55.00	47.08	35.83	40.74	22.21	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	12.17	
	IC=	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	
3.180	M=	65.00	49.57	61.62	58.27	31.97	44.68	10.50	12.50	18.50	11.50	-4.09	0.000
	C=	-0.077	-0.069	-0.101	-0.092	-0.083	-0.132	-0.172	-0.186	0.068	-0.011	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.003	0.075	0.002	0.000	
	P=	55.00	39.57	49.62	42.27	12.97	25.68	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.09	
	IC=	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	
3.240	M=	65.00	69.73	60.00	37.07	61.72	51.20	10.50	12.50	18.50	24.85	5.83	0.000
	C=	-0.039	-0.026	-0.069	-0.053	-0.099	-0.100	-0.173	-0.221	0.052	0.056	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.001	0.091	0.000	0.000	
	P=	55.00	59.73	48.00	21.07	42.72	32.20	-9.50	-9.50	-9.50	3.65	0.83	
	IC=	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	
3.300	M=	65.00	75.42	44.98	63.46	56.28	27.55	10.50	20.83	18.50	25.78	53.78	0.000
	C=	-0.095	-0.059	-0.038	-0.096	-0.090	-0.033	-0.179	-0.193	0.043	0.038	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.107	0.000	0.000	
	P=	55.00	65.42	32.98	47.46	37.28	8.55	-9.50	-1.17	-9.50	4.78	48.78	
	IC=	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
3.360	M=	65.00	40.26	78.87	64.18	29.30	15.59	65.63	26.27	18.50	47.42	45.72	0.000
	C=	-0.079	-0.047	-0.066	-0.075	-0.030	-0.012	-0.106	-0.213	0.024	-0.012	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.122	0.000	0.000	
	P=	55.00	30.26	66.87	48.18	10.30	-3.41	45.63	6.27	-9.50	26.42	40.72	
	IC=	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	

Tabela 12 - continuação

3.420	H=	65.00	68.45	59.46	44.72	23.51	67.037	74.21	61.927	18.50	31.44	41.07	0.000
	C=	0.031	-0.044	-0.000	0.000	0.000	-0.103	-0.125	-0.102	-0.058	-0.014	0.000	
	C=	0.030	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.132	0.000	0.000	
	P=	55.00	58.45	47.46	20.72	4.51	48.037	54.21	41.27	-9.50	17.44	36.07	
	IC=												
3.460	H=	65.00	84.19	34.31	18.79	82.77	82.10	65.00	64.41	18.50	12.16	31.17	0.000
	C=	-0.033	-0.036	-0.020	0.000	-0.077	-0.109	-0.098	-0.106	-0.052	-0.056	0.000	
	C=	0.030	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.134	0.000	0.000	
	P=	55.00	74.19	22.31	2.79	63.77	63.10	45.00	42.41	-9.50	-8.16	26.17	
	IC=												
3.540	H=	65.00	30.67	43.52	72.35	77.37	80.39	72.31	20.25	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	-0.073	-0.027	0.042	-0.093	-0.118	-0.069	-0.090	-0.102	-0.033	-0.038	0.000	
	C=	0.030	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.133	0.000	0.001	
	P=	55.00	20.67	31.52	56.35	58.37	61.39	52.31	-1.75	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=												
3.600	H=	65.00	24.35	68.90	102.08	69.98	67.58	35.65	26.40	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	0.039	0.065	-0.100	-0.071	-0.089	-0.099	0.017	-0.002	-0.025	0.007	0.000	
	C=	0.030	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.131	0.001	0.002	
	P=	55.00	14.35	56.90	86.08	50.98	48.58	15.65	4.40	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=												
3.660	H=	65.00	103.02	82.90	66.54	92.28	25.25	21.69	33.90	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	0.093	-0.034	-0.108	-0.095	-0.052	-0.021	0.011	0.021	-0.016	0.024	0.000	
	C=	0.030	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.130	0.003	0.001	
	P=	55.00	93.02	70.90	50.54	73.28	6.25	1.69	11.90	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=												
3.720	H=	65.00	123.52	100.64	73.11	21.81	46.40	23.50	13.79	18.50	11.50	23.84	0.000
	C=	-0.137	-0.029	-0.030	-0.089	-0.009	0.037	0.001	0.004	0.002	0.009	0.000	
	C=	0.030	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.128	0.007	0.000	
	P=	55.00	113.52	88.64	57.11	2.81	27.40	3.50	-8.21	-9.50	-9.50	18.84	
	IC=												
3.780	H=	65.00	62.64	113.73	55.92	27.24	20.07	38.49	12.50	18.50	11.50	47.23	0.000
	C=	-0.142	-0.103	-0.010	0.056	-0.000	-0.006	0.052	0.039	0.010	-0.024	0.000	
	C=	0.030	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.127	0.008	0.000	
	P=	55.00	52.64	101.73	39.92	8.24	1.07	18.49	-9.50	-9.50	-9.50	42.23	
	IC=												
3.840	H=	65.00	55.23	17.94	67.86	54.17	19.34	10.50	43.20	18.50	11.50	-0.84	0.000
	C=	-0.098	-0.123	-0.017	0.078	0.000	0.015	0.018	0.043	0.028	-0.009	0.000	
	C=	0.030	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.127	0.004	0.000	
	P=	55.00	45.23	5.94	51.86	35.17	0.34	-9.50	21.20	-9.50	-9.50	-5.84	
	IC=												
3.900	H=	65.00	20.31	9.39	16.19	59.95	44.59	24.05	12.50	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	-0.104	-0.012	-0.035	-0.013	0.003	0.078	0.006	0.016	0.037	0.024	0.000	
	C=	0.030	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.000	0.001	
	P=	55.00	10.31	-2.61	0.19	40.95	25.59	4.05	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=												
3.960	H=	65.00	19.17	18.57	6.50	9.50	64.65	45.15	12.50	18.50	26.58	-4.30	0.000
	C=	0.074	-0.016	-0.009	-0.010	0.011	0.084	0.077	0.079	0.055	0.022	0.000	
	C=	0.030	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.000	0.001	
	P=	55.00	9.17	6.57	-9.50	-9.50	45.65	25.15	-9.50	-9.50	5.58	-9.50	
	IC=												

Tabela 12 - continuação

A-020	M	65:30	63:25	16:28	6:50	9:50	10:07	53:09	50:75	18:50	11:50	37:94	0:000
	C	0:072	0:077	-0:010	-0:006	-0:022	0:010	0:106	0:066	0:066	0:055	0:000	
	C	0:030	0:000	0:000	0:001	0:000	0:000	0:000	0:000	0:125	0:000	0:000	
	IC	55:00	53:25	4:28	-9:50	-9:50	-0:93	33:09	28:75	-9:50	-9:50	32:94	0
A-080	M	65:30	62:10	51:17	14:28	9:50	9:50	15:67	45:95	18:50	29:66	55:60	0:000
	C	0:081	0:078	0:100	-0:007	0:008	0:022	-0:001	0:120	0:082	-0:016	0:000	
	C	0:030	0:000	0:000	0:000	0:001	0:001	0:000	0:000	0:122	0:000	0:000	
	IC	55:30	52:10	39:17	-1:72	-9:50	-9:50	-4:33	23:95	-9:50	8:66	50:60	0
A-140	M	65:30	52:93	60:09	59:53	9:50	9:50	10:50	12:50	18:50	58:53	21:79	0:000
	C	0:033	0:104	0:082	0:084	-0:022	-0:013	0:052	0:117	-0:037	0:055	0:000	
	C	0:030	0:000	0:000	0:000	0:001	0:002	0:001	0:003	0:114	0:060	0:000	
	IC	55:30	42:93	48:09	43:53	-9:50	-9:50	-9:50	-9:50	-9:50	37:53	16:79	0
A-200	M	65:30	62:59	61:28	55:30	54:22	9:50	10:50	12:50	18:50	11:50	61:25	0:000
	C	0:127	0:067	0:068	0:091	0:095	0:018	0:001	0:161	-0:072	-0:020	0:000	
	C	0:030	0:000	0:000	0:000	0:000	0:003	0:002	0:010	0:103	0:000	0:000	
	IC	55:30	52:59	49:28	39:30	35:22	-9:50	-9:50	-9:50	-9:50	-9:50	56:25	0
A-260	M	65:30	73:34	58:20	55:97	61:77	60:81	10:50	12:50	18:50	21:23	1:22	0:000
	C	0:091	0:111	0:096	0:098	0:078	0:082	0:044	0:016	-0:010	-0:077	0:000	
	C	0:030	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:003	0:003	0:000	0:000	
	IC	55:30	63:34	46:20	39:97	42:77	41:81	-9:50	-9:50	-9:50	0:23	-3:78	0
A-320	M	65:30	60:22	68:02	64:67	62:56	52:23	58:63	12:50	18:50	11:50	-4:50	0:000
	C	0:095	0:100	0:121	0:084	0:085	0:087	0:086	0:138	-0:082	0:050	0:000	
	C	0:030	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:022	0:083	0:001	0:000	
	IC	55:30	50:22	56:02	48:67	43:56	33:23	38:03	-9:50	-9:50	-9:50	-9:50	0
A-380	M	65:30	59:69	66:68	74:60	55:13	60:38	47:10	12:50	18:50	11:50	-4:50	0:000
	C	0:139	0:105	0:068	0:108	0:102	0:059	0:107	0:070	0:017	0:003	0:000	
	C	0:030	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:022	0:075	0:003	0:000	
	IC	55:30	49:69	54:68	58:60	36:13	41:38	27:10	-9:50	-9:50	-9:50	-9:50	0
A-440	M	65:30	71:46	66:27	57:14	72:42	50:00	14:28	12:50	18:50	11:50	13:23	0:000
	C	0:115	0:097	0:092	0:106	0:112	0:112	0:118	0:114	-0:055	0:061	0:000	
	C	0:030	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:017	0:068	0:007	0:000	
	IC	55:30	61:46	54:27	41:14	53:42	31:00	-5:72	-9:50	-9:50	-9:50	8:23	0
A-500	M	65:30	71:57	61:92	64:09	52:02	26:35	15:43	12:50	18:50	11:50	53:76	0:000
	C	0:034	0:102	0:115	0:096	0:116	0:201	0:179	0:047	0:043	-0:063	0:000	
	C	0:030	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:011	0:063	0:010	0:000	
	IC	55:30	61:57	49:92	48:09	33:02	7:35	-4:57	-9:50	-9:50	-9:50	48:76	0
A-560	M	65:30	55:47	69:39	56:80	18:07	17:47	24:55	12:50	18:50	11:50	9:77	0:000
	C	0:030	0:103	0:106	0:125	0:185	0:182	0:204	0:091	-0:028	-0:061	0:000	
	C	0:030	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:000	0:005	0:059	0:007	0:000	
	IC	55:30	45:47	57:39	40:80	-0:93	-1:53	4:55	-9:50	-9:50	-9:50	4:77	0

Tabela 12 - continuação

4.620	H=	65.30	62.52	50.36	23.40	22.27	16.28	14.54	65.28	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	0.121	0.094	0.113	0.195	0.191	0.188	0.188	0.126	0.070	0.003	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	0.003	0.002	
	P=	55.30	52.52	38.36	7.40	3.27	-2.72	-5.46	43.28	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.680	H=	65.30	59.68	16.87	19.67	21.61	19.34	56.98	44.62	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	0.098	0.131	0.182	0.179	0.198	0.197	0.110	0.130	-0.001	-0.000	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	
	P=	55.30	49.68	4.67	-0.13	2.61	0.34	36.98	22.62	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.740	H=	65.30	19.08	25.41	15.09	12.95	62.27	49.40	12.50	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	0.141	0.166	0.197	0.185	0.184	0.120	0.139	0.204	0.097	0.012	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.041	0.000	0.001	
	P=	55.30	9.08	13.41	-0.91	-6.05	43.27	29.40	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.800	H=	65.30	30.56	17.31	22.49	55.72	42.98	17.82	23.29	18.50	29.36	17.82	0.000
	C=	0.274	0.207	0.189	0.202	0.107	0.126	0.205	0.189	0.026	0.076	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034	0.000	0.000	
	P=	55.30	20.56	5.31	6.49	36.72	23.98	-2.18	1.29	-9.50	8.36	12.82	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.860	H=	65.30	63.16	27.63	57.90	52.48	11.32	16.90	21.57	18.50	24.62	68.98	0.000
	C=	0.273	0.278	0.212	0.111	0.144	0.132	0.176	0.194	0.055	0.013	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.000	0.000	
	P=	55.30	53.16	15.63	41.90	33.48	-7.68	-3.10	-0.40	-9.50	3.62	63.98	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.920	H=	65.30	62.03	103.66	57.59	13.53	26.42	15.07	12.50	18.50	56.11	31.82	0.000
	C=	0.231	0.278	0.199	0.154	0.196	0.195	0.185	0.186	0.001	-0.021	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	
	P=	55.30	52.03	91.66	41.59	-5.47	7.42	-4.93	-9.50	-9.50	37.11	26.82	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.980	H=	65.30	105.44	91.91	59.30	31.55	17.28	22.01	12.50	89.03	25.50	47.25	0.000
	C=	0.233	0.222	0.220	0.284	0.204	0.189	0.203	0.192	0.039	-0.012	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	95.44	79.91	43.30	12.55	-1.72	2.01	-9.50	61.03	4.50	42.25	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.040	H=	65.30	94.54	61.14	65.86	62.98	27.14	14.71	98.11	71.88	78.16	19.18	0.000
	C=	0.124	0.226	0.287	0.270	0.277	0.212	0.194	0.056	0.077	0.000	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	84.54	49.14	49.86	43.98	8.14	-5.29	76.11	43.88	57.16	14.18	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.100	H=	65.30	20.79	68.82	64.81	61.41	60.35	103.18	73.55	87.24	65.55	109.07	0.000
	C=	0.168	0.209	0.225	0.280	0.278	0.282	0.066	0.060	0.077	0.089	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	10.79	56.82	48.81	42.41	41.35	63.18	51.55	59.24	44.55	104.07	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.160	H=	65.30	39.05	24.51	64.37	62.18	137.35	119.09	92.31	67.22	118.14	111.90	0.000
	C=	0.294	0.218	0.202	0.283	0.285	0.132	0.168	0.087	0.092	0.017	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	29.05	12.51	48.37	43.18	118.35	99.09	70.31	39.22	97.14	106.90	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabela 12 - continuação

5.220	H=	65.00	68.66	34.65	21.94	140.22	120.84	126.47	112.74	123.20	113.56	127.21	0.000
	C=	0.267	0.287	0.226	0.207	0.137	0.171	0.152	0.180	0.027	0.003	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	58.66	22.65	5.94	121.22	101.84	106.47	92.74	95.20	92.56	122.21	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.280	H=	65.00	60.57	66.03	110.45	80.58	129.34	114.50	157.33	159.03	132.27	115.22	0.000
	C=	0.279	0.275	0.241	0.080	0.094	0.158	0.183	0.093	0.091	0.010	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	50.57	54.03	94.45	61.58	110.34	94.50	135.33	131.03	111.27	110.22	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.340	H=	65.00	62.38	136.27	124.57	99.60	74.27	160.18	160.75	166.38	160.68	137.33	0.000
	C=	0.284	0.284	0.129	0.178	0.100	0.106	0.098	0.094	0.075	0.058	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	52.38	124.27	108.57	80.60	55.27	140.18	138.75	138.38	139.68	132.33	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.400	H=	65.00	140.61	120.65	125.41	118.22	130.44	120.52	169.23	162.40	171.43	206.11	0.000
	C=	0.238	0.138	0.171	0.150	0.190	0.041	0.017	0.061	0.091	0.066	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	130.61	108.65	109.41	99.22	111.44	100.52	147.23	134.40	150.43	201.11	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.460	H=	65.00	123.39	129.76	114.52	156.22	164.42	139.49	122.18	174.28	207.82	205.52	0.000
	C=	-0.008	0.176	0.158	0.183	0.091	0.101	0.024	0.013	0.071	0.003	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	113.39	117.76	98.52	137.22	145.42	119.49	100.12	146.28	186.62	200.52	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.520	H=	65.00	54.19	117.06	160.54	160.68	165.27	166.07	144.55	167.60	208.36	209.53	0.000
	C=	0.063	0.013	0.168	0.099	0.094	0.073	0.098	0.014	-0.074	0.005	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	44.19	105.06	144.54	141.68	146.27	146.07	122.55	139.60	187.36	204.53	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.580	H=	65.00	58.72	84.58	163.19	169.56	162.33	170.31	211.47	178.63	169.32	211.20	0.000
	C=	0.034	0.075	-0.047	0.099	0.081	0.091	0.083	0.010	-0.052	-0.017	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	48.72	72.98	147.19	150.58	143.33	150.31	189.47	150.63	146.32	206.20	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.640	H=	65.00	95.79	104.85	94.03	164.83	174.62	207.72	204.38	213.17	161.47	129.13	0.000
	C=	0.037	-0.026	-0.014	-0.064	0.095	0.072	0.003	-0.002	0.007	-0.057	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	85.79	92.85	78.03	145.83	155.62	187.72	182.38	185.17	160.47	124.13	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.700	H=	65.00	111.12	104.64	106.51	99.09	210.21	208.09	209.43	207.22	172.96	151.75	0.000
	C=	-0.035	-0.002	-0.043	-0.017	-0.074	0.008	0.006	-0.000	-0.008	0.064	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	101.12	92.64	90.51	80.09	191.21	188.69	187.43	179.22	151.96	146.75	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.760	H=	65.00	74.06	112.78	109.89	151.88	133.16	211.92	211.52	169.24	177.50	216.82	0.000
	C=	-0.031	-0.162	-0.005	-0.053	-0.104	-0.139	0.005	0.001	0.077	0.050	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	64.06	100.78	93.89	132.88	114.16	191.92	189.52	141.24	156.50	211.82	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabela 12 - continuação

		VALORES MÁXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITÓRIO											
X/L =		.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0	
9.420	M =	65.30	66.60	68.35	58.97	73.51	97.59	131.05	167.59	177.23	166.64	112.20	0.000
	C =	-0.137	-0.058	-0.187	-0.094	-0.133	-0.103	-0.195	-0.103	-0.106	-0.107	0.000	
	C =	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P =	55.30	56.00	56.35	42.97	54.51	78.59	111.65	145.59	149.23	145.64	107.20	
	IC =	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.480	M =	65.00	69.27	61.74	67.40	80.48	118.52	132.52	131.50	168.46	117.17	111.06	0.000
	C =	-0.131	-0.145	-0.089	-0.145	-0.136	-0.220	-0.170	-0.194	-0.104	0.010	0.000	
	C =	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P =	55.30	59.27	49.74	51.40	61.48	99.52	112.52	109.50	140.46	96.17	106.06	
	IC =	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.540	M =	65.30	60.14	68.33	83.24	112.37	115.41	118.38	133.42	71.49	112.69	122.13	0.000
	C =	-0.153	-0.082	-0.143	-0.130	-0.231	-0.203	-0.219	-0.172	-0.078	0.003	0.000	
	C =	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P =	55.30	50.14	56.33	67.24	93.37	96.41	98.38	111.42	43.49	91.69	117.13	
	IC =	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.600	M =	65.30	64.06	81.63	113.25	118.13	112.24	116.31	58.43	77.69	76.47	114.32	0.000
	C =	-0.033	-0.151	-0.133	-0.229	-0.197	-0.231	-0.204	-0.104	0.064	-0.068	0.000	
	C =	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P =	55.30	54.06	69.63	97.25	99.13	93.24	96.31	36.43	49.69	55.47	109.32	
	IC =	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.660	M =	65.30	86.47	108.93	116.49	113.12	119.03	52.35	60.65	63.41	79.33	30.82	0.000
	C =	-0.149	-0.124	-0.237	-0.200	-0.229	-0.199	-0.115	-0.097	-0.113	-0.067	0.000	
	C =	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P =	55.30	76.47	96.93	100.49	94.12	100.03	32.35	38.65	35.41	58.33	25.82	
	IC =	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabela 12 - continuação

