

INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS - UFMG/CNEN

DIVISÃO DE REATORES

LABORATÓRIO DE TÉCNICA

JULHO, 1972

DESEMPENHO DE UMA Sonda ELÉTRICA RESISTIVA NUM TERMOAMENTO
BIFÁSICO ÁGUA-AR EM DUTO CILÍNDRICO VERTICAL

Bruno Cordeiro Neiva

Tese submetida ao Curso de Ciências e Técnicas Nucleares da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências

A MEUS PAIS

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi elaborado no Laboratório de Térmica da Divisão de Reatores do Instituto de Pesquisas Radioativas (UFMG/CNEN) e faz parte de seu programa experimental.

Agradeço ao Prof. Milton Campos, Diretor do Instituto de Pesquisas Radioativas, por haver permitido a preparação desta tese dentro do programa de trabalho do I.P.R. Da mesma forma, agradeço ao Prof. Carlos Márcio Mascarenhas Dale, Chefe da Divisão de Reatores do I.P.R. pelo seu apoio na realização deste trabalho.

Meus reconhecimentos ao Dr. Paulo de Carvalho Tófani pela sugestão do assunto e valiosa orientação em todas as fases deste trabalho.

Agradeço igualmente a colaboração do matemático Alzamir Aires Feijó e dos engenheiros Fernando Lobo Vaz de Mello, Jairo Gontijo de Paula, João Luiz Campos e Olga Côrtes Rabelo Leão Simbalista.

Meus agradecimentos se estendem aos técnicos Hamilton Eutáquio de Mattos, Haydn Amaral Fernandes, José Rui Machado e Luiz Duarte Lage.

Igualmente agradeço a Srta. Neide Barra Reis pelos serviços de datilografia e ao Sr. Leonardo Machado Costa pelos serviços de impressão.

I N D I C E

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Introdução	2
2.2 Definições	2
2.3 Tipos de configuração de escoamento	4
2.4 Métodos experimentais de determinação de configuração de escoamento e/ou fração de vazio	5
2.4.1 Observação visual e registros fotográficos	6
2.4.2 Válvulas de ação rápida	6
2.4.3 Atenuação radiativa	6
2.4.4 Anemômetro de fio quente	7
2.4.5 Amostragem isocinética	7
2.4.6 Sondas elétricas	7
2.5 Correlações para determinação de configurações de escoamento e frações de vazio	8
2.5.1 Escoamento do tipo bolhas	8
2.5.2 Escoamento do tipo bolsões	8
2.5.3 Escoamento do tipo anular	9
2.5.4 Escoamento do tipo gotas	10
3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	11
3.1 Introdução	11
3.2 Circuito de ar e água	11
3.3 Misturador	12
3.4 Seções de testes	12
3.5 Separador ar-água	12
3.6 Instrumentos de medida do circuito	13

	Página	
3.6.1	Medidas de pressão estática	13
3.6.2	Medidas de temperatura	13
3.6.3	Medidas de vazões	13
3.7.	Sonda elétrica	13
4.	ESTUDO EXPERIMENTAL	16
4.1	Teste mecânico	16
4.2	Influência do sistema de mistura	16
4.3	Gama de variáveis utilizadas	16
4.4	Operação do circuito	17
4.5	Testes de determinação dos tipos de configurações de escoamento	18
4.5.1	Sinais padrões	18
4.5.2	Estrutura dos escoamentos	19
4.6	Teste para determinação de fração de vazio	20
4.6.1	Fração de vazio local	20
4.6.2	Distribuição da fração de vazio	22
5.	ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	23
5.1	Introdução	23
5.2	Configurações de escoamento	23
5.3	Fração de vazio média superficial	24
6.	CONCLUSÕES	27

NOMENCLATURA

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TABELAS DE 1 a 11

FIGURAS DE 1 a 23

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento dos fenômenos que ocorrem quando de um escoamento bifásico é de grande importância na engenharia química e térmica. Com o advento dos reatores nucleares, intensificou-se o estudo sobre escoamento bifásico devido a necessidade de se obterem melhores características de transferência de calor comparadas com escoamento a fase única.

O presente trabalho insere-se, como experiência de caráter fundamental, em programa de térmica de reatores. Trata-se de um estudo experimental de determinação de configurações de escoamento e de fração de vazio, com auxílio de uma sonda elétrica, de uma mistura de água e ar em escoamento vertical, ascendente, em duto cilíndrico em condições adiabáticas a baixa pressão.

O estudo engloba cinco partes:

- Revisão de trabalhos já realizados.
- Descrição do dispositivo experimental utilizado.
- Desenvolvimento das experiências.
- Análise dos resultados experimentais.
- Conclusões do estudo.

2. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Apresentam-se, neste capítulo, as definições de termos u suais, bem como resultados de estudos experimentais sobre escoamentos bifásicos.

2.2 Definições

Fase - É um dos estados da matéria e pode ser um gás, um líquido ou um sólido.

Escoamento bifásico - É o escoamento simultâneo de duas fases.

Escoamento a dois componentes - Escoamentos cujas fases são de natureza química diferentes.

Fração de vazio local - Em dado elemento de volume representa a concentração volumétrica de gás na mistura.

Fração de vazio média superficial - É, em qualquer instante, dada por

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{A} \iint \alpha(x, y) dA \quad (2.1)$$

Na seção normal do escoamento têm-se

$$\langle \alpha \rangle = \frac{A_g}{A} \quad (2.2)$$

Para um escoamento uniforme ao longo do canal têm-se:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{v_g}{v} \quad (2.3)$$

Título - E' a razão da vazão de massa de gás para a vazão de massa da mistura.

$$\langle X \rangle = \frac{W_g}{W} \quad (2.4)$$

Velocidade superficial ou fluxo volumétrico - E' a razão entre a vazão volumétrica do gás (do líquido) e a área total da seção reta do canal.

$$j_g = \frac{Q_g}{A} = \frac{W_g}{\rho_g A} \quad (2.5)$$

$$j_l = \frac{Q_l}{A} = \frac{W_l}{\rho_l A} \quad (2.6)$$

Velocidade real - E' a velocidade do gás e do líquido dadas, respectivamente, por:

$$\langle V_g \rangle = \frac{Q_g}{A_g} = \frac{j_g}{\langle \alpha \rangle} \quad (2.7)$$

$$\langle V_l \rangle = \frac{Q_l}{A_l} = \frac{j_l}{1 - \langle \alpha \rangle} \quad (2.8)$$

Velocidade relativa - E' a diferença entre a velocidade real do gás e a velocidade real do líquido.

$$V_{gl} = \langle V_g \rangle - \langle V_l \rangle \quad (2.9)$$

Coefficiente de escorregamento - E' a razão entre a velocidade real do gás e a velocidade real do líquido.

$$S = \frac{\langle V_g \rangle}{\langle V_l \rangle} \quad (2.10)$$

A relação entre a fração de vazio, o título e o coeficiente de escorregamento é dada por:

$$\frac{1 - \langle X \rangle}{\langle X \rangle} = \frac{1}{S} \frac{1 - \langle \alpha \rangle}{\langle \alpha \rangle} \frac{\rho_l}{\rho_g} \quad (2.11)$$

2.3 Tipos de configuração de escoamento

Trata-se de uma classificação baseada na observação visual da distribuição das fases no canal de escoamento. Os diversos tipos considerados são apresentados na figura 1.

Configuração do tipo bolhas - Neste caso a fase gasosa flui descontinuamente na forma de bolhas numa fase líquida contínua.

Configuração do tipo bolsões - Quando as bolhas se unem formam-se grandes bolhas de gás em forma de projétil. Estes bolsões de gás são separados uns dos outros por porções de líquido e da parede do tubo, por uma delgada película de líquido.

Configuração do tipo semi-anular - Trata-se da transição entre o regime de bolsões e anular. É uma estrutura relativamente instável.

Configuração do tipo anular - O gás percorre o núcleo do tubo e o líquido forma uma película anular junto à parede. Pode haver, neste caso, dispersão da fase líquida no núcleo gasoso e da gasosa na película de líquido.

Configuração do tipo gotas - O líquido é levado como pequenas gotas pela fase gasosa que constitui a fase contínua.

Encontram-se, na literatura, cartas de configurações como a apresentada na figura 2. Nas coordenadas representam-se as velocidades superficiais de cada fase.

Se num longo tubo tem lugar mudança de fase a estrutura do escoamento pode evoluir de líquido à entrada a vapor à saída. A figura 3 apresenta a evolução dos vários regimes num escoamento vertical a um componente.

2.4 Métodos experimentais de determinação de configurações de escoamento e/ou frações de vazio

Inúmeras técnicas experimentais vêm sendo desenvolvidas com auxílio da observação visual ou fotográfica, das válvulas de ação rápida, da atenuação radiativa, da anemometria de fio quente, de amostragem isocinética e de sondas elétricas.

2.4.1 Observação visual e registros fotográficos

Foram os primeiros métodos utilizados para a obtenção de configurações de escoamento e são ainda utilizados em conjunção com outros métodos. A formação de uma película de água sobre as superfícies das seções de teste dificulta a análise do tipo de configuração de escoamento.

2.4.2 Válvulas de ação rápida

Trata-se de um dispositivo mecânico que consiste no fechamento simultâneo de duas válvulas situadas ao longo da seção de teste. Após decantação da mistura determina-se a fração de vazio média no volume compreendido entre as duas válvulas.

2.4.3 Atenuação radiativa

É baseado no princípio que a atenuação sofrida por um feixe de radiação passando através de um meio é função da densidade do meio.

Este método pode ser empregado na determinação da configuração, na medida direta da fração de vazio local e da fração de vazio média superficial. Este método, quando utilizado para medidas de fração de vazio média superficial, possui a vantagem de que as medidas não perturbam a estrutura do escoamento dentro do canal.

2.4.4 Anemômetro de fio quente

Este está baseado no fato de que o coeficiente de transferência de calor de um cilindro aquecido para um fluido refrigerante varia diretamente com a raiz quadrada da velocidade e com as propriedades físicas do fluido.

Este método possibilita a identificação de regimes de escoamento, bem como da fração de vazio local.

2.4.5 Amostragem isocinética

Neste método uma sonda retira uma amostra do escoamento de tal modo que as fases não separem e que não exista variação das velocidades relativas. O escoamento é, em seguida, dividido em duas partes por meio de separadores determinando-se o tipo de configuração, as velocidades reais de cada fase e a fração de vazio local.

2.4.6 Sondas elétricas

As sondas elétricas baseiam-se na diferença de resistividade elétrica entre as fases líquida e gasosa. São utilizadas para a determinação de configurações de escoamento e para a medida de fração de vazio local.

Neste trabalho, interessa-se particularmente por esta técnica experimental.

O comportamento de sondas elétricas foi estudado em ti-

pos determinados de configurações água-ar: por Neal [1], Nassos [2], Griffith [3], Haberstroh e Griffith [4], Bencze e Orbeck [5], C. Lakmé [6], J.M. Delhaye e C. Chevrier [7], Lafferty e Hammitt [8] e Schraub, Simpson e Janssen [9]. Alguns destes experimentadores determinaram, também, distribuições da fração de vazio local nos escoamentos bifásicos estudados.

2.5 Correlações para determinação de configurações de escoamento e frações de vazio

2.5.1 Escoamento do tipo bolhas

A existência deste escoamento é função da geometria da seção de teste utilizada, da pureza do líquido e da distância entre a injeção da mistura e ponto de observação.

Experimentalmente, verificou-se que o intervalo da fração de vazio está, geralmente, compreendida entre 0 e 0,3.

A correlação usual para o cálculo da fração de vazio para este regime em dutos cilíndricos é a correlação de Bankoff [10]:

$$\langle \alpha \rangle = 0,83 \frac{j_g}{j_g + j_l} \quad (2.12)$$

2.5.2 Escoamento do tipo bolsões

Está situado numa faixa mais ampla de vazões de gás e líquido como se pode observar na figura 2.

O intervalo de frações de vazio está compreendido, geralmente, entre 0,3 e 0,8.

Adota-se, neste caso a correlação de Nicklin e Davidson [11] para a fração de vazio no escoamento tipo bolsões vertical ascendente em dutos cilíndricos:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{j_g}{1,2 (j_g + j_l) + 0,35 \sqrt{g D}} \quad (2.13)$$

Consideram-se dois critérios para definir a transição de escoamento em bolsões ao escoamento anular:

- Estudando as condições sob as quais pontes de líquido através do gás desaparecem.
- Determinando-se a intersecção de valores da fração de vazio nos regimes de tipos bolsões e anular.

2.5.3 Escoamento do tipo Anular

O escoamento anular ideal é, relativamente, instável em virtude de variações na forma da interface gás líquido, principalmente, devidas ao fenômeno de arrastamento em altas vazões de gás. Este fato dificulta a correlação dos resultados experimentais para este tipo de escoamento.

O intervalo de frações de vazio está compreendido entre 0,8 e 0,95.

A correlação utilizada para o cálculo da fração de vazio é dada pela equação [12]:

$$\frac{j_g^*}{1 - 2,85 (1 - \langle \alpha \rangle)} - \frac{j_g^*}{2,85 (1 - \langle \alpha \rangle)} = 0,775 \quad (2.14)$$

onde

$$j_g^* = j_g \rho_g^{1/2} \left[g D (f_i - f_g) \right]^{-1/2} \quad (2.15)$$

$$j_i^* = j_i / f_i^{1/2} \left[g D (f_i - f_g) \right]^{-1/2} \quad (2.16)$$

2.5.4 Escoamento do tipo gotas

A forma ideal deste escoamento quase nunca é obtida, uma vez que as gotas ao chocarem na parede do tubo tendem a se aglomerar e formar uma película anular de líquido, tornando-se um escoamento anular com gotas em dispersão na fase gasosa.

Este tipo de escoamento tem lugar até valores unitários da fração de vazio.

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Apresenta-se, neste capítulo, a descrição do dispositivo experimental que consiste num circuito de água e ar, um misturador, uma seção de testes e um separador de mistura, bem como instrumentos para as medidas de vazões, temperaturas e pressões. Descreve-se ainda a sonda elétrica utilizada na determinação das configurações de escoamento e das distribuições de frações de vazio.

3.2 Circuito de ar e água

O fluxograma do circuito ar-água utilizado é mostrado na figura 4 e uma fotografia é apresentada na figura 5.

O ar provém de um compressor Wayne de 25 c.v., com descarga livre efetiva de $153 \text{ m}^3/\text{h}$, equipado com filtros, manômetros e válvulas de segurança. Na linha de suprimento de ar medem-se temperaturas, vazões e pressões.

A alimentação em água é assegurada por uma bomba centrífuga de 3 c.v., Albrizzi Petry, com altura manométrica de 30 m à vazão nominal de 3 l/s. Um desvio de bomba permite o funcionamento nas condições nominais para qualquer vazão na seção de testes. No circuito de água medem-se temperaturas e vazões.

3.3 Misturador

Está localizado na extremidade inferior da seção de testes. Consiste numa câmara anular de altura 100 mm. As paredes dos tubos concêntricos estão distantes 17 mm. A água é introduzida axialmente no misturador, em direção ascendente. A injeção de ar na água é realizada perpendicularmente ao eixo através da parede interna do misturador de diâmetro igual ao da seção de testes. Este tubo possui 432 orifícios de 1 mm de diâmetro. Na figura 6, apresenta-se uma fotografia do misturador.

3.4 Seção de testes

A mistura ar-água do misturador escoava verticalmente em direção ascendente na seção de testes que é constituída por um tubo de PVC de 2230 mm de comprimento e 21,3 mm de diâmetro interno.

Nas extremidades da seção de testes foram instalados dois manômetros do tipo Bourdon, e na saída um termômetro bimetalico.

3.5 Separador ar-água

Da seção de testes, a mistura vai ao separador onde a água retorna à bomba e o ar é lançado a atmosfera. Na entrada do separador instalou-se uma válvula cuja operação permite fixar a pressão de operação.

