

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO MECÂNICO

TÍTULO: Medição de Vazão por Ultrasom

AUTOR: Lahyr Aparecido Chahin Maragno

ORIENTADOR: Engº Márcio Nunes - DEM/AET

SUPERVISOR: Prof. Doutor Marcos de M. Pimenta

9.0
(NOVE)
ml

1985

Este trabalho é o resultado de uma série de ensaios realizados junto ao Laboratório de Máquinas Hidráulicas desta escola, onde o objetivo principal é estudar o comportamento de um aparelho medidor de vazão por ultrasom diante da variação de alguns parâmetros envolvidos no processo de medição de vazão em si, como diâmetro da tubulação e grau de turbulência do escoamento.

AGRADECIMENTOS

Reservo está página para agradecer à colaboração das seguintes pessoas, sem a ajuda das quais dificilmente concluiria este trabalho:

- . os funcionários do Laboratório de Engenharia Mecânica: Joaquim , Paulo e Laércio;
- . os funcionários do Agrupamento de Engenharia Térmica do IPT: Valmir, Sumô, Marcão, Márcio Nunes, Tatá e Janet;
- . minha noiva, Sonia.

A todos, Muito Obrigado.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO.....	01
2. PRINCÍPIO DA MEDIÇÃO DE VAZÃO.....	02
3. PRINCIPAIS MÉTODOS INTRUSIVOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO.....	03
4. PRINCIPAIS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO POR ULTRASOM.....	05

CAPÍTULO II

1. PROPAGAÇÃO DE ABSORÇÃO DO ULTRASOM.....	07
1.1. Conceito das oscilações ultrasônicas.....	07
2. A VELOCIDADE DO SOM EM SÓLIDOS E LÍQUIDOS.....	12
2.1. Velocidade do Som em Líquidos.....	12
2.2. Dependência da Velocidade do Som com a Pressão e Temperatura	13
2.3. Dispersão da Velocidade do Som	14
2.4. Velocidade do Som em Soluções.....	15
2.5. Velocidade do Som nos Sólidos.....	18
3. REFLEXÃO DE ONDAS ULTRASÔNICAS NA INTERFACE.....	20
3.1. Transformação de Ondas.....	23
4. ABSORÇÃO DO SOM EM LÍQUIDOS.....	25
4.1. Teoria do Amortecimento para os Líquidos.....	29
5. ABSORÇÃO DO SOM EM SÓLIDOS.....	31
6. GERAÇÃO DE ULTRASOM.....	33

CAPÍTULO III

1. PRINCÍPIOS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO POR ULTRASOM.....	34
1.1. Método da Contrapropagação do Feixe de Ondas.....	34
1.1.1. Influência do perfil de velocidades.....	36
1.1.2. Descrição do sistema.....	37
1.1.3. Sistema de operação.....	38
1.1.4. Cálculo da vazão.....	38
1.2. Medição de Vazão por Efeito Doppler.....	39
1.2.1. Efeito Doppler.....	40
1.2.2. Princípio de operação.....	42
1.2.3. Características do escoamento.....	43

1.3. Ensaio Comparativo Entre o Medidor de Vazão por Efeito Doppler e um Padrão de Volume.....	43
1.3.1. Objetivo do ensaio.....	43
1.3.2. Considerações iniciais.....	45
1.3.3. Relações dos equipamentos de acordo com o croquis.....	46
1.3.4. Procedimento experimental.....	47
1.3.5. Determinação da vazão do tanque.....	47
1.3.6. Determinação da vazão de ar comprimido.....	48
1.3.7. Resultados experimentais.....	49
1.3.8. Constatações experimentais.....	50
1.3.9. Conclusões.....	52
2. VANTAGENS DO APARELHO E ALGUMAS APLICAÇÕES.....	53
BIBLIOGRAFIA.....	54

ANEXO

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, um tema bastante questionado no campo de medições de vazão em tubulações é a utilização de medidores do tipo não-intrusivo em processos.

Tais medidores apresentam vantagens e desvantagens quando comparados com os medidores tradicionais recomendados pela A.S.M.E.- American Society of Mechanical Engineers. A principal vantagem é que o medidor não necessita estar em contato direto e permanente com o fluido que escoar na tubulação, ou seja, pode ser facilmente instalado externamente à mesma, evitando assim problemas operacionais que normalmente ocorrem quando se trabalha com medidores ditos "padrões".

Os medidores do tipo não-intrusivo podem ser classificados em dois grandes grupos: os medidores de vazão magnéticos e os medidores de vazão por ultrassom. Os medidores magnéticos baseiam seu princípio de funcionamento no efeito Faraday, isto é, uma tensão é induzida em um condutor movendo-se em um campo magnético; já os medidores por ultrassom, baseiam seu princípio na emissão e recepção de ondas sonoras na faixa ultrasônica.

Dentro do grupo dos medidores por ultrassom, há ainda uma outra subdivisão, que será detalhada mais adiante, isto é:

- . medidores por efeito Doppler, onde a onda ultrasônica é emitida e recebida em uma mesma posição da tubulação, por uma única sonda contendo os sensores de emissão e recepção de sinais (Figura 1.1.);



Doppler

FIGURA 1.1. Medidor de vazão por efeito Doppler

- Medidores por contrapropagação do feixe de ondas, onde a onda ultrasônica é emitida em uma dada posição da tubulação e recebida na face oposta à mesma, a uma dada distância; para tal, são utilizadas duas sondas, cada qual contendo um sensor (uma para emissão e outra para recepção, conforme Figura 1.2).



Contrapropagating
transmission

FIGURA 1.2. Medidor de vazão por deflexão de feixe

NOTA: Os medidores de vazão por efeito Faraday (magnéticos) serão apenas citados como um dos tipos de medidores não-intrusivos já que seu detalhamento não foi parte do escopo do trabalho.

2. PRINCÍPIO DA MEDIÇÃO DE VAZÃO

Por definição, vazão é uma grandeza vetorial característica do escoamento, que define um volume ou uma quantidade de massa que escoar através de uma dada seção de uma tubulação, durante um intervalo de tempo.

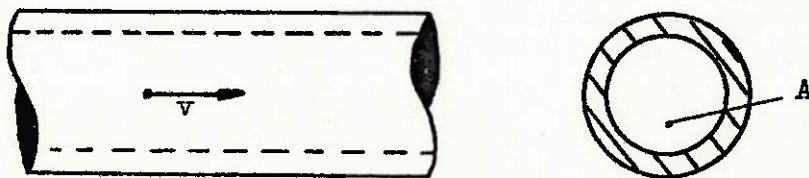


FIGURA 2.1. Escoamento de um fluido com massa específica " ρ " numa tubulação com área da seção transversal " A " e velocidade de escoamento " v ".

Sendo assim, baseado na Figura 2.1 define-se:

. Vazão em volume (Q):

$$Q = v \cdot A \quad [m^3/s] \quad (I-1)$$

. Vazão em massa (\dot{m}):

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad [kg/s] \quad (I-2)$$

É fácil verificar, entretanto, que para efetuarmos uma medição de vazão precisamos apenas medir a velocidade do fluido, uma vez que a área da seção transversal da tubulação e a massa específica do mesmo normalmente são conhecidos.

3. PRINCIPAIS MÉTODOS INTRUSIVOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

Dividem-se em três principais grupos que são:

- . medidores por constricção de fluxo;
- . medidores tipo turbina;
- . medidores de área variável.

Os medidores de vazão por constricção de fluxo, como o nome já enfatiza, baseiam-se na introdução de uma perda de pressão na tubulação e comparação da mesma com uma escala de velocidades, como é o caso dos bocais, placas de orifício, tubos de venturi ou ainda tubos de Pitot (em alguns casos). Tais medidores, desde que normalizados, são chamados de medidores tipo padrão pois é a partir destes que se levantam as curvas características de qualquer medidor de vazão.

Os medidores tipo turbina, baseiam seu princípio de operação na conservação de quantidade de movimento, isto é, o impacto do fluido com uma pá ou hélice imersa no fluxo causa um movimento de rotação da mesma em torno de seu eixo de simetria que é convertido em

velocidade através de um conjunto de engrenagens ou um campo magnético, devidamente calibrados.

Os medidores de área variável (rotâmetros) são medidores de vazão de leitura direta. Trata-se de um tubo de vidro de forma tronco cônica contendo em seu interior um corpo de forma especial, através do qual se faz passar o fluxo cuja vazão se deseja conhecer. O flutuador é suspenso pela passagem do fluxo, e sua posição relativa à escala gravada no vidro fornece a vazão.

4. PRINCIPAIS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO POR ULTRASOM

Após a década passada, a teoria sobre medição de vazão por ultrassom partiu da fase de estudos para a aplicação industrial.

Existem hoje, vários métodos de medição de vazão por ultrassom, conforme nos mostra a Figura 4.1, sendo que apenas dois são usados comercialmente: medição por efeito Doppler e medição por contrapropagação de feixe de ondas.

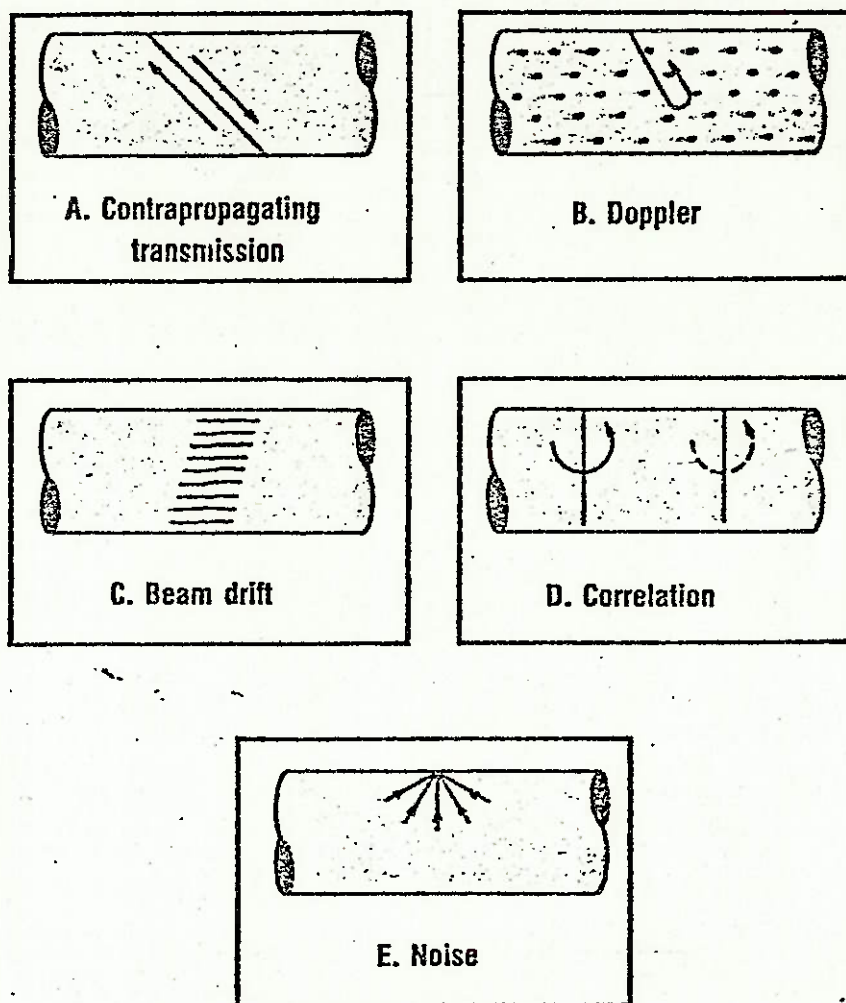


FIGURA 4.1. Principais métodos de medição de vazão por ultrassom.

Destes dois métodos, apenas o da contrapropagação do feixe de ondas pode ser aplicado para gases, pois o medidor por efeito Doppler necessita de escoamento bifásico para o pleno desenvolvimento de seu princípio, sendo mais usado para líquidos.

Nos capítulos seguintes, estes métodos serão mais detalhados a título informativo, já que faz parte do trabalho um estudo de talhado do comportamento de um medidor de vazão por efeito Doppler perante a variação de alguns parâmetros (diâmetro e grau de turbulência).

CAPÍTULO II

1. PROPAGACÃO E ABSORÇÃO DO ULTRASOM1.1. O Conceito das Oscilações Ultrasônicas

Considerando-se a propagação das oscilações, a transmissão de um efeito da fonte ao receptor nos mostra o conceito de onda. A presença de um meio material é uma condição necessária para a transmissão de ondas acústicas. Entretanto, se uma das partículas do meio sai de equilíbrio, forças elásticas agirão sobre ela provenientes de outras partículas do meio, de modo a colocá-la novamente em equilíbrio. Nesse caso, as partículas vizinhas tornam-se fora de equilíbrio e devido à inércia do meio, continuam a oscilar mesmo após a onda ter passado. Quando o efeito das partículas oscilantes do meio posiciona-se para dentro do alcance audível do ouvido humano, essas ondas elásticas são percebidas por nós como som. As oscilações ultrasônicas distinguem-se das ondas sonoras elásticas apenas pela sua alta frequência. É comum pensar em ultrassom como uma onda que contenha oscilações que são propagadas num meio elástico com frequências supersônicas, isto é, a frequência excedendo a audição humana (20 kHz). Correspondentemente, a frequência da onda sonora será caracterizada por um definido comprimento de onda " λ ", que mantém a seguinte relação com a velocidade do som no meio " c " e a frequência da onda " f ":

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{II-1})$$

O máximo limite de frequências das oscilações ultrasônicas gira em torno de 100 MHz e 1000 MHz e está consequentemente adjacente ao rango hipersônico que se estende para uma frequência de 10^7 MHz. O comprimento de onda das oscilações ultrasônicas encontra-se muito próximo ao comprimento de onda da luz, o que vale dizer que as Leis da Óptica geométrica podem ser aplicadas às ondas ultrasônicas.

As ondas ultrasônicas podem propagar-se em qualquer meio elástico: líquido, sólido, vapores ou gases. A forma das ondas dependerá essencialmente das propriedades elásticas do meio. Nos meios lí

gídeos ou gasosos não existe a possibilidade de geração de esforços e manutenção de tensões tangenciais dada sua composição elástica (meio).

Desde que a oscilação da partícula no meio tome lugar na direção de uma força elástica restaruada, em líquidos e gases, uma onda só pode se propagar na direção do movimento oscilatório das partículas, coincidindo com a direção de propagação da onda (ondas longitudinais). O fato das ondas sonoras em líquidos e gases serem longitudinais se deve à existência de apenas um módulo elástico de deformação. Em sólidos, aparecem também tensões tangenciais e a deformação correspondente é propagada através de ondas transversais; num corpo sólido porém, a propagação de uma onda pode ser também longitudinal ou ainda longitudinal e transversal (pode ocorrer também propagação de ondas superficiais).

A relação entre as velocidades de propagação de ondas sonoras superficiais, transversais e longitudinais é dada por:

$$\frac{C_{\text{trans}}}{C_{\text{long}}} \approx 0,63 ; \frac{C_{\text{sup}}}{C_{\text{trans}}} \approx 0,90 \rightarrow C_{\text{long}} > C_{\text{trans}} > C_{\text{sup}} \quad (\text{II.2})$$

onde C = velocidade do som no meio.

Ondas planas, cilíndricas ou esféricas são distinguidas pela natureza de suas trajetórias de propagação. No caso ideal, consegue-se obter a onda esférica quando a fonte sonora pode ser admitida puntual. De qualquer forma, na prática o raio da fonte (r_0) é pequeno quando comparado com o comprimento de onda (λ) do som por ela irradiado; logo, se $r_0 \gg \lambda$ teremos uma onda esférica. A uma dada frequência, com o aumento do raio da fonte, a onda esférica perderá suas características e transformar-se-a numa onda plana.

É fácil perceber também, que a grandes distâncias da fonte emissora de som, a frente de onda esférica é cada vez mais retificada e torna-se pouco a pouco uma onda plana.

Em virtude da baixa condutividade térmica de gases e líquidos, podemos considerar que na propagação do som, a compressão e a rarefação em todos os pontos do meio ocorram adiabaticamente. A pressão é função da massa específica e vale a relação.

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\gamma \quad (\text{II.3})$$

$$\text{onde: } \gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (\text{II.4})$$

Se usarmos " δ " para designar a razão entre o aumento de massa específica para uma deformação do meio e a massa específica inicial, temos:

$$\tau = \frac{d\rho}{\rho_0} \quad (\text{II.5})$$

$$\therefore P \approx P_0 (1 + \gamma \cdot \delta) \approx P_0 + P_0 \cdot \gamma \cdot \delta \quad (\text{II.6})$$

O termo " $P_0 \cdot \gamma \cdot \delta$ " caracteriza o aumento de pressão devido à deformação causada pela onda sonora: " $P_0 \cdot \gamma$ " é o coeficiente de proporcionalidade entre a pressão a deformação (δ), designado fisicamente por módulo de elasticidade (S):

$$S = P_0 \cdot \gamma \quad (\text{II.7})$$

Uma onda plana define um fluxo de energia que é propagado na direção de uma simples coordenada (x) normal ao plano da onda. Para obtermos a equação de propagação da onda é necessário admitir que o líquido é compressível e o regime é permanente. Aplicando a equação de equilíbrio dinâmico e continuidade, a equação de propagação para uma onda plana será:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{P_0 \gamma}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \quad (\text{II.8})$$

onde " Ψ " é o potencial de velocidade e a velocidade em si (v) é dada por:

$$v = \nabla \Psi \quad (\text{II.9})$$

A projeção de $\nabla \Psi$ nos eixos coordenados será:

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (\text{ii.10})$$

A equação de propagação da onda sonora pode ser escrita também em função de " p ", " ρ ", " δ ", o deslocamento ξ , etc. Entretanto, escrevendo a equação em função de " Ψ " fica mais caracterizado o movimento irrotacional do fluido desde que $\text{rot} \nabla \Psi = 0$.

Na propagação do som, as partículas do meio estão sujeitas a oscilações sobre a posição de equilíbrio, a qual se procede com uma velocidade definida. Esta velocidade é chamada velocidade da partícula e para ondas planas é dada por:

$$\dot{\xi} = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (\text{II.11})$$

A oscilação das partículas do meio durante a propagação da onda sonora cria regiões de compressão e rarefação no líquido. A pressão acústica é dada por:

$$P = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (\text{II.12})$$

Desse modo, se soubermos o valor do potencial de velocidades (Ψ) podemos determinar a velocidade da partícula e a pressão acústica.

O termo $P_0 \gamma / \rho$ tem dimensão de velocidade ao quadrado (m^2/s^2), logo, a velocidade de propagação das ondas sonoras é dada por:

$$c = \sqrt{\frac{P_0 \gamma}{\rho}} = \sqrt{\frac{S}{\rho}} \quad (\text{II.13})$$

A equação diferencial encontrada para caracterizar o movimento de propagação de uma onda plana, tem como solução:

$$\psi = A \cdot \cos w \left(t + \frac{x}{C} \right) \quad (\text{II.14})$$

onde: A = amplitude de oscilação

K = w/C é o nº de onda

A impedância acústica (R) é determinada pela Lei de Ohm a cústica, feita a analogia a circuitos elétricos, ou seja:

$$R = \frac{P}{\xi} = \rho \cdot C \quad (\text{II.15})$$

O valor de "R" é uma característica do material e varia apenas com a mudança destas características.

Para um sólido, o valor de "R" será dado por:

$$R = \rho \cdot C = \sqrt{\rho \cdot E} = \frac{E}{C} \quad (\text{II.16})$$

A onda sonora, quando se propaga através de um meio é transmitida com uma certa quantidade de energia bem definida. A quantidade de energia transmitida pela onda sonora durante 1 segundo em uma área de 1 cm^2 perpendicular à direção de propagação é chamada de comprimento de som ou intensidade sonora. Para uma onda senoidal plana, a intensidade sonora (I) é dada por:

$$I = \frac{p^2}{2\rho C} = \frac{(\dot{\xi})^2 \cdot R}{2} \quad (\text{II.17})$$

onde "p" é a amplitude da pressão e ξ a velocidade da partícula.

$$\text{OBS.: } [I] = \frac{W}{m^2}$$

2. A VELOCIDADE DO SOM EM SÓLIDOS E LÍQUIDOS

2.1. Velocidade do Som em Líquidos

Admitindo que a propagação seja adiabática, o módulo da velocidade do som em líquidos é dada por:

$$C = \frac{S\gamma}{\rho} = \frac{1}{\text{Bad} \cdot \rho} \quad (\text{II.18})$$

onde: S = módulo de compressibilidade

Bad = coeficiente de compressibilidade adiabática

$\gamma = C_p/C_v$

ρ = massa específica

OBS.: para água, Bad $\approx 4,47 \cdot 10^{-11}$ cm²/dina

Introduzindo a compressibilidade isotérmica (Bis) teremos:

$$C = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho \cdot \text{Bis}}} \quad (\text{II.19})$$

onde: Bis = 1/S

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{\text{Bis}}{\text{Bad}}$$

Entretanto, com as medidas da velocidade do som e da compressibilidade isotérmica podemos calcular a relação entre calores específicos para o líquido em questão ou ainda, se soubermos o valor de " γ " podemos determinar o módulo de elasticidade. Na tabela

(II.1) encontram-se tabelados tais valores para vários líquidos.