4.050	H=	65.00	66.10	67.19	68.29	69.04	70.34	71.39	76.45	78.92	80.54	81.07	0.000
	C=	-0.431	-0.461	-0.603	-0.603	-0.552	-0.481	-0.345	-0.305	-0.207	-0.104	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	P=	55.00	56.10	55.19	52.29	49.04	51.34	53.39	54.45	50.92	59.54	76.07	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
4.200	H=	65.00	66.10	67.19	62.47	56.91	54.88	55.22	56.47	57.72	58.56	58.89	0.000
	C=	-0.633	-0.603	-0.603	-0.575	-0.543	-0.485	-0.406	-0.314	-0.214	-0.158	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	P=	55.00	56.10	55.19	46.47	37.91	35.88	35.32	34.47	29.72	37.56	53.89	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
4.350	H=	65.00	66.10	61.42	55.91	49.45	42.08	38.16	36.76	36.24	36.14	36.09	0.000
	C=	-0.633	-0.603	-0.575	-0.544	-0.508	-0.467	-0.401	-0.314	-0.216	-0.110	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	P=	55.00	56.10	49.42	39.91	30.45	23.08	18.16	14.76	8.24	15.14	31.09	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
4.500	H=	65.00	60.37	54.92	48.51	41.19	32.87	23.69	18.09	18.50	13.83	13.42	0.000
	C=	-0.633	-0.576	-0.544	-0.509	-0.469	-0.424	-0.376	-0.302	-0.194	-0.107	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	P=	55.00	50.37	42.92	32.51	22.19	13.87	3.69	-3.91	-9.50	-7.17	8.42	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
4.650	H=	65.00	53.92	47.56	40.30	32.04	22.92	12.93	12.50	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	-0.549	-0.545	-0.510	-0.470	-0.426	-0.378	-0.326	-0.253	-0.085	-0.009	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	P=	55.00	43.92	35.56	24.30	13.04	3.92	-7.07	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
4.800	H=	65.00	52.25	39.41	31.20	22.14	12.20	11.78	12.50	18.50	11.50	9.58	0.000
	C=	-0.438	-0.464	-0.471	-0.427	-0.379	-0.328	-0.322	-0.331	-0.126	-0.028	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.009	0.001	0.000	0.000
	P=	55.00	42.25	27.41	15.20	3.14	-6.80	-8.22	-9.50	-9.50	-9.50	4.58	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
4.950	H=	65.00	50.52	35.97	21.26	11.48	11.06	11.78	12.50	18.50	11.50	-23.60	0.000
	C=	-0.419	-0.415	-0.402	-0.381	-0.330	-0.324	-0.324	-0.309	-0.017	0.009	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	P=	55.00	40.52	23.97	5.36	-7.52	-7.94	-8.22	-9.50	-9.50	-9.50	16.60	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
5.100	H=	65.00	49.73	32.50	16.31	10.34	11.06	11.78	12.50	18.50	11.50	13.42	0.000
	C=	-0.343	-0.338	-0.324	-0.305	-0.326	-0.326	-0.326	-0.385	-0.058	-0.028	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.133	0.049	0.000	0.000
	P=	55.00	38.73	20.50	0.31	-8.66	-7.94	-8.22	-9.50	-9.50	-9.50	8.42	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
5.250	H=	65.00	47.60	29.11	21.48	15.88	11.06	11.78	16.21	18.50	11.50	-0.59	0.000
	C=	-0.258	-0.254	-0.242	-0.271	-0.302	-0.328	-0.328	-0.346	0.050	-0.009	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.188	0.044	0.000	0.000
	P=	55.00	37.60	17.11	5.48	-3.12	-7.94	-8.22	-5.79	-9.50	-9.50	-5.59	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
5.400	H=	65.00	45.39	35.97	28.93	22.15	16.57	15.47	23.73	18.50	11.50	9.58	0.000
	C=	-0.147	-0.143	-0.200	-0.239	-0.273	-0.304	-0.348	-0.365	0.009	0.058	0.000	0.000
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.250	0.043	0.000	0.000
	P=	55.00	35.39	23.97	12.63	3.15	-2.43	-4.53	1.73	-9.50	-9.50	4.58	0.000
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000

Tabela 13 - Listagem dos valores de carga, vazão, pressão e volume da cavidade ao longo da tubulação ($\alpha = 1,44\%$)

5.550	M=	45.30	53.97	44.84	34.39	39.27	24.28	20.44	17.73	10.50	11.50	33.88	0.000
	C=	-0.068	-0.113	-0.160	-0.203	-0.222	-0.293	-0.360	-0.357	-0.118	-0.009	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.313	0.039	0.000	
	P=	55.30	43.95	32.86	20.59	10.27	7.50	8.44	-4.25	-9.50	-9.50	18.58	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
5.700	M=	65.30	64.44	54.53	45.86	40.88	41.04	28.72	23.22	18.50	11.50	13.42	0.000
	C=	-0.060	-0.066	-0.116	-0.163	-0.223	-0.297	-0.303	-0.333	-0.077	-0.058	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.382	0.021	0.000	
	P=	55.30	54.44	42.23	29.46	21.88	22.04	8.72	1.22	-9.50	-9.50	8.42	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
5.850	M=	65.30	65.57	65.01	58.76	57.14	43.04	35.78	29.42	18.50	23.90	-0.57	0.000
	C=	-0.033	-0.063	-0.088	-0.136	-0.219	-0.233	-0.271	-0.305	0.185	0.050	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.451	0.000	0.000	
	P=	55.30	55.57	53.01	42.76	38.14	24.04	15.78	7.42	-9.50	2.90	-5.57	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
6.000	M=	65.30	65.57	69.78	76.83	60.87	51.85	43.67	31.04	18.50	28.08	34.17	0.000
	C=	-0.035	-0.066	-0.083	-0.124	-0.146	-0.193	-0.235	-0.247	0.024	0.138	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.509	0.000	0.000	
	P=	55.30	55.57	57.78	60.63	41.87	32.95	23.67	9.04	-9.50	7.08	29.37	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
6.150	M=	65.30	69.21	77.17	71.87	71.30	61.86	47.07	32.75	18.50	28.97	56.89	0.000
	C=	-0.068	-0.085	-0.121	-0.093	-0.098	-0.148	-0.169	-0.181	0.092	-0.026	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.550	0.000	0.000	
	P=	55.30	59.21	65.17	55.67	52.30	42.46	27.07	10.75	-9.50	7.08	51.69	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
6.300	M=	65.30	76.59	71.30	71.85	72.44	66.49	50.52	34.52	18.50	47.09	23.57	0.000
	C=	-0.136	-0.124	-0.095	-0.094	-0.095	-0.075	-0.095	-0.108	-0.076	-0.046	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.574	0.000	0.000	
	P=	55.30	66.59	59.30	55.85	53.44	47.49	30.52	12.52	-9.50	26.09	18.57	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
6.450	M=	65.30	67.09	71.28	71.87	67.05	61.89	53.94	36.27	18.50	13.11	37.50	0.000
	C=	-0.130	-0.115	-0.098	-0.098	-0.072	-0.043	-0.015	-0.027	-0.184	-0.050	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.585	0.000	0.000	
	P=	55.30	57.09	59.28	55.87	48.05	42.49	33.94	14.27	-9.50	-7.09	32.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
6.600	M=	65.30	59.72	67.66	66.48	60.93	54.50	47.24	37.92	18.50	11.50	2.65	0.000
	C=	-0.125	-0.154	-0.118	-0.075	-0.045	-0.012	0.026	0.033	-0.024	-0.125	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.547	0.000	0.000	
	P=	55.30	49.72	55.66	50.48	41.93	35.50	27.24	15.92	-9.50	-9.50	-2.35	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
6.750	M=	65.30	65.58	54.95	56.75	53.94	46.69	38.48	29.88	18.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	-0.128	-0.128	-0.130	-0.065	-0.015	0.023	0.065	0.112	-0.116	0.043	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.521	0.004	0.004	
	P=	55.30	55.58	42.95	40.75	34.94	27.69	18.48	7.68	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
6.900	M=	65.30	60.23	54.68	42.44	42.51	37.93	28.94	19.09	18.50	11.50	20.34	0.000
	C=	-0.130	-0.105	-0.075	-0.070	0.003	0.063	0.109	0.159	0.023	0.029	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.491	0.017	0.000	
	P=	55.30	50.23	42.68	26.44	23.51	18.93	8.94	-2.91	-9.50	-9.50	15.34	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	

Tabela 13 - continuação

7050	M=	65.00	54.12	47.72	40.45	26.44	24.74	18.57	17.48	18.50	11.50	17.55	0.000
	C=	-0.032	-0.078	-0.044	-0.007	0.007	0.089	0.156	0.161	0.048	-0.043	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.466	0.016	0.000	
	P=	55.00	44.12	35.72	24.45	7.44	5.78	-1.43	-4.02	-9.50	-9.50	12.55	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
7200	M=	65.00	52.50	39.90	31.73	22.73	9.50	13.85	17.48	18.50	11.50	2.66	0.000
	C=	-0.025	-0.021	-0.009	0.033	0.079	0.112	0.141	0.158	0.110	-0.029	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.447	0.004	0.000	
	P=	55.00	42.50	27.50	15.73	3.73	-9.50	-6.15	-4.02	-9.50	-9.50	-2.34	
	IC=	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	
7350	M=	65.00	50.78	36.51	22.19	14.80	9.50	10.50	14.37	18.50	22.02	5.46	0.000
	C=	0.039	0.043	0.056	0.076	0.114	0.120	0.122	0.138	0.019	0.093	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.433	0.000	0.000	
	P=	55.00	40.78	24.51	6.19	-4.20	-9.50	-9.50	-7.63	-9.50	1.02	0.46	
	IC=	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	
7500	M=	65.00	49.01	33.07	19.59	9.50	13.42	10.50	12.50	18.50	14.00	41.36	0.000
	C=	0.112	0.116	0.128	0.137	0.142	0.121	0.119	0.126	0.076	0.041	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.420	0.000	0.000	
	P=	55.00	39.01	21.07	3.59	-9.50	-5.58	-9.50	-9.50	-9.50	-7.60	36.36	
	IC=	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	
7650	M=	65.00	47.30	32.10	20.39	18.21	12.80	10.50	12.50	18.50	37.63	22.54	0.000
	C=	0.193	0.197	0.197	0.189	0.143	0.126	0.102	0.089	0.063	-0.017	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.414	0.000	0.000	
	P=	55.00	37.30	20.10	4.39	-0.79	-6.20	-9.50	-9.50	-9.50	16.63	17.54	
	IC=	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	
7800	M=	65.00	48.09	34.61	30.69	23.14	15.29	14.33	15.03	18.50	27.03	34.30	0.000
	C=	0.231	0.273	0.257	0.203	0.175	0.157	0.118	0.060	-0.110	0.022	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.399	0.000	0.000	
	P=	55.00	38.09	22.61	14.69	4.14	-3.71	-5.67	-6.97	-9.50	6.03	29.30	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
7950	M=	65.00	52.29	46.63	37.31	27.75	24.64	23.13	22.43	18.50	14.99	31.53	0.000
	C=	0.354	0.341	0.279	0.243	0.217	0.168	0.119	0.079	-0.019	-0.093	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.380	0.000	0.000	
	P=	55.00	42.29	34.63	21.31	8.75	5.64	3.13	0.43	-9.50	-6.01	26.53	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
8100	M=	65.00	63.47	54.91	43.65	38.77	35.54	32.72	26.58	18.50	22.99	-4.30	0.000
	C=	0.401	0.359	0.327	0.293	0.235	0.179	0.128	0.102	-0.076	-0.041	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.361	0.000	0.000	
	P=	55.00	53.47	42.91	27.65	19.77	16.54	12.72	4.58	-9.50	1.99	-9.30	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
8250	M=	65.00	67.54	60.42	56.30	51.36	46.79	38.96	28.78	18.50	11.50	14.47	0.000
	C=	0.365	0.366	0.372	0.319	0.254	0.196	0.162	0.147	-0.063	0.076	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.00	57.54	48.42	40.30	32.36	27.79	18.96	6.78	-9.50	-9.50	9.47	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
8400	M=	65.00	61.96	68.66	68.04	64.23	54.73	42.03	30.67	18.50	11.50	27.28	0.000
	C=	0.372	0.378	0.378	0.334	0.279	0.237	0.215	0.200	-0.008	-0.014	0.000	
	C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.302	0.019	0.000	
	P=	55.00	51.96	56.66	52.04	45.23	35.73	22.63	6.67	-9.50	-9.50	22.28	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	

Tabela 13 - continuação

8.550	H=	65.30	66.32	69.53	76.69	71.32	60.21	46.62	32.54	18.50	11.50	6.53	0.000
	C=	0.330	0.324	0.339	0.338	0.316	0.298	0.276	0.263	0.005	-0.076	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.267	-0.012	0.000	
	P=	55.30	56.32	57.53	60.69	52.32	41.21	26.62	10.54	-9.50	-9.50	3.53	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
8.700	H=	65.30	72.51	74.13	72.79	72.64	63.18	49.90	34.23	18.50	11.50	-4.26	0.000
	C=	0.356	0.352	0.324	0.322	0.356	0.334	0.316	0.334	0.059	0.014	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.228	0.003	0.000	
	P=	55.30	62.51	62.13	56.79	53.64	44.18	29.90	12.23	-9.50	-9.50	-9.26	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
8.850	H=	65.30	72.78	75.75	70.12	64.68	62.32	50.77	35.84	18.50	13.24	14.47	0.000
	C=	0.314	0.316	0.335	0.342	0.300	0.404	0.412	0.412	0.072	0.064	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.182	0.000	0.000	
	P=	55.30	62.78	63.75	54.12	45.68	43.32	30.77	13.84	-9.50	-7.76	9.47	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
9.000	H=	65.30	68.26	68.79	67.66	59.86	52.33	48.28	35.03	18.50	23.97	30.72	0.000
	C=	0.278	0.297	0.334	0.372	0.390	0.417	0.470	0.486	0.109	0.046	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.128	0.000	0.000	
	P=	55.30	58.26	56.79	51.66	40.86	33.33	28.28	13.03	-9.50	2.97	25.72	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
9.150	H=	65.30	61.06	60.24	58.59	55.36	45.91	36.68	30.96	18.50	35.96	33.47	0.000
	C=	0.280	0.294	0.335	0.382	0.430	0.455	0.490	0.550	0.019	0.025	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059	0.060	0.000	
	P=	55.30	51.06	48.24	42.59	36.36	26.91	16.68	8.96	-9.50	14.96	28.47	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
9.300	H=	65.30	57.03	50.94	48.04	44.73	39.80	28.73	20.25	87.52	26.00	41.21	0.000
	C=	0.313	0.318	0.343	0.392	0.447	0.502	0.535	0.566	0.1273	-0.026	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	47.03	38.94	32.04	25.73	20.80	8.73	-1.75	59.52	7.00	36.21	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.450	H=	65.30	54.91	44.91	37.19	32.62	27.67	23.47	84.99	85.20	92.66	22.53	0.000
	C=	0.355	0.361	0.375	0.408	0.464	0.526	0.577	0.260	0.249	0.248	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	44.91	32.91	21.19	13.62	8.67	3.47	62.99	57.20	71.66	17.53	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.600	H=	65.30	52.90	41.22	29.59	20.30	16.46	83.63	88.02	90.12	79.94	143.94	0.000
	C=	0.437	0.411	0.425	0.446	0.487	0.539	0.253	0.262	0.235	0.275	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	42.90	29.22	13.59	1.30	-2.54	63.63	66.02	62.12	58.64	138.94	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.750	H=	65.30	51.33	37.62	24.41	13.56	76.01	80.70	88.75	82.48	141.32	136.54	0.000
	C=	0.467	0.471	0.482	0.503	0.521	0.215	0.226	0.227	0.288	-0.013	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	41.33	25.62	8.41	-5.44	57.01	60.70	66.75	54.48	120.32	131.54	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.900	H=	65.30	49.74	34.56	21.65	79.82	77.49	81.14	75.20	139.88	139.26	138.70	0.000
	C=	0.534	0.537	0.549	0.556	0.233	0.209	0.190	0.251	-0.020	0.013	0.000	
	C=	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	P=	55.30	39.74	22.56	5.65	60.82	58.49	61.14	53.20	111.88	118.26	133.70	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabela 13 - continuação

14.550	M=	65.30	109.14	12.66	12.77	36.73	9.50	14.61	14.99	10.50	11.50	11.86	0.000
	C=	-0.048	0.199	0.128	0.161	-0.028	-0.146	-0.126	-0.200	-0.007	-0.117	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.000	0.000	0.189	0.007	0.000	
	Pa	55.30	99.14	0.66	-3.23	17.73	-9.50	-5.29	-7.01	-9.50	-9.50	6.86	
	IC=	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	
14.700	M=	65.30	20.50	62.89	40.90	44.49	9.50	17.61	23.36	10.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	-0.014	0.166	0.421	-0.008	0.027	-0.180	-0.166	-0.198	-0.087	-0.002	0.000	
	Ca	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.215	0.005	0.003	
	Pa	55.30	10.50	50.89	24.90	25.49	-9.50	-2.19	1.36	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	
14.850	M=	65.30	19.00	48.70	94.36	13.69	53.24	18.24	21.30	10.50	11.50	-4.50	0.000
	C=	0.350	0.208	0.030	0.267	0.123	-0.015	-0.222	-0.202	0.060	0.037	0.000	
	Ca	0.330	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.242	0.010	0.000	
	Pa	55.30	9.00	36.70	78.36	-5.31	34.24	-1.76	-0.70	-9.50	-9.50	-9.50	
	IC=	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO											
x/L=	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.
M=	65.30	126.97	124.01	177.20	179.86	172.46	182.87	193.61	194.20	202.39	217.15
C=	0.749	0.679	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
V=	0.030	0.000	0.000	0.025	0.083	0.032	0.015	0.010	0.574	0.049	0.004

Tabela 13 - continuação

6.2) Separação de coluna. (Vaporização).

A aplicação das equações (105), (106), (107) e (108), para determinação das condições de vaporização do líquido quando da ocorrência de separação de coluna, exige dados adicionais que nos permitam relacionar a altura Δy de líquido evaporado em função do tempo e da área disponível para vaporização.

Além destes valores, torna-se necessário o conhecimento do comprimento de tubulação submetido à pressão de vapor, para efeito de definição da área de vaporização. Este comprimento é muito difícil de determinar, visto caracterizarmos toda a região separada em apenas um ponto, i.é, na secção (i) correspondente.

No presente trabalho admitiremos o comprimento da região separada igual à distância entre duas secções consecutivas da tubulação e cujo centro coincide com a secção de estudo, conforme figura seguinte.

