

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia de Campinas
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

MATA

MEDIDA DE FRAÇÃO DE VAZIO SUPERFICIAL
NUM ESCOAMENTO BIFÁSICO GAS-LÍQUIDO
PELA TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA

*Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida pelo
Engº Josaphat Dias da Mata e aprovada pela Comissão Julgadora
em 28 de março de 1989.*

Prof. Dr. Antônio Carlos Bannwart

18/89

Autor : Josaphat Dias da Mata
Orientador : Antônio Carlos Bannwart

Março de 1989

BC/910-2513

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

A dissertação "Medida de Fração de Vazio Superficial num Escoamento Bifásico Gás-Líquido pela Técnica de Atenuação de Raios Gama", elaborada por Josaphat Dias da Mata e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora, foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 28 de Março de 1989.

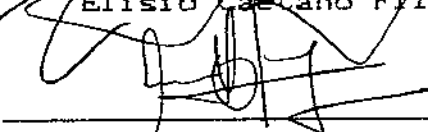
Banca Examinadora



Antonio Carlos Bannwart, Ph.D.



Elísio Caetano Filho, Ph.D.



Osvaldo Vidal Trevisan, Ph.D.

A meus pais,
Elpídio e Maria da Conceição,
pela educação que me deram.

À minha esposa,
Patrícia,
pelo amor, compreensão e incentivo.

A meus filhos,
Fábio e Aline,
pelo carinho, esperança e estímulo.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Antônio Carlos Bannwart, pela sugestão do tema da tese e pela valiosa orientação e estímulo demonstrados durante todo o curso deste trabalho;

Aos professores, funcionários e colegas da UNICAMP, por terem proporcionado um agradável convívio acadêmico.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN) e à Coordenadoria de Projetos Especiais (COPESP), em especial aos engenheiros Gilberto Gomes de Andrade, Valdemir Gutierrez Rodrigues, Amir C. Abraham Assad e Raimundo Dias da Silva, e ao físico Sérgio Perilo, pelo interesse demonstrado, suporte técnico e facilidades proporcionadas;

À PETROBRÁS, pela oportunidade de fazer o Curso de Mestrado em Engenharia de Petróleo;

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

"A mente que se abre a uma nova idéia
jamais retorna ao seu tamanho natural."

(Albert Einstein)

"Se não houver frutos, valeu as flores.
Se não houver flores, valeu as folhas.
Se não houver folhas, valeu a intenção da semente."

(Henfil)

RESUMO

A determinação da fração de vazio em misturas bifásicas gás-líquido é essencial para um completo entendimento da hidrodinâmica dos fluidos associada ao escoamento multifásico. Muitas técnicas de medida de fração de vazio têm sido desenvolvidas, e as já conhecidas, aperfeiçoadas, com o objetivo de medi-las com maior rapidez e precisão.

Neste trabalho empregou-se a técnica experimental de atenuação de raios gama para medir a fração de vazio em uma seção de um tubo cilíndrico de policarbonato, de 104 mm de diâmetro interno, com escoamento bifásico ar-água vertical ascendente. Foram atingidos vários padrões de escoamento bifásico, variando-se as vazões de ar e de água, respectivamente, de 5 a 450 m³/h e de 5 a 25 m³/h. Para cada condição de fluxo foram determinadas as frações de vazio linear e superficial, observando-se também o padrão de escoamento.

A comparação entre os resultados obtidos e os dados de outros autores mostrou haver boa concordância, não só para as frações de vazio, como também para os padrões de escoamento. Além disso, para os casos possíveis, foi calculado o parâmetro de distribuição (Co), parâmetro este que leva em consideração a não uniformidade do fluxo e os perfis de concentração das fases no modelo de Zuber e Findlay.

ABSTRACT

TWO-PHASE FLOW VOID FRACTION MEASUREMENTS USING THE GAMMA RAY ATTENUATION TECHNIQUE

The evaluation of void fraction in gas-liquid two-phase flow is essential for a thorough understanding of the fluid hydrodynamics associated to the multiphase flow. Many void fraction measurement techniques have been developed, and those already known have been improved, so that the goal of measuring them faster and more accurately may be attained.

The present work deals with experimental void fraction measurement in a two-phase air-water flow, by using a gamma-ray attenuation technique. Several upward vertical flow patterns in a 104-mm cylindrical tube were simulated. The air flow varied from 5 to 450 m³/h and the water flow varied from 5 to 25 m³/h. For each flow condition the mean superficial void fractions were determined, based on the measured linear void fractions, and the flow pattern was observed.

The results were compared with some other authors' data and showed a good agreement, not only for the void fractions, but also for the flow patterns. Besides, for all possible cases, the distribution parameter (Co), which takes into account the non uniformity of the flow and the concentration phase profiles in Zuber and Findlay's model, was calculated.

INDICE

Folha de rosto.....	i
Folha de aprovação da Banca Examinadora.....	ii
Dedicatória.....	iii
Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xiii

CAPÍTULO

PÁGINA

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objetivo deste trabalho.....	10

2. MÉTODOS DE MEDIDA DE FRAÇÃO DE VAZIO

2.1. Definição de fração de vazio.....	12
2.2. Classificação dos métodos de medida.....	15
2.3. Seleção do método de medição de fração de vazio.....	18

3. TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA

3.1. Histórico.....	29
3.2. Determinação da expressão de cálculo da fração de vazio linear (meios homogêneos).....	30
3.3. Efeito da distribuição de vazios e a sensibilidade da medida (modelos de distribuição em série e em paralelo)	36
3.4. Obtenção da fração de vazio superficial por integração.	43
3.5. Obtenção da fração de vazio superficial por outras	

formas de quadratura.....	47
3.5.1. Somatório de contagens.....	47
3.5.2. Ponderação de área.....	48
3.5.3. Outras ponderações.....	49
3.6. Seleção da energia e coeficiente de absorção.....	49
3.7. Seleção e característica das fontes de raios gama.....	53
3.8. Seleção do tempo de contagem e atividade da fonte.....	56
 4. APARATO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	
4.1. Circuito Experimental.....	60
4.2. Seção de teste.....	62
4.3. Sistema de medição de radiação.....	62
4.4. Procedimento experimental.....	69
 5. ANÁLISE DE ERRO	
5.1. Critérios adotados para análise de erro.....	73
5.2. Análise do erro na fração de vazio linear.....	73
5.3. Análise do erro na fração de vazio superficial.....	78
5.4. Erro dinâmico para vazios flutuantes.....	86
 6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	
6.1. Análise geral.....	94
6.2. Fração de vazio linear.....	98
6.3. Fração de vazio superficial.....	106
 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	
7.1. Conclusões.....	114
7.2. Sugestões.....	115
 8. NOMENCLATURA.....	117
 9. BIBLIOGRAFIA	
9.1. Referências bibliográficas.....	123
9.2. Bibliografia suplementar.....	128

APÊNDICE

PÁGINA

A. PADRÃO DE ESCOAMENTO.....	131
B. FRAÇÃO DE VAZIO SUPERFICIAL POR PONDERAÇÃO DE ÁREA.....	147
C. TAXA DE DECAIMENTO E MEIA-VIDA.....	150
D. EXEMPLOS DE CÁLCULO DO ERRO ESTATÍSTICO.....	152
E. ANÁLISE DA TRANSIÇÃO BOLHAS-PISTONADO.....	157

ANEXO

PÁGINA

1. DADOS EXPERIMENTAIS - SEÇÃO INFERIOR.....	164
2. DADOS EXPERIMENTAIS - SEÇÃO SUPERIOR.....	195

LISTA DE FIGURAS

FIGURA Nº	TÍTULO	PÁGINA
1.1.	Escoamento bifásico gás-líquido num tubo horizontal.....	7
1.2.	Escoamento bifásico sem escorregamento ("no-slip").....	8
1.3.	Escoamento bifásico com escorregamento ("slip").....	8
2.1.	Modelo dinâmico da distribuição bifásica.....	14
2.2.	Diagrama de uma sonda de resistência.....	19
2.3.	Geometria típica de uma sonda elétrica.....	19
2.4.	Sensor de fibra óptica (sonda óptica desenvolvida por Danel & Delhaye, 1971).....	20
2.5.	Parte ativa do sensor de fibra óptica.....	20
2.6.	Histograma de amplitude típico do sinal do anemômetro (Delhaye, 1969).....	22
2.7.	Sistema de raio-X multifeixe, para determinação de fra- ções de vazio lineares (Smith, 1975).....	23
2.8.	Sistema de raios gama de três feixes (Wesley, 1977).....	24
2.9.	Método de espalhamento de nêutrons para medir fração de vazio (Rousseau & Riegel, 1978; Banerjee et al., 1978).....	25
3.1.	Esquema do método de atenuação de raios gama.....	30
3.2.	Modelos de distribuição de vazio (em série e em paralelo)	37
3.3.	Comparação da fração de vazio levando em conta a distri- buição preferencial.....	40
3.4.	Distribuição preferencial.....	41
3.5.	Distribuição de vazio na seção de teste (Petrick et al.)...	43
3.6.	Seção transversal de uma seção de teste.....	44
3.7.	Coefficiente de absorção linear da água.....	50
3.8.	Coefficiente de absorção linear de materiais leves.....	50
3.9.	Coefficiente de absorção linear de materiais pesados.....	51
3.10.	Coefficiente de absorção de massa da água.....	53
4.1.	Circuito experimental de água e ar.....	61
4.2.	Seção de teste.....	63

4.3. Sistema de medição de radiação.....	65
4.4. Foto: detetor (E), tubo e fonte (D).....	65
4.5. Foto: detalhe da fonte.....	66
4.6. Foto: câmara de mistura e tubo vertical.....	66
4.7. Foto: impressora e equipamentos eletrônicos.....	66
4.8. Foto: sistema de radiação.....	67
4.9. Foto: outro ângulo dos equipamentos eletrônicos.....	67
4.10. Foto: vista de parte do aparato experimental.....	68
4.11. Foto: vista dos rotâmetros de gás e tubulação.....	68
5.1. Erro estatístico da fração de vazio linear.....	77
5.2. Erro estatístico da fração de vazio superficial.....	85
5.3. Esquema do erro dinâmico.....	87
5.4. Erro dinâmico máximo.....	92
5.5. Erro dinâmico para $\lambda = 0,8944$	93
6.1. Mapa de fluxo: seção inferior.....	95
6.2. Mapa de fluxo: seção superior.....	95
6.3. Fração de vazio x cordas (bolhas).....	100
6.4. Fração de vazio x cordas (pistonado).....	100
6.5. Fração de vazio x cordas (agitante).....	101
6.6. Fração de vazio x cordas (agitante).....	101
6.7. Fração de vazio x cordas (anular).....	102
6.8. Fração de vazio x cordas (anular).....	102
6.9. Fração de vazio x cordas (agitante).....	103
6.10. Fração de vazio x cordas (agitante).....	103
6.11. Fração de vazio x cordas (agitante).....	104
6.12. Fração de vazio x cordas (agitante).....	104
6.13. Fração de vazio x cordas (anular).....	105
6.14. Gráfico $(j_g/\alpha_2) \times j$: escoamento em bolhas.....	111
6.15. Gráfico $(j_g/\alpha_2) \times j$: escoamento agitante.....	112
6.16. Gráfico $(j_g/\alpha_2) \times j$: escoamento anular.....	113
A.1. Padrões de escoamento num fluxo vertical.....	133
A.2. Padrões de escoamento num fluxo horizontal.....	133
A.3. Mapa de Baker modificado por Scott (1963).....	136
A.4. Mapa de Baker modificado por Bell (1969).....	136

A.5. Mapa de Hewitt & Roberts (1969).....	137
A.6. Mapa de Govier & Aziz (1972).....	138
A.7. Mapa de fluxo $j_g \times j_l$	139
A.8. Mapa de Taitel et al. (1980).....	140
A.9. Mapa de Mishima & Ishii (1984).....	141
A.10. Mapa de fluxo comparando a transição pistonado-agitante...	142
A.11. Mapa de fluxo de Taitel et al para as condições experi- mentais.....	143
A.12. Mapa de Griffith & Wallis (1961).....	144
A.13. Mapa de Duns & Ros (1963).....	146
A.14. Mapa de Oshinowo & Charles (1974).....	146
B.1. Esquema da área de influência.....	149
B.2. Laterais verticais da área de influência.....	149
B.3. Detalhe do triângulo.....	149

LISTA DE TABELAS

TABELA Nº	TÍTULO	PÁGINA
2.1.	Técnicas de medida de fração de vazio.....	28
3.1.	Dados de algumas fontes de raios gama.....	57
5.1.	Erro estatístico na fração de vazio linear.....	77
5.2.	Erro estatístico na fração de vazio superficial.....	85
6.1.	Vazões e velocidades superficiais.....	96
6.2.	Comparação de α_2 no escoamento em bolhas.....	98
6.3.	Resultados de α_2 : Plano Inferior.....	107
6.4.	Resultados de α_2 : Plano Superior.....	108
6.5.	Determinação do parâmetro de distribuição.....	111

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

O escoamento bifásico é o escoamento de fluidos mais comum na natureza. Dos quatro tipos de fluxo bifásico (gás-líquido, gás-sólido, líquido-líquido e líquido-sólido), os escoamentos gás-líquido são os mais complexos, pois combinam as características da interface deformável e a compressibilidade da fase gasosa.

O escoamento bifásico líquido-gás está presente em inúmeros processos de interesse na engenharia, tais como (a) instalações de produção e transporte de gás e óleo, (b) processos da indústria química, (c) processos e equipamentos de refrigeração, (d) sistemas de elevação de água, (e) indústria nuclear, etc. Nas instalações petrolíferas, o escoamento bifásico é o mais comum, ocorrendo tanto em poços (fluxo vertical), quanto no transporte através de oleodutos e gasodutos (fluxo horizontal ou inclinado), etc.

Quando um gás e um líquido escoam simultaneamente numa tubulação, as fases se distribuem segundo configurações interfaciais particulares, isto é, há uma distribuição topográfica particular de cada fase na mistura bifásica que depende de variáveis operacionais (como a vazão de cada fluido e a pressão do escoamento), variáveis geométricas do sistema (como a forma e a dimensão do duto ou sua inclinação em relação à horizontal) e de propriedades físicas das substâncias envolvidas (como a densidade, a viscosidade e a tensão superficial de cada fluido). Estes fatores combinados determinam certas classes de configuração interfacial, normalmente denominadas de padrões (ou regimes) de escoamento multifásico.