3.6 Instrumentos de medida do circuito

3.6.1 Medidas de pressão estática

Estas foram realizadas com manômetros tipo Bourdon até 5 kgf/cm^2 , com graduação de 0,1 kgf/cm^2 .

3.6.2 Medidas de temperatura

Utilizaram-se termômetros metálicos com precisão de 1°C .

3.6.3 Medidas de Vazões

Foram realizadas com auxílio de 4 rotâmetros LANDA, com flutuadores de aço inoxidável, guarnições de neoprene e visor de Pirex, nas seguintes faixas:

Vazões de ar: 0 a 5 m^3/h com graduação em 0,1 m^3/h
4 a 40 m^3/h com graduação em 0,5 m^3/h

Vazões de água: 0,04 a 0,3 l/s com graduação em 0,005 l/s
0,3 a 3 l/s com graduação em 0,05 l/s

3.7 Sonda elétrica

O elemento sensível da sonda elétrica é constituído por dois polos em circuito aberto. Se o ar banha a extremidade sensível o circuito permanece aberto. Se a água está em contato com a sonda o circuito se fecha.

A sonda consiste num mini-tubo de aço inoxidável cobreado de comprimento 100 mm e de diâmetro externo 1,5 mm, que constitui um dos polos. O outro polo é um fio de cobre de diâmetro 0,6 mm, inserido no mini-tubo. O espaço entre o fio e mini-tubo é preenchido com araldite e cera para melhor vedação e isolamento elétrico. Na extremidade sensível a distância entre os dois polos é de 0,5 mm.

Para se deslocar a sonda diametralmente na seção transversal de saída, 1740 mm à jusante do misturador, utilizou-se um sistema porta sondas que permite o posicionamento da extremidade sensível com precisão da ordem de poucos décimos de milímetro.

Na figura 7 apresenta-se uma fotografia da sonda.

O esquema do circuito elétrico utilizado é apresentado na figura 8.

O circuito de detecção da sonda é constituído pela sonda elétrica (R_s), uma fonte de tensão (V) em c.c. modelo HP 723 A, de impedância interna da ordem de deciohms e um resistor (R_T) de 10 M Ω , em série com a sonda para determinação da variação de tensão.

Ao sistema de detecção são acoplados um osciloscópio de armazenamento (Storage) tipo 549 da Tektronix com uma impedância de 10 M Ω , com base de tempo de 5 msec/cm e escala vertical 1 volt/cm, um relé de tempo modelo Ti dual da Nuclear Chicago, um integrador de pulsos consistindo de um amplificador operacional tipo modular (O Plug-In Unit) com um elo de realimentação RC, onde a resistência R é igual a 10 M Ω e a capacitância é de $1/\mu\text{F}$ e um voltímetro digital modelo 3440 A da HP.

Para a determinação das configurações de escoamento utilizou-se o osciloscópio enquanto que para a medida de fração de vazão local o circuito completo foi utilizado.

Na figura 9 apresenta-se uma fotografia da instrumentação eletrônica.

4. ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1 Teste Mecânico

Os circuitos foram testados até a pressão de 6 kgf/cm^2 e, nesta condição, apresentou perfeita resistência mecânica e estanqueidade absoluta.

4.2 Influência do sistema de mistura

Quando utilizados no misturador três tubos de mesmas dimensões, sendo um com 432 orifícios de 1 mm de diâmetro e os outros dois com 130 orifícios de 1 mm e 2 mm, respectivamente, constatou-se que no primeiro caso obtém-se uma evolução uniforme de pressão ao longo da seção de testes, indicando melhor estabelecimento do regime de escoamento [13].

Utilizou-se em toda a experiência, o misturador com tubo de 432 orifícios de 1 mm de diâmetro.

4.3 Gama de variáveis utilizadas

As faixas de vazões utilizadas foram escolhidas de modo a abranger resultados experimentais disponíveis na literatura. Variou-se a vazão de líquido de 0,05 l/s a 2,0 l/s e a de gás de 0,1 l/s a 11,4 l/s.

O intervalo de pressões à saída da seção de testes foi de 2,0 a 4,0 ata.

Durante a operação do circuito a temperatura da água variou de 25 a 32 °C e a do ar de 22 a 26 °C.

4.4 Operação do circuito

Com todas as válvulas fechadas, abre-se V_1 para encher o circuito d'água. Com as válvulas V_3 , V_2 , V_4 e V_5 abertas, e o nível d'água abaixo de V_3 , é feita a circulação d'água para a limpeza do circuito. Repete-se a operação com o circuito limpo.

Após limpo, o circuito é novamente posto em condições de operação.

Com a água em circulação, a vazão de ar é aumentada gradativamente. Primeiramente, abre-se a válvula V_7 , até que o manômetro instalado junto ao rotâmetro de ar acuse uma pressão próxima a 3 atmosferas. Em seguida, abre-se a válvula V_9 juntamente com V_7 , de modo a não permitir recuo da água na tubulação de ar. Com o circuito em funcionamento, fixa-se a pressão de operação à saída da seção. Ajusta-se a vazão de líquido em valor escolhido e varia-se a vazão de gás, conservando-se a pressão de operação constante. Isto é feito, ajustando conjuntamente as válvulas V_3 , V_4 , V_5 , V_6 , V_7 e V_2 .

As vazões são corrigidas para as condições de pressão e temperatura na seção de testes.

4.5 Testes de determinação dos tipos de configurações de escoamento

4.5.1 Sinais padrões

O sinal fornecido pela sonda é observado no osciloscópio e tomado como o indicador do regime de escoamento.

Inicialmente, determinam-se os sinais padrões fixando-se a extremidade sensível da sonda no eixo da seção de testes. No caso do escoamento de uma única fase líquida, o sinal no osciloscópio apresenta-se como indicado na figura 10.

Fixando-se uma vazão de líquido e com uma vazão de gás reduzida, o sinal obtido consiste de um traço representando a forma de onda característica de uma única fase líquida com superposição de picos isolados de pequena amplitude, que indicam a passagem de bolhas independentes. Neste caso, têm-se o padrão da configuração tipo bolhas independentes cujo registro é mostrado na figura 11.

Aumentando-se gradativamente a vazão de gás em registros como o apresentado na figura 12, observa-se que a população de bolhas aumenta. Este padrão caracteriza o tipo de configuração de bolhas aglomeradas.

Com o aumento da vazão de gás o quadro observado, como na figura 13, é típico da configuração de bolsões, caracterizado por grande bolha de ar antecipada por um sinal característico da presença de líquido e seguida de flutuações que acusam a presença de um rastro de escoamento de bolhas.

Aumentando, ainda mais, a vazão de gás observa-se o registro da figura 14 acusando presença de gotas de líquido correspondente ao escoamento de gotas. Este registro é o oposto do apresentado na figura 12.

Em vazões de gás a sonda fornece uma indicação de circuito aberto no osciloscópio, representado na figura 15, de maneira análoga ao da figura 10.

4.5.2 Estrutura dos escoamentos

Com estes padrões em vista, foram realizados testes, nas gamas de vazões utilizadas, deslocando-se a sonda diametralmente de milímetro em milímetro à saída da seção de testes, com a finalidade de se pesquisar a distribuição espacial das fases presentes.

Quando deslocada, deste modo, a sonda, verificam-se cinco tipos de configurações de escoamento: de bolhas independentes, de bolhas aglomeradas, de bolsões, semi-anular e anular com dispersão da fase líquida.

No escoamento de bolhas independentes ou aglomeradas observa-se uma tendência de escoamento da fase gasosa no centro do canal.

Na configuração do tipo bolsões nota-se que os bolsões de gás e o canal cilíndrico não são totalmente concêntricos.

O escoamento semi-anular é caracterizado por fortes ondulações da interface líquido-gás.

Finalmente, a configuração do tipo anular se apresenta com dispersão da fase líquida no núcleo de gás.

Nas tabelas de 1 a 5, organizadas segundo os registros observados na tela do osciloscópio, apresentam-se as condições experimentais adotadas: vazões de cada fase e pressão de operação.

4.6 Teste para determinação de fração de vazio

4.6.1 Fração de vazio local

A fração de vazio local de uma mistura bifásica é definida como a fração do tempo que a fase gasosa existe num ponto do escoamento. Tem-se que na fórmula 2.1

$$\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T [1 - f(t)] dt \quad (4.1)$$

onde $f(t)$ é uma função do tempo igual a um quando a fase líquida existe no ponto em questão e zero quando a fase gasosa existe no mesmo ponto, e T é o tempo de integração.

O sinal fornecido pela sonda é eletronicamente integrado e, no caso do esquema utilizado na figura 8, é dado por:

$$e_o = -\frac{1}{RC} \int_0^T e_i(t) dt \quad (4.2)$$

Multiplicando-se a equação 4.2 pela constante $\frac{RC}{e_{i0} T}$, sendo e_{i0} a queda de tensão no resistor R_T quando somente água está em contato com a sonda dada, aplicando-se o teorema de Thévenin, por:

$$e_{i0} = \frac{E R_F}{R_{s0} + R_F} \quad (4.3)$$

Desta maneira, tem-se que:

$$-e_o \frac{RC}{e_{i0} T} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{e_i(t)}{e_{i0}} dt \quad (4.4)$$

Comparando-se a equação 4.3 com 4.1 e admitindo-se que $\frac{e_i(t)}{e_{i0}}$ é idêntica a $f(t)$, tem-se:

$$1 - \alpha = -e_o \frac{RC}{e_{i0} T} \quad (4.5)$$

Como E é negativo, e_{i0} também o será, donde:

$$1 - \alpha = \frac{e_o}{\frac{e_{i0} T}{RC}} \quad (4.6)$$

Verifica-se, experimentalmente, que quando somente líquido escoar na seção de testes, com um potencial da fonte de 5 volts a queda de tensão máxima e_{i0} não varia apreciavelmente no entorno de 2,5 volts durante a operação. A tensão da fonte é ajustada de modo que e_{i0} seja constante e igual ao valor acima.

O tempo de integração adotado foi de 60 segundos que permite considerável reprodutibilidade dos resultados.

Deste modo, o valor da constante $e_{i0} T/RC$ foi fixado em 12,1 V.

Finalmente, mede-se a tensão e_0 e calcula-se o valor de α pela equação 4.6.

4.6.2 Distribuição da fração de vazio

Os valores da fração de vazio local foram determinados ao longo do diâmetro do canal em posições distanciadas da parede de referência do tubo de 0; 4,3; 8,5; 10,6; 12,8; 17,0 e 21,2 mm. Assim sendo, as medidas foram realizadas em posições simétricas em relação ao eixo do tubo.

Nas tabelas de 6 a 8 apresentam-se os valores das vazões de cada fase, da pressão de operação e das medidas das tensões e_0 e dos resultados dos cálculos da fração de vazio local.

5. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Introdução

Os resultados obtidos são apresentados em forma de gráficos e comparados com experiências análogas existentes na literatura.

5.2 Configurações de escoamento

Representando-se os dados fornecidos nas tabelas 1 a 5 num gráfico tendo como coordenadas as velocidades superficiais de cada fase, tem-se uma carta onde se distinguem contornos dos vários tipos de configurações de escoamento. Os resultados obtidos são apresentados na figura 16 para pressões de operação de 2 a 4 ata e na figura 17 na pressão de 2 ata.

Na figura 18 as fronteiras determinadas são comparadas aos resultados de Roumy [14], Griffith [15] e Haberstroh [4]. Observa-se que estes experimentadores exploraram gamas de valores de vazão de cada fase mais estreitas do que as apresentadas neste trabalho e, em consequência, um número mais reduzido de tipos de configuração de escoamento.

De uma maneira geral, a delimitação das regiões é extremamente delicada. Nota-se na figura 18 a variação das linhas de transição com os diâmetros das seções utilizadas.

A falta de informações sobre a influência de fatores, tais como o processo de mistura das duas fases, a constituição das sondas utilizadas e método de análise dos sinais elétricos, torna difícil a concordância dos resultados obtidos pelos vários experimentadores. Apresentam-se na figura 19 os resultados obtidos por um único experimentador [16] com dois tipos de sondas elétricas, no caso particular da transição bolsão e anular, comparados aos resultados obtidos neste estudo.

Calculando-se, com auxílio das equações 2.12, 2.13 e 2.14, os valores das frações de vazio médias superficiais correspondentes às condições de escoamento dos pontos contidos nas regiões de bolhas, bolsões e anular da carta de configuração obtida, obtêm-se os seguintes intervalos explorados experimentalmente:

Configuração do tipo bolhas : 0 a 0,48

Configuração do tipo bolsões: 0,43 a 0,81

Configuração do tipo anular : 0,73 a 0,96

5.3 Fração de vazio média superficial

Os valores medidos das frações de vazio locais, apresentadas nas tabelas de 6 a 8, foram utilizadas no traçado das curvas mostradas nas figuras de 20 a 22 correspondentes aos tipos de configuração bolhas, bolsões e anular, respectivamente. Nestas curvas apresentam-se os valores da fração de vazio em função de uma distância adimensional $(r/R)^2$ onde $r = 0$ no eixo do tubo. Consideram-se os dois perfis teoricamente simétricos em relação ao eixo.

A partir das distribuições das frações de vazio locais, foram determinadas os seus valores médios superficiais com auxílio da equação:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{2}{R^2} \int_0^T \alpha(r) r dr \quad (5.1)$$

que se deduz da equação 2.1 no caso de simetria cilíndrica. Os valores assim obtidos figuram nas tabelas de 9 a 11, nas quais se apresentam, igualmente, os valores das frações de vazio calculadas, para cada tipo de configuração, com auxílio das equações 2.12, 2.13 e 2.14.

Finalmente, na figura 23 comparam-se os valores obtidos a partir das experiências realizadas com os valores calculados com as correlações supra citadas.

Na comparação dos resultados obtidos com os resultados de Lafferty e Hammit [8] e Bencze e Orbeck [5], observa-se a mesma dissimetria da distribuição da fração de vazio em relação ao eixo da tubulação. Este fato está ligado, principalmente, à dificuldade de se obterem experimentalmente tipos perfeitos de configurações. Estes experimentadores não fazem alusão ao tipo de configuração em que processam as medidas das distribuições da fração de vazio. Entretanto, do que se pode inferir destes documentos, nota-se que no escoamento a bolhas o primeiro encontra o máximo da distribuição próximo ao centro do canal (como na figura 20), enquanto o segundo encontra um máximo de população de bolhas junto às paredes. Os perfis obtidos por Schraub, Simpson e Janssen [9], no caso do escoamento do tipo anular são de mesma forma que os apresentados na figura 22.

Na figura 23 observa-se que os valores das frações de vazio que provêm das experiências, são quase sempre inferiores aos

valores fornecidos pelas correlações 2.12, 2.13 e 2.14. Este fato foi verificado experimentalmente nas experiências de Schraub, Simpson e Janssen [9], Nassos [2] quando do confronto dos resultados obtidos com técnicas de sonda elétrica e técnicas de sonda isocinética e radiação, respectivamente. Este erro está ligado ao problema extremamente complexo de detecção e tratamento dos sinais elétricos quando da deformação da interface água-ar no encontro com o elemento sensível da sonda [2] [5] [6] [7].

6. CONCLUSÕES

No tocante ao aspecto implantação do Laboratório de Térmica do Instituto de Pesquisas Radioativas, esta experiência constituiu um primeiro passo no sentido de se desenvolver instrumentação para estudos sobre a estrutura dos escoamentos a dois componentes.

Foi desenvolvido um primeiro protótipo de sonda elétrica testado, em seguida, em condições relativamente cômodas de um escoamento água-ar a baixa pressão, adiabático sem evolução de fases.

A sonda desenvolvida foi utilizada na determinação de cartas de configurações em gamas de valores de vazão de cada componente mais abrangentes do que as utilizadas, normalmente, por outros experimentadores. Os resultados obtidos, no contexto das experiências realizadas alhures, são satisfatórios.

Uma primeira tentativa de se medir a fração de vazio local foi feita e os resultados são comparáveis a de outros autores. Deve-se, no entanto, prosseguir no desenvolvimento do sistema de detecção e análise do sinal com objetivo de se alcançarem melhores valores da fração de vazio.

