

ESTUDO DAS OSCILAÇÕES DE  
PRESSÃO NOS CONDUTOS DE  
RECALQUE

josé peixoto dos santos



S237e Santos, José Peixoto dos.  
Estudo das oscilações de pressão nos condutos de recalque / José Peixoto dos Santos. - Campina Grande, 1974.  
  
Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1974.  
Referências.  
  
1. Turbinas - Hidráulica. 2. Energia Hidráulica - Turbinas. 3. Hidromecânica. 4. Ciências - Dissertação. I. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). II. Título

CDU 626(043)



CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA  
PARAÍBA

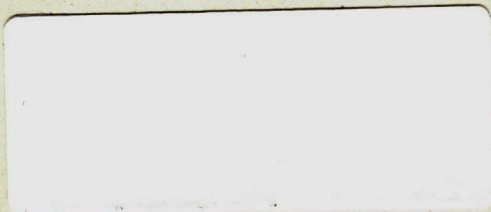
ESTUDO DAS OSCILAÇÕES DE PRESSÃO NOS CONDUTOS DE RECALQUE

JOSÉ PEIXOTO DOS SANTOS

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE  
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLO-  
GIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA COMO PARTE DOS REQUIS-  
TOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRÁU DE MESTRE EM CIÊN-  
CIA (M.Sc.).

APROVADO POR:

COMISSÃO:



*Vaclav Elias*

VACLAV ELIAS, Ph.D.

Presidente

*Hugo Carvalho Guerra*

HUGO CARVALLO GUERRA, Ph.D

*Luiz Arnaldo Jalfim Leite*

LUIZ ARNALDO JALFIM LEITE, M.Sc.

CAMPINA GRANDE  
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL

15/AGOSTO/1974



DEDICATÓRIA

AOS MEUS PAIS,

Pelo esforço e incentivo, no qual me proporcionaram realizar este trabalho.

A MINHA ESPOSA E FILHA,

Pela dedicação e carinho, sem o qual não teria alcançado esta vitória.



AGRADECIMENTOS

Meu reconhecimento aos professores Arlindo Cabús e Lybaldio Cavalcanti de Albuquerque, pelo esforço que desempenharam para a efetivação deste trabalho; aos colegas em geral, pela amizade e compreensão no ambiente de trabalho; aos professores e funcionários do Centro de Ciências e Tecnologia da U.F.Pb. pelo apoio a mim proporcionado.

Gratidão especial a COORDENAÇÃO DO APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR - CAPES, ao CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA U.F.AL, a Sra. Terezinha Fialho.

Agradecimentos especiais, ao professor Vaclav Elias, pelos ensinamentos e orientação, sem o qual não teria realizado esta pesquisa.



### S I N O P S E

O trabalho apresentado estuda a determinação das oscilações de pressão nos condutos de recalque, devidos à parada brusca de uma bomba por falta de energia, e fechamento total e instantâneo de uma válvula situada no final de jusante do conduto.

Essas oscilações de pressão causam grandes prejuízos aos sistemas hidráulicos das redes de abastecimento de água das grandes cidades, nas redes de projetos de irrigação, das adutoras para as turbinas hidráulicas, o que justifica o grande interesse no assunto, prestado pelos pesquisadores no passado. O problema estudado, foi analisado graficamente empregando o método gráfico de SCHNYDER e BERGERON, e analiticamente com o uso da teoria da solução de equações diferenciais pelo método das características. O fenômeno do Golpe de Ariete na tubulação de recalque foi simulado pelo instrumento demonstrativo ( WATER HAMMER APPARATUS ) equipado com um captor de pressão eletrônico o que permite visualizar e medir as oscilações de pressão pelo osciloscópio. No caso de fechamento total e instantâneo da válvula no final de jusante, os resultados teóricos foram confirmados pelos ensaios na primeira fase da onda positiva. Para as oscilações de pressão no conduto de recalque, onde se apresenta um problema mais complexo pelo efeito da cavitação que ocorre nas pressões abaixo da pressão de vapor do líquido, não se chegou a uma solução satisfatória, apenas uma análise qualitativa que pode servir para uma pesquisa planejada posteriormente.



ABSTRACT

This work studies the determination of variations of pressure in pipelines due to the sudden failure of a pump caused by a power cut and the sudden total closure of the valve at the downstream end of the pipeline.

These pressure variations cause great problems in city hydraulic water supply systems, in irrigation projects and in pipelines for hydraulic turbines, which justifies the past interest in this subject. This problem has been studied graphically by the method of SCHNYDER and BERGERON and analytically using the theory of solution of differential equations by the characteristic method.

The water hammer effect (phenomenon) in a closed pipeline has been simulated by the device shown (Water Hammer Apparatus) equipped with an electronic pressure transducer which permits the observation and measurement of pressure variations by oscilloscope.

In the case of instant total closure of the downstream valve theoretical results were confirmed by test on the first positive wave phase. For pressure variation in the pipeline where there appears a more complex problem, due to the effects of cavitation which occurs in pressures lower than the water pressure, a satisfactory solution was not reached. Only a qualitative analysis which may serve as the basis for a future study.



## I N D I C E

### I. INTRODUÇÃO

- 1.1 Análise sobre o Golpe de Ariete
- 1.2 Dispositivos de Proteção contra o Golpe de Ariete

### II. REVISÃO DE LITERATURA

- 2.1 Revista Técnica Sulzer
- 2.2 Siemens
- 2.3 Victor
- 2.4 Enio Tourasse
- 2.5 Kranenburg

### III. MATERIAIS E MÉTODOS

- 3.1 Aparelhagem
- 3.2 Métodos utilizados na solução teórica do Golpe de Ariete
- 3.3 Caso de fechamento total e instantâneo da válvula
  - 3.3.1 Descrição do fenômeno
  - 3.3.2 Dados iniciais para o experimento
- 3.4 Caso de parada brusca da bomba
  - 3.4.1 Descrição do fenômeno
  - 3.4.2 Dados para o experimento
- 3.5 Solução teórica do Golpe de Ariete para o caso de fechamento total e instantâneo da válvula, aplicando o método das características
- 3.6 Solução teórica do Golpe de Ariete para o caso de fechamento total e instantâneo da válvula aplicando o método gráfico de SCHNYDER E BERGERON
- 3.7 Solução teórica do Golpe de Ariete para o caso de parada brusca da bomba, aplicando o método das características



- 3.8 Solução teórica do Golpe de Ariete para o caso de parada brusca da bomba, aplicando o método gráfico de SCHNIDER E BERGERON

#### IV. RESULTADOS

- 4.1 Tabela dos valores do Golpe de Ariete calculados pelo método das características, para o caso de fechamento total e instantâneo da válvula
- 4.2 Tabela dos valores do Golpe de Ariete calculados pelo método gráfico de SCHNIDER E BERGERON
- 4.3 Tabela de valores do Golpe de Ariete calculados pelo método das características, para o caso de parada brusca da bomba
- 4.4 Tabela de valores do Golpe de Ariete calculados pelo método gráfico de SCHNIDER E BERGERON

#### V. DISCUSSÃO

#### VI. CONCLUSÕES

#### VII. ANEXO

- 7.1 Análise sobre o método das características
- 7.2 Programa em linguagem Fortran IV para o computador IBM 1130, para a solução numérica do Golpe de Ariete no caso de fechamento total e instantâneo da válvula
- 7.3 Programa em linguagem Fortran IV para o computador IBM 1130, para a solução numérica do Golpe de Ariete no caso de parada brusca da bomba
- 7.4 Gráficos comparativos entre os valores calculados e medidos do Golpe de Ariete para o caso de fechamento total e instantâneo da válvula



- 7.5 Gráficos comparativos entre os valores calculados e medidos do Golpe de Ariete, para o caso de parada brusca da bomba
- 7.6 Gráficos apresentando a solução gráfica do Golpe de Ariete, para o caso de fechamento total e instantâneo da válvula
- 7.7 Gráfico apresentando a solução gráfica do Golpe de Ariete, para o caso de parada brusca da bomba

VIII. BIBLIOGRAFIAS.



SÍMBOLOS:

f - Coeficiente de atrito

L - Comprimento total do conduto

D - Diâmetro interno do conduto

a - Celeridade de propagação da onda de pressão

V<sub>0</sub> - Velocidade de escoamento antes do fechamento da válvula

N - Número de secção estudada

T<sub>max</sub> - Tempo máximo estudado

t - Intervalo de tempo, usado nos cálculos da malha

g - Aceleração da gravidade

x - Distância entre as secções estudadas

H<sub>0</sub>, H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>, H<sub>4</sub>, H<sub>5</sub>, H<sub>6</sub> - Pressão hidrostática antes do fechamento da válvula

x - Coordenadas do espaço

t - Coordenada do tempo

H - Pressões calculadas, após o fechamento da válvula

e - Espessura da parede do conduto

H - Perda de carga.



## I. INTRODUÇÃO

### 1.1 Análise sobre o Golpe de Ariete

Como é de conhecimento geral, o escoamento uniforme de um fluido em um conduto sob pressão depende de duas características principais que são a pressão e a velocidade de escoamento. Estas duas grandezas estão ligadas uma a outra, em cada caso em uma relação determinada por diversos fatores.

Qualquer mudança rápida no regime de vazão de uma canalização, traz ou oscilações de pressão, chamada de Golpe de Ariete, acompanhada simultaneamente pelas variações de velocidades no escoamento local. O fenômeno representa uma fase de transição entre dois regimes uniformes ou em regime uniforme e a parada total do escoamento.

O Golpe de Ariete começa por uma sobrepressão no caso de fechamento de uma válvula situada no final de jusante de um conduto, ou no caso de início de trabalho de uma bomba, ou, ao contrário por uma depressão causada pela abertura de uma válvula ou a parada de uma bomba.

Outros estudos anteriores, fizeram notar, que o Golpe de Ariete devido a parada brusca da bomba, é de natureza mais complexa do que o caso de fechamento rápido da válvula na saída do conduto.

Sendo a parada da bomba provocada por uma carência de energia, que nem sempre é fácil de evitar, os construtores de bombas devem enfrentar muitas vezes sem dispor de meios próprios para remediar, uma brusca queda de pressão devido ao esgotamento da reserva de energia cinética do grupo.

### 1.2 Dispositivos de Proteção contra o Golpe de Ariete

Embora seja possível na maioria dos casos tomar medidas apropriadas para dominar os problemas do Golpe de Ariete, nas instalações de bombas não faltam os exemplos de avarias e acidentes graves, cuja causa reside nos fenômenos deste gênero.



Para impedir o desenvolvimento de elevadas pressões, utiliza-se os seguintes dispositivos: Câmara de Ar, Válvula Anti-Golpe de Ariete, Chaminé de Equilíbrio, etc.



## II. REVISÃO DE LITERATURA

Das bibliografias existentes sobre o estudo do Golpe de Ariete em condutos de recalque, as quais serviram de base para a presente pesquisa, destacam-se:

### 2.1 REVISTA TÉCNICA SULZER

A REVISTA TÉCNICA SULZER (6) em 1955, apresentou o estudo do Golpe de Ariete nos condutos de recalque em dois grupos de bombas de capacidade diferentes nos condutos de características constantes, e em uma estação de bombas de acumulação tendo os condutos características, variáveis. Nesta pesquisa foi aplicado o método gráfico de SCHNYDER E BERGERON.

### 2.2. SIMONS

SIMONS (16) em Fevereiro de 1967, estudou o fenômeno da cavitação em condutos horizontais devido a parada brusca de uma bomba, tendo chegado a conclusão de que com a parada da bomba, uma cavidade se formará próxima a bomba e que após o colapso da mesma não ocorreria pressão alta.

### 2.3 VICTOR

VICTOR (17) apresentou em 1967, uma análise detalhada sobre vários métodos de resolução do Golpe de Ariete. Ele apresenta o estudo do Golpe de Ariete em experimento com bomba centrífuga e reservatório de grandes dimensões a montante, e uma válvula no final de jusante do conduto, tendo a mesma fechamento lento e rápido, inclusive testou os valores calculados do Golpe de Ariete através de um modelo equipado com um instrumento eletrônico de medição.

### 2.4 ENIO TOURASSE

ENIO TOURASSE (15) em Outubro de 1969 estudou o Golpe de Ariete em



linhas de recalque, aplicando um método numérico. Ele apresenta o estudo do Golpe de Ariete em linhas retilíneas, linhas em ondulações no plano vertical, tendo inclusive dado uma análise sobre os dispositivos de proteção dos condutos de recalque.

#### 2.5 KRAEWENBURG

KRAEWENBURG (3) em Outubro de 1971, estudou o fenómeno da cavitação em condutos horizontais devido ao Golpe de Ariete, dando continuidade ao estudo desenvolvido por SIMONS (16). Ele apresenta duas aproximações para a teoria na determinação do Golpe de Ariete, tendo inclusive, descordado da conclusão apresentada por SIMONS (16), de que após o colapso da cavidade nenhuma alta ocorrência não é justificada. Nesta pesquisa é feito o cálculo numérico de um experimento em conduto de recalque horizontal, sendo os valores calculados comparados com os valores medidos por intermédio de um instrumento eletrónico que mede o desenvolvimento do Golpe de Ariete em quatro secções do conduto.

Ele apresenta uma sugestão para o próximo estudo, que se deve levar em conta a parte do gás evacuada do líquido



### III. MATERIAIS E METODOS

#### 3.1 APARELHAGEM

O equipamento experimental indicado para o estudo sobre o Golpe de Ariete é ilustrado nas figuras (1,2,3,4,5,6) conforme mostra o anexo, essencialmente ele consiste de um conduto de cobre em forma de espiral. O fluxo que passa através do mesmo, é ajustado por uma válvula solenóide operando na descarga final. A pressão é medida pelo captor acoplado no conduto fechado e conectado a um osciloscópio, que indica as flutuações de pressão no conduto resultante do fechamento da válvula solenóide. O captor de pressão mede somente na seção próxima a válvula solenóide. Uma válvula by-pass de descarga para dissipação é conectada no conduto em forma de espiral, e uma segunda válvula ajustável é instalada para descarregar desde a jusante da válvula solenóide. Conforme a ajustagem das válvulas by-pass e da segunda válvula, a vazão e a pressão do fluxo uniforme podem ser reguladas com a válvula solenóide fechada.

#### Características do Equipamento:

Comprimento do conduto em forma de espiral.....	L=61m
Diâmetro interno do conduto.....	D=0,0127m
Espessura da parede do conduto.....	e=0,00119m
Máxima pressão traduzida pelo captor .....	H=11x10 <sup>5</sup> N/m <sup>2</sup>
Alimentação do captor.....	4,5 V DC
Alimentação do osciloscópio.....	220V AC

O sistema de alimentação é acoplado ao equipamento WATER HAMMER, por meio de mangueiras de pressão (borracha), conforme instruções do fabricante.

#### Características do Sistema de Alimentação:

##### a) Bomba Rotativa

##### 1) Marca - Refaga



2) Modelo -  $\frac{135}{26}$   
1" x 1"

3) Diâmetro = 1,35"

b) Motor

1) Marca - Arno S.A (Assincrono Trifásico)

2) Potência = 7,5 CV ( Cavalo-Vapor )

3) Rotações = 1720 RPM ( Rotações por minuto )

4) Voltagem : 220V e 380V ( Volts )

5) Altura Máxima de Recalque = 75m.c.a ( Metro de Coluna de Água)

6) Altura Mínima de Recalque = 25m.c.a

7) Vazão Máxima = 2500L/h ( litro/hora)

8) Vazão Mínima = 500L/h

### 3.2 MÉTODOS UTILIZADOS NA SOLUÇÃO TEÓRICA DO GOLPE DE ARIETE PARA OS CASOS DE FECHAMENTO TOTAL E INSTANTÂNEO DA VÁLVULA E PARADA BRUSCA DA BOMBA

Os métodos utilizados neste estudo são: O método analítico das características e o método gráfica de SCHNYDER E BERGERON.