Modernamente, a análise de escoamentos bifásicos é realizada através da formulação de balanços globais de massa,

quantidade de movimento e energia, seja para cada fase, seja para a mistura como um todo. A resolução dessas equações de balanço unidimensionais usualmente passa pela construção de um modelo hidrodinâmico apropriado ao padrão de escoamento observado (bolhas, pistonado, anular, estratificado, agitante, etc.). Uma das principais grandezas a serem modeladas é a fração de vazio superficial, definida como a média temporal da fração da seção transversal do tubo ocupada pela fase gasosa. A fração de vazio de fato intervém em todas as equações de balanço. Do seu conhecimento, portanto, depende a determinação do gradiente axial de pressão e da taxa de transferência de calor procurados.

Sabe-se que em qualquer escoamento de gás e líquido ocorre escorregamento ou deslizamento ("slip") entre as duas fases. Este escorregamento representa a diferença entre as velocidades médias seccionais "in situ" das duas fases (V_g e V_l), e está relacionado com as propriedades físicas dos fluidos envolvidos, o ângulo de inclinação do tubo e outros parâmetros. Por causa desse escorregamento, a fração de vazio real em uma seção transversal do duto difere da calculada com base nos volumes de gás e líquido que entram no tubo. Como resultado, a densidade média da mistura não pode ser calculada tendo como base somente as vazões (ou os títulos) das fases, mas requer também o conhecimento da fração de vazio.

Os métodos que determinam a fração de vazio podem expressar suas propriedades em termos da fração de vazio propriamente dita (α_z) ou através das velocidades médias de líquido e gás. Uma variável bastante conveniente no estudo de escoamentos multifásicos é a denominada velocidade superficial (j), que pode ser definida como a relação entre a vazão volumétrica (Q) e a área total (A), ou seja:

$$j_g = \alpha_z \cdot V_g = \alpha_z \cdot \frac{Q_g}{A_g} = \frac{Q_g}{A} \quad (1.1)$$

$$j_l = (1-\alpha_2) \cdot V_l = (1-\alpha_2) \cdot \frac{Q_l}{A_l} = \frac{Q_l}{A} \quad (1.2)$$

onde: V_g = velocidade real (ou "in situ") do gás;
 V_l = velocidade real (ou "in situ") do líquido;
 j_g = velocidade superficial do gás;
 j_l = velocidade superficial do líquido;
 A_g = área (da seção transversal) ocupada pelo gás;
 A_l = área (da seção transversal) ocupada pelo líquido;
 $A = A_g + A_l$ = área da seção transversal;
 $\alpha_2 = A_g/A$ = fração de vazio superficial;
 Q_g e Q_l = vazão volumétrica de gás e líquido.

A velocidade superficial da mistura é definida como a soma das velocidades superficiais de cada fase, ou seja:

$$j = j_g + j_l = \frac{Q_g}{A} + \frac{Q_l}{A} = \frac{Q}{A} \quad (1.3)$$

A velocidade superficial, às vezes chamada de fluxo volumétrico, representa, pois, a velocidade que um fluido teria se sozinho escoasse através de toda a seção transversal do duto.

A velocidade relativa média (V_r) é dada por:

$$V_r = V_g - V_l \quad (1.4)$$

e a razão de deslizamento (S) é definida como:

$$S = \frac{V_g}{V_l} \quad (1.5)$$

Temos então as seguintes expressões de S :

$$S = \frac{j_g / \alpha_2}{j_l / (1 - \alpha_2)} = \frac{j_g \cdot (1 - \alpha_2)}{j_l \cdot \alpha_2} = \frac{Q_g \cdot (1 - \alpha_2)}{Q_l \cdot \alpha_2} \quad (1.6)$$

ou também:

$$S = \frac{\frac{\dot{m} \cdot x}{\dot{m} (1-x)} / A \cdot \alpha_2 \cdot \rho_g}{\rho_l} = \frac{\rho_l \cdot x \cdot (1 - \alpha_2)}{\rho_g \cdot (1 - x) \cdot \alpha_2} \quad (1.7)$$

onde: ρ = densidade (ou massa específica);

$\dot{m}_g = \rho_g \cdot Q_g$ = vazão mássica de gás;

$\dot{m}_l = \rho_l \cdot Q_l$ = vazão mássica de líquido;

$\dot{m} = \dot{m}_g + \dot{m}_l$ = vazão mássica total;

$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}}$ = título ou fração mássica.

Das equações acima, segue-se que:

$$\alpha_2 = \frac{Q_g}{S \cdot Q_l + Q_g} \quad (1.8)$$

$$\text{ou:} \quad \alpha_2 = \frac{j_g}{S \cdot j_l + j_g} \quad (1.9)$$

$$\text{ou também:} \quad \alpha_2 = \frac{\rho_l \cdot x}{S \cdot \rho_g \cdot (1 - x) + \rho_l \cdot x} \quad (1.10)$$

Outra variável usada no fluxo bifásico é o "hold-up" (fração volumétrica líquida) - também chamado de "liquid hold-up" ou "in-situ hold-up". É definida como a fração volumétrica do tubo ocupada pelo líquido, isto é:

$$H_l = \frac{V_l}{V} = \frac{\text{Volume de líquido}}{\text{Volume total}} \quad (1.11)$$

Então, considerando-se as frações de vazio superficial e volumétrica iguais, tem-se que

$$\alpha_2 = 1 - H_l \quad (1.12)$$

Alguns autores definem também a fração volumétrica de entrada (λ_l) - "no-slip hold-up" ou "input hold-up" -, assumindo que o gás e o líquido se movem à mesma velocidade, ou seja:

$$\lambda_l = \frac{Q_l}{Q_l + Q_g} = \frac{Q_l}{Q} = \frac{j_l}{j} \quad (1.13)$$

A densidade média da mistura bifásica é imprescindível para o cálculo da perda de carga. Esta densidade pode ser definida de várias maneiras:

* densidade bifásica com escorregamento ("slip density"):

$$\rho_s = \alpha_2 \cdot \rho_g + (1 - \alpha_2) \cdot \rho_l \quad (1.14)$$

* densidade bifásica sem escorregamento ("no-slip density"):

$$\rho_n = \lambda_l \cdot \rho_l + \lambda_g \cdot \rho_g \quad (1.15)$$

onde: $\lambda_g = 1 - \lambda_l = \frac{j_g}{j}$

* densidade bifásica cinética ("kinetic density"):

$$\rho_k = \rho_g \cdot \frac{\lambda_g^2}{\alpha_2} + \rho_l \cdot \frac{\lambda_l^2}{1 - \alpha_2} \quad (1.16)$$

Em um escoamento monofásico, o gradiente axial de pressão compõe-se de três termos: gravitacional, de atrito e acelerativo. De fato, da equação de balanço de quantidade de movimento resulta que:

$$\frac{dp}{dz} = \rho \cdot g \cdot \sin \theta + 2 \cdot \frac{f}{D} \cdot \rho \cdot j^2 + \rho \cdot j \cdot \frac{dj}{dz} \quad (1.17)$$

onde: θ = inclinação do tubo em relação à horizontal;

D = diâmetro da tubulação;

f = fator de atrito.

A mesma equação para um fluxo bifásico pode ser expressa genericamente como:

$$\frac{dp}{dz} = \rho_s \cdot g \cdot \sin \theta + 2 \cdot \frac{f_{tp}}{D} \cdot \rho_{tp} \cdot j^2 + \left(\frac{dp}{dz} \right)_{ac} \quad (1.18)$$

onde: f_{tp} = fator de atrito da mistura bifásica;

ρ_{tp} = densidade da mistura bifásica;

$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{ac}$ = gradiente de pressão devido à aceleração.

Para a componente gravitacional (1º termo do 2º membro), deve-se usar sempre ρ_s , conforme indicam vários pesquisadores; necessita-se, então, da medição da fração de vazio (ou, pelo menos, de uma correlação empírica para α_2). Para a componente de atrito (2º termo do 2º membro), os fatores f_{tp} e ρ_{tp} são determinados por equações que dependem do modelo adotado (modelo homogêneo, de fases separadas, da similaridade, etc.). A densidade bifásica cinética (ρ_k), por exemplo, é usada por Dukler no modelo de similaridade; todavia, a maioria dos pesquisadores usa a densidade bifásica sem escorregamento (ρ_m) no termo de atrito. A

parcela acelerativa (3º termo do 2º membro) nem sempre é desprezível. Seu cálculo também é função do modelo adotado.

A Fig. 1.1 mostra um trecho de um duto com escoamento bifásico, apontando algumas das variáveis citadas. A Fig. 1.2 mostra um escoamento bifásico na condição sem escorregamento entre as fases ("no-slip"), ou seja, $V_g = V_l$ e $H_l = \lambda_l$. A Fig. 1.3 mostra um escoamento bifásico com escorregamento entre as fases ("slip"), ou seja, $V_g > V_l$ e $H_l > \lambda_l$.

No modelo homogêneo (empregado por vários pesquisadores), as velocidades das fases são iguais em uma mesma seção transversal. Então, $V_g = V_l$ e, portanto, $S = 1$. Daí:

$$\alpha_h = \frac{Q_g}{Q_l + Q_g} = \frac{j_g}{j_l + j_g} = \lambda_g \quad (1.19)$$

onde: α_h = fração de vazio superficial no modelo homogêneo.

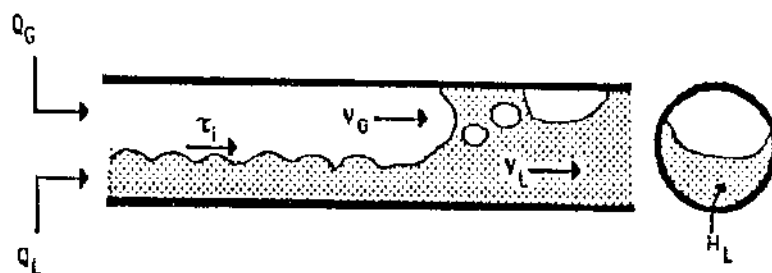


Fig. 1.1. Escoamento bifásico gás-líquido num tubo horizontal

1. SEM ESCORREGAMENTO $V_g = V_l \rightarrow H_l = \lambda_l$

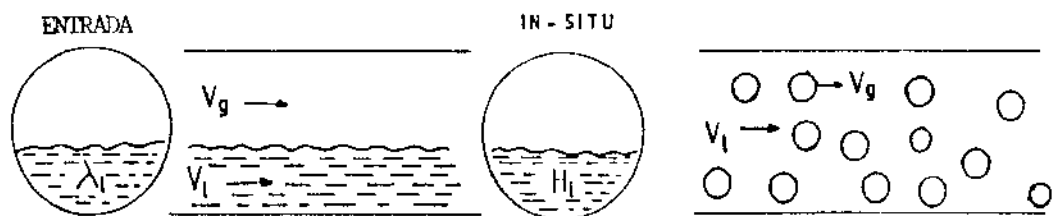


Fig. 1.2. Escoamento bifásico sem escorregamento ("no-slip")

2. COM ESCORREGAMENTO $\rightarrow V_g > V_l \rightarrow H_l > \lambda_l$

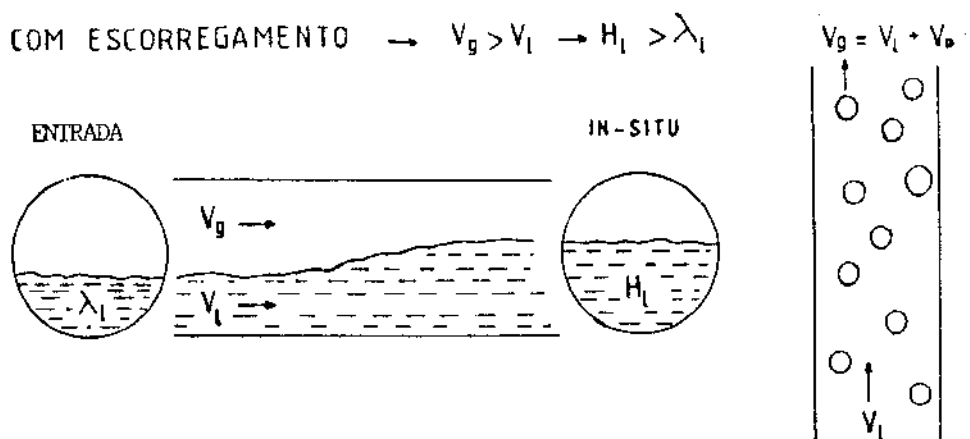


Fig. 1.3. Escoamento bifásico com escorregamento ("slip")

A fração de vazio se aproxima do calculado pelo modelo homogêneo a altas pressões e com alto fluxo de massa, mas normalmente se desvia bastante deste valor. Um modelo simples para o cálculo de α_2 é o que assume que há, em toda a seção transversal, uma velocidade relativa uniforme (por ex., o modelo de Wallis, 1962 [1]). Modelos mais sofisticados levam em conta a distribuição radial das velocidades, usando fatores de distribuição empíricos (como foi feito por Zuber e Findlay, 1965 [2]).

Alguns autores ainda preferem usar correlações empíricas para α_2 , como, por exemplo, a correlação de Lockhart e Martinelli [3]. Esta correlação não leva em consideração a inclinação do tubo e nem o padrão de escoamento. Segundo Lockhart e Martinelli,

$$\alpha_2 = \frac{\phi_l - 1}{\phi_l} \quad (1.20)$$

onde: ϕ_l é um fator de atrito, definido como a razão entre perdas de carga, como se segue:

$$\phi_l^2 = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_l} \quad (1.21)$$

onde: dp/dz = gradiente de pressão da mistura bifásica;
 $(dp/dz)_l$ = gradiente de pressão da fase líquida escoando sozinha.

A fração de vazio também pode ser calculada pela equação de Chisholm (1967), que é função do parâmetro de Lochart Martinelli (X):

$$\alpha_2 = \left(1 + X^{0,8} \right)^{-0,378} \quad (1.22)$$

$$\text{onde:} \quad X = \left[\frac{(dp/dz)_l}{(dp/dz)_g} \right]^{1/2} \quad (1.23)$$

$(dp/dz)_g$ = gradiente de pressão da fase gasosa escoando sozinha.

O desenvolvimento de modelos detalhados e precisos da fração de vazio requer a consideração dos padrões de escoamento específicos. Tradicionalmente as regiões de ocorrência dos padrões de escoamento existentes são grafados em mapas de fluxo, cujas coordenadas, em princípio, podem ser representadas por parâmetros arbitrários. Alguns autores sugerem como coordenadas as velocidades superficiais de ambas as fases, já que são parâmetros determinantes dos padrões de escoamento. Entretanto, postula-se que a estrutura do escoamento deva depender diretamente dos parâmetros geométricos, da fração de vazio e da área de interface entre as duas fases. No Apêndice A é apresentado um resumo dos diferentes critérios adotados na caracterização dos padrões de escoamento bifásico e na construção de mapas de fluxo.