Liquid	Chemical formula	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{g/cm}^3$	$C, \text{m/sec}$	$\rho C, 10^3 \text{g/cm}^2 \cdot \text{sec}$	$B_{ad}, 10^{-12} \text{cm}^2/\text{dyne}$	$\frac{\Delta C}{\Delta t}$
Aniline	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	20	1.022	1656	170	35.7	-4.6
Acetone	CH_3COCH_3	20	0.792	1192	94	89	-5.5
Benzene	C_6H_6	20	0.878	1326	116	64.9	-5.2
Valeric acid	$\text{C}_5\text{H}_9\text{COOH}$	20	0.942	1244	117	68.7	-4.8
Water	H_2O	25	0.997	1497	149	44.7	-2.5
"		20		1488			
Sea water		17	1.025	1510	155		
Heavy water	D_2O	25	1.104	1399	154	46.3	-2.8
Glycerine	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	20	1.261	1923	242	21.4	-1.8
"		25		1986			
Dichlorethane	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	20	1.253	1034	130	74.6	-4.6
Methyl alcohol	CH_3OH	20	0.792	1123	88.9	100	-3.3
Formic acid	HCOOH	20	1.216	1287	156	49.7	
Acetic acid	CH_3COOH	20	1.0	1250	125	50	
Carbon bisulfide	CS_2	20	1.263	1158	146	59	-3.2
Chloroform	CHCl_3	20	1.469	1005	149	66.5	-3.6
Carbon tetrachloride	CCl_4	20	1.595	938	150	71.4	-3
Ethyl iodide	$\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$	20	1.84	869	168	68.2	
Ethyl alcohol	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	20	0.789	1168		91.1	-3.0
Kerosene		34	0.825	1295	107	74.5	
Gasoline		20	0.879	1320	116		
Transformer oil		32.5	0.895	1425	128	55.8	
Linseed oil		31.5	0.922	1772	163	34.9	
Olive oil		32.5	0.904	1381	125	58.7	
Spindle oil		32	0.905	1342	121	62.3	
Mercury	Hg	20	13.595	1451	1972	3.42	-0.46
Lead alloy		327		1790		2.92	
Tin alloy		232		2270		2.79	
Aqueous solution of NaCl ..		20	Cont.	1809		26.2	
"			26.5%				
Aqueous solution of KCl ...		20	25.4%	1669		32.2	

TABELA II.1. Características de líquidos

2.2. Dependência da Velocidade do Som com a Pressão e Temperatura do Meio

Se a temperatura do meio é variada, haverá uma variação da velocidade do som, provando que $C = f(T)$. Para todos os líquidos, exceto a água, a velocidade do som diminui com o aumento da temperatura. Para a água, com o aumento da temperatura a velocidade do som aumenta conforme ilustra a tabela II.2, até entre 75°C e 85°C . Pode-se ainda perceber pela tabela que a uma variação de 1°C na temperatura corresponde uma variação de 2,5 m/s na velocidade.

Já com o aumento de pressão, o aumento de velocidade ocorre quase que linearmente. Entretanto, para a maioria dos líquidos o fator $\Delta C/\Delta P$ tende a 0,4 m/s.atm enquanto que para a água ele é da ordem de 0,2 m/s.atm.

T(°C)	10	20	30	40	50	60	70	80
C(m/s)	1448	1483	1510	1530	1544	1552	1555	1554

TABELA II.2. Velocidade do som em função da temperatura para a água.

2.3. Dispersão da Velocidade do Som

A teoria de amortecimento dos líquidos é uma generalização da teoria similar para gases poliatômicos. Desse modo, na propagação do som através de gases poliatômicos há um amortecimento de energia interna. A energia interna (E_i) suporta uma variação do estado de equilíbrio (E_{i0}); a razão desta troca de energia interna para estados próximos ao equilíbrio é proporcional à diferença $E_i - E_{i0}$ e inversamente proporcional ao módulo do tempo de amolecimento, isto é:

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot (E_i - E_{i0}) \quad (\text{II.20})$$

Da teoria de amortecimento para gases poliatômicos deduz-se a seguinte expressão para a velocidade do som:

$$c^2 = \frac{P}{\rho} \cdot \left(1 + \frac{R}{C_a + K}\right) \quad (\text{II.21})$$

$$\text{onde: } K = \frac{C_i}{1 + i\omega\tau}$$

C_a , C_i : frações do calor específico pertencentes aos graus de liberdade avançados e internos respectivamente.

$R = C_p - C_v$: constante universal de G.P.

Consideremos dois casos especiais:

. WB << 1 - baixa frequência:

$$Co^2 = \frac{P}{\rho} \left(1 + \frac{P}{Cv} \right) \quad (II.22)$$

. WB << 1 - alta frequência:

$$Coo^2 = \frac{P}{\rho} \left(1 + \frac{R}{Ca} \right) \quad (II.23)$$

Então, desde que $Cv > Ca$, uma vez transitados de baixa para alta frequência, a velocidade do som aumenta e, conseqüentemente, a dispersão do mesmo torna-se evidente.

A dispersão do som em líquidos na faixa de frequências ultrasônicas é qualitativamente pequena. Por exemplo, para ácido acético vale 0,5%; bisulfato de carbono - 1,4%; acetato etil - 0,06%. Para a água, nenhuma dispersão é observada na faixa de frequências ultrasônicas.

2.4. Velocidade do Som em Soluções

Vários autores estabeleceram o fato de que em soluções aquosas de eletrólitos, a velocidade do som é aproximadamente linear, dependendo apenas da concentração da mesma, conforme ilustra a Figura 2.4.1.

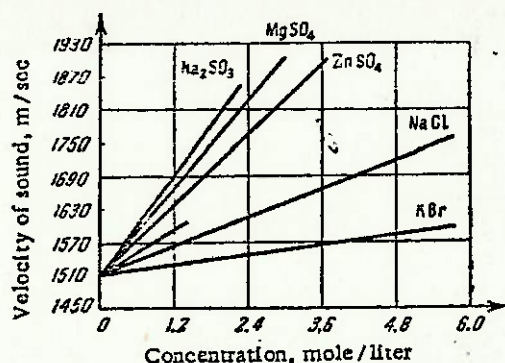


FIGURA 2.4.1. Dependência da velocidade do som com a concentração em soluções aquosas de eletrólitos.

A medição da velocidade do som em função da concentração, em soluções, faz entender a interligação entre compressibilidade e concentração. A compressibilidade em eletrólitos segue a seguinte relação:

$$B_{ad} = B_o + K \cdot A \quad (\text{II.24})$$

onde: B_o = coeficiente de compressibilidade do solvente puro;

K = concentração molar

A = constante

(Por exemplo, para o brometo de potássio - KBr - o valor de A é $-52 \cdot 10^{-13}$)

Em soluções de eletrólitos fortes, a interação das moléculas dissolvidas tem efeito repentino. Os ions do eletrólito quando dissolvidas em H_2O , criam um forte campo elétrico que orienta as moléculas da água na redondeza próxima aos ions. O suposto solvente é então formado, com propriedades distintas. A pressão ao redor

dos ions aumenta, causando uma redução na compressibilidade e consequente aumento de velocidade do som.

Dados experimentais sobre a velocidade do som em várias frequências nos possibilita desenvolver métodos de cálculo dessa velocidade para qualquer líquido, ou ainda, a partir do módulo da velocidade de propagação do som determinar a concentração da solução e em alguns casos determinar a massa específica da massa.

Sendo assim, a partir da velocidade do som, pode-se determinar a concentração de sais no abastecimento de água em um gerador de vapor e, consequentemente utilizar o método em controle de processos industriais.

Em análises de soluções aquosas de álcool, ácidos e cetonas conseguiu-se obter curvas que mostram que a velocidade do som tem um máximo bem definido. A Figura 2.4.2 abaixo mostra a variação da densidade, velocidade e compressibilidade com a concentração da solução para o álcool metílico em solução aquosa.

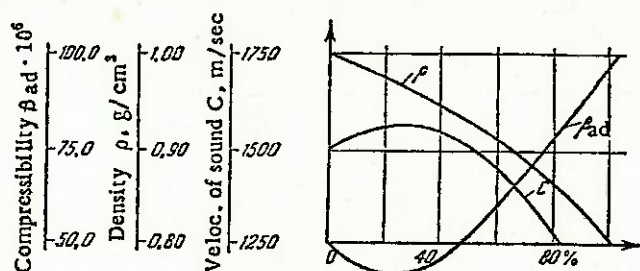


FIGURA 2.4.2. Características da solução aquosa de álcool metílico em função da concentração.

Há ainda um outro fator a se considerar: com o aumento da temperatura, a máxima velocidade do som na mistura diminui, reduzindo também a concentração da mistura, dada a possibilidade de vaporização do soluto conforme mostra a Figura 2.4.3.

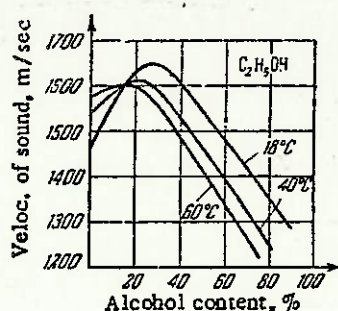


FIGURA 2.4.3. Dependência entre a velocidade do som, a concentração e temperatura da mistura de uma solução aquosa de álcool etílico.

2.5. Velocidade do Som em Sólidos

Diferentemente dos líquidos, em corpos sólidos as ondas longitudinais podem ser acompanhadas de ondas transversais ou ainda superficiais, conforme citado anteriormente. Em sólidos, aliado ao volume elástico há a elasticidade da forma. Em consequência a isto, num meio fronteiriço a natureza de ondas excitadas depende ainda da forma do corpo. Por exemplo, em corpos de dimensão limitada ocorrem ondas flexivas, isto é, as partículas localizadas no centro do plano do corpo sofrerão movimento puramente transversal, enquanto que as partículas na superfície do corpo sofrerão oscilações longitudinais.

Dividindo-se um corpo em duas de suas dimensões, obtém-se um corpo com forma de bastão onde o valor da velocidade de propagação da onda longitudinal é dada por:

$$C_{LRO} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{II.25})$$

Para um meio infinitamente extenso, quando suas dimensões (d) são muito maiores que o comprimento de onda (λ) propagada nele ($d \gg \lambda$) podemos desprezar as ondas refletidas na fronteira do meio,

e a velocidade de propagação das ondas longitudinais será:

$$C_{LOO} = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \sigma)}{\rho \cdot (1 + \sigma) \cdot (1 - 2\sigma)}} \quad (II.26)$$

onde σ é o coeficiente de Poisson.

Para a maioria dos sólidos, $\sigma = 0,25$ e a equação (II.26) será:

$$C_{LOO} = 1 \cdot 1 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (II.27)$$

Por outro lado, a velocidade de propagação de ondas transversais em sólidos é dada por:

$$C_{ST} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (II.28)$$

onde: μ = shear módulos

As constantes E , μ e σ estão interrelacionados pela seguinte relação:

$$E = 2\mu(1 + \sigma) \quad (II.29)$$

A velocidade de propagação da onda na superfície de um meio infinitamente estendido é dado por:

$$C_{SUP} = \frac{0,87 + 1,12\sigma}{1 + \sigma} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (II.30)$$

Na Tabela II.3 são dados os valores de velocidade do som com densidades e coeficientes de elasticidade de alguns sólidos.

Material	ρ , g/cm ³	E , kg/mm ²	μ , kg/mm ²	σ	C_{Lrod} , m/sec	C_{Loo} , m/sec	C_s , m/sec	ρC_{Loo} , 10 ⁴ g/cm ² .sec
Aluminum	2.7	7100	2640	0.34	5080	6260	3080	169
Tungsten	19.1	35200	13400	0.35	4310	5400	2620	1042
Carbon steel	7.8	20400	8550	0.28	5050	6100	3300	393
Molybdenum steel	8.39				4700			
Iron	7.8	2100	8200	0.28	5170	5850	3280	456
Cast iron	7.7	11700	4480	0.27	8850	4500	2400	296
Gold	19.3	8120	2850	0.42	2030	3240	1200	626
Constantan	8.8	16600	6250	0.33	4300	5240	2640	460
Copper	8.9	12500	4640	0.35	3710	4700	2260	418
Brass	8.1	10050	3780	0.35	3490	4430	2123	361
Nickel	8.8	20540	7850	0.31	4785	5630	2960	495
Tin	7.3	5540	2080	0.39	2730	3320	1670	242
Lead	11.4	1600	580	0.44	1200	2160	700	246
Silver	10.5	7500	2720	0.38	2640	3600	1590	380
Zinc	7.1	10500	4200	0.25	3810	4170	2410	296
Plexiglas	1.18	535	151	0.35		2670	1121	32
Polysterol	1.06	426	136	0.32		2350	1120	23
Ebonite	112				1570	2405		29
Porcelain	2.41	5660	2381	0.23	4884	5340	3120	128
Gypsum	2.26	3600	1270	0.34	4790		2370	1.08
Marble	2.66	7360	2820	0.305	6150		3260	164
Rubber	0.95	0.102	0.034	0.5	46	1040	27	
Paraffin	0.9	196			1460			130
Wood (oak)	0.8	1330			4050			3.2
Synthetic rubber	0.9					1479		14
Glass	3.2	5725	2250	0.28	4160	4650	2605	149
Ice	1	988	372	0.33	3280	3980	1990	32
Quartz (X-cut)	2.65	8050			5450			144
Rochelle salt (45° X-cut) ..	1.77	3100			3200			57
Tourmaline	3.1	3780				7540		223
Barium titanate	0.56	11200			4300	5500		310

TABELA II.3 - Características de alguns sólidos.

3. REFLEXÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NA INTERFACE

Quando uma onda é propagada em algum meio e incide sobre uma interface entre dois meios, parte da energia é transferida ao outro meio e a restante é refletida de volta. Neste caso, a energia distribuída entre a onda transmitida e a onda refletida depende da relação entre a impedância acústica de cada meio.

Considerando o caso de incidência normal de uma onda na interface de dois meios caracterizados respectivamente pelas impedâncias acústicas $R_1 = \rho_1 C_1$ e $R_2 = \rho_2 C_2$. Na interface, o excesso de velocidade e pressão deveria ser contínuo, e a soma das amplitudes das velocidades incidente (\hat{e}_01) e refletida (\hat{e}_01) deveria corresponder a amplitude da velocidade transmitida (\hat{e}_02) ao segundo meio, isto é:

$$\dot{\epsilon}_{o1} + \dot{\epsilon}'_{o1} - \dot{\epsilon}_{o2} \quad (II.31)$$

Analogamente, para as pressões teríamos:

$$\tau p_{o1} + \tau p'_{o1} = \tau p_{o2} \quad (II.32)$$

$$\text{onde: } \tau p = \frac{1}{2} R \cdot \dot{\epsilon}$$

Pode-se ainda obter os seguintes valores para transmissividade e reflectividade:

$$\frac{\dot{\epsilon}_{o2}}{\dot{\epsilon}_{o1}} = \sigma_{12} = \frac{2R_1}{R_1 + R_2} \quad (II-31)$$

$$\frac{\dot{\epsilon}'_{o1}}{\dot{\epsilon}_{o1}} = \sigma_{12} = \frac{R_2 - R_1}{R_1 + R_2}$$

As relações de energia podem ser escritas a partir da equação de conservação de energia na interface, expressa em termos de intensidade oscilatória, isto é:

$$I_{o1} = I'_{o1} + I_{o2} \quad (II.32)$$

ou ainda:

$$\sigma_{12}^2 + \frac{R_2}{R_1} t_{12}^2 = 1 \quad (II.33)$$

O primeiro componente de (II.33) representa a energia perdida na relexão e o segundo a energia transmitida pela interface.

Como já era de se esperar, ocorrem perdas de energia devido à reflexão, que são determinadas por:

$$\Delta I = \frac{I'_{01}}{I_{01}} = \left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \right)^2 = 1 - \frac{\Delta R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \quad (\text{II.34})$$

Dai, conclui-se que a reflectividade na interface independe do modo como são transmitidas as oscilações de um meio ao outro.

A Tabela II.4 nos mostra valores da energia perdida devido à reflexão por incidência normal de ondas acústicas planas na interface de certos meios.

Medium I	R_1 10^4 g/cm ² · sec	Medium II	R_2 10^4 g/cm ² · sec	ΔI , %
Steel.....	475	Brass.....	361	1.9
"	475	Tin.....	242	10.5
"	475	Quartz	144	28.5
"	475	Rochelle salt....	57	62
"	475	Plexiglas.....	32	68
"	475	Water.....	15	88
"	475	Alcohol.....	9	90.5
"	475	Air.....	0.043	99.96
Quartz	144	Aluminum	169	0.64
"	"	Transformer oil..	56	9
"	"	Water.....	15	66
Barium titanate ..	310	Steel.....	475	4
" " ..	"	Aluminum	169	9
" " ..	"	Water.....	15	82.5
Aluminum.....	169	Water.....	15	70

TABELA II.4

Observando a tabela, sobre a incidência de ondas ultrassônicas do aço no ar, 99,96% da energia é refletida. Consequentemente, a reflexão de ondas da interface entre meios deve ser considerada ao acoplar-se aparelhos para emissão de ondas de ultrassom. No aco

plamento, para um melhor contato acústico entre o radiador ultrassônico e a superfície de teste (amostra), deve ser inserido algum tipo de óleo lubrificante, pasta, etc., de modo a formar um filme entre os meios e expulsar o ar existente no acoplamento para que não ocorra reflexão em excesso do feixe de ultrassom emitido.

As perdas de energia nestes filmes podem ser calculadas pela seguinte equação:

$$\Delta I = \frac{I_{REF}}{I_{INC}} = \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_2}{R_1} \right)^2 \cdot \left[4 \cot^2 \left(\frac{2\pi L}{\lambda} \right) + \left(\frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right]^{-1} \quad (II.35)$$

onde: L = espessura do filme

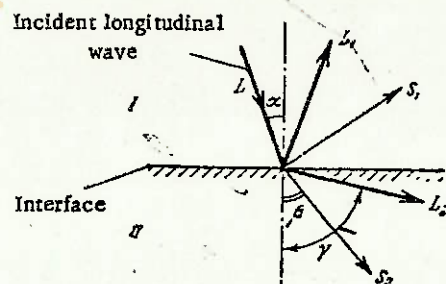
λ = comprimento de onda

3.1. Transformação de Ondas

Quando uma onda sonora incide na interface entre dois meios num ângulo obrigatório com a superfície da mesma, na penetração do segundo meio ela é defletida de sua inicial direção de propagação, isto é, é refratada. Simultaneamente, se a fonte sonora estiver localizada em um sólido, então a incidência de uma onda longitudinal na interface causará o rompimento da mesma, que acarretará uma transformação da onda.

Os ângulos α , β e γ referentes à Figura 3.1.1. encontram-se interrelacionadas com as velocidades de propagação das ondas pela seguinte relação:

$$\frac{\sin \alpha}{C_{LI}} = \frac{\sin \gamma}{C_{LII}} = \frac{\sin \beta}{C_{SII}} \quad (II.36)$$



Wave transformation at the interface between media. L is the incident longitudinal wave, L_1 and L_2 are the reflected and refracted longitudinal waves, S_1 and S_2 are the reflected and refracted transverse waves.

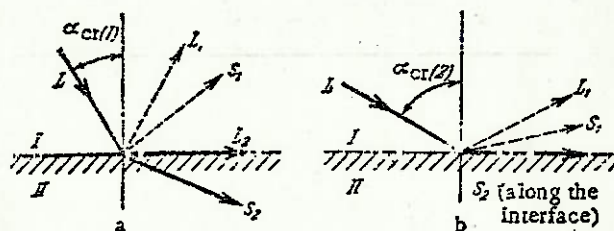


Fig. 6. Total internal reflection.
a) For longitudinal waves; b) for transverse waves.

FIGURA 3.1.1. Disposição geométrica do feixe de ultrassom na interface.

Desde que a velocidade das ondas longitudinais sejam maiores que a velocidade da onda transversal, a relação $\gamma > \beta$ sempre será satisfeita. Com um aumento no ângulo α , a reflexão total interna das ondas longitudinais juntam-se e teremos o primeiro ângulo crítico ($\alpha_{CR}(1)$), pelo qual apenas a onda transversal é propagada no meio II (ocorrerá quando $\sin \gamma = 1$) onde:

$$\sin \alpha_{CR}(1) = \frac{C_{LI}}{C_{LII}}$$

Para o caso onde o meio I é um material plástico leve e transparente e o meio II é aço, teremos os seguintes ângulos:

$$\text{sen } \alpha_{\text{CR}}(1) = \frac{2,67 \cdot 10^5}{6,10 \cdot 10^5} \rightarrow \alpha_{\text{CR}}(1) = 26^\circ$$

$$\text{sen } \alpha_{\text{CR}}(2) = \frac{2,67 \cdot 10^5}{3,30 \cdot 10^5} \rightarrow \alpha_{\text{CR}}(2) = 54^\circ$$

4. ABSORÇÃO DO SOM EM LÍQUIDOS

Na propagação de ondas sonoras, é necessário considerar o fato de que um meio elástico, no qual ocorram oscilações existe um efeito devido à viscosidade do meio, isto é, em qualquer meio existe uma perda de energia durante a propagação do meio. Levando em conta que a absorção do som no meio é consequência da viscosidade do mesmo. Stokes definiu a equação de propagação de uma onda plana num fluido da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{3}{4} \cdot v \cdot \frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3 \partial t} \quad (\text{II.37})$$

onde: v = viscosidade cinemática.

Considerando oscilações harmônicas, a solução de (II.37) será:

$$\psi = B \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos Kx \quad (\text{II.38})$$

B = constante

β = coeficiente de absorção do som (função do tempo),

isto é:

$$\beta = \frac{-8}{3} \frac{\pi^2 \gamma f^2}{\rho \cdot C^2}$$

Entretanto, a absorção do som com a distância é de maior interesse e pode ser dada por:

$$\Psi = A_0 e^{i\omega t} \cdot e^{-\alpha x} \quad (\text{II.39})$$

$$\text{onde } \alpha = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma \cdot \omega^2}{\rho c^3} \quad (\text{II.40})$$

Da equação (II.40), segue que a amplitude das oscilações variará conforme a distância à fonte de som conforme a Lei: $e^{-\alpha x}$ e, então, em algum ponto terá o seguinte valor:

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (\text{II.41})$$

onde: A_0 é a amplitude junto à fonte emissora de som ($x=0$).
Se para a onda plana os valores de "A" são conhecidos em dois pontos (x_1 e x_2), então o coeficiente de absorção do som pode ser escrito como:

$$\alpha = \frac{1}{x_1 - x_2} \cdot \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \quad (\text{II.42})$$

Da equação (II.41), obtém-se a equação da diminuição da intensidade sonora em função da distância, isto é:

$$I = I_0 \cdot e^{-2\alpha x} \quad (\text{II.43})$$

$$\text{onde } \alpha = \frac{1}{2\ell} \cdot \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad \text{e} \quad "I_1" \text{ e } "I_2"$$

são as intensidades do som em " x_1 " e " x_2 " e o valor de " ℓ " é $x_1 - x_2$.