#### 3.3 Caso de fechamento total instantâneo da válvula

##### 3.3.1 Descrição do fenômeno:

A figura (7) dá um esboço esquemático do modelo. Ele consiste de um conduto de cobre, tendo um comprimento total de 61m. O conduto é horizontal. A vazão pode ser medida diretamente na saída do conduto por coleta-gem da descarga, medindo o tempo de enchimento em um vaso calibrado. A máxima vazão que passa no conduto é de 6L/minuto. Uma bomba fornece água ao conduto, cuja pressão hidrostática é medida na saída do conduto (  $x=L$  ) por meio de um manômetro. O fluxo é controlado por duas válvula na entrada do conduto.



Uma válvula solenóide é fixada no final do conduto, tendo a mesma a função de assegurar o fechamento total e instantâneo.

Durante a experiência, na secção final do conduto a oscilação da pressão pode ser transformada em oscilação elétrica pelo captor de pressão. São oscilações estas provocadas pelo fechamento da válvula solenóide, que são visíveis na tela do osciloscópio.

Após o fechamento da válvula, a pressão atrás da mesma aumenta imediatamente no sentido positivo.

A correspondente velocidade do fluxo reduz-se a zero. A pressão positiva propaga-se na direção de montante com a celeridade  $a = 1340 \text{ m/seg}$ . Quando a onda de pressão positiva encontra o fim do conduto, com a carga hidrostática constante fornecida pela bomba, a onda é refletida negativamente. Dependendo das condições iniciais, e do atrito entre o líquido e as paredes do conduto, a reflexão da onda pode ser total ou diminuída. No segundo caso as oscilações de pressão que ocorrem em torno da pressão inicial vão amortecendo com o tempo. Durante o processo de oscilações de pressão, a velocidade do fluido troca de direção.

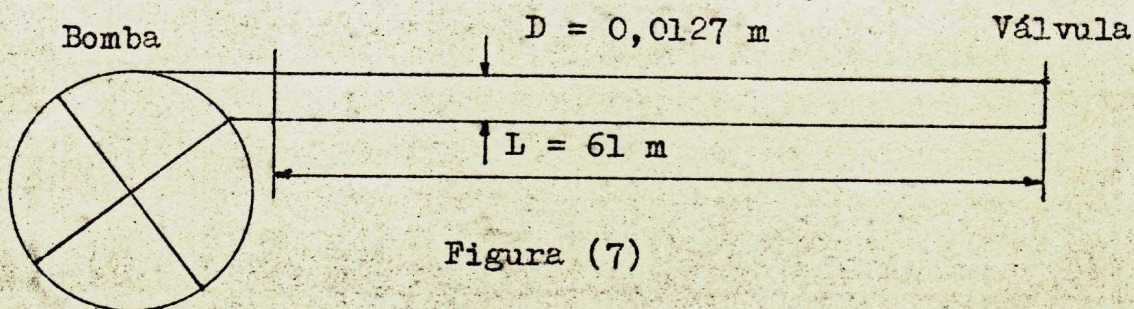


Figura (7)

### 3.3.2 Dados iniciais para o experimento

O presente experimento tem como finalidade determinar as variações de pressão, após o fechamento da válvula solenóide, na secção onde está instalada a mesma:



Dados:

- $f = 0,034$ .....coeficiente de atrito
- $L = 61m$ .....comprimento total do conduto
- $D = 0,0127m$ .....diâmetro do conduto
- $a = 1340m/seg$ .....celeridade da onda de pressão
- $V_0 = 0,79m/seg$ .....velocidade da água no conduto antes do fechamento da válvula
- $N = 5$ .....número de secção a serem estudadas
- $\Delta x = \frac{L}{N} = 12,2 m$ .....distância entre as secções estudadas.
- $\Delta t = \frac{\Delta x}{a} = 0,0091 seg$ .....passo-tempo usado no cálculo da malha.
- $T_{max} = 2,5seg$ .....tempo máximo estudado

Condições limites:

A montante:  $H_{p1} = 75,5m.c.a$  ( Constante )

A jusante:  $V_{p6} = 0$  ( Constante )

O cálculo da pressão em cada secção estudada no estado inicial (antes do fechamento da válvula), foi feito utilizando a seguinte fórmula:

$$H = H_0 - \frac{f \Delta x V_0^2}{2gD}$$

Onde  $H_0$  é a pressão hidrostática fornecida pela bomba, e  $\frac{f \Delta x V_0^2}{2gD}$  é a fórmula universal da perda de carga ao longo do conduto.



O valor de  $f = 0,034$ , correspondente ao número da Reynolds entre 3000 e 10000 condições do experimento.

Cálculo das pressões nas seções ( 1,2,3,4,5,e 6 )

$$H_1 = H_0 = 75,5 \text{ m.c.a.}$$

$$H_2 = 75,5 - \frac{f \Delta x v_0^2}{2gD} = 75,5 - 1,1 = 74,4 \text{ m.c.a.}$$

$$H_3 = H_2 - 1,1 = 74,4 - 1,1 = 73,3 \text{ m.c.a.}$$

$$H_4 = H_3 - 1,1 = 73,3 - 1,1 = 72,2 \text{ m.c.a.}$$

$$H_5 = H_4 - 1,1 = 72,2 - 1,1 = 71,1 \text{ m.c.a.}$$

$$H_6 = H_5 - 1,1 = 71,1 - 1,1 = 70,0 \text{ m.c.a.}$$

Observação: o valor de  $g$  (aceleração da gravidade) foi tomado igual a  $9,81 \text{ m/seg}^2$ .

### 3.4 Caso de parada brusca da bomba

#### 3.4.1 Descrição do fenômeno

A figura (8), dá um esboço esquemático do modelo. Ele consiste de um conduto de cobre, tendo um comprimento total de 61m. O conduto é horizontal. A vazão pode ser medida diretamente na saída do conduto por coleta da descarga, medindo o tempo de enchimento de um vaso calibrado. A máxima vazão que passa através do conduto é de 6L/minuto. A bomba fornece água ao reservatório situado a jusante do conduto. Uma válvula solenóide é fixada na entrada do conduto, tendo a mesma fechamento total e instantâneo. Durante a experiência na seção de entrada do conduto ( $x = 0$ ), a oscilação de pressão após a parada da bomba pode ser transformada em oscilação elétrica pelo captor de pressão, e visíveis na tela do osciloscópio.



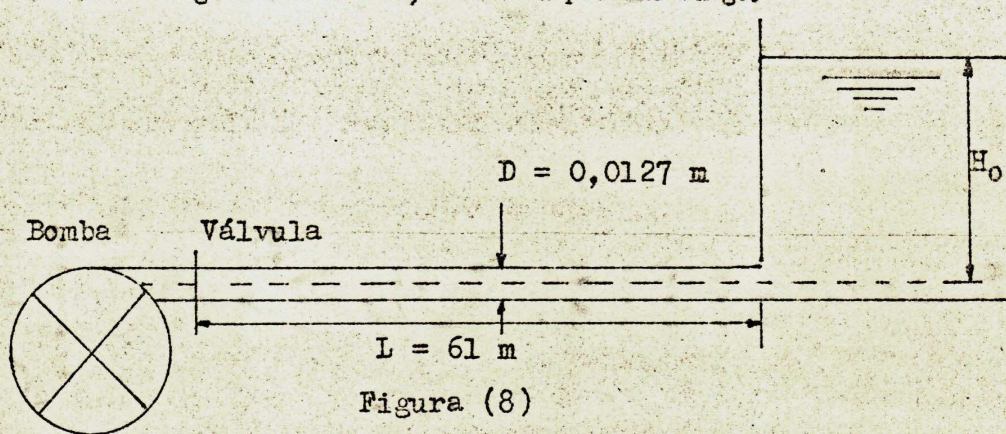
Durante a experiência o nível da água no reservatório a jusante do conduto pode ser considerado constante. A máxima diferença entre o nível da seção de entrada do conduto, e o nível da água no reservatório é de 2,7m. Em situação estacionária a pressão decresce linearmente. A onda de pressão tem celeridade de propagação medida de  $a = 1340\text{m/seg.}$

Após o fechamento da válvula que tem a finalidade de simular a parada brusca da bomba, a velocidade do fluxo não se reduz a zero, e consequentemente o fenômeno da cavitação começa a desenvolver-se atrás da válvula. A pressão decresce imediatamente para a pressão de vapor e propaga-se na direção da jusante com uma celeridade de  $1340\text{m/seg.}$  Após a passagem da onda de pressão abaixo da pressão atmosférica, bolhas de vapor começam a crescer e formar uma grande cavidade. No começo do conduto a frente da onda de pressão é real perigo, exceto que isto depende do tamanho da cavidade e do decréscimo da declividade da frente dela. Isto indica que a dispersão de bolhas pode ser observada para pressões abaixo da pressão atmosférica. Quando a onda de pressão negativa encontra o fim do conduto com o reservatório de nível constante, neste instante a cavitação pode ser observada em todo conduto. Após a reflexão a onda de pressão tem valor positivo. Na região com cavitação e bolhas de vapor, diminui muito a celeridade normal de propagação do Golpe de Ariete.

Na frente da onda de pressão refletida em golpe vertical positivo, desenvolve-se. Depois do colapso das bolhas de vapor pequenas bolhas de gás permanecem em vários locais ou pontos do conduto. Isto implica que o gás contido no fluido com movimento livre tem um certo papel. Depois da frente da onda ter passado a região de cavitação, ela deixa uma grande cavidade perto da válvula, e toda cavitação no resto do conduto desaparece. Na grande cavidade perto da válvula a pressão encontra-se baixa, e a frente da onda é negativamente refletida outra vez. Conforme a velocidade inicial do fluido for bastante alta, ela como consequência



conserva a mesma direção, e a mesma cavidade continua a crescer. Depois da reflexão da onda contra a cavidade, a cavitação por mais tempo não ocorrerá no conduto. A altura da onda de pressão decresce consideravelmente, e dependendo da condição inicial, a onda de pressão amortece completamente. Finalmente a água no conduto comporta-se igualmente uma coluna rígida de água. Durante este processo a velocidade do fluido troca de direção, e a grande cavidade torna-se suave e fecha-se novamente. Até o momento de fechamento da grande cavidade, uma alta pressão surge.



### 3.4.2 Dados para o experimento

O presente experimento tem como finalidade determinar as variações de pressão, após o fechamento da válvula solenóide, que tem a finalidade de simular a parada brusca da bomba.

Dados:

- L = 61m..... comprimento do conduto
- D = 0,012..... diâmetro do conduto
- a = 1340m/seg..... celeridade da onda de pressão
- V<sub>0</sub> = 0,79m/seg..... velocidade inicial da água no conduto antes do fechamento da válvula
- N = 5..... número de secções estudadas



- $\Delta x = 12,2m$  ..... distância entre as secções estudadas  
 $\Delta t = 0,0091seg$  ..... passo-tempo usado no cálculo da malha  
 $T_{max} = 2,5 seg$  ..... tempo máximo estudado  
 $f = 0,034$  ..... coeficiente de atrito

Condições limites:

A montante:  $V_{pl} = 0$  (constante)

A jusante:  $H_{p6} = 2,7 m.c.a$

Os cálculos da pressão em cada secção estudada, no estado inicial, isto é, antes do fechamento da válvula solenóide, foi feito utilizando a fórmula universal da perda de carga ao longo de um conduto.

Onde:

$$H = H_0 + \frac{f \Delta x V_0^2}{2gD} \quad \text{Sendo, } H_0 = H_{p6} = 2,7 m.c.a$$

$$\text{Fazendo } \Delta H = \frac{f \Delta x V_0^2}{2gD} = 1,1 m.c.a$$

$$H_6 = 2,7 m.c.a$$

$$H_5 = H_6 + \Delta H = 2,7 + 1,1 = 3,8 m.c.a$$

$$H_4 = H_5 + \Delta H = 3,8 + 1,1 = 4,9 m.c.a$$

$$H_3 = H_4 + \Delta H = 4,9 + 1,1 = 6,0 m.c.a$$

$$H_2 = H_3 + \Delta H = 6,0 + 1,1 = 7,1 m.c.a$$

$$H_1 = H_2 + \Delta H = 7,1 + 1,1 = 8,2 m.c.a$$



Esquema da malha no  $x-t$  plano, para ambos os casos.

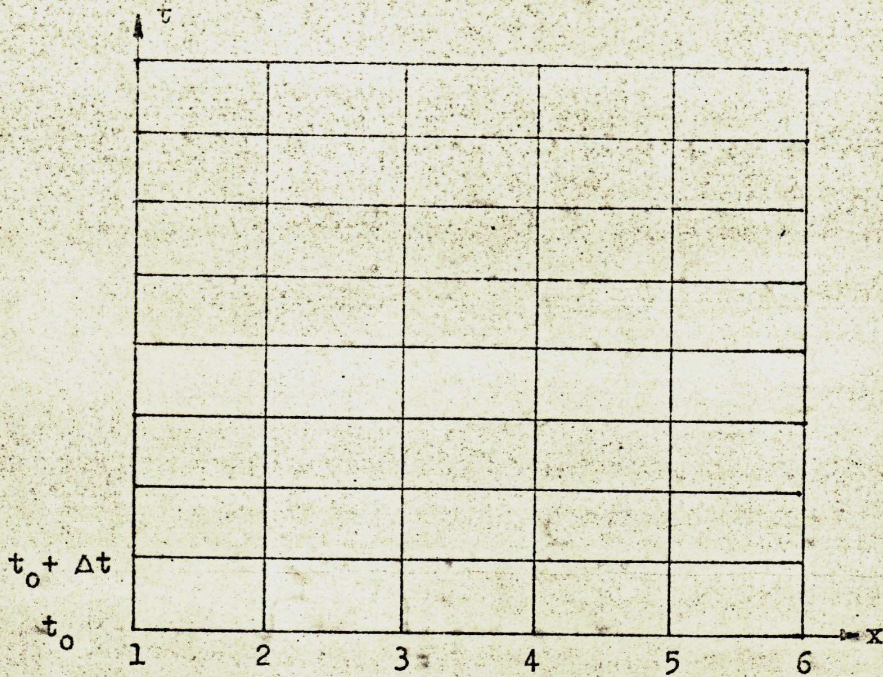


Figura ( 9 )

### 3.5 SOLUÇÃO TEÓRICA DO GOLPE DE ARIETE PARA O CASO DE FECHAMENTO TOTAL E INSTANTÂNEO DA VÁLVULA, APLICANDO O MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

A resolução do Golpe de Ariete utiliza as equações básicas, que governam o escoamento de um fluido variável em um conduto fechado que são as equações da Continuidade e da Quantidade de Movimento.