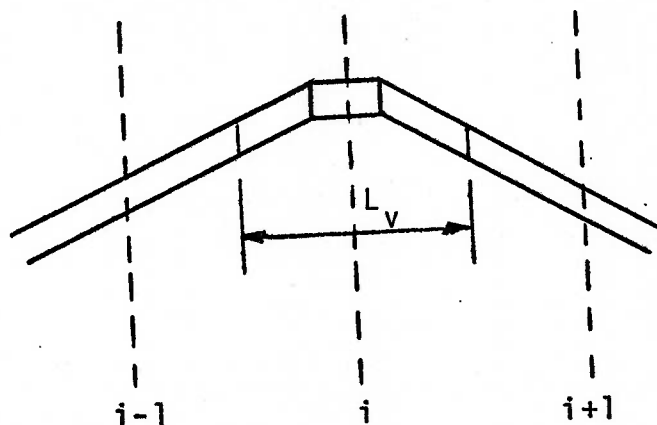


Fig. 29 - Caracterização da região separada.

Esta simplificação foi também usada por Provoost [19], revelando bons resultados.

As curvas apresentadas por Hooper e outros [4,5], nos possibilita obter a tabela a seguir, que relaciona o volume de líquido evaporado em função do tempo e da massa inicial de líquido.

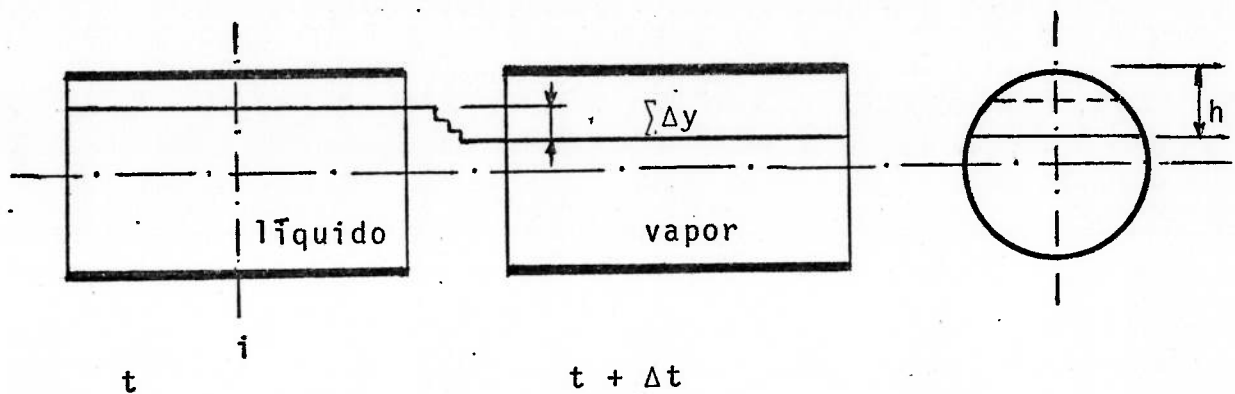


Fig. 30 - Vaporização entre dois instantes consecutivos.

O mecanismo de vaporização (fig. 4,5) nos permite concluir que mantida a pressão constante durante o processo, a temperatura e o volume específico também permanecerão constantes, o que simplifica sobremaneira o nosso estudo, reduzindo as equações a (105) e (106).

$$(105) \quad m_v(t) = \frac{P_r \int \Delta y u_v(t) \cdot \Delta t}{v_v(t)}$$

$$(106) \quad u_v(t) = \left[\frac{2}{\eta + 1} \frac{\bar{R}}{\bar{M}} T_v(t) \right]^{1/2}$$

E de (106), verificamos que mantida a temperatura T_v constante, a velocidade de escape das bolhas de vapor, u_v , mantém-se também constante.

A cada instante do transitório devemos determinar a quantidade de vapor produzido por unidade de tempo e volume, além do volume relativo de vapor β , para substituição nas equações da continuidade (76) e (82).

Para a fase líquida a função de vaporização F_v é dada por:

$\frac{\Delta y \cdot A}{M_0} \left(\frac{m^3}{kg} \cdot 10^{-9} \right)$	0	5,41	12,63	28,87	48,72	73,98	102,85	124,50
$t \text{ (S} \cdot 10^{-3} \text{)}$	20	30	40	50	60	70	80	86

Tabela 12 . Volume de líquido evaporado, em função do tempo.

Quando a secção fôr mantida sob pressão de vapor por um tempo superior a $86 \cdot 10^{-3}$ s, a curva pode ser aproximada por uma reta de equação

$$\frac{V_v}{M_0} = \frac{\Delta y A}{M_0} = -130 + 2886 t \quad (203)$$

$V_v (m^3 \cdot 10^{-9})$
 $t (s)$
 $M_0 (kg)$

Dos resultados medidos por Provoost e apresentados na ref. [19], podemos concluir que o valor $D/8$ caracteriza o limite máximo para a altura de vapor na região de separação.

Atê atingir aquêle valor, a produção de vapor é mais intensa que a condensação do mesmo, verificando-se um aumento da altura de vapor com conseqüente redução da altura de líquido.

Em $h \cong D/8$, atingimos a condição de equilíbrio entre a massa líquida evaporada e a massa de vapor condensada, seguindo-se, a partir deste instante,

$$\frac{\Delta m_v}{\Delta t} = 0 \quad (204)$$

$$(76) \quad F_v = \frac{\Delta m_v}{\Delta t} \cdot \frac{4}{(1-\alpha-\beta)\pi D^2 \rho_l L_v} \quad (205)$$

Para a fase de vapor,

$$(82) \quad F_v' = \frac{\Delta m_v}{\Delta t} \cdot \frac{4}{\beta \pi D^2 \bar{\rho}_v L_v} \quad (206)$$

A relação entre o volume relativo de vapor e a massa de vapor \bar{v} é imediata.

$$\beta = \frac{\bar{v}_v}{\bar{v}} \quad (207)$$

$$\Delta\beta = \frac{\Delta\bar{v}_v}{\bar{v}} \rightarrow \Delta\beta = \frac{\Delta m_v}{\rho_v \bar{v}} \quad (208)$$

Ao iniciar-se o processo de separação de coluna em dado ponto da tubulação, a massa evaporada é calculada através das equações (105) e (106), enquanto o volume relativo de vapor \bar{v} é através de (208).

Em instante subsequente a variação de massa evaporada é calculada a partir de (105) e (106), subtraída da massa total de vapor existente no instante anterior.

Durante o fechamento da coluna, em que as frentes líquidas separadas estão animadas de velocidades convergentes ao centro da região, temos a condensação do vapor existente, mantendo-se o seu volume específico inalterado e igual a $57,84 \text{ m}^3/\text{kg}$.

A massa condensada será calculada a partir das velocidades convergentes das frentes separadas, conforme esquema semelhante ao proposto por Streeter e Wylie [23,28].

Enquanto ocorre o fechamento da coluna, calculamos as velocidades das frentes separadas e mantendo a altura de vapor constante, calculamos a massa de vapor condensada por unida

de de tempo por:

$$\frac{\Delta m_v}{\Delta t} = \left[\frac{V(t + \Delta t) - V(t)}{\Delta t} \right] \rho_v \quad (209)$$

Obtendo um valor negativo, visto estarmos numa situação em que a cavidade está em processo de fechamento.

Com Δm_v calculada em (209), determinamos a variação do volume relativo de vapor e conseqüentemente o valor de β no instante de cálculo.

As funções de vaporização (205) e (206) são calculadas, durante o fechamento da coluna, a partir de (209).

As imprecisões de cálculo verificadas no método de Lax Wendroff apresentam-se novamente de forma mais pronunciada quando da ocorrência de separação de coluna, não permitindo a obtenção de resultados coerentes e que possibilitem a comparação com o método proposto.

Uma forma alternativa de aplicação do método é combiná-lo com o das características. Neste esquema, podemos calcular a região de golpe, pelo método das características e quando da separação de coluna, apenas nas secções de ocorrência, aplicar o método de Lax-Wendroff.

Esta alternativa foi aplicada a um problema em que se permite a separação de coluna em apenas um ponto da linha visando minimizar as imprecisões, revelando-se também inconveniente. Nesta situação, os cálculos por Lax-Wendroff indicam o fechamento da coluna, passando-se então à utilização apenas do método das características, que, por sua vez continua revelando valores de pressão de vapor na secção.

Alem disso, a proposta de se estudar o processo de fechamento das colunas pelo método das características revela-se inconveniente em virtude das imprecisões citadas e do comportamento diverso das alternativas propostas. No capítulo final retornaremos ao assunto.

6.3) Vãlvula de retenção como um sistema de proteção.

Como vimos anteriormente, escoamentos transitórios podem gerar situações, em que as sucessivas reflexões das perturbações de pressão no início e final da linha levam a situação em que podem ocorrer pressões ou gradientes de pressão intensos em pontos característicos, podendo levar à ruína da instalação.

Um dos elementos causadores destas situações extremas é o desaparecimento da região de separação de coluna quando da reunião das frentes separadas.

Trabalhos desenvolvidos em Delft [10,26] mostraram, inclusive experimentalmente que para linhas horizontais os efeitos da reunião das colunas separadas são irrelevantes no que concerne às eventuais pressões geradas.

Por outro lado, quando as linhas deixam de ser horizontais, aparecendo pontos altos ao longo das mesmas, o efeito da reunião das colunas deve ser considerado para dimensionamento.

Para contornar estes problemas e evitar superdimensionamento da parte estrutural do sistema, utilizam-se métodos variados de proteção da linha, tais como chaminês de equilíbrio, tanques amortecedores unidirecionais, reservatórios hidropneumáticos, etc. [9,16,28].

Além destes citados, lança-se mão também de vãlvula de retenção munida de furo central, ou de vãlvula de retenção cega, operando em conjunto com um sistema by-pass. O objetivo destes sistemas bastante simples de proteção é reduzir a velocidade de retorno de uma das colunas separadas através da introdução de perdas de carga locais, visando atenuar o golpe gerado pela reunião das colunas.

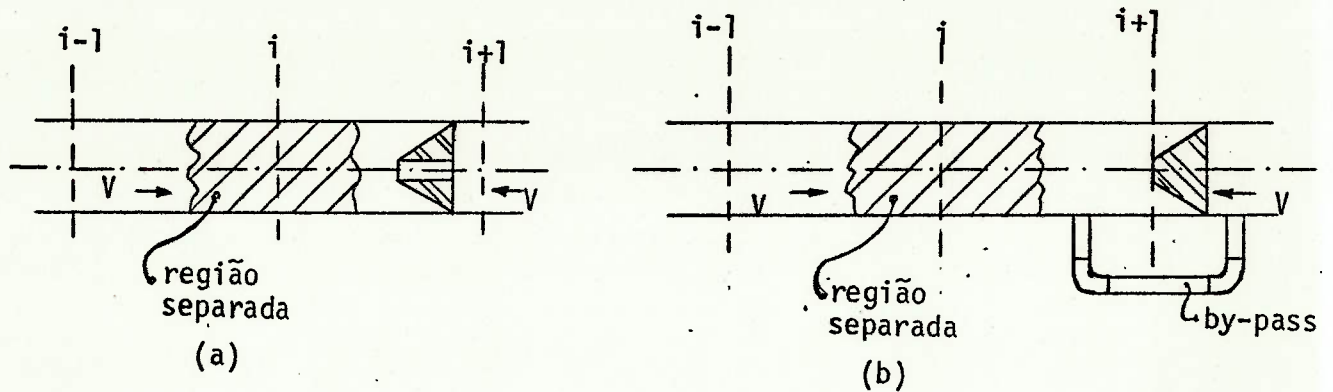


Fig. 31 - Válvula de retenção como proteção contra efeitos de reunião de colunas separadas.

Uma terceira montagem da válvula de retenção também possível. Neste caso localizámos a válvula no ponto $(i-1)$ da figura acima, permitindo a ocorrência da reunião das colunas sem qualquer interferência. A única função da válvula, então, seria a de evitar a propagação das perturbações para aquém da secção $(i-1)$ onde a mesma está localizada.

A válvula de retenção situada na linha deve ser equacionada como ponto extremo, inicial e final, visto sua localização dividir a tubulação em dois trechos distintos.

Para a solução analítica da presença da válvula de retenção iremos lançar mão do método das características, devido à impossibilidade de aplicação do método de Lax-Wendroff, conforme já citado anteriormente.

A válvula de retenção será locada conforme fig. 31 sendo os cálculos feitos apenas para a condição da válvula com furo. O dimensionamento do by-pass torna-se imediato, apenas igualando-se a perda de carga total introduzida pela válvula com furo à perda de carga que a forma e o comprimento do by-pass acarretam.

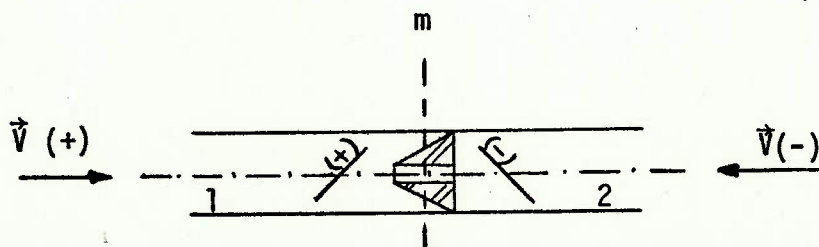


Fig. 32 - Estudo da válvula de retenção com furo.

Os cálculos e o equacionamento a serem por nós realizados serão levados a efeito a partir do posicionamento da válvula de retenção na secção (i+1), fora da região separada. A presença da válvula de retenção na tubulação será considerada apenas quando do escoamento invertido (-) em que a carga na face de jusante da válvula é maior que a carga de montante. Esta simplificação equivale a desprezar a perda de carga introduzida pela válvula aberta quando do escoamento normal.

O ponto \underline{m} da figura 32 define o final do primeiro trecho de tubulação e início do segundo, isto é, o primeiro trecho de tubulação é definido desde ao reservatório (1) até o ponto \underline{m} de instalação da válvula, enquanto o segundo trecho inicia-se em \underline{m} seguindo até o final da linha (NS).

Assim sendo, a linha inicialmente definida entre os extremos 1 e NS passa a ser definida entre 1 e \underline{m} , que chamaremos 1(i) e entre \underline{m} e NS, chamada 2(i). As variáveis H e Q, p.ex., inicialmente indexadas como H(i) e Q(i), agora o serão como H1(i) e Q1(i) e H2(i) e Q2(i).

O cálculo dos pontos interiores é feito segundo o apêndice A, enquanto as condições de contorno são definidas por:

$$\begin{aligned} Q1(\underline{m}) &= Q2(\underline{m}) \quad \text{ou} \\ Q1(NS) &= Q2(1) \end{aligned} \tag{210}$$

calculados por intermédio de (166).

As cargas H1(\underline{m}) e H2(\underline{m}), que correspondem a H1(NS) e H2(1) o serão através de:

$$H1(NS) = CP - B.Q1(NS) \tag{211}$$

$$H2(1) = CM + B.Q2(1) \tag{212}$$

Durante o escoamento em sentido normal, temos a igualdade (210) mantida, e as cargas no ponto \underline{m} são dadas por:

$$(A-19) \quad H1(m) = H2(m) = 0,5 (CP + CM) \quad (213)$$

Para utilização em (211), (212) e (213), CP e CM são calculados respectivamente por:

$$(A-20) \quad CP = H(i-1) + B \cdot Q(i-1) - R \left[Q(i-1) \cdot |Q(i-1)| \right]$$

$$(A.21) \quad CM = H(i+1) + B \cdot Q(i+1) - R \left[Q(i+1) |Q(i+1)| \right]$$

Quando do posicionamento da válvula

$$(A-15) \quad CP = H1(N) + B \cdot Q1(N) - R \left[Q1(N) \cdot |Q1(N)| \right]$$

$$(A-16) \quad CM = H2(2) - B \cdot Q2(2) + R \left[Q2(2) \cdot |Q2(2)| \right]$$

O problema do reservatório alimentando uma tubulação enquanto ao final da linha ocorre o fechamento de uma válvula deixa de ser conveniente para o estudo da válvula de retenção como elemento de proteção.

Para este propósito iremos tomar uma tubulação submetida as condições de contorno que seguem:

- início da linha:

bomba operando em regime permanente com as seguintes características para o ponto de máximo rendimento:

QR = 0,210 m ³ /s	(vazão)
HR = 65,5 mca	(carga)
TR = 784,5 N.m	(torque)
SNR = 1760 rpm	(rotação)
WRR = 88,3 N.m.s ²	(momento de inércia)
Z1(1) = 495 m	(cota)

- final da linha
reservatório mantido a nível constante

Z2(NS) = 525 m (cota)

As demais condições para o problema são:

A = 1200 m/s (celeridade)
L = 5000 m (comp. da tubulação)
D = 0.40 m (diâmetro)
F = 0,017 (coef.perda de carga)
N = 50 (subdivisões da linha)

O programa de computador proposto simula as condições de queda de fornecimento de energia elétrica a bomba, situação comum e que provoca sucessivas reduções de pressão na linha levando comumente a separação de coluna em um ou mais pontos do conduto.

A bomba está munida de válvula de controle à sua saída e que inicia o fechamento ao ser cortado o fornecimento de energia à mesma. As características de operação da bomba podem ser determinadas em cada instante do transitório a partir do conhecimento das condições de operação da mesma no ponto de máximo rendimento, a partir do equacionamento proposto em | 9,28 |.

Por interessar-nos apenas os efeitos introduzidos pela válvula de retenção na instalação, apresentamos apenas o resumo emitido pelo computador das condições máximas e mínimas para cada caso.

A nomenclatura usada nas listagens é:

CV - coeficiente de descarga da válvula de retenção com furo

DV - diâmetro da válvula de retenção (m)

DT - intervalo de tempo de cálculo (s)

TAU- coeficiente de fechamento da válvula

ALFA- rotação da bomba/rotação em regime permanente

MM - face de montante da válvula

MJ - face de jusante da válvula.

A condição de contorno na válvula acompanha o exposto no parágrafo 4.2, enquanto a condição de perda de carga no orifício efetuado na válvula de retenção é baseado no material encontrado em [22] para perdas singulares em reduções bruscas de seção.

A tabela 14 é composta por uma série de listagens para cada condição de diâmetro do furo da válvula de retenção. Inicialmente estão indicados os valores das variáveis envolvidas, além das cotas, EL, de cada uma das seções de cálculo da instalação.

Os valores extremos ocorridos no transitório sem proteção são indicadas na listagem seguinte, 12.a, podendo-se verificar a manutenção de valores máximos praticamente constantes em toda a linha, e indicando resultados variando de 2,44 a 18,2 vezes do valor da pressão em regime permanente.

De 14.b a 14.g encontramos os valores máximos para válvula de retenção instalada com diâmetros de furo variando de 0,0 a 0,1m em intervalos de 0,02m.

A tabela 14.h apresenta os valores para diâmetro de furo igual a 0,3m.

A figura 33 condensa os resultados da tabela 14. Nela estão traçadas as linhas de carga máxima para diâmetros do furo da válvula de retenção variando de 0 a 0,08m ($\frac{d}{D} = 0$ a $\frac{d}{D} = \frac{1}{5}$) além, do caso sem proteção.

Os cálculos foram efetuados até a relação $d/D = 0,95$ ($d = 0,38m$), situando-se os valores máximos entre as curvas $d=D/5$ e sem proteção.

Verifica-se que no trecho entre a bomba e a posição de instalação da válvula de retenção, para $d = 0$ e $d/D = 20$, as cargas coincidem com aquelas calculadas para regime permanente, enquanto que para o trecho entre o reservatório e a válvula a solução $d/D = 20$ é mais conveniente que a solução $d = 0$, pois apresenta valores menores de cargas máximas.

A partir da relação $d/D = 10$ as cargas ultrapassam as de regime permanente em toda a linha, verificando-se que as cargas

máximas tendem às da situação sem proteção, quanto menor for a relação d/D .