1.2. Objetivo deste trabalho

A produção e o transporte de misturas bifásicas em tubulações têm sido praticados em escala crescente, sendo particularmente evidenciados nos campos terrestres e marítimos de produção de hidrocarbonetos. Aqui, o transporte bifásico limita os custos de construção de dutos e reduz despesas operacionais ao centralizar os equipamentos de processo de óleo e gás.

A importância da concentração volumétrica de gás (representada pela fração de vazio) e do padrão de escoamento da mistura são evidentes na determinação de parâmetros fundamentais do sistema.

O objetivo deste trabalho é o de estudar e pôr em

prática uma técnica de medição de fração de vazio num escoamento bifásico gás-líquido, já conhecida e de ampla aplicação. Nenhuma das técnicas disponíveis é universal, devendo-se selecionar a mais apropriada em função de fatores como: tipo de fração de vazio que se deseja medir, padrão de escoamento, faixa de variação de fração de vazio, dependência tecnológica, etc. Além disso, escolhida a técnica, uma análise dos erros decorrentes do processo de medida deve ser feita.

São discutidos vários métodos de medição de fração de vazio. A técnica selecionada - atenuação de raios gama - permite a medição numa ampla faixa de fração de vazio, independe do padrão de escoamento da mistura, além de não interferir no escoamento, o que permite que seja amplamente utilizada nas instalações de petróleo. Possui ainda como vantagem a possibilidade de se medir fração de vazio linear ou superficial. Pode ser usada em escoamentos verticais, horizontais ou inclinados.

A técnica de atenuação de raios gama é usada para medir a fração de vazio em um tubo transparente (de policarbonato), cilíndrico, com escoamento vertical ascendente de água e ar. A transparência de um grande trecho do circuito experimental permite a visualização do padrão de escoamento existente. A fração de vazio é medida em diversas cordas selecionadas da seção transversal. A fração de vazio superficial (ou seja, na seção transversal) é obtida através de vários métodos de integração da fração de vazio linear.

Este estudo contribui para uma melhor compreensão do escoamento bifásico em tubulações, já que com as medidas da fração de vazio linear (para cada padrão de escoamento), pode-se obter os perfis da fração de vazio ao longo do diâmetro do tubo, pode-se calcular a fração de vazio superficial de uma dada seção, etc. Estes valores podem ser correlacionados com diversos parâmetros de interesse, comparados com os resultados de modelos ou com outros dados experimentais. Podem, também, ser usados diretamente nas equações que os exijam.

2. MÉTODOS DE MEDIDA DE FRAÇÃO DE VAZIO

2.1. Definição de fração de vazio

Em um escoamento bifásico gás-líquido, cada parte do campo de escoamento é ocupada por uma fase ou pela outra. A fração de vazio pode ser definida como a fração de área da seção transversal do tubo ocupada pelo gás, ou seja:

$$\alpha_2 = \frac{A_g}{A} \quad (2.1)$$

onde: A_g = área (da seção transversal) ocupada pelo gás;
 A = área total (da seção transversal) do duto.

Neste caso, a fração de vazio é denominada superficial ou na seção.

Para propósitos práticos, há quatro tipos principais de medição de fração de vazio:

* Medições volumétricas: aqui requer-se a fração de vazio média em um trecho do duto. Em princípio, isto pode ser obtido integrando-se muitas das medições mais localizadas, embora seja tedioso e caro, principalmente no caso de medições transientes. Um método conveniente e satisfatório é o uso de válvulas de fechamento rápido. Este método altera o fluxo a montante do ponto de separação e é particularmente intrusivo. Se um duto de comprimento L (suficiente para eliminar flutuações locais) e seção transversal A for repentinamente isolado e o volume total de gás for medido, então a fração de vazio volumétrica (α_3) será:

$$\alpha_3 = \frac{V_g}{A \cdot L} \quad (2.2)$$

onde: V_g = volume de gás medido no trecho.

* Medições na seção transversal: a fração de vazio média é calculada em uma seção transversal. Pode-se obtê-la integrando as medidas de fração de vazio das cordas sobre uma seção transversal, ou então usando a técnica de um feixe ("one-shot technique"). Também, usando-se a técnica de dispersão de nêutrons, pode-se conseguir uma medição direta. Outra alternativa (menos precisa) seria usar os medidores de impedância. A medição na seção transversal é também chamada de medição superficial ou medição bidimensional. A equação 2.1 é a definição da fração de vazio superficial.

* Medições lineares: aqui incluem-se as medições feitas através das cordas ou do diâmetro da seção transversal. Obtém-se a medição linear normalmente através de métodos de atenuação de radiação.

Em uma dada seção transversal de um duto por onde flui uma mistura bifásica, a fração de vazio linear instantânea pode ser descrita pela seguinte expressão [4]:

$$\alpha(t) = \alpha_m + \sigma_{\alpha}(t) \quad (2.3)$$

onde: α_m é a fração de vazio linear média em um intervalo de tempo t ;

$\sigma_{\alpha}(t)$ é um termo residual, função do tempo, com média zero.

A fração de vazio linear média é dada por:

$$\alpha_m = \frac{1}{t} \cdot \int \alpha^*(t) dt \quad (2.4)$$

$$\alpha^*(t) = \frac{\sum X_g(t)}{X_o} = \frac{L_g}{Ltp} \quad (2.5)$$

onde: X_g = diâmetro característico da fase gasosa presente no ins_

tante t , conforme Fig. 2.1;

X_0 = diâmetro do duto ou comprimento da corda considerada;
 L_g = soma dos comprimentos das camadas de gás (numa corda);
 L_{tp} = soma dos comprimentos das camadas de mistura bifásica.

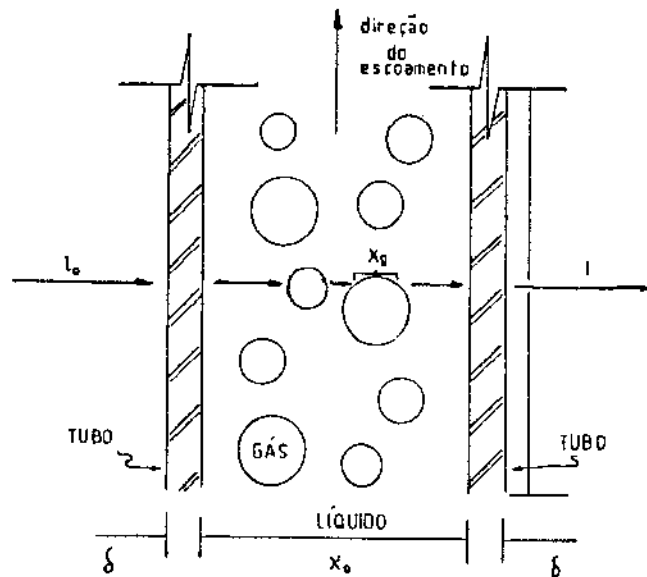


Fig. 2.1. Modelo dinâmico da distribuição bifásica

* Medições locais (ou pontuais): aqui a fração de vazio é medida numa posição particular do duto (ou seja, um ponto na seção transversal). Geralmente esta fração de vazio representa a média temporal num ponto e é dada por [5]:

$$\alpha(m) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_g}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum t_g}{T} \quad (2.6)$$

onde T_g é a duração cumulativa do tempo de residência da fase

gasosa no ponto m durante o período total (T) do experimento.

No caso de um grande número de leituras instantâneas, o valor médio da fração de vazio no tempo e no espaço é então:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\iint \alpha(r,t) \, dr \, dt}{\int dr \cdot \int dt} \quad (2.7)$$

2.2. Classificação dos métodos de medição

Houve inegáveis progressos nos métodos de medição de fluxos bifásicos nos últimos trinta anos. A importância de boas técnicas de medição foi reconhecida por Hewitt [6] e Jones e Delhay [7], que analisaram o problema e mostraram estes métodos de medição numa maneira organizada.

Hewitt classifica as formas de medição em dois grupos: (a) por parâmetro e (b) por "tipo" de método empregado.

A classificação por parâmetro considera todos os métodos aplicados à medição de uma variável particular (como fração de vazio, por ex.). Os parâmetros foram agrupados de acordo com sua aplicação. Assim, são discriminados:

(1) Parâmetros de primeira ordem: são os de relevância direta ao projeto ou sistema, tais como queda de pressão, fração de vazio, coeficiente de transferência de calor, vibração, etc.

(2) Parâmetros de segunda ordem: são os parâmetros de pesquisa necessários para obter uma melhor compreensão do sistema, tais como padrões de escoamento, espessura de filme, fração de vazio local, distribuição de velocidades ou de tamanhos de bolha.

(3) Parâmetros de terceira ordem: a compreensão das flutuações ou instabilidades (característica do fluxo bifásico),

tais como velocidade local instantânea, temperatura, pressão ou tensão cisalhante na parede, auxilia o desenvolvimento de melhores métodos ou sistemas. Estes parâmetros flutuantes são referidos como de terceira ordem.

Quanto aos tipos de métodos empregados na medição de fluxo bifásico, Hewitt [6] inclui:

(1) Métodos ópticos: incluem processos de modulação da luz (absorção, dispersão, interferência, refração, excitação) e métodos de gravação de sinal (eletrônico ou fotográfico). Com o advento do "laser", novos métodos têm surgido (anemometria laser Doppler, interferometria holográfica).

(2) Métodos de absorção¹ ou de espalhamento de radiação: o uso de radiação como técnica de medição de fração de vazio é factível mesmo em sistemas opacos, e não provoca distúrbios no escoamento (método não-intrusivo). Nesta técnica usa-se o fato de que as duas fases têm diferentes capacidades de atenuação e espalhamento da radiação incidente. Vários tipos de radiação têm sido usados em escoamento bifásico: a absorção de raios X ou gama pode ser usada para medir a fração de vazio, determinar o padrão de escoamento através da forma da flutuação temporal do sinal de saída, ou para determinar a espessura do filme em fluxo anular; a absorção de raios beta ou de feixes de nêutrons também tem sido usada.

A radiação também pode se dispersar na mistura bifásica, sendo a radiação dispersa de diferentes energias ou formas daquela da radiação incidente, podendo permitir uma medição local.

¹Absorção (Física): Processo pelo qual a radiação transfere parte ou toda a sua energia para o material com o qual interage. (Química): Incorporação das moléculas de uma substância no volume de outra substância.

Contudo, a sensibilidade das técnicas de dispersão é baixa, pois os feixes dispersos têm baixa intensidade.

Para medir espessuras de filme líquido ou frações de vazio, pode-se montar uma fonte radioativa (radionuclídeo) numa sonda colocada dentro da tubulação com fluxo bifásico. Um detetor de radiação externo ao tubo mede a radiação que passa através de uma porção do tubo e da parede. Em outros experimentos, adiciona-se um soluto radioativo ao fluido. Detetores situados externamente medem a radiação emitida pelo fluido bifásico. A quantidade de radiação emitida é relacionada ao "hold-up" na seção de teste.

(3) Métodos de capacitância e condutância: a diferença na condutância ou capacitância entre as fases líquida e gasosa pode ser usada para medir vários parâmetros, como espessura de filme (Hewitt et al, 1962) ou fração de vazio (Olsen, 1967, apud Hewitt [6]).

(4) Métodos traçadores: um traçador é adicionado a uma das fases e, através de amostragem a jusante ou de detecção do traçador, pode-se obter informação sobre a mistura, as velocidades do fluxo, etc.

(5) Métodos de transferência de calor e massa: por ex., o uso de anemometria de fio quente para medir velocidade local e fração de vazio local (Hsu et al, 1963), a técnica do filme quente para medição de tensão cisalhante na parede (Shiralkar, 1970, apud Hewitt [6]).

(6) Métodos empregando o efeito de Seebeck (termopar): termopares são usados para, por exemplo, medir a temperatura da parede ou do fluido, ou em estudos de campos de temperatura localmente flutuantes em ebulição (Siboul, 1976).

(7) Métodos de pressão diferencial e quantidade de movimento:

pressão diferencial é um parâmetro importante e já foi usado para medição de título (Chisholm, 1972) ou em medições locais (Banerjee *et al*, 1978).

(8) Métodos de separação de fluxo: nesta classe, os fluxos são fisicamente separados e medidos. Exemplos: métodos de sucção do filme líquido (Cousins *et al*, 1965), métodos de válvulas de fechamento rápido para medir fração de vazio (Agostini e Premoli, 1971). Neste método uma seção do tubo é isolada, fechando simultaneamente as válvulas de entrada e saída da seção, sendo o líquido drenado e medido, o que permite o cálculo da fração de vazio.

Jones e Delhaye [7] apresentaram um sumário das técnicas de medida transientes e estatísticas, incluindo uso de microtermopares, sondas elétricas e ópticas, anemometria de filme quente, atenuação de fótons, etc.

2.3. Seleção do método de medição de fração de vazio

Muitos métodos (ou técnicas) foram desenvolvidos para a medição da fração de vazio, conforme citado acima. Segue um resumo das principais técnicas usadas:

(1) Sonda elétrica: consiste de dois eletrodos inseridos na mistura bifásica (método intrusivo). Aplicando-se um potencial elétrico entre os elementos, observa-se uma corrente elétrica, que é uma medida direta da condutividade da mistura entre os eletrodos. A esta medida está relacionada a concentração volumétrica relativa dos fluidos condutores (líquido) e não-condutores (gás). O primeiro requisito para a aplicação deste método é que haja uma diferença significativa entre as condutividades elétricas das fases (Figs. 2.2 e 2.3).

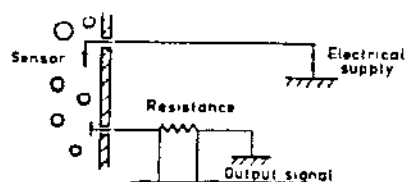


Fig. 2.2. Diagrama de uma sonda de resistência

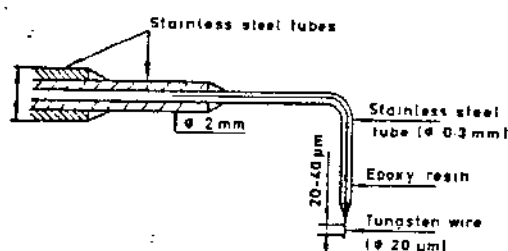


Fig. 2.3. Geometria típica de uma sonda elétrica

Este método foi estudado por vários pesquisadores, como Olsen, Welle, Galaup (1975), Delhay e Achard (1977). Também pode ser usado para medir velocidades interfaciais.

As sondas elétricas são também chamadas sondas de condutividade ou sondas de resistência.