Os termos de menor importância foram omitidos nas equações acima citadas, para uma introdução da teoria para um simples conduto. As equações simplificadas (\*) são:

$$\frac{g \partial H}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{f v |v|}{2D} = 0 \quad (1)$$



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

Aplicando o método das características no sistema tem-se:

$$C^+ \left\{ \begin{array}{l} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV |V|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = a \end{array} \right. \quad (3)$$

$$C^- \left\{ \begin{array}{l} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV |V|}{2D} = 0 \\ -\frac{dx}{dt} = -a \end{array} \right. \quad (4)$$

Aplicando a técnica das diferenças-finitas nas equações (3) e (4),  
obtem-se:

Para os pontos interno da malha,

$$V_{pi} = 0,5 \left[ V_{i-1} + V_{i+1} + \frac{g}{a} (H'_{i-1} - H_{i+1}) - \frac{f \Delta t}{2D} (V_{i-1} |V_{i-1}| + \right. \\ \left. + V_{i+1} |V_{i+1}|) \right] \quad (5)$$

$$H_{pi} = 0,5 \left[ H_{i-1} + H_{i+1} + \frac{a}{g} (V_{i-1} - V_{i+1}) - \frac{af \Delta t}{2gD} (V_{i-1} |V_{i-1}| - \right. \\ \left. - V_{i+1} |V_{i+1}|) \right] \quad (6)$$



Para os pontos externos da malha, isto é, nas secções 1 e 6, aplica-se as equações:

$$V_{p1} = V_2 + \frac{g}{a} (H_{p1} - H_2) - \frac{f \Delta t V_2^2}{2D} \left| V_2 \right| \quad (7)$$

$$H_{p6} = \frac{a}{g} V_5 + H_5 - \frac{af \Delta t}{2gD} V_5 \left| V_5 \right| \quad (8)$$

O cálculo numérico baseado nas equações (5), (6), (7), (8) foi feito utilizando um programa em linguagem Fortran IV, para um computador IBM 1130 conforme é especificado no anexo (7.2). (\*) O desenvolvimento matemático do método das características mais detalhado se encontra no anexo (7.1).

### 3.6 SOLUÇÃO TEÓRICA DO GOLPE DE ARIETE PARA O CASO DE FECHAMENTO TOTAL E INSTANTÂNEO DA VÁLVULA, APLICANDO O MÉTODO GRÁFICO DE SCHNYDER E BERGERON

O método gráfico de SCHNYDER E BERGERON é baseado na representação, gráfica das equações do Golpe de Ariete, desenvolvidas por ALLIEVI que são as seguintes:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = g \frac{\partial H}{\partial x} \quad (9)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (10)$$

Onde a integração das equações (9) e (10) é :

$$H_{t,x} = H_{0,x} + F\left(t - \frac{x}{a}\right) + f\left(t + \frac{x}{a}\right) \quad (11)$$



$$V_{t,x} = V_0 - \frac{g}{a} \left[ F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t + \frac{x}{a}\right) \right] \quad (12)$$

Substituindo  $H = H_{t,x} = H_{0,x}$  obtém-se:

$$H = F\left(t - \frac{x}{a}\right) + f\left(t + \frac{x}{a}\right) \quad (13)$$

$$V_{t,x} = V_0 - \frac{g}{a} \left[ F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t + \frac{x}{a}\right) \right] \quad (14)$$

Uma representação na forma simples das equações (13) e (14) é dada por:

$$H = F + f \quad (15)$$

$$V = V_0 - \frac{g}{a} (F - f) \quad (16)$$

Sendo :  $V = V_{t,x}$

$$F = F\left(t - \frac{x}{a}\right)$$

$$f = f\left(t + \frac{x}{a}\right)$$

O método desenvolvido por SCHNYDER e BERGERON, é baseado na aplicação do sistema de equações de ALLIEVI, válidos em qualquer condição, na extremidade do conduto, ou seja perto do obturador.

Resolvendo o sistema das equações (15) e (16) tem-se:

$$H = \frac{a}{g} (V - V_0) + 2F \quad (17)$$



$$H = - \frac{a}{g} (V - V_0) + 2f \quad (18)$$

Onde um sistema de coordenadas cartesianas com eixos (V,H), pode-se interpretar as relações acima, no caso das funções  $F(t - \frac{x}{a})$  e  $f(t + \frac{x}{a})$  com valores constantes, como as equações lineares da forma:

$$H = KV + \text{Const.} \quad (19)$$

$$H = -KV + \text{Const.} \quad (20)$$

Onde:  $K = \frac{a}{g}$ , é o coeficiente angular das equações acima:

$$\text{Dados: } 75,5 \times 10^4 \text{ W/m}^2 = H_0$$

$$V_0 = 0,79 \text{ m/seg.}$$

$$k = \frac{1340}{9,81} = 136,5$$

Parábola das perdas de carga:

$$C = \frac{V^2}{2g} + \frac{f V^2 L}{2gD} = 8,36V^2 \quad (V, \text{ varia de } 0 \text{ a } V_0)$$

Com os dados acima, os valores de H são determinados graficamente, conforme mostra o gráfico (1), (ANEXO 7.6)

### 3.7 SOLUÇÃO TEÓRICA DO GOLPE DE ARIETE PARA O CASO DE PARADA BRUSCA DA BOMBA, APLICANDO O MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

A resolução do Golpe de Ariete utiliza as equações que governam o escoamento de um fluido variável em um conduto fechado, que são as equações da Continuidade e da Quantidade de Movimento.

Aplicando o método das características e a técnica das diferenças finitas, onde para o caso de parada brusca da bomba, as seguintes equações são obtidas:



Para os pontos internos da malha:

$$V_{pi} = 0,5 \left[ V_{i-1} + V_{i+1} + \frac{a}{g} (H_{i-1} - H_{i+1}) - \frac{f\Delta t}{2D} (V_{i-1} | V_{i-1}| + V_{i+1} | V_{i+1}|) \right] \quad (21)$$

$$H_{pi} = 0,5 \left[ H_{i-1} + H_{i+1} + \frac{a}{g} (V_{i-1} - V_{i+1}) - \frac{af\Delta t}{2gD} (V_{i-1} | V_{i-1}| - V_{i+1} | V_{i+1}|) \right] \quad (22)$$

Para os pontos externos, isto é, nas secções 1 e 6, aplicam-se as seguintes equações:

$$V_{p6} = V_5 + \frac{a}{g} (H_5 - H_{p6}) - \frac{f\Delta t}{2D} V_5 | V_5 | \quad (23)$$

$$H_{p1} = H_2 - \frac{a}{g} V_2 + \frac{af\Delta t}{2gD} V_2 | V_2 | \quad (24)$$

O cálculo numérico baseado nas equações (21), (22), (23) e (24) foi feito utilizando um programa em linguagem Fortran IV, para um computador IBM 1130, conforme é especificado no anexo (7.3)

### 3.8 SOLUÇÃO TEÓRICA DO GOLPE DE ARIETE PARA O CASO DE PARADA BRUSCA DA BOMBA, APLICANDO O MÉTODO GRÁFICO DE SCHNYDER E BERGERON

Aplicando o método gráfica de SCHNYDER E BERGERON, conforme foi mostrado anteriormente, para o presente caso obtém-se:

Com os dados abaixo:

$$H_0 = 2,7 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$



$$V_0 = 0,79 \text{ m/seg.}$$

$$k = \frac{a}{g} = \frac{1340}{9,81} = 136,5$$

Parábola das perdas de carga:

$$C = \frac{V^2}{2g} + \frac{kV^2 L}{2g} = 8,36V^2$$

Onde, V - varia de 0 a  $V_0$ .

Com os dados acima, os valores de H são determinados graficamente conforme mostra o gráfico (4), (ANEXO 7.7)





IV RESULTADOS

4.1 Tabelas dos valores do Golpe de Ariete, calculados pelo método das características, para o caso de fechamento total e instantâneo da válvula.

Valores calculados de H em função do tempo:

t (tempo) em $10^{-3}$ seg.	H (pressão) em $10^4$ N/m <sup>2</sup>	t (tempo) em $10^{-3}$ seg.	H (pressão) em $10^4$ N/m <sup>2</sup>
0,00	70,00	464	- 7,12
9,00	177,97	546	- 11,50
91,00	182,66	555	155,04
100,00	-22,27	636	159,35
182,00	-26,91	646	-1,18
191,00	168,98	728	-5,42
273,00	173,57	737	149,52
282,00	-14,05	819	153,69
364,00	-18,58	828	3,94
373,00	161,44	909	-0,14
454,00	165,90	919	144,73

4.2 Tabela dos valores do Golpe de Ariete calculados pelo método, gráfico de SCHNYDER E BERGERON, para o caso de fechamento total e instantâneo da válvula.



Valores calculados de H, em função do tempo:

t (tempo) em $10^{-3}$ seg.	H (pressão) em $10^4 \text{ N/m}^2$	t (tempo) em $10^{-3}$ seg.	H (pressão) em $10^4 \text{ N/m}^2$
0	75,00	546	19,00
91	173,00	637	128,00
182	-10,00	728	29,00
273	149,00	818	118,00
364	7,00	909	36,00
455	139,00	1000	111,00

4.3 Tabela dos valores do Golpe de Ariete calculados pelo método das características, para o caso de parada brusca da bomba.

Valores calculados de H em função do tempo

t (tempo) em $10^{-3}$ seg.	H (pressão) em $10^4 \text{ N/m}^2$	t (tempo) em $10^{-3}$ seg.	H (pressão) em $10^4 \text{ N/m}^2$
0	8,20	182	105,11
9	-97,77	191	-90,78
91	-104,46	273	-95,37
100	100,47	282	92,25
364	96,78	464	85,32
373	-83,24	546	89,71
454	-87,70	555	-76,84
636	-81,15	646	79,38
728	83,62	737	-71,32
819	-75,42	828	74,25
909	78,34	919	-66,53



4.4 Tabela dos valores calculados do Colpe de Ariete pelo método gráfico de SCHNEIDER E BERGERON, para o caso de parada brusca da bomba.

Valores calculados de H em função do tempo:

t (tempo) em $10^{-3}$ seg.	H (pressão) em $10^4$ N/m <sup>2</sup>	t (tempo) em $10^{-3}$ seg.	H (pressão) em $10^4$ N/m <sup>2</sup>
0	8,2	546	-10,00
91	-10,00	637	-10,00
182	-10,00	728	93,00
273	-10,00	818	-10,00
364	-10,00	909	-10,00
455	-10,00	1000	-10,00



## V. DISCUSSÃO

No caso de fechamento total e instantâneo da válvula, conforme mostram os gráficos (2) e (3), verificou-se um bom acôrdo entre os valores positivos da pressão calculadas e medidas, tanto na solução gráfica como também na solução numérica. Mas observou-se também para os valores negativos da pressão, uma discrepância entre os calculados e medidos, sendo que a solução numérica apresenta um maior êrro, isto deve-se ao fato de que na solução gráfica apresentada por SCHNIDER E BERGERON os valores mínimos da pressão, são limitados pela pressão de vapor do líquido, enquanto o método numérico apresentado por VICTOR (17), não possuem esta particularidade. Por isto se pode observar no gráfico (3) valores da pressão abaixo da pressão de vapor do líquido, que é praticamente impossível. Estes erros apresentados na solução numérica, devem-se ao fato de que não se levou em conta o problema da cavitação. Segundo alguns estudiosos no assunto, a cavitação afeta consideravelmente a celeridade normal da onda de propagação de pressão tendo inclusive em alguns casos reduzido a mesma a zero, na zona de cavitação.

Este experimento foi feito utilizando uma válvula com fechamento total e instantâneo, caso que dificilmente é realizável na prática. Nos casos de fechamento lento, não tem sobrepressão com valores altos, e também a onda refletida não será perigosa tendo o mesmo valores maiores que a pressão de vapor do líquido.

Nos gráficos (2) e (3) verificou-se boas variações do sinal da velocidade de escoamento, pois a duração dos golpes e contra golpe calculadas e medidas apresentam um bom acôrdo.

Após exame dos gráficos (2) e (3), verifica-se que a teoria para o experimento estudado é aceitável, logo o programa em linguagem Fortran IV para o computador IEM 1130, usado na resolução numérica do experimento po



de ser aplicado em casos práticos. O programa citado acima encontra-se no anexo (7.2). Para resolução do Golpe de Ariete, nos casos de fechamento lento de uma válvula situada na saída do conduto, o livro de JEREBER (17) apresenta um programa em linguagem Fortran IV, podendo o mesmo ser aplicado em casos práticos.

Sendo o problema de fechamento total e instantâneo da válvula relativamente simples, não há grandes problemas a analisar. Apenas a incerteza de alguns dados como por exemplo o coeficiente de atrito que é determinado através de experimento, não tendo assim uma certeza quanto a seu valor real, sendo este coeficiente muito importante na determinação do amortecimento do fenômeno do Golpe de Ariete, logo de uma maneira geral, pode-se afirmar que a duração do golpe e contra golpe são aceitáveis conforme mostram os cálculos.

No caso da parada brusca da bomba, conforme mostra os gráficos (5) e (6), verificou-se que não há um bom acôrdo entre os valores positivos da pressão calculados e medidos, tanto para o método gráfico, como também para o método numérico. Entretanto para os valores negativos da pressão apenas o método gráfico apresentou um bom acôrdo com os valores, medidos enquanto que o método numérico demonstra ser totalmente impraticável. Este erro deve-se ao fato da cavitação ser um problema muito complexo, e que neste experimento é um dos principais obstáculos na determinação do Golpe de Ariete, que o método numérico apresentado por VICTOR (17), não considera o problema da cavitação.

Nos gráficos (5) e (6) verificou-se que não há um bom acôrdo entre a duração do golpe e contra golpe calculados e medidos, consequentemente a variação do sinal da velocidade de escoamento não é muito boa, isto é acarretado devido ao fato de que nos cálculos tanto numérico como gráfico, ambos consideram a celeridade de propagação da onda de pressão, com um valor constante, o que não é verdadeiro quando a mesma penetra na re



ção de cavitação.

Quando o Golpe de Ariete penetra na região com cavitação há formação de uma cavidade grande tendo alguns autores citado correção de valores da pressão na zona de cavitação, mas nos primeiros testes não deu resultados satisfatórios, amortecendo o fenômeno demais, o que é impossível. Existem outras dúvidas sobre a determinação da celeridade de propagação da onda de pressão, e redução da pressão na zona de cavitação como é proposto pelos autores KALKWIJK e KRANENBURG (3), o que poderá ser esclarecidas nas próximas pesquisas.



## VI. CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou a validade e aplicabilidade prática da teoria básica para a solução do problema do Golpe de Ariete nos casos de fechamento total e instantâneo da válvula situada no fim da saída de um conduto. Introduzindo os dados reais do conduto estudado, o programa de computação em anexo (7.2) permite determinar com precisão satisfatória as pressões máximas e mínimas devidas ao Golpe de Ariete.

No caso de parada brusca da bomba, a pesquisa serviu para os estudos qualitativos, demonstrando a complexibilidade teórica. Os ensaios no equipamento experimental simulam bem o fenômeno estudado. A análise teórica empregada neste estudo não apresentou resultados estatísticos, e para obter os valores significativos é melhor usar a solução gráfica. O método analítico com o emprego da solução numérica pelas características, dá apenas um acôrdo melhor na variação da velocidade de escoamento, do que o método gráfico, mas apresenta valores falsos para as oscilações de pressão.