Na figura 34 temos indicado o comportamento da relação - entre pressões máximas e pressão em regime permanente para as relações d/D em que foram efetuados os cálculos, acompanhada da correspondência entre a solução de válvula com furo e a solução válvula sem furo e by-pass.

A reta contínua indica o valor da relação máxima P/P_0 na seção correspondente à de instalação da válvula de retenção para transitório sem proteção, enquanto a reta tracejada indica a mesma relação na face da válvula de controle.

Verificamos que a atenuação das pressões máximas é sensível, i.é., a aplicação do sistema de proteção é conveniente, tendo-se como valor limite $d/D = 0,25$, a partir do qual a relação P/P_0 na face da retenção passa a corresponder ao valor sem proteção, enquanto na válvula de controle temos valores maiores que na condição sem proteção.

Os cálculos levados a efeito para análise do desempenho da válvula de retenção como sistema de proteção revelam resultados interessantes.

O fechamento da válvula de controle ocorre em $t = 57,0$ s e como consequência da reflexão de onda em sua face, temos o desenvolvimento de uma cavidade de volume máximo $0,283 \text{ m}^3$ em $t = 70,75$ s e o seu fechamento gera, em $t = 93,166$ s, a pressão máxima igual a 2,448 vezes a de regime permanente, em $t = 96,083$ s.

Ao introduzirmos a válvula de retenção com $d \approx D/20$ ou $d = 0$, reduzimos a energia da coluna líquida em escoamento negativo, acarretando uma redução no volume máximo da cavidade e fazendo com que, ao reunirem-se as colunas separadas, as pressões sejam inferiores às de regime permanente.

Tal constatação é também apresentada por Marsden e Fox [14], que a partir do tratamento da região de separação com um modelo de escoamento em canal aberto, concluíram não serem significativos as pressões geradas quando do fechamento da coluna e responsabilizando a operação da válvula de controle pelos valores extremos atingidos.

Por outro lado, os experimentos conduzidos por Marsden e Fox não podem ser tomados como definitivos pois foram realizados numa instalação de recalque cujo ponto alto não estava submetido a qualquer carga estática. No caso, o líquido foi recolocado até o ponto alto, retornando em seguida ao nível de sucção.

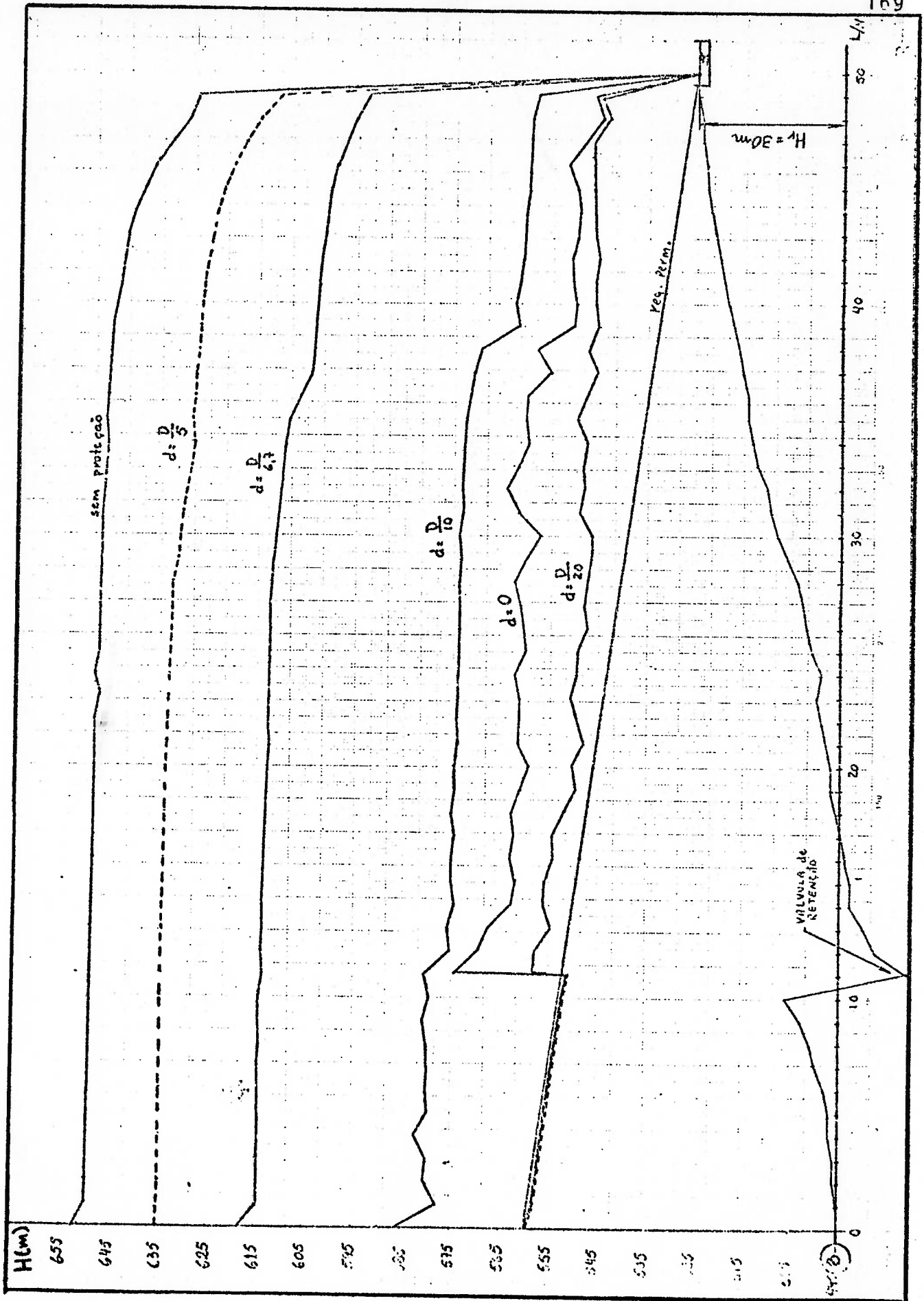


Fig.33 - Cargas ao longo da tubulação para válvula de retenção instalada.

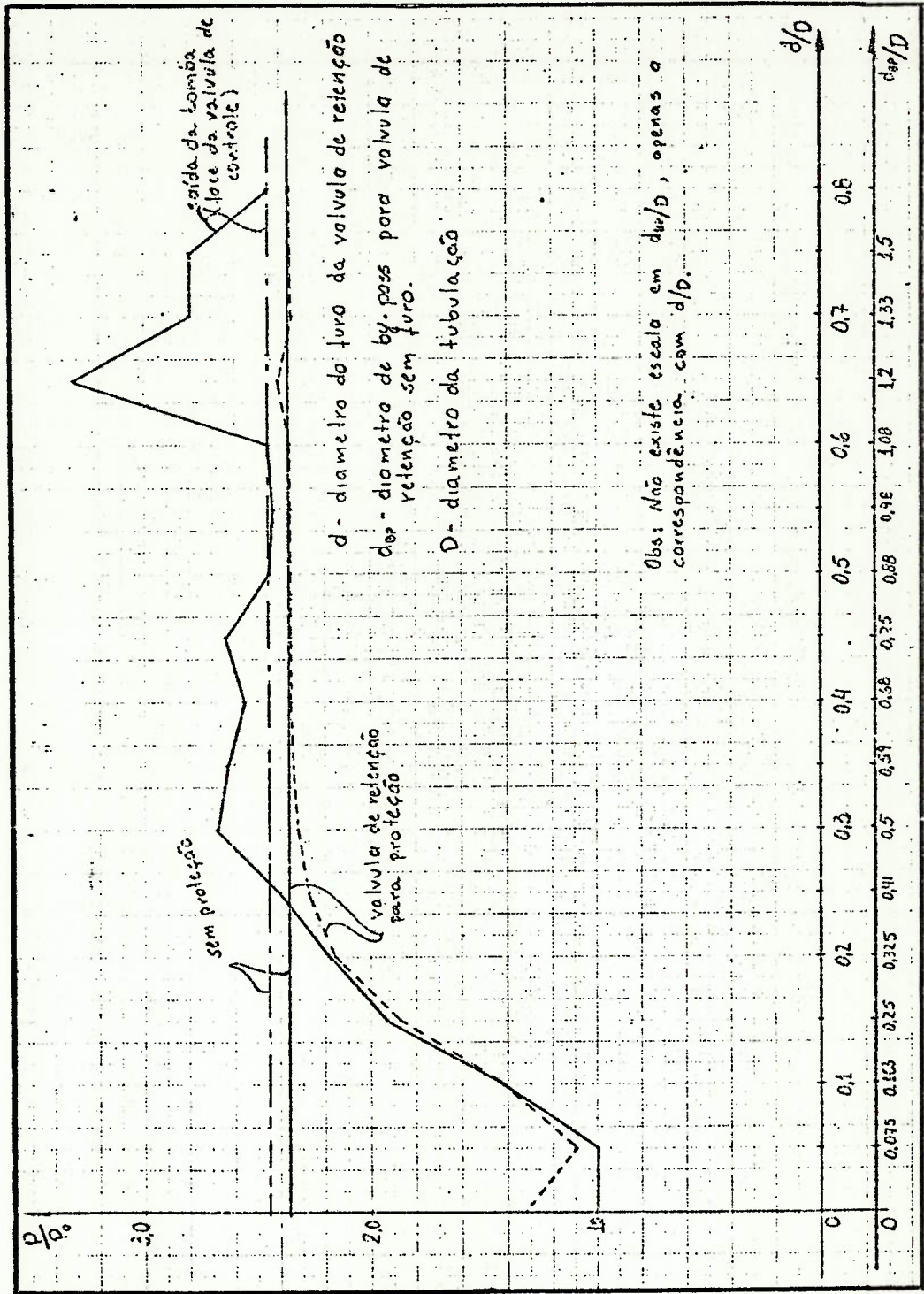


Fig.34 - Relação entre pressão e pressão em regime permanente em função da relação de diâmetro do furo da válvula e da tubulação.

```

A,XL,D,F,G,E,L,S,F,L,R,P,I,C,P,CV = 1200,00 5000,00 0,40 0,0170 9,0000 495,00 525,00 3,1010 0,00 0,00
OR,MR,IR,SUR,SRP,IMX,AKS,DVR = 0,210 65,500 80,000 1760,00 4,00 130,00 0,20 0,00
TOL,MY,DTAU,AL,ALO,ALOC,V,B = 0,0002 -9,5000 3,0000 1,0 1,0 1,0 1,0 0,00
L,L2,LL,N,IPP,HTAU,K,IL3, = 0 0 1 50 32 10 0 0
TAU
1,00000 1,00000 1,00000 1,00000 1,00000 1,00000 1,00000 1,00000 1,00000 1,00000 1,00000 0,85000
0,66000 0,48000 0,32000 0,21000 0,14000 0,08000 0,04000 0,00011
EL
495,000 497,000 496,000 496,000 497,000 497,000 497,000 498,000 498,000 501,000 503,000
516,000 518,000 498,000 480,000 491,000 493,000 493,000 493,000 474,000 495,000 496,000
497,000 497,000 498,000 499,000 500,000 499,000 501,000 501,000 502,000 503,000 504,000
504,000 508,000 509,000 510,000 510,000 513,000 514,000 514,000 514,000 515,000 516,000
517,000 518,000 519,000 520,000 521,000 522,000 523,000 523,000 524,000 524,000 525,000

```

Tabela 14 - Listagem dos valores máximos e mínimos das variáveis envolvidas no estudo de separação de coluna com válvula de retenção como proteção.

CV, DV, DT=0.		0.000		0.083																																																																			
GOLPE POTENCIAL HQ= 217.006																																																																							
P/P0=RELACAO PRESSAO/PRESSAO REG.PERMANENTE HCARGAS (M)																																																																							
P=PRESSOES (MCA) Q=VAZAOES (M3/S) C=VOLUME DA CAVIDADE (M3)																																																																							
TEMPO	TAU	ALFA	X/L=	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																																																									
0.000	1.000	1.000	H=	559.20	555.78	552.36	548.94	545.52	542.10	538.68	535.26	531.84	528.42	525.00																																																									
			P=	64.20	58.78	46.36	55.94	48.52	43.10	32.68	22.26	14.84	6.42	0.00																																																									
			Q=	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223																																																									
			C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000																																																									
			P/P0=	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000																																																									
COTA REFERENTE A MAXIMA CAVIDADE						506.000						COMPRIMENTO MAXIMO DA CAVIDADE (VOL/AREA)		6.040																																																									
TEMPO DE OCORRENCIA DA MAXIMA CAVIDADE						77.000						LCAVE		M= 11		M= 12		JC= 2																																																					
COTA DE INSTALACAO DA PROTECCAO						480.000						ABCISSA DE INSTALACAO DA PROTECCAO						1100.000																																																					
VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO SEM PROTECCAO																																																																							
X/L=		0.		.1		.2		.3		.4		.5		.6		.7		.8		.9		1.																																																	
HMAX=		652.18		649.79		649.30		649.15		648.43		647.88		647.19		646.78		646.62		636.79		525.00																																																	
HMIN=		485.50		487.50		496.50		483.50		487.50		489.50		496.50		503.50		507.50		512.50		525.00																																																	
PHAX=		157.18		192.79		143.30		156.15		151.43		148.88		141.19		133.78		127.62		116.79		0.00																																																	
PHIN=		-9.50		-9.50		-9.50		-9.50		-9.50		-9.50		-9.50		-9.50		-9.50		-9.50		0.00																																																	
VCAM=		0.2384		0.0030		0.7591		0.0036		0.0051		0.0015		0.0077		0.0328		0.0369		0.0064		0.0000																																																	
P/P0(MAX)=		2.448		2.599		3.091		2.791		3.121		3.454		4.320		6.010		8.600		18.192		1.000																																																	
P/P0(MIN)=		-0.148		-0.162		-0.205		-0.170		-0.196		-0.220		-0.291		-0.427		-0.640		-1.480		1.000																																																	
T(MAX PRESSAO)=						96.083						60.583						59.417						59.833						60.250						60.667						59.250						59.667						59.500						59.917						130.000					
T(MIN PRESSAO)=						129.917						129.583						130.000						118.083						129.667						114.500						129.083						129.750						130.000						130.000											
T(MAX CAV)=						87.000						87.000						77.000						100.250						100.917						112.083						101.750						106.333						94.833						95.333						0.000					
VOLUMES MAXIMOS																																																																							
0.2384		0.0174		0.0551		0.0131		0.0129		0.0030		0.0049		0.0162		0.0123		0.0271		0.7591		0.0012		0.0020		0.0010		0.0013		0.0036																																									
0.0010		0.0010		0.0015		0.0051		0.0019		0.0026		0.0014		0.0060		0.0015		0.0015		0.0015		0.0037		0.0040		0.0052		0.0077		0.0381																																									
0.0100		0.0038		0.0021		0.0328		0.0354		0.0066		0.0040		0.0040		0.0369		0.0112		0.0102		0.0119		0.0044		0.0064		0.0049		0.0022																																									
CARGAS MAXIMAS																																																																							
652.18		649.72		649.47		649.62		649.74		649.79		649.85		649.38		649.39		649.31		649.30		649.18		649.29		649.30		649.21		649.15																																									
648.75		648.78		648.63		648.69		648.43		648.31		648.37		647.97		648.28		647.88		647.76		647.50		647.16		647.21		647.19		647.08																																									
646.80		646.62		646.25		646.78		646.38		645.82		645.40		645.03		644.62		643.90		642.76		641.93		640.49		638.79		636.43		633.30																																									
629.36		628.32		525.00																																																																			

Tabela 14.a-continuação

HMIN(H)= -9.50

CV, DV, DT=0. 0.000 0.003
 GOLPE POTENCIAL HO= 217.006

P/PO=RELACAO PRESSAO/PRESSAO REC.PERMANENTE MCARGAS (M) P=PRESSOES (MCA) GEVAZDES (M3/S) C=VOLUME DA CAVIDADE (M3)

TEMPO TAU	ALFA X/L=	0.0	0.1	0.2	MM	MJ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.000	1.000	ME 559.20	555.78	552.36	551.67	551.67	548.94	545.52	542.10	538.68	535.26	531.84	528.42	525.00
		PE 60.20	58.78	46.36	71.67	71.67	55.94	48.52	43.10	32.68	22.26	14.84	6.42	0.00
		GE 0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223
		C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		P/PO=	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

COTA REFERENTE A MAXIMA CAVIDADE 506.000 COMPRIMENTO MAXIMO DA CAVIDADE (VOL/AREA) 2.880

TEMPO DE OCORRENCIA DA MAXIMA CAVIDADE 57.000 LCAVE 1 MME 11 ME 12 JCR 2

COTA DE INSTALACAO DA PROTECAO 480.000 ABCISSA DE INSTALACAO DA PROTECAO 1100.000

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO

VALVULA DE PROTECAO INSTALADA,DIAM. DO FURO DV= 0.0000

MAXIMA PERDA DE CARGA 80.90 MAXIMA VAZAO 0.000 TEMPO DE OCORRENCIA 29.917

X/L=	0.0	0.1	0.2	MM	MJ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
MMAX=	559.20	555.78	552.36	551.67	574.52	561.89	550.82	560.12	558.67	560.64	549.89	549.92	525.00
MMIN=	485.50	487.50	496.50	476.85	476.85	483.50	487.50	490.23	496.50	503.50	507.50	512.50	525.00
PMAX=	64.20	58.78	46.36	71.67	94.52	68.89	62.82	61.12	52.57	47.54	32.89	27.92	0.00
PMIN=	-9.50	-9.50	-3.15	-3.15	-7.50	-7.50	-8.77	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	0.00
VCAY=	0.0039	0.0020	0.3619	0.0000	0.0000	0.0007	0.0000	0.0000	0.0010	0.0077	0.0047	0.0021	0.0000
P/PO(MAX)=	1.000	1.000	1.000	1.000	1.319	1.232	1.295	1.418	1.612	2.140	2.217	4.350	1.000
P/PO(MIN)=	-0.148	-0.162	-0.205	-0.044	-0.044	-0.170	-0.196	-0.204	-0.291	-0.427	-0.640	-1.080	1.000

(MAX PRESSAO)= 0.000 0.417 0.833 0.917 29.917 29.583 30.667 31.083 31.583 31.917 30.917 30.917 31.33330.000

(MIN PRESSAO)=112.417 91.583130.000 13.167 13.583 13.333 3.917 23.667 50.750 64.083 64.583130.000

(MAX CAV) = 64.833 69.667 57.000 0.000 0.000 13.333 13.333 0.000 14.083 2.250 5.667 4.917 0.000

DIAMETRO DE BY-PASS PARA VALVULA SEM FURO E MESMOS VALORES MAXIMOS DE PRESSAO V.CAVIDADE, DRP= 0,000 (M)

VOLUMES MAXIMOS

0.0039	0.0005	0.0122	0.0020	0.0035	0.0020	0.0038	0.0058	0.0039	0.0158	0.3619	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005
0.0007	0.0003	0.0010	0.0003	0.0006	0.0000	0.0001	0.0005	0.0001	0.0004	0.0000	0.0004	0.0007	0.0003	0.0006
0.0081	0.0027	0.0035	0.0207	0.0077	0.0354	0.0066	0.0037	0.0018	0.0047	0.0050	0.0047	0.0038	0.0053	0.0021
0.0012	0.0020	0.0012	0.0000											0.0020

CARGAS MAXIMAS

559.20	558.51	557.83	557.15	556.46	555.78	555.09	554.41	553.73	553.04	552.36	551.67	574.52	569.82	567.56
561.89	563.21	562.30	562.94	561.23	559.82	561.92	561.74	561.87	562.63	562.63	560.75	561.11	562.85	560.18
562.06	560.41	561.76	559.80	560.64	560.08	559.61	560.89	559.34	560.89	559.34	559.83	549.10	549.92	551.63
548.84	544.88	546.59	545.00											