(2) Sonda óptica: é sensível a mudanças no índice de refração do meio, o que torna possível medir fração de vazio local ou frequências de passagens interfaciais, mesmo de um fluido não-condutor. Usando dois sensores e um método de correlação cruzada, pode-se obter a velocidade de trânsito (Galaup, 1975). Uma sonda óptica proposta por Danel e Delhay (1971) e desenvolvida por Galaup (1975) consiste de uma única fibra óptica de 40 μm de diâmetro. O elemento ativo da sonda é obtido dobrando-se a fibra em forma de U. Toda a fibra, exceto a curva em

U, é protegida por um tubo de aço inoxidável de 2 mm de diâmetro (Fig. 2.4). A parte ativa da sonda tem um diâmetro característico de 0,1 mm (Fig. 2.5).

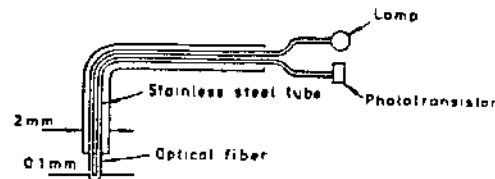


Fig. 2.4. Sensor de fibra óptica (sonda elétrica desenvolvida por Danel & Delhaye, 1971)

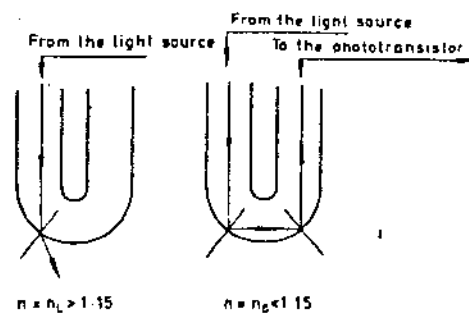


Fig. 2.5. Parte ativa do sensor de fibra óptica

A análise do sinal é realizada através de um ajuste de sinais limites, o que permite que a resposta seja transformada em um sinal binário. A fração de vazio é função desses limiares

ajustados. Resultados experimentais para perfis de fração de vazio num fluxo bifásico de Freon e de ar-água foram obtidos por Galaup (1975). Charlot et al usaram, em 1978, sondas ópticas para determinar perfis de fração de vazio num canal contendo quatro tubos esfriados por Freon.

As sondas ópticas estão em contínuo desenvolvimento, podem operar em sistemas com pressão e temperatura elevadas, e dão melhor resposta que as sondas de resistência. Seu custo, porém, é bem mais alto.

(3) Anemômetro de fio quente ou anemômetro térmico: pode medir a fração de vazio local, a velocidade instantânea ou a intensidade de turbulência da fase líquida. Consiste de um cilindro de vidro de pequeno diâmetro coberto com platina e conectado entre seus terminais a um fio condutor de eletricidade. A resistência da sonda tem que ser ajustada, por meio de uma corrente elétrica, ao valor correspondente à temperatura da sonda. As mudanças de temperatura da sonda são devidas à transferência de calor, que depende da fase em contato com a sonda. Ocorrendo uma mudança de resistência decorrente de uma mudança de temperatura, a unidade de controle responderá com uma mudança na corrente, a fim de manter a temperatura da sonda constante.

A maior vantagem do anemômetro térmico sobre a sonda elétrica é que ele se autocontém e não requer um eletrodo secundário. A desvantagem é que, além de provocar distúrbios no fluxo, os extremos são frágeis, tempo de vida curto e custo inicial alto.

É evidente que se os sinais do gás e do líquido pudessem ser separados, a estrutura turbulenta da fase líquida poderia ser obtida. Para conseguir esta separação, Delhaye (1969) e Galaup (1975) usaram a função densidade de probabilidade versus o sinal de saída (Fig. 2.6). Em primeira aproximação, as frações de vazio locais eram calculadas como a razão da área hachurada pela área total. Outros pesquisadores que usaram este método foram Serizawa et al (1975), Herringe & Davis (76), Remke (76).

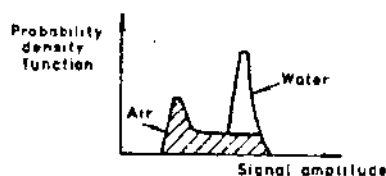


Fig. 2.6. Histograma de amplitude típico do sinal do anemômetro (Delhay, 1969)

(4) Válvulas de fechamento rápido: são instaladas de cada lado da seção de teste, para se obter uma medição direta. Devem ser capazes de bloquear o fluxo de líquido e gás rápida e simultaneamente. Após o fechamento das válvulas, o volume de líquido é drenado e medido, sendo comparado com o volume total da seção de teste para fornecer a fração de vazio. A principal desvantagem desta técnica é que ela fornece somente valores médios de fração de vazio sobre todo o duto, não podendo ser usada para medir sua distribuição detalhada ou variação temporal.

Esta técnica tem sido muito usada em sistemas adiabáticos a baixas pressões. Roumy [8] usou esta técnica e correlacionou a fração de vazio com as velocidades superficiais dos fluidos para três diâmetros de tubos diferentes: 16, 20 e 32 mm, elaborando expressões que permitem calcular a fração de vazio para o escoamento em bolhas.

Para sistemas operando com pressão e temperatura altas, válvulas remotamente operadas (solenóides) seriam uma solução.

(5) Técnica de atenuação de partículas beta: as partículas β (ou raios β) são elétrons de alta energia emitidos pelo núcleo de um átomo em decaimento. Elas podem ser usadas para medir fração de vazio, porém seu alcance é pequeno. Por exemplo, alguns centímetros de água podem parar completamente um feixe de partículas β de 2 MeV. As vantagens (em relação às partículas γ) é que apresentam maior sensibilidade (70 vezes maior) e a blindagem

não é obstáculo. A alta atenuação sofrida pelas partículas β em materiais densos é sua maior desvantagem. Isto limita a espessura do meio e das paredes do duto, além de impor um limite mínimo no valor da fração de vazio. Requer-se uma fonte radioativa grande e compacta para se obter um feixe de alta intensidade. No entanto, a alta intensidade aumenta a fração de partículas β que é absorvida pelo próprio material da fonte (efeito de auto-blindagem). Assim, deve-se determinar uma fonte de tamanho adequado a fim de otimizar a intensidade do feixe.

(6) Técnica de atenuação de raios X: o raio X é uma radiação eletromagnética de comprimento de onda menor que o da luz visível, sendo produzido pelo bombardeamento de um alvo metálico com elétrons rápidos em alto vácuo. O uso de um tubo de raios X como fonte radioativa para medir fração de vazio tem sido estudado por muitos pesquisadores. Várias técnicas têm sido usadas, tais como: densitômetro unifeixe, de feixe duplo e multifeixe. Para todos os casos citados, quanto menor a fração de vazio, maior o erro, que pode ser minimizado aumentando-se a taxa de contagem.

Smith (1975) usou um sistema multifeixe para determinar a fração de vazio num tubo horizontal (Fig. 2.7). Wesley (1977) usou um densitômetro de três feixes, conforme pode ser visto na Fig. 2.8. Lottes (1967) usou o método do feixe único ("one-shot").

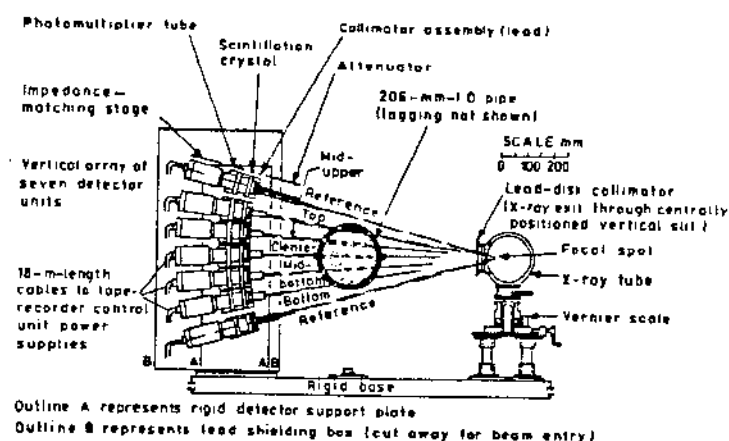


Fig. 2.7. Sistema de raio-X multifeixe, para determinação de frações de vazio lineares (Smith, 1975)

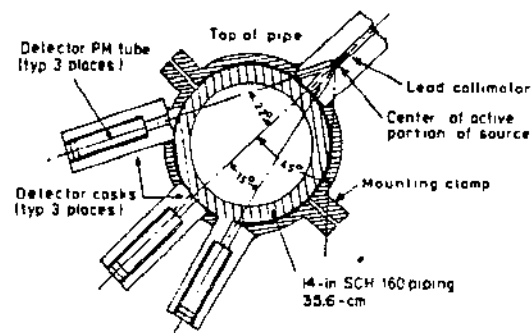


Fig. 2.8. Sistema de raios gama de três feixes (Wesley, 1977)

A operação de máquinas de raio X requer um perito e, em muitas aplicações, isto não é exequível. Outra consideração importante é o custo.

(7) Técnica de atenuação e espalhamento de nêutrons: este é o método mais adequado para se medir a fração de vazio linear nos escoamentos transientes. Tem sido usado para medir a fração de vazio em reatores nucleares. A fonte deve ser forte o bastante para adequar a estatística de contagem em medições transientes. Untermyer et al (1961) usaram o método, medindo a razão de cádmio e fios de cobalto colocados em várias posições do núcleo do reator, relacionando estas razões com os valores de fração de vazio local.

Na técnica de espalhamento de nêutrons, deve-se posicionar o detetor formando um ângulo com o feixe de nêutrons para contar o número de nêutrons espalhados naquela direção (Fig. 2.9).

Alguns pesquisadores que usaram estas técnicas foram Untermyer, Thier et al (1961), Sha e Bonilla (1965) e Banerjee et al (1976).

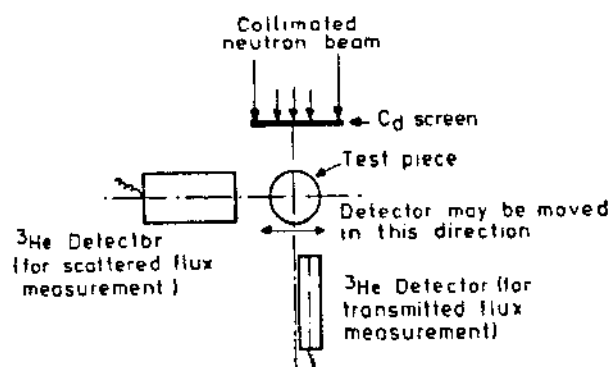


Fig. 2.9. Método de espalhamento de nêutrons para medir fração de vazio (Rousseau & Riegel, 1978; Banerjee et al, 1978)

(8) Técnica de atenuação e espalhamento de raios gama: os raios gama são radiações eletromagnéticas com comprimento de onda curto, de origem nuclear (intervalo de energia de 10 keV a 9 MeV). Esta técnica usa essencialmente os mesmos conceitos das técnicas de atenuação de raio X. Já que um feixe de raios γ pode ser obtido da desintegração nuclear de fontes radioativas naturais, sua intensidade depende de sua meia-vida. As fontes de meia-vida curta requerem calibrações constantes, ao passo que as meia-vida longa são de difícil manuseio. A alta capacidade de penetração de um feixe de raios γ permite o seu uso para medir frações de vazio mesmo em geometrias complexas.

Esta técnica tem sido desenvolvida ao longo do tempo e a precisão com que a fração de vazio pode ser medida tem sido aperfeiçoada continuamente.

Cook [9] conduziu vários testes com modelos em acrílico. Os resultados indicaram que o erro entre a fração de vazio medida e a real aumenta com o distanciamento tubo-detetor e com a aproximação fonte-tubo. Observaram-se erros de até 93%. No entanto, os modelos estudados por Cook representam casos extremos de distribuição preferencial em fluxo bifásico, só obtidas no

escoamento anular.

Levert e Helminski [10] fizeram uso de duas fontes de energia na técnica de atenuação gama, ao invés da técnica convencional de uma só faixa energética. A nova técnica reduz os erros na fração de vazio que surgem das flutuações inerentes ao fluxo bifásico. No entanto, é alta a complexidade resultante, devido à dificuldade de diferenciar um fóton de alta energia espalhado e um de baixa energia não espalhado.

Kennett et al [11] discutiram a vantagem de se usar a técnica de espalhamento de raios gama de alta energia sobre a técnica de atenuação de raios gama. Eles usaram um feixe colimado de raios γ (com energia da ordem de 9 MeV) extraído de um reator nuclear. Concluíram que os erros encontrados são dez vezes menores que os comparados com a técnica de atenuação. Entretanto, esta técnica requer um tempo de contagem muito longo, o que inviabiliza o seu uso, por exemplo, para medições transientes.

Ferrel e McGee [12] desenvolveram um sistema de colimação de raios γ tipo unifeixe ("one-shot") capaz de medir fração de vazio com melhor precisão que a técnica usada por Gardner, Bean e Ferrel [13]. Os erros caíram para 5% para frações de vazio maiores que 35%.

(9) Técnica do traçador radioativo dissolvido: adicionando-se um traçador radioativo de meia-vida curta na fase líquida de uma mistura bifásica, obtém-se uma intensidade de radiação emitida que depende da quantidade de líquido na mistura. Seguindo-se o movimento do traçador ao longo do canal, pode-se determinar a velocidade média do líquido (valor real, ou seja, a velocidade *in situ*). Para se calcular a fração de vazio fazendo uso desta velocidade, deve-se supor que as duas fases estão separadas e cada fase tem uma velocidade constante. Esta hipótese pode levar a valores imprecisos da fração de vazio. As desvantagens desta técnica são: só pode ser usada em sistemas fechados (para se recuperar o material radioativo) e produz uma alta radiação de fundo (requer uma blindagem de todo o arranjo experimental).

Além destes citados, existem ainda outros métodos de medição de fração de vazio, como o medidor de impedância ("impedance void gauge"), que é indicado para dutos não circulares com escoamento homogêneo. Este método é sujeito a ambigüidades devido à distribuição de vazios.

Analizados os métodos principais para medição de fração de vazio, selecionou-se a técnica de atenuação de raios gama para este trabalho, pois:

- * permite a medição de fração de vazio linear e superficial;
- * não é intrusivo (não interfere no escoamento);
- * permite a medição numa ampla faixa de fração de vazio;
- * tem facilidade e flexibilidade de instalação;
- * apresenta facilidade de manuseio do sistema fonte-detetor e sistema eletrônico associado;
- * apresenta disponibilidade tecnológica;
- * independe do padrão de escoamento da mistura.

A Tabela 2.1 compara resumidamente os métodos de medição de fração de vazio num escoamento bifásico.