De uma maneira geral o número dos resultados disponíveis, susceptíveis de serem comparados aos resultados obtidos, é reduzido. Nos trabalhos examinados, a falta de detalhes sobre as experiências realizadas torna impossível melhores comparações.

NOMENCLATURA

1. LETRAS LATINAS

- A - Área da seção transversal
- C - Capacitância elétrica
- D - Diâmetro da seção de teste
- E - Tensão elétrica da fonte
- e_{i0} - Queda de tensão em R_F
- e_o - Sinal de tensão integrado
- $e_i(t)$ - Sinal de tensão da sonda
- $f(t)$ - Função do tempo
- g - Aceleração da gravidade
- j - Fluxo volumétrico, velocidade superficial
- L - Distância a partir da parede
- p - Pressão de operação
- Q - Vazão volumétrica
- R - Resistência, raio da seção de teste
- r - Coordenada cilíndrica
- s - Coeficiente de escorregamento
- T - Tempo de integração

t	-	Tempo
V	-	Velocidade
\dot{V}	-	Volume
V_{gl}	-	Velocidade relativa
W	-	Vazão em massa
X	-	Título da mistura
x,y	-	Coordenadas retangulares
y	-	Distância adimensional

2. LETRAS GREGAS

α	-	Fração de vazão local
ρ	-	Densidade

3. INDICES

F	-	Referência
g	-	Gás
l	-	Líquido
io	-	Sinal de entrada relativo ao líquido
o	-	Sinal integrado
s	-	Sonda
i	-	Sinal de entrada

4. SÍMBOLOS

$\langle \quad \rangle$ - Valor médio superficial

* - Parâmetro adimensional

REFERÊNCIAS

- (1) NEAL, L.G., "Local parameters in cocurrent mercury-nitrogen flow", ANL - 6625, 1963.
- (2) NASSOS, G.P., "Development of an electrical resistivity probe for void-fraction measurements in air-water flow", ANL-6739, 1963.
- (3) GRIFFITH, P., "The slug-annular flow regime transition at elevated pressure", ANL-6796, 1963.
- (4) HABERSTROH, R.D., and GRIFFITH, P., "Transition between annular and semi annular regimes in two-phase flow", Tese Doutoramento, 1964.
- (5) BENCZE, I. and ORBECK, I., "Development and application of an instrument for digital measurement and analysis of void digital measurement and analysis of void using an AC impedance probe", KR-73, 1964.
- (6) LACKME, C., "Structure et Cinématique des écoulements diphasiques a bulles", Rapport CEA-R 3203, 1967.
- (7) DELHAYE, J.M. et CHEVRIER, C., "Emploi des sondes resistives pour la mesure du taux de vide local dans les écoulements diphasiques", CEA-1966.
- (8) LAFFERTY, J.F. and HAMMITT, F.G., "A conductivity probe for measuring local void fractions in two-phase flow", Nuclear Applications, vol.3, nº 5, 1967.

- (9) SCHRAUB, F.A., SIMPSON, R.L., and JANSSEN E., "Two-phase flow and heat transfer in multirod geometries air water flow structure data for a round tube, concentric and eccentric annular, and nine-rod bundle", GEAP-5739, 1969.
- (10) BANKOFF, S.G., "A variable density single fluid model for two phase flow with particular reference to steam water flow", Journal of heat transfer 82, 265-272 (1960).
- (11) NICKLIN, D.J. and DAVIDSON, J.F., "The onset of instability in two-phase slug flow, Proc. Symposium on two-phase fluid flow, paper 4, Inst. Mech. Eng. (London) (Feb. 1962).
- (12) WALLIS, G.B. "One-dimensional two-phase flow", McGraw-Hill-1969, (AEC Rept. NYO-3114-14, EURAEC 1605, 1966).
- (13) PAULA, J.G., "Estudo experimental sobre evolução de pressão em escoamentos bifásicos água-ar", Tese de mestrado UFMG-1972.
- (14) ROUMY, R., "Structure des écoulements diphasiques eau-air. Etude de la fraction de vide moyenne et des configurations d'écoulement". CEA-R-3892, 1969.
- (15) GRIFFITH, P., "Two-phase flow in pipes" Developments in heat transfer - MIT Press 1964.
- (16) WALLIS, G.B., STEEN, D.A., and BRENNER, S.N., Report N° NYO 10.487 July, 1963.

TABELA 1 - CONFIGURAÇÃO DO TIPO BOLHAS INDEPENDENTES

Q_1 (l/s)	Q_g (l/s)	j_1 (m/s)	j_g (m/s)	n_{op} (ata)
0,80	0,46	2,25	1,29	2,0
0,80	0,31	2,25	0,87	2,0
0,80	0,16	2,25	0,45	2,0
1,00	0,46	2,81	1,29	2,0
1,00	0,31	2,81	0,87	2,0
1,00	0,16	2,81	0,45	2,0
1,00	0,09	2,81	0,25	2,0
1,10	0,61	3,10	1,71	2,0
1,10	0,31	3,10	0,87	2,0
1,30	0,61	3,65	1,71	2,0
1,30	0,31	3,65	0,87	2,0
1,40	0,92	3,93	2,59	3,0
1,40	0,61	3,93	1,71	3,0
1,40	0,31	3,93	0,87	3,0
1,50	0,45	4,22	1,26	3,0
1,60	0,92	4,50	2,59	3,0
1,60	0,61	4,50	1,71	3,0
1,60	0,31	4,50	0,87	3,0
1,70	0,61	4,77	1,71	3,0
1,70	0,31	4,77	0,87	3,0
1,80	0,31	5,10	0,87	3,0
1,90	1,22	5,20	3,43	3,0
1,90	0,61	5,20	1,71	3,0
2,00	0,92	5,62	2,59	3,0
2,00	0,61	5,62	1,71	3,0
2,00	0,31	5,62	0,87	3,0

TABELA 2 - CONFIGURAÇÃO DO TIPO BOLHAS AGLOMERADAS

Q_1 (l/s)	Q_g (l/s)	j_1 (m/s)	j_g (m/s)	p_{cp} (ata)
0,40	0,62	1,12	1,74	2,0
0,60	1,29	1,69	3,62	2,0
0,80	0,62	2,25	1,74	2,0
1,00	0,97	2,81	2,73	2,0
1,00	0,81	2,81	2,28	2,0
1,00	0,62	2,81	1,74	2,0
1,10	1,62	3,10	4,55	2,0
1,10	1,29	3,10	3,62	2,0
1,10	0,97	3,10	2,73	2,0
1,30	1,62	3,65	4,55	2,0
1,30	0,97	3,65	2,73	2,0
1,40	1,53	3,93	4,30	3,0
1,40	1,22	3,93	3,43	3,0
1,60	1,32	4,50	3,71	3,0
1,60	1,22	4,50	3,43	3,0
1,70	1,31	4,77	3,68	3,0
1,70	0,98	4,77	2,75	3,0
1,80	1,41	5,10	3,96	2,2
1,80	0,98	5,10	2,75	2,0
1,90	1,83	5,20	5,14	3,0
2,00	2,75	5,62	7,73	3,0
2,00	2,03	5,62	5,70	3,0
2,00	1,53	5,62	4,30	3,0
2,00	1,22	5,62	3,43	3,0

TABELA 3 - CONFIGURAÇÃO DO TIPO BOLSÕES

Q_1 (l/s)	Q_2 (l/s)	J_1 (m/s)	J_2 (m/s)	p_{op} (ata)
0,05	1,67	0,14	4,69	2,0
0,05	1,11	0,14	3,12	2,0
0,10	1,77	0,28	4,97	2,0
0,10	1,18	0,28	3,32	2,0
0,15	1,12	0,42	3,15	2,0
0,20	1,18	0,56	3,32	2,0
0,25	2,47	0,70	6,94	2,0
0,40	2,59	1,12	7,28	2,0
0,40	1,86	1,12	5,23	2,0
0,40	1,24	1,12	3,48	2,0
0,60	4,05	1,69	11,38	2,0
0,60	3,24	1,69	9,10	2,0
0,60	2,59	1,69	7,28	2,0
0,60	1,94	1,69	5,45	2,0
0,80	2,70	2,25	7,59	2,0
0,80	1,94	2,25	5,45	2,0
0,80	1,62	2,25	4,55	2,0
0,80	1,29	2,25	3,62	2,0
0,80	1,11	2,25	3,12	2,0
0,80	0,97	2,25	2,73	2,0
0,80	0,77	2,25	2,16	2,0
1,00	2,81	2,81	7,90	2,0
1,00	2,78	2,81	7,81	2,0
1,00	2,02	2,81	5,68	2,0
1,00	1,62	2,81	4,55	2,0
1,00	1,46	2,81	4,10	2,0
1,00	1,29	2,81	3,62	2,0
1,00	1,11	2,81	3,12	2,0
1,10	4,57	3,10	12,84	2,5
1,10	3,88	3,10	10,90	2,5

TABELA 3 - Continuação

Q_1 (l/s)	Q_S (l/s)	j_1 (m/s)	j_S (m/s)	p_{op} (ata)
1,10	3,32	3,10	9,32	2,2
1,10	2,75	3,10	7,73	2,2
1,10	2,02	3,10	5,68	2,0
1,30	4,85	3,65	13,63	3,0
1,30	3,27	3,65	9,18	3,0
1,30	2,62	3,65	7,36	3,0
1,30	2,26	3,65	6,32	2,2
1,40	3,38	3,93	9,50	3,0
1,40	2,62	3,93	7,36	3,0
1,40	2,29	3,93	6,43	3,0
1,40	1,94	3,93	5,45	3,0
1,50	3,42	4,22	9,61	3,0
1,50	2,70	4,22	7,59	3,0
1,50	1,94	4,22	5,45	3,0
1,50	1,27	4,22	3,57	3,0
1,60	3,46	4,50	9,72	3,0
1,60	2,70	4,50	7,59	3,0
1,60	1,94	4,50	5,45	3,0
1,60	1,64	4,50	4,61	3,0
1,70	4,12	4,77	11,57	3,3
1,70	3,46	4,77	9,72	3,1
1,70	2,70	4,77	7,58	3,0
1,70	1,94	4,77	5,45	3,0
1,70	1,60	4,77	4,50	2,3
1,80	3,32	5,10	9,32	3,3
1,80	2,77	5,10	7,78	3,2
1,80	1,96	5,10	5,50	3,0
1,90	3,50	5,20	9,84	3,5
1,90	2,82	5,20	7,92	3,0

TABELA 4 - CONFIGURAÇÃO DO TIPO SEMI-ANULAR

Q_1 (l/s)	Q_g (l/s)	J_1 (m/s)	J_g (m/s)	p_{op} (ata)
0,05	4,72	0,14	13,26	2,0
0,05	3,89	0,14	10,93	2,0
0,05	3,33	0,14	9,36	2,0
0,05	2,78	0,14	7,81	2,0
0,05	2,22	0,14	6,24	2,0
0,10	3,33	0,28	9,36	2,0
0,10	2,95	0,28	8,29	2,0
0,10	1,18	0,28	6,24	2,0
0,15	3,55	0,42	9,98	2,0
0,15	2,95	0,42	8,29	2,0
0,15	2,25	0,42	6,32	2,0
0,20	5,18	0,56	14,56	2,0
0,20	4,53	0,56	12,73	2,0
0,20	3,88	0,56	10,90	2,0
0,20	3,24	0,56	9,10	2,0
0,20	2,47	0,56	6,94	2,0
0,25	3,88	0,70	10,90	2,0
0,25	3,24	0,70	9,10	2,0
0,30	3,87	0,84	10,87	2,0
0,30	2,78	0,84	7,81	2,0
0,40	3,24	1,12	9,10	2,0
0,60	4,93	1,69	13,85	2,0

TABELA 4 - Continuação

Q_1 (l/s)	Q_g (l/s)	j_1 (m/s)	j_g (m/s)	p_{op} (ata)
0,80	4,22	2,25	11,86	2,0
0,80	3,52	2,25	9,89	2,0
1,00	5,68	2,81	15,96	2,0
1,10	7,50	3,10	21,00	3,3
1,10	6,80	3,10	19,11	3,2
1,10	6,08	3,10	17,08	3,0
1,10	5,20	3,10	14,68	2,7
1,30	7,42	3,65	20,85	3,7
1,30	5,97	3,65	16,77	3,3
1,30	5,32	3,65	14,95	3,1
1,40	7,76	3,93	21,81	4,0
1,40	6,50	3,93	18,27	3,9
1,40	5,39	3,93	15,15	3,5
1,40	5,18	3,93	14,56	3,0
1,40	4,17	3,93	11,72	3,0
1,60	5,43	4,50	15,26	3,8
1,60	4,93	4,50	13,85	3,5
1,60	4,12	4,50	11,58	3,3
1,70	5,43	4,77	15,26	3,7
1,70	4,83	4,77	13,57	3,3
1,80	4,15	5,10	11,66	3,6

TABELA 5 -- CONFIGURAÇÃO DO TIPO ANULAR

Q_1 (l/s)	Q_g (l/s)	j_1 (m/s)	j_g (m/s)	p_{op} (ata)
0,05	9,44	0,14	26,53	2,0
0,05	8,41	0,14	23,63	2,0
0,05	7,72	0,14	21,69	2,0
0,05	6,80	0,14	19,11	2,0
0,05	6,19	0,14	17,39	2,0
0,05	5,55	0,14	15,60	2,0
0,10	9,46	0,28	26,58	2,0
0,10	8,78	0,28	24,67	2,0
0,10	8,10	0,28	22,76	2,0
0,10	7,09	0,28	19,92	2,0
0,10	6,47	0,28	18,18	2,0
0,10	5,55	0,28	15,60	2,0
0,10	4,80	0,28	11,63	2,0
0,15	10,24	0,42	28,77	2,0
0,15	8,78	0,42	24,67	2,0
0,15	8,10	0,42	22,76	2,0
0,15	7,43	0,42	20,88	2,0
0,15	6,47	0,42	18,18	2,0
0,15	5,83	0,42	16,38	2,0
0,15	4,72	0,42	13,26	2,0
0,15	4,33	0,42	12,17	2,0
0,20	9,85	0,56	27,68	2,0
0,20	9,51	0,56	26,72	2,0
0,20	8,44	0,56	23,72	2,0
0,20	7,43	0,56	20,88	2,0
0,20	6,47	0,56	18,18	2,0
0,20	5,83	0,56	16,38	2,0
0,25	11,39	0,70	32,00	2,0
0,25	10,64	0,70	29,90	2,0

TABELA 5 - Continuação

Q_1 (l/s)	Q_g (l/s)	j_1 (m/s)	j_g (m/s)	p_{op} (ata)
0,25	9,50	0,70	26,70	2,0
0,25	8,78	0,70	24,67	2,0
0,25	8,05	0,70	22,62	2,0
0,25	7,03	0,70	19,75	2,0
0,25	6,08	0,70	17,08	2,0
0,25	5,17	0,70	14,53	2,0
0,25	4,53	0,70	12,73	2,0
0,30	9,29	0,84	26,10	2,0
0,30	7,98	0,84	22,42	2,0
0,30	6,94	0,84	19,50	2,0
0,30	6,22	0,84	17,48	2,0
0,30	5,07	0,84	14,25	2,0
0,30	4,57	0,84	12,84	2,0
0,40	9,12	1,12	25,63	2,0
0,40	7,31	1,12	20,54	2,0
0,40	6,33	1,12	17,79	2,0
0,40	5,40	1,12	15,17	2,0
0,40	4,53	1,12	12,73	2,0
0,40	3,88	1,12	10,90	2,0
0,60	10,55	1,69	29,65	2,0
0,60	9,44	1,69	26,53	2,0
0,60	8,61	1,69	24,19	2,0
0,60	7,60	1,69	21,36	2,0
0,60	6,84	1,69	19,22	2,0
0,80	6,38	2,25	17,93	2,0
0,80	5,60	2,25	15,74	2,0
0,80	5,32	2,25	14,95	2,0
1,10	8,74	3,10	24,62	3,6
1,10	8,61	3,10	24,19	3,4