Tabela 14.b-continuaçao

CV, DV, DT= 2425-05 0.020 0.083		GOLPE POTENCIAL NOS 217,406													
P/PO=RELACAO PRESSAO/PRESSAO REG.PERMANENTE H=CARGAS (M) P=PRESSOES (MCA) Q=VAZIOES (M3/S) C=VOLUME DA CAVIDADE (M3)															
TEMPO TAU	ALFA X/LF	MJ	MH	MJ	MH	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
0.000	1.000	ME	559.20	555.78	552.36	551.67	551.67	548.74	545.52	542.10	538.64	535.26	531.84	528.42	525.00
		PZ	64.20	58.78	46.36	41.67	37.67	33.22	28.32	23.10	17.68	12.04	6.24	0.42	0.00
		QZ	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223
		CE	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		P/PO	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
COTA REFERENTE A MAXIMA CAVIDADE			506.000												
TEMPO DE OCORRENCIA DA MAXIMA CAVIDADE			56.917												
COTA DE INSTALACAO DA PROTECCAO			480.000												
			LCAV= 1 MM= 11 ME= 12 JCE= 2												
			AUCISSA DE INSTALACAO DA PROTECCAO 1100.000												
				VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITO(MIN)											
				VALVULA DE PROTECCAO INSTALADA,DIAM. DO FURO DVE= 0.0200											
				MAXIMA PERDA DE CARGA 63.83 MAXIMA VAZAO -0.018 TEMPO DE OCORRENCIA 30.500											
X/LF	0.0	0.1	0.2	MH	MJ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
HMAX	559.20	555.78	552.36	551.67	551.67	551.67	551.67	548.74	545.52	542.10	538.64	535.26	531.84		
HMIN	485.50	487.50	489.50	476.50	476.50	476.50	476.50	483.50	487.50	490.23	496.50	503.50	507.50		
HMAX	60.20	58.78	46.36	41.67	37.67	33.22	28.32	23.10	17.68	12.04	6.24	0.42	0.00		
HMIN	-0.50	-9.50	-9.50	-3.50	-3.15	-2.50	-2.50	-2.50	-2.50	-2.50	-2.50	-2.50	-2.50		
VCAV	0.0284	0.0047	0.3051	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
P/PO(MAX)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		
P/PO(MIN)	-0.168	-0.162	-0.205	-0.049	-0.044	-0.170	-0.176	-0.204	-0.201	-0.227	-0.240	-0.249	-0.269		
T(MAX PRESSAO)	0.000	0.417	0.833	0.917	30.500	30.167	30.250	29.250	32.093	32.417	32.000	21.250	130.000		
T(MIN PRESSAO)	22.917	80.167	82.000	83.833	13.167	13.563	13.333	3.917	25.500	26.000	26.417	34.083	130.000		
T(MAX CAV)	60.083	72.250	56.917	0.000	0.000	13.333	13.333	0.000	14.083	23.333	5.667	4.917	0.900		
				DIAMETRO DE BY-PASS PARA VALVULA SEM FURO E MESMOS VALORES MAXIMOS DE PRESSAO,V.CAVIDADE. DBP= 0.030 (M)											
VOLUMES MAXIMOS															
0.0284	0.0062	0.0136	0.0118	0.0148	0.0047	0.0095	0.0091	0.0057	0.0049	0.3051	0.0000	0.0000	0.0000		
0.0007	0.0003	0.0010	0.0003	0.0006	0.0000	0.0001	0.0005	0.0001	0.0074	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000		
0.0061	0.0027	0.0032	0.0207	0.0075	0.0354	0.0066	0.0037	0.0018	0.0047	0.0050	0.0047	0.0030	0.0021		
0.0012	0.0020	0.0012	0.0000												
CARGAS MAXIMAS															
559.20	558.51	557.83	557.15	556.46	555.78	555.09	554.41	553.73	553.04	552.36	551.67	550.98	550.29		
555.06	554.39	553.75	553.11	552.46	551.81	551.16	550.50	549.85	549.20	548.54	547.89	547.24	546.59		
549.11	548.47	547.84	547.21	546.56	545.91	545.26	544.61	543.96	543.31	542.66	542.01	541.36	540.71		
546.92	543.74	546.55	525.00												

Tabela. 14.c - continuacao

CV, DV, DT# S1GE-04		0.040		0.083															
GOLPE POTENCIAL NO= 217.406																			
P/P0=RELAÇÃO PRESSÃO/PRESSÃO REG.PERMANENTE HECARGAS (M)																			
TEMPO TAU	ALFA X/L#	0.0	0.1	0.2	MM	MJ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0					
0.000	1.000	HE	559.20	555.78	552.36	551.67	548.94	545.52	542.10	538.68	535.26	531.84	528.42	525.00					
		PE	64.20	58.78	46.36	71.67	55.94	48.52	43.10	32.68	22.26	14.84	5.42	0.00					
		DE	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223					
		C#	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000					
		P/P0#	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000					
COTA REFERENTE A MAXIMA CAVIDADE						COMPRIMENTO MAXIMO DA CAVIDADE (VOL/APELA)						1.287							
TEMPO DE OCORRENCIA DA MAXIMA CAVIDADE						10.750						LCAV# 1		MM# 11		ME# 12		JC# 2	
COTA DE INSTALACAO DA PROTECAO						480.000						AUCISSA DE INSTALACAO DA PROTECAO						1100.000	
VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO																			
VALVULA DE PROTECAO INSTALADA-DIAM. DO FURO DV# 0.0400																			
MAXIMA PERDA DE CARGA 28.90 MAXIMA VAZAO -0.055 TEMPO DE OCORRENCIA 41.000																			
X/L#	0.0	0.1	0.2	MM	MJ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0						
MNAX#	586.18	579.64	579.79	581.88	581.88	575.07	574.61	574.03	574.01	571.85	562.43	560.56	525.00						
MPINE	485.50	487.50	496.50	476.85	476.85	483.50	487.50	490.82	494.50	503.50	507.50	512.50	525.00						
PMAX#	91.18	82.64	73.79	101.88	101.88	82.07	77.61	75.03	68.01	58.85	45.43	38.56	0.00						
PMIN#	-9.50	-9.50	-9.50	-3.15	-3.15	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	0.00						
VCAV#	0.0000	0.0003	0.1618	0.0000	0.0000	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000						
P/P0(MAX)#	1.420	1.406	1.592	1.421	1.421	1.467	1.600	1.741	2.081	2.444	3.051	6.006	1.000						
P/P0(MIN)#	-0.148	-0.162	-0.205	-0.044	-0.044	-0.170	-0.196	-0.204	-0.229	-0.427	-0.640	-1.000	1.000						
T(MAX PRESSAO)# 81.667 81.833 82.250 82.333 82.333 82.333 61.333 61.417 60.167 60.583 60.917 59.750 59.917130.000																			
T(MIN PRESSAO)# 88.333 23.41726.583 13.167 13.167 13.583 13.533 88.583106.509124.607125.083123.833130.000																			
T(MAX CAV) = 88.333 23.000 10.750 0.000 0.000 13.333 13.333 0.000 89.167 23.333 5.867 4.917 0.000																			
DIAMETRO DE BY-PASS PARA VALVULA SEM FURO E MESMOS VALORES MAXIMOS DE PRESSAO, V. CAVIDADE. DdP# 0.065 (M)																			
VOLUMES MAXIMOS																			
0.0000	0.0002	0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0016	0.0008	0.0011	0.0013	0.1618	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005					
0.0007	0.0003	0.0010	0.0003	0.0006	0.0000	0.0001	0.0005	0.0001	0.0004	0.0004	0.0013	0.0008	0.0012	0.0017					
0.0081	0.0027	0.0032	0.0207	0.0077	0.0354	0.0066	0.0037	0.0049	0.0047	0.0056	0.0047	0.0038	0.0030	0.0015					
0.0018	0.0020	0.0012	0.0000																
CARGAS MAXIMAS																			
586.18	578.64	580.77	580.37	582.50	579.64	580.35	580.02	579.71	581.82	579.79	581.88	581.88	575.42	576.14					
575.07	575.16	574.57	575.30	574.53	574.61	574.04	574.33	574.22	574.14	574.03	574.07	573.92	574.21	574.01					
572.64	572.81	572.40	572.21	571.85	571.40	570.82	569.89	561.97	562.43	561.97	561.36	561.05	560.79	560.56					
559.63	559.21	558.27	525.00																

Tabela 14.d - continuação

CV. DV. DT# 205E-03 0.060 0.003
 GOLPE POTENCIAL M0= 217.006

P/PORELACAO PRESSAO/PRESSAO REG. PERMANENTE HCARGAS (M) P PRESSORES (MCA) Q VAZAOES (M3/S) C VOLUME DA CAVIDADE (M3)

TEMPO TAU	ALFA X/L#	0.0	0.1	0.2	MM	MJ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.000	1.000	M= 559.20	555.78	552.36	551.67	551.67	548.94	545.52	542.10	538.68	535.26	531.84	528.42	525.00
		P= 64.20	58.78	48.36	71.67	71.67	55.94	48.52	43.10	32.68	22.26	14.84	6.42	0.00
		Q= 0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223
		C= 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		P/PO= 1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

COTA REFERENTE A MAXIMA CAVIDADE 506.000 COMPRIMENTO MAXIMO DA CAVIDADE (VOL/AREA) 2.785

TEMPO DE OCORRENCIA DA MAXIMA CAVIDADE 71.417 LCAVE 1 MM= 11 M= 12 JCE 2

COTA DE INSTALACAO DA PROTECAO 480.000 ARCISSA DE INSTALACAO DA PROTECAO 1100.000

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO

VALVULA DE PROTECAO INSTALADA, DIAM. DO FURO OVE= 0.0600

MAXIMA PERDA DE CARGA 16.64 MAXIMA VAZAO -0.094 TEMPO DE OCORRENCIA 49.333

X/L#	0.0	0.1	0.2	MM	MJ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
HMAX	618.53	616.55	614.28	613.90	613.90	613.93	613.08	612.47	611.58	608.13	603.48	600.77	595.00
HMIN	485.50	487.50	496.50	472.41	475.98	483.50	487.50	489.50	496.50	503.50	507.50	512.50	525.00
PMAX	123.53	117.55	108.28	133.90	133.90	120.93	116.08	113.47	105.58	95.13	86.48	78.77	60.00
PMIN	-9.50	-9.50	-7.59	-4.02	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	0.00
VCAVE	0.0300	0.0056	0.3099	0.0000	0.0000	0.0011	0.0022	0.0018	0.0139	0.0201	0.0047	0.0052	0.0000
P/PO(MAX)	1.924	2.060	2.336	1.868	1.868	2.162	2.392	2.633	3.231	4.274	5.628	12.271	1.000
P/PO(MIN)	-0.148	-0.162	-0.205	-0.106	-0.056	-0.170	-0.195	-0.220	-0.291	-0.427	-0.640	-1.400	1.000

T(MAX PRESSAO)= 89.833 89.417 59.417 59.250 59.250 59.833 59.667 60.583 60.917 60.917 59.750 59.917 59.000
 T(MIN PRESSAO)= 126.000 103.333 126.833 105.500 98.833 124.500 120.500 120.333 128.333 129.167 129.750 130.000
 T(MAX CAV) = 67.917 81.417 71.417 0.000 0.000 105.833 118.000 118.833 96.250 98.583 5.667 128.917 0.000

DIAPETRO DE BY-PASS PARA VALVULA SEM FURO E MESHOS VALORES MAXIMOS DE PRESSAO, V. CAVIDADE, DBP= 0,100 (M)

	0.0300	0.0187	0.0443	0.0065	0.0092	0.0056	0.0051	0.0061	0.0047	0.0243	0.3499	0.0000	0.0000	0.0005	0.0011
VOLUMES MAXIMOS	0.0010	0.0003	0.0003	0.0024	0.0022	0.0007	0.0007	0.0045	0.0018	0.0037	0.0036	0.0027	0.0029	0.0139	0.0027
CARGAS MAXIMAS	0.0027	0.0021	0.0112	0.0000	0.0000	0.0074	0.0074	0.0074	0.0074	0.0074	0.0074	0.0074	0.0074	0.0074	0.0074
	618.53	614.66	614.44	614.44	614.26	614.55	614.31	614.47	614.21	614.33	614.28	613.90	613.90	614.02	613.94
	613.53	613.52	613.57	613.59	613.34	613.08	612.45	613.00	612.62	612.75	612.47	612.31	612.41	612.18	611.92
	611.06	610.59	609.98	609.20	608.13	606.27	604.31	603.98	603.56	603.48	602.97	602.50	601.75	601.36	600.77
	597.64	595.64	592.80	525.00											

Tabela 14.e - continuação

CV, DV, DTZ .PSIE=03 0.080 0.083
 CULPE POTENCIAL MW= 217.406

P/PO=RELACAO PRESSAO/PRESSAO REG.PERMANENTE MCARGAS (M) P=PRESSOES (MCA) Q=VAZUES (M3/S) C=VOLUME DA CAVIDADE (M3)

TEMPO	TAU	ALFA	X/L=	0.0	0.1	0.2	MM	MJ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.000	1.000	M=	559.20	555.78	552.36	551.67	551.67	548.94	545.52	542.10	538.68	535.26	531.84	528.42	525.00	
		P=	64.20	58.78	46.36	71.67	71.67	55.94	44.52	43.10	32.68	22.26	14.84	6.42	0.00	
		C=	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	
		C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
		P/PO=	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	

COTA REFERENTE A MAXIMA CAVIDADE 506.000 COMPRIMENTO MAXIMO DA CAVIDADE (VOL/AREA) 4.786

TEMPO DE OCORRENCIA DA MAXIMA CAVIDADE 74.417 LCAVE 1 MME 11 ME 12 JCE 2

COTA DE INSTALACAO DA PROTECAO 480.000 ABSCISSA DE INSTALACAO DA PROTECAO 1100.000

VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITOPIO

VALVULA DE PROTECAO INSTALADA-DIAN, DO FURU DV= 0.0600

MAXIMA PERDA DE CARGA 7.72 MAXIMA VAZAO -0.115 TEMPO DE OCORRENCIA 55.167

X/L=	0.0	0.1	0.2	MM	MJ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
MMAE	635.10	634.78	634.79	634.54	639.54	634.47	133.60	633.00	631.55	624.53	626.95	622.63	525.00
MMNE	485.50	487.50	496.50	479.85	478.85	483.50	187.50	484.50	494.50	503.50	507.50	512.50	525.00
PMAXE	140.10	137.78	128.79	154.54	154.54	141.47	136.80	134.00	125.55	115.53	109.95	100.63	0.00
PMINE	-9.50	-9.50	-9.50	-3.15	-3.15	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	0.00
VCAVMS	0.1772	0.0057	0.6014	0.0000	0.0000	0.0007	0.0010	0.0006	0.0011	0.0243	0.0103	0.0035	0.0000
P/PO(MAX)=	2.182	2.344	2.778	2.156	2.156	2.529	2.819	3.109	3.842	5.190	7.409	15.676	1.000
P/PO(MIN)=	-0.108	-0.162	-0.205	-0.044	-0.044	-0.170	-0.196	-0.220	-0.291	-0.427	-0.600	-1.480	1.000

(MAX PRESSAO)= 60.250 60.667 59.417 59.250 59.250 59.833 60.000 60.667 60.583 59.750 59.500 59.917130.000
 T(MIN PRESSAO)=129.503128.250130.000 13.167 13.167127.417127.633127.107126.633129.333130.000129.647130.000
 T(MAX CAV) =103.917 86.500 74.417 0.000 0.000 13.333126.917126.333 67.650131.033101.543 76.750 0.000

DIAMETRO DE BY-PASS PARA VALVULA SEM FURU E MESMOS VALORES MAXIMOS DE PRESSAO,V.CAVIDADE, DBP=0.130 (M)

VOLUMES MAXIMOS

0.1772	0.1021	0.0748	0.0099	0.0130	0.0057	0.0055	0.0134	0.0105	0.0498	0.6014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0005
0.0007	0.0004	0.0013	0.0003	0.0006	0.0010	0.0009	0.0007	0.0012	0.0025	0.0006	0.0019	0.0041	0.0044	0.0643	0.0011
0.0081	0.0028	0.0056	0.0207	0.0243	0.0354	0.0066	0.0104	0.0071	0.0103	0.0784	0.0767	0.0151	0.0056	0.0033	0.0031
0.0032	0.0020	0.0014	0.0000												

CARGAS MAXIMAS

635.00	634.50	634.75	634.82	634.78	634.77	634.74	634.70	634.79	634.54	634.54	634.46	634.49	634.51
630.47	634.18	634.26	633.95	633.98	633.80	633.54	633.46	633.29	633.46	633.00	633.00	632.94	634.48
630.68	629.83	628.77	629.25	628.53	628.38	628.12	627.65	627.30	629.95	628.33	625.45	624.82	623.66
618.23	615.20	610.94	525.00										

Tabela 14.f - continuação

CV, DV, DT = 213E-02		0.100		0.083																			
GOLPE POTENCIAL M0E 217.406																							
P/PO=RELAÇÃO PRESSAO/PRESSAO REG.PERMANENTE M=CARGAS (M)																							
P=PRESSOES (MCA)																							
G=VAZUES (M ³ /S)																							
C=VOLUME DA CAVIDADE (M ³)																							
TEMPO TAU	ALFA X/LF	0.0	0.1	0.2	MM	MJ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0									
0.000	1.000	H=	559.20	555.78	552.36	551.67	551.67	548.94	545.52	542.10	538.68	535.26	531.84	528.42									
		P=	64.20	59.78	46.36	71.67	59.64	47.52	43.10	52.60	27.26	14.84	6.42	0.00									
		G=	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223	0.223									
		C=	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000									
		P/PO=	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000									
COTA REFERENTE A MAXIMA CAVIDADE						506.000						COMPRIMENTO MAXIMO DA CAVIDADE (VOL/AHEA)		5.477									
TEMPO DE OCORRENCIA DA MAXIMA CAVIDADE						76.000						LCAVE		1		MP= 11		ME 12		JC= 2			
COTA DE INSTALACAO DA PROTECAO						480.000						ABCESSA DE INSTALACAO DA PROTECAO						1100.000					
VALORES MAXIMOS OCGRIDOS NO TRANSITORIO																							
VALVULA DE PROTECAO INSTALADA-DIAM. DO FURO DV= 0.1000																							
MAXIMA PERDA DE CARGA																							
3.58																							
MAXIMA VAZAO																							
-0.123																							
TEMPO DE OCORRENCIA																							
55.167																							
X/LF	0.0	0.1	0.2	MM	MJ.	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0										
MMAXE	689.18	604.24	642.91	642.62	642.62	642.66	611.67	641.39	639.36	638.47	636.78	646.95	525.00										
MMINE	485.50	487.50	486.50	475.52	475.77	463.50	437.50	489.50	476.50	503.50	507.50	512.50	525.00										
PMAXE	154.14	187.24	136.91	162.62	162.62	149.66	144.67	142.39	133.36	125.47	119.78	124.95	0.00										
PMINE	-9.50	-9.50	-9.50	-3.48	-4.23	-9.50	-9.50	-4.50	-9.50	-9.50	-9.50	-9.50	0.00										
VCAVME	0.1930	0.0230	0.6883	0.0000	0.0060	0.0049	0.0045	0.0045	0.0112	0.0330	0.0370	0.0000	0.0000										
P/PO(MAX)	2.401	2.505	2.953	2.269	2.676	2.966	3.304	4.081	5.637	8.072	19.463	1.000	1.000										
P/PO(MIN)	-0.148	-0.162	-0.205	-0.062	-0.059	-0.170	-0.196	-0.220	-0.291	-0.427	-0.640	-1.469	1.000										
TCMAX PRESSAO)= 95.750																							
95.417																							
60.167																							
59.833																							
60.250																							
60.667																							
60.583																							
59.667																							
59.500																							
92.000																							
130.000																							
130.000																							
130.000																							
125.917																							
94.171																							
0.000																							
0.000																							
112.167																							
113.000																							
128.503																							
126.917																							
104.333																							
103.917																							
94.000																							
0.000																							
DIAMETRO DE BY-PASS PARA VALVULA SEM FURO E MESMOS VALORES MAXIMOS DE PRESSAO,V.CAVIDADE.																							
DBPE																							
0.165																							
(M)																							
VOLUMES MAXIMOS																							
0.1930	0.0397	0.0072	0.0092	0.0045	0.0230	0.0126	0.0096	0.0124	0.0427	0.6883	0.0000	0.0000	0.0001	0.0007	0.0020								
0.0060	0.0013	0.0047	0.0123	0.0026	0.0089	0.0017	0.0048	0.0035	0.0130	0.0035	0.0048	0.0026	0.0010	0.0024	0.0045								
0.0127	0.0045	0.0041	0.0316	0.0112	0.0691	0.0066	0.0037	0.0053	0.0330	0.0456	0.0243	0.0081	0.0104	0.0070	0.0072								
CARGAS MAXIMAS																							
649.14	648.62	648.40	647.91	644.64	644.24	643.18	642.94	642.92	642.76	642.91	642.62	642.62	642.70	642.75	642.62								
642.66	642.28	642.21	642.10	642.19	641.87	641.78	641.75	641.75	641.74	641.39	640.64	641.04	640.74	639.88	639.36								
639.04	638.78	638.49	638.23	638.47	638.30	637.95	637.58	637.13	636.78	636.08	637.21	641.35	643.08	646.95	645.13								
646.17	645.65	618.22	525.00																				