TABELA 2.1 - Técnicas de Medida de Fração de Vazio

TÉCNICA	PRINCÍPIO	OBSERVAÇÕES
VOLUMÉTRICA	Mede o volume de líquido ou de gás contido num dado volume da seção de teste: válvulas de fechamento rápido.	Interrompe o escoamento cada vez que se faz a medida. Pode ser usada em regime estacionário ou transiente.
ÓPTICA	Mede a variação do índice de refração do meio ou a atenuação de um feixe de luz.	Interfere no escoamento. Mede α local e global em regime permanente ou α local em reg. transiente
TÉRMICA	Mede a variação do coeficiente de trocas térmicas entre o líquido e o vapor: anemômetro de fio quente.	Escoamento com 2 componentes (mede α local, velocidade instantânea, etc.) ou com 1 comp. com mudança de fase (resultados inconsistentes).
ELETRICA	LOCAL: Mede os tempos de residência das fases dispositivo "on-off").	A resposta eletrônica do sistema é compatível com o tamanho das bolhas, velocidade da interface e dimensões físicas da extremidade da sonda. Líquidos condutores.
	GLOBAL: Mede a variação da impedância do meio com a presença de vazios.	
RADIAÇÃO	Através da absorção ou difusão da radiação, tal como: raios X, γ , β ou nêutrons.	Não perturba o escoamento. Regimes permanentes ou transientes. Mede basicamente α linear ou α superficial.
OUTROS	Traçadores Termopares Medidores de impedância	Usos específicos, tais como medidas transientes, tubos não circulares, etc.

3. TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA

3.1. Histórico

Radiações de alta energia, tais como raios beta, gama ou X, têm sido bastante usadas para medir certas propriedades de fluxo bifásico.

O método da atenuação de radiação baseia-se na absorção de raios gama (ou de outras radiações oriundas de uma fonte radioativa), que pode ser medida e relacionada com a fração de vazio. O método pode fornecer a fração de vazio linear (da corda) ou superficial (da seção transversal), e também informações detalhadas sobre o padrão de escoamento (Jones, 1973, e Jones e Zuber, 1975, *apud* Bergles [20]).

Nos últimos anos, técnicas experimentais para o estudo de distribuição de fases e fração de vazio, baseadas no uso de radiação, têm sido desenvolvidas e bastante empregadas. Em muitas aplicações, mede-se a fração de vazio a partir da medida da atenuação de raios gama, provenientes de uma fonte, através da seção de teste (Fig. 3.1). A fonte é colocada do lado de fora da seção de teste e emite um feixe colimado de radiação, que atravessa esta seção de teste. O feixe de raios emergentes é medido por um detetor situado do lado oposto da seção de teste. A quantidade de líquido penetrada influi diretamente na atenuação da radiação incidente, permitindo a determinação da fração de vazio.

Para medições de fração de vazio num escoamento "estabilizado" (regime permanente), tem-se desenvolvido a técnica de atenuação de raios beta, gama ou X. Entretanto, para um escoamento transiente, somente a técnica de atenuação de raios X tem sido usada.

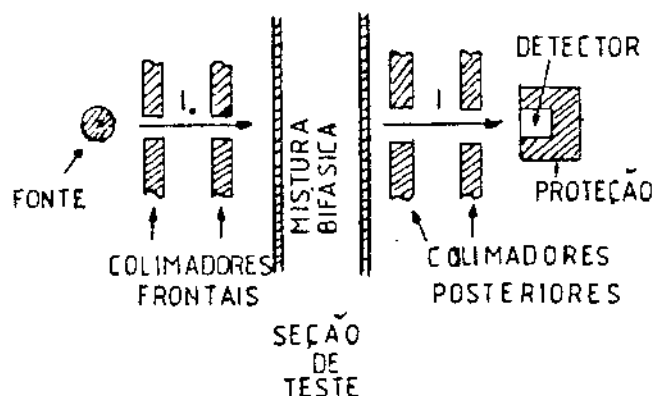


Fig. 3.1. Esquema do método de atenuação de raios gama

3.2. Determinação da expressão de cálculo da fração de vazio linear (α) (meios homogêneos)

Um feixe colimado monocromático de raios gama é atenuado num meio homogêneo de acordo com a seguinte lei exponencial [16]:

$$\frac{I(L)}{I_0} = e^{-(\mu \cdot L)} \quad (3.1)$$

onde: $I(L)$ é a intensidade local do feixe (após percorrer a distância L);

I_0 é a intensidade incidente do feixe;

L é a espessura do meio absorvente;

μ é o coeficiente de absorção linear.

O coeficiente de absorção linear depende da composição química do meio e é função da energia da radiação incidente:

$$\mu = \frac{N_0}{M} \cdot \rho \cdot \sigma_m \quad (3.2)$$

onde: N_0 = número de Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$ átomos/átomo-grama;
 M = massa atômica;
 ρ = densidade do meio absorvedor;
 σ_m = seção transversal microscópica de absorção.

A seção transversal microscópica é uma propriedade do átomo e é função da energia da radiação.

Em princípio, a técnica de atenuação de radiação é simples: uma fonte apropriada de radiação é colimada para produzir um fluxo de fótons unidirecional, que atinge a seção de teste na direção normal. A radiação é atenuada, na ordem, pela parede do tubo, pela mistura bifásica e pela parede oposta do tubo. Aplicando a equação 3.1, tem-se:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu_s \cdot L_s} \cdot e^{-\mu_{tp} \cdot L_{tp}} \cdot e^{-\mu_s \cdot L_s} \quad (3.3)$$

onde: I = intensidade medida no detetor;
 μ_s = coeficiente de absorção linear do tubo (estrutura);
 L_s = espessura da parede do tubo;
 μ_{tp} = coeficiente de absorção linear da mistura bifásica;
 L_{tp} = comprimento do feixe de raios gama através do fluxo bifásico.

Considerando o escoamento bifásico como um meio homogêneo, o coeficiente de absorção linear da mistura pode ser obtido da seguinte expressão [16]:

$$\mu_{tp} = \alpha \cdot \mu_g + (1-\alpha) \cdot \mu_l \quad (3.4)$$

onde: α é a fração de vazio linear;
 g e l referem-se às fases gás e líquido.

Na eventualidade da mistura não ser homogênea (escoamento pistonado, por ex.), as propriedades representarão as médias na seção.

Considerando que a estrutura forneça uma atenuação constante (para uma dada temperatura), é conveniente medir (para I_0 constante) a intensidade no detector (I) quando o tubo está cheio de líquido e quando está vazio.

Para o tubo cheio ($\alpha = 0$):

$$I_l = I_0 \cdot \exp(-2\mu_s.L_s) \cdot \exp(-\mu_l.L_p) \quad (3.5)$$

Para o tubo vazio ($\alpha = 1$):

$$I_g = I_0 \cdot \exp(-2\mu_s.L_s) \cdot \exp(-\mu_g.L_p) \quad (3.6)$$

Então, pode-se obter:

$$\frac{I_g}{I_l} = \frac{\exp(-\mu_g \cdot L_p)}{\exp(-\mu_l \cdot L_p)} = \exp[(\mu_l - \mu_g) \cdot L_p] \quad (3.7)$$

e também:

$$\frac{I}{I_l} = \frac{\exp(-\mu_{tp} \cdot L_p)}{\exp(-\mu_l \cdot L_p)} = \exp[\alpha(\mu_l - \mu_g) \cdot L_p] \quad (3.8)$$

Combinando as equações 3.7 e 3.8, tem-se:

$$\alpha = \frac{\ln(I/I_l)}{\ln(I_g/I_l)} \quad (3.9)$$

Segundo Galaup [17], a fração de vazio linear instantânea, obtida pela equação 3.9, é válida para baixas pressões e temperatura ambiente, pois neste caso a absorção pelo gás pode ser considerada desprezível comparada com a do líquido. Ele ressalta que para escoamentos água-vapor a altas pressões, tem-se:

$$\frac{\mu_l}{\rho_l} = \frac{\mu_g}{\rho_g} \quad (3.10)$$

mas neste caso a densidade do vapor não é mais desprezível comparada com a da água. Neste caso, necessita-se de uma calibração bem próxima à das condições experimentais (Martin, 1972, Reocreux, 1974, *apud* Bergles [20]).

Geralmente torna-se mais prático substituir as intensidades que aparecem na eq. 3.9 pela voltagem de saída do detetor (tipicamente um cintilador acoplado a um tubo fotomultiplicador) ou então por um sinal equivalente que seja proporcional à intensidade do feixe (por ex., contagens medidas num registrador).

Segundo Petrick e Swanson [18], o fluxo total de raios gama é definido como o produto da intensidade pela área total atravessada:

$$\phi = I \cdot A \quad (3.11)$$

Este fluxo de radiação, que colide no cristal fluorescente (também chamado cristal de cintilação ou cintilador), é transformado em luz:

$$\phi_l = k_2 \cdot \phi \quad (3.12)$$

onde: ϕ_l = fluxo de luz visível;
 k_2 = eficiência de conversão do cristal.

A luz visível é então convertida para corrente elétrica pelo fotocátodo do tubo multiplicador. A corrente é dada por:

$$i = k_3 \cdot (V_f)^7 \cdot \phi_l \quad (3.13)$$

onde: i = corrente do anodo do tubo fotomultiplicador;

V_f = voltagem da fonte do tubo fotomultiplicador;
 k_3 = fator de conversão.

A corrente é transmitida ao amplificador linear cuja voltagem de saída é:

$$V_o = k_4 \cdot i \quad (3.14)$$

onde: V_o = voltagem de saída;
 k_4 = fator de conversão (no caso, uma resistência elétrica).

Esta voltagem é medida e registrada. Assim a combinação das equações acima leva a:

$$V_o = k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (V_f)^7 \cdot I \cdot A \quad (3.15)$$

Petrick et al, usando o modelo de distribuição bifásica em série, definem a intensidade medida no detetor como:

$$I = I_o \cdot \exp(-2\mu_s \cdot L_s) \cdot \exp(-\mu_g \cdot L_g) \cdot \exp(-\mu_v \cdot L_v) \quad (3.16)$$

onde: L_g = soma dos comprimentos das camadas de gás;
 L_v = soma dos comprimentos das camadas de líquido.

$$\text{Já que:} \quad L_v + L_g = L_{tp} \quad (3.17)$$

$$\text{então:} \quad L_g = L_{tp} - L_v \quad (3.18)$$

Substituindo, tem-se:

$$I = I_o \cdot e^{-2\mu_s \cdot L_s} \cdot e^{-\mu_g \cdot L_{tp}} \cdot e^{-(\mu_v - \mu_g) \cdot L_v} \quad (3.19)$$

O fluxo de raios gama é dado por:

$$\phi = I_o . A . e^{-2\mu_s . L_s} . e^{-\mu_g . L_{tp}} . e^{-(\mu_v - \mu_g) . L_v} \quad (3.20)$$

A voltagem de saída (V_o) então é:

$$V_o = k_2 . k_3 . k_4 . (V_i)^7 . I_o . A . e^{-2\mu_s . L_s} . e^{-\mu_g . L_{tp}} . e^{-(\mu_v - \mu_g) . L_v} \quad (3.21)$$

Fazendo

$$k_5 = k_2 . k_3 . k_4 . (V_i)^7 . I_o . A . e^{-2\mu_s . L_s} . e^{-\mu_g . L_{tp}} \quad (3.22)$$

$$\text{tem-se que:} \quad V_o = k_5 . \exp[-(\mu_v - \mu_g) . L_v] \quad (3.23)$$

$$\text{Mas} \quad \alpha = \frac{L_g}{L_{tp}} = 1 - \frac{L_v}{L_{tp}} \quad (3.24)$$

$$\text{Então:} \quad V_o = k_5 . \exp[-(\mu_v - \mu_g) . (1 - \alpha) . L_{tp}] \quad (3.25)$$

Aplicando as condições limites, tem-se:

$$(\text{Para } \alpha = 0) \dots \dots V_l = k_5 . \exp[-(\mu_v - \mu_g) . L_{tp}] \quad (3.26)$$

$$(\text{Para } \alpha = 1) \dots \dots \dots V_g = k_5 \quad (3.27)$$

Combinando e simplificando, obtém-se:

$$\alpha = \frac{\ln(V_o/V_l)}{\ln(V_g/V_l)} \quad (3.28)$$

Esta equação (3.28), deduzida para o modelo de fases em série, é análoga à equação 3.9, válida para meios homogêneos.

É importante ressaltar que a eq. 3.9 é válida contanto

que:

(a) o fluxo bifásico seja homogêneo ou então esteja de acordo com a eq. 3.4;

(b) o feixe esteja bem colimado, de modo que todos os fótons se movem basicamente na mesma direção;

(c) o feixe seja monocromático.

Estes requisitos serão analisados adiante. As equações 3.7, 3.8 e 3.9 auxiliam a seleção da fonte a ser usada numa aplicação determinada. Vale salientar que quando a eq. 3.9 é usada para calcular a fração de vazio de dados experimentais, não é necessário conhecer os coeficientes de atenuação dos vários materiais envolvidos.

3.3. Efeito da distribuição de vazios e a sensibilidade da medida (modelos de distribuição em série e em paralelo)

Quando não há uma distribuição uniforme de vazios no tubo, ou seja, as fases não estão homogeneamente misturadas, o resultado obtido na eq. 3.9 não é válido. Este problema foi investigado por diversos pesquisadores, incluindo Petrick e Swanson [18] e Schrock e Selph [19]. Petrick e Swanson deduziram expressões para a atenuação com os vazios (fase gasosa) orientados em duas configurações extremas: uma como uma série de lâminas perpendiculares ao feixe e outra como lâminas paralelas ao feixe (Fig. 3.2).

O primeiro caso fornece um resultado idêntico ao caso homogêneo, como se pode concluir pela comparação das equações 3.28 e 3.9.