TABELA 6 - FRAÇÃO DE VAZIO LOCAL NA CONFIGURAÇÃO DO TIPO BOLHAS

Teste	Q_g (l/s)	Q_l (l/s)	j_g (m/s)	j_l (m/s)	Pop (ata)		L (mm)							
							0	4,3	8,5	10,6	12,8	17,0	21,2	
1	0,31	0,80	0,87	2,24	2									
						ϵ_c	12,04	11,59	11,44	11,55	11,20	10,85	10,98	
2	1,22	1,85	3,42	5,19	3									
						ϵ_c	0,01	0,04	0,05	0,05	0,07	0,10	0,09	
3	0,92	1,40	2,58	3,93	3									
						ϵ_c	10,89	10,45	10,17	10,12	9,87	10,46	11,09	
4	0,31	1,60	0,87	4,49	3									
						ϵ_c	0,10	0,14	0,16	0,16	0,18	0,14	0,08	
5	0,97	1,00	2,72	2,81	2									
						ϵ_c	11,33	10,90	10,39	9,88	9,66	11,53	11,55	
5	0,97	1,00	2,72	2,81	2									
						ϵ_c	0,06	0,10	0,14	0,18	0,20	0,05	0,05	
5	0,97	1,00	2,72	2,81	2									
						ϵ_c	11,65	10,40	9,90	9,64	9,49	9,99	10,08	
5	0,97	1,00	2,72	2,81	2									
						ϵ_c	0,04	0,14	0,18	0,20	0,22	0,17	0,17	
5	0,97	1,00	2,72	2,81	2									
						ϵ_c	11,86	11,44	9,75	8,83	9,52	10,86	10,31	
5	0,97	1,00	2,72	2,81	2									
						ϵ_c	0,02	0,05	0,19	0,27	0,21	0,10	0,15	

TABELA 7 - FRAÇÃO DE VAZIO LOCAL NA CONFIGURAÇÃO DO TIPO BOLSÕES

Teste	Q_g (l/s)	Q_l (l/s)	j_g (m/s)	j_l (m/s)	Pop (ata)	L (mm)						
						0	4,3	8,5	10,6	12,8	17,0	21,2
1	2,47	0,25	6,94	0,70	2							
						11,21	10,04	9,00	8,80	9,11	8,94	10,86
2	2,22	1,2	6,23	3,37	2							
						0,07	0,17	0,26	0,27	0,25	0,26	0,10
3	1,94	1,5	5,45	4,21	3							
						11,74	9,54	7,73	7,51	7,60	9,52	11,86
4	1,27	1,5	3,56	4,21	3							
						0,23	0,21	0,36	0,38	0,37	0,21	0,02
5	1,64	1,6	4,60	4,49	3							
						11,87	10,30	8,07	8,01	8,66	11,14	11,52
5	1,64	1,6	4,60	4,49	3							
						0,02	0,15	0,33	0,34	0,28	0,08	0,05
5	1,64	1,6	4,60	4,49	3							
						10,11	10,26	8,69	9,35	9,53	11,54	12,00
5	1,64	1,6	4,60	4,49	3							
						0,16	0,15	0,28	0,23	0,21	0,05	0,01
5	1,64	1,6	4,60	4,49	3							
						9,38	8,44	7,65	7,62	9,00	10,34	11,15
5	1,64	1,6	4,60	4,49	3							
						0,22	0,30	0,37	0,37	0,26	0,15	0,08

TABELA 8 - FRAÇÃO DE VAZIO LOCAL NA CONFIGURAÇÃO DO TIPO ANULAR

Teste	Q_g (l/s)	Q_1 (l/s)	j_g (m/s)	j_1 (m/s)	P_{op} (ate)		L (mm)									
							0	4,3	8,5	10,6	12,8	17,0	21,2			
1	11,39	0,25	32,00	0,70	2											
2	9,85	0,20	27,67	0,56	2											
3	10,24	0,15	28,77	0,42	2											
4	9,46	0,10	26,58	0,28	2											
5	9,44	0,05	26,52	0,14	2											

TABELA 9 - FRAÇÃO DE VAZIO NA CONFIGURAÇÃO DO TIPO BOLHAS

Teste	j_g (m/s)	j_l (m/s)	$\langle \alpha \rangle_{exp}$	$\langle \alpha \rangle_{calc}$
1	0,87	2,24	0,06	0,24
2	3,42	5,19	0,12	0,35
3	2,58	3,93	0,08	0,35
4	0,87	4,49	0,15	0,14
5	2,72	2,81	0,08	0,40

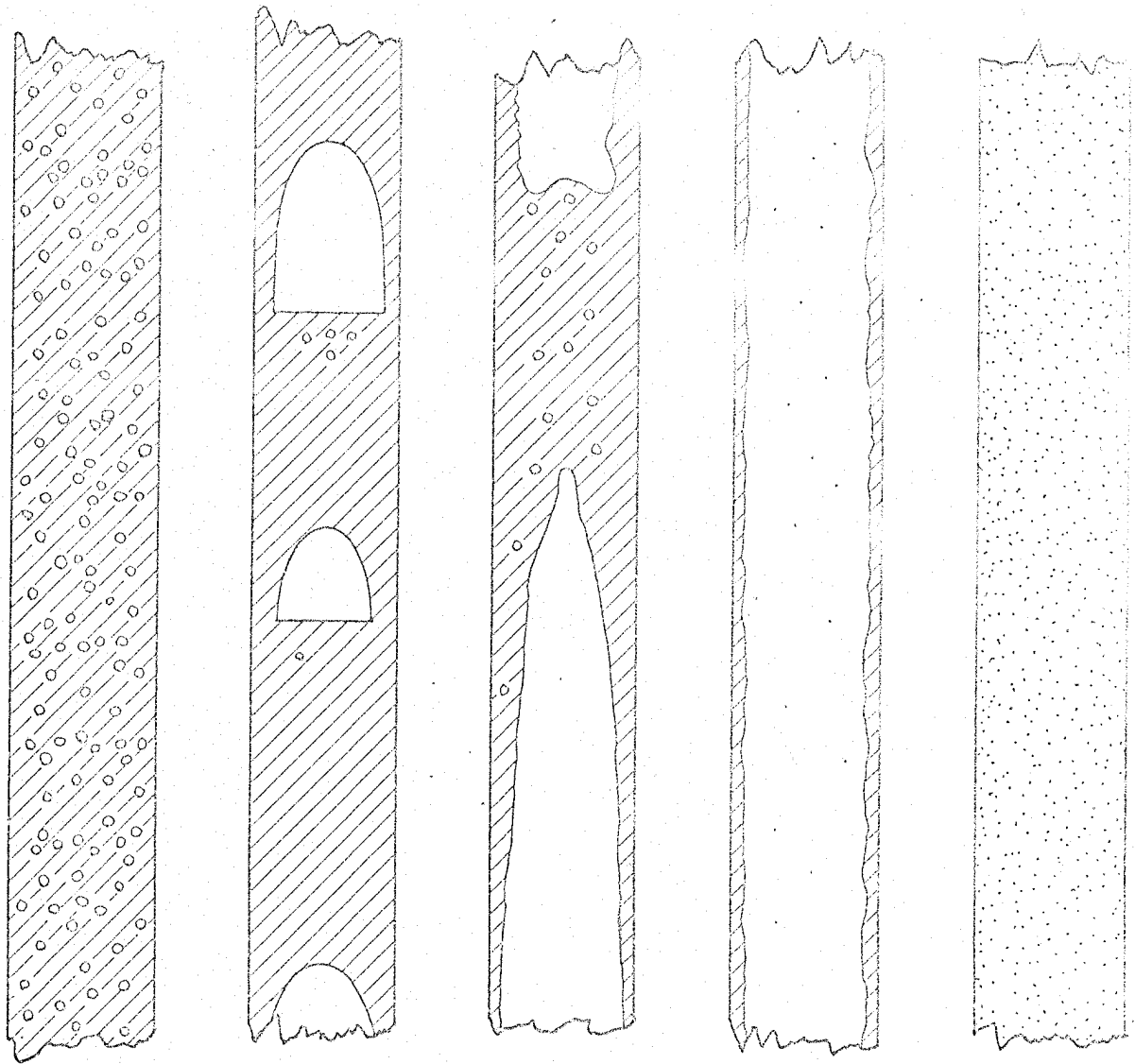
TABELA 10 - FRAÇÃO DE VAZIO NA CONFIGURAÇÃO DO TIPO BOLSÕES

Teste	j_g (m/s)	j_l (m/s)	$\langle \alpha \rangle_{exp}$	$\langle \alpha \rangle_{calc}$
1	6,94	0,70	0,36	0,74
2	6,23	3,37	0,38	0,53
3	5,45	4,21	0,20	0,46
4	3,56	4,21	0,48	0,37
5	4,60	4,49	0,22	0,41

TABELA 11 - FRAÇÃO DE VAZIO NA CONFIGURAÇÃO DO TIPO ANULAR

Teste	j_g (m/s)	j_l (m/s)	$\langle \alpha \rangle_{exp}$	$\langle \alpha \rangle_{calc}$
1	32	0,70	0,50	0,88
2	27,67	0,56	0,54	0,88
3	28,77	0,42	0,41	0,90
4	26,58	0,28	0,46	0,92
5	26,52	0,14	0,48	0,96

TIPOS DE CONFIGURAÇÃO DE
ESCOAMENTO BIFÁSICO



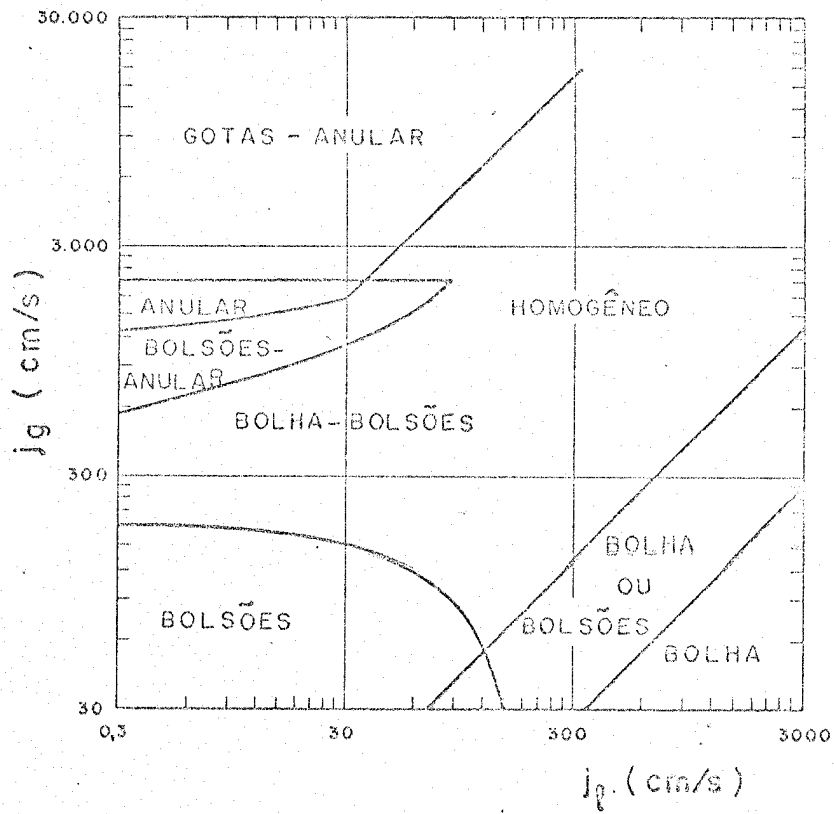
BOLHAS

BOLSÕES

SEMI-ANULAR

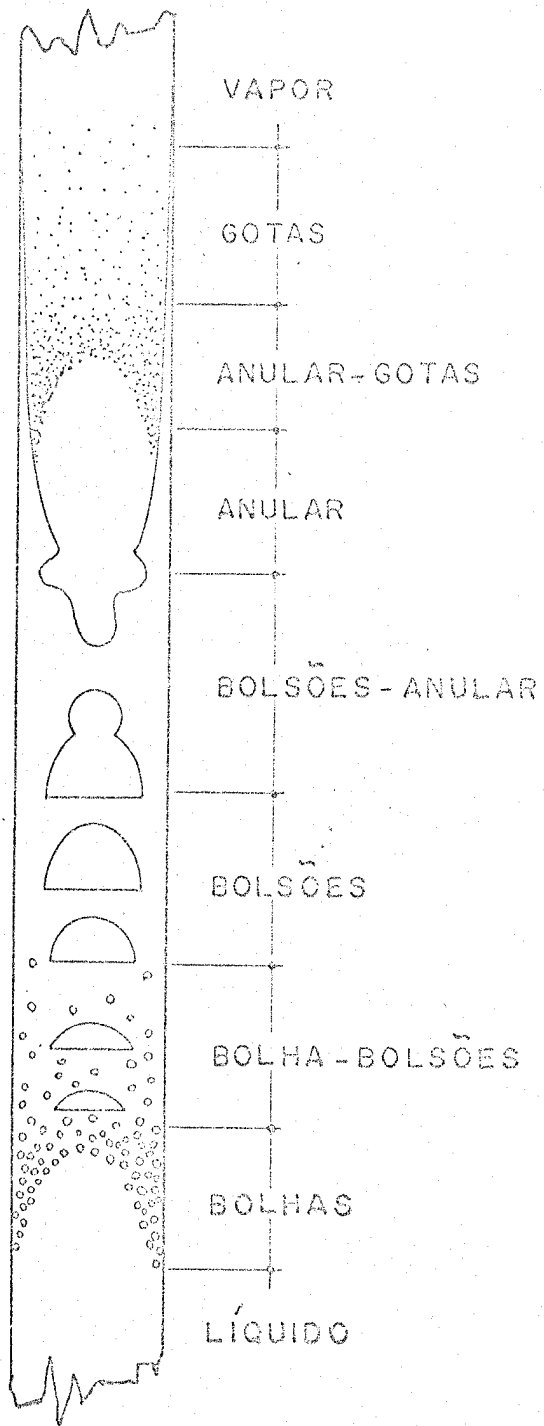
ANULAR

GOTAS



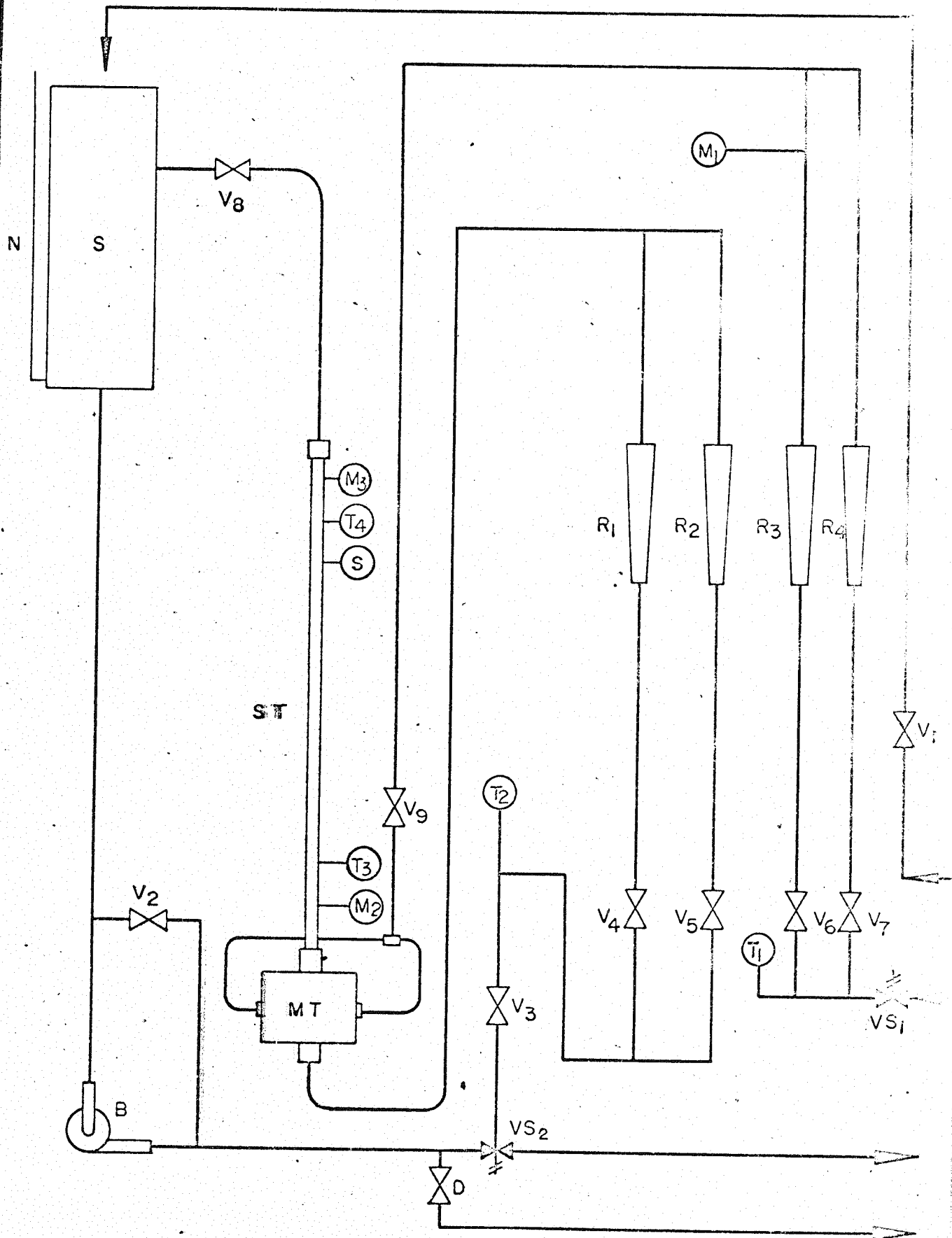
CARTA DE CONFIGURAÇÕES DE ESCOAMENTO

(FIG-2)