Tabela 14.g - continuação

CV, UV, UT = 350E+00 0.300 0.003		GOLPE POTENCIAL P= 217.406	
P/PO=RELACAO PRESSAO/INCLSSAC REF. PERMANENTE RECARGAS (M)			
TEMPO	TAU	ALFA X/L=	0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0
0.000	1.000	1.000	559.20 555.78 552.36 551.67 551.67 547.52 542.10 538.68 535.26 531.84 528.42 525.00
			PE 64.20 54.78 46.58 71.67 71.67 55.94 44.52 43.10 32.68 22.26 14.84 6.42 0.00
			OE 0.223 0.223 0.223 0.223 0.223 0.223 0.223 0.223 0.223 0.223 0.223 0.223 0.223
			CE 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
			P/PO= 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000
COTA REFERENTE A MA IPA CAVIDADE 506.000			
COMPRIMENTO MAXIMO DA CAVIDADE (VOL/AREA) 6.002			
TEMPO DE OCORRENCIA DA MAXIMA CAVIDADE 77.000			
LCAVE 1 MM= 11 H= 12 JC= 2			
COTA DE INSTALACAO DA PROTECAO 440.000			
ARCISSA DE INSTALACAO DA PROTECAO 1100.000			
VALORES MAXIMOS OCORRIDOS NO TRANSITORIO			
VALVULA DE PROTECAO INSTALADA, DIAM. DO FURO DV= 0.3000			
MAXIMA PERDA DE CARGA 0.02 MAXIMA VAZAO -0.130 TEMPO DE OCORRENCIA 55.167			
X/L=	0.0	0.1	0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0
MM	674.65	649.74	652.62 649.13 649.10 648.38 647.84 651.23 646.73 644.57 638.74 525.00
MM	485.50	487.50	496.50 470.78 470.78 485.50 487.50 489.50 486.50 503.50 507.50 512.50 525.00
MM	170.65	152.74	146.62 169.13 169.13 156.10 151.38 148.84 145.23 133.73 127.57 116.74 0.00
MM	-9.50	-9.50	-9.50 -9.22 -9.22 -9.50 -9.50 -9.50 -9.50 -9.50 -9.50 -9.50 0.00
MM	0.2341	0.0029	0.7592 0.0000 0.0000 0.0025 0.0015 0.0005 0.0011 0.0243 0.0055 0.0065 0.0000
MM	2.798	2.599	3.163 2.360 2.791 3.120 3.493 4.444 8.008 6.547 14.185 1.000
MM	-0.158	-0.102	-0.205 -0.129 -0.170 -0.196 -0.220 -0.291 -0.427 -0.640 -1.460 1.000
TI MAX PRESSAO=127.750 60.583 98.917 61.063 61.063 59.833 60.250 60.607125.250 59.667 59.500 59.017130.000			
T (MIN PRESSAO)=130.000129.417130.000106.500117.633118.250114.500129.667130.000130.000129.000129.000			
T (MAX Cav) = 70.750 84.333 77.000 0.000 0.000117.750115.000111.750101.333 94.667110.333 0.000			
DIAMETRO DE BY-PASS PARA VALVULA SEM FURO F MESMOS VALORES MAXIMOS DE PRESSAO, V. CAVIDADE, DUPE= 0.502 (M)			
VOLUMES MAXIMOS			
0.2341	0.0276	0.0424	0.0060 0.0092 0.0029 0.0292 0.0395 0.0602 0.0334 0.3592 0.0060 0.0000 0.0006 0.0005 0.0000
0.0025	0.0004	0.0010	0.0015 0.0014 0.0015 0.0003 0.0006 0.0075 0.0079 0.0005 0.0007 0.0008 0.0011 0.0010 0.0011
0.0191	0.0058	0.0121	0.0074 0.0243 0.0305 0.0066 0.0037 0.0030 0.0055 0.0247 0.0075 0.0163 0.0052 0.0065 0.0075
0.0123	0.0079	0.0171	0.0000
CAPAS MAXIMAS			
0.74.65	655.21	654.26	650.67 652.20 649.74 649.81 649.34 649.35 649.26 652.62 649.13 649.13 649.25 649.20 649.10
649.10	648.71	655.33	648.58 648.27 648.38 648.27 648.33 647.92 648.24 647.84 647.70 647.46 647.10 656.49 651.23
645.09	647.70	646.33	646.20 646.73 646.52 645.77 645.34 644.96 644.57 644.85 642.71 641.88 640.44 638.74 636.39
633.25	639.45	633.92	525.00

Tabela 14.h - continuação

CAPITULO VII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA O FUTURO

O trabalho se propõe a um apanhado geral sobre as condições de escoamento transitório, com enfoque particular para o problema de separação das colunas líquidas em condutos sob pressão.

Neste capítulo apresentamos as conclusões a que chegamos ao longo de sua preparação, como também sugestões para futuros trabalhos, a partir da experiência adquirida no transcorrer da dissertação.

7.1) Conclusões

Este estudo oferece uma forma não convencional de análise do comportamento da região de separação quando da ocorrência de baixas pressões em pontos característicos da instalação.

A limitação do estudo às características de desenvolvimento, crescimento e colapso das bolhas de gás nas condições de separação é uma simplificação restritiva do fenômeno.

O gás presente na coluna líquida recalçada é insuficiente para preencher a cavidade gerada ao longo do tempo.

Justifica-se, a partir dos dados condensados na tabela 3, o estudo da influência da vaporização da massa líquida quando a mesma é submetida à pressão de vapor.

O método de vaporização proposto, flash, é o que mais se adapta às condições de produção de vapor a partir do líquido saturado, durante o fenômeno de separação de coluna.

A solução de problemas transitórios em computadores digitais pode ser feita com aproximação de primeira ordem para o termo dissipativo, pois o custo da solução é o mais baixo e a precisão dos resultados é boa se comparada aos outros métodos.

Para problemas de separação de coluna o método das características é pouco conveniente em virtude do aparecimento de uma terceira reta característica.

O método Lax-Wendroff apresenta a possibilidade de dedução de equações mais convenientes, verificando-se a presença explícita de todas as variáveis de interesse ao problema.

A aplicação deste método é bastante simples, porém leva à imprecisão nos resultados em virtude da operação entre valores de ordem de grandeza dispares. Tais imprecisões impedem conclusões e avaliações comparativas com o método das características.

A reunião das colunas separadas, em linhas não horizontais, pode levar a gradientes de pressão intensos, além de gerar pressões acima daquelas de regime permanente, exigindo assim sistemas de proteção à linha.

O estudo das condições de fechamento da cavidade a partir de método semelhante ao proposto em 6.1, não é conveniente devido à incompatibilidade aparente dos métodos. Tal afirmação é passível de confirmação a partir da purificação dos resultados emitidos pelo método Lax-Wendroff.

A válvula de retenção pode ser usada como elemento de proteção contra os efeitos da reunião das colunas separadas. Como melhor solução temos a válvula munida com furo central de diâmetro igual a 1/20 do diâmetro da linha.

7.2) Sugestões

Devem ser estudadas as condições de aplicação do método de Lax-Wendroff em que as imprecisões de cálculo não detur-

pelos resultados obtidos, visto ser este método muito conveniente para o estudo da região de separação.

As condições de comportamento da massa líquida evaporada deve ter seu enfoque estendido às condições de condensação, caso não seja possível compatibilizar os métodos sugeridos em 6.2.

Os resultados obtidos a partir da aplicação do método das características ao problema da válvula de retenção como proteção, apesar de terem sido repetidos para condições de operação diversas e diferentes perfis de linha, devem ser confirmados experimentalmente. Tal confirmação não foi possível em virtude da não obtenção de verba junto ao CNPq.

Ao estudarmos problemas em que a separação de coluna ocorre, um dos maiores problemas é a definição do comprimento da cavidade gerada. Esta definição revela-se mais importante ainda quando devemos determinar a produção de vapor em função da variação de volume.

Justifica-se então o estudo teórico e, principalmente experimental do comportamento geométrico da cavidade.

Por fim, devido à redução da celeridade na região separada, torna-se difícil estudar comprimentos relativamente longos de cavidade, pois a quase totalidade dos métodos numéricos estabelece o intervalo de tempo de estudo como função da celeridade e do comprimento de cada trecho da tubulação.

Apesar do método Lax-Wendroff permitir variações da celeridade, torna-se difícil compatibilizar as regiões de golpe e separação, devido ao fato de que, na região de separação o intervalo de tempo de estudo ser tanto maior quanto menor for a celeridade.

Sugere-se então subdividir a região de separação em uma segunda malha, tal que permita obter um intervalo de tempo compatível com da região de golpe.

APÊNDICE A .

MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

A aplicação do método das características para a solução de equações hiperbólicas de derivadas parciais, pode ser feita de formas distintas. Para o caso em que a inclinação das retas características é constante, $\frac{dx}{dt} = \pm a$ encontramos o método

do intervalo de tempo especificado e que será aplicado para as equações (119) a (122). Um segundo método, do intervalo de tempo especificado com interpolações será aplicado às equações (123) a (126), enquanto o método da malha de características não será aplicado.

Para as equações (119) a (122):

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \pm a \quad (\text{A-1})$$

a aplicação do método das características revela-se bastante simples. Divide-se a linha em N intervalos iguais de comprimento Δx .

$$\Delta x = \frac{L}{N} \quad (\text{A-2})$$

A celeridade, calculada com (3) ou (3), (6), (16) possibilita conhecermos o intervalo de tempo Δt .

$$(\text{A-1}) \quad \Delta t = \frac{\Delta x}{a} \quad (\text{A-3})$$

Com Δx e Δt , podemos montar uma malha, chamada malha característica, conforme fig. A-1.

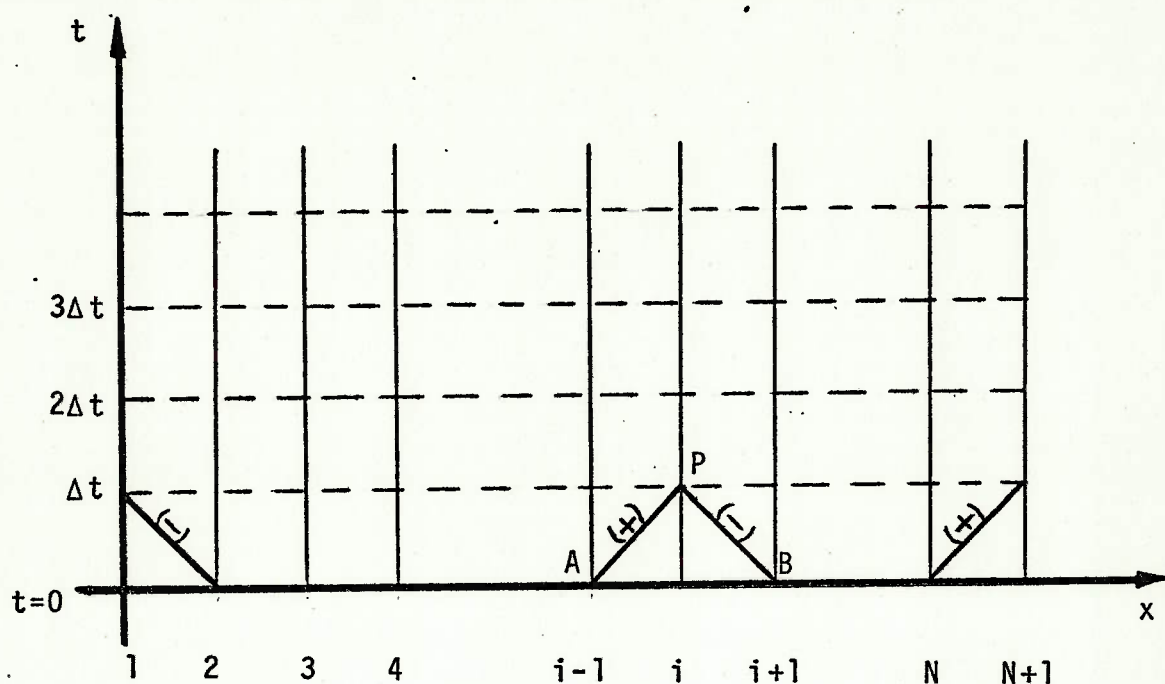


Fig.(A-1)- Malha característica.

Os cálculos se iniciam com o conhecimento prévio das condições de escoamento para $t = 0$, em todos os $(N+1)$ pontos da linha, i.é, escoamento em regime permanente; ou carga constante e vazão nula quando de abertura de válvula fechada.

Conhecidas as condições em A e B (fig.A-1), determinam-se H (ou p) e Q(ou V) no instante Δt , no ponto P, através da solução simultânea das equações integradas representadas em (136). e válidas sobre as retas de inclinação $(+a)$ ou $(-a)$.

Sistematizando e substituindo os extremos de integração de (136), teremos:

$$(H_p - H_a) + \frac{a}{Ag} (Q_p - Q_A) + \frac{f \Delta x}{2g DA^2} Q_A |Q_A| = 0 \quad (A-4)$$

Válida sobre

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = + a \quad (A-5)$$

$$-(H_p - H_B) + \frac{a}{Ag} (Q_p - Q_B) + \frac{f \Delta x}{2g DA^2} Q_B |Q_B| = 0 \quad (A-6)$$

Válida sobre

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = -a \quad (A-7)$$

As demais equações, para integração de segunda ordem, são especificadas de forma análoga. Tais equações são válidas apenas entre os pontos 2 e N da malha da figura A-1. Para os pontos 1 e N+1 valem respectivamente (A-4) e (A-6) além das condições de contorno externas.

Codificando para solução por computador, teremos; para aproximação de primeira ordem:

$$H(i,t) = H(i \mp 1, t - \Delta t) \mp \left[Q(i,t) - Q(i \mp 1, t - \Delta t) \right] \frac{a}{Ag} \mp \frac{f \Delta x}{2g DA^2} \left[Q(i \mp 1, t - \Delta t) \cdot |Q(i \mp 1, t - \Delta t)| \right] \quad (A-8)$$

Com aproximação de segunda ordem:

$$H(i,t) = H(i \mp 1, t - \Delta t) \mp \left[Q(i,t) - Q(i \mp 1, t - \Delta t) \right] \frac{a}{Ag} \mp \frac{f \Delta x}{8g DA^2} \left\{ \left[Q(i,t) + Q(i \mp 1, t - \Delta t) \right] \cdot \left[|Q(i,t) + Q(i \mp 1, t - \Delta t)| \right] \right\} \quad (A-9)$$

Os sinais superiores que aparecem nas equações (A-8) e (A-9) valem para a reta de inclinação (+a), enquanto os inferiores valem para a reta de inclinação (-a).

Com a substituição de variáveis proposta por Streeter e Wiley [23, 28]

$$\frac{a}{Ag} = B \quad ; \quad \frac{f \Delta x}{2g DA^2} = R \quad (A-10)$$

$$H(i,t) = HP \quad , \quad H(i,t-\Delta t) = H \quad (A-11)$$

$$Q(i,t) = QP \quad , \quad Q(i,t-\Delta t) = Q \quad (A-12)$$

A equação (A-8) apresenta a forma final:

$$(A-8) \quad HP(i) = H(i-1) - B \left[QP(i) - Q(i-1) \right] - R \left[Q(i-1) | Q(i-1) \right] \quad (A-13)$$

$$(A-8) \quad HP(i) = H(i+1) + B \left[QP(i) - Q(i+1) \right] + R \left[Q(i+1) | Q(i+1) \right] \quad (A-14)$$

Tomando

$$CP = H(i-1) + B \cdot Q(i-1) - R \left[Q(i-1) | Q(i-1) \right] \quad (A-15)$$

$$CM = H(i+1) - B \cdot Q(i+1) + R \left[Q(i+1) | Q(i+1) \right] \quad (A-16)$$

Teremos:

$$(A-13) \quad HP(i) = CP - B \cdot QP(i) \quad (A-17)$$

$$(A-14) \quad HP(i) = CM + B \cdot QP(i) \quad (A-18)$$

então:

$$HP(i) = \frac{1}{2} (CP + CM) \quad (A-19)$$

e $QP(i)$ pode ser determinado por (A-17) ou (A-18).

Devemos observar que o cálculo de $HP(i)$ torna-se bastante fácil de executar, pois tal variável independe das condições de escoamento no tempo t de cálculo, sendo função apenas das cargas e vazões no instante anterior, $(t - \Delta t)$.

A aproximação de 2ª ordem para as equações em questão exigem a utilização de um método específico de cálculo pois agora temos as cargas $HP(i)$ em função da segunda potência das vazões $QP(i)$, o que não permite simples substituições como em (A-17), (A-18).

$$(A-9) \quad HP(i) = H(i-1) - B [QP(i) - Q(i-1)] - \frac{R}{4} \{ [QP(i) + Q(i-1)] \cdot [QP(i) + Q(i-1)] \} \quad (A-20)$$

$$(A-9) \quad HP(i) = H(i+1) + B [QP(i) - Q(i+1)] + \frac{R}{4} \{ [QP(i) + Q(i+1)] \cdot [QP(i) + Q(i+1)] \} \quad (A-21)$$

Nota-se nestas equações ser mais fácil calcular inicialmente $QP(i)$, para em seguida determinar $HP(i)$. Para eliminar $HP(i)$, basta-nos subtrair (A-21) de (A-20).

$$E = [H(i+1) - H(i-1)] + B [2 \cdot QP(i) - Q(i+1) - Q(i-1)] + \frac{R}{4} \{ [QP(i) + Q(i+1)] \cdot [QP(i) + Q(i+1)] + [QP(i) + Q(i-1)] \cdot [QP(i) + Q(i-1)] \} \quad (A-22)$$

A obtenção da raiz da equação (A-22), i.é, o valor de $QP(i)$ que conduz a $E = 0$, será feita pelo método de Newton - Raphson | 3|.