Para o caso de lâminas paralelas, tem-se, aplicando a eq. 3.1 para as camadas de gás e de líquido:

$$I_g = I_o \cdot \exp(-2\mu_s \cdot L_g) \cdot \exp(-\mu_g \cdot L_l) \quad (3.29)$$

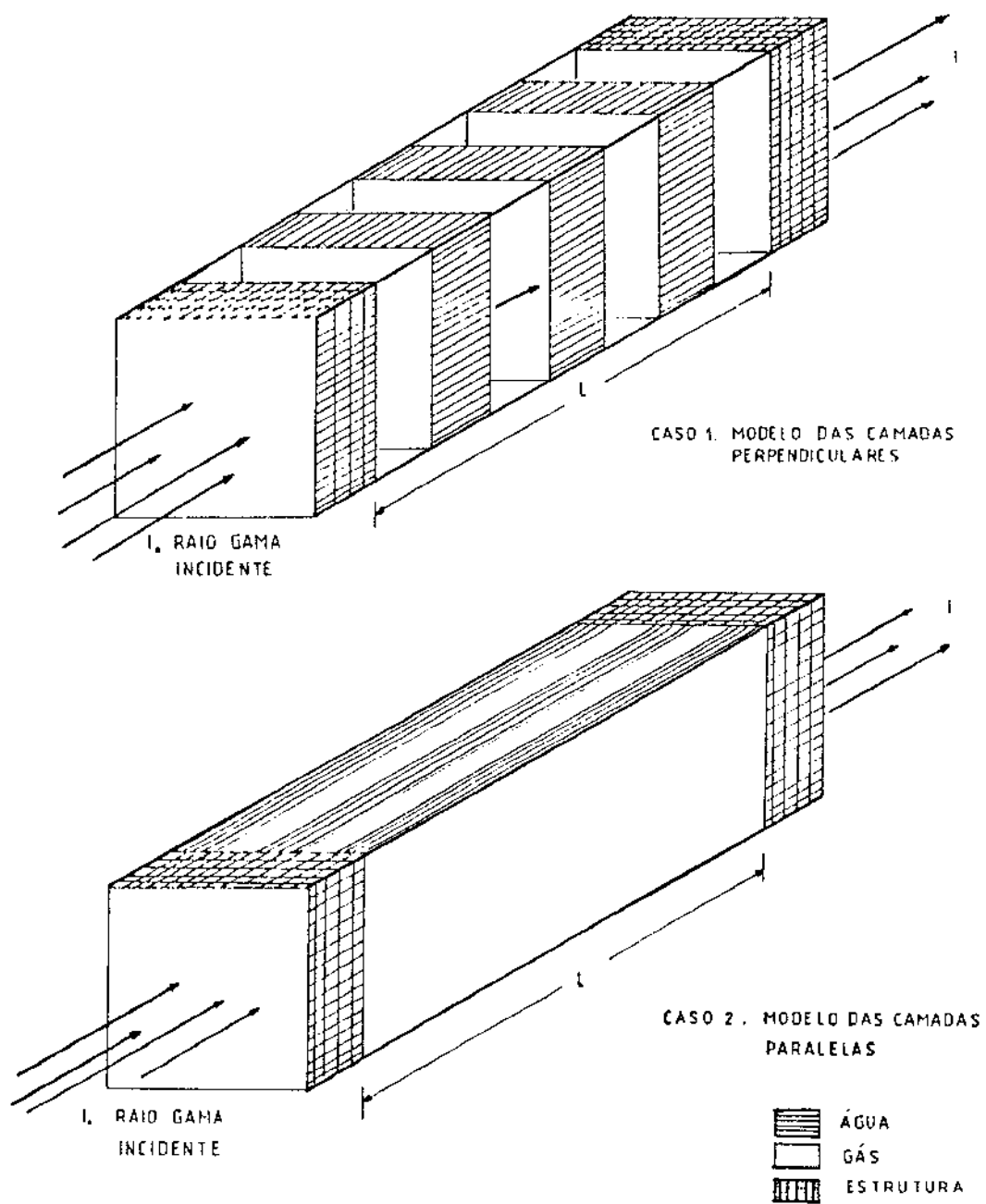


Fig. 3.2. Modelos de distribuição de vazio (em série e em paralelo)

$$I_l = I_o. \exp(-2\mu_s.L_s). \exp(-\mu_v.L_{tp}) \quad (3.30)$$

O fluxo total de raios gama no detetor é:

$$\phi = I_g.A_g + I_v.A_v \quad (3.31)$$

Combinando as equações 3.29 - 3.31, tem-se:

$$\phi = I_o. \exp(-2\mu_s.L_s). [A_g. \exp(-\mu_g.L_{tp}) + A_v. \exp(-\mu_v.L_{tp})] \quad (3.32)$$

Usando a eq. 3.21 (voltagem de saída) e fazendo

$$k_s = k_2.k_3.k_4.(V_l)^7.I_o. \exp(-2\mu_s.L_s). A \quad (3.33)$$

$$\text{vem: } V_o = k_s. \left[\frac{A_g}{A}. \exp(-\mu_g.L_{tp}) + \frac{A_v}{A}. \exp(-\mu_v.L_{tp}) \right] \quad (3.34)$$

$$\frac{A_v}{A} = 1 - \frac{A_g}{A} = 1 - \alpha \quad (3.35)$$

Aplicando as condições limites, tem-se:

$$(\text{Para } \alpha = 0) \dots \dots \dots V_l = k_s. \exp(-\mu_v.L_{tp}) \quad (3.36)$$

$$(\text{Para } \alpha = 1) \dots \dots \dots V_g = k_s. \exp(-\mu_g.L_{tp}) \quad (3.37)$$

Combinando e simplificando as equações, chega-se a:

$$\alpha_p = \frac{V_o - V_l}{V_g - V_l} \quad (3.38)$$

onde: α_p = fração de vazio obtida pelo modelo de lâminas paralelas.

Uma maneira simplificada de se chegar a um resultado

análogo seria considerar a intensidade medida (I) dada por [20]:

$$I = \alpha \cdot I_g + (1 - \alpha) \cdot I_l \quad (3.39)$$

Dai, chega-se á expressão:

$$\alpha_p = \frac{I - I_l}{I_g - I_l} \quad (3.40)$$

que é usada no modelo de camadas paralelas ao feixe de raios gama.

Há, portanto, duas equações (3.9 e 3.40) para calcular a fração de vazio, obtidas a partir de dois tipos extremos de distribuição de fase. Segundo Petrick et al [18], uma mistura bifásica real situar-se-ia entre os dois casos citados (modelo em série e em paralelo).

Este efeito da distribuição de vazios influenciará a escolha da radiação (que será discutida adiante) e a sensibilidade da medida. A radiação, por sua vez, é caracterizada por seu espectro de energia e sua intensidade.

Uma medida da sensibilidade do sistema é o chamado contraste, definido como:

$$c = \frac{I_g}{I_l} \quad (3.41)$$

Para o escoamento de gás-líquido a baixa pressão, tem-se:

$$c = \exp [(\mu_l - \mu_g) \cdot L_{tp}] \cong \exp (\mu_l \cdot L_{tp}) \quad (3.42)$$

Quanto maior o contraste, maior a sensibilidade da medida. Para aumentar o contraste, deve-se aumentar o coeficiente de absorção linear (μ_l) e, portanto, diminuir a energia, pois estes últimos são inversamente proporcionais.

Para um dado contraste (I_g/I_l), pode-se calcular a

diferença entre as frações de vazio calculadas pelos dois modelos propostos, isto é, os modelos das camadas em série e em paralelo (α_s e α_p), usando-se os mesmos dados experimentais. Esta diferença aumenta à medida que a fração de vazio se aproxima de zero. Fazendo:

$$\alpha_p = \frac{I - I_l}{I_g - I_l} = \frac{(I/I_l) - 1}{(I_g/I_l) - 1} \quad (3.43)$$

e traçando as coordenadas α_s versus $[(\alpha_s/\alpha_p) - 1]$, obtém-se um gráfico do erro entre esses modelos extremos. A Fig. 3.3 mostra os resultados obtidos para a fração de vazio linear nos dois modelos, para um contraste $c = 2,0$. A Fig. 3.4 compara os dois modelos para valores de contraste 2,0 e 1,1.

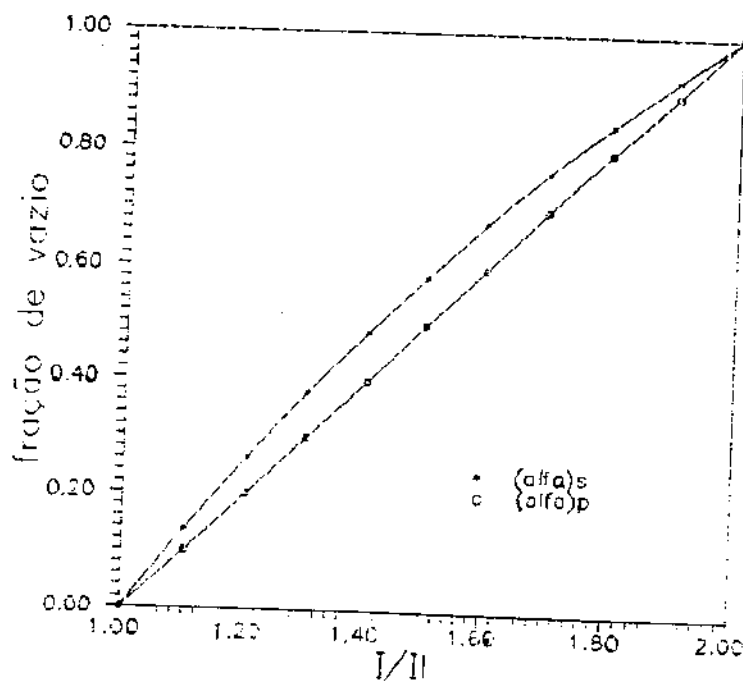


Fig. 3.3. Comparação da fração de vazio levando em conta a distribuição preferencial

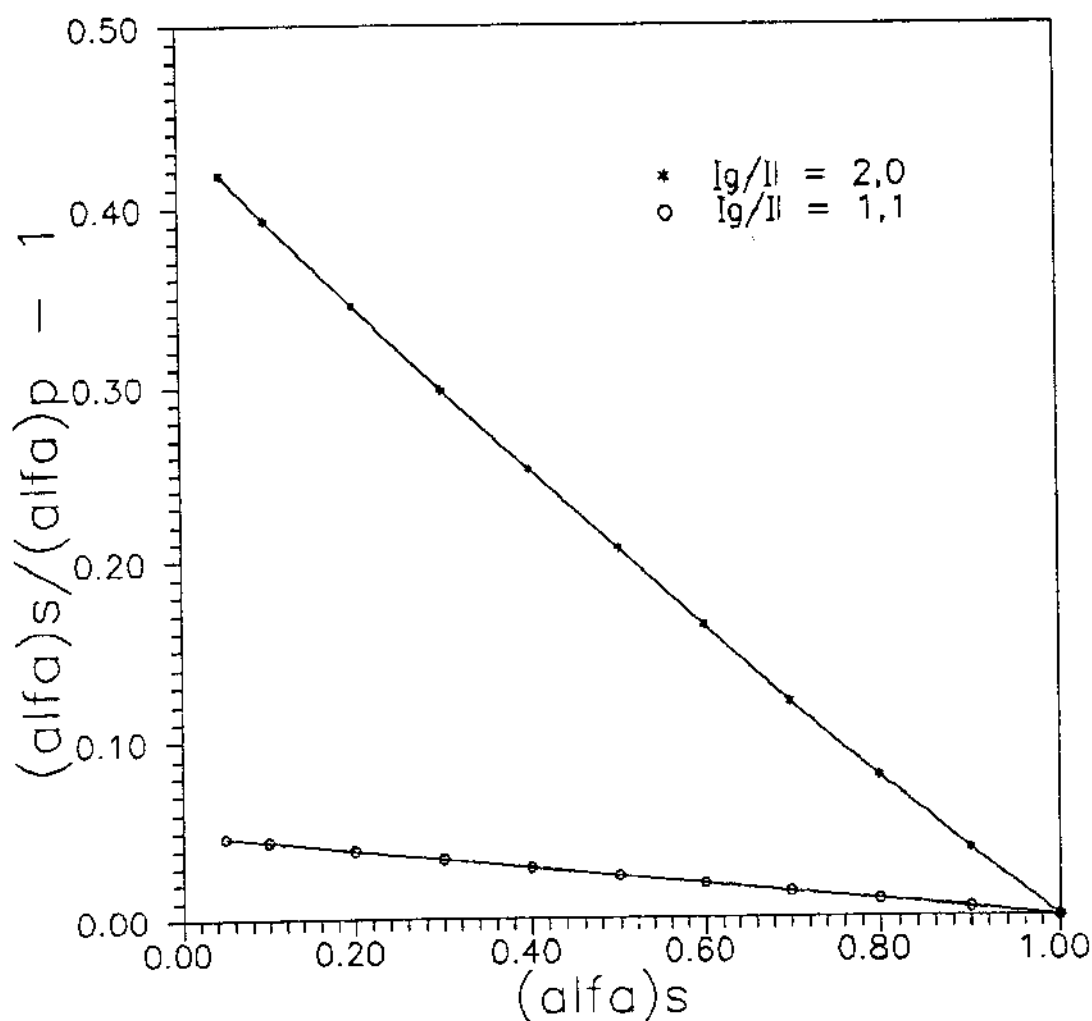


Fig. 3.4. Distribuição preferencial

Como o contraste é uma medida de sensibilidade às mudanças de fração de vazio, isto implica um compromisso na escolha do contraste. Se for muito pequeno, o erro será grande devido à insensibilidade, ao passo que, se for grande demais, a incerteza será grande por causa da distribuição preferencial da fração de vazio. Os valores mais adequados estão na faixa de 1,10 a 2,6.

Petrick et al [18] ressaltam que, nos sistemas reais, há

um efeito de orientação das fases. No entanto, o caso das lâminas paralelas é um tanto improvável. E como há um grau considerável de homogeneidade nos fluidos bifásicos, os raios gama tendem a ser atenuados exponencialmente e a fração de vazio deve, então, ser calculada pela eq. 3.9.

Neste trabalho, usar-se-á a eq. 3.9 para o cálculo das frações de vazio lineares, por representar a configuração mais usual (modelo do meio homogêneo ou modelo de distribuição bifásica em série), sendo, portanto, a mais recomendada.

Outra observação importante é que a equação 3.1 só é válida para o caso ideal de um feixe delgado colimado. O coeficiente de absorção (μ) representa a seção transversal total para todos os eventos e essencialmente assume que toda interação de fótons permanentemente remove o fóton do feixe. Quando a colimação não é adequada, os fótons podem, após múltiplos eventos de dispersão, tomar o rumo do detetor, o que tenderá a produzir uma fração de vazio menor que a real.

Numa colimação delgada há menos probabilidade de "escorregamento" ("streaming") de fótons, isto é, lâminas de líquido e gás paralelas ao feixe não são uma configuração provável. Isto significa que a fração de vazio assim medida é bem mais precisa do que usando a técnica do feixe largo único ("one-shot method"). Esta idéia foi verificada experimentalmente por Petrick e Swanson [18], onde obtiveram resultados com as técnicas linear (das cordas) e superficial ("one-shot") e os compararam com modelos reais em acrílico. Eles relatam que os erros médios (para α entre 16 e 61%) foram de 36,5 % para o método unifeixe ("one-shot") e de 7,3 % para o método linear.

Além de fornecer uma precisão melhor, a técnica do feixe estreito linear pode fornecer alguns detalhes da distribuição. A Fig. 3.5 mostra, por exemplo, como os vazios tendem a atingir o máximo no centro do tubo.