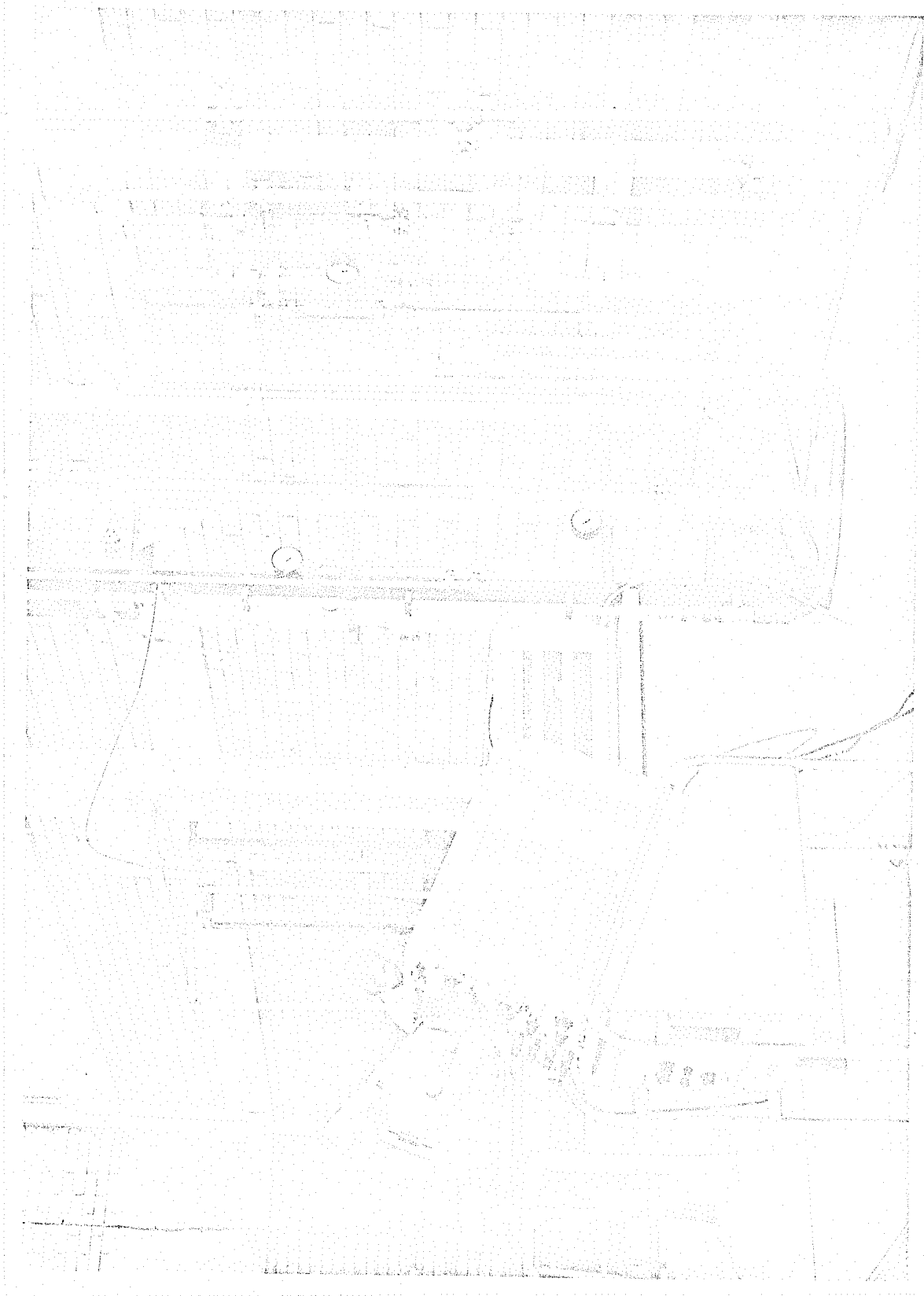


(FIG-3)

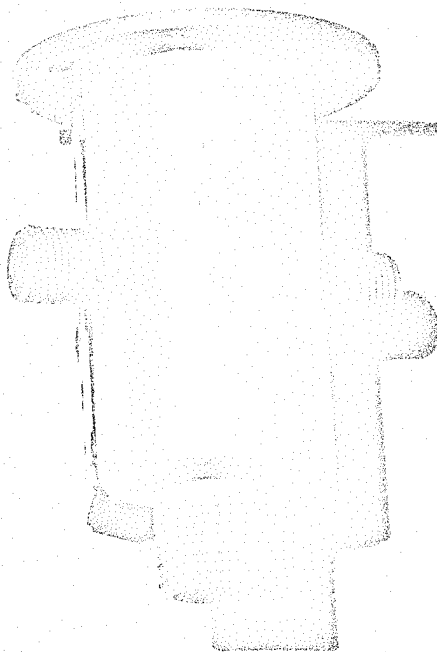
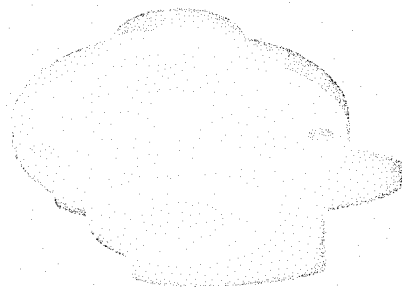
CIRCUITO ÁGUA - AR



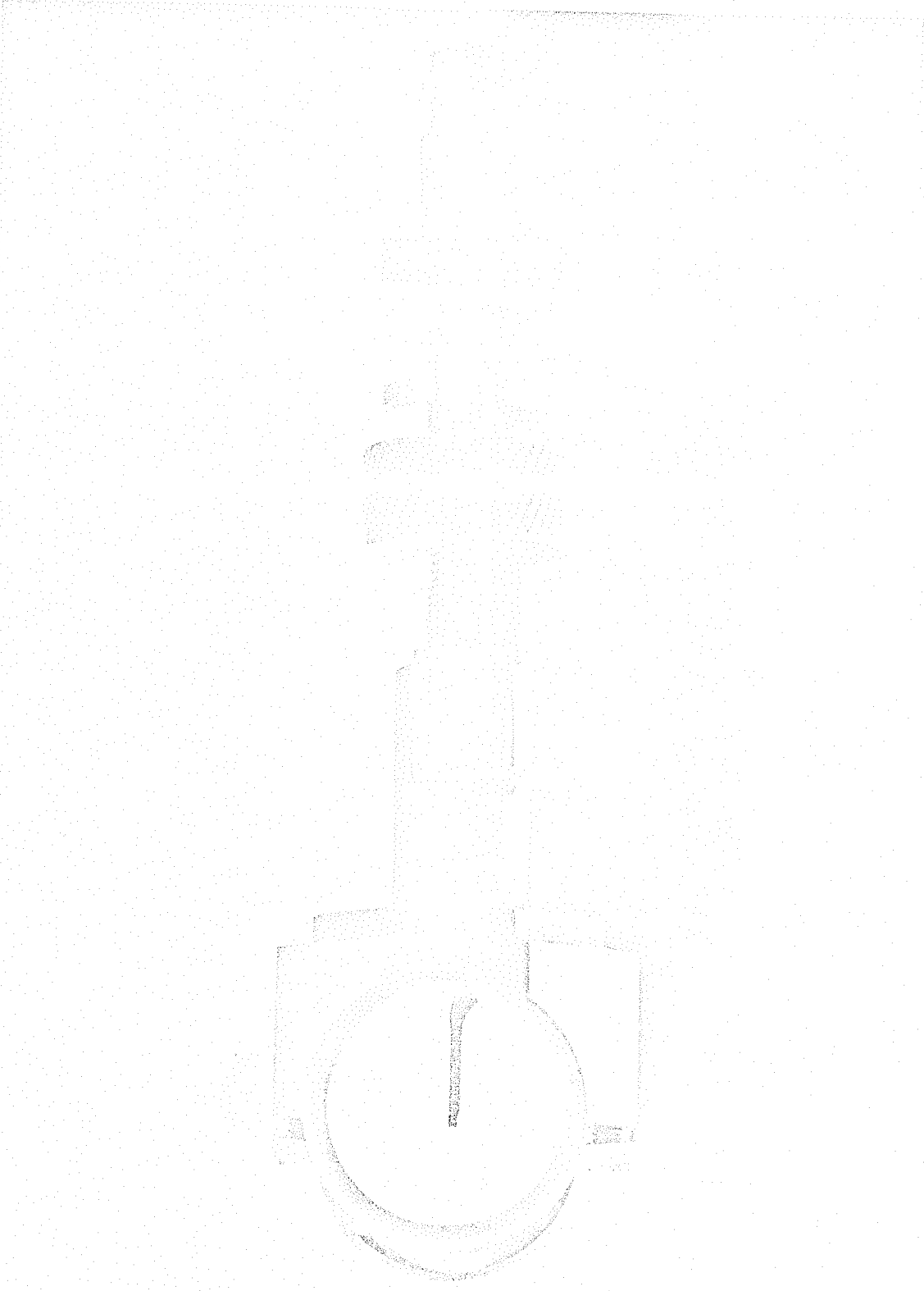
(FIG - 4)



(FIG - 5)

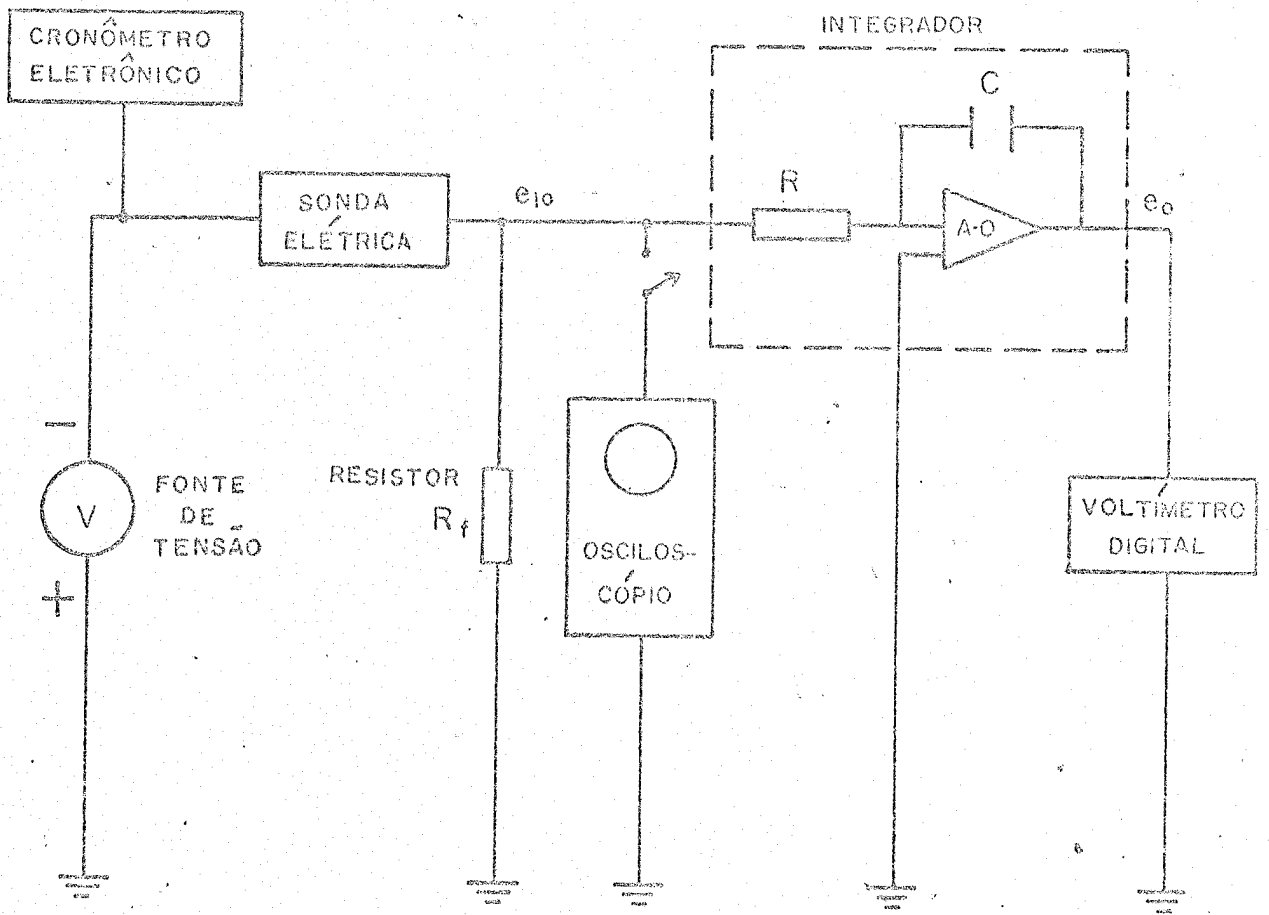


(FIG - 6)