Não se chegou a uma melhor precisão nos valores das oscilações de pressão, com as introduções de correção necessárias para a zona de cavitação similares as correções propostas pelos autores KALKWIJK e KRANENBURG (3). Antes de publicar mais detalhes sobre este aspecto do fenômeno, é necessário fazer uma pesquisa complementar.

Como recomendação para a próxima pesquisa, aconselhamos estudar os fatores:

1º Determinação de um coeficiente, afim de aplica-lo nas equações normais sobre o Golpe de Ariete, com isto diminuir os erros dos valores determinados teóricamente com relação aos medidos.

2º Para um estudo mais elevado e definitivo, será determinar a influência da criação de bôlhas no líquido, bem como a influência da par



te do gás evacuado no líquido, que tem muita influência sobre o transitório Golpe nos condutos de recalque.

## VII. ANEXO

### 7.1 Análise sobre o método das características.

As equações que governam o escoamento de um fluido variável em um conduto fechado, são as equações da Continuidade e da Quantidade de Movimento. Através de uma geral solução, não é possível ser usado o método das características. O método das características tem como finalidade, transformar a equação diferencial parcial, em uma particular equação diferencial total, que são solucionadas por uma primeira ordem, pela técnica das diferenças-finitas.

#### Equações Características:

As equações da Continuidade e da Quantidade de Movimento, forma um par de aparentes equações linear-hiperbólicas diferencial parcial, em termos de duas dependentes variáveis que são a velocidade do fluido e a altura de pressão, e duas independentes variáveis, que são a distância ao longo do conduto e o tempo.

As equações da Continuidade e da Quantidade de Movimento, são transformadas em quatro equações diferenciais ordinárias pelo método das características.

As equações simplificadas da continuidade e da Quantidade de Movimento, onde se eliminou os termos de menor importância, afim de introduzir uma simples teoria para o caso de um simples conduto, são identificadas como  $L_1$  e  $L_2$ .

$$L_1 = \frac{E \partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (25)$$



$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (26)$$

Combinando uma equação com a outra, usando um multiplicador incógnito  $\lambda$  temos:

$$L = L_1 + L_2 = \left( \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{g}{\lambda} + \frac{\partial H}{\partial t} \right) + \left( \frac{\lambda a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + \frac{rV|V|}{2D} = 0 \quad (27)$$

Qualquer par de valores distintos e real de  $\lambda$ , pode novamente formar duas equações em termos de duas variáveis dependentes de H e V, que são em todo caminho equivalente as equações (25) e (26).

O método das características envolve a seleção de dois valores particulares de  $\lambda$ , que converte a equação (27), em um par de equações diferenciais totais.

Se  $V = V(x,t)$  e  $H = H(x,t)$  são soluções das equações (25) e (26), pelo cálculo obtém-se:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad (28)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (29)$$

Para um exame da equação (27), com as equações (28) e (29), observa-se que:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\lambda} = \frac{a^2}{g} \quad (29a)$$

Logo a equação (27) transforma-se em uma equação diferencial ordinária da forma:



$$\frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (30)$$

Desta forma, a solução da equação (29a) será os dois valores particulares de  $\lambda$ , com grande simplificação da equação original.

$$\lambda = \pm g/a \quad (31)$$

Substituindo os valores de dentro da equação (29a), tem-se:

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (32)$$

Que representa a condição imposta na equação (30), quando os dois valores de  $\lambda$ , são substituídos. Após a combinação da equação (31) com a equação (30), e juntando os resultados com a correspondente equação (32), obtém-se dois pares de equações, que identifica-se como  $C^+$  e  $C^-$ :

$$C^+ \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 & (33) \\ \frac{dx}{dt} = a & (34) \end{cases}$$

$$C^- \begin{cases} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 & (35) \\ \frac{dx}{dt} = -a & (36) \end{cases}$$

As primeiras equações  $C^+$  e  $C^-$  são válidas unicamente quando as segundas equações em cada grupo são satisfeitas.

Isto é conveniente para visualizar a solução como se desenvolve nos independentes planos  $xt$ . Visto que a celeridade da onda de propagação, é



geralmente considerada constante para um conduto. Então a equação (34) é projetada como uma linha reta no plano  $xt$ , e similamente a equação (36) é projetada como uma linha reta conforme mostra a figura (10).

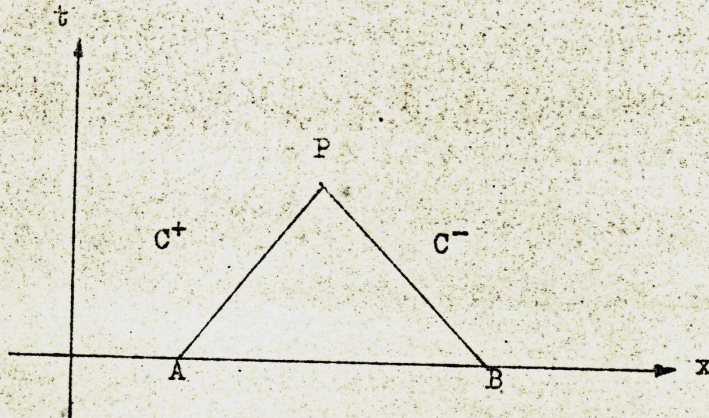


Figura (10) - Linhas características no plano  $xt$ .

Conforme mostra a figura (11) as equações (34) e (36) são linhas características no plano  $xt$ . O  $C^+$  par de equações são associados com o  $C^+$  características, e o  $C^-$  par de equações são associados com o  $C^-$  características.

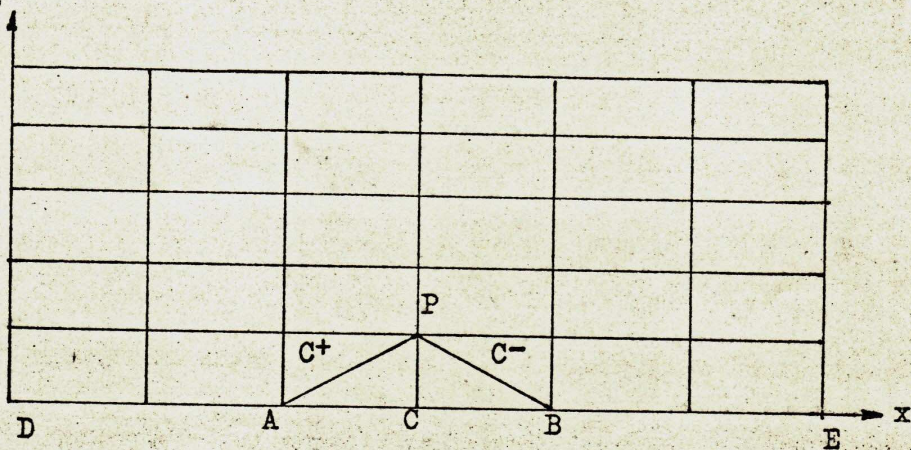


Figura (11) -  $xt$  malha para resolver o problema do Golpe de Ariete em um simples conduto.



Estas equações características são de uma forma, que podem ser convenientemente resolvidas em um digital computador.

Uma solução das equações características usando uma aproximação de primeira ordem das diferenças-finitas.

As duas características  $C^+$  e  $C^-$  passando através dos pontos A e B interceptam-se no ponto P, onde as condições são desconhecidas.

Usando a forma linear das diferenças-finitas entre os pontos P e A aplicando as equações (33) e (34) e entre P e B, aplicando as equações (35) e (36), obtém-se as seguintes equações:

$$V_p - V_A + \frac{g}{a} (H_p - H_A) + \frac{f}{2D} V_A |V_A| (t_p - t_A) = 0 \quad (37)$$

$$x_p - x_A = a (t_p - t_A) \quad (38)$$

$$V_p - V_B - \frac{g}{a} (H_p - H_B) + \frac{f}{2D} V_B |V_B| (t_p - t_B) \quad (39)$$

$$x_p - x_B = -a (t_p - t_B) \quad (40)$$

Os índices são usados para definir alocação conhecida ou incógnita quantidade. Estas quatro equações, são suficientes para determinar, as incógnitas  $t_p$ ,  $x_p$ ,  $V_p$  e  $H_p$ . Para determinar as incógnitas acima descritas, os pontos A e B são racionalmente selecionados para que as equações diferenciais, representem adequadamente as originais equações diferenciais parciais.

Uma malha de características é agora estabelecida em ordem, para executar uma ordenada solução. Um conduto de comprimento L é dividido, em trechos iguais a  $\Delta x = L/N$ , sendo N o número de trechos.



Se é conhecidas as condições iniciais do escoamento, isto é, em  $t = t_0$ , são conhecidos  $V$  e  $H$  para as seções  $N+1$ . O intervalo de tempo é especificado com o auxílio das equações (38) e (40), tem-se:

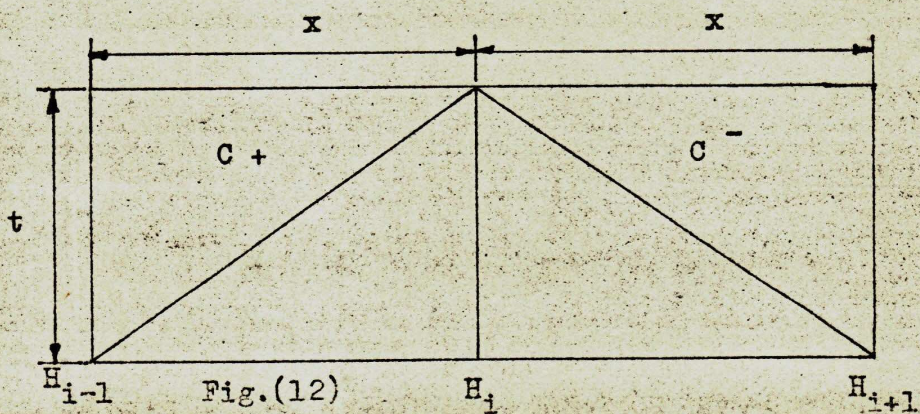
$\Delta t = \frac{\Delta x}{a} = t_p - t_A = t_p - t_B$ , e as linhas características destas seções interceptam outras seções selecionadas. As linhas características de A e B interceptam-se em P, que é a seção C, ver figura (11). Com este esquema, o cálculo da velocidade no interior da seção  $i$  é obtido, resolvendo as equações (37) e (39) para  $V_{pi}$  eliminando  $H_{pi}$ , deste modo obtém-se:

$$V_{pi} = 0,5 \left[ V_{i-1} + V_{i+1} - \frac{a}{g} (H_{i-1} - H_{i+1}) - \frac{f \Delta t}{2D} (V_{i-1} | V_{i-1} | + V_{i+1} | V_{i+1} |) \right] \quad (41)$$

E similarmente para  $H_{pi}$ , tem-se:

$$H_{pi} = 0,5 \left[ H_{i-1} + H_{i+1} + \frac{a}{g} (V_{i-1} - V_{i+1}) - \frac{af \Delta t}{2gD} (V_{i-1} | V_{i-1} | - V_{i+1} | V_{i+1} |) \right] \quad (42)$$

Os índices de notação são mostrados na figura (12).





As equações (41) e (42), permitem o cálculo dos pontos internos na malha, se os valores de  $V$  e  $H$  são conhecidos em todas secções precedentes para o passo-tempo, ou dadas as condições iniciais, ou conforme os resultados de um período de cálculo.

Um exame na malha da figura (11), mostra que o ponto final do sistema, começa influenciando os pontos internos, após o primeiro passo-tempo. Entretanto uma ordem para uma completa solução em um desejado tempo, é necessário introduzir apropriadas condições-limites. Estas condições-limites são aquelas onde são conhecidas os valores de  $V$  e  $H$  nas secções  $D$  e  $E$ , conforme mostra a figura (11).



LOG DRIVE 0000    CART SPEC 0008    CART AVAIL 0008    PHY DRIVE 0000

V2 H10    ACTUAL 16K    CONFIG 16K

// \* J O S E P E I X O T O D O S S A N T O S

// FOR

\*LIST SOURCE PROGRAM

\*IOCS(CARD,1132 PRINTER)

```

C *****
C    PROGRAMA BASICO SOBRE O GOLPE DE ARIETE EM CONDUTOS FORCADOS
C    BOMBA ROTATIVA A MONTANTE, COM VALVULA SOLENOIDE DE FECHAMENTO
C    TOTAL INSTANTANEO, NO FINAL A JUSANTE
C *****
C    DIMENSION H(6,110) , V(6,110)
C    C1=1340./9.81
C    C2=0.034*0.0091/0.0254
C    DELT=0.0091
C    TEMPO=0.
C    DO 10 I=1,6
10    V(I,1)=0.79
C    DO 12 J=2,110
12    V(6,J)=0.
C    DO 15 J=1,110
15    H(1,J)=75.5
C    H(2,1)=74.4
C    H(3,1)=73.3
C    H(4,1)=72.2
C    H(5,1)=71.1
C    H(6,1)=70.
C    WRITE(3,40) TEMPO, (H(I,1),I=1,6), (V(I,1),I=1,6)
C    DO 50 J=2,110
C    H(6,J)=H(5,J-1)+C1*V(5,J-1)-C1*C2*(V(5,J-1)*ABS(V(5,J-1)))
C    DO 20 I=2,5
C    H(I,J)= .5*(H(I-1,J-1)+ H(I+1,J-1)+C1*(V(I-1,J-1)-V(I+1,J-1))
C    *-C1*C2*(V(I-1,J-1)*ABS(V(I-1,J-1))-V(I+1,J-1)*ABS(V(I+1,J-1))) )
20    V(I,J)=.5*(V(I-1,J-1)+V(I+1,J-1)+(H(I-1,J-1)-H(I+1,J-1))/C1-C2*
C    *(V(I-1,J-1)*ABS(V(I-1,J-1))+V(I+1,J-1)*ABS(V(I+1,J-1))))
C    V(1,J)=V(2,J-1)+(H(1,J)-H(2,J-1))/C1-C2*(V(2,J-1)*ABS(V(2,J-1)))
C    TEMPO=(J-1)*DELT
C    WRITE(3,40) TEMPO, (H(I,J),I=1,6), (V(I,J),I=1,6)
40    FORMAT(1HC,F7.3,5X,'H=',6F8.2/19X,'V=',6F8.2)
50    CONTINUE
C    CALL EXIT
C    END

```

FEATURES SUPPORTED

IOCS

CORE REQUIREMENTS FOR

COMMON

VARIABLES 2568 PROGRAM 602

END OF COMPILATION



// XEQ

0.000	H=	75.50	74.40	73.30	72.20	71.10	70.00	
	V=	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	
0.009	H=	75.50	74.40	73.30	72.19	71.10	177.97	
	V=	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.00
0.018	H=	75.50	74.40	73.30	72.19	178.55	179.03	
	V=	0.79	0.79	0.79	0.79	0.00	0.00	0.00
0.027	H=	75.50	74.40	73.30	179.13	178.61	179.13	
	V=	0.79	0.79	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00
0.036	H=	75.50	74.40	179.71	179.19	179.71	179.19	
	V=	0.79	0.79	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.045	H=	75.50	180.23	179.76	180.29	179.77	180.29	
	V=	0.79	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.054	H=	75.50	180.34	180.86	180.34	180.87	180.34	
	V=	-0.75	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.063	H=	75.50	76.54	180.92	181.44	180.92	181.44	
	V=	-0.75	-0.75	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.072	H=	75.50	76.54	77.59	181.50	182.02	181.50	
	V=	-0.75	-0.75	-0.75	0.00	0.00	0.00	0.00
0.081	H=	75.50	76.54	77.59	78.64	182.08	182.60	
	V=	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	0.00	0.00	0.00
0.091	H=	75.50	76.54	77.59	78.64	79.69	182.66	
	V=	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	0.00
0.100	H=	75.50	76.54	77.59	78.64	79.69	-22.27	
	V=	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	0.00
0.109	H=	75.50	76.54	77.59	78.64	-22.84	-22.32	
	V=	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.00	-0.00	0.00
0.118	H=	75.50	76.54	77.59	-23.41	-22.89	-23.42	
	V=	-0.75	-0.75	-0.75	-0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.127	H=	75.50	76.54	-23.99	-23.47	-23.99	-23.47	
	V=	-0.75	-0.75	-0.01	-0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.136	H=	75.50	-24.56	-24.04	-24.56	-24.04	-24.56	
	V=	-0.75	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.145	H=	75.50	-24.62	-25.14	-24.62	-25.14	-24.62	
	V=	0.71	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.154	H=	75.50	74.49	-25.19	-25.71	-25.19	-25.71	
	V=	0.71	0.71	-0.01	-0.00	-0.00	-0.00	0.00
0.163	H=	75.50	74.49	73.49	-25.76	-26.29	-25.76	