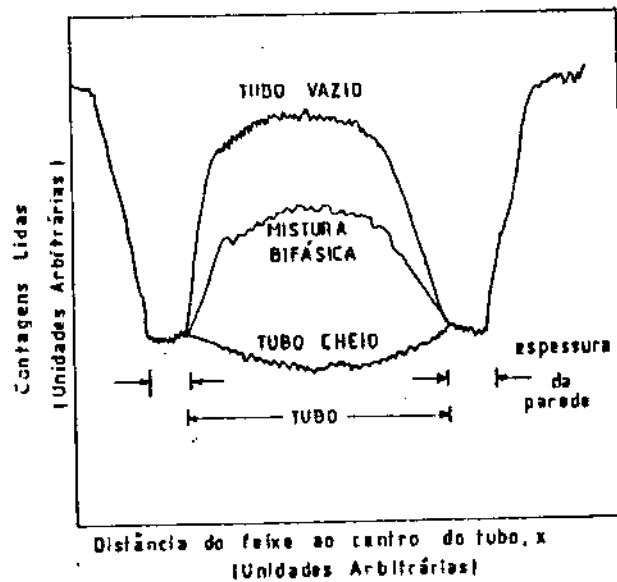


Fig. 3.5. Distribuição de vazio na seção de teste

3.4. Obtenção da fração de vazio superficial (α_2) por integração

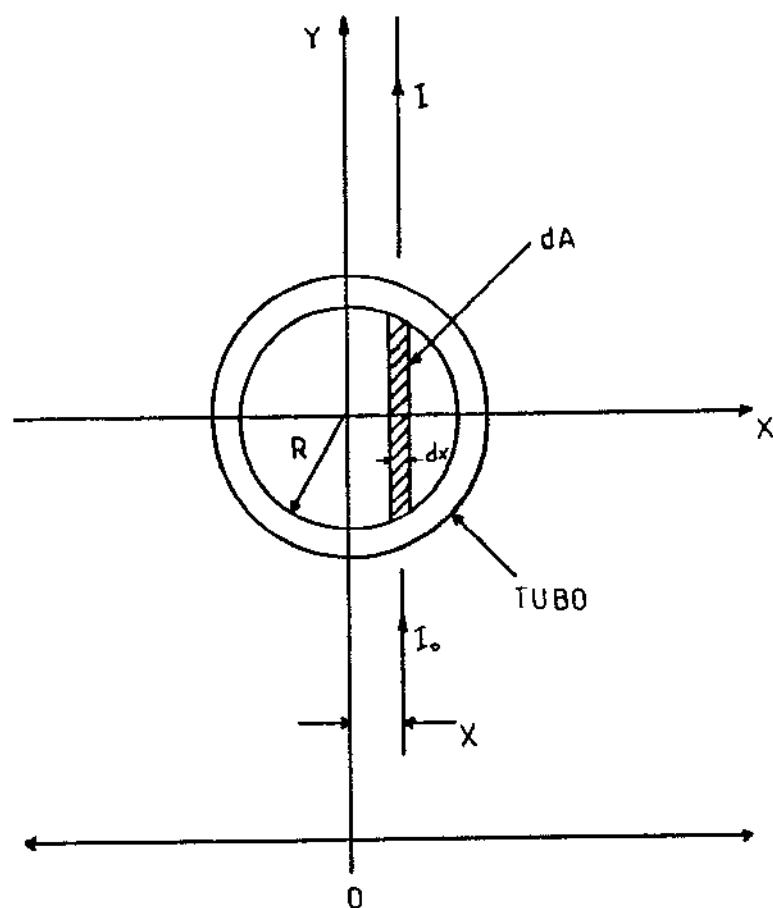
A seção transversal de uma seção de teste por onde escoava uma mistura bifásica pode ser representada pela Fig. 3.6, onde R é o raio interno do duto.

Dessa figura, tem-se:

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (3.44)$$

ou:
$$y = \pm \sqrt{R^2 - x^2} \quad (3.45)$$

onde x representa a distância do eixo-y ao feixe de raios gama.



| POSICIONAMENTO DO FEIXE DE RAIOS GAMA |

Fig. 3.6. Seção transversal de uma seção de teste

A fração de vazio superficial (α_z) média-temporal pode ser determinada a partir de um perfil da fração de vazio linear (α) média-temporal.

A fração de vazio média superficial (α_z) é dada por:

$$\alpha_z = \frac{1}{A} \cdot \int_{-R}^R \alpha(x) dA \quad (3.46)$$

onde: $\alpha(x)$ = fração de vazio média linear, que é função da corda e é dada pela eq. 3.9;

$$A = \pi \cdot R^2 = \text{área da seção transversal (interna)}. \quad (3.47)$$

Devido à simetria,

$$dA = 2 \cdot y \cdot dx = 2 \cdot \sqrt{R^2 - x^2} \cdot dx \quad (3.48)$$

Substituindo as equações 3.9, 3.47 e 3.48 em 3.46, tem-se:

$$\alpha_z = \frac{2}{\pi R^2} \cdot \int_{-R}^R \frac{\ln [I(x)/I_1(x)]}{\ln [I_g(x)/I_1(x)]} \cdot \sqrt{R^2 - x^2} dx \quad (3.49)$$

onde: $I(x)$ é a intensidade do feixe emergente na posição x (corda selecionada).

Como o integrando da expressão acima só é definido para um número finito de pontos-base (que são as cordas selecionadas), no intervalo de integração $[-R, R]$, a solução deve ser buscada por algum processo de quadratura numérica. Os métodos conhecidos para avaliação de uma integral podem ser classificados em duas categorias: quadratura de Newton-Cotes (quando os pontos se acham igualmente espaçados) e quadratura gaussiana, que se vale de polinômios de Legendre ou de outros polinômios ortogonais (quando os pontos - pré-estabelecidos pelos polinômios ortogonais - não estão igualmente espaçados).

Já que os pontos aqui considerados, que são as posições

das cordas selecionadas, estão igualmente espaçados, optou-se pela quadratura de Newton-Cotes, ou, mais precisamente, pelo uso da Regra de Simpson, pois o número de pontos é ímpar.

Assim, pela Regra de Simpson, tem-se:

$$\alpha_2 = \int_a^b f(x) dx \cong \frac{h}{3} \cdot [f(x_1) + 4.f(x_2) + 2.f(x_3) + \dots + 4.f(x_{n-1}) + f(x_n)] + \epsilon_1 \quad (3.50)$$

onde: $h = x_{i+1} - x_i \quad (3.51)$

$$f(x) = \frac{2}{\pi R^2} \cdot \frac{\ln [I_1(x)/I_2(x)]}{\ln [I_2(x)/I_1(x)]} \cdot \sqrt{R^2 - x^2} \quad (3.52)$$

$$\epsilon_1 = - \frac{h^5}{90} \cdot f^{(4)}(x) \quad (3.53)$$

Neste trabalho a fração de vazio superficial foi calculada através da Regra de Simpson para onze pontos ou para treze pontos. No primeiro caso foram consideradas 11 cordas internas selecionadas, variando no intervalo [-50 mm, +50 mm], onde o centro do tubo corresponde à corda zero.

No caso das 13 cordas, foram consideradas, além das 11 cordas anteriores, as cordas que tangenciam internamente a seção transversal dos dois lados. Considerou-se haver um filme líquido junto à parede do tubo, qualquer que fosse o padrão de escoamento. A fração de vazio na parede do tubo seria então igual a zero. Isto se justifica pelo fato de haver uma tendência para a parede do tubo ser molhada pela fase líquida e para a fase gasosa ocupar o centro do tubo (uma exceção a esta tendência seria o caso de um escoamento bifásico onde o tubo fosse aquecido; neste caso, o gás tenderia a ocupar as regiões de alta temperatura, ou seja, a

periferia e não o centro do tubo).

3.5. Obtenção de α_2 por outras formas de quadratura

A fim de comparar a fração de vazio superficial obtida pela integração numérica com outros métodos de ponderação, calculou-se α_2 através do somatório de contagem (método que faz uma analogia entre a técnica de medição linear e a superficial unifeixe), da ponderação da área de influência, da ponderação da distância ou da simples média aritmética dos valores lineares. Estas outras formas de "quadratura numérica" estão resumidas abaixo.

3.5.1. Fração de vazio superficial por somatório de contagens

Pode-se calcular a fração de vazio média superficial (α_2) transformando as medidas realizadas corda a corda como se fosse uma medida que abrangesse toda a seção transversal de uma só vez (método unifeixe). Transformando então as contagens obtidas por corda em contagens totais ("one-shot"), tem-se [21]:

$$N_{it} = \frac{N_i}{A_c} \cdot A_t \quad (3.54)$$

onde: N_{it} = contagem corda a corda transformada;

$N_i = \int I_i \, dt$ = contagem obtida da corda;

A_c = área do círculo varrida por uma corda;

A_t = área total (transformada).

O somatório das contagens transformadas corda a corda é equivalente à obtida por um sistema unifeixe ("one-shot method"). Assim, a fração de vazio superficial média calculada por somatório

de contagens (α_c) é dada por:

$$\alpha_c = \frac{\ln (\Sigma N_{xt} / \Sigma N_{lt})}{\ln (\Sigma N_{gt} / \Sigma N_{lt})} \quad (3.55)$$

onde: ΣN_{xt} = somatório das contagens transformadas para a mistura bifásica;

ΣN_{lt} = somatório das contagens transformadas para a seção de teste contendo somente água;

ΣN_{gt} = somatório das contagens transformadas para a seção de teste contendo somente ar.

Na expressão acima, encontra-se o fator (A_t/A_c) tanto no numerador quanto no denominador dos logaritmos. Portanto, pode ser simplificada para:

$$\alpha_c = \frac{\ln (\Sigma N_x / \Sigma N_l)}{\ln (\Sigma N_g / \Sigma N_l)} \quad (3.56)$$

onde: ΣN_x = somatório das contagens obtidas na seção de teste contendo a mistura bifásica;

ΣN_g = somatório das contagens obtidas na seção de teste contendo somente ar;

ΣN_l = somatório das contagens obtidas na seção de teste contendo somente água.

3.5.2. Fração de vazio superficial por ponderação de área

A fração de vazio superficial pode ser calculada como o somatório das frações de vazio lineares ponderadas pela "área de influência", abaixo definida.

A seção transversal circular foi dividida em várias "fatias", cada uma tendo uma corda selecionada em seu centro e se estendendo até a metade da distância às cordas vizinhas, situando-se sob o arco de círculo. A área compreendida entre estes

contornos - denominada área de influência - foi calculada (numa sub-rotina do programa de computador) como a soma de um trapézio e um segmento de círculo, definidos através de arranjos trigonométricos (Apêndice B).

3.5.3. Fração de vazio superficial por outras ponderações

A fração de vazio superficial também foi calculada, apenas para comparação, como a média aritmética das frações de vazio lineares e também como a soma das frações de vazio lineares ponderadas pela distância de influência. Para as cordas internas, a distância de influência é constante e igual a 10 mm. Para as cordas extremas - junto à parede - a distância de influência é igual a 0,7 mm.

Deve-se observar, no entanto, que estes valores médios não apresentam significado físico algum, já que estas ponderações desprezam a influência da posição e da área relacionada a cada corda.

3.6. Energia do fóton e o coeficiente de absorção

Os feixes de raios gama são atenuados pelos materiais que atravessam por uma combinação de efeitos fotoelétricos, espalhamento Compton e produção de pares. A importância relativa de cada um desses mecanismos de espalhamento depende da substância e da energia do feixe incidente. A Fig. 3.7 mostra um gráfico do coeficiente de absorção linear da água.

Sabe-se que o coeficiente de absorção linear (μ) é função da energia do feixe incidente e geralmente diminui com o aumento da energia dos fótons, sendo independente do estado físico da substância (sólido, líquido ou gasoso). A Fig. 3.8 mostra o coeficiente de absorção linear para algumas substâncias leves e a Fig. 3.9 mostra o este coeficiente para substâncias pesadas.

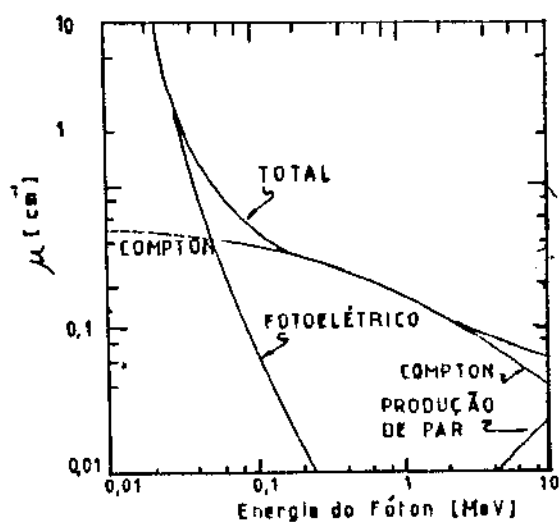


Fig. 3.7. Coeficiente de absorção linear da água

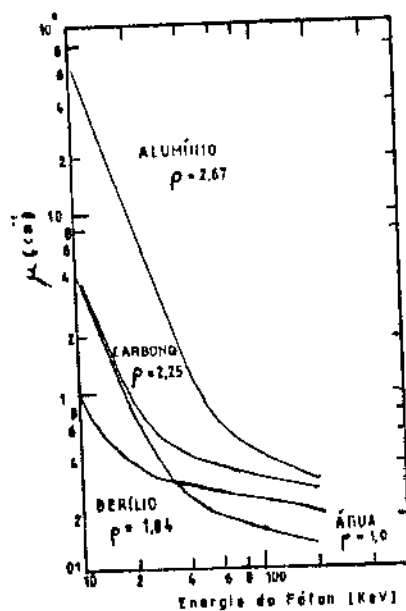


Fig. 3.8. Coeficiente de absorção linear de materiais leves

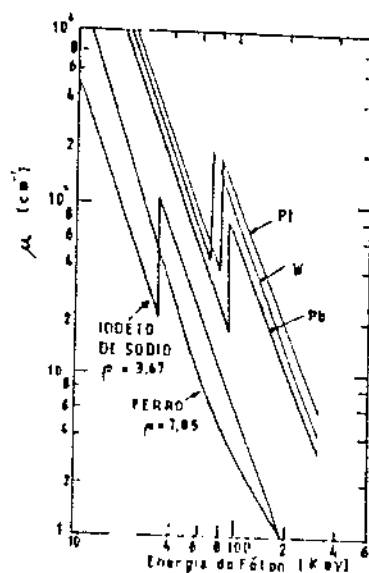


Fig.3.9. Coeficiente de absorção linear de materiais pesados

Para um densitômetro de absorção de raios γ , o fator de interesse é a quantidade transmitida de radiação, que se relaciona diretamente com a quantidade absorvida pelo meio (através de todos os processos de interação de radiação γ com a matéria). O coeficiente de absorção de massa (μ/ρ) tem contribuições de absorção pelos mecanismos citados através da seguinte relação:

$$\mu/\rho = \tau + \kappa + \pi \quad (3.57)$$

onde: τ = coef. de absorção de massa por efeito fotoelétrico;

κ = coef. de absorção de massa por efeito Compton;

π = coef. de absorção de massa por produção de pares e^+, e^- .