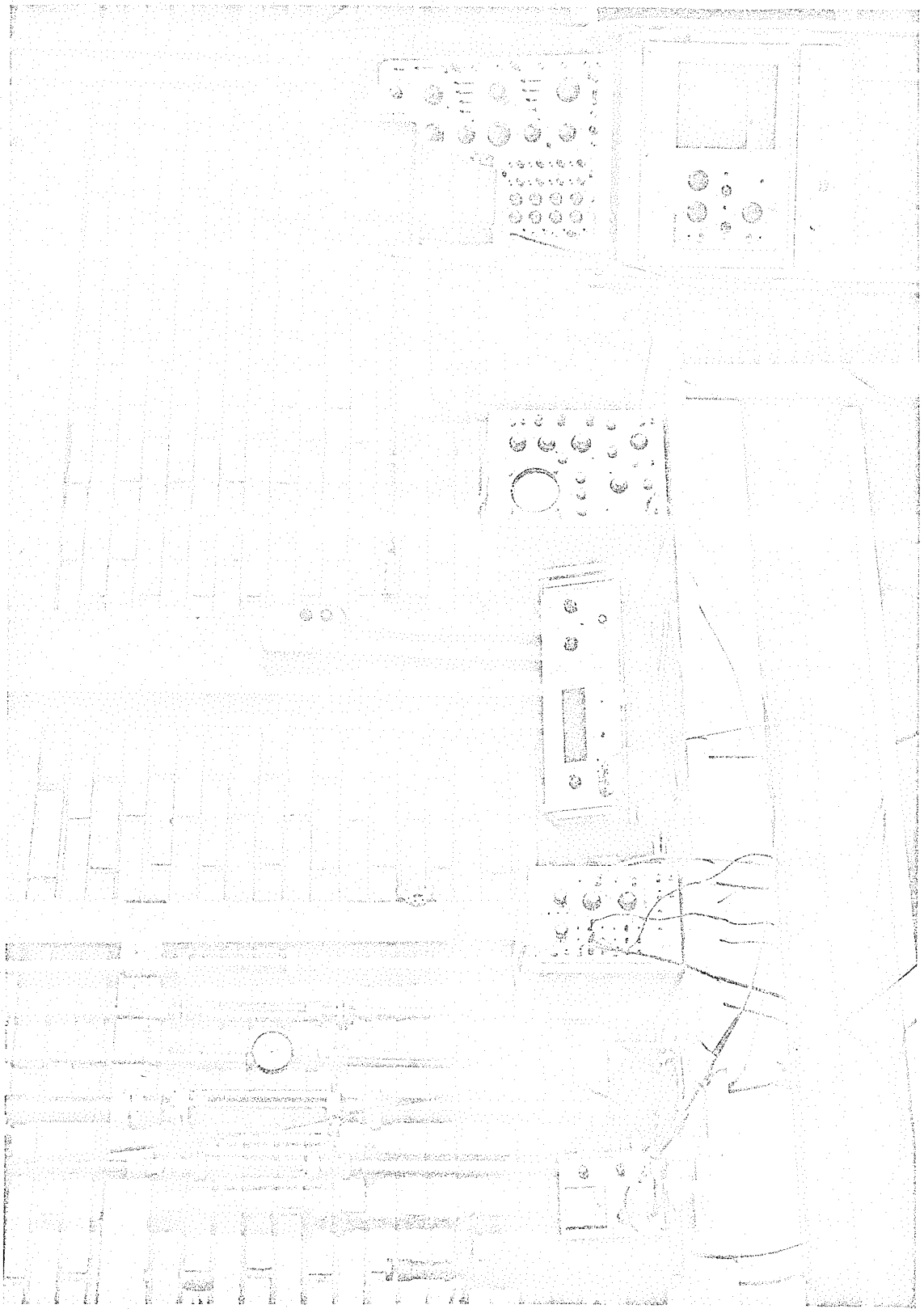


(FIG - 7)

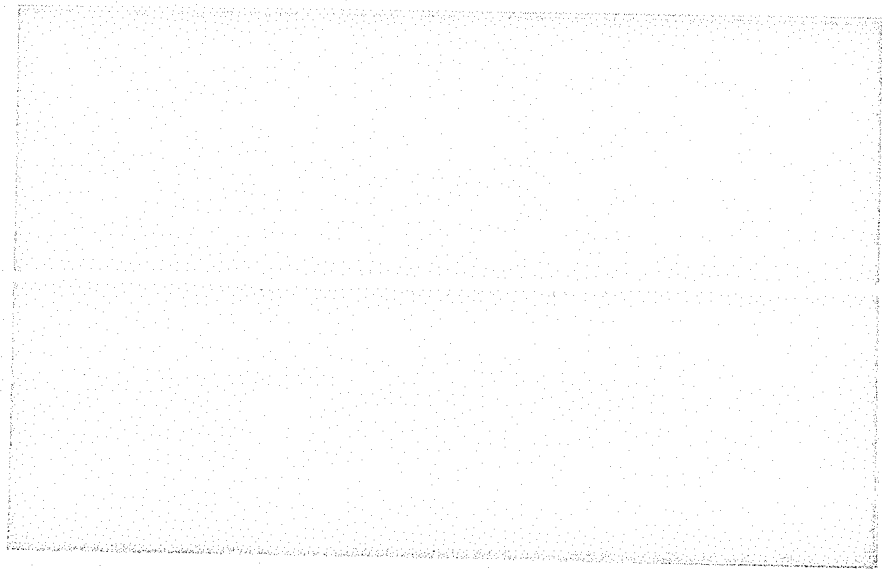
ESQUEMA DO CIRCUITO ELÉTRICO



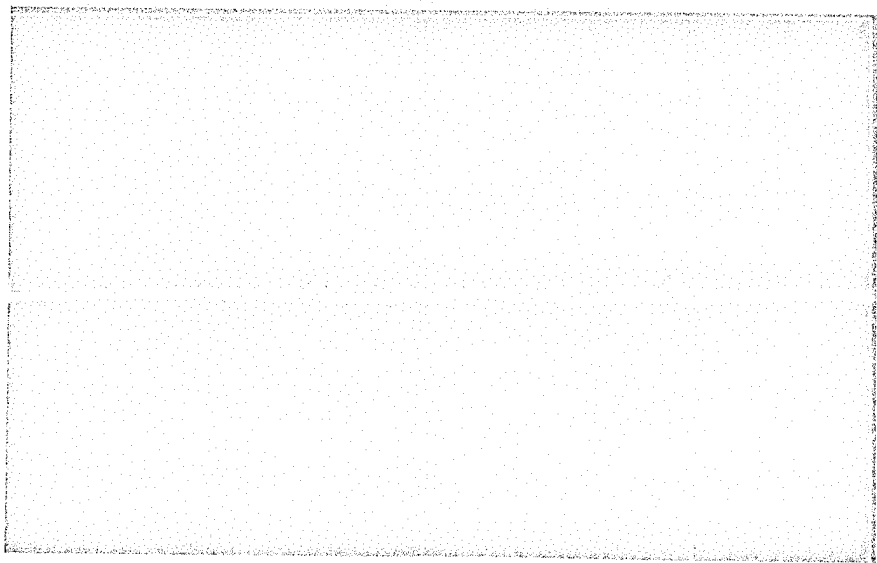
(FIG - 8)



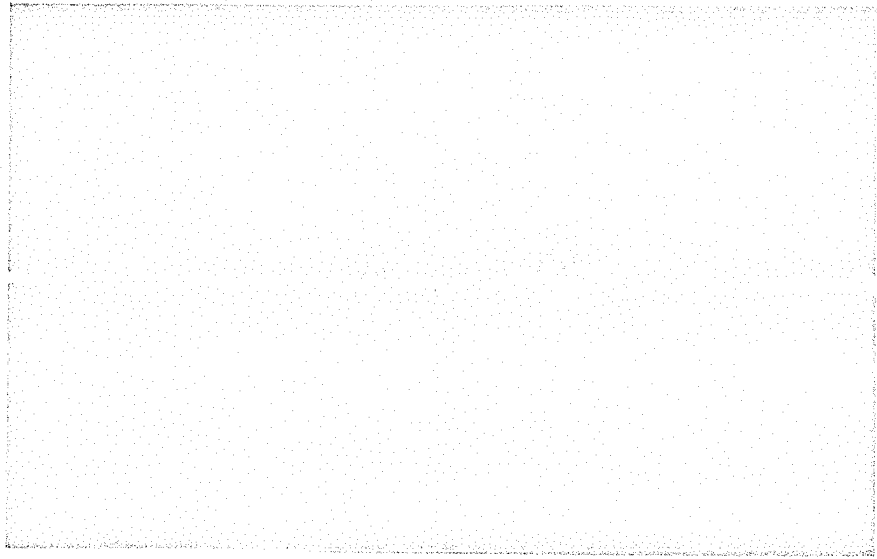
(FIG - 9)



(FIG - 10)



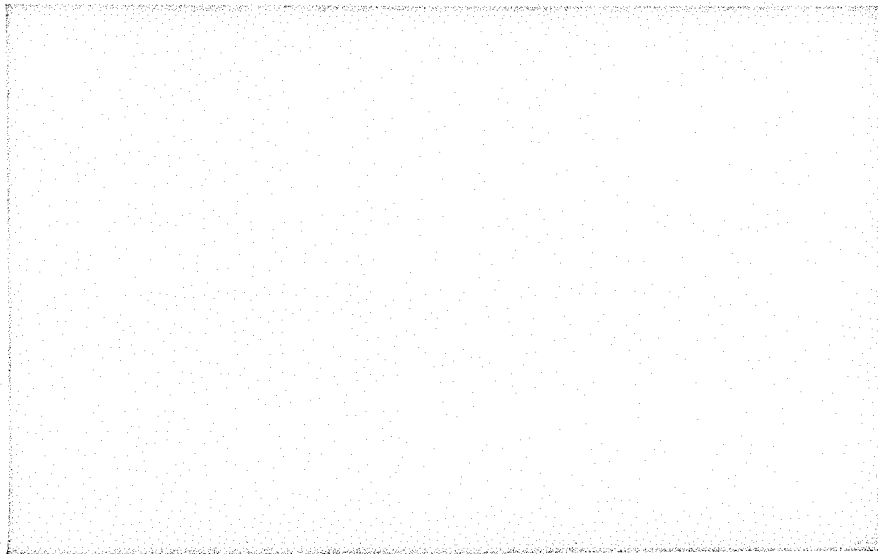
(FIG - 11)



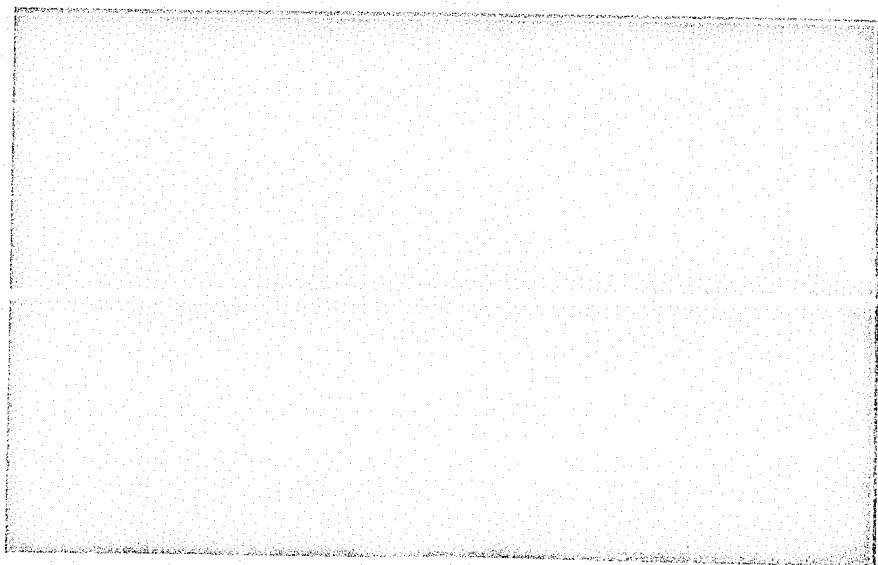
(FIG - 12)



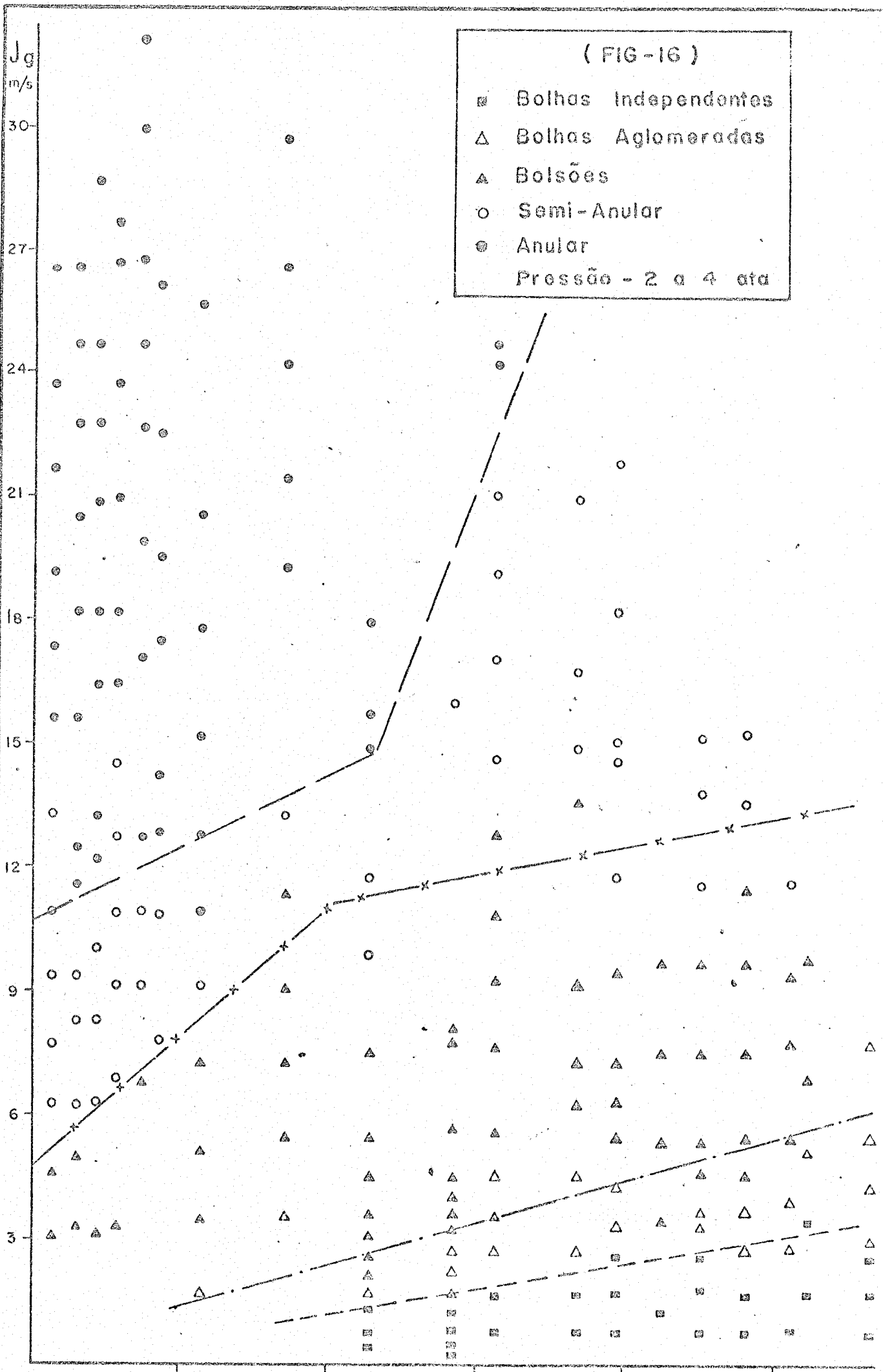
(FIG - 13)