Destas equações pode-se observar que o coeficiente de absorção do som para as amplitudes é metade do mesmo coeficiente para intensidade sonora.

A dimensão do coeficiente " α " é cm^{-1} . Entretanto, o valor de " α " é frequentemente expresso em neper/cm, desde que "neper" seja a razão entre duas quantidades que vale "e", onde $e = 2,7183$ é a base de logaritmos naturais; consequentemente, $1/\alpha$ define o comprimento de um intervalo (e) em cm, sobre o qual a relação de intensidades segue o valor "e". Às vezes, o fato " α " é expresso em decibéis por metro (dB/m). Desde que a relação entre intensidades sonoras em dB tenha a seguinte forma,

$$n = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad (\text{II.44})$$

enquanto a razão entre os logaritmos na base dez e os logaritmos naturais vale 0,4329, obtém-se o seguinte valor para o coeficiente de absorção em dB/m:

$$\alpha = \frac{1}{8,868 \cdot \ell} \cdot \log \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad (\text{II.45})$$

Os valores de " α " calculados pela equação (II.40) deixam de serem precisos quando a absorção do som não se deva apenas pela viscosidade, mas também pela condutividade térmica do meio. Realmente, desde que o processo de propagação do som seja adiabático, a temperatura do meio não se mantém constante. Considerando a influência da condutividade térmica do meio pela introdução da difusividade de X, Kirchhoff desenvolveu a seguinte equação para o coeficiente de absorção:

$$\alpha = \frac{w^2}{2\rho C^3} \left[\frac{4}{3}n + X \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right) \right] \quad (\text{II.46})$$

Essa é a chamada absorção clássica, ou de acordo com Stokes-Kirchoff. A partir dessa equação, obtém-se:

$$A = \frac{\alpha}{f^2} = \frac{2\pi^2}{\rho C^3} \left[\frac{4}{3}\eta + X \left(\frac{1}{C_V} - \frac{1}{C_P} \right) \right] \quad (\text{II.47})$$

A Tabela II.5 mostra-nos valores teóricos do coeficiente de absorção, seguindo que a absorção do som sem considerar a condutividade térmica é consideravelmente menor que a absorção sem considerar o efeito do atrito viscoso ($A_\eta \gg A_x$), então A_x pode ser desprezado. Desse modo, usualmente considera-se apenas o coeficiente A_η , isto é:

$$A \approx A_\eta = \frac{8\pi^2\eta}{3\rho C^3} \quad (\text{II.48})$$

Liquids	A_η , 10^{-17} sec^2 per cm	A_x , 10^{-17} sec^2 per cm	A , 10^{-17} sec^2 per cm
Acetone.	6.54	0.5	7.04
Water.	8.5	0.0064	8.50
Chloroform.	10.045	0.057	10.1

TABELA II.5

Na Tabela II.6, encontram-se valores de medições efetuadas da absorção do som, analítica e experimentalmente, juntamente com o coeficiente de temperatura de alguns líquidos.

Liquid	Chemical formula	t°, C	f, Mc	$\Lambda_{exp.}$ 10^{-17} sec ² /cm	theor. 10^{-17} sec ² /cm	$\frac{1}{\omega} \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$
Acetone.	(CH ₃) ₂ CO	25	1-4	70	7	
		20	5-70	30	7	
Benzene	C ₆ H ₆	20-25	1-165	900	8.7	0.006
Water	H ₂ O	20	7-250	25	8.5	-0.031
		20-27	0.15-4	2500		-0.069
Glycerine	C ₃ H ₈ O ₃	32.8	30	1410	590	
		-18.8	30	12700	29100	0.036
Dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	30.8	30	103	9.7	0.005
Ethyl iodide	C ₂ H ₅ I	2	15	40	12	
		17.5	4.0	2270	5	
Formic acid.	CH ₃ OOH	20.5	9.8	1170	5	
Methyl alcohol	CH ₃ OH	20-25	1-250	34	14.5	-0.01
Nitrobenzene	C ₆ H ₅ NO ₂	25	1-15	80	14	0.005
Linseed oil		20.5	3.1	1470	1450	-0.032
Acetic acid	CH ₃ COOH	18	0.5	90000	17	
		18	67.5	158	17	-0.01
Chloroform	CHCl ₃	20-25	1-10	400	10	
Carbon tetrachloride	CCl ₄	20	1-10	500	20	0.001
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	20-25	1-220	54	22	-0.015
Mercury	Hg	20-25	20-50	6	5.05	
Castor oil		18.6	3	10900	9.130	-0.075
Olive oil		21-25	1-4	1250	1100	-0.038

TABELA II.6

4.1. Teoria do Amortecimento para os Líquidos

Conforme já citado anteriormente, a lei d Stokes-Kirchhoff mostra que:

$$\frac{\alpha}{f^2} = \text{constante}$$

Para quase todos os líquidos, esta dependência é válida para largos intervalos de frequência. Entretanto, para o álcool etílico, a absorção do som obtida experimentalmente - como mostra a tabela II-7 - mantém-se constante entre 37 MHz e 19 MHz. A quantidade (α/f^2) varia similarmente em função da frequência para acetona, benzeno e água. Entretanto, ácido fórmico e ácido acético aparecem como exceções, e para ambas, o desvio relativo a essa lei existe sobre uma considerável faixa de frequências. A teoria de Stokes-Kirchhoff de nada serve como uma explicação para essa absorção anômala; o mecanismo de absorção deve ser considerado em função da teoria do amortecimento.

Frequency, kc	t° , C	α	$\frac{\alpha}{f^2} 10^7$ Exptl.	$\frac{\alpha}{f^2} 10^7$ Theoret.
37000	22.5	0.79	57.7	24.4
30530	24	0.48	51.4	
25570	21	0.34	52.0	
19000	21	0.20	55.4	

TABELA II.7

Na generalização da teoria do amortecimento de gases poliatômicos para líquidos, deve-se notar que os processos de repouso nesse caso são considerados mais complexos que no caso de gases devido à existência de uma interação de moléculas bem maior que no caso de gases. Conforme essa teoria, presume-se que o estado do líquido em qualquer ponto não é determinado apenas pela temperatura e densidade, mas também pela quantidade " Ψ ", que determina o estado interno do líquido. Neste caso, a quantidade " Ψ " pode ser tomada como a concentração de excitações e associações de moléculas. Sem designar uma interpretação física específica à quantidade " Ψ ", a teoria permite prever que em processos muito rápidos, tal quantidade não pode ser contada pelas interações externas. Com isso, é possível formular a teoria do amortecimento onde os parâmetros característicos para o líquido são o tempo de amortecimento (τ), a quantidade " Ψ ", ou as quantidades " Ψ ", " Ψ_2 ", " Ψ_3 ", ..., desde que a hipótese da absorção do som seja caracterizada por muitos efeitos imediatos, justificando-se por vários momentos de amortecimento. Através de cálculos semelhantes aqueles efetuados para a absorção anômala em gases poliatômicos, obteve-se o coeficiente de absorção através da equação:

$$\alpha_r = \frac{1}{2C_o} \cdot \left(\frac{w^2 \cdot \tau \cdot \delta}{1 + w^2 \cdot \tau^2} \right) \quad (\text{II.49})$$

$$\text{onde } \tau = \left(\frac{C_{oo}^2}{C_o^2} - 1 \right)$$

Sendo assim, é necessário considerar que o coeficiente de absorção seja " $\alpha + \alpha_r$ ", onde " α_r " é o coeficiente de absorção por amortecimento caracterizando a energia perdida devido ao efeito de amortecimento e " α " já foi definido anteriormente.

Entretanto, desde que a maioria dos casos, $X \ll \eta$, podemos, com um suficiente grau de precisão, fazer uso da equação (II.40). Ela será válida sempre que $\eta \gg \eta'$.

5. ABSORÇÃO DO SOM EM SÓLIDOS

Aparentemente, a estrutura de objetos sólidos tem um efeito considerável na absorção do som. Para meios homogêneos, isto é, corpos amorfos-isotrópicos ou monocristais, a absorção de oscilações ultrasônicas é pequena e basicamente determinada pelos coeficientes de viscosidade e condutividade térmica. Neste caso, como no caso de líquidos, a absorção do som é proporcional ao quadrado da frequência.

Características de singular interesse são observadas na propagação do som em substâncias policristalinas, consistindo num grande número de cristais finos separados. Para altas frequências quando o comprimento de onda (λ) é pequeno em comparação às dimensões dos cristais (d), isto é, quando $\lambda \ll d$, o som é absorvido em cada cristal, onde o coeficiente de absorção do som é proporcional ao quadrado da frequência, isto é:

$$\alpha \sim f^2$$

A natureza da dependência da frequência do coeficiente de absorção e seu módulo, depende da relação entre o comprimento de onda e as dimensões dos cristais separados do meio. A absorção do som é especialmente grande quando a principal dimensão dos cristais é da ordem do comprimento de onda do sinal em questão, isto é:

$$\lambda \sim d$$

Nesse caso, com a propagação do som em um dado meio, a onda deverá penetrar e difundir-se entre as partículas (pequenos cristais) do meio policristalino e o mecanismo para difusão do som implica na difusão da luz em meios turbidos. Assim, a absorção do som, dadas as relações para " λ " e " d ", será determinada pela difusão no meio.

Com um aumento no tamanho dos cristais o mecanismo de absorção mudará. Assim, quando $\lambda \gg d$, o som será difundido por partículas comparativamente pequenas em relação ao comprimento de onda. Aqui pode-se considerar que cada cristal estará sujeito a uma presão uniforme na direção de propagação da onda sonora no corpo. Entretanto, em vista da anisotropia e orientação individual diversa dos cristais, o gradiente de temperatura sobe na vizinhança de cada pequeno cristal (ilícito, pois foi admitido propagação adiabática da onda sonora) causando um forte aumento na absorção do som devido à condutividade térmica do meio; seu módulo irá assim exceder ao módulo de absorção devido a efeitos viscosos do meio, que deverá ser desprezado. Aqui, a dependência da frequência com o coeficiente de absorção do som, será determinada pela relação entre o tempo de amortecimento para condução térmica (τ_x) e o período de onda sonora (T). Quando " τ_x " é pequeno em comparação com o período, o equilíbrio térmico pode obviamente ser estabelecido dentro da vizinhança de cada pequeno cristal. Então, a temperatura tornar-se-á equalizada e não haverá perdas por calor. No caso considerado, a absorção do som em corpos policristalinos será proporcional ao quadrado da frequência. Naqueles casos onde $\tau_x \gg T$, a absorção do som será proporcional a raiz quadrada da frequência, isto é:

$$\alpha \sim \sqrt{f}$$

Concluindo, devemos notar que a absorção do som em meios policristalinos é determinada pela relação entre as dimensões individuais dos cristais e o comprimento de onda do som. Em baixas frequências onde o mecanismo de absorção é semelhante à difusão do som por partículas finas, a absorção do som é estipulada pela condutividade térmica do meio. Passando para frequências maiores, onde $\lambda \geq 3d$, a difusão torna-se predominante. Em frequências muito altas,

a absorção do som será determinada pelo quadrado da frequência, enquanto que para médias frequências, pela raiz quadrada de frequência.

Para ondas muito longas (baixa frequência), a chamada difusão de energia de Ray Leigh pode voltar a ter um efeito considerável como mecanismo de absorção. Aqui o coeficiente de absorção é proporcional a quarta potência da frequência.

A Figura 5.1 mostra-nos a dependência da absorção do som em função da dimensão (d) de pequenos cristais de substâncias policristalinas.

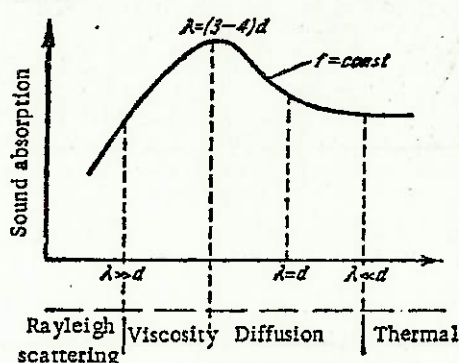


FIGURA 5.1

6. A GERAÇÃO DE ULTRASOM

Existem vários métodos, diferentes em sua natureza, para se obter ondas de ultrassom. Podem dividir-se em três grupos: mecânico, magnético e piezoelétrico. O primeiro, é aplicado na maioria das vezes em excitação de oscilações acústicas e ultrasônicas no ar ou meios gasosos; o segundo, tem sido utilizado muito intensamente em irradiações ultrasônicas de meios líquidos; o terceiro, é o método mais frequentemente utilizado tanto em meios sólidos como líquidos.

CAPÍTULO III

1. PRINCÍPIOS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO POR ULTRASOM

Na década passada, o medidor de vazão por ultrassom cresceu dos conceitos teóricos e métodos laboratoriais para uma técnica hoje aceita para medição de vazão de vários fluidos, desde água até cryogênicos. Hoje, no mercado mundial, existem perto de doze empresas que já desenvolveram algum tipo de medidor de vazão por ultrassom.

Existem vários princípios de medição de vazão por ultrassom, como mostra a Figura 4.1. do Capítulo I. Entretanto, somente dois métodos são comercialmente viáveis de se produzir medição por efeito Doppler e por contrapropagação de feixe. Destes dois, somente o da contrapropagação do feixe (A) pode ser utilizado em gases pois no medidor por efeito Doppler a energia ultrasônica tem que ser refletida em partículas pertencentes ao escoamento do fluido, sendo o sinal refletido submetido a uma mudança de frequência, que é proporcional à velocidade da partícula, caracterizando o princípio.

1.1. Método da contrapropagação do feixe de ondas

No medidor de vazão por contrapropagação do feixe de ondas, doravante MCFO, a velocidade é obtida pela medição da diferença de tempo entre duas ondas "viajantes" em uma mesma trajetória porém em sentidos contrários, como mostra a Figura 3.1.



A. Contrapropagating
transmission

FIGURA 3.1. - "MCFO"

As ondas podem ser transmitidas simultaneamente, porém, normalmente são alternadas para evitar interferências entre elas.

Para uma tubulação circular, a equação que descreve a velocidade média da onda (V_F) em função dos tempos de trânsito (t_1 e t_2) pelo fluido é:

$$V_F = \left(\frac{L^2 + D^2}{2L} \right) \cdot \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (\text{III-1})$$

onde: L e D são as distâncias mostradas na Figura 3.2.

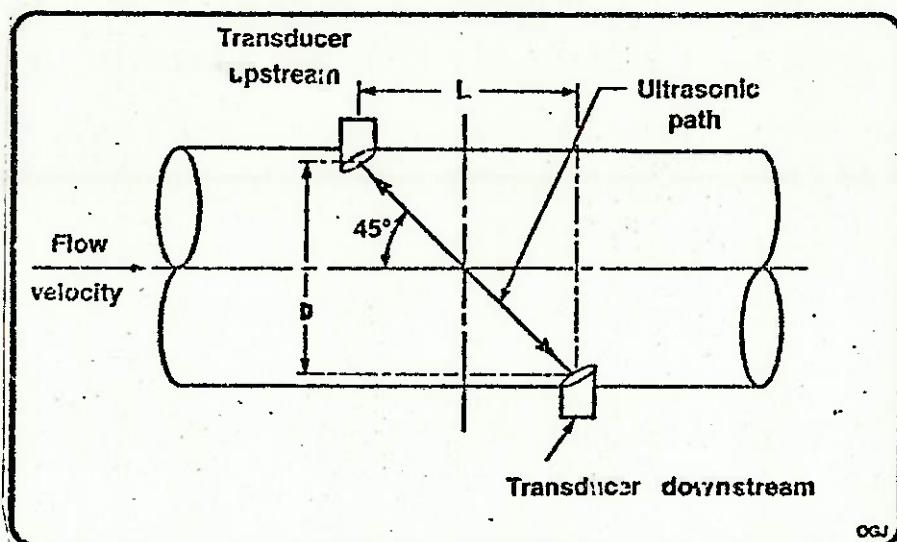


FIGURA 3.2. Valores de L e D

Para chegar-se à equação (III-1) fêz-se as seguintes considerações:

- a) a frente de onda caminha paralelamente à ela mesma (largura infinita);
- b) a fonte é puntual.

1.1.1. Influência do perfil de velocidades

A expressão (III-1) refere-se à velocidade média ao longo da trajetória do feixe ultrassônico. Se a velocidade sobre tal trajetória é uniforme então, a medida exata da velocidade em qualquer ponto do escoamento é a mesma que a velocidade média. Na realidade, entretanto, a equação necessita uma correção pois as hipóteses de validade da mesma não são completamente satisfeitas.

Numa tubulação retílinea, admite-se um perfil com distribuição simétrica, porém não uniforme. A velocidade no centro da tubulação é assim maior que nas proximidades da parede. A relação entre a velocidade no centro da tubulação e nas proximidades da parede aumenta com a diminuição do nº de Reynolds.

A Figura 3.3 mostra como se desenvolvem os perfis de velocidade em função do grau de turbulência (Re).

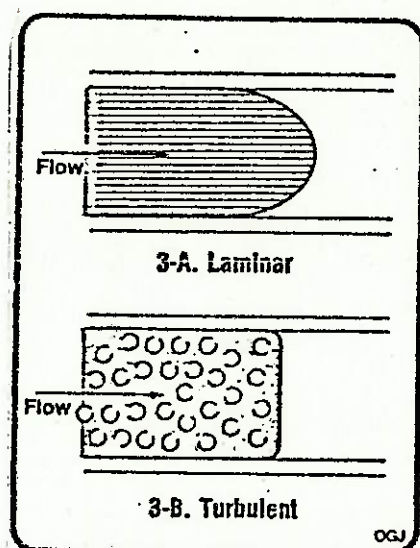


FIGURA 3.3. Perfis de velocidade

Tendo em vista que as velocidades típicas de tubulações de gás natural resultam em altos Reynolds, tais escoamentos normalmente são turbulentos. Então, a medição da velocidade em um ponto no centro do perfil resulta num valor 3 a 5% maior que a velocidade média do escoamento.

O medidor de vazão para gases da Panametrics* por exemplo, mede a velocidade média do escoamento de gás que intercepta o feixe de ondas. Como um único par de transdutores ultrasônicos é utilizado, e localizado ao longo do maior diâmetro, a velocidade medida não é a velocidade média de um volume através de uma área transversal, mas sim, a velocidade através da trajetória do feixe de ondas. Sendo assim, deve-se fazer uma correção para conseguirmos obter a velocidade real do fluxo de gás. Esta correção, requer que o perfil do fluxo possa ser matematicamente descrito como função de Reynolds. Para tal, utiliza-se o fator " K_{FP} " que é dado por:

$$K_{FP} = \frac{1}{C_1 + C_2 \log Re} \quad (III-3)$$

onde: C_1, C_2 = ctes. empíricos

Re = nº de Reynolds

1.1.2. Descrição do sistema (Baseado no medidor da Panametrics)

O método de medição de vazão por contrapropagação do feixe de ondas consiste basicamente em duas partes: o sistema eletrônico interno composto de uma fonte de alimentação, circuitos de transmissão e recepção e um microprocessador, e um par de transdutores ultrasônicos.

No sistema eletrônico interno, o microprocessador é responsável pelo cálculo da vazão medida com os transdutores ultrasônicos, e controla ainda toda a operação da unidade. Os transdutores ultrasônicos são unidades hermeticamente seladas, fixadas em um mecanismo de encaixe; são confeccionados com material piezoelétrico de aproximadamente 1 polegada de diâmetro acoplado a um material de baixa densidade de modo a manter a impedância acústica semelhante a do gás.

*Panametrics é uma das firmas empenhadas no desenvolvimento de medidores de vazão por ultrasom tendo inclusive adquirido um "Know-how" na área.

Os transdutores são de banda relativamente estreita, centrada em torno de 100 KHz. A direcionalidade do transdutor é excelente, entretanto, a essa frequência, a onda ultrasônica não é bruscamente atenuada ou dispersa pela alta pressão do gás. Devem ser instalados em contato direto com o gás e intercaldos, sendo estas condições desnecessárias no caso de alguns líquidos.

1.1.3. Sistema de operação

A onda ultrasônica gerada pelo medidor de vazão possui uma frequência de 100 KHz modulada por uma onda de 5 KHz. Cada transdutor serve tanto como transmissor, como receptor, e em cada 4 segundos são eletronicamente invertidos. O sinal recebido é desmodulado para produzir um "pacote de ondas" como mostra a Figura 3.4.

Os tempos de trânsito (t_1 e t_2) da "contra-corrente" e "corrente" necessários para a solução da equação (III-1) são os intervalos de tempo entre a transmissão e recepção do sinal (Figura 3.5).

5A. Received wavepacket

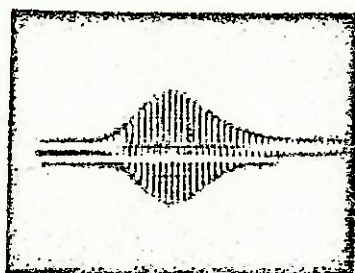


FIGURA 3.4. Forma de onda recebida.

5B. Transit time measurement

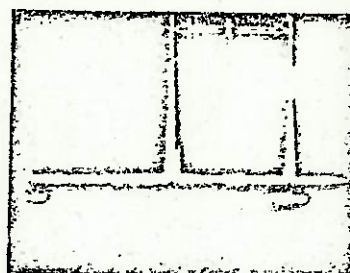


Figura 3.5. Diferença de tempos de trânsito (t)

1.1.4. Cálculo da vazão

A vazão medida é calculada a partir da seguinte relação:

$$Q = K_{FP} \cdot V_F \cdot A \cdot \left(\frac{\rho a}{\rho s} \right) \quad (\text{III-4})$$

ou

$$Q = K_{FP} \cdot V_F \cdot A \cdot \left(\frac{P_a}{P_s} \right) \cdot \left(\frac{I_s}{T_a} \right) \cdot F_{PV}^2 \quad (\text{III-5})$$

onde:

- . Q = vazão referente às condições padrões
- . K_{FP} = Fator de correção do perfil
- . A = área transversal do tubo
- . V_F = velocidade do gás
- . ρ = densidade do gás
- . P = pressão do gás
- . T = temperatura do gás
- . F_{PV} = fator de supercompressibilidade
- . a = índice referente ao fluxo
- . s = índice referen à base

Desse modo, a medição de Pressão (P) e temperatura (T) do gás no tubo são necessárias, bem como medições da gravidade específica (SG), nº de moles de CO_2 e N_2 para estimativa do fator de supercompressibilidade (F_{PV}). Isso vai de encontro a maior vantagem deste tipo de medidor que é a não necessidade de introduzir sondas no meio do escoamento.