Outros mecanismos, tais como espalhamento Rayleigh, não são considerados, pois contribuem muito pouco. Na faixa de energia de 100 a 1000 keV, o coeficiente de absorção e espalhamento deve-se quase exclusivamente ao processo Compton (Fig. 3.10).

É importante que o feixe de fótons seja monocromático para que a lei da absorção exponencial seja válida (isto é, todos os fótons devem pertencer à mesma faixa energética). A emissão de raios γ é mais monocromática que a de raios X.

No caso de fontes reais, o feixe tem uma distribuição de energia de fótons. Se cada banda estreita de energia obedece à lei exponencial, os fótons de energia mais baixa são mais atenuados (alto μ) e o espectro de energia muda à medida que o feixe avança. O resultado é que a atenuação total não é exponencial.

Mesmo para feixe inicialmente monocromático, alguns efeitos secundários tendem a produzir fótons de energia mais baixa, que distorcem ligeiramente o comportamento da atenuação. O efeito fotoelétrico produz um átomo ionizado e um elétron livre com alta energia. O átomo então emite um fóton e o elétron produz "bremsstrahlung"¹. Os eventos de espalhamento Compton envolvem transferência de energia. Alguns fótons podem reaparecer no feixe após múltiplos eventos de espalhamento e, portanto, com baixa energia.

Filtros ou discriminadores eletrônicos podem ser usados para selecionar ou detectar somente aqueles fótons com energia numa certa faixa. Os feixes selecionados terão um comportamento substancialmente exponencial num meio homogêneo. O filtro deve ser espesso o suficiente para absorver os componentes energéticos baixos, mas fino o suficiente para que não reduza demais os componentes energéticos altos.

¹Bremsstrahlung (radiação de freamento): radiação eletromagnética secundária, produzida como consequência do freamento sofrido por partículas carregadas ao atravessarem um meio.

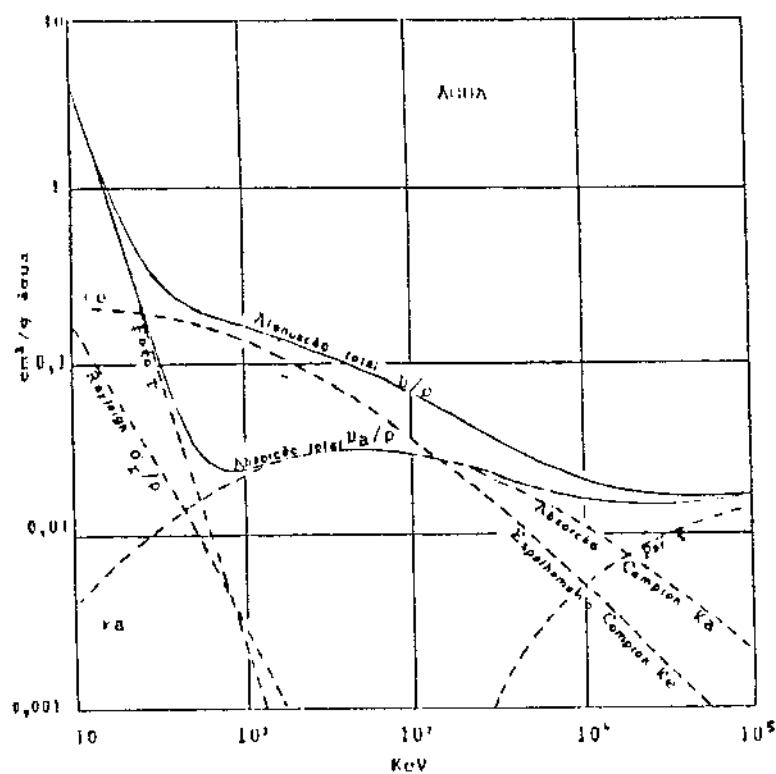


Fig.3.10. Coeficiente de absorção de massa da água

3.7. Seleção e característica das fontes de raios gama

As fontes de fótons são de dois tipos: decaimento de radionuclídeo (raios γ) e raios X. O número de fótons produzidos por um radionuclídeo por unidade de tempo é proporcional à atividade (taxa de decaimento), usualmente especificada em Curies ou Becquerel (Obs.: $1 \text{ Ci} = 3,70 \cdot 10^{10}$ desintegrações por segundo $= 3,70 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$).

Os fótons de alta energia sofrem flutuações estatísticas em suas emissões. Assim, a intensidade também tem flutuações.

Considerando o número total de partículas (N) ao invés da intensidade (I) do feixe, as leis da estatística levam à seguinte relação:

$$\frac{\Delta N}{N} = \left(\frac{1}{N} \right)^{0,5} \quad (3.58)$$

onde: $\Delta N / N$ = incerteza de uma única observação.

Quando se usa um registrador, o número de contagens que deve ser acumulado é determinado pela relação acima. Então, para uma contagem $N = 10^4$, tem-se que a incerteza é de 10^{-2} ou 1 %.

O tempo requerido para acumular N contagens depende da intensidade da fonte. Para medições "transientes" necessita-se de um sistema com tempo de resposta mais rápido. Considerando partículas incidentes no detector durante um tempo t, então a taxa requerida de intensidade se relaciona com a incerteza por:

$$\frac{\Delta I}{I} = \left(\frac{1}{t \cdot I \cdot A} \right)^{0,5} \quad (3.59)$$

onde: A = área do feixe detector.

Então, para uma incerteza de 10^{-2} , tem-se que:

- para $t = 1 \text{ s}$ $\phi = I \cdot A = 10^4$ fótons/s;
- para $t = 10^{-2} \text{ s}$ $\phi = I \cdot A = 10^6$ fótons/s.

Uma outra equação que relaciona tempo de contagem com a precisão da medida é a seguinte [16]:

$$N = f \cdot a \cdot t \quad (3.60)$$

onde: $f = 10^{-5}$ = fator típico do ângulo sólido;

a = atividade da fonte [Bq = desintegrações/s]

t = tempo de contagem[s]

Para se obter uma precisão de 1 %, requer-se $N = 10^4$. Se um tempo de 30 s é aceitável, uma fonte com atividade igual a $3,33 \cdot 10^7$ Bq é adequada. Levando em consideração outros fatores (auto-absorção, filtros de feixe, atenuação da seção cheia), chega-se a 10^9 Bq como um valor mais razoável. Portanto, fontes da magnitude de miliCuries (~ 30 mCi) podem ser usadas para experimentos estáveis. Para medidas transientes, obtendo-se a mesma precisão, a fonte teria de ter uma atividade da ordem de $5 \cdot 10^{19}$ Bq, ou cerca de 1000 Ci, valor muito perigoso para ser manuseado em laboratório.

Literalmente há centenas de radionuclídeos acessíveis (fontes), mas só alguns apresentam as propriedades desejadas. As propriedades que influenciam a escolha da fonte são: a meia-vida, o esquema de decaimento, a energia do fóton, o custo e a disponibilidade da fonte.

(a) Meia-vida $[t_{1/2}]$: a meia-vida é importante porque se relaciona com a taxa de decaimento (Apêndice C):

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda_d \cdot N \quad (3.61)$$

onde:

$$\lambda_d = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \approx \frac{0,693}{t_{1/2}} \quad (3.62)$$

Um radionuclídeo com meia-vida curta muda sua intensidade rapidamente e precisa ser calibrado amiúde. Um radionuclídeo com meia-vida muito longa tem muita massa e apresentará excessiva autoproteção. A faixa desejável é de 10^2 a 10^4 dias.

(b) Esquema de decaimento: este esquema é importante para o contraste do raio gama. As energias do raio γ devem ser escolhidas para valores razoáveis de I_γ/I_β na sua aplicação particular (seção

de teste, espessura da parede, etc.), o que possibilitará obter uma boa sensibilidade. Geralmente deve-se escolher a fonte com a menor energia possível, para se ter um dispositivo leve e compacto.

(c) Energia do fóton: o nível de energia do fóton determina o valor do coeficiente de atenuação linear (μ). Como uma pequena fração de átomos é transmutada ao se produzir uma fonte com intensidade apropriada, esta fonte deve ser periodicamente irradiada para manter a intensidade desejada.

(d) Custo e disponibilidade da fonte: devem ser analisados criteriosamente.

A Tabela 3.1 mostra dados de algumas fontes de raios γ disponíveis comercialmente. Algumas fontes emitem fótons de diferentes energias. A taxa de emissão (e) da tabela é definida como o número de gamas de uma energia particular emitido para cada 100 desintegrações do radionuclídeo. Quanto menor a taxa de emissão para o gama desejado, maior a taxa de desintegração (atividade) exigida para a fonte. Isto acarreta aumento nos custos e maior exigência de blindagem. Assim, deseja-se que a fonte tenha baixa atividade (e alta taxa de emissão, portanto).

3.8. Seleção do tempo de contagem e atividade da fonte

A atividade de uma fonte de raios gama é dada pela expressão [22]:

$$a = \frac{N}{f_1 \cdot f_2 \cdot e} \quad (3.63)$$

onde: a = atividade da fonte (também chamada de taxa de decaimento ou taxa de desintegração);

TABELA 3.1 - Dados de Algumas Fontes de Raios Gama

Fonte (isótopo)	Meia-vida (dia; ano)	Energia princ. do fóton (keV)	Taxa de emissão (e) (%)
Americio-241	433 a	11,9 - 22,3 59,5	~ 40 35,3
Bário-133	10,8 a	30 - 36 80 - 81 276,0 303,0 356,0 384,0	~ 123 36,2 7,1 18,7 61,5 8,9
Cádmio-109	453 d	22,1 - 26,0 88,0	102,3 3,6
Césio-137	30,1 a	32,0 - 38,0 662,0	8,0 85,1
Cobalto-57	270,5 d	6,4 - 7 14,4 122,0 136,5	~ 55 9,4 85,2 11,1
Cobalto-60	5,27 a	1173,0 1333,0	99,86 99,98
Cúrio-244	17,8 a	12,1 - 23,0	~ 8
Gadolíneo-153	241,5 d	41,3 - 47,3 69,7 97,4 103,2	~ 110 2,6 30 20
Iodo-129	$1,57 \cdot 10^7$ a	30 - 35 40,0	~ 69 7,5
Chumbo-210	22,3 a	9,42 - 16,4 46,5	~ 21 ~ 4
Manganês-54	312,5 d	835,0	100
Plutônio-238	87,75 a	11,6 - 21,7	~ 13
Telúrio-123	119,7 d	27,4 - 31,1 159	~ 50 83,5
Túlio-170	128 d	50,0 - 59,7 84,3	~ 5 3,4

N = intensidade da fonte (contagens/tempo);
 f_1 = fator geométrico;
 f_2 = eficiência do cintilador;
 e = taxa de emissão da fonte.

O fator geométrico f_1 é dado por:

$$f_1 = 0,5 \cdot \left[1 - \frac{H}{(H^2 - r^2)^{0,5}} \right] \quad (3.64)$$

onde: r = raio do detetor;

H = distância fonte-detetor.

Para o arranjo experimental utilizado, tem-se $r = 1$ mm e $H = 500$ mm. A eficiência média do detetor NaI (TI) é 0,6. Considerando-se os parâmetros meia-vida alta, taxa de emissão alta, energia da fonte cujo contraste fique entre 1 e 2,5 e boa separação da energia entre os picos, a fonte de Césio-137 foi a que se mostrou mais adequada. Para se ter uma boa estatística de contagem, assumiu-se $N > 10.000$ contagens no intervalo de tempo t . Da Tabela 3.1, tem-se que a taxa de emissão é $e = 0,851$. Substituindo estes valores:

$$\begin{cases} f_1 = 10^{-6} ; & f_2 = 0,6 ; \\ e = 0,851 ; & N = 10^4 \text{ contagens/t} \end{cases}$$

na equação 3.63, tem-se: $a = 1,96 \cdot 10^{10}$ desintegrações / t.

Considerando $t = 1$ s, tem-se que $a = 1,96 \cdot 10^{10}$ Bq, ou seja 0,530 Ci ou 530 mCi. Preferiu-se utilizar uma fonte com menor atividade, aumentando-se o tempo de contagem. Das fontes disponíveis, a escolhida foi uma fonte de Cs^{137} , com atividade de 240 mCi, o que implicaria um tempo de contagem (pelas equações acima) de 2,2 s. No entanto, levando-se em conta outros fatores (auto-absorção da fonte, absorção do ar, absorção da parede da

seção de teste, etc.) e ainda compatibilizando-se com a precisão pretendida, adotou-se um tempo mínimo de contagem de 20 segundos para cada medida.

4. APARATO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Circuito Experimental

A Fig. 4.1 mostra os circuitos de água e ar utilizados para a realização do programa experimental.

O circuito de água opera a pressão e temperatura ambientes, formando um circuito fechado. Constitui-se dos seguintes componentes:

- Reservatório de água de 4000 litros.
- Bomba centrífuga OMEL tipo UND-AB, grupo P, capacidade: 30 m³/h, H = 28 m, 3500 RPM, número de série 93.260. Motor de indução GE, modelo TRICLAD 45.4072.405, horizontal, trifásico, 3440 RPM, potência: 7,5 CV.
- Rotâmetro de água OMEL S.A., número 98506 B, capacidade: 3,5 a 35,0 m³/h.
- Válvulas (globo e agulha).
- Transdutor de pressão Fischer PT10 (para a tomada de pressão de entrada da seção de teste).
- Transdutor de pressão Fischer PT10 (para a tomada de pressão do rotâmetro).
- Registrador gráfico Hewlett-Packard(HP), modelo 7414A, com 4 módulos tipo HP8801-A, com 4 penas (utilização de 2).
- Seção de teste.

O circuito de ar constitui-se dos seguintes equipamentos:

- Rotâmetro de ar OMEL, número 92648B, capacidade: 5,0 a 150,0 m³/h.
- Rotâmetro de ar OMEL, número 92648A, capacidade: 80,0 a 800,0 m³/h.
- Compressor de ar estacionário rotativo (de parafuso) tipo GAB04PAU824275, fabricante: Atlas Copco, potência: 65 kW, pressão