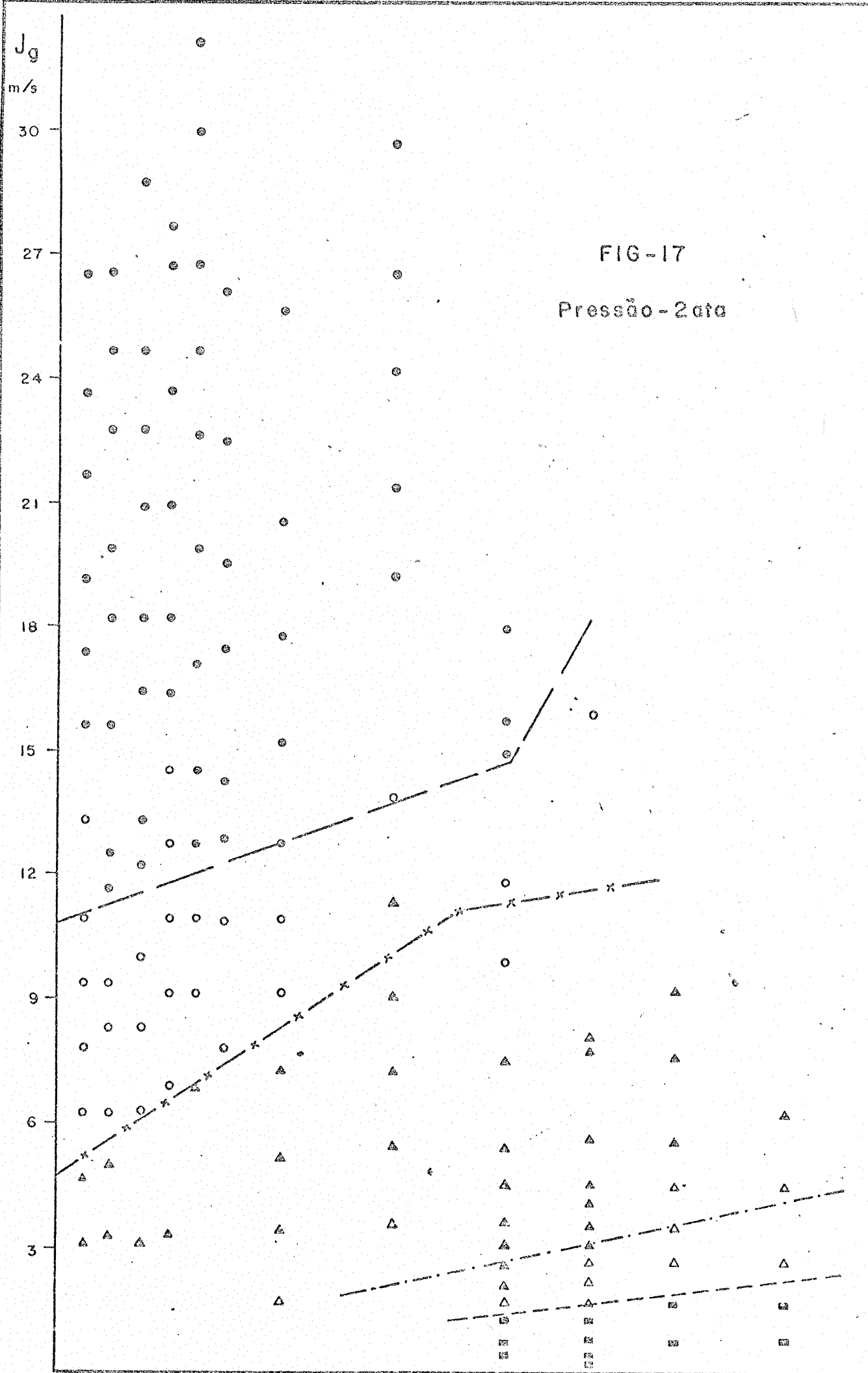


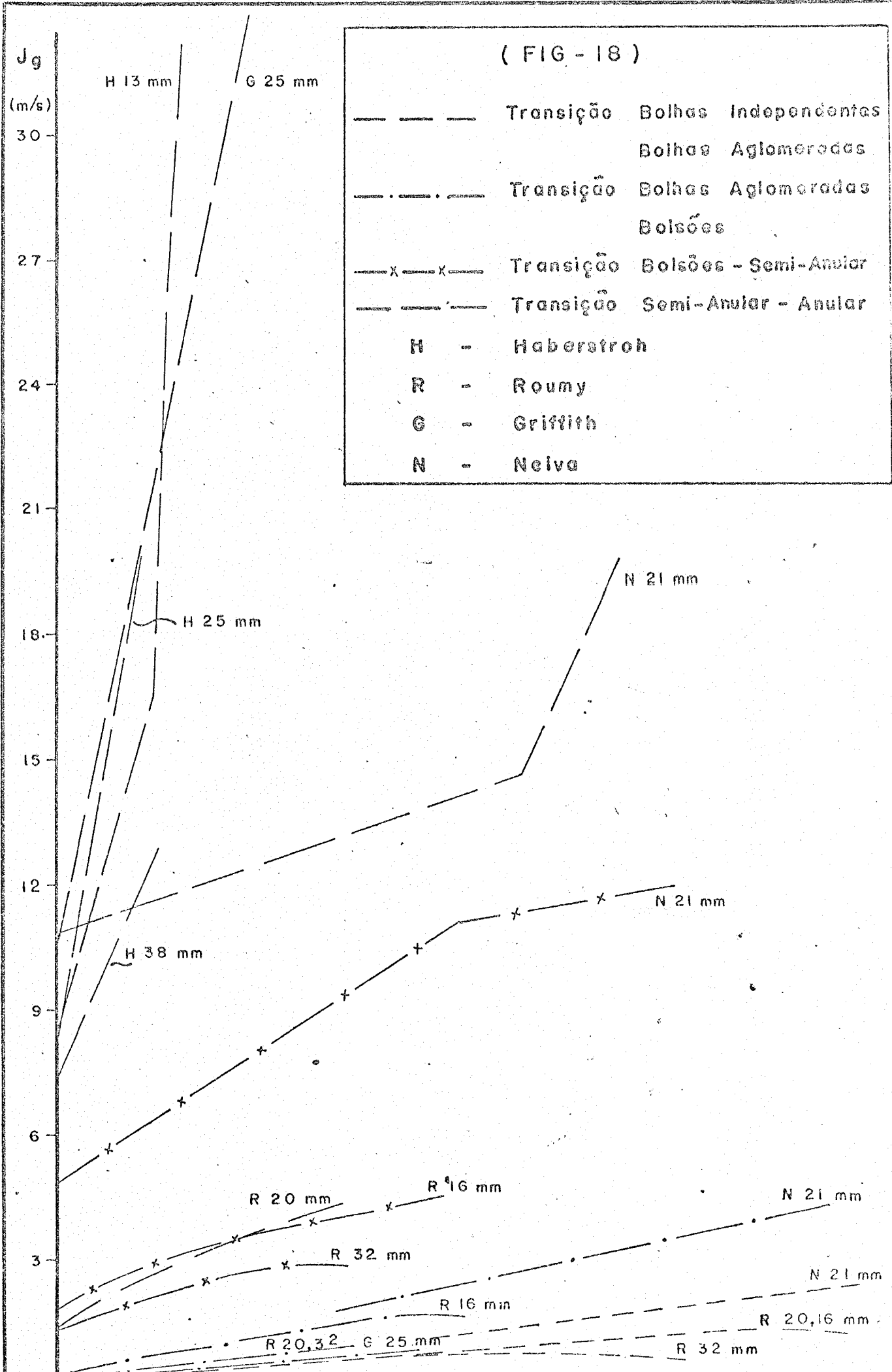
(FIG - 14)



(FIG - 15)







Jg
(m/s)

30

27

24

21

18

15

12

9

6

3

H 13 mm

G 25 mm

H 25 mm

N 21 mm

H 38 mm

N 21 mm

R 20 mm

R 16 mm

N 21 mm

R 32 mm

N 21 mm

R 16 mm

R 20,16 mm

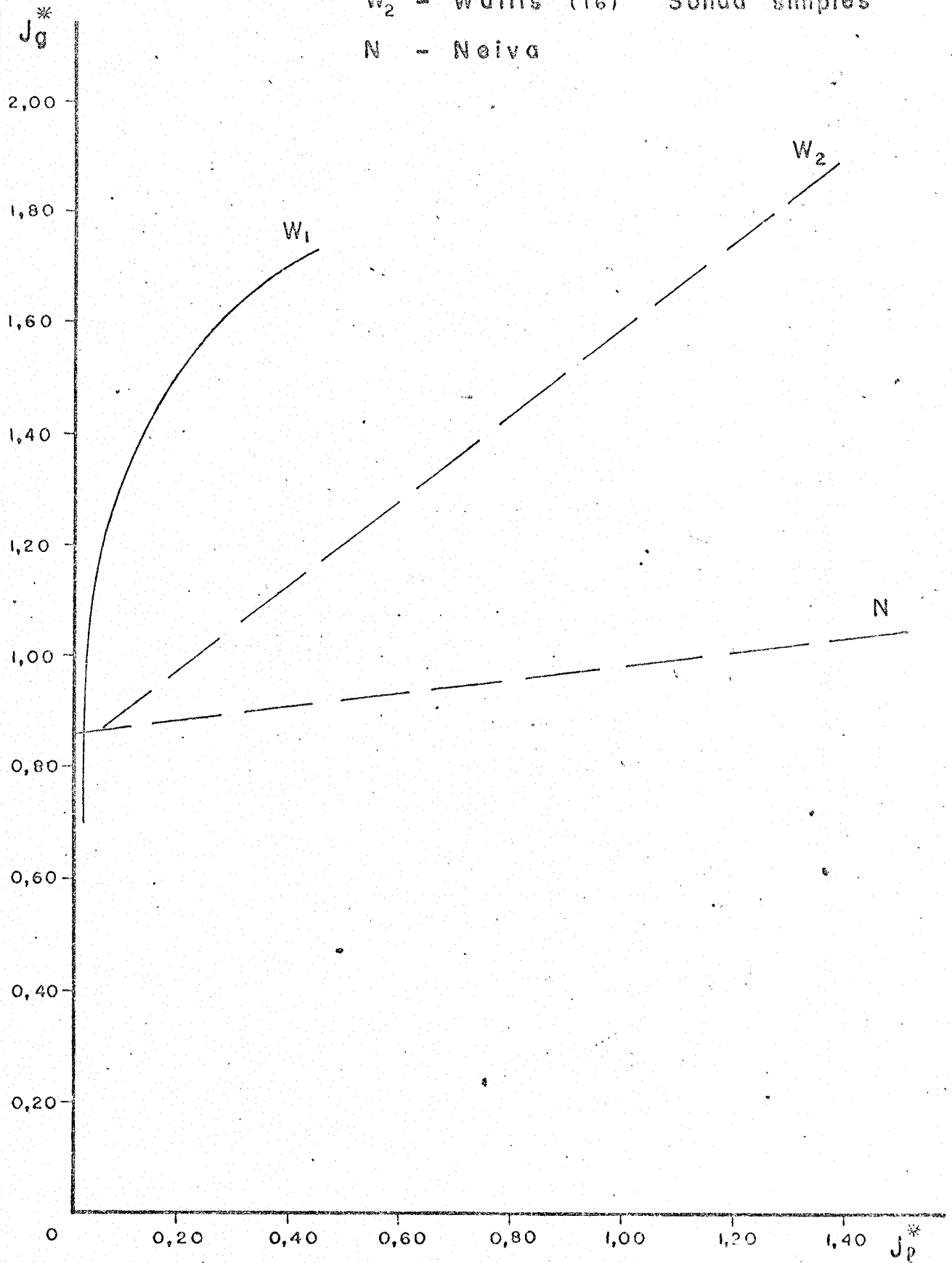
R 20,32

G 25 mm

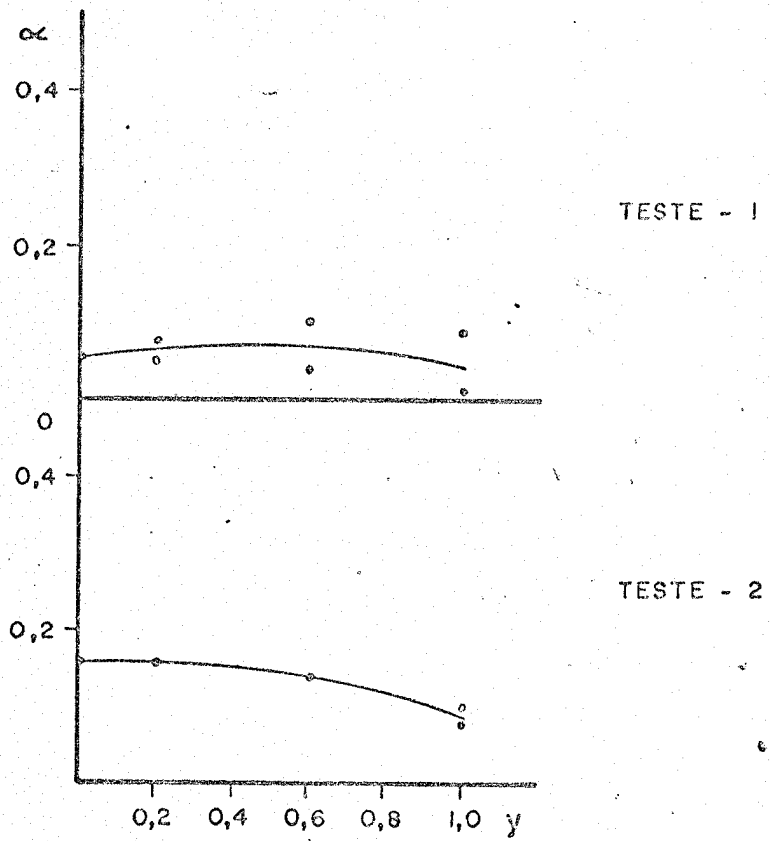
R 32 mm

TRANSIÇÃO BOLSÕES - ANULAR

W_1 - Wallis (16) Sonda dupla
 W_2 - Wallis (16) Sonda simples
N - Neiva

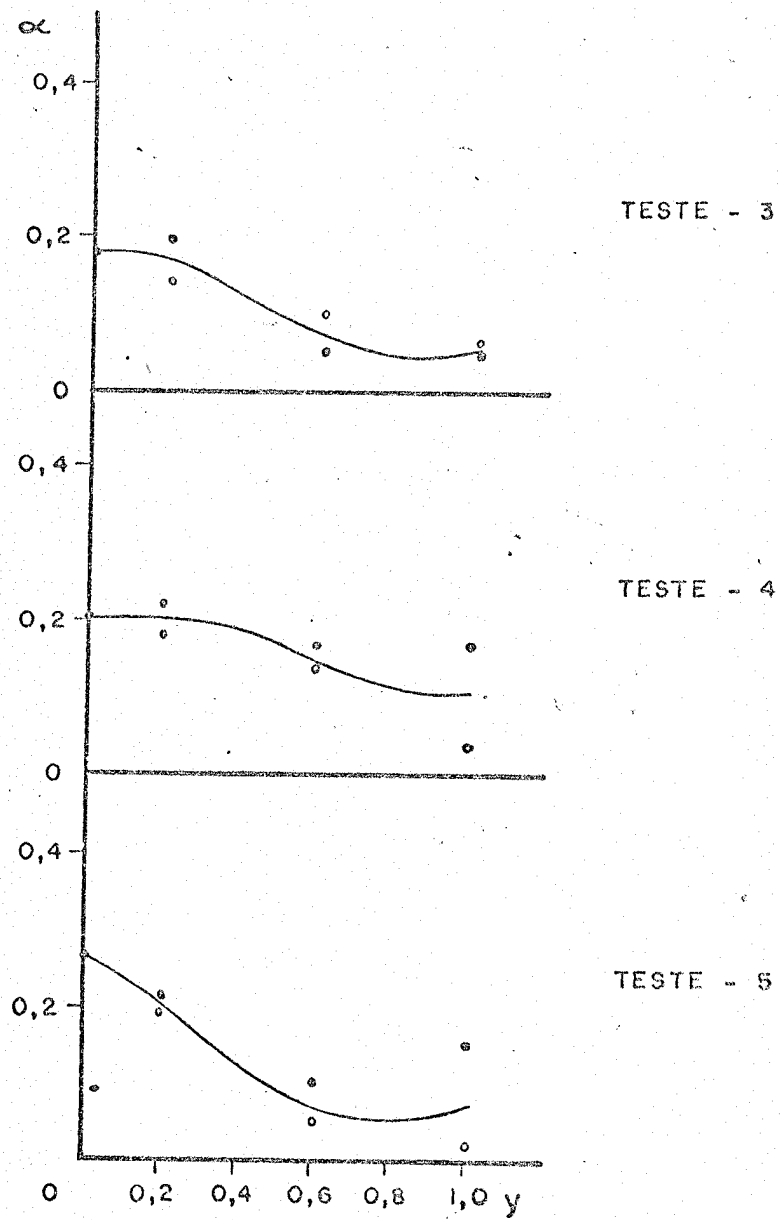


DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIO LOCAL NA
CONFIGURAÇÃO TIPO BOLHAS