A-1) Método de Newton - Raphson

O conhecimento aproximado da raiz da equação (A-22) permite a aplicação do método através de aproximações sucessivas.

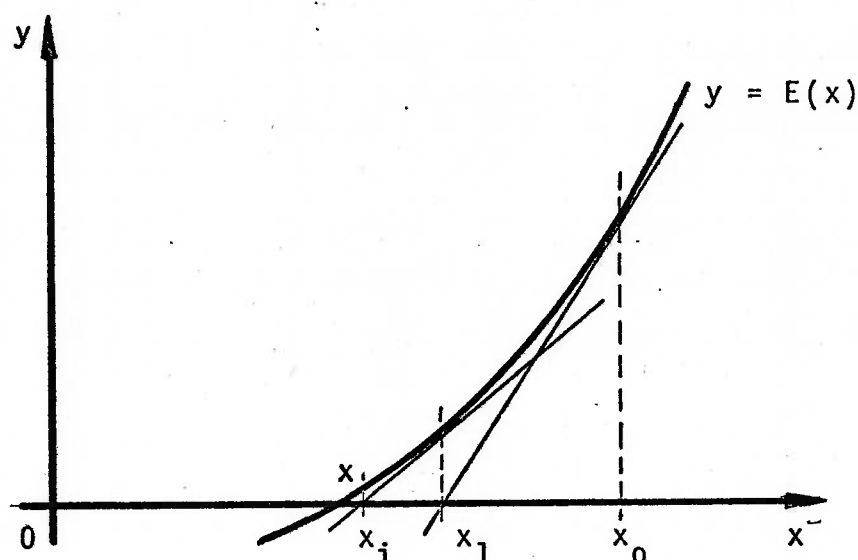


Fig.(A-2) - Método de Newton - Raphson.

Seja $y = E(x)$ e conhecido o ponto (x_0, y_0) da curva, próximo à raiz da equação $y = E(x)$, podemos admitir inicialmente x_0 como raiz, evidentemente com um erro sensível com relação à raiz verdadeira.

Se tomarmos a derivada de $E(x)$, $E'(x)$, no ponto (x_0, y_0) teremos uma reta que, cortando o eixo $y = 0$, irá nos oferecer um novo ponto, x_1 , cujo valor como raiz de $E(x)$ é mais preciso que o inicial x_0 .

Repetindo a operação, tomando agora $E'(x)$ no ponto (x_1, y_1) , teremos uma nova raiz x_2 mais conveniente que x_1 .

A repetição contínua do processo irá nos fornecer o valor correto para a raiz. Devemos entender por correto aquele valor de x_i que nos afasta da solução exata, x , de um valor tolerável dentro da precisão aceita nos cálculos.

O método deixa de ser conveniente, i.é., deixa de ser convergente a uma solução única quando existem pontos de inflexão

na curva representativa da função $E(x)$, o que não ocorre no presente caso.

Formalizando matematicamente o método, temos:

$$E'(x_0) = \frac{E(x_0)}{x_0 - x_1} \quad (\text{A-23})$$

$$x_1 = x_0 - \frac{E(x_0)}{E'(x_0)} \quad (\text{A-24})$$

A verificação da aceitação ou não de x_1 como solução é feita por:

$$\Delta x = x_1 - x_0 = \frac{E(x_0)}{E'(x_0)} \quad (\text{A-25})$$

comparando-se Δx com a tolerância fornecida previamente.

Um diagrama de blocos para a rotina de cálculo a ser usada com Tol = tolerância para desvio da solução correta resume-se a:

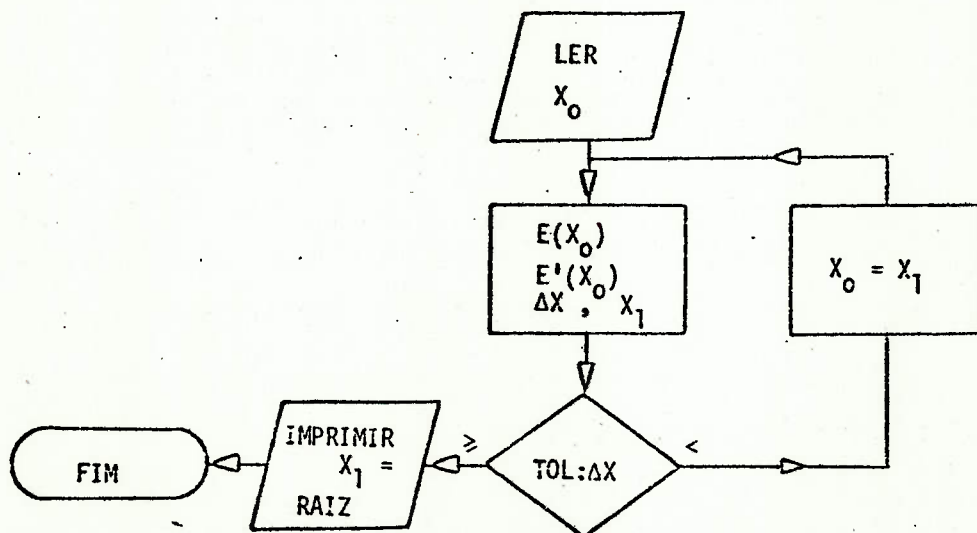


Fig.(A-3) - Diagrama de blocos para Método de Newton - Raphson.

Aplicando as equações (A-23), (A-24), (A-25) ao nosso problema específico, temos:

$$E' = \frac{dE}{d(QP)} = 2B + \frac{R}{4} \left[2|QP(i)+Q(i+1)| + 2|QP(i)+Q(i-1)| \right] \quad (A-26)$$

$$E' = 2B + \frac{R}{2} \left[|QP(i)+Q(i+1)| + |QP(i)+Q(i-1)| \right] \quad (A-27)$$

O valor de $QP(i)$ para início dos cálculos é tomado como a extrapolação linear dos valores de $QP(i)$ nos dois instantes imediatamente anteriores: $t-\Delta t$, $t-2\Delta t$ de cálculo.

$$QP(i,t) = 2 \cdot QP(i,t-\Delta t) - QP(i,t-2\Delta t) \quad (A-28)$$

Após o primeiro cálculo de $QP(i)$ tomaremos para novas aproximações:

$$QP_{(k+1)}(i,t) = QP_{(k)}(i,t) + \Delta QP \quad (A-29)$$

com

$$\Delta QP = \frac{E(QP)}{E'(QP)} \quad (A-30)$$

A-2) Método do intervalo de tempo especificado com interpolações.

A não simplificação das equações:

$$\begin{array}{l} (124) \\ (126) \end{array} \quad \frac{dx}{dt} = v \pm a \quad \text{para} \quad \frac{dx}{dt} = \pm a \quad (A-31)$$

impede a utilização do método das características na forma apresentada no início deste apêndice. Isto nos obriga a lançar mão dos demais métodos já citados, para contornar o fato de não mais termos retas características, mas, curvas características, pois V é função de x e t .

Para este método, adotaremos apenas a aproximação de primeira ordem visto objetivarmos comparar resultados.

As equações (123) a (126) submetidas a integração de primeira ordem, segundo (130) e (131) serão resolvidas numericamente aproximando-se as curvas (V^{\pm}) a retas. Outras formas de aproximação podem também ser tomadas, porém não o serão neste trabalho.

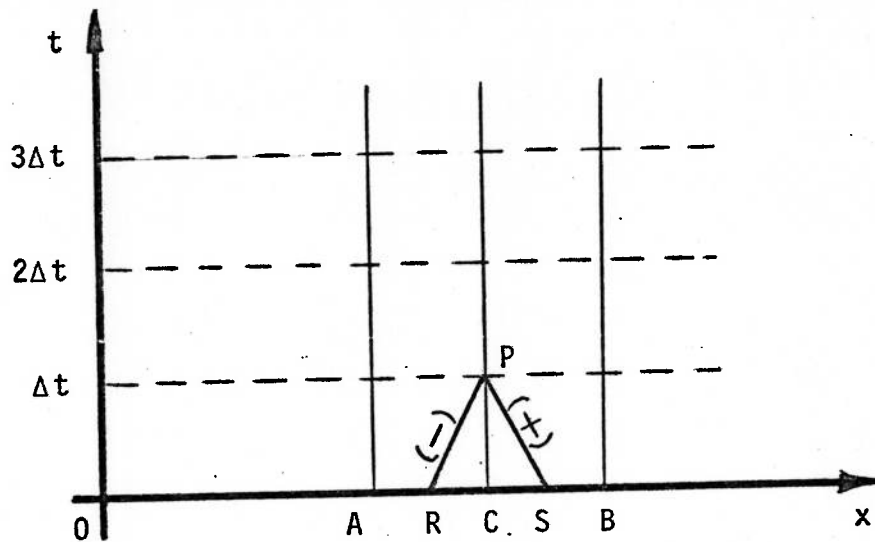


Fig.(A-4) - Método do intervalo de tempo especificado com interpolação.

Os índices R e S que comparecem nas equações a seguir caracterizam o valor da variável no respectivo ponto (ver fig.A-4)

$$(123) \quad H_p = H_R - \frac{a_R}{gA} (Q_p - Q_R) - \frac{a_R f \Delta t}{2g DA^2} Q_R \cdot |Q_R| + \frac{Q_R}{A} \Delta t \sin \theta \quad (A-32)$$

$$(124) \quad \Delta x = (V_R + a_R) \Delta t \quad (A-33)$$

$$(125) H_p = H_s + \frac{a_s}{gA} (Q_p - Q_s) + \frac{a_s \cdot f \cdot \Delta t}{2g DA^2} Q_s \cdot |Q_s| + \frac{Q_s}{A} \Delta t \operatorname{sen} \theta \quad (\text{A-34})$$

$$(126) \Delta x = (V_s - a_s) \Delta t \quad (\text{A-35})$$

A aplicação do método baseia-se, como já visto, no conhecimento das condições iniciais no tempo $t = 0$ em todos os pontos da tubulação.

Assim, podemos determinar por interpolação as vazões em R e S.

$$\frac{x_c - x_B}{x_c - x_A} = \frac{Q_c - Q_B}{Q_c - Q_A} \quad (\text{A-36})$$

$$\text{Com } \frac{\Delta t}{\Delta x} = \delta \quad \text{e} \quad \frac{\Delta t}{\Delta x} a = \zeta \quad (\text{A-37})$$

$$\text{e } x_c - x_B = x_c - x_A = \Delta x \quad (\text{A-38})$$

$$Q_R = \frac{Q_c - \zeta_R (Q_c - Q_A)}{1 + \frac{\delta}{A} (Q_c - Q_A)} \quad (\text{A-39})$$

$$Q_S = \frac{Q_c - \zeta_S (Q_c - Q_B)}{1 - \frac{\delta}{A} (Q_c - Q_B)} \quad (\text{A-40})$$

$$H_R = H_c - \left(\frac{Q_R \cdot \delta}{A} + \zeta_R \right) (H_c - H_A) \quad (\text{A-41})$$

$$H_S = H_c + \left(\frac{Q_S \cdot \delta}{A} - \zeta_S \right) (H_c - H_B) \quad (\text{A-42})$$

Para manter a mesma sistemática do método anterior, de:

$$(A-32) \quad H_p = CP - B_R \cdot Q_p \quad (A-43)$$

$$(A-33) \quad H_p = CM + B_S Q_p \quad (A-44)$$

$$\text{onde} \quad B_R = \frac{a_R}{gA} \quad ; \quad B_S = \frac{a_S}{gA} \quad (A-45)$$

$$R_R = \frac{a_R f \Delta t}{2g D A^2} \quad ; \quad R_S = \frac{a_S f \Delta t}{2g D A^2} \quad (A-46)$$

$$C_c = \frac{\Delta t}{A} \quad ; \quad \text{tg } \theta = \left[\frac{Z(I+1) - Z(I)}{\Delta x} \right] ; \quad \text{sen } \theta = \text{STG}(I) \quad (A-47)$$

$$CP = H_R + B_R \cdot Q_R (1 + C_c \text{sen } \theta - R_R |Q_R|) \quad (A-48)$$

$$CM = H_R - B_S \cdot Q_S (1 - C_c \text{sen } \theta - R_S |Q_S|) \quad (A-49)$$

Neste método torna-se perfeitamente possível o cálculo de transitórios num conduto submetido à celeridade variável, o que não é permitido pelo método anterior. Seu inconveniente está na atenuação introduzida na propagação das ondas de pressão durante os cálculos, i.é, fazendo com que a sobre ou subpressão geradas num extremo da linha, ao atingir o outro extremo se apresenta com valores à quem daqueles que ocorreriam apenas devido à dissipação no escoamento [9,28]

Recomenda-se então, para contornar o problema, a utilização de um grande número de secções de cálculo, como também a manutenção de um valor de ζ próximo à unidade.

Mantendo a convenção anterior (A-10) a (A-12) e com

$$Q(R, t-\Delta t) = QR(i) ; \quad Q(S, t-\Delta t) = QS(i) \quad (A-50)$$

$$H(R, t-\Delta t) = HR(i) ; \quad H(S, t-\Delta t) = HS(i) \quad (A-51)$$

$$\zeta_R = CSIR \quad ; \quad \zeta_S = CSIS \quad (A-52)$$

temos, para o cálculo de HP(i) e QP(i,t)

$$(A-39) \quad QR(i) = \{ Q(i) - CSIR [Q(i) - Q(i-1)] \} \cdot \left[1 + \frac{DEL}{A} [Q(i) - Q(i-1)] \right]^{-1} \quad (A-53)$$

$$(A-40) \quad QS(i) = \{ Q(i) - CSIR [Q(i) - Q(i+1)] \} \cdot \left[1 + \frac{DEL}{A} [Q(i) - Q(i+1)] \right]^{-1} \quad (A-54)$$

$$(A-41) \quad HR(i) = H(i) - \left[\frac{QR(i) \cdot DEL}{A} + CSIR \right] \cdot [H(i) - H(i-1)] \quad (A-55)$$

$$(A-42) \quad HS(i) = H(i) + \left[\frac{QS(i) \cdot DEL}{A} - CSIS \right] \cdot [H(i) - H(i+1)] \quad (A-56)$$

$$(A-43) \quad HP(i) = CP - BR \cdot QP(i) \quad (A-57)$$

$$(A-44) \quad HP(i) = CM + BS \cdot QP(i) \quad (A-58)$$

$$(A-48) \quad CP = HR(i) + BR \cdot QR(i) \left[1 + CC \cdot STG(i) - RR |QR(i)| \right] \quad (A-59)$$

$$(A-49) \quad CM = HS(i) - BS \cdot QS(i) \left[1 - CC \cdot STG(i) - RS \cdot |QS(i)| \right] \quad (A-60)$$

Verifica-se que o cálculo de $Q_R, Q_S, H_R, H_S, CP, CM$, depende apenas dos valores das variáveis envolvidas no instante $t-\Delta t$, semelhante ao método inicialmente sugerido, método do intervalo de tempo especificado, sem interpolações.

O valor da vazão $QP(i)$ é obtido igualando-se (A-57) e (A-58)

$$QP(i) = \frac{CP - CM}{BR + BS} \quad (A-61)$$

com $HP(i)$ calculado através de (A-57) ou (A-58).

Para utilização no capítulo III, sendo a celeridade admitida constante, teremos:

$$BR = BS \quad (A-62)$$

$$RR = RS \quad (A-63)$$

As equações precedentes são válidas para os pontos internos da tubulação, i.é, $I = 2, N$. Os pontos 1, NS, respectivamente ao início e final da tubulação, valem respectivamente as equações (A-58) e (A-57).

APÊNDICE B

MÉTODO DE LAX - WENDROFF

As equações (182), (184), (186) são as formas conservativas das equações da continuidade para a massa líquida e de vapor respectivamente, e a equação do movimento para o meio heterogêneo estudado, nas chamadas formas conservativas.

A forma geral destas equações é:

$$(178) \quad \frac{\partial}{\partial t} Q_{j1} + \frac{\partial}{\partial x} Q_{j2} = Q_{j3} \quad ; \quad (B-1)$$

$$Q_{jk} = f(p, V, \beta)$$

$$j, k = 1, 2, 3$$

A aplicação do operador [12;21]

$$\int_{x-\Delta x}^{x+\Delta x} dx \int_t^{t+\Delta t} dt \quad (B-2)$$

à equação (B-1), conduz-nos a :

$$\begin{aligned} & \int_{x-\Delta x}^{x+\Delta x} [Q_{j1}(x', t+\Delta t) - Q_{j1}(x', t)] dx' + \int_t^{t+\Delta t} [Q_{j2}(x+\Delta x, t') - \\ & - Q_{j2}(x-\Delta x, t')] dt' = \int_{x-\Delta x}^{x+\Delta x} \int_t^{t+\Delta t} Q_{j3}(x', t') dx' dt' \end{aligned} \quad (B-3)$$

$$\text{Onde: } \left[(x - \Delta x) < x' < (x + \Delta x) \right] \quad (\text{B-4})$$

$$\left[(t - \Delta t) < t' < t \right] \quad (\text{B-5})$$

Para solução numérica, as integrais de (B-3) serão aproximadas por somatórias.

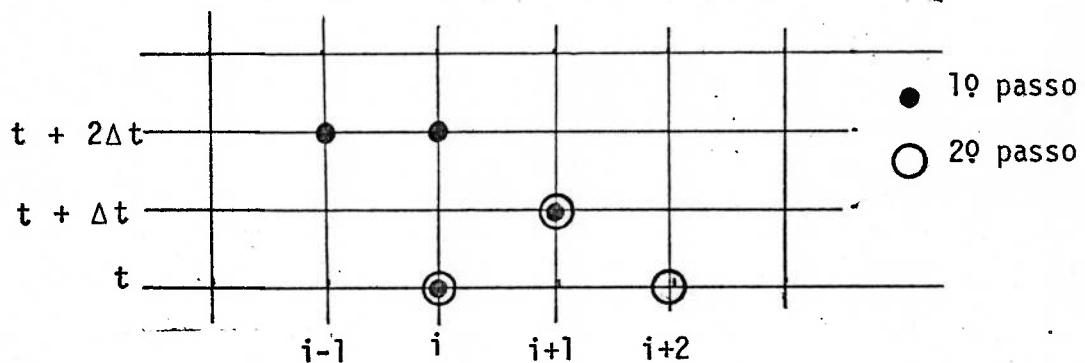


Fig. B1 - Método de Lax-Wendroff

Vários esquemas de diferenças finitas podem ser impostos, evidentemente em função da ordem de aproximação desejada, gerando precisões diversas de resultados.

Lax [11] propõe um esquema de cálculo, por ele chamado de primeiro passo, tal que as integrais de (B-3) são aproximadas por:

$$\int_t^{t+\Delta t} Q_{j2}(x \pm \Delta x, t') dt' = \Delta t Q_{j2}(x \pm \Delta x, t) + O(\Delta t^2) \quad (\text{B-6})$$

$$\int_{x-\Delta x}^{x+\Delta x} Q_{j1}(x', t) dx' = \Delta x \left[Q_{j1}(x - \Delta x, t) + Q_{j1}(x + \Delta x, t) \right] + O(\Delta x^2) \quad (\text{B-7})$$

$$\int_{x-\Delta x}^{x+\Delta x} Q_{j1}(x', t + \Delta t) dx' = 2\Delta x \cdot Q_{j1}(x, t + \Delta t) + O(\Delta x^3) \quad (\text{B-8})$$

Este método de cálculo baseia-se, como o método das ca

racterísticas aplicado anteriormente (Apêndice A), no conhecimento prévio das condições iniciais do problema, i.é, das condições de pressão e velocidade em todas as secções de cálculo, no instante $t = 0$.