		V=	0.71	0.71	0.71	-0.00	-0.00	0.00
0.172	H=	75.50	74.49	73.49	72.49	-26.34	-26.86	
		V=	0.71	0.71	0.71	0.71	-0.00	0.00
0.182	H=	75.50	74.49	73.49	72.49	71.49	-26.91	
		V=	0.72	0.71	0.72	0.71	0.72	0.00
0.191	H=	75.50	74.49	73.49	72.49	71.49	163.98	
		V=	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.00
0.200	H=	75.50	74.49	73.49	72.49	169.55	169.03	
		V=	0.72	0.72	0.72	0.72	0.00	0.00
0.209	H=	75.50	74.49	73.49	170.11	169.60	170.12	
		V=	0.72	0.72	0.72	0.00	0.00	0.00
0.218	H=	75.50	74.49	170.68	170.16	170.68	170.16	
		V=	0.72	0.72	0.01	0.00	0.00	0.00
0.227	H=	75.50	171.25	170.73	171.25	170.73	171.25	
		V=	0.72	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.236	H=	75.50	171.30	171.82	171.30	171.82	171.30	
		V=	-0.68	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.245	H=	75.50	76.45	171.87	172.39	171.87	172.39	
		V=	-0.68	-0.68	0.01	0.00	0.00	0.00
0.254	H=	75.50	76.45	77.41	172.43	172.95	172.43	
		V=	-0.68	-0.68	-0.68	0.00	0.00	0.00
0.263	H=	75.50	76.45	77.41	78.37	173.00	173.52	
		V=	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	0.00	0.00
0.273	H=	75.50	76.45	77.41	78.37	79.33	173.57	
		V=	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	0.00
0.282	H=	75.50	76.46	77.41	78.38	79.33	-14.05	
		V=	-0.68	-0.69	-0.68	-0.69	-0.68	0.00
0.291	H=	75.50	76.46	77.42	78.38	-14.61	-14.10	
		V=	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.00	0.00
0.300	H=	75.50	76.46	77.42	-15.17	-14.66	-15.17	
		V=	-0.69	-0.69	-0.69	-0.00	-0.00	0.00
0.309	H=	75.50	76.46	-15.73	-15.22	-15.74	-15.22	
		V=	-0.69	-0.69	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.318	H=	75.50	-16.29	-15.78	-16.30	-15.78	-16.30	
		V=	-0.69	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.327	H=	75.50	-16.34	-16.86	-16.34	-16.86	-16.34	
		V=	0.65	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.336	H=	75.50	74.58	-16.90	-17.42	-16.90	-17.42	
		V=	0.65	0.65	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.345	H=	75.50	74.58	73.66	-17.46	-17.98	-17.46	



		V=	0.65	0.65	0.65	-0.00	-0.00	0.00
0.354	H=	75.50	74.58	73.66	72.74	-18.02	-18.54	
		V=	0.65	0.66	0.65	0.66	-0.00	0.00
0.364	H=	75.50	74.58	73.65	72.74	71.81	-18.58	
		V=	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.00
0.373	H=	75.50	74.57	73.65	72.73	71.81	161.44	
		V=	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.00
0.382	H=	75.50	74.57	73.65	72.73	162.00	161.49	
		V=	0.66	0.66	0.66	0.66	0.00	0.00
0.391	H=	75.50	74.57	73.65	162.55	162.04	162.55	
		V=	0.66	0.66	0.66	0.00	0.00	0.00
0.400	H=	75.50	74.57	163.10	162.59	163.10	162.59	
		V=	0.66	0.66	0.01	0.00	0.00	0.00
0.409	H=	75.50	163.65	163.14	163.66	163.14	163.66	
		V=	0.66	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.418	H=	75.50	163.70	164.21	163.70	164.21	163.70	
		V=	-0.62	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.427	H=	75.50	76.38	164.25	164.76	164.25	164.76	
		V=	-0.62	-0.63	0.01	0.00	0.00	0.00
0.436	H=	75.50	76.38	77.26	164.80	165.31	164.80	
		V=	-0.63	-0.63	-0.63	0.00	0.00	0.00
0.445	H=	75.50	76.38	77.26	78.15	165.35	165.86	
		V=	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	0.00	0.00
0.454	H=	75.50	76.38	77.26	78.15	79.03	165.90	
		V=	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	0.00
0.464	H=	75.50	76.38	77.26	78.15	79.03	-7.12	
		V=	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	0.00
0.473	H=	75.50	76.38	77.27	78.15	-7.66	-7.16	
		V=	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.00	0.00
0.482	H=	75.50	76.38	77.27	-8.21	-7.70	-8.21	
		V=	-0.63	-0.64	-0.63	-0.00	-0.00	0.00
0.491	H=	75.50	76.38	-8.75	-8.24	-8.75	-8.24	
		V=	-0.64	-0.64	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.500	H=	75.50	-9.29	-8.79	-9.29	-8.79	-9.29	
		V=	-0.64	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.509	H=	75.50	-9.33	-9.84	-9.33	-9.84	-9.33	
		V=	0.60	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.518	H=	75.50	74.65	-9.88	-10.38	-9.88	-10.38	
		V=	0.60	0.60	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.527	H=	75.50	74.65	73.80	-10.42	-10.93	-10.42	



		V=	0.60	0.60	0.60	-0.00	-0.00	0.00
0.536	H=	75.50	74.64	73.80	72.94	-10.96	-11.47	
		V=	0.60	0.61	0.60	0.61	-0.00	0.00
0.546	H=	75.50	74.64	73.79	72.94	72.09	-11.50	
		V=	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.00
0.555	H=	75.50	74.64	73.79	72.94	72.09	155.04	
		V=	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.00
0.564	H=	75.50	74.64	73.79	72.94	155.57	155.08	
		V=	0.61	0.61	0.61	0.61	0.00	0.00
0.573	H=	75.50	74.64	73.79	156.11	155.61	156.11	
		V=	0.61	0.61	0.61	0.00	0.00	0.00
0.582	H=	75.50	74.64	156.65	156.15	156.65	156.15	
		V=	0.61	0.61	0.01	0.00	0.00	0.00
0.591	H=	75.50	157.18	156.68	157.18	156.68	157.18	
		V=	0.61	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.600	H=	75.50	157.22	157.72	157.22	157.72	157.22	
		V=	-0.58	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.609	H=	75.50	76.31	157.75	158.25	157.75	158.25	
		V=	-0.58	-0.58	0.01	0.00	0.00	0.00
0.618	H=	75.50	76.31	77.13	158.28	158.79	158.29	
		V=	-0.58	-0.58	-0.58	0.00	0.00	0.00
0.627	H=	75.50	76.31	77.13	77.95	158.82	159.32	
		V=	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	0.00	0.00
0.636	H=	75.50	76.31	77.14	77.95	78.77	159.35	
		V=	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	0.00
0.646	H=	75.50	76.32	77.13	77.96	78.77	-1.18	
		V=	-0.58	-0.59	-0.58	-0.59	-0.58	0.00
0.655	H=	75.50	76.32	77.14	77.96	-1.71	-1.22	
		V=	-0.59	-0.59	-0.59	-0.59	-0.00	0.00
0.664	H=	75.50	76.32	77.14	-2.24	-1.74	-2.24	
		V=	-0.59	-0.59	-0.59	-0.00	-0.00	0.00
0.673	H=	75.50	76.32	-2.76	-2.27	-2.76	-2.27	
		V=	-0.59	-0.59	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.682	H=	75.50	-3.29	-2.80	-3.29	-2.79	-3.29	
		V=	-0.59	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.691	H=	75.50	-3.32	-3.81	-3.32	-3.81	-3.32	
		V=	0.56	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.700	H=	75.50	74.71	-3.85	-4.34	-3.85	-4.34	
		V=	0.56	0.56	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.709	H=	75.50	74.71	73.92	-4.37	-4.87	-4.37	



		V=	0.56	0.56	0.56	-0.00	-0.00	0.00
0.718	H=	75.50	74.70	73.92	73.12	-4.90	-5.39	
		V=	0.56	0.56	0.56	0.56	-0.00	0.00
0.728	H=	75.50	74.70	73.91	73.12	72.33	-5.42	
		V=	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.00
0.737	H=	75.50	74.70	73.91	73.12	72.33	149.52	
		V=	0.56	0.57	0.56	0.57	0.56	0.00
0.746	H=	75.50	74.70	73.91	73.12	150.04	149.56	
		V=	0.57	0.57	0.57	0.57	0.00	0.00
0.755	H=	75.50	74.70	73.91	150.56	150.07	150.56	
		V=	0.57	0.57	0.57	0.00	0.00	0.00
0.764	H=	75.50	74.70	151.08	150.59	151.08	150.59	
		V=	0.57	0.57	0.01	0.00	0.00	0.00
0.773	H=	75.50	151.59	151.11	151.59	151.11	151.59	
		V=	0.57	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.782	H=	75.50	151.62	152.11	151.62	152.11	151.62	
		V=	-0.54	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.791	H=	75.50	76.26	152.14	152.63	152.14	152.63	
		V=	-0.54	-0.54	0.01	0.00	0.00	0.00
0.800	H=	75.50	76.26	77.02	152.66	153.15	152.66	
		V=	-0.54	-0.54	-0.54	0.00	0.00	0.00
0.809	H=	75.50	76.26	77.02	77.79	153.18	153.66	
		V=	-0.54	-0.54	-0.54	-0.54	0.00	0.00
0.819	H=	75.50	76.26	77.02	77.78	78.55	153.69	
		V=	-0.54	-0.54	-0.54	-0.54	-0.54	0.00
0.828	H=	75.50	76.26	77.02	77.79	78.55	3.94	
		V=	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	0.00
0.837	H=	75.50	76.26	77.03	77.79	3.44	3.91	
		V=	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.00	0.00
0.846	H=	75.50	76.26	77.03	2.93	3.41	2.93	
		V=	-0.55	-0.55	-0.55	-0.00	-0.00	0.00
0.855	H=	75.50	76.26	2.42	2.90	2.42	2.90	
		V=	-0.55	-0.55	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.864	H=	75.50	1.91	2.39	1.91	2.39	1.91	
		V=	-0.55	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.873	H=	75.50	1.88	1.40	1.88	1.40	1.88	
		V=	0.52	-0.01	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.882	H=	75.50	74.76	1.37	0.89	1.37	0.89	
		V=	0.52	0.52	-0.01	-0.00	-0.00	0.00
0.891	H=	75.50	74.76	74.02	0.87	0.39	0.87	



	V=	0.52	0.52	0.52	-0.00	-0.00	0.00
0.900	H=	75.50	74.76	74.02	73.28	0.36	-0.11
	V=	0.52	0.52	0.52	0.52	-0.00	0.00
0.909	H=	75.50	74.76	74.02	73.28	72.54	-0.14
	V=	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.00
0.919	H=	75.50	74.75	74.02	73.27	72.54	144.73
	V=	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.00
0.928	H=	75.50	74.75	74.01	73.28	145.23	144.75
	V=	0.53	0.53	0.53	0.53	0.00	0.00
0.937	H=	75.50	74.75	74.01	145.73	145.25	145.73
	V=	0.53	0.53	0.53	0.00	0.00	0.00
0.946	H=	75.50	74.75	146.23	145.75	146.23	145.75
	V=	0.53	0.53	0.01	0.00	0.00	0.00
0.955	H=	75.50	146.73	146.25	146.73	146.25	146.73
	V=	0.53	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.964	H=	75.50	146.75	147.22	146.75	147.23	146.75
	V=	-0.50	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
0.973	H=	75.50	76.21	147.25	147.72	147.25	147.72
	V=	-0.50	-0.50	0.01	0.00	0.00	0.00
0.982	H=	75.50	76.21	76.92	147.75	148.22	147.75
	V=	-0.51	-0.50	-0.51	0.00	0.00	0.00
0.991	H=	75.50	76.21	76.92	77.64	148.25	148.72
	V=	-0.51	-0.51	-0.51	-0.51	0.00	0.00



LOG DRIVE 0000 CART SPEC 0008 CART AVAIL 0008 PHY DRIVE 0000

V2 M10 ACTUAL 16K CONFIG 16K

// \* JOSE PEIXOTO DOS SANTOS

// FOR
\*LIST SOURCE PROGRAM
\*IOCS(CARD,1132 PRINTER)

C \*\*\*\*\*
C PROGRAMA BASICO DO GOLPE DE ARIETE EM CONDUTOS DE RECALQUE
C BOMBA ROTATIVA COM VALVULA SOLENOIDE DE FECHAMENTO TOTAL INSTANTANEO
C A MONTANTE E RESERVATORIO A JUSANTE
C \*\*\*\*\*
C A VALVULA TEM A FINALIDADE DE SIMULAR UMA PARADA DE BOMBA
C \*\*\*\*\*

DIMENSION H(6,110) , V(6,110)

C1=1340./9.81

C2=0.034\*0.0091/0.0254

DELT=0.0091

TEMPO=0.