Estes dados medidos, devem ser computados e introduzidos no medidor, e a partir de então ele passará a executar o cálculo da vazão. Se as condições forem alteradas, deve-se introduzir novamente os dados mais recentes para que o aparelho possa corrigir os resultados.

1.2. Medição de Vazão por Efeito Doppler

Este é outro método de medição de vazão por ultrasom muito usado, porém quando se possui escoamento de fluidos no estado líquido ou pastoso (não pode ser utilizado em gases).

Uma condição essencial para o bom desempenho do aparelho é que se possua um escoamento bifásico onde se deseja fazer a medição, uma vez que o princípio de operação do aparelho é baseado no efeito Doppler.

1.2.1. Efeito Doppler

O efeito Doppler é um fenômeno relacionado com a mudança de frequência das ondas recebidas por um observador, para uma situação em que ocorra movimento relativo entre ele (observador) e a fonte emissora de ondas.

Para melhor esclarecer, suponhamos uma fonte que emita uma nota de certa frequência (f_0) e comprimento de onda (λ_0), movendo-se com velocidade (v_s) em direção a um observador fixo; devido ao movimento da fonte, o comprimento de onda aparente das ondas é diminuído, já que de certo modo a fonte tende a alcançar a frente de onda. Essa diminuição do comprimento de onda emitido implica num aumento de frequência, ou seja, o observador fixo ouve um sinal de frequência maior que o sinal emitido pela fonte (f_0). Analogamente, se a fonte se afastar do observador fixo, este irá ouvir um sinal de frequência menor que a frequência emitida (f_0).

Consideremos a seguir, um observador está se afastando da fonte, então passarão por ele um menor número de ondas por intervalo de tempo que se ele estivesse em repouso, isto é, o observador em movimento perceberá uma onda de frequência mais baixa que f_0 . Analogamente, se o observador caminha em direção à fonte, ele receberá um maior número de ondas por intervalo de tempo e portanto ouvirá uma onda com frequência mais alta que f_0 .

Imaginemos agora, a fonte e o observador em movimento ao longo da mesma direção, situados em um meio que também se movimenta ao longo dessa mesma direção.

Suponhamos inicialmente que a fonte emitindo ondas de frequência " f_0 " move-se com velocidade " v_s " e aproxima-se de um observador em movimento com velocidade " v_o ", num meio que se move com velocidade " v_m ". Supõe-se ainda que todas essas velocidades estejam orientadas positivamente segundo o eixo " x ", conforme a Figura 3.6.

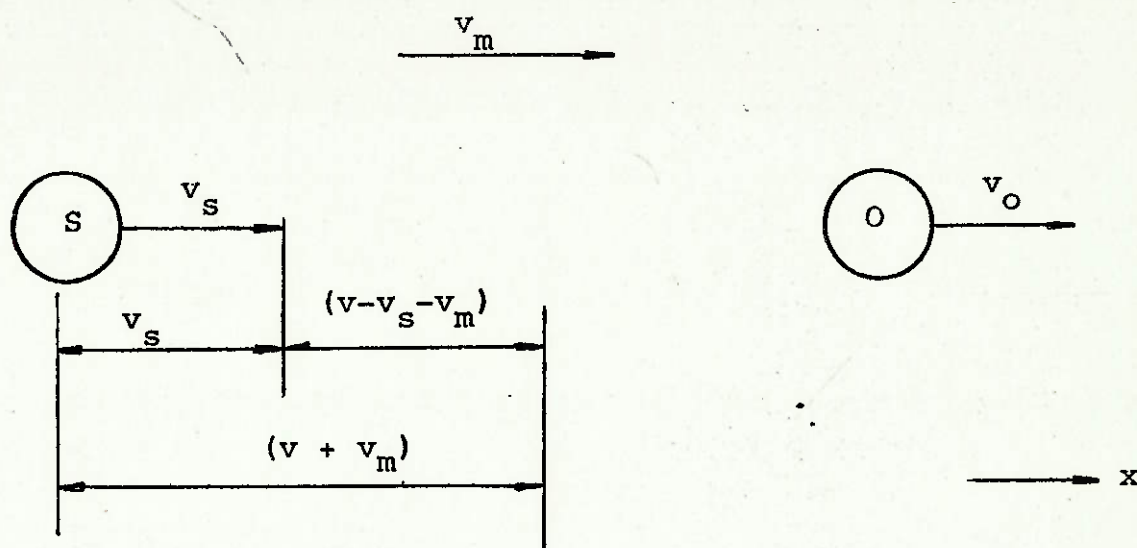


FIGURA 3.6. Fonte e observador em movimento ao longo do eixo "x" positivo.

A velocidade das ondas no meio é " v " e, desde que isto seja uma propriedade do meio, não sofre influência de qualquer movimento da fonte. Uma vez que a velocidade " v " é relativa ao meio, e o meio desloca-se com velocidade " v_m " em relação à Terra, segue-se que a velocidade das ondas na Figura 3.6 relativa à Terra é a soma das duas velocidades ($v + v_m$). Poderíamos considerar este movimento do meio como um vento horizontal que carrega as ondas consigo.

Se considerarmos um intervalo de tempo de 1 segundo, podemos dizer que em um segundo, a frente das ondas deslocou-se de uma distância " $v + v_m$ " para a direita, e durante esse tempo a fonte deslocou-se de uma distância " v_s ". Uma vez que a fonte tem uma frequência " f_o ", está emitindo " f_o " ondas por segundo, de modo que estas ondas " f_o " estão contidas na distância " $v + v, - v_1$ ", o comprimento de onda " λ " dessas ondas será:

$$\lambda = \frac{v + v_m - v_s}{f_o}$$

(III-6)

Consideremos agora o observador. Aproximam-se dele ondas com velocidade " $v + v_m$ " em relação à Terra. Entretanto, supõe-se que o observador está em movimento com velocidade v_o em relação à Terra, portanto, conforme a Figura 3.6, a velocidade das ondas em relação ao observador em movimento é " $v + v_m + v_o$ ". A frequência " f " da nota que o observador recebe é igual ao número de ondas que passa por ele por segundo. Essas ondas, tem um comprimento e destacam-se com velocidade " $v + v_m - v_o$ " em relação a ele, portanto, a frequência " f " da nota recebida pelo observador é:

$$f = \frac{v + v_m - v_o}{\lambda} \quad (III-7)$$

Substituindo " λ " da equação (III-6), obtemos a frequência " f " da nota recebida por um observador em movimento quando a nota é emitida por uma fonte em movimento, de frequência " f_o " em um meio que se desloca com velocidade " v_m ", isto é:

$$f = f_o \cdot \left[\frac{v + v_m - v_o}{v + v_m - v_s} \right] \quad (III-8)$$

OBS.: a equação (III-8) deve apenas ser usada quando todas as velocidades estiverem orientadas segundo uma mesma direção.

1.2.2. Princípio de operação

O equipamento é composto de uma unidade eletrônica responsável pela geração do sinal de ultrassom e conversão do sinal recebido em um valor de velocidade do fluxo, e uma sonda contendo um sensor emissor e um sensor receptor de sinais ultrasônicos acoplados num mesmo dispositivo de fixação.

Opera da seguinte maneira: estando fixada a sonda junto à tubulação onde se deseja medir a vazão, o gerador de pulsos começa a emitir sinais de alta frequência (ultrasônicas) que são refletidos em qualquer descontinuidade do meio; quando este sinal encontra algum material sendo arrastado pelo fluido, em uma fase diferente de

líquida (gasosa ou sólida), será refletido pelo mesmo de volta à sonda que, através de seu sensor receptor, transmite o sinal refletido novamente à unidade de controle. Este sinal, como foi refletido em uma partícula que estava sendo arrastada pelo fluido, possui uma frequência diferente de sua frequência original (efeito Doppler), sendo esta diferença de frequências proporcional à velocidade da partícula. Supondo então que a partícula possui a mesma velocidade do fluido, a diferença de frequência medida reflete diretamente a velocidade do escoamento. Como em determinado instante, atravessam a seção transversal onde a sonda está instalada inúmeras partículas, a unidade de controle fornece ao final a "velocidade média instantânea" na seção, resultado do grande número de reflexões existentes.

1.2.3. Características do escoamento

Conforme já citado, o escoamento onde se deseja efetuar a medição deve apresentar pelo menos uma fase a mais, diferente da fase líquida. Entretanto, na maioria das situações isto ocorre, uma vez que para isto basta termos um escoamento turbulento. Por natureza, o escoamento turbulento quase sempre consegue arrastar consigo bolhas de ar ou vapor do líquido que está escoando.

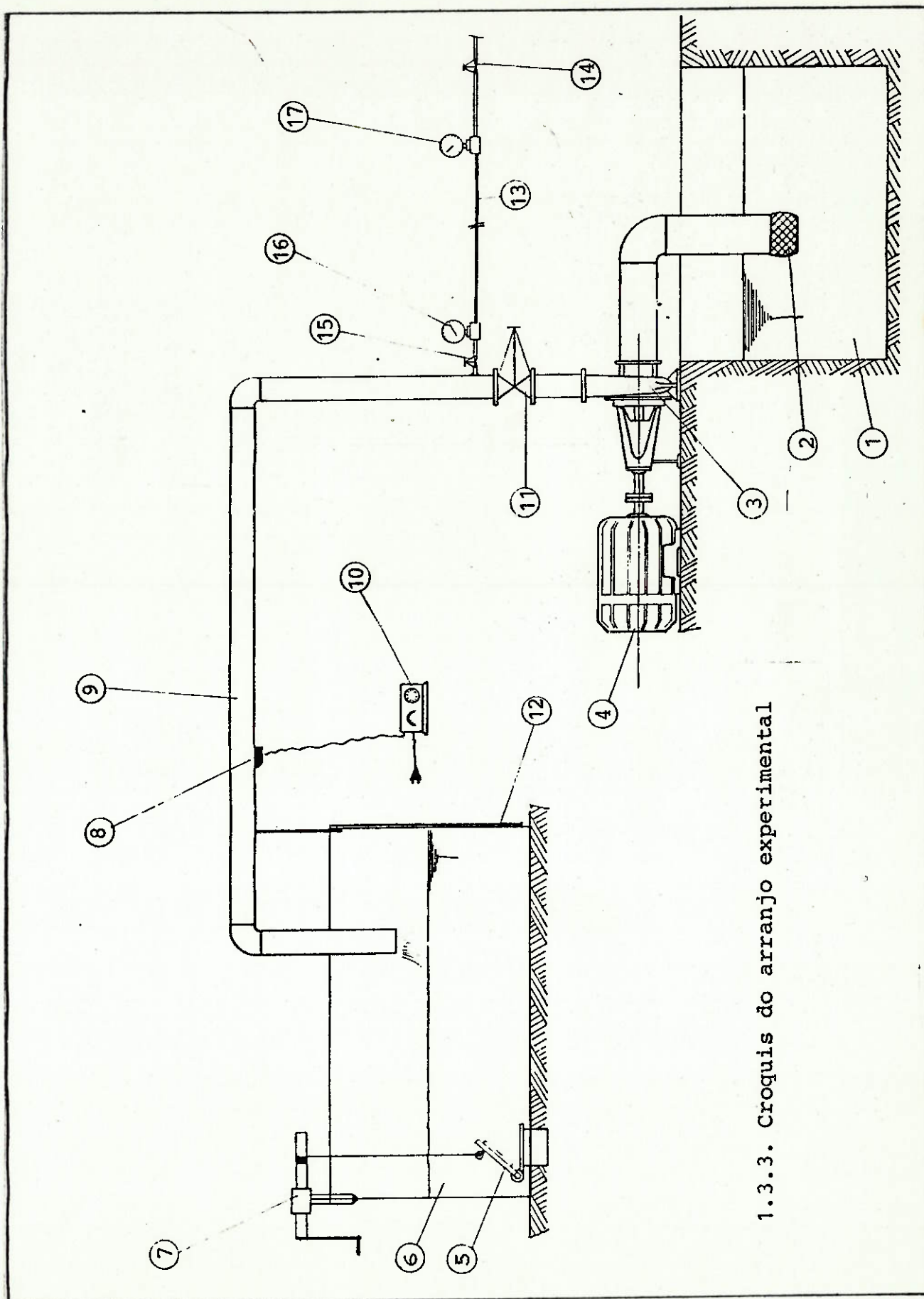
Quando, por alguma razão, não se possui escoamento bifásico, um artifício pode ser utilizado: injeção de ar comprimido a montante da seção da tubulação onde a sonda está instalada. Isto faz com que o escoamento seja bifásico e passa haver reflexão do sinal emitido pela sonda.

Entretanto, pode-se perceber que este artifício pode ser prejudicial ao sistema, vindo a ocasionar perdas de carga indesejáveis quando se tem pequenos diâmetros e ainda introduzir erros na medição como veremos mais adiante.

1.3. Ensaio Comparativo entre um Medidor de Vazão por Efeito Doppler e um Padrão de Volume

1.3.1. Objetivo do ensaio

O ensaio comparativo entre o medidor de vazão por ultrassom e um padrão conhecido, tem por finalidade estudar o comportamento do aparelho diante da variação de alguns parâmetros à medição, como o diâmetro da tubulação e o grau de turbulência do escoamento, conside



1.3.3. Croquis do arranjo experimental

rados os mais significativos.

1.3.2. Considerações iniciais

A parte experimental foi desenvolvida junto às instalações do Laboratório de Máquinas Hidráulicas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O padrão utilizado para comparar a leitura do aparelho, foi um tanque de 2.700 litros e o intervalo de tempo considerado, medido através de um cronômetro com precisão de décimos de segundo; o tanque foi inicialmente calibrado e verificado sua escala de volume.

O medidor de vazão por ultrassom utilizado foi cedido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, bem como os manômetros e válvulas da tubulação de ar comprimido e as tubulações de recalque da bomba.

OBS.: O tanque utilizado possuía um vazamento no assento de sua válvula de descarga (tipo escotilha), o qual não consegui suprimir; entretanto, como o objetivo da experiência não é calibrar o aparelho, este foi regulado para fornecer um erro de leitura - nulo para a vazão em questão, levando em consideração o vazamento, repetindo-se o procedimento para cada coleta de dados.

Relação dos equipamentos de acordo com o croquis:

ITEM	DISCRIMINAÇÃO	OBSERVAÇÕES
1	Reservatório de água - sucção	-
2	Válvula de pé com crivo	-
3	Bomba	-
4	Motor trifásico	-
5	Válvula de descarga do reservatório de recalque	Tipo escolhido
6	Tanque de recalque	Calibrado até 2700 l
7	Mecanismo de acionamento da escotilha	Tipo "sarrilho"
8	Sonda emissora/receptora de sinais <u>ul</u> trasônicos	-
9	Tubulação de recalque	Diâmetro de acordo com o ensaio
10	Medidor de vazão por ultrasom	Panasonics
11	Válvula tipo gaveta	Controla a vazão de água (V3)
12	Visor de nível da água do tanque	Calibrado p/ 2700 l
13	Mangueira de injeção de ar comprimido no duto	Posicionada de forma a permanecer na posição horizontal
14	Válvula de abertura de ar comprimido	Tipo "on-off" (V1)
15	Válvula reguladora de vazão de ar comprimido	Tipo esfera (V2)
16	Manômetro	Leitura de P2
17	Manômetro	Leitura de P1

1.3.4. Procedimento experimental

Para cada coleta de dados, foram realizadas as seguintes e tapas:

- 3.1. colocou-se a instalação em regime , mantendo-se a válvula V3 totalmente aberta, proporcionando de início vazão máxima na bomba;
- 3.2. colocou-se a válvula V3 numa posição intermediária, mediu-se o tempo que o tanque de recalque demorou para completar 2200 litros; com esses dados obteve-se a vazão da tubulação doravante \dot{V}_T ;
- 3.3. com a sonda do aparelho já instalada na tubulação de recalque , mediu-se a velocidade do escoamento através da mesma, doravante \dot{V}_a (a vazão de ar comprimido era nula);
- 3.4. "recalibrrou-se" o aparelho de modo a obter-se uma leitura muito próxima daquela obtida no item(3.2) proporcionando uma diferença de leituras muito baixa, que leva em consideração o vazamen-to anteriormente citado;
- 3.5. colocou-se novamente V3 numa posição totalmente aberta e mediu-se \dot{V}_T , \dot{V}_a , P_1 , P_2 , T, para cinco vazões de ar comprimido através da regulagem de V2;
- 3.6. repetiu-se o item 3.5 para mais três posições de V3 (75% aberta, 50% aberta, 25% aberta);
- 3.7. repetiu-se todo o procedimento até o item 3.6, para outra posi-ção da sonda na seção tubular e para mais seções ao longo da tu-bulação.

1.3.5. Determinação da vazão do tanque

A partir da medição de um volume escoando ao longo do tempo, determinou-se a vazão, isto é:

$$\dot{V}_T = \frac{\Delta \dot{V}_m}{\Delta t}$$

onde: \dot{V}_T = vazão do tanque [m^3/s]

$\Delta \dot{V}_m$ = volume medido [m^3]

Δt = intervalo de tempo referen a \dot{V}_m [s]

1.3.6. Determinação da vazão de ar comprimido

Para a determinação da vazão de ar comprimido, utilizou-se como ferramenta a fórmula de Worthington, ou seja:

$$\Delta P = 0,842 \cdot \frac{L_{TOT} \cdot Q_N^2}{R \cdot d^5}$$

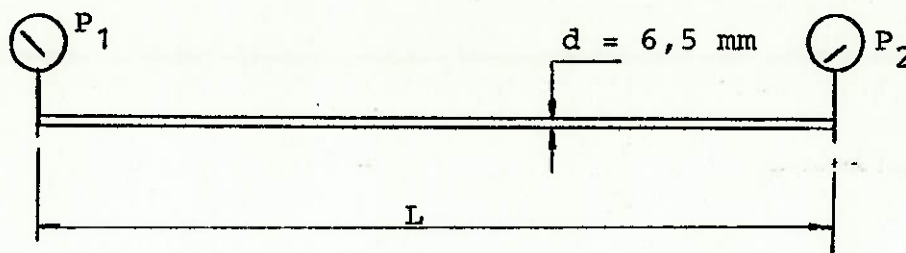
onde: $L_{TOT} = L_{eq} + L$ [m]

R = relação de compressão

d = diâmetro da tubulação [cm]

Q = vazão de ar normal [Nm³/min]

ΔP = perda de pressão



ar normal: $P = 1 \text{ kgf/cm}^2$

(definição) $T = 20^\circ\text{C}$

$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$

$\phi = 36\%$

$K = 1,4$

$$\frac{P_N V_N}{T_N} = \frac{P_R V_R}{T_R} \quad (T_N = T_R) \rightarrow V_R = \frac{P_N}{P_R} \cdot V_N = \frac{V_N}{R}$$

$$\rightarrow Q_R = \frac{Q_N}{R}$$

mas,

$$R = \frac{(P1 + 1)}{1} = P1 + 1$$

$$\rightarrow (P1 - P2) = 0,842 \cdot \frac{L_{TOT} \cdot Q_R^2 \cdot R^2}{R \cdot d^5}$$

$$\rightarrow Q_R = \frac{d^5 \cdot (P1 - P2)}{0,842 \cdot L_{TOT} \cdot (P1 + 1)}$$

$$\therefore \hat{V}_{AR} = \frac{d^5 \cdot (P1 - P2)}{0,842 \cdot L_{TOT} \cdot (P1 + 1)}$$

onde: \hat{V}_{AR} = vazão de ar comprimido em m³/min

1.3.7. Resultados experimentais

. Dados do aparelho de ultrassom utilizado:

Marca: Polisonic

Tipo: Efeito Doppler

Fundo de Escala: 16 m/s

Série: UFM/PD

. Resolução dos aparelhos utilizados:

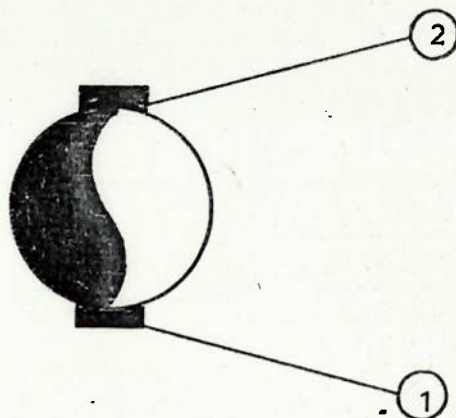
Cronômetro: 0,1 s

Manômetro: 0,5 kgf/cm²

Tanque: 50 l

Termômetro: 0,5°C

- . Para cada diâmetro da tubulação, foram efetuadas 3 medições em três seções distintas: duas horizontais e uma vertical. Em cada uma delas, a sonda foi posicionada em duas posições distintas, conforme mostra a figura:



- . Os resultados encontram-se apresentados em forma de tabelas no anexo "A", para os diâmetros de tubulação de 2", 3" e 5"; na última coluna das tabelas, item OBSERVAÇÕES, o índice "a" significa "aberto", indicando o estado em que se encontra a válvula "V3".
- . O grau de turbulência foi variado através da injeção de ar comprimido imediatamente após a válvula "V3", através de uma válvula tipo GLOBO própria a este fim; para avaliar-se a quantidade de ar que era injetada no escoamento, mediu-se o ΔP (perda de pressão) entre dois pontos da tubulação de ar comprimido e aplicou-se o cálculo apresentado, no item 1.3.6 deste capítulo; quanto mais ar era injetado, mais turbulento tornava-se o escoamento.