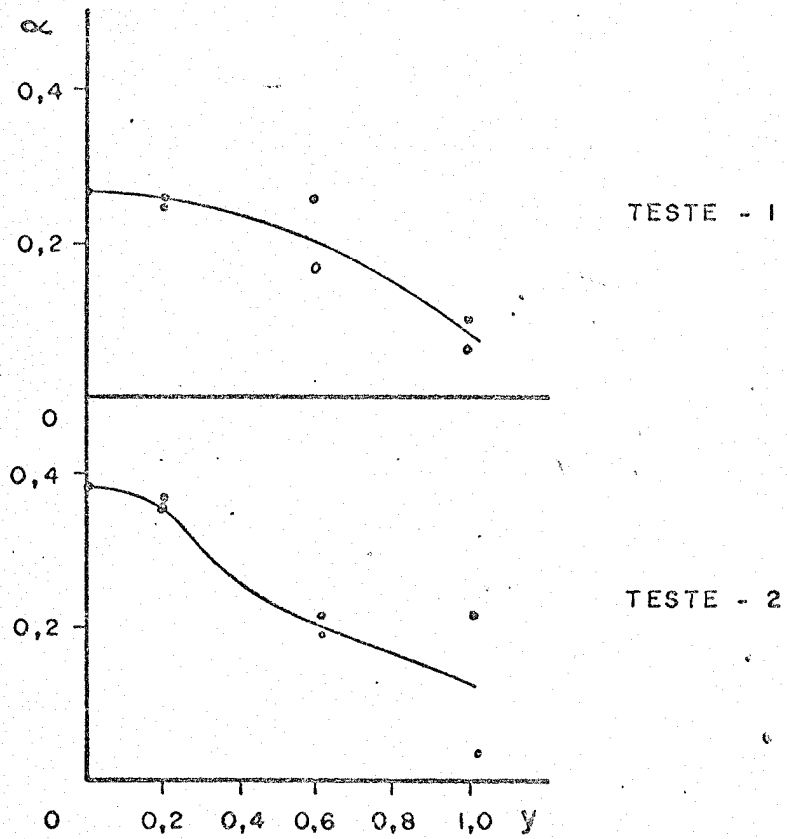
(FIG - 20)

Continuação



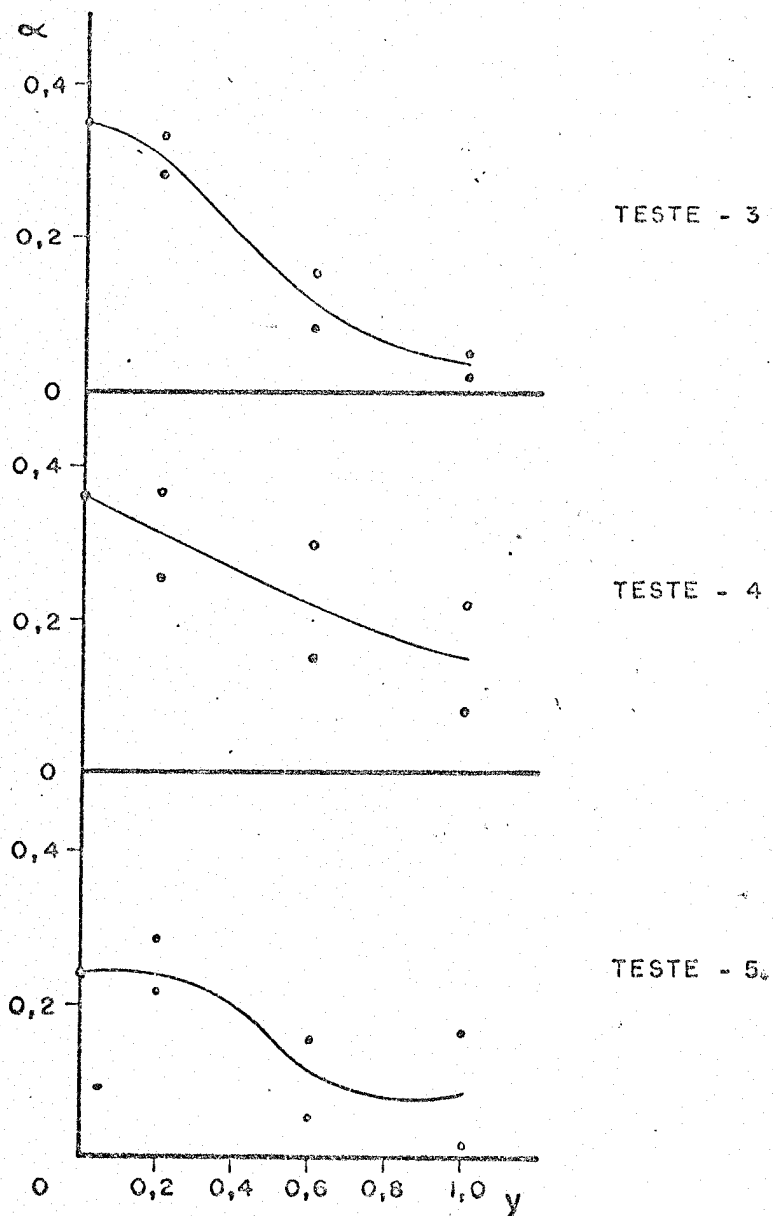
(FIG - 20)

DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIO LOCAL NA
CONFIGURAÇÃO TIPO BOLSÕES



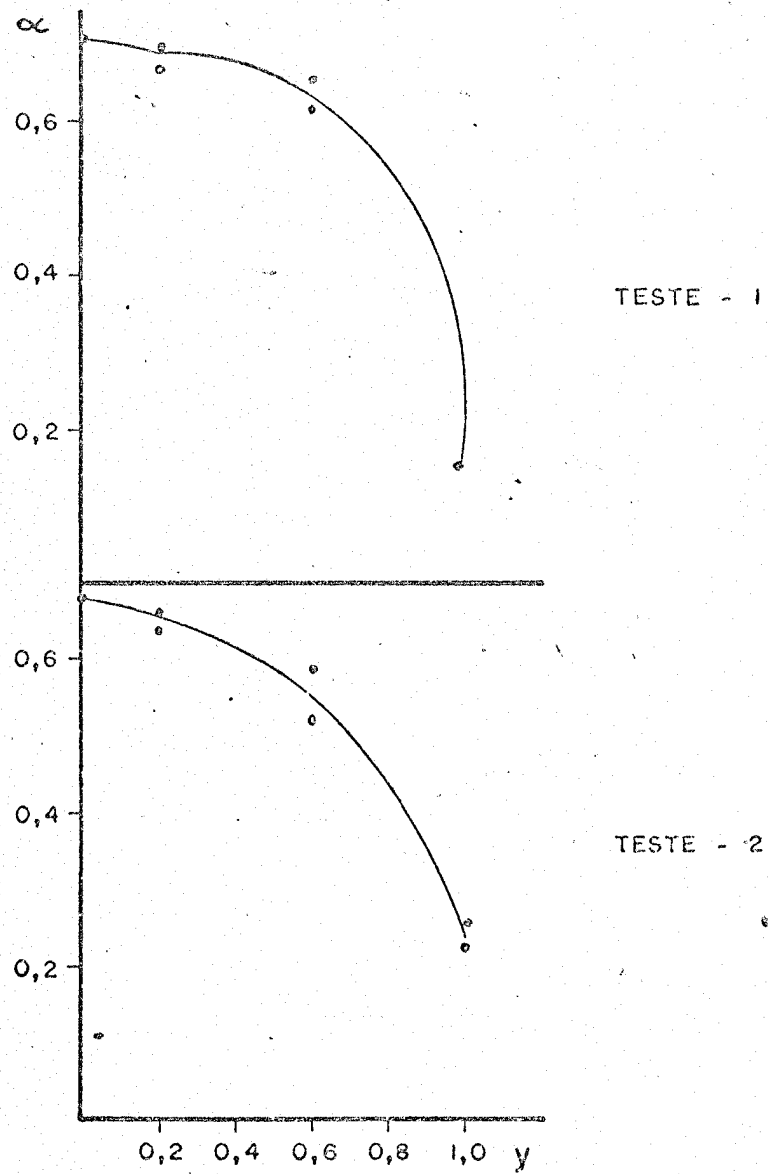
(FIG - 21)

Continuação



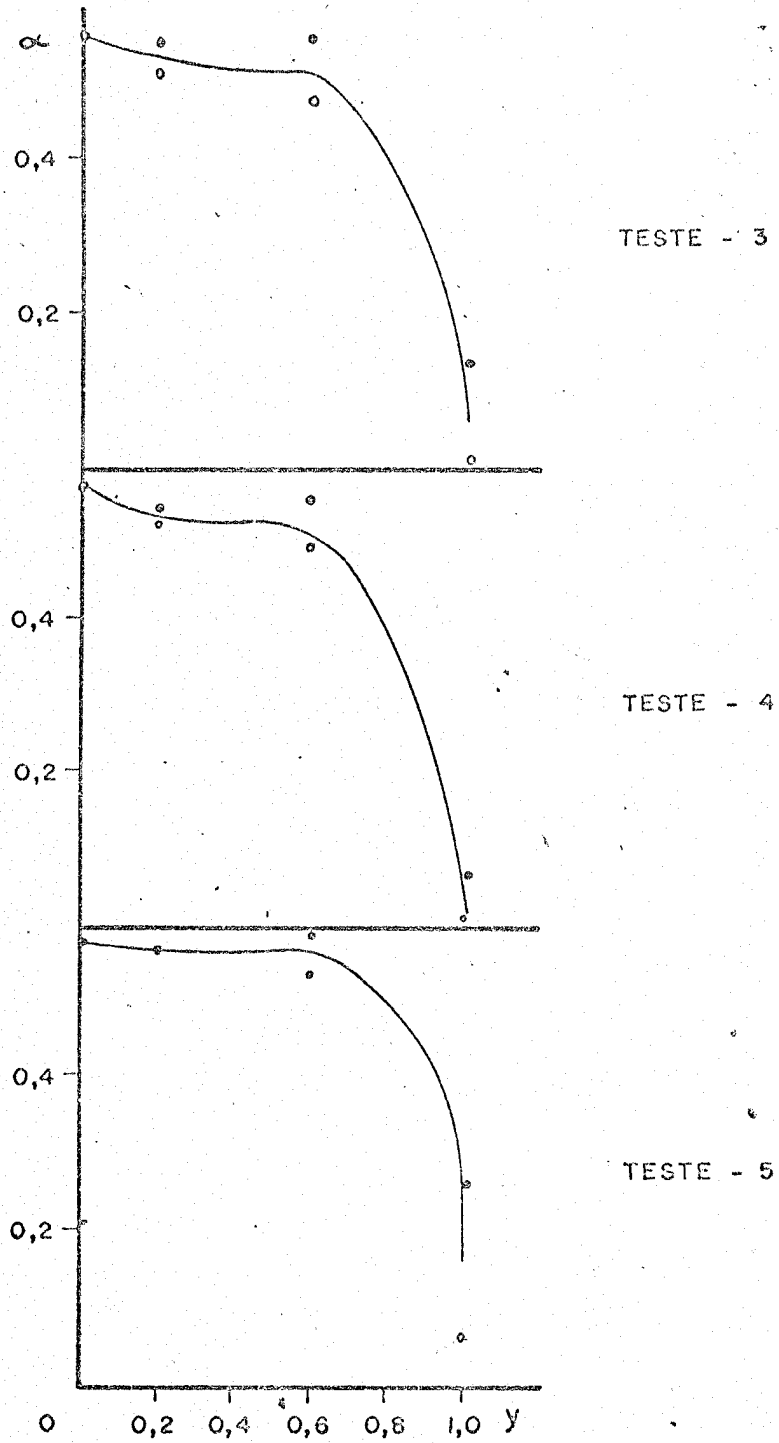
(FIG - 21)

DISTRIBUIÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIO LOCAL NA
CONFIGURAÇÃO TIPO ANULAR

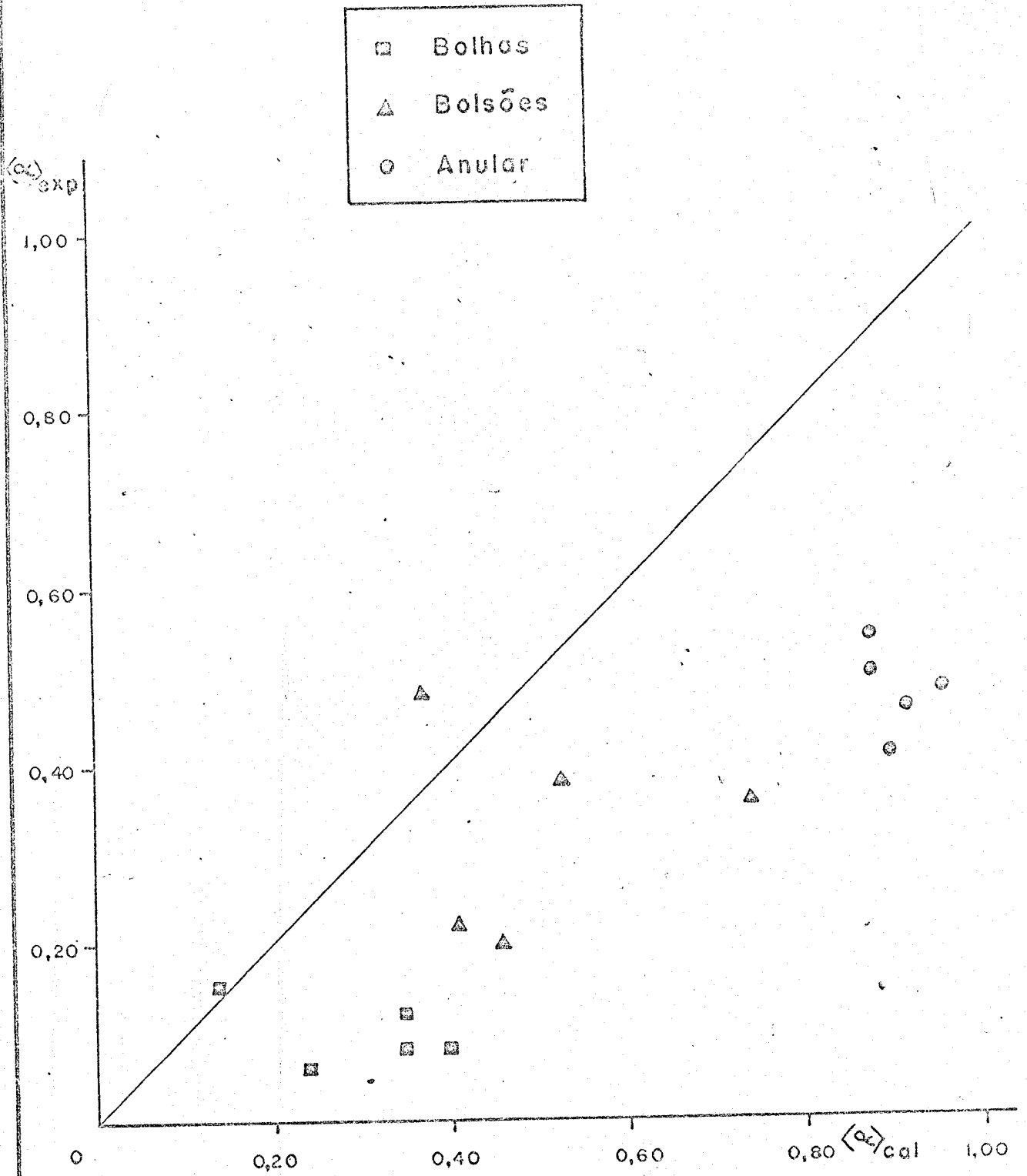


(FIG - 22)

Continuação



(FIG - 22)



(FIG - 23)