Verifica-se que, em (B-6), (B-7) e (B-8), apenas a variável Q_{j1} é função de $(t + \Delta t)$, podendo então ser determinada explicitamente de forma semelhante às aproximações de primeira ordem introduzidas no capítulo IV.

A aplicação deste esquema de cálculo revela o inconveniente de provocar atenuação na propagação das ondas de pressão que ocorrem no meio durante o transitório. Esta atenuação implica numa redução das pressões máximas desenvolvidas no transitório.

A verificação destes inconvenientes levou Lax, agora associado a Wendroff, a propôr um esquema de cálculo com aproximação de segunda ordem, chamado de segundo passo. Neste processo, os limites de integração para (B-3) serão:

$$\left[x < x' < x + 2\Delta x ; t < t' < t + 2\Delta t \right] \quad (B-9)$$

Com tais limites, as integrais de (B-3) são aproximadas por:

$$\int_x^{x+2\Delta x} Q_{j1}(x', t) dx' = 2\Delta x Q_{j1}(x + \Delta x, t) + O(\Delta x^3) \quad (B-10)$$

$$\int_x^{x+2\Delta x} Q_{j1}(x', t+2\Delta t) dx' = 2\Delta x Q_{j1}(x+\Delta x, t+2\Delta t) + O(\Delta x^3) \quad (B-11)$$

$$\int_t^{t+2\Delta t} Q_{j2}(x, t') dt' = 2\Delta t Q_{j2}(x, t+\Delta t) + O(\Delta t^3) \quad (B-12)$$

$$\int_t^{t+2\Delta t} Q_{j2}(x+2\Delta x, t') dt' = 2\Delta t Q_{j2}(x+2\Delta x, t+\Delta t) + O(\Delta t^3) \quad (B-13)$$

Verifica-se que para a aplicação do segundo passo ($t + 2\Delta t$) há necessidade do conhecimento das condições em $(t+\Delta t)$, i.é., é necessária a utilização do primeiro passo, desde que são conhecidos apenas as condições no instante t .

Assim, para a aplicação do método de Lax-Wendroff [12], devemos nos utilizar das seguintes equações de diferenças finitas, já incluída a integração do membro da direita de (B-3).

- primeiro passo ($t + \Delta t$)

$$\begin{aligned}
 Q_{j1}(x + \Delta x, t+\Delta t) = & \frac{1}{2} \left[Q_{j1}(x + 2\Delta x, t) + Q_{j1}(x, t) \right] - \\
 & - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[Q_{j2}(x + 2\Delta x, t) - Q_{j2}(x, t) \right] + \\
 & + \frac{\Delta t}{2} \left[Q_{j3}(x + 2\Delta x, t) + Q_{j3}(x, t) \right] \quad (B-14)
 \end{aligned}$$

- segundo passo ($t + 2\Delta t$)

$$\begin{aligned}
 Q_{j1}(x, t + 2\Delta t) = & Q_{j1}(x, t) - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[Q_{j2}(x + \Delta x, t+\Delta t) - \right. \\
 & - Q_{j2}(x - \Delta x, t+\Delta t) \left. \right] + \Delta t \left[Q_{j3}(x + \Delta x, t + \Delta t) + \right. \\
 & \left. + Q_{j3}(x - \Delta x, t + \Delta t) \right] \quad (B-15)
 \end{aligned}$$

As equações acima são verificadas consistentes com a equação diferencial (B-1), como também estáveis, [12,21] desde que:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{a + |V|} \quad e \quad (B-16)$$

$$\Delta t < \frac{D}{f} |V| \quad (B-17)$$

As equações de derivadas parciais (182), (184), (186) serão agora expressas em termos das diferenças finitas (B-14) e (B-15) para posterior integração.

Iniciando por (182) temos, para a região de separação:

$$Q_{11} = (1 - \alpha - \beta) \left[1 + \frac{p}{a^2 \rho_l} \right] \quad (\text{B-18})$$

$$Q_{12} = V(1 - \alpha - \beta) \left[1 + \frac{p}{a^2 \rho_l} \right] \quad (\text{B-19})$$

$$Q_{13} = -F_v (1 - \alpha - \beta) \quad (\text{B-20})$$

Sendo α constante na região, tomaremos:

$$A = (1 - \alpha) \quad (\text{B-21})$$

Usando a notação

$$\left. \begin{aligned} \beta(i, t + \Delta t) &= B1(i); \quad p(i, t + \Delta t) = P1(i); \quad V(i, t + \Delta t) = V1(i); \\ F_v(i, t + \Delta t) &= FV1(i) \end{aligned} \right\} (\text{B-22})$$

$$\left. \begin{aligned} \beta(i, t + 2\Delta t) &= B2(i); \quad p(i, t + 2\Delta t) = P2(i); \quad V(i, t + 2\Delta t) = V2(i) \\ F_v(i, t + 2\Delta t) &= FV2(i) \end{aligned} \right\} (\text{B-23})$$

$$\left. \begin{aligned} \beta(i, t) &= B0(i); \quad p(i, t) = P0(i); \quad V(i, t) = V0(i) \\ F_v(i, t) &= FV0(i) \end{aligned} \right\} (\text{B-24})$$

Temos as diferenças finitas para (182), dadas por:

-primeiro passo

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \left[A-B1(i+1) \right] \left[1 + \frac{P1(i+1)}{a^2 \rho_\ell} \right] \right\} = \frac{1}{2} \left\{ \left[A-B0(i+2) \right] \left[1 + \frac{P0(i+2)}{a^2 \rho_\ell} \right] + \right. \\
 & \left. + \left[A-B0(i) \right] \left[1 + \frac{P0(i)}{a^2 \rho_\ell} \right] \right\} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left\{ V0(i+2) \left[A-B0(i+2) \right] \left[1 + \frac{P0(i+2)}{a^2 \rho_\ell} \right] - \right. \\
 & \left. - V0(i) \left[A-B0(i) \right] \left[1 + \frac{P0(i)}{a^2 \rho_\ell} \right] \right\} + \frac{\Delta t}{2} \left\{ -FV0(i+2) \left[A-B0(i+2) \right] - \right. \\
 & \left. - FV0(i) \left[A-B0(i) \right] \right\} \quad (B-25)
 \end{aligned}$$

- segundo passo

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \left[A-B2(i) \right] \left[1 + \frac{P2(i)}{a^2 \rho_\ell} \right] \right\} = \left\{ \left[A-B0(i) \right] \left[1 + \frac{P0(i)}{a^2 \rho_\ell} \right] \right\} - \\
 & - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ V1(i+1) \left[A-B1(i+1) \right] \left[1 + \frac{P1(i+1)}{a^2 \rho_\ell} \right] - V1(i-1) \left[A-B1(i-1) \right] \right. \\
 & \left. \left[1 + \frac{P1(i-1)}{a^2 \rho_\ell} \right] \right\} + \Delta t \left\{ -FV1(i+1) \left[A-B1(i+1) \right] - FV1(i-1) \right. \\
 & \left. \left[A-B1(i-1) \right] \right\} \quad (B-26)
 \end{aligned}$$

Para a equação da continuidade da massa de vapor, (184),

$$Q_{21} = \beta \quad (B-27)$$

$$Q_{22} = V \cdot \beta \quad (B-28)$$

$$Q_{23} = F_v \cdot \beta \quad (B-29)$$

- primeiro passo

$$B1(i+1) = \frac{1}{2} \left[B0(i+2) + B0(i) \right] - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \{ V0(i+2) \cdot B0(i+2) - V0(i) \cdot B0(i) \} + \frac{\Delta t}{2} \{ FV0(i+2) \cdot B0(i+2) + FV0(i) \cdot B0(i) \} \quad (B-30)$$

- segundo passo

$$B2(i) = B0(i) - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ V1(i+1) \cdot B1(i+1) - V1(i-1) \cdot B1(i-1) \} + \{ FV1(i+1) \cdot B1(i+1) + FV1(i-1) \cdot B1(i-1) \} \quad (B-31)$$

Para a equação do movimento, temos, então:

$$Q_{31} = V \left[1 + \frac{p}{a^2 \rho_l} \right] (A - \beta) \quad (B-32)$$

$$Q_{32} = (A - \beta) V^2 \left[1 + \frac{p}{a^2 \rho_l} \right] + \frac{p}{a^2 \rho_l} \quad (B-33)$$

$$Q_{33} = (F_v \cdot V - \frac{f}{2D} V|V| - g \sin \theta) (A - \beta) \quad (B-34)$$

- primeiro passo

$$\begin{aligned}
 & \{V1(i+1) [A-B1(i+1)] [1 + \frac{P1(i+1)}{a^2 \rho_\ell}]\} = \frac{1}{2} \{V0(i+2) [A-B0(i+2)] \\
 & [1 + \frac{P0(i+2)}{a^2 \rho_\ell}] + V0(i) [A - B0(i)] [1 + \frac{P0(i)}{a^2 \rho_\ell}]\} - \\
 & - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \{ [V0(i+2)]^2 [A-B0(i+2)] [1 + \frac{P0(i+2)}{a^2 \rho_\ell}] + \frac{P0(i+2)}{\rho_\ell} - \\
 & - [V0(i)]^2 [A-B0(i)] [1 + \frac{P0(i)}{a^2 \rho_\ell}] - \frac{P0(i)}{\rho_\ell} \} + \frac{\Delta t}{2} \{ [FV0(i+2) \cdot \\
 & \cdot V0(i+2) - \frac{f}{2D} V0(i+2) |V0(i+2)| - g \text{ sen}\theta(i+2)] + [FV0(i) \cdot V0(i) - \\
 & - \frac{f}{2D} V0(i) |V0(i)| - g \text{ sen } \theta(i)] \} \quad (B-35)
 \end{aligned}$$

- segundo passo

$$\begin{aligned}
 & \{V2(i) [A-B2(i)] [1 + \frac{P2(i)}{a^2 \rho_\ell}]\} = \{ V0(i) [A-B0(i)] [1 + \frac{P0(i)}{a^2 \rho_\ell}]\} - \\
 & - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ [V1(i+1)]^2 [A-B1(i+1)] [1 + \frac{P1(i+1)}{a^2 \rho_\ell}] + \frac{P1(i+1)}{\rho_\ell} - [V1(i-1)]^2 \cdot \\
 & \cdot [A-B1(i-1)] [1 + \frac{P1(i-1)}{a^2 \rho_\ell}] - \frac{P1(i-1)}{\rho_\ell} \} + \Delta t \{ [FV1(i+1) \cdot V1(i+1) - \\
 & - \frac{f}{2D} V1(i+1) |V1(i+1)| - g \text{ sen}\theta(i+1)] [A-B1(i+1)] + [FV1(i-1) \cdot V1(i-1) - \\
 & - \frac{f}{2D} V1(i-1) |V1(i-1)| - g \text{ STG}(i-1)] [A-B1(i-1)] \} \quad (B-36)
 \end{aligned}$$

Para a região de golpe, as diferenças finitas, já efetuadas as simplificações possíveis, serão:

a) equação da continuidade.

- primeiro passo

$$P1(i+1) = \frac{1}{2} \{P0(i+2)+P0(i)\} - \frac{a^2 \rho_l \Delta t}{2\Delta x} \{V0(i+2) \left[1 + \frac{P0(i+2)}{a^2 \rho_l} \right] - V0(i) \left[1 + \frac{P0(i)}{a^2 \rho_l} \right] \} \quad (B-37)$$

- segundo passo

$$P2(i) \equiv P0(i) - \frac{a^2 \rho_l \Delta t}{\Delta x} \{V1(i+1) \left[1 + \frac{P1(i+1)}{a^2 \rho_l} \right] - V1(i-1) \cdot \left[1 + \frac{P1(i-1)}{a^2 \rho_l} \right] \} \quad (B-38)$$

b) equação do movimento

- primeiro passo

$$V1(i+1) = \left\{ \frac{1}{2} \left\{ V0(i+2) \left[1 + \frac{P0(i+2)}{a^2 \rho_l} \right] + V0(i) \left[1 + \frac{P0(i)}{a^2 \rho_l} \right] \right\} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left\{ \left[V0(i+2) \right]^2 \left[1 + \frac{P0(i+2)}{a^2 \rho_l} \right] + \frac{P0(i+2)}{A \rho_l} - \left[V0(i) \right]^2 \left[1 + \frac{P0(i)}{a^2 \rho_l} \right] - \frac{P0(i)}{A \rho_l} \right\} + \frac{-\Delta t}{2} \left\{ -\frac{f}{2D} V0(i+2) |V0(i+2)| - g \operatorname{sen}\theta(i+2) \right\} + \left[-\frac{f}{2D} V0(i) |V0(i)| + g \operatorname{sen}\theta(i) \right] \right\} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{P1(i+1)}{a^2 \rho_l}} \right] \quad (B-39)$$

- segundo passo

$$\begin{aligned}
 V_2(i) = & \left\{ V_0(i) \left[1 + \frac{P_0(i)}{a^2 \rho_\ell} \right] - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[V_1(i+1) \right]^2 \left[1 + \frac{P_1(i+1)}{a^2 \rho_\ell} \right] + \right. \\
 & + \frac{P_1(i+1)}{A \rho_\ell} - \left[V_1(i-1) \right]^2 \left[1 + \frac{P_1(i-1)}{a^2 \rho_\ell} \right] - \frac{P_1(i-1)}{A \rho_\ell} \left. \right\} + \\
 & + \Delta t \left\{ \left[- \frac{f}{2D} V_1(i+1) |V_1(i+1)| - g \sin \theta(i+1) \right] + \right. \\
 & + \left. \left[- \frac{f}{2D} V_1(i-1) |V_1(i-1)| - g \sin \theta(i-1) \right] \right\} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{P_2(i)}{a^2 \rho_\ell}} \right] \quad (B-40)
 \end{aligned}$$

O método revela-se de difícil aplicação para o tratamento das condições de contorno dos problemas. A simples observação das expressões anteriormente expostas indica que, nos pontos 1 e NS, não definem respectivamente:

$$V_0(i-1); P_0(i-1); V_1(i-1); P_1(i-1) \dots$$

e

$$V_0(i+1); P_0(i+1); V_1(i+1); P_1(i+1) \dots$$

Kranenburg [10] mostra que as equações de diferenças finitas propostas neste capítulo equivalem às equações de compatibilidade do método das características, quando a relação $\Delta x / \Delta t$ é igual à celeridade local, além de dever-se desprezar os termos convectivos das equações da continuidade e do movimento.

Verificamos anteriormente que o abandono destes termos não introduz prejuízo à precisão dos cálculos.

Assim, para as condições de contorno em 1 e NS, utilizaremos o método das características.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) AMES, W.F. - Nonlinear partial differential equations in engeneering, 1^a ed., New York, Academic Press, 1960
511p
- 2) DELHAYE, J.M. et alii - Void fraction and vapor and liquid temperatures: local measurements in two-phase flow using a microthermocouple. Journal of Heat Transfer. New York, ASME, 1973 : 365-70p, 990.
- 3) FRÖBERG, C.E. - Introduction to numerical analysis, 1^a ed., Massachussets, Addison-Wesley Publ. Comp. Inc., 1965, 340p
- 4) HOOPER, F.C. et alii - Pressure effects on bubble growth in the flashing of superheated water. Paris, 49 Int. Heat Transfer conference, 1970. Vol.V, B2.3
- 5) HOOPER, F.C.; LUK, P.S.K. - The mechanisms controlling the static pressure in a flashing liquid. Tokyo, 59 Int. Heat Transfer conference, 1974, Vol.V, B2.8.
- 6) HOUGEN, O.A. et alii - Chemical Process Principles, 2^a ed., New York, J.Wiley & Sons, 1967, p.II.
- 7) KELLER, A; ZIELKE, W. - Variation of free gas content in water during pressure fluctuations. London, 29 Int. Conf. on pressure surges, 1976, D1 :1-12.
- 8) KNAPP, R. et alii - Cavitation. New York, McGraw-Hill Inc., 1970, 550 p.
- 9) KOELLE, E. - Transitórios Hidráulicos. Notas de Aula. São Paulo, EPUSP, 1976.

- 10) KRANENBURG, C.G. - Transient Cavitation in Pipelines Delft, Delft University of Technology, 1973, Ph.D. Thesis, 161 p.
- 11) LAX, P. - Weak solutions of nonlinear hyperbolic equations and their numerical computations. Comm. on pure and app. mathematics, Vol. VII, 1954, : 159-93.
- 12) LAX, P.; WENDROFF, B - Systems of conservation laws. Comm. on pure and app. mathematics. Vol. XIII, 1960, : 217-37.
- 13) LAURIA, D. - Ocorrência de baixas pressões em linhas de recalque - separação de coluna. Seminário de Área. São Paulo, EPUSP, 1977, 45. p.
- 14) MARSDEN, N.J.; FOX, J.A. - An alternative approach to the problem of column separation in an elevated section of pipe. London, 2^o Int. Conf. on pressure surges, 1976, F1:1-13.
- 15) MARTIN, C.S.; et alii - Pressure in two phase bubbly air-water mixtures. London, 2^o Int. Conf. on pressure, 1976, C1 : 1-15.
- 16) PARMAKIAN, J. - Waterhammer Analysis. New York Dover Publications Inc., 1963, 161.p.
- 17) PERRY, J.H. - Chemical engineer's handbook. 5^o ed. Tokyo, McGraw-Hill Inc. Kogakusha Comp. Ltd. 1973, 1895.p.
- 18) PICKFORD, J. - Analysis of Surge, 1^a ed., London. Mc Millan and Co. Ltd., 1969, 203.p.
- 19) PROVOOST, G.A. - Investigation into cavitation in a prototype pipeline caused by waterhammer. Delft, Delft University of Technology, 1975, 17.p.

- 20) RALSTON,A; WILF,H.S. - Mathematical methods for digital computers, 1^a ed., New York, J.Wiley & Sons, 1960, V.I.
- 21) RICHTMYER,R.D.; MORTON,K.W. - Difference methods for initial-value problems, 2^a ed., New York, J.Wiley & Sons 1967, 405.p.
- 22) STREETER,V.L. - Mecânica dos Fluidos, 1^a ed., Fluid Mechanics trad. Celso da Silva Muniz e outros. 1^a ed., São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975, 736.p.
- 23) STREETER,V.L.; WYLIE,E.B. - Hydraulic Transients, 1^a ed., New York, McGraw-Hill Inc., 1963, 329.p.
- 24) TREYBAL,R.E. - Mass Transfer Operations, 1^a ed., Tokyo, Kogakusha Company Ltd., 1955, 666.p.
- 25) TULLIS,J.P. et al - Waterhammer analysis with air release. London, 2^a Int. Conf. on pressure surges, 1976, C-3 : 35-47.
- 26) VREUGDENHIL,C.B. et alii- Investigation into cavitation in long horizontal pipelines caused by waterhammer. Delft. Delft University of Technology,1972, 13p.
- 27) WINJGAARDEN,L. von; VOSSERS,G. - Mechanisms and physics of gas bubbles in liquids: a report on Euromech 98, J.of Fluid Mechanics, Cambridge, 1978, Vol.87,p.4.
- 28) WYLIE,E.B; STREETER,V.L. - Fluid Transientes, 1^a ed., New York, McGraw-Hill Inc., 1978, 384 p.