1.3.8. Constatações experimentais

Com o decorrer dos ensaios, foram feitas as seguintes observações:

- . toda vez que o acoplamento entre a sonda e a tubulação utilizada estivesse imperfeito, o aparelho não conseguia apresentar uma medida, ou seja, o feixe ultrassônico era emitido e refletido inteiramente na interface imperfeita, ocasionando um "eco" não previsto no sinal recebido;
- . quanto a sonda foi posicionada na parte superior da tubulação horizontal e, durante certas medições a água que estava escoando não conseguia preencher internamente a seção da tubulação, o aparelho apresentou um erro crescente em função do aumento da vazão de ar,

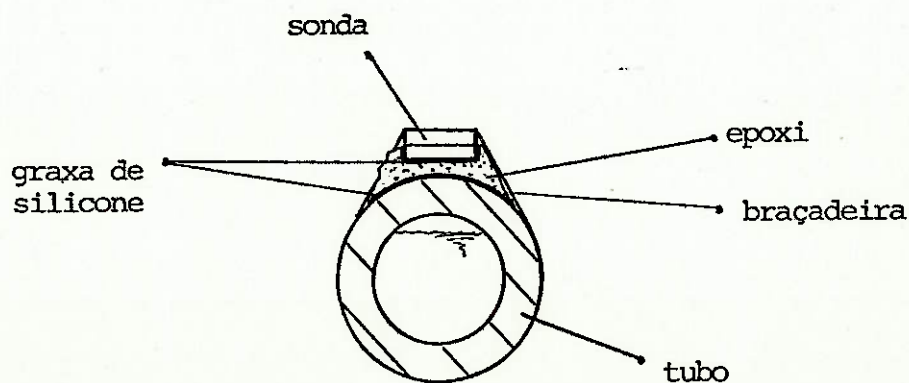
sendo que a velocidade medida com o aparelho foi menor que a velocidade medida no tanque para este caso. Isso se deve ao fato de haver uma "bolsa" de ar na tubulação, causando um aumento da impedância acústica do sistema e por conseguinte um aumento no tempo de percurso da onda sonora;

- . o erro na leitura aumenta (em geral) com o aumento da quantidade de ar comprimido injetada na tubulação, independentemente do diâmetro ou posição da sonda, ou seja, deve-se procurar se possível calibrar o equipamento para o tipo de escoamento que for utilizado;
- . a espessura da parede do tubo em nada influi nos resultados, haja vista a velocidade do som nos sólidos ser bastante alta;
- . para altas velocidades do escoamento (válvula "V3" 100% aberta) o aumento do erro com o grau de turbulência era menor que para baixas velocidades (50% aberta), ou seja, o aparelho era mais sensível a variações com baixas velocidades de escoamento.

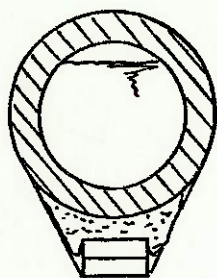
1.3.9. Conclusões

A partir dos resultados experimentais, chegou-se às seguintes conclusões:

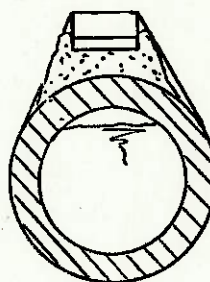
- . Se o escoamento tornar-se bifásico a partir da injeção de ar comprimido na tubulação, quanto maior a vazão de ar, maiores serão as bolhas injetadas e maior será o erro da medição. Isto se deve ao fato da impedância acústica do ar ser diferente da impedância acústica da água e quando as bolhas aumentam em volume, passam a introduzir severas variações na continuidade do meio, causando alterações na frequência da onda ultrasônica e por conseguinte na velocidade lida no aparelho;
- . Quando a válvula controladora da vazão de água encontrava-se totalmente aberta, isto é, a velocidade do escoamento era máxima para o diâmetro de tubo em questão, a imposição de escoamento bifásico a partir da injeção de ar comprimido na tubulação ocasionava erros menores e constantes enquanto que quando a velocidade do escoamento era menor, tais erros eram maiores e variáveis. Tal fato explica-se com base na observação anterior, isto é, quando a velocidade do escoamento é máxima as bolhas que formam são menores que quando a velocidade é intermediária, não evidenciando em demasia o problema da descontinuidade do meio devido ao volume das bolhas;
- . Quando for efetuado o acoplamento entre a sonda e a tubulação, deve sempre existir um elemento pastoso entre a superfície da sonda, a base de "epoxi" e a superfície do tubo, de modo a preencher possíveis espaços vazios que venham a causar alguma descontinuidade nas interfaces. Se isso não for respeitado, o aparelho não conseguirá sequer ler a velocidade do escoamento, como entra-se ilustrado abaixo:



- . A sonda nunca deve ser posicionada na parte superior da tubulação e sim inferior, de modo a evitar possíveis "bolsas" de ar que, ao serem arrastadas pelo escoamento estarão sempre concentradas no topo da seção transversal, criando assim uma descontinuidade no meio e ocasionando erros de medição;



correto



incorreto

- . Notou-se experimentalmente que o diâmetro da tubulação não influenciou em demasia nos erros de leitura, talvez porque o aparelho não fosse sensível a esse ponto e os erros encontravam-se dentro da precisão do equipamento (resolução).

2. VANTAGENS DO APARELHO E ALGUMAS APLICAÇÕES

A maior vantagem do aparelho em relação aos medidores de vazão convencionais, desde que consideradas as observações do item 1.39, é a não necessidade de introduzir-se o aparelho no meio onde se deseja efetuar a medição. Aliado a este fato, está a facilidade de instalação (montagem e desmontagem) e interpretação de resultados - Leitura direta - não necessitando nenhum tipo de correção.

Como aplicações, pode-se citar todo tipo de escoamento bifásico, tubulações com grandes diâmetros, medições esporádicas e controle de processos, sempre respeitando suas condições de operação.

BIBLIOGRAFIA

- Ultrasonics and its Industrial Applications - Babikov
- Oil & Gas Journal, Sept 6, 1982 TECHNOLOGY (pg 110-120)
- Panasonic, Ultrasonic Flow-Meter (catálogo do aparelho)
- Física Moderna. FERENC JR./LEMON/STEPHENSON.

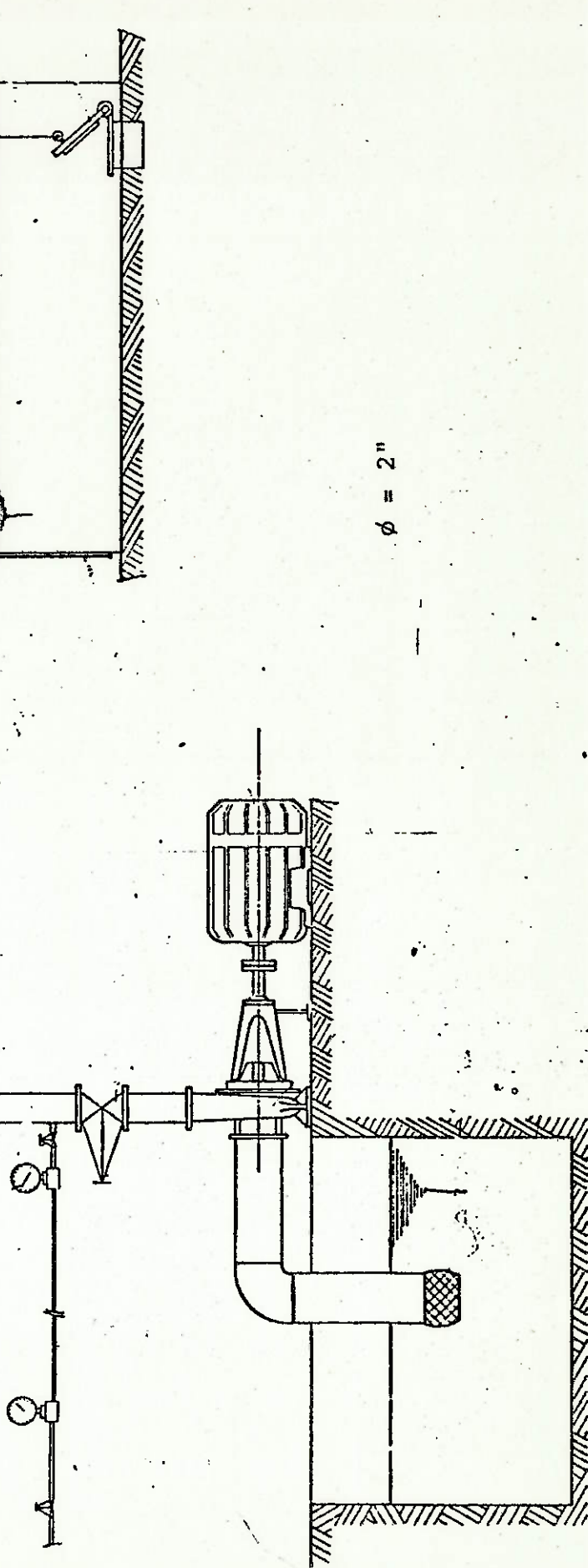
A N E X O

POSICÃO DA Sonda

186 cm

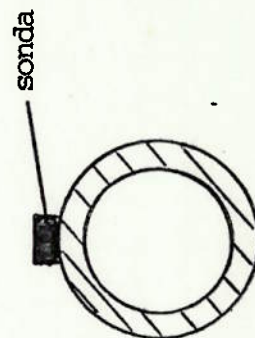
100 cm

$\phi = 2''$



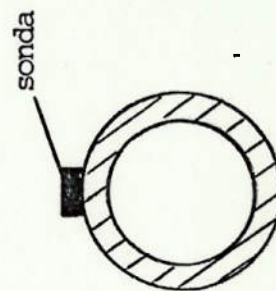
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,5	98	16,0	44,0	7,05	7,04	0,14	7,0	7,0	28	100% a
2	1,5	109	16,0	41,5	6,36	6,64	4,20	7,5	6,0	28	100% a
3	1,5	111	16,0	40,0	6,24	6,40	2,50	7,5	5,0	28	100% a
4	1,5	114	16,0	39,5	6,08	6,32	3,80	7,5	4,0	28	100% a
5	1,5	114	16,0	39,0	6,08	6,24	2,60	7,5	2,0	28	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Polí
- . DATA DO ENSAIO: 25/9/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior
- . OBSERVAÇÕES: C/25 - aparelho



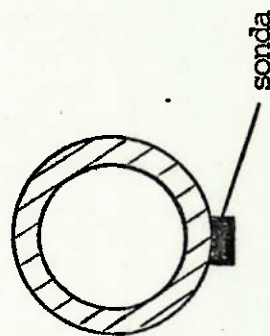
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,0	205	4,00	56,5	2,25	2,26	0,44	7,5	7,5	28	60% a
2	1,0	215	4,00	56,5	2,15	2,26	4,86	7,5	6,0	28	60% a
3	1,0	219	4,00	57,0	2,11	2,28	7,46	7,5	5,0	28	60% a
4	1,0	222	4,00	59,5	2,08	2,38	12,61	7,5	4,0	28	60% a
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Pol1
- . DATA DO ENSAIO: 25/9/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior
- . OBSERVAÇÕES: B-223/aparelho



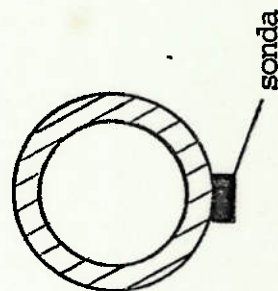
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,5	98	16,0	44,5	7,07	7,12	0,70	7,5	7,5	30	100% a
2	1,5	104,5	16,0	49,5	6,63	7,92	16,28	6,5	5,5	30	100% a
3	1,5	109	16,0	48,5	6,36	7,76	18,04	6,5	4,5	30	100% a
4	1,5	111,5	16,0	47,5	6,21	7,60	18,23	6,5	3,5	30	100% a
5	1,5	111	16,0	47,5	6,24	7,60	17,89	6,5	2,0	30	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: POLI
- . DATA DO ENSAIO: 25/9/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- . OBSERVAÇÕES: C-41/aparelho



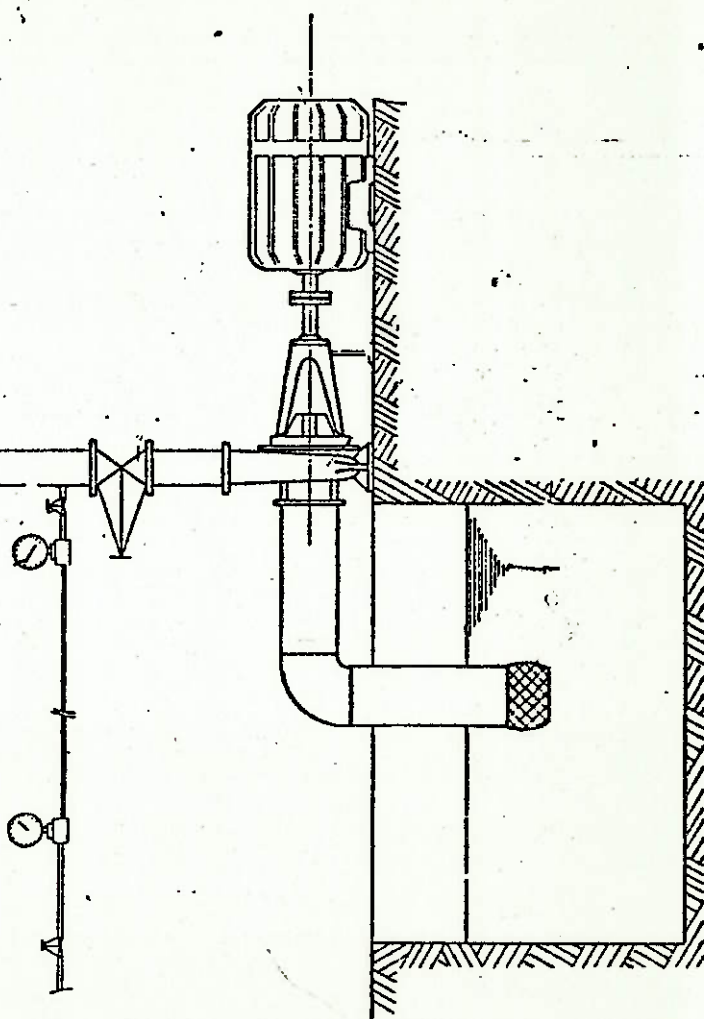
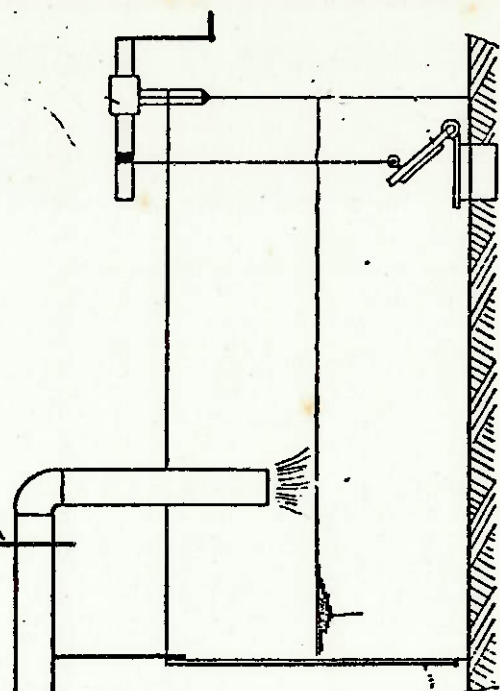
PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,0	174	4,00	66,5	2,65	2,66	0,38	6,5	6,5	29	60% a
2	1,0	184,5	4,00	80,0	2,50	3,20	21,9	6,5	5,5	29	60% a
3	1,0	190	4,00	84,5	2,43	3,38	28,1	6,5	4,5	29	60% a
4	1,0	191,5	4,00	85,0	2,41	3,40	29,1	6,5	3,5	28	60% a
5	1,0	191	4,00	85,0	2,42	3,40	28,8	6,5	2,0	28	60% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- LOCAL DO ENSAIO: POLI
- DATA DO ENSAIO: 25/9/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- OBSERVAÇÕES: A-101/aparelho



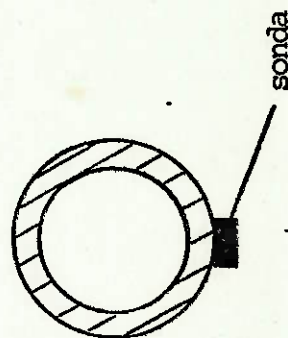
POSICÃO DA
SONDA

$\phi = 2''$



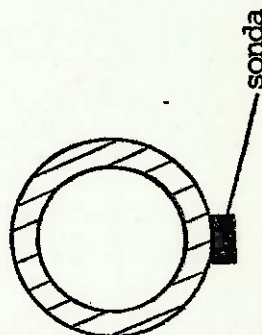
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,5	98	16,0	48,5	7,07	7,76	8,9	6,0	6,0	28	100% a
2	1,5	107	16,0	47,5	6,48	7,60	14,7	6,0	5,5	28	100% a
3	1,5	110	16,0	16,0	6,30	7,36	14,4	6,0	4,0	28	100% a
4	1,5	113	16,0	45,5	6,13	7,28	15,8	6,0	3,0	28	100% a
5	1,5	113	16,0	45,0	6,13	7,20	14,9	5,5	1,0	28	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Pol1
- . DATA DO ENSAIO: 16/10/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- . OBSERVAÇÕES: C-41/aparelho



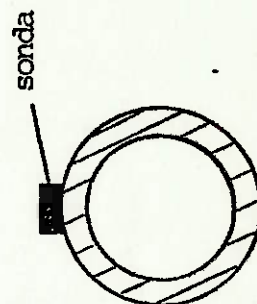
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,5	174	8,0	51,5	3,98	4,12	3,3	6,0	6,0	28	60% a
2	1,5	185	8,0	56,5	3,75	4,52	17,0	6,2	5,1	27	60% a
3	1,5	190	8,0	58,0	3,65	4,64	21,3	6,0	4,0	27	60% a
4	1,5	191	8,0	58,5	3,63	4,68	22,4	6,0	3,0	28	60% a
5	1,5	191	8,0	58,5	3,63	4,68	22,4	6,0	1,0	27	60% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- LOCAL DO ENSAIO: Pol1
- DATA DO ENSAIO: 16/10/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- POSICÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- OBSERVAÇÕES: B-41/aparelho



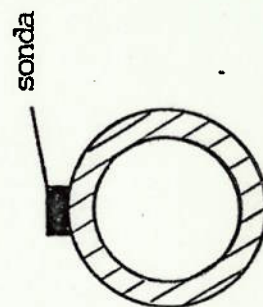
PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,5	98	16,0	48,5	7,07	7,76	8,8	7,5	7,5	28	100% a
2	1,5	106	16,0	43,0	6,54	6,88	4,9	7,5	6,5	28	100% a
3	1,5	109	16,0	41,5	6,36	6,64	4,2	7,5	5,5	28	100% a
4	1,5	112	16,0	40,0	6,19	6,40	3,3	7,5	4,0	28	100% a
5	1,5	113	16,0	39,5	6,13	6,32	3,0	7,5	1,5		100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

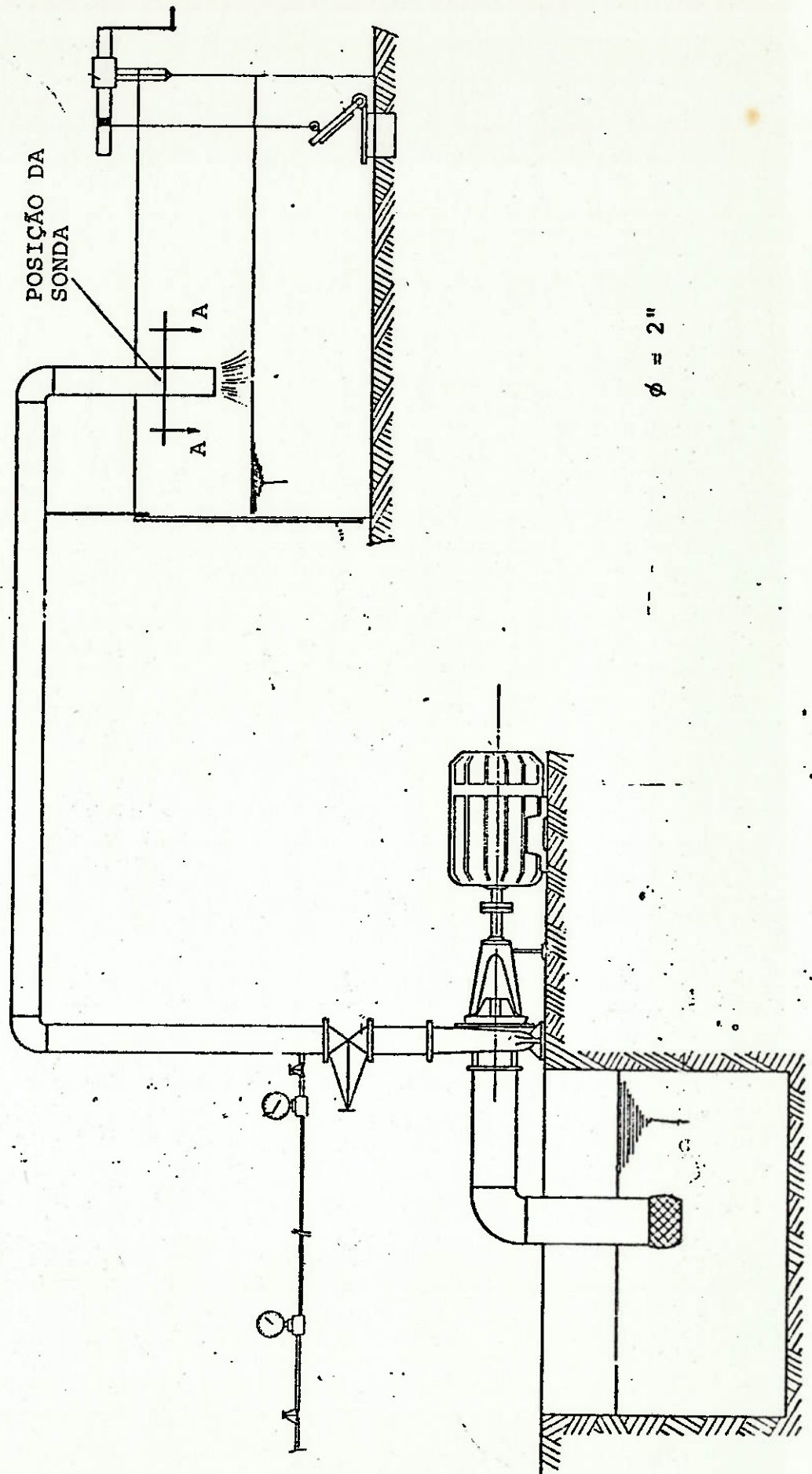
- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 16/10/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior
- . OBSERVAÇÕES: C-46 - aparelho



PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,5	174	8,0	52,5	3,98	4,20	5,2	7,5	7,5	28	60% a
2	1,5	185	8,0	44,5	3,75	3,56	-5,3	7,0	6,0	27	60% a
3	1,5	190	8,0	44,5	3,65	3,56	-2,5	7,0	4,5	27	60% a
4	1,5	191	8,0	44,5	3,63	3,56	-2,0	7,0	3,0	27	60% a
5	1,5	191	8,0	44,5	3,63	3,56	-1,9	6,8	1,2	27	60% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

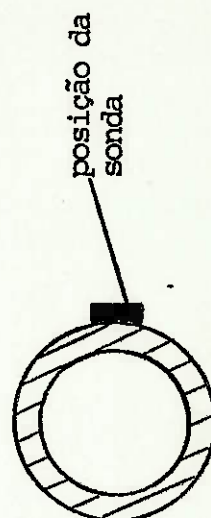
- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 16/10/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior
- . OBSERVAÇÕES: B-46/aparelho





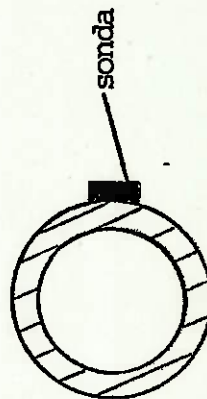
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,5	98	16,0	48,5	7,07	7,76	8,8	8,0	8,0	27	100% a
2	1,5	106	16,0	45,5	6,54	7,28	10,2	7,5	6,5	27	100% a
3	1,5	110	16,0	45,5	6,30	7,28	13,5	7,5	5,5	27	100% a
4	1,5	112	16,0	45,5	6,19	7,28	15,0	7,5	4,5	27	100% a
5	1,5	113	16,0	45,5	6,13	7,28	15,8	7,5	2,0	27	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 16/10/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- . POSIÇÃO DA Sonda: Vertical
- . OBSERVAÇÕES: C-46 - aparelho



PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,5	171	8,0	50,5	4,05	4,04	0,24	7,5	7,5	27	60% a
2	1,5	173	8,0	56,5	4,00	4,52	11,50	7,5	6,5	27	60% a
3	1,5	180	8,0	59,5	3,85	4,76	19,11	7,5	5,5	27	60% a
4	1,5	190	8,0	61,5	3,65	4,92	25,8	7,5	4,5	27	60% a
5	1,5	190	8,0	62,5	3,65	5,00	27,0	7,5	2,0	27	60% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

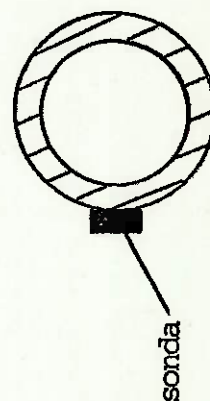
- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 16/10/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Vertical
- . OBSERVAÇÕES: C-46/aparelho



Corte A-A

PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,5	98	16,0	48,5	7,07	7,76	8,8	8,0	8,0	27	100% a
2	1,5	106	16,0	46,5	6,54	7,44	12,1	8,0	7,0	27	100% a
3	1,5	110	16,0	45,0	6,30	7,20	12,5	8,0	6,0	27	100% a
4	1,5	112	16,0	45,0	6,19	7,20	14,0	8,0	4,5	26	100% a
5	1,5	113	16,0	45,0	6,13	7,20	14,9	8,0	2,0	26	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 16/10/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Vertical
- . OBSERVAÇÕES: C-46/aparelho



Corte A-A

PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,5	171	8,0	51,5	4,05	4,12	1,7	7,5	7,5	26	60%
2	1,5	173	8,0	58,0	4,00	4,64	13,7	8,0	7,0	26	60%
3	1,5	177	8,0	60,0	3,91	4,80	18,5	8,0	6,0	26	60%
4	1,5	189	8,0	62,0	3,67	4,96	26,0	8,0	4,5	26	60%
5	1,5	191	8,0	62,5	3,63	5,00	27,4	8,0	1,5	26	60%
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

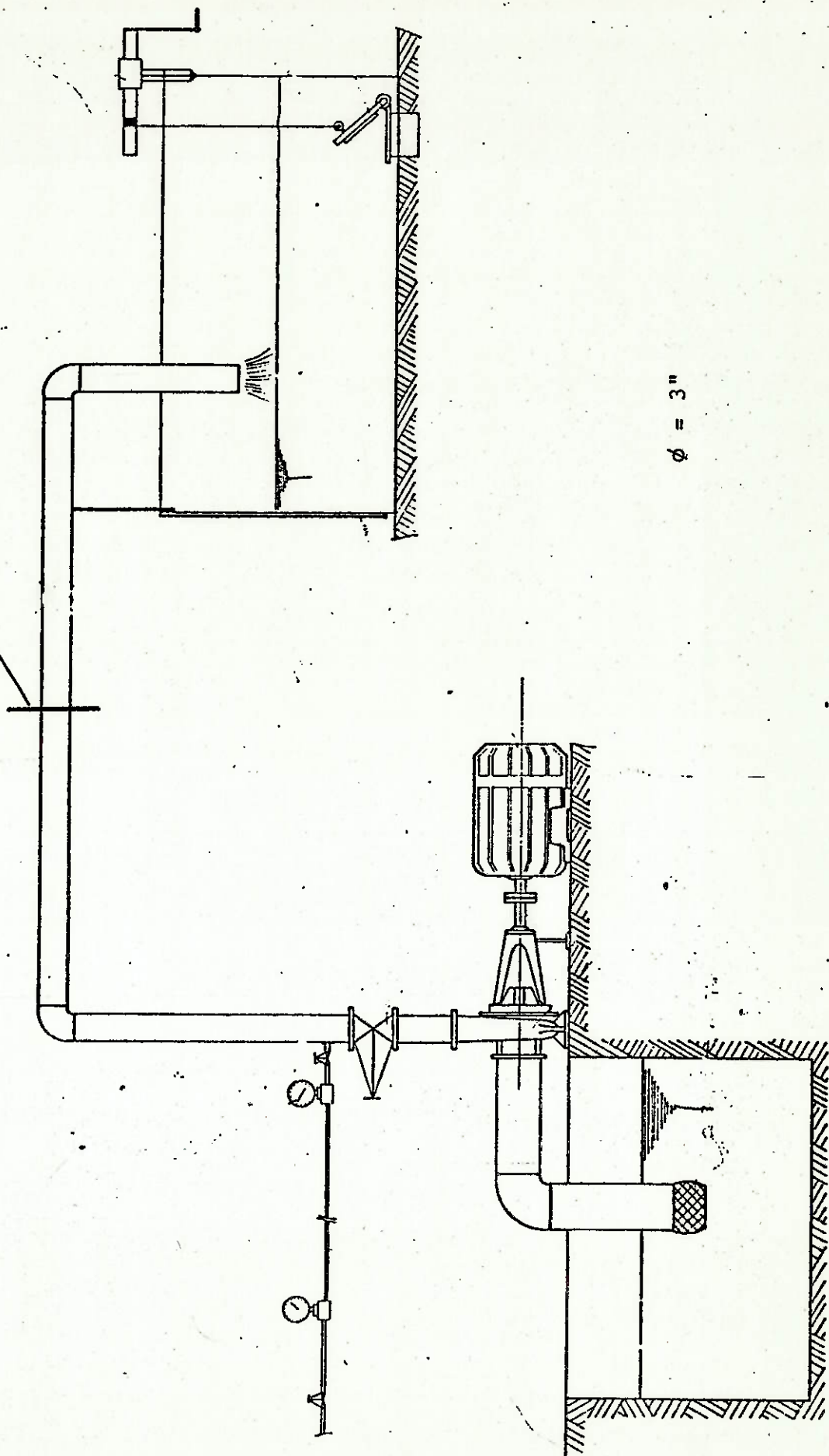
- . LOCAL DO ENSAIO: Pol1
- . DATA DO ENSAIO: 16/10/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 2"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 52,5 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,002165 m²
- . POSIÇÃO DA Sonda: Vertical
- . OBSERVAÇÕES: C-46/aparelho



Corte A-A

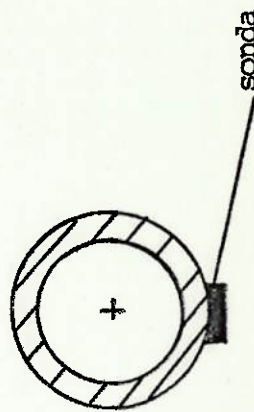
POSICÃO DA Sonda

$\phi = 3''$



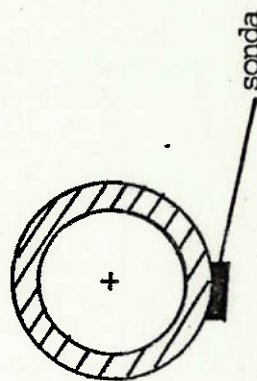
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	91	8,0	62,0	4,93	4,96	0,6	6,5	6,5	18	-
2	2,2	95	8,0	65,0	4,73	5,20	9,0	6,5	5,5	18	-
3	2,2	97	8,0	65,5	4,63	5,24	11,6	6,0	4,5	18	-
4	2,2	98	8,0	65,5	4,58	5,24	12,6	6,0	3,0	18	-
5	2,2	98	8,0	65,0	4,58	5,20	11,9	6,0	2,0	18	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: POLI
- . DATA DO ENSAIO: 19/7/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- . OBSERVAÇÕES: válvula 100% aberta



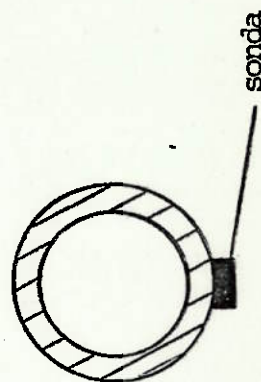
PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	107	8,0	50,0	4,19	4,00	-4,75	6,0	6,0	18	-
2	2,2	113	8,0	52,0	3,97	4,16	4,60	6,0	4,75	18	-
3	2,2	114	8,0	53,5	3,94	4,28	7,90	6,0	4,0	18	-
4	2,2	115	8,0	54,5	3,90	4,36	10,50	6,0	3,0	18	-
5	2,2	114	8,0	54,0	3,94	4,32	8,80	6,0	2,0	18	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Pol1
- . DATA DO ENSAIO: 19/7/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- . OBSERVAÇÕES: válvula 3/4 aberta



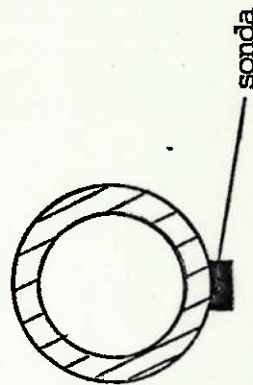
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	152	4,0	68,5	2,95	2,74	-7,6	6,5	6,5	18	-
2	2,2	154	4,0	68,0	2,92	2,72	-7,2	6,5	6,5	18	-
3	2,2	159	4,0	76,5	2,82	3,06	5,5	5,5	4,5	18	-
4	2,2	162	4,0	78,0	2,77	3,12	11,2	6,0	4,0	18	-
5	2,2	162	4,0	80,0	2,77	3,20	13,4	6,0	3,0	18	-
6	2,2	162	4,0	80,0	2,77	3,20	13,4	6,0	2,0	18	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 19/7/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- . OBSERVAÇÕES: válvula 1/2 aberta



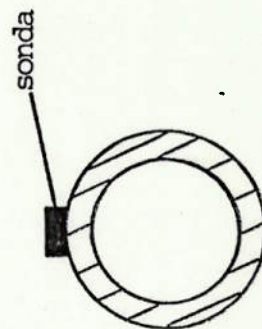
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,6	228	4,0	34,0	1,36	1,43	4,8	6,0	6,0	18	-
2	1,6	244	4,0	44,0	1,34	1,76	23,8	6,0	5,0	18	-
3	1,6	248	4,0	49,0	1,32	1,96	32,8	6,0	4,0	18	-
4	1,6	248	4,0	49,5	1,32	1,98	33,3	6,0	3,0	18	-
5	1,6	248	4,0	49,5	1,32	1,98	33,3	6,0	2,0	18	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 19/7/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- . OBSERVAÇÕES: válvula 1/4 aberta



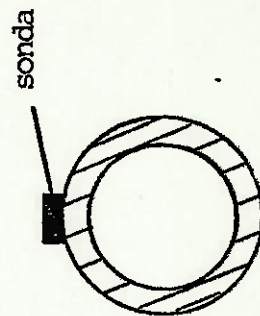
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	91	8,0	62,0	4,93	4,96	0,6	6,5	6,5	20	-
2	2,2	96	8,0	62,5	4,68	5,00	6,4	6,0	5,0	20	-
3	2,2	98	8,0	62,5	4,58	5,00	8,4	6,0	4,0	20	-
4	2,2	100	8,0	62,0	4,49	4,96	9,5	6,5	3,5	20	-
5	2,2	101	8,0	62,0	4,45	4,96	10,3	7,0	3,0	20	-
6	2,2	101	8,0	62,5	4,45	5,00	11,0	7,0	2,5	20	-

- LOCAL DO ENSAIO: Poli
- DATA DO ENSAIO: 25/7/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- POSICÃO DA SONDA: Horizontal-superior-meio
- OBSERVAÇÕES: Válvula 100% aberta



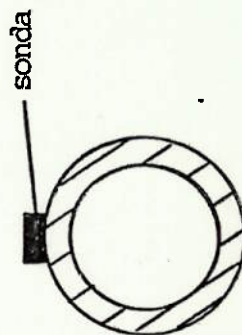
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	120	4,0	93,5	3,74	3,74	0,0	6,0	6,0	20	-
2	2,2	120	4,0	93,5	3,74	3,74	0,0	6,0	6,0	20	oscilou muito
3	2,2	126	4,0	92,5	3,56	3,70	3,4	6,0	5,0	20	-
4	2,2	129	4,0	92,5	3,48	3,70	5,9	6,0	4,0	20	-
5	2,2	128	4,0	92,5	3,51	3,70	5,1	5,5	2,5	20	-
6	2,2	129	4,0	92,5	3,48	3,70	5,9	5,8	1,8	20	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Pol1
- . DATA DO ENSAIO: 25/7/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior-meio
- . OBSERVAÇÕES: Válvula 3/4 aberta



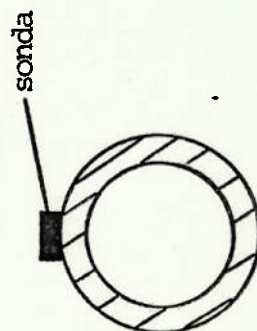
PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	150	4,0	74,5	2,99	2,98	0,34	7,5	7,5	19	-
2	2,2	157	4,0	69,0	2,86	2,76	-3,62	7,5	6,5	10	-
3	2,2	158	4,0	69,5	2,84	2,78	-2,16	7,5	5,5	19	-
4	2,2	159	4,0	69,5	2,82	2,78	-1,44	7,2	4,5	19	-
5	2,2	158	4,0	69,0	2,84	2,76	-2,90	5,5	1,5	19	muita vibração
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 25/7/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior-meio
- . OBSERVAÇÕES: Válvula 1/2 aberta



PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	269	4,0	41,5	1,67	1,66	0,6	6,0	6,0	19	-
2	2,2	292	4,0	35,5	1,54	1,42	-8,5	6,0	5,0	19	-
3	2,2	292	4,0	35,5	1,54	1,42	-8,5	6,0	4,0	19	-
4	2,2	295	4,0	36,0	1,52	1,44	-5,5	5,5	2,5	19	-
5	2,2	297	4,0	35,5	1,51	1,42	-6,3	5,8	1,8	19	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: POL1
- . DATA DO ENSAIO: 25/7/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA FA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior-meio
- . OBSERVAÇÕES: Válvula 1/4 aberta



PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	91	8,0	62,0	4,93	4,96	0,6	7,0	7,0	20	-
2	2,2	93	8,0	63,0	4,83	5,04	4,2	7,0	6,0	20	-
3	2,2	95	8,0	63,5	4,73	5,08	6,9	7,0	5,0	20	-
4	2,2	95,5	8,0	64,0	4,70	5,12	9,2	6,5	3,5	21	-
5	2,2	95,5	8,0	64,0	4,70	5,12	9,2	6,5	2,5	21	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

. ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²

. POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-meio

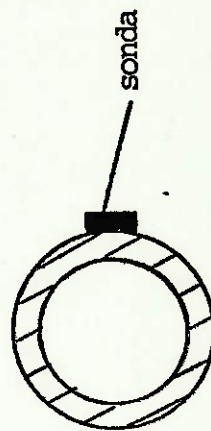
. OBSERVAÇÕES: Válvula 100% aberta

. LOCAL DO ENSAIO: Pol1

. DATA DO ENSAIO: 02/08/85

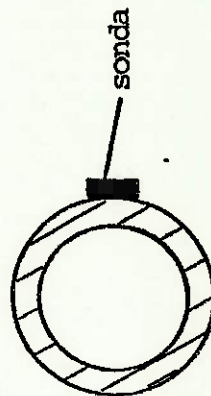
. DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"

. DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm



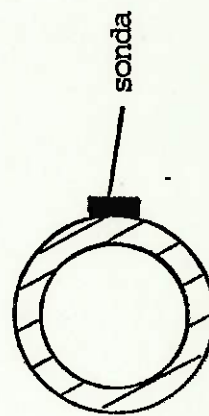
PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	110	8,0	51,0	4,08	4,08	0	6,5	6,5	21	-
2	2,2	114	8,0	55,5	3,94	4,44	11,3	6,5	5,5	21	-
3	2,2	115	8,0	56,5	3,90	4,52	13,7	6,5	4,5	21	-
4	2,2	115	8,0	57,0	3,90	4,56	14,5	6,0	3,5	21	-
5	2,2	116	8,0	57,0	3,89	4,56	14,7	6,0	2,0	21	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 02/8/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-meio
- . OBSERVAÇÕES: válvula 75% aberta



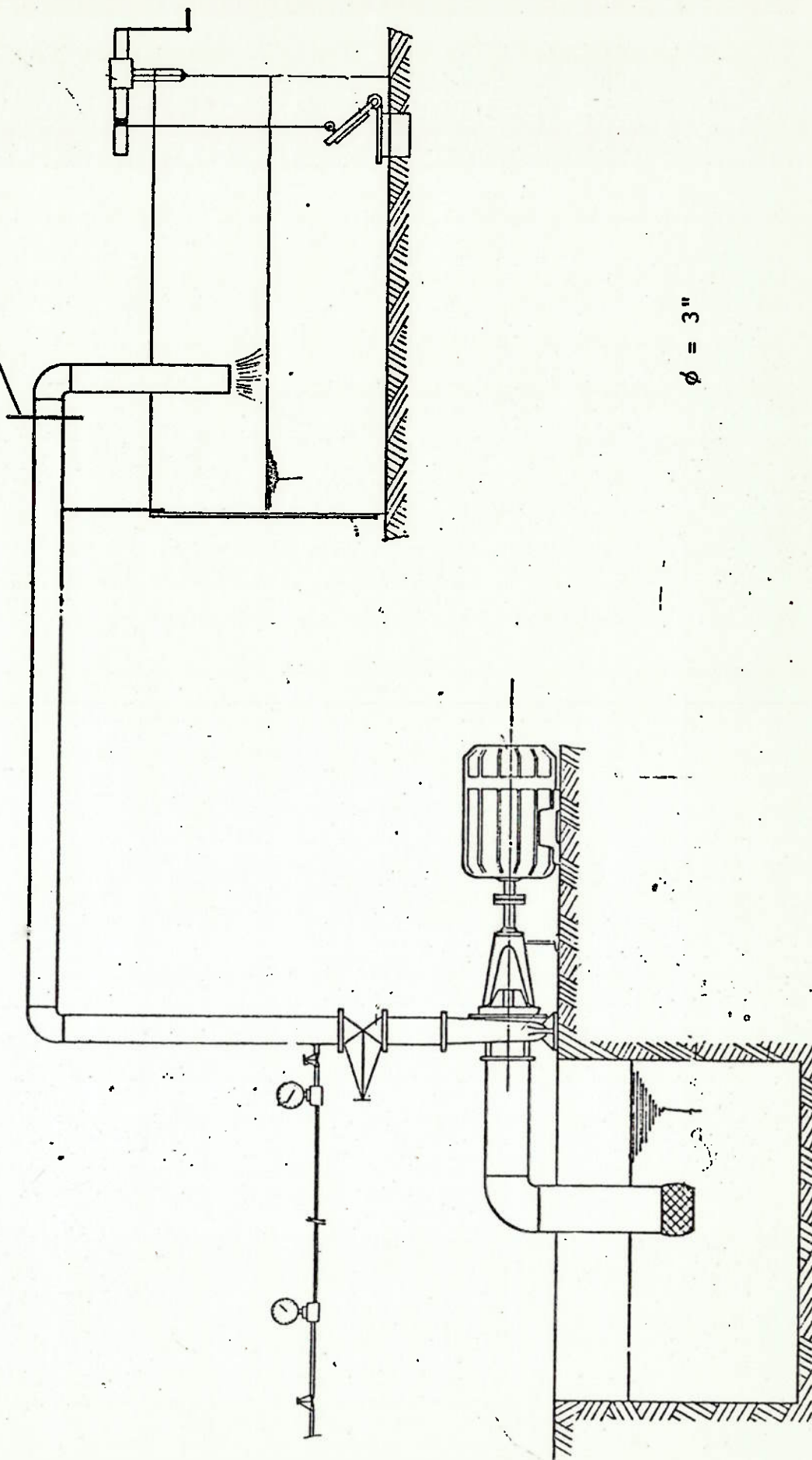
PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	248	4,0	45,5	1,81	1,82	0,5	7,0	7,0	21	-
2	2,2	254	4,0	49,0	1,77	1,96	9,7	6,5	6,0	21	-
3	2,2	267	4,0	51,0	1,68	2,04	17,6	6,5	5,5	21	-
4	2,2	269	4,0	52,5	1,67	2,10	20,5	7,0	5,0	22	-
5	2,2	275	4,0	52,5	1,63	2,10	22,4	6,25	3,25	22	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 02/08/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-meio
- . OBSERVAÇÕES: Válvula 25% aberta