DO 10 I=1,6

10 V(I,1)=0.79

DO 12 J=2,110

12 V(1,J)=0.

DO 15 J=1,110

15 H(6,J)=2.7

H(1,1)=8.2

H(2,1)=7.1

H(3,1)=6.0

H(4,1)=4.9

H(5,1)=3.8

WRITE(3,40) TEMPO, (H(I,1),I=1,6), (V(I,1),I=1,6)

DO 50 J=2,110

H(1,J)= H(2,J-1) - C1\*V(2,J-1) + C1\*C2\*V(2,J-1)\*ABS(V(2,J-1))

DO 20 I=2,5

H(I,J)= .5\*(H(I-1,J-1)+ H(I+1,J-1)+C1\*(V(I-1,J-1)-V(I+1,J-1))

\*-C1\*C2\*(V(I-1,J-1)\*ABS(V(I-1,J-1))-V(I+1,J-1)\*ABS(V(I+1,J-1))) )

20 V(I,J)=.5\*(V(I-1,J-1)+V(I+1,J-1)+(H(I-1,J-1)-H(I+1,J-1))/C1-C2\*

\*(V(I-1,J-1)\*ABS(V(I-1,J-1))+V(I+1,J-1)\*ABS(V(I+1,J-1))))

V(6,J)=V(5,J-1)+(H(5,J-1)-H(6,J))/C1-C2\*(V(5,J-1)\*ABS(V(5,J-1)))

TEMPO = (J-1)\*DELT

WRITE(3,40) TEMPO, (H(I,J),I=1,6), (V(I,J),I=1,6)

40 FORMAT(1H0,F7.3,5X,'H=',6F8.2/19X,'V=',6F8.2)

50 CONTINUE

CALL EXIT

END

FEATURES SUPPORTED

IOCS

CORE REQUIREMENTS FOR

COMMON

0 VARIABLES

2688

PROGRAM

600



// XEQ

0.000	H=	8.20	7.10	6.00	4.90	3.80	2.70
	V=	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
0.009	H=	-89.77	7.10	6.00	4.90	3.80	2.70
	V=	0.00	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
0.018	H=	-99.83	-100.35	6.00	4.89	3.80	2.70
	V=	0.00	0.00	0.79	0.79	0.79	0.79
0.027	H=	-100.93	-100.41	-100.93	4.89	3.79	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.79	0.79	0.79
0.036	H=	-100.99	-101.51	-100.99	-101.51	3.79	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.79	0.79
0.045	H=	-102.09	-101.57	-102.09	-101.56	-102.08	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.79
0.054	H=	-102.14	-102.67	-102.14	-102.66	-102.14	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.75
0.063	H=	-103.24	-102.72	-103.24	-102.72	1.65	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.75	-0.75
0.072	H=	-103.30	-103.82	-103.30	0.60	1.65	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	-0.75	-0.75	-0.75
0.081	H=	-104.40	-103.88	-0.44	0.60	1.65	2.70
	V=	0.00	0.00	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75
0.091	H=	-104.46	-1.49	-0.44	0.60	1.65	2.70
	V=	0.00	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75
0.100	H=	100.47	-1.49	-0.44	0.60	1.65	2.70
	V=	0.00	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75
0.109	H=	100.52	101.04	-0.44	0.60	1.65	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75
0.118	H=	101.62	101.09	101.61	0.60	1.65	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.75	-0.75	-0.75
0.127	H=	101.67	102.19	101.67	102.19	1.65	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.75	-0.75
0.136	H=	102.76	102.24	102.76	102.24	102.76	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01	-0.75
0.145	H=	102.82	103.34	102.82	103.34	102.82	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01	0.71
0.154	H=	103.91	103.39	103.91	103.39	3.70	2.70



	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	0.71	0.71
0.163	H=	103.96	104.49	103.96	4.70	3.70	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	0.71	0.71	0.71
0.172	H=	105.06	104.54	5.70	4.70	3.70	2.70
	V=	0.00	-0.00	0.71	0.71	0.71	0.71
0.182	H=	105.11	6.70	5.70	4.70	3.70	2.70
	V=	0.00	0.72	0.71	0.72	0.71	0.72
0.191	H=	-90.78	6.70	5.70	4.70	3.70	2.70
	V=	0.00	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
0.200	H=	-90.83	-91.35	5.70	4.70	3.70	2.70
	V=	0.00	0.00	0.72	0.72	0.72	0.72
0.209	H=	-91.92	-91.40	-91.91	4.70	3.70	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.72	0.72	0.72
0.218	H=	-91.96	-92.48	-91.96	-92.48	3.70	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.72	0.72
0.227	H=	-93.05	-92.53	-93.05	-92.53	-93.05	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.72
0.236	H=	-93.10	-93.62	-93.10	-93.62	-93.10	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.68
0.245	H=	-94.19	-93.67	-94.19	-93.67	1.74	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.68	-0.68
0.254	H=	-94.23	-94.75	-94.23	0.78	1.74	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	-0.68	-0.68	-0.68
0.263	H=	-95.32	-94.80	-0.17	0.78	1.74	2.70
	V=	0.00	0.00	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68
0.273	H=	-95.37	-1.13	-0.17	0.78	1.74	2.70
	V=	0.00	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68
0.282	H=	92.25	-1.13	-0.18	0.78	1.73	2.70
	V=	0.00	-0.68	-0.69	-0.68	-0.69	-0.68
0.291	H=	92.30	92.81	-0.18	0.77	1.73	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69
0.300	H=	93.37	92.86	93.37	0.77	1.73	2.70
	V=	0.00	-1.00	-0.00	-0.69	-0.69	-0.69
0.309	H=	93.42	93.94	93.42	93.93	1.73	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.69	-0.69
0.318	H=	94.50	93.98	94.50	93.98	94.49	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01	-0.69
0.327	H=	94.54	95.06	94.54	95.06	94.54	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01	0.65
0.336	H=	95.62	95.10	95.62	95.10	3.61	2.70



	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	0.65	0.65
0.345	H=	95.66	96.18	95.66	4.53	3.61	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	0.65	0.65	0.65
0.354	H=	96.74	96.22	5.45	4.53	3.61	2.70
	V=	0.00	-0.00	0.66	0.65	0.66	0.65
0.364	H=	96.78	5.33	5.45	4.54	3.61	2.70
	V=	0.00	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
0.373	H=	-83.24	5.33	5.46	4.54	3.62	2.70
	V=	0.00	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
0.382	H=	-83.29	-83.80	5.46	4.54	3.62	2.70
	V=	0.00	0.00	0.66	0.66	0.66	0.66
0.391	H=	-84.35	-83.84	-84.35	4.54	3.62	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.66	0.66	0.66
0.400	H=	-84.39	-84.90	-84.39	-84.90	3.62	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.66	0.66
0.409	H=	-85.46	-84.94	-85.46	-84.94	-85.45	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.66
0.418	H=	-85.50	-86.01	-85.50	-86.01	-85.50	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.62
0.427	H=	-86.56	-86.05	-86.56	-86.05	1.81	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.63	-0.62
0.436	H=	-86.60	-87.11	-86.60	0.93	1.81	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	-0.63	-0.63	-0.63
0.445	H=	-87.66	-87.15	0.04	0.93	1.81	2.70
	V=	0.00	0.00	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63
0.454	H=	-87.70	-0.83	0.04	0.93	1.81	2.70
	V=	0.00	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63
0.464	H=	85.32	-0.83	0.04	0.93	1.81	2.70
	V=	0.00	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63
0.473	H=	85.36	85.86	0.04	0.92	1.81	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63
0.482	H=	86.41	85.90	86.41	0.92	1.81	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.63	-0.64	-0.63
0.491	H=	86.44	86.95	86.44	86.95	1.81	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.64	-0.63
0.500	H=	87.49	86.99	87.49	86.99	87.49	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01	-0.64
0.509	H=	87.53	88.04	87.53	88.04	87.53	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01	0.60
0.518	H=	88.56	88.08	88.58	88.08	3.54	2.70



	V=	-0.00	-0.00	-0.00	-0.01	0.60	0.60
0.527	H=	86.62	89.13	88.62	4.39	3.54	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	0.60	0.60	0.60
0.536	H=	89.67	89.16	5.25	4.39	3.55	2.70
	V=	0.00	-0.00	0.61	0.60	0.61	0.60
0.546	H=	89.71	6.10	5.25	4.40	3.55	2.70
	V=	0.00	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
0.555	H=	-76.84	6.10	5.25	4.40	3.55	2.70
	V=	0.00	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
0.564	H=	-76.88	-77.37	5.25	4.40	3.55	2.70
	V=	0.00	0.00	0.61	0.61	0.61	0.61
0.573	H=	-77.91	-77.41	-77.91	4.40	3.55	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.61	0.61	0.61
0.582	H=	-77.95	-78.45	-77.95	-78.45	3.55	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.61	0.61
0.591	H=	-78.98	-78.48	-78.98	-78.48	-78.98	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.61
0.600	H=	-79.02	-79.52	-79.02	-79.52	-79.02	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.58
0.609	H=	-80.05	-79.55	-80.05	-79.55	1.88	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.58	-0.58
0.618	H=	-80.09	-80.59	-80.08	1.06	1.88	2.70
	V=	0.00	0.00	0.00	-0.58	-0.58	-0.58
0.627	H=	-81.12	-80.62	0.24	1.06	1.88	2.70
	V=	0.00	0.00	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58
0.636	H=	-81.15	-0.57	0.24	1.05	1.88	2.70
	V=	0.00	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58	-0.58
0.646	H=	79.38	-0.57	0.23	1.06	1.87	2.70
	V=	0.00	-0.58	-0.59	-0.58	-0.59	-0.58
0.655	H=	79.42	79.91	0.23	1.05	1.87	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.59	-0.59	-0.59	-0.59
0.664	H=	80.44	79.94	80.44	1.05	1.87	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.59	-0.59	-0.59
0.673	H=	80.47	80.96	80.47	80.96	1.87	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.59	-0.59
0.682	H=	81.49	80.99	81.49	81.00	81.49	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01	-0.59
0.691	H=	81.52	82.01	81.52	82.01	81.52	2.70
	V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01	0.56
0.700	H=	82.54	82.05	82.54	82.05	3.48	2.70

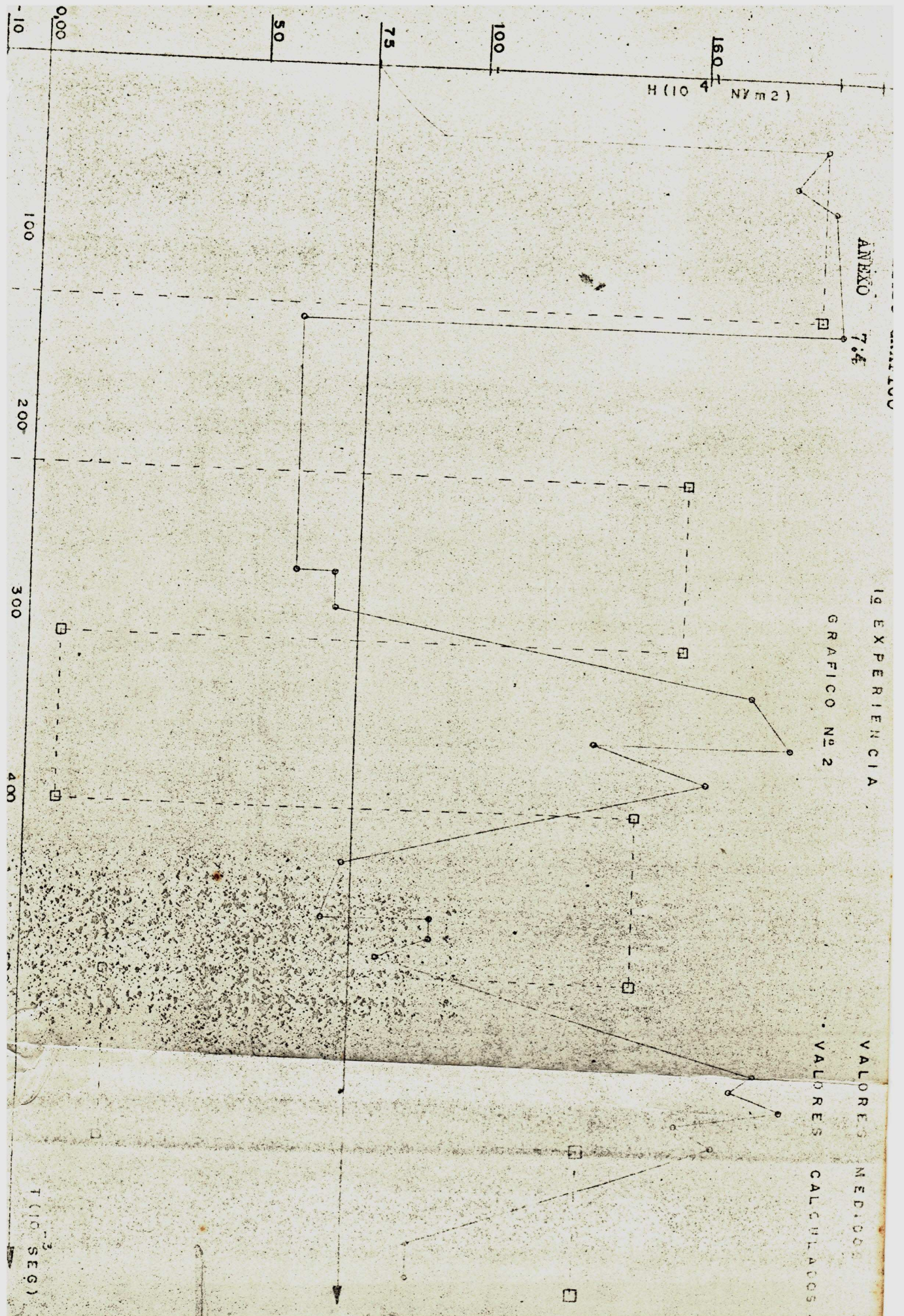


		V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	0.56	0.56
0.709	H=	82:57	83.07	82.57	4.27	3.48	2.70	
		V=	0.00	-0.00	-0.00	0.56	0.56	0.56
0.718	H=	83.59	83.10	5.07	4.27	3.49	2.70	
		V=	0.00	-0.00	0.56	0.56	0.56	0.56
0.723	H=	83.62	83.86	5.07	4.28	3.49	2.70	
		V=	0.00	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
0.737	H=	-71.32	5.83	5.07	4.28	3.49	2.70	
		V=	0.00	0.56	0.57	0.56	0.57	0.56
0.746	H=	-71.36	-71.84	5.07	4.28	3.49	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.57	0.57	0.57	0.57
0.755	H=	-72.36	-71.87	-72.36	4.28	3.49	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	0.57	0.57	0.57
0.764	H=	-72.39	-72.88	-72.39	-72.88	3.49	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.57	0.57
0.773	H=	-73.39	-72.91	-73.39	-72.91	-73.39	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.57
0.782	H=	-73.42	-73.91	-73.42	-73.91	-73.42	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.54
0.791	H=	-74.43	-73.94	-74.43	-73.94	1.93	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.54	-0.54
0.800	H=	-74.46	-74.95	-74.46	1.17	1.93	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	-0.54	-0.54	-0.54
0.809	H=	-75.46	-74.98	0.40	1.17	1.93	2.70	
		V=	0.00	0.00	-0.54	-0.54	-0.54	-0.54
0.819	H=	-75.49	-0.35	0.41	1.17	1.93	2.70	
		V=	0.00	-0.54	-0.54	-0.54	-0.54	-0.54
0.828	H=	74.25	-0.35	0.40	1.17	1.93	2.70	
		V=	0.00	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55
0.837	H=	74.28	74.75	0.40	1.16	1.93	2.70	
		V=	0.00	-0.00	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55
0.846	H=	75.26	74.78	75.26	1.16	1.93	2.70	
		V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.55	-0.55	-0.55
0.855	H=	75.29	75.77	75.29	75.77	1.93	2.70	
		V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.55	-0.55
0.864	H=	76.28	75.80	76.28	75.80	76.28	2.70	
		V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01	-0.55
0.873	H=	76.31	76.79	76.31	76.79	76.31	2.70	
		V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	-0.01	0.55
0.882	H=	77.30	76.82	77.30	76.82	3.43	2.70	



		V=	0.00	-0.00	-0.00	-0.01	0.52	0.52
0.891	H=	77.32	77.80	77.32	4.17	3.43	2.70	
		V=	0.00	-0.00	-0.00	0.52	0.52	0.52
0.900	H=	78.31	77.83	4.91	4.17	3.43	2.70	
		V=	0.00	-0.00	0.52	0.52	0.52	0.52
0.909	H=	78.34	78.65	4.91	4.17	3.43	2.70	
		V=	0.00	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
0.919	H=	-66.53	-65.65	4.92	4.17	3.44	2.70	
		V=	0.00	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
0.928	H=	-66.56	-67.03	4.91	4.18	3.44	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.53	0.53	0.53	0.53
0.937	H=	-67.53	-67.05	-67.53	4.18	3.44	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	0.53	0.53	0.53
0.946	H=	-67.55	-68.03	-67.55	-68.03	3.44	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.53	0.53
0.955	H=	-68.53	-68.05	-68.53	-68.05	-68.53	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.53
0.964	H=	-68.55	-69.02	-68.55	-69.02	-68.55	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.50
0.973	H=	-69.52	-69.05	-69.52	-69.05	1.98	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.50	-0.50
0.982	H=	-69.55	-70.02	-69.55	1.27	1.98	2.70	
		V=	0.00	0.00	0.00	-0.51	-0.50	-0.51
0.991	H=	-70.52	-70.05	0.55	1.27	1.98	2.70	
		V=	0.00	0.00	-0.51	-0.51	-0.51	-0.51







METODO NUMERICO

ANEXO 7.4

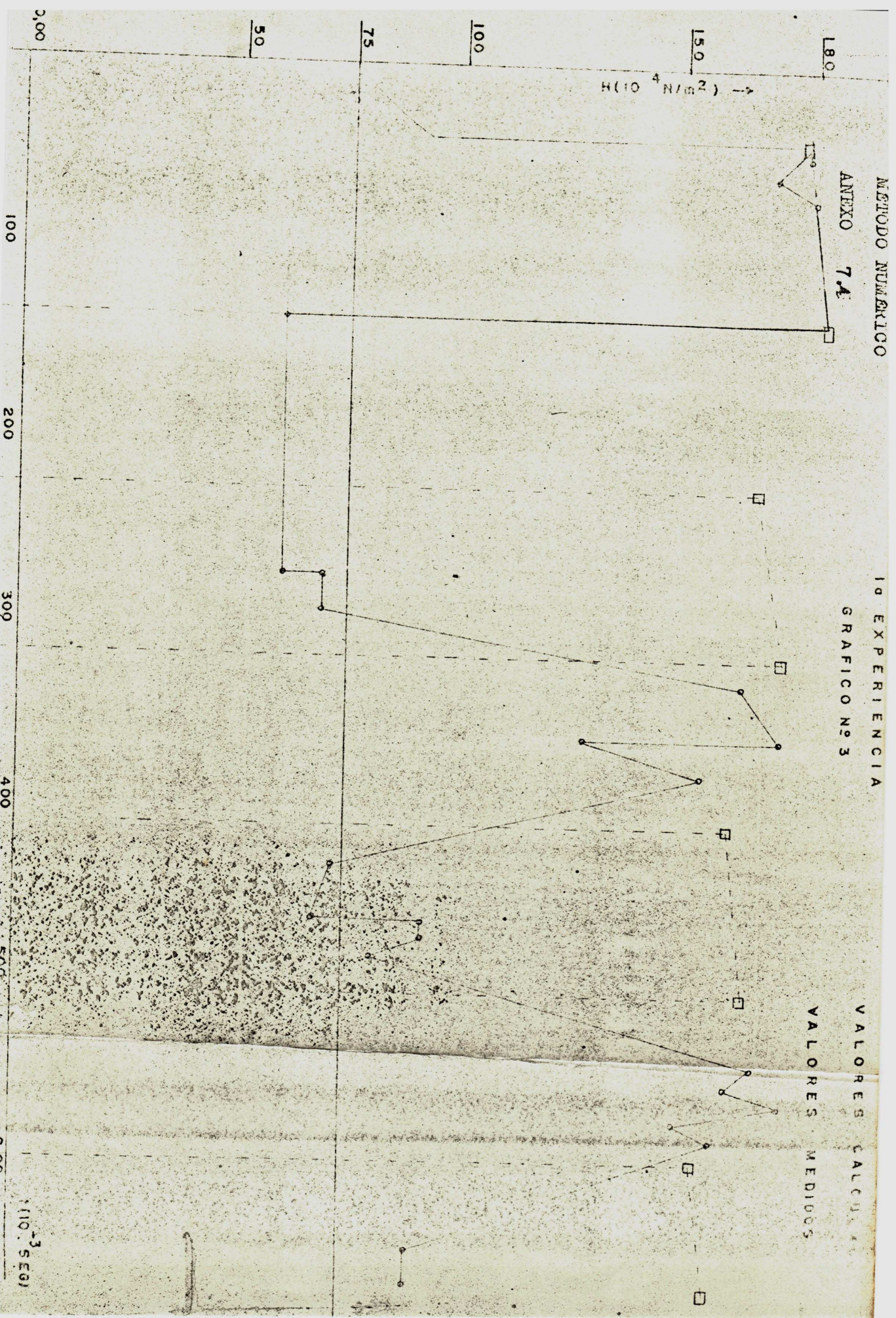
1ª EXPERIENCIA

GRAFICO Nº 3

VALORES CALCULADOS

VALORES MEDIDOS

$H(10^4 \text{ N/m}^2)$



(110.3 SEG)



MÉTODOS GRÁFICO

ANEXO 7.5

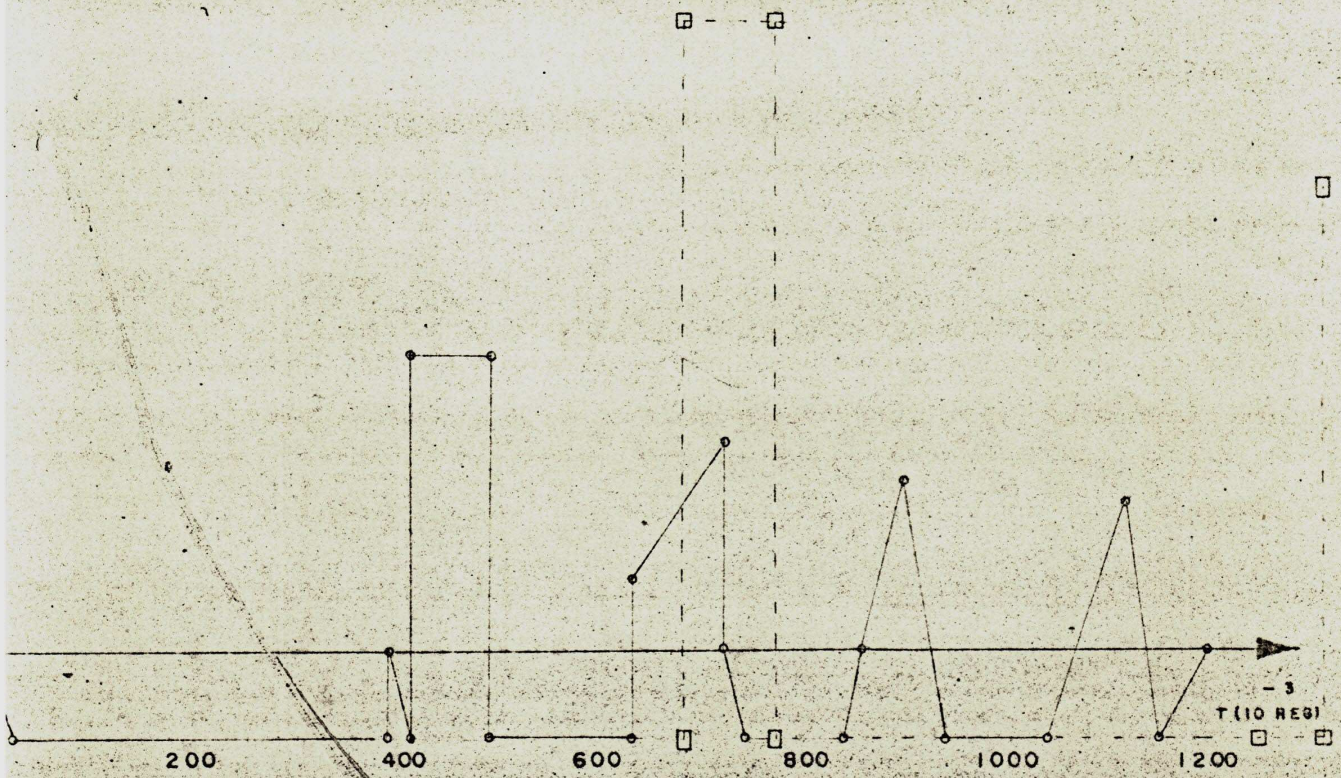
29. EXPERIENCIA

GRÁFICO Nº 3

VALORES MEDIDOS ———

CONVENÇÕES

VALORES CALCULADOS - - - - -





MÉTODO NUMÉRICO

ANEXO 7.5

2ª EXPERIENCIA

GRAFICO Nº 6

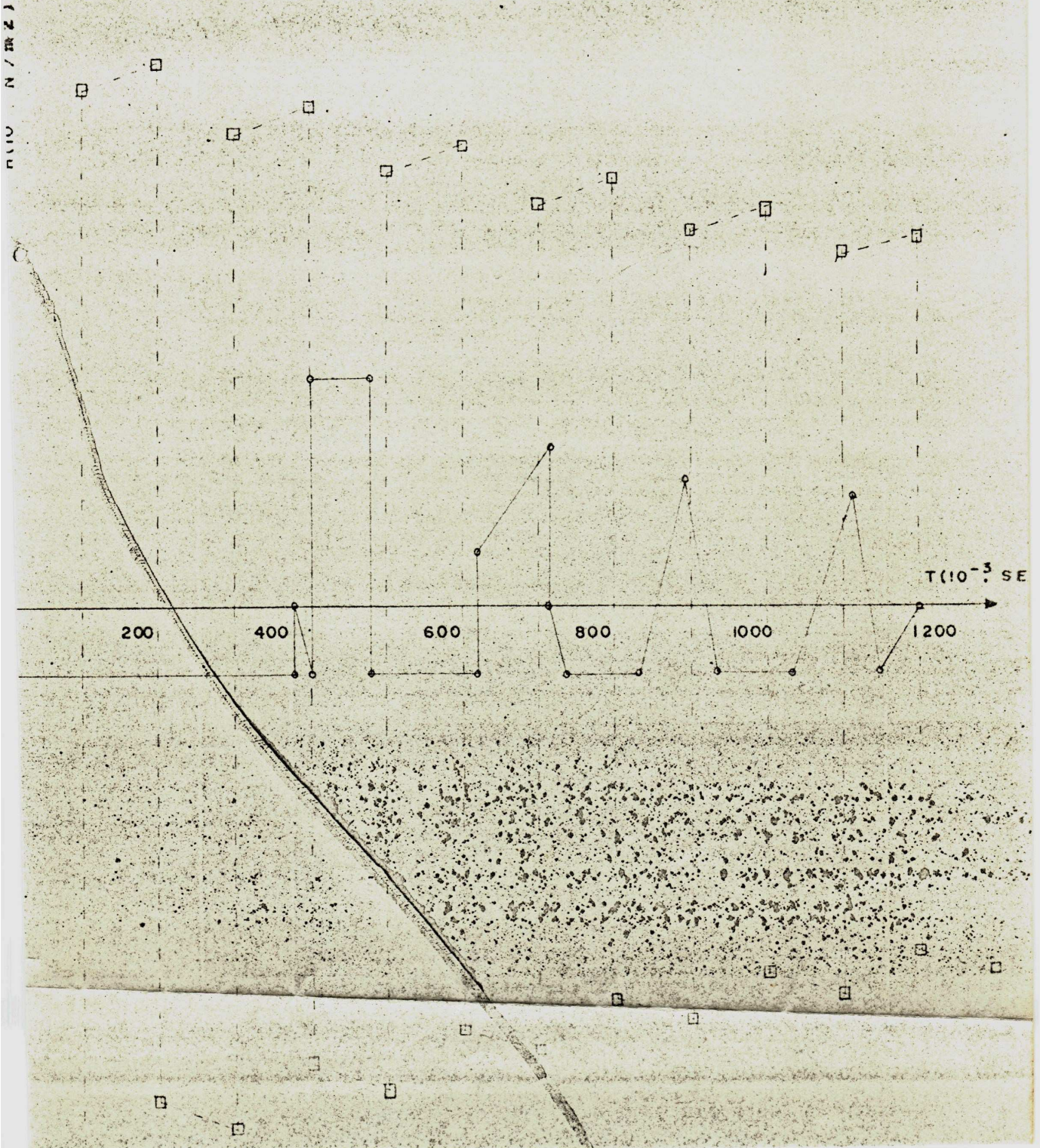
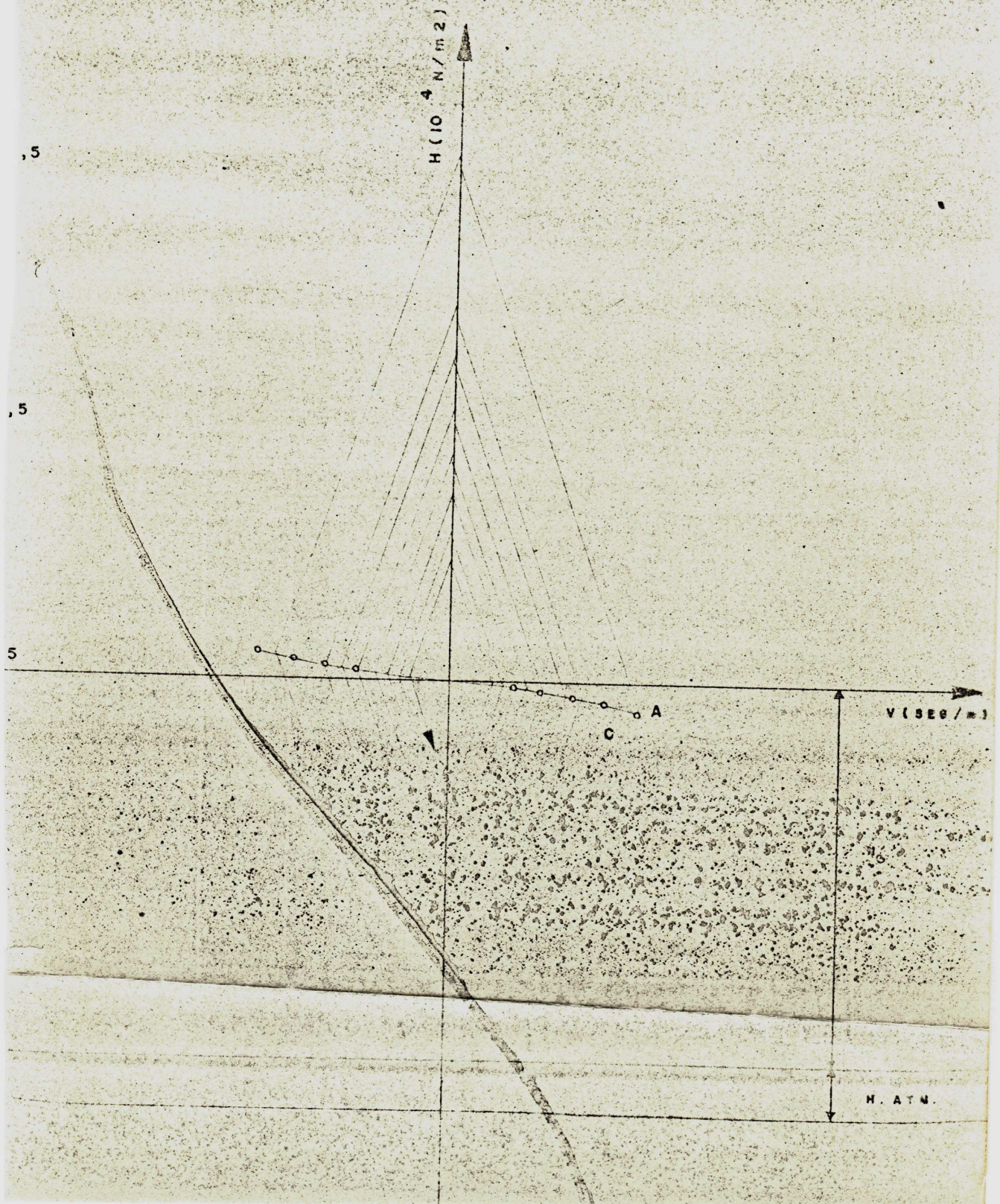
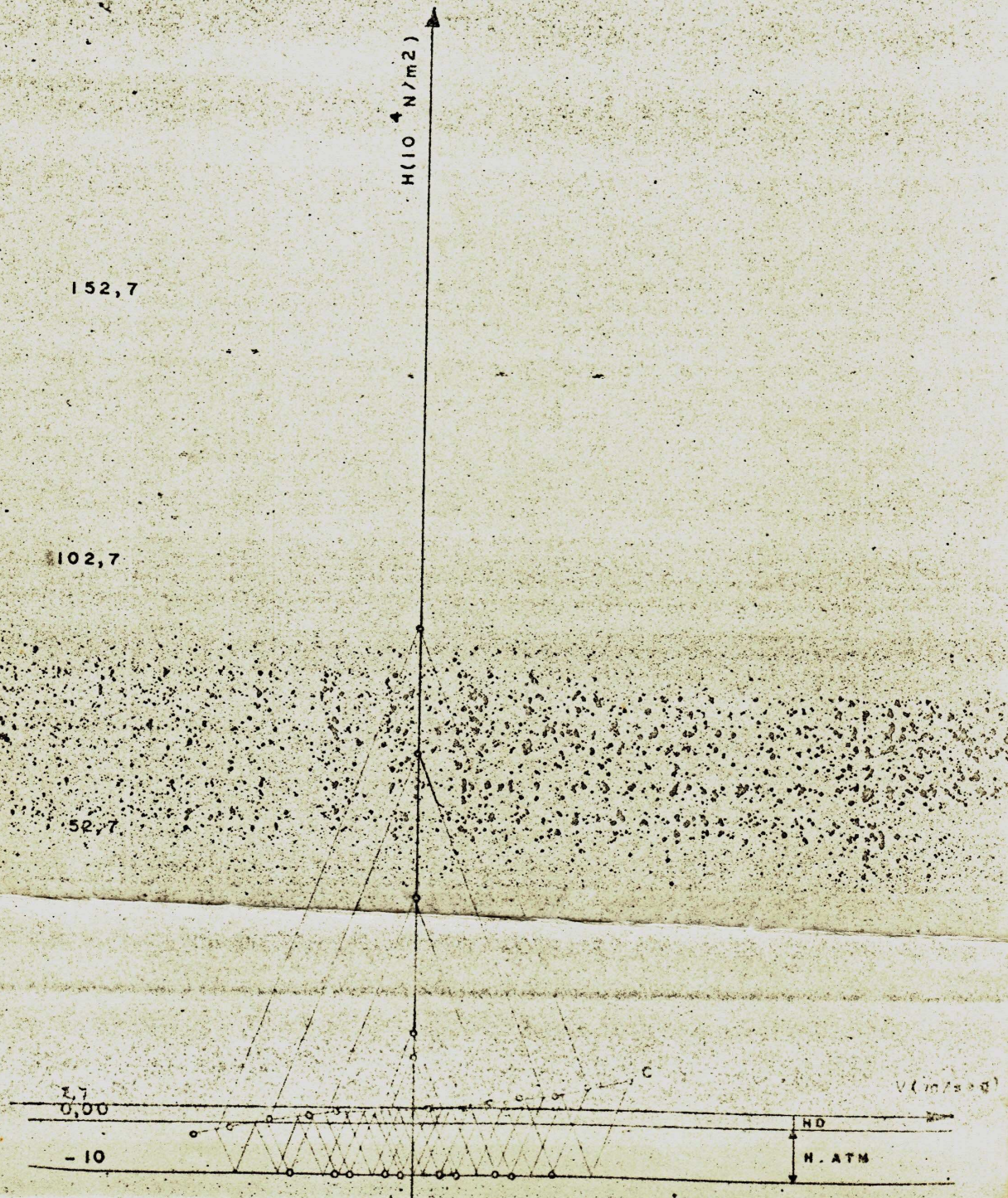