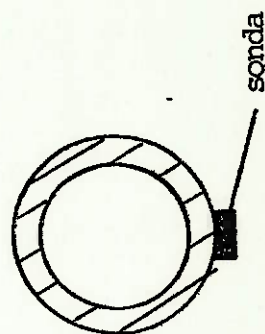
POSICÃO DA
SONDA

$\phi = 3"$



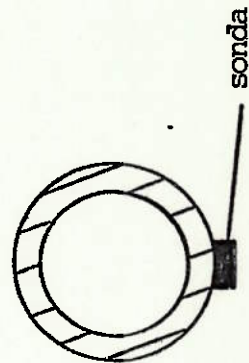
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	89	8,0	63,0	5,04	5,04	0	6,0	6,0	22	100% a
2	2,2	90	8,0	64,0	4,99	5,12	2,54	6,5	6,0	22	100% a
3	2,2	92	8,0	64,0	4,88	5,12	4,69	6,25	5,0	22	100% a
4	2,2	93	8,0	64,5	4,83	5,16	6,40	6,25	4,0	22	100% a
5	2,2	94	8,0	64,5	4,78	5,16	7,36	6,0	1,0	22	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- LOCAL DO ENSAIO: Poli
- DATA DO ENSAIO: 02/8/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- POSICÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- OBSERVAÇÕES: C/210 - p/ o aparelho



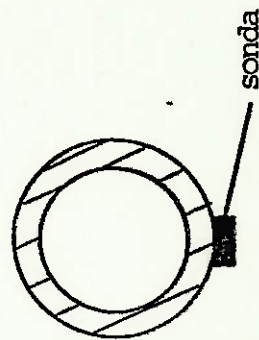
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	132	8,0	42,5	3,40	3,40	0	6,0	6,0	22	75% a
2	2,2	134,5	8,0	45,0	3,34	3,60	7,22	6,3	5,8	22	75% a
3	2,2	136	8,0	47,0	3,30	3,76	12,23	6,0	5,0	22	75% a
4	2,2	138	8,0	48,5	3,25	3,88	16,24	6,0	4,0	22	75% a
5	2,2	138	8,0	48,5	3,25	3,88	16,24	6,0	1,0	22	75% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 02/8/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- . OBSERVAÇÕES: C/207 -- aparelho



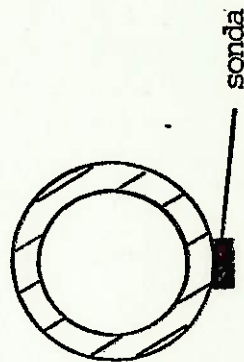
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	171	4,0	65,5	2,63	2,62	-0,38	6,0	6,0	23	50% a
2	2,2	176	4,0	70,0	2,55	2,80	8,93	6,3	5,5	23	50% a
3	2,2	177	4,0	74,5	2,54	2,98	14,77	6,3	5,0	23	50% a
4	2,2	178	4,0	78,0	2,52	3,12	19,23	6,3	4,3	23	50% a
5	2,2	179	4,0	81,5	2,51	3,26	23,01	6,0	1,0	23	50% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 02/8/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- . OBSERVAÇÕES: B/212 - aparelho



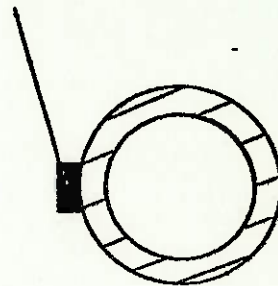
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	251	4,0	45,0	1,79	1,80		6,0	6,0	22	25% a
2	2,2	268	4,0	46,5	1,68	1,86		6,25	5,75	22	25% a
3	2,2	273,5	4,0	50,0	1,64	2,00		6,25	5,00	22	25% a
4	2,2	274	4,0	55,0	1,64	2,20		6,25	4,25	22	25% a
5	2,2	277	4,0	58,0	1,62	2,32		6,00	1,00	22	25% a
6	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 02/8/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- . OBSERVAÇÕES: B/212 - aparelho



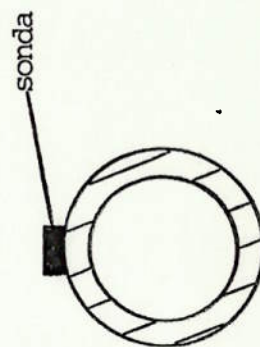
PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	91	8,0	62,0	4,93	4,96	0,6	5,0	5,0	24	100% a
2	2,2	93	8,0	59,0	4,83	4,72	-2,3	5,0	4,5	24	100% a
3	2,2	94	8,0	57,5	4,78	4,60	-3,9	5,0	4,0	24	100% a
4	2,2	95	8,0	56,5	4,73	4,52	-4,6	5,0	3,0	24	100% a
5	2,2	96	8,0	55,0	4,68	4,40	-6,4	5,0	2,0	25	100% a
6	2,2	96	8,0	55,0	4,68	4,40	-6,4	5,0	1,0	25	100% a

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 09/8/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior
- . OBSERVAÇÕES: C/226 - aparelho



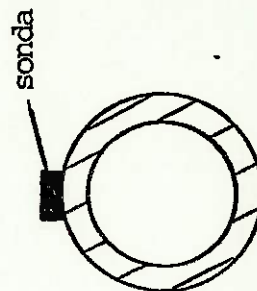
PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	159,5	4,0	70,5	2,81	2,82	0,4	5,0	5,0	24	50% a
2	2,2	163,5	4,0	30,0	2,75	1,20	-129	5,0	4,5	24	50% a
3	2,2	166,0	4,0	31,0	2,70	1,24	-118	5,0	4,0	24	50% a
4	2,2	167,0	4,0	33,5	2,69	1,34	-101	5,0	3,0	24	50% a
5	2,2	167,0	4,0	34,0	2,69	1,36	-98	5,0	2,0	24	50% a
6	2,2	168,5	4,0	34,0	2,66	1,36	-96	5,0	1,0	24	50% a

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 09/8/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior
- . OBSERVAÇÕES: B/241 - aparelho



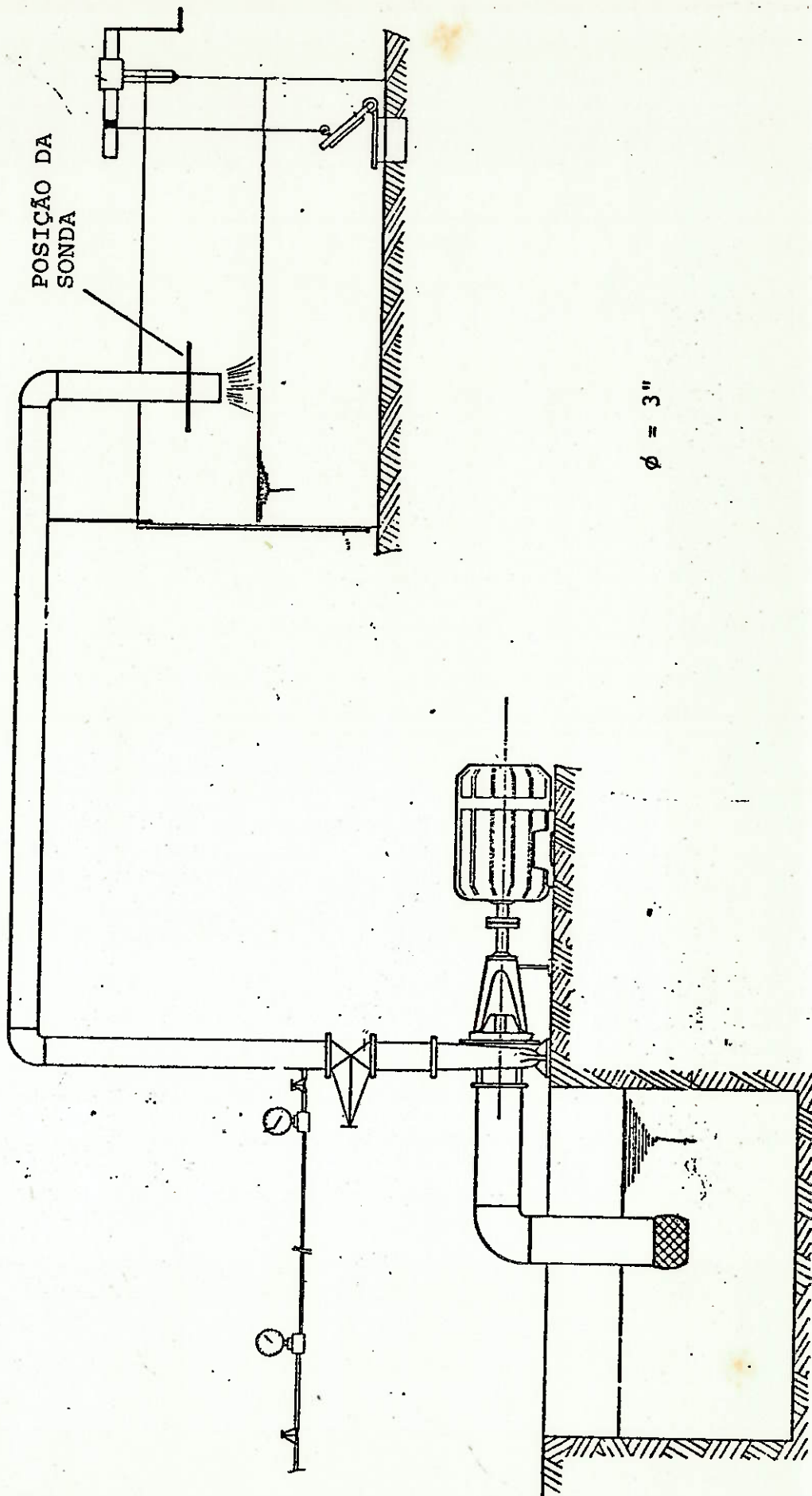
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,0	133,0	4,0	38,5	1,53	1,54	0,7	5,0	5,0	24	25% a
2	1,0	144,5	4,0	41,5	1,41	1,66	15,1	5,0	4,0	24	25% a
3	1,0	146,0	4,0	45,0	1,40	1,80	22,2	5,0	3,0	24	25% a
4	1,0	159,0	4,0	45,5	1,41	1,82	22,5	5,0	2,0	24	25% a
5	1,0	160	4,0	48,0	1,40	1,92	27,1	5,0	1,0	24	25% a
6											

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 09/8/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior
- . OBSERVAÇÕES: B/420 - aparelho



POSICÃO DA
SONDA

$\phi = 3''$



PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	91	8,0	61,5	4,93	4,92	-0,2	8,0	8,0	23	100% a
2	2,2	94	8,0	58,5	4,78	4,68	-2,1	7,8	7,0	23	100% a
3	2,2	96	8,0	58,5	4,68	4,68	0,0	7,6	6,0	23	100% a
4	2,2	97	8,0	60,0	4,63	4,80	3,5	7,6	3,5	23	100% a
5	2,2	97	8,0	63,0	4,63	5,04	8,1	7,6	1,5	23	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

. LOCAL DO ENSAIO: Poli

. DATA DO ENSAIO: 20/8/85

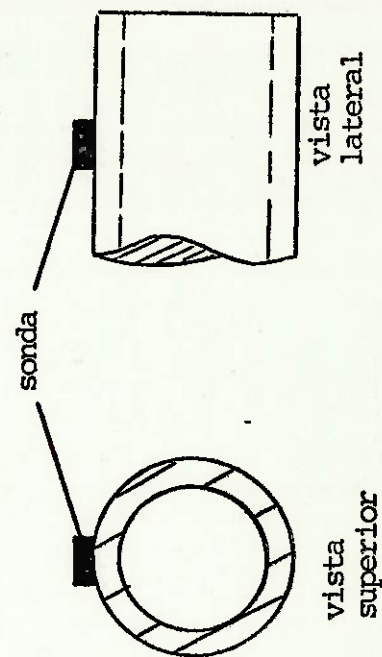
. DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"

. DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm

. ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²

. POSIÇÃO DA SONDA: Vertical

. OBSERVAÇÕES: C/227 - aparelho



PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt — (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	156	4,0	72,0	2,88	2,88	0,0	7,6	7,6	25	50% a
2	2,2	161,5	4,0	63,0	2,78	2,52	-10,3	7,4	7,4	23	50% a
3	2,2	163	4,0	76,0	2,75	3,04	9,5	7,4	6,0	23	50% a
4	2,2	164	4,0	82,5	2,74	3,30	16,9	7,2	4,0	23	50% a
5	2,2	164	4,0	86,0	2,74	3,44	20,3	7,2	1,5	23	50% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

. LOCAL DO ENSAIO: Poli

. DATA DO ENSAIO: 20/8/85

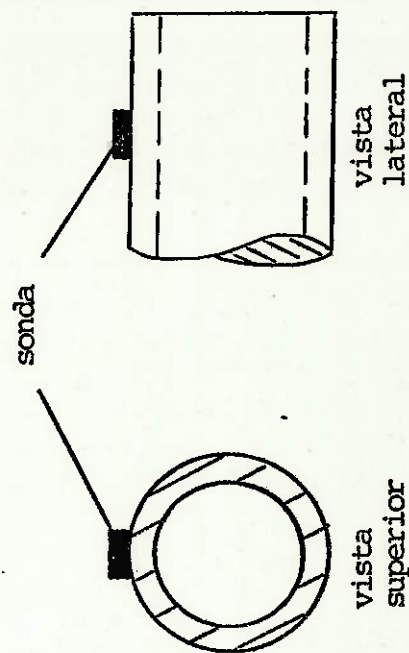
. DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"

. DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm

. ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²

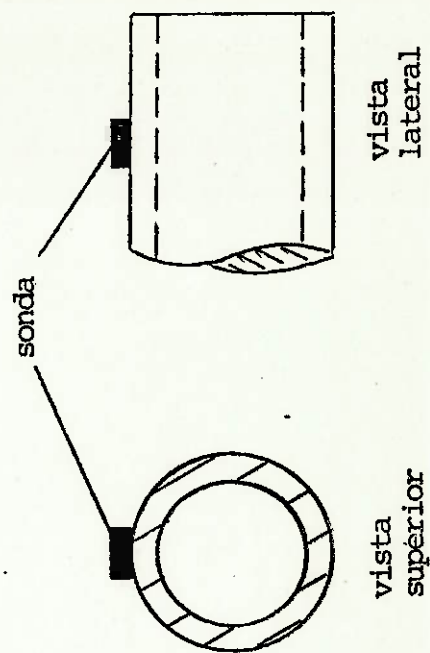
. POSIÇÃO DA SONDA: Vertical

. OBSERVAÇÕES: B/221 - aparelho



PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,0	203	4,0	25,0	1,01	1,00	1,0	7,6	7,6	24	25% a
2	1,0	217	4,0	49,5	0,94	1,98	52,5	7,4	7,0	24	25% a
3	1,0	221	4,0	51,0	0,92	2,04	54,9	7,2	5,0	24	25% a
4	1,0	217	4,0	51,5	0,94	2,06	54,4	7,2	3,5	24	25% a
5	1,0	216	4,0	51,5	0,94	2,06	54,4	7,2	1,5	24	25% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 20/8/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Vertical
- . OBSERVAÇÕES: B/171 - aparelho



PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	91,5	8,0	61,5	4,91	4,92	0,2	7,2	7,2	26	100% a
2	2,2	93,0	8,0	66,5	4,83	5,32	9,2	7,2	6,5	26	100% a
3	2,2	95,5	8,0	71,5	4,70	5,72	17,8	6,2	5,0	26	100% a
4	2,2	96,5	8,0	72,5	4,65	5,80	19,8	5,8	3,2	26	100% a
5	2,2	97,5	8,0	73,5	4,60	5,88	21,8	5,2	1,0	26	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

. LOCAL DO ENSAIO: Pol1

. DATA DO ENSAIO: 20/8/85

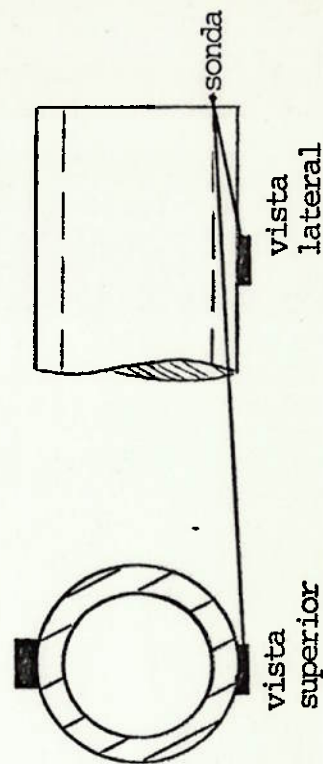
. DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"

. DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm

. ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²

. POSIÇÃO DA SONDA: Vertical

. OBSERVAÇÕES: C&173 - aparelho



PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	171,5	8,0	33,0	2,62	2,64	0,8	5,0	5,0	25	50% a
2	2,2	175	8,0	39,5	2,57	3,16	18,7	5,0	4,5	25	50% a
3	2,2	178	8,0	51,5	2,52	4,12	38,8	5,4	4,4	25	50% a
4	2,2	180	8,0	53,5	2,49	4,28	41,8	7,2	4,4	25	50% a
5	2,2	180	8,0	53,5	2,49	4,28	41,8	7,5	1,5	25	50% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

. LOCAL DO ENSAIO: POLI

. DATA DO ENSAIO: 20/8/85

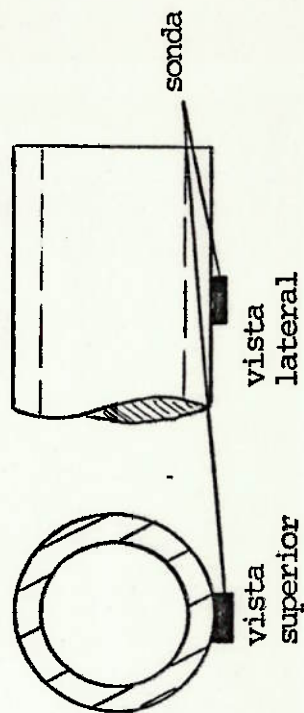
. DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"

. DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm

. ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²

. POSIÇÃO DA SONDA: Vertical

. OBSERVAÇÕES: C/173 - aparelho



PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	1,0	261	2,0	47,0	0,94	0,94	0,0	7,2	7,2	25	25%
2	1,0	219	2,0	49,5	0,93	0,99	6,1	7,2	6,5	25	25%
3	1,0	222	2,0	50,0	0,92	1,00	8,0	6,2	5,0	25	25%
4	1,0	223	2,0	50,0	0,92	1,00	8,0	5,8	3,2	25	25%
5	1,0	223	2,0	50,0	0,92	1,00	8,0	5,2	1,0	25	25%
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

. LOCAL DO ENSAIO: Polí

. DATA DO ENSAIO: 20/8/85

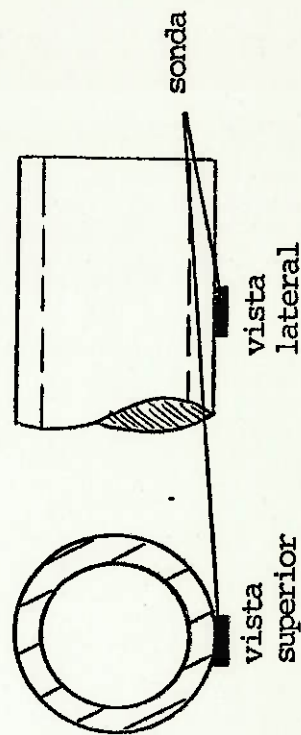
. DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 3"

. DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 79 mm

. ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,0049 m²

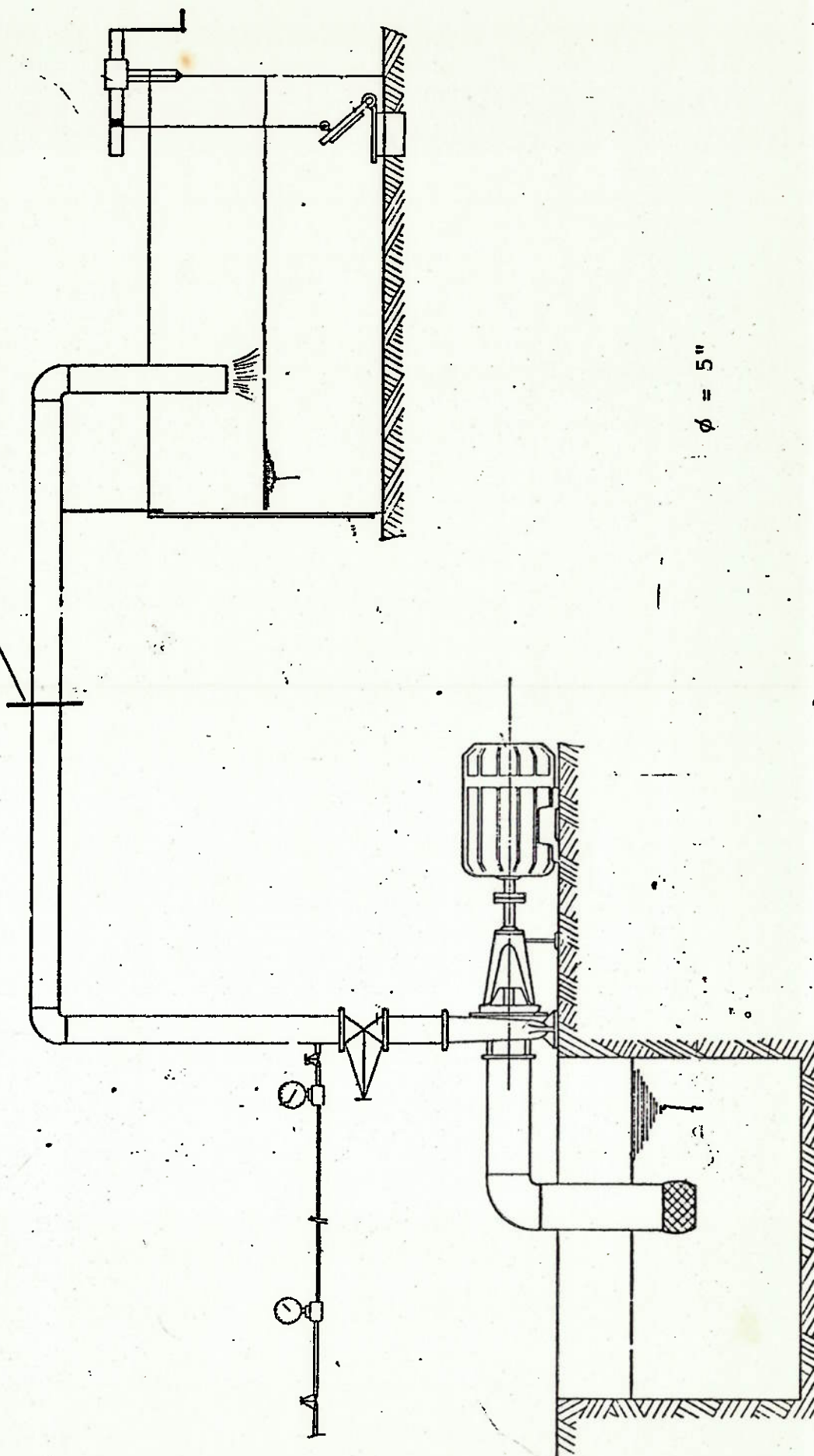
. POSIÇÃO DA SONDA: Vertical

. OBSERVAÇÕES: B/44 - aparelho



POSICÃO DA SONTA

$\phi = 5''$



PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	78,0	4,0	56,0	2,23	2,23	0,0	7,0	7,0	20	100% a
2	2,2	78,5	4,0	56,0	2,23	2,24	0,4	7,0	7,0	20	100% a
3	2,2	79,0	4,0	56,5	2,20	2,26	2,6	6,0	5,0	20	100% a
4	2,2	81,0	4,0	56,0	2,14	2,24	4,5	6,0	4,0	20	100% a
5	2,2	81,0	4,0	57,0	2,14	2,28	6,1	6,0	1,0	20	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

. LOCAL DO ENSAIO: Poli

. DATA DO ENSAIO: 30/8/85

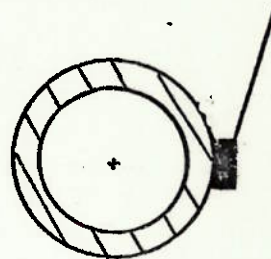
. DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"

. DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm

. ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²

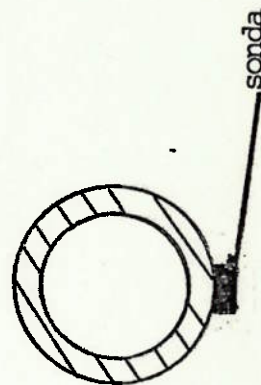
. POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal

. OBSERVAÇÕES: B/236 - aparelho



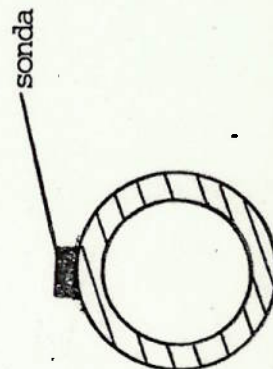
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	147	4,0	29,5	1,18	1,18	0,0	8,0	8,0	20	60% a
2	2,2	148,5	4,0	31,0	1,17	1,24	5,6	8,0	7,0	20	60% a
3	2,2	149	4,0	32,0	1,16	1,28	9,4	7,8	5,9	20	60% a
4	2,2	149	4,0	32,0	1,16	1,28	9,4	7,1	4,4	20	60% a
5	2,2	150	4,0	32,5	1,16	1,30	10,8	6,8	1,0	20	60% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Pol1
- . DATA DO ENSAIO: 30/8/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-meio
- . OBSERVAÇÕES: B/211 - aparelho



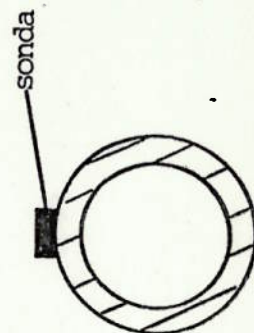
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	78	4,00	56,0	2,23	2,24	0,45	7,0	7,0	20	100% a
2	2,2	81	4,00	42,0	2,14	1,68	-27,3	7,8	6,5	20	100% a
3	2,2	81	4,00	39,5	2,14	1,58	-35,4	7,3	4,8	21	100% a
4	2,2	81	4,00	40,5	2,14	1,62	-48,2	6,3	2,3	21	100% a
5	2,2	81	4,00	40,5	2,14	1,62	-48,2	5,5	0,9	21	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- LOCAL DO ENSAIO: Pol1
- DATA DO ENSAIO: 05/9/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm
- ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²
- POSIÇÃO DA SONDA: Superior-horizontal
- OBSERVAÇÕES: B-248/aparelho



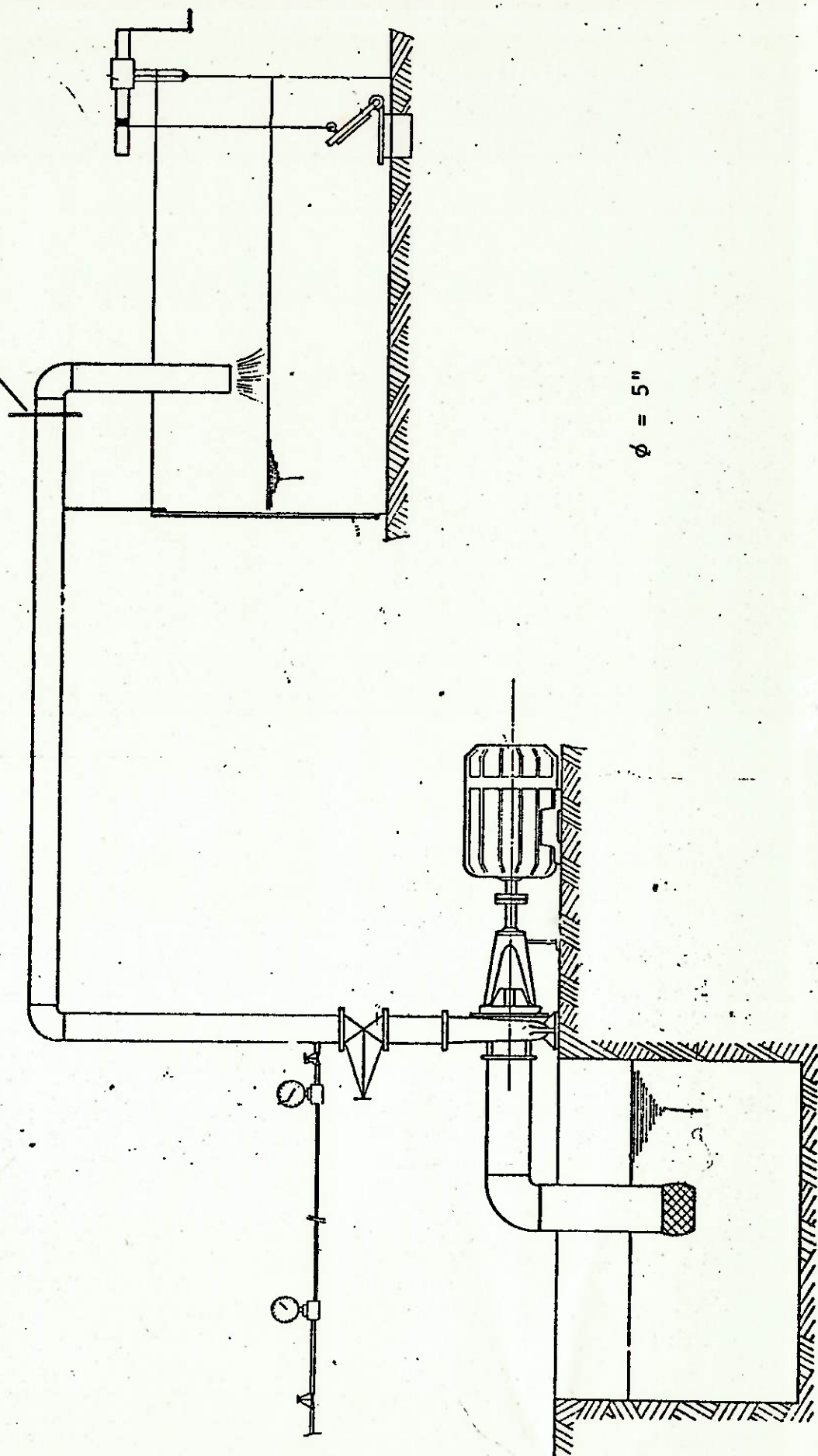
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	173	2,00	50,5	1,005	1,010	0,50	7,0	7,0	21	60% a
2	2,2	174	2,00	45,5	0,998	0,910	-9,67	7,5	6,5	21	60% a
3	2,2	174	2,00	47,0	0,998	0,940	-6,20	7,5	5,5	21,5	60% a
4	2,2	175	2,00	48,5	0,992	0,970	-2,30	7,8	3,5	21,5	60% a
5	2,2	175	2,00	49,0	0,992	0,980	-1,20	7,5	1,0	22	60% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- LOCAL DO ENSAIO: Pol1
- DATA DO ENSAIO: 05/9/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm
- ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²
- POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior
- OBSERVAÇÕES: B-293/aparelho



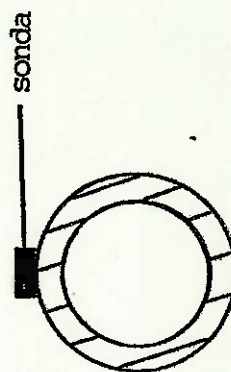
POSICÃO DA
SONDA

$\phi = 5''$



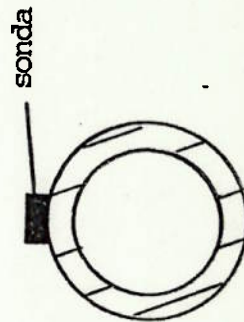
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	174	2,00	50,5	1,005	1,01	0,5	7,0	7,0	22	60% a
2	2,2	174	2,00	51,5	0,998	1,03	3,1	7,5	6,0	22	60% a
3	2,2	175	2,00	52,5	0,992	1,05	5,5	7,5	4,5	22	60% a
4	2,2	175	2,00	52,5	0,992	1,05	5,5	7,5	2,5	22	60% a
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- LOCAL DO ENSAIO: Polí
- DATA DO ENSAIO: 05/9/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm
- ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²
- POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior
- OBSERVAÇÕES: B-248/aparelho



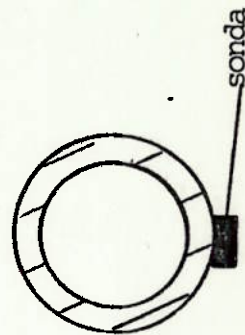
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	78	4,00	56	2,23	2,24	0,5	7,0	7,0	22	100% a
2	2,2	79	4,00	44,5	2,20	1,78	-23,6	7,0	6,0	22	100% a
3	2,2	81,5	4,00	42,5	2,13	1,70	-25,3	5,8	3,8	22,5	100% a
4	2,2	82	4,00	43,0	2,12	1,72	-23,3	4,8	2,3	22,5	100% a
5	2,2	81	4,00	41,0	2,14	1,64	-30,5	7,5	1,0	22,5	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- LOCAL DO ENSAIO: Poli
- DATA DO ENSAIO: 05/9/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm
- ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²
- POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-superior
- OBSERVAÇÕES: B-189/aparelho



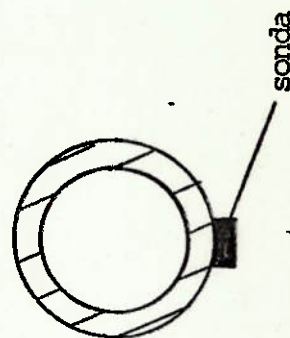
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	78	4,00	55,5	2,23	2,22	-0,45	6,0	6,0	25	100% a
2	2,2	78,5	4,00	56,0	2,21	2,24	1,30	7,5	6,5	25	100% a
3	2,2	81	4,00	55,5	2,14	2,22	3,60	7,5	5,5	26	100% a
4	2,2	81	4,00	55,5	2,14	2,22	3,60	7,5	4,5	26	100% a
5	2,2	82	4,00	55,5	2,12	2,22	4,50	7,5	0,9	26	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- LOCAL DO ENSAIO: Poli
- DATA DO ENSAIO: 11/9/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm
- ÁREA LA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²
- POSIÇÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- OBSERVAÇÕES: B-158/aparelho



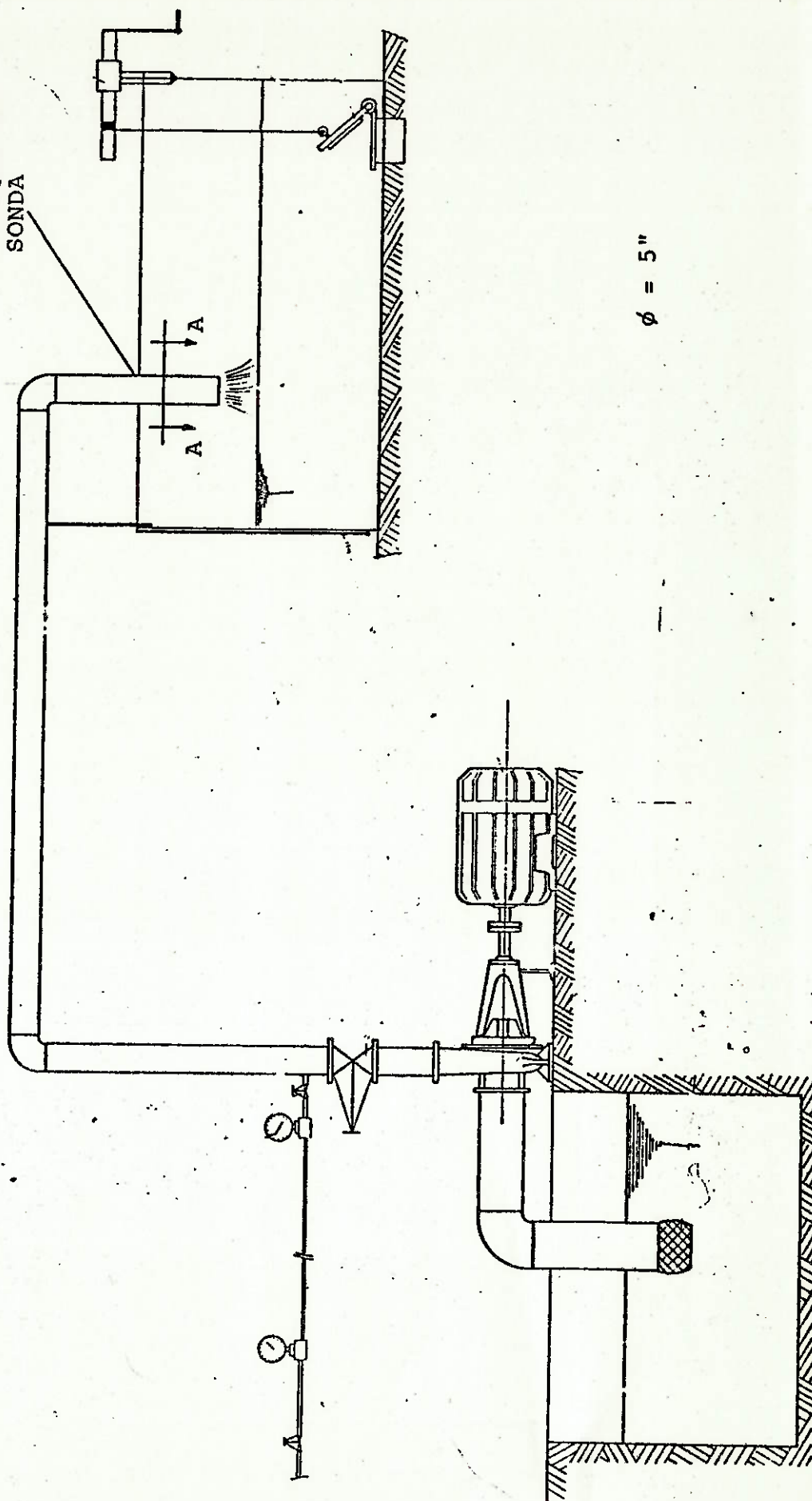
PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	184	2,00	47,5	0,942	0,950	0,84	7,5	7,5	26	60% a
2	2,2	186,5	2,00	54,5	0,931	1,090	14,6	7,5	6,5	26	60% a
3	2,2	186	2,00	58,0	0,933	1,160	19,6	7,5	5,5	26	60% a
4	2,2	186	2,00	59,5	0,933	1,190	21,6	7,2	4,0	27	60% a
5	2,2	187	2,00	59,5	0,928	1,190	22,0	7,3	1,0	27	60% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- LOCAL DO ENSAIO: Polí
- DATA DO ENSAIO: 11/9/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm
- ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²
- POSICÃO DA SONDA: Horizontal-inferior
- OBSERVAÇÕES: B-454/aparelho



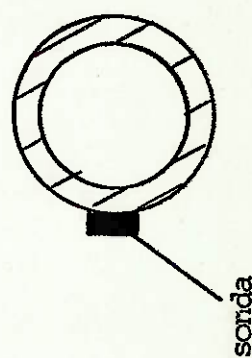
POSIÇÃO DA
SONDA

$\phi = 5''$



PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	77	4,00	56,5	2,26	2,26	0	7,5	7,5	27	100% a
2	2,2	78	4,00	55,5	2,23	2,22	-0,45	7,5	6,5	27	100% a
3	2,2	78	4,00	55,5	2,23	2,22	-0,45	7,5	5,5	27	100% a
4	2,2	82,5	4,00	55,5	2,10	2,22	5,40	7,5	4,0	27,5	100% a
5	2,2	83	4,00	55,5	2,09	2,22	5,80	7,5	1,0	27	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- LOCAL DO ENSAIO: Poli
- DATA DO ENSAIO: 19/9/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm
- ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²
- POSIÇÃO DA SONDA: Vertical
- OBSERVAÇÕES: B/258 - aparelho



corte A-A

PONTO	VOLUME (m ³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm ²)	P2 (kgf/cm ²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	168	2,00	51,5	1,033	1,030	-0,29	7,5	7,5	27,5	60% a
2	2,2	169	2,00	54,5	1,027	1,090	5,70	7,2	6,5	27	60% a
3	2,2	169,5	2,00	61,0	1,024	1,220	16,1	7,2	5,5	27	60% a
4	2,2	169,5	2,00	73,5	1,024	1,470	30,3	7,2	4,3	27,5	60% a
5	2,2	169,5	2,00	73,5	1,024	1,470	30,3	7,2	1,0	27	60% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

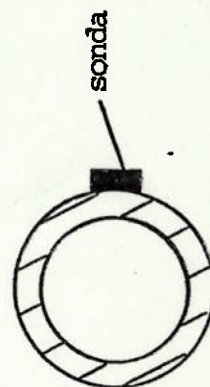
- . LOCAL DO ENSAIO: Pol1
- . DATA DO ENSAIO: 19/9/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Vertical
- . OBSERVAÇÕES: B-356/aparelho



corte A-A

PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(V_a - V_t)}{V_a}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	77	4,00	55,5	2,26	2,26	0	7,5	7,5	27	100% a
2	2,2	78	4,00	55,5	2,23	2,22	-0,45	7,5	6,5	27	100% a
3	2,2	79	4,00	55,5	2,20	2,22	0,90	7,5	5,5	27	100% a
4	2,2	82	4,00	55	2,10	2,20	4,55	7,5	4,0	26	100% a
5	2,2	83	4,00	54	2,09	2,16	3,20	7,5	1,0	26	100% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

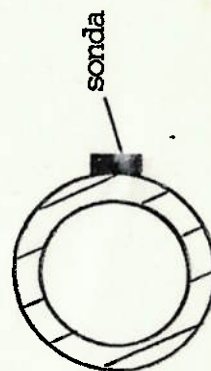
- LOCAL DO ENSAIO: Poli
- DATA DO ENSAIO: 19/9/85
- DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"
- DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm
- ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²
- POSICÃO DA SONDA: Vertical
- OBSERVAÇÕES: B-258/aparelho



Corte A-A

PONTO	VOLUME (m³)	TEMPO (s)	FUNDO DE ESCALA	%FE	Vt (m/s)	Va (m/s)	$\frac{(Va-Vt)}{Va}$ (%)	P1 (kgf/cm²)	P2 (kgf/cm²)	Tamb (°C)	OBS.
1	2,2	168	2,00	51,5	1,034	1,030	-0,40	7,5	7,5	26	60% a
2	2,2	169	2,00	54	1,027	1,080	4,91	7,5	6,5	26	60% a
3	2,2	169	2,00	61	1,027	1,220	15,8	7,5	5,5	26	60% a
4	2,2	169	2,00	73	1,027	1,460	29,7	7,5	4,3	25	60% a
5	2,2	169	2,00	73	1,027	1,460	29,7	7,5	1,0	25	60% a
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- . LOCAL DO ENSAIO: Poli
- . DATA DO ENSAIO: 19/9/85
- . DIÂMETRO NOMINAL DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 5"
- . DIÂMETRO INTERNO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE: 127 mm
- . ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,01267 m²
- . POSIÇÃO DA SONDA: Vertical
- . OBSERVAÇÕES: B-356/aparelho



Corte A-A