GRAFICO 1









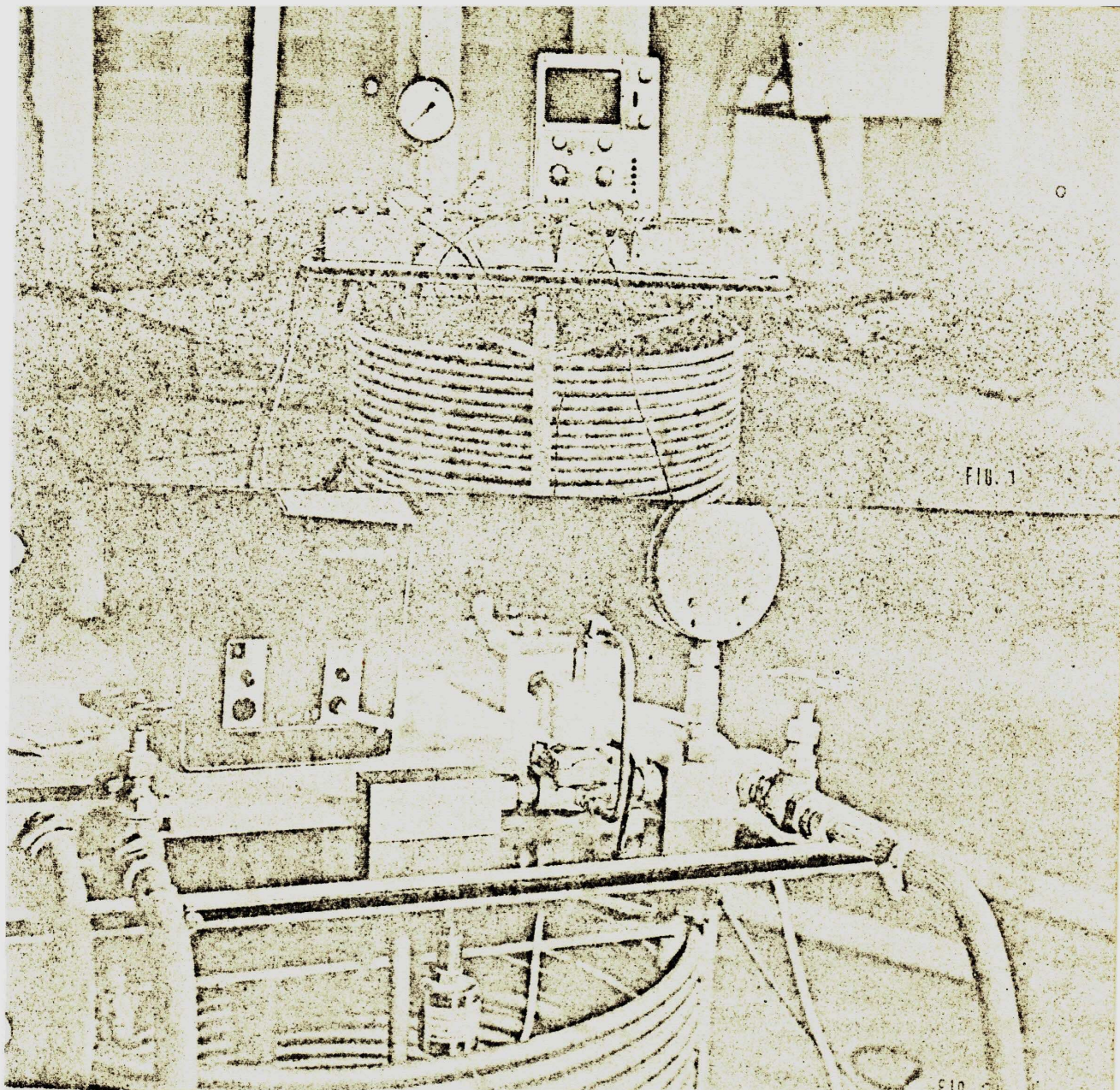


FIG. 1

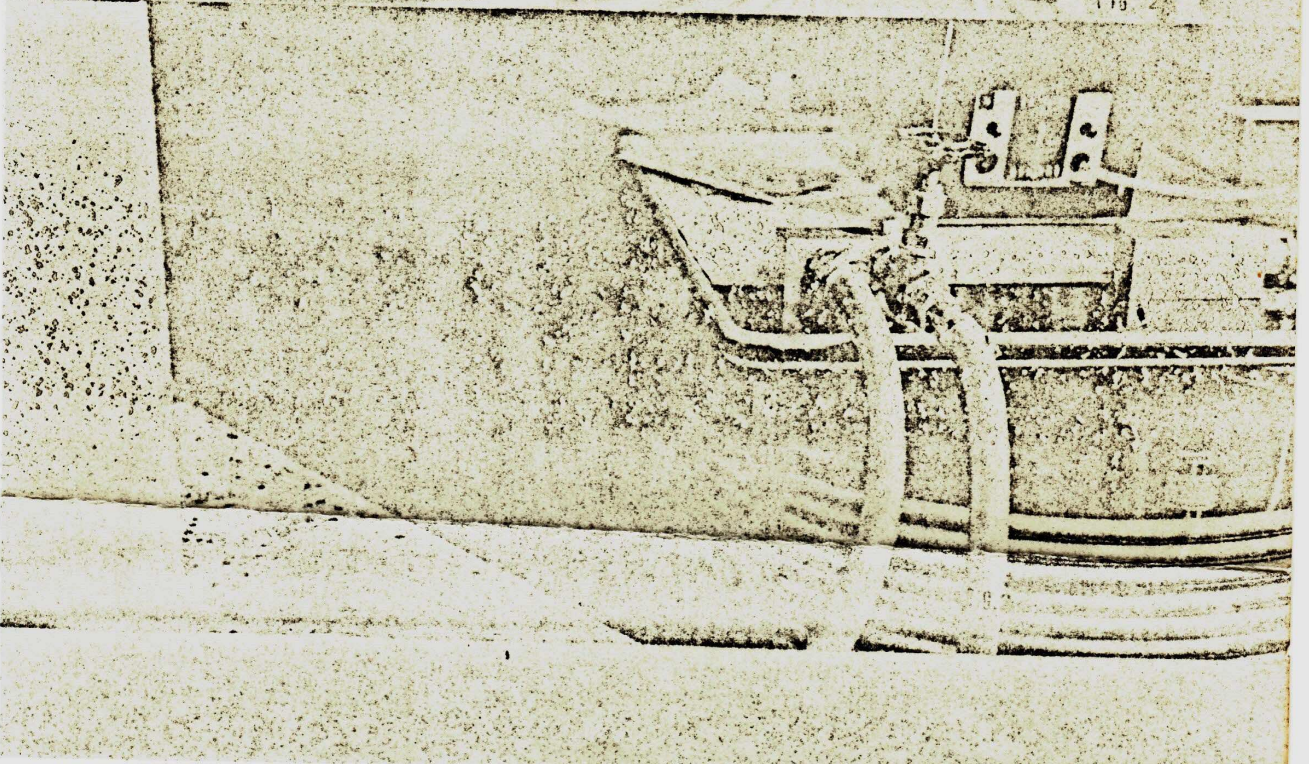


FIG. 2





FIG. 4

FIG. 5

FIG. 6



### VIII. BIBLIOGRAFIAS

1. VACLAV ELIAS - Apostila de Fenômeno Transitório  
Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, 1972 - BRASIL
2. LUCAS NOGUEIRA GAROZZI - Elementos de Mecânica dos Fluidos São Paulo, 1960 - BRASIL
3. J. P. Th. KALKWIJK AND C. KRANENBURG - Cavitation in Horizontal Pipelines due to Water Hammer.  
Journal of the HYDRAULICS DIVISION Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol 97, No. HY10, October, 1971 - 1585 a 1605p.
4. DON J. WOOD, M. ASCE AND SHEN P' ENG CHAO - Effect of Pipeline Junction on Water Hammer Surges.  
TRANSPORTATION ENGINEERING JOURNAL proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.97, NO. TE3, August 1971- 441 a 457p.
5. DON J. WOOD. M. ASCE - Pressure Attenuation Utilizing an Air Chamber.  
Journal of the HYDRAULICS DIVISION Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 96, No.HY5, Mayo, 1970- 1143 a 1156p.
6. CALCULOS DO COLPE DE ARIETE NOS CONDUTOS DE RECALQUE - Revista Técnica Sulzer, No. 1, Ano 1955 - 22 a 32p.



7. D. J. WOOD AND R. E. STELSON - Energy Analysis of Pressure Surge in Closed Conduits, 371 a 388p.
8. JAIME NONELL LOPEZ - Mecánica de Líquidos. Abertura Lenta de Tubo - rias.  
Aceron Y Energia (Espagne), No. 154, Ano (1969) - 561 a 570p.
9. FRANCO SICCARDI, ERMINIO RAITERI - Sovrappressioni da Cavitazione in Condotte Prementi.  
L' ENERGIAELETTRICA, No. 3, 1971 - 153 a 160p.
10. HALLER, AND A. BÉDUE - The Break- Away of Water Columns as a Result of Negative Pressure Shocks.  
Sulzer Technical Review, Winterthur, Switzerland, No.4, Ano 1951 -18 a 25p.
11. R. J. BROWN - Water-Column Separation at Two Pumping Plants.  
Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Vol. 90, No. 4, DECEMBER 1968 - 521 a 531p.
12. A. J. STEPANOFF - Pompes Centrifuges et Pompes Hélices, Théorie, Tra - cé et Applications.  
LIVRO-DUNOD, Paris, 1961.
13. HERBERT ADDISON - Centrifugal and Other ROTODYNAMIC PUMPS.  
LIVRO- London, Chapman & Hall, 1966
14. APUNTES DEL CURSO INTENSIVO, BOMBAS PARA AGUA POTABLE- LIVRO- Pu - blicación Científica No. 145, Diciembre del 1966. Organización Pana - americana de de La Salud de la ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD, 525 Twenty - third Street, N. W. Washington, D. C. 20037, E. U. A.



15. ENIO TOURASSE - Avaliação do Golpe de Ariete em Linhas de Recalque.  
Revista D.A.R., Rio de Janeiro, Outubro de 1969 - 83 a 88p.
16. J. SIEMONS - The Phenomenon of Cavitation in a Horizontal,  
Pipe-line due to a Sudden Pump-Failure.  
A.I.R.H - Journal de Recherches Hydrauliques (Fays-Bas)  
Vol. 5, No. 2, February 1967, 135, 152p.
17. Victor L. Streeter and E. Benjamin Wylie - Concepts of Water Hammer.  
Hydraulic Transients McGraw-Hill Book Company, 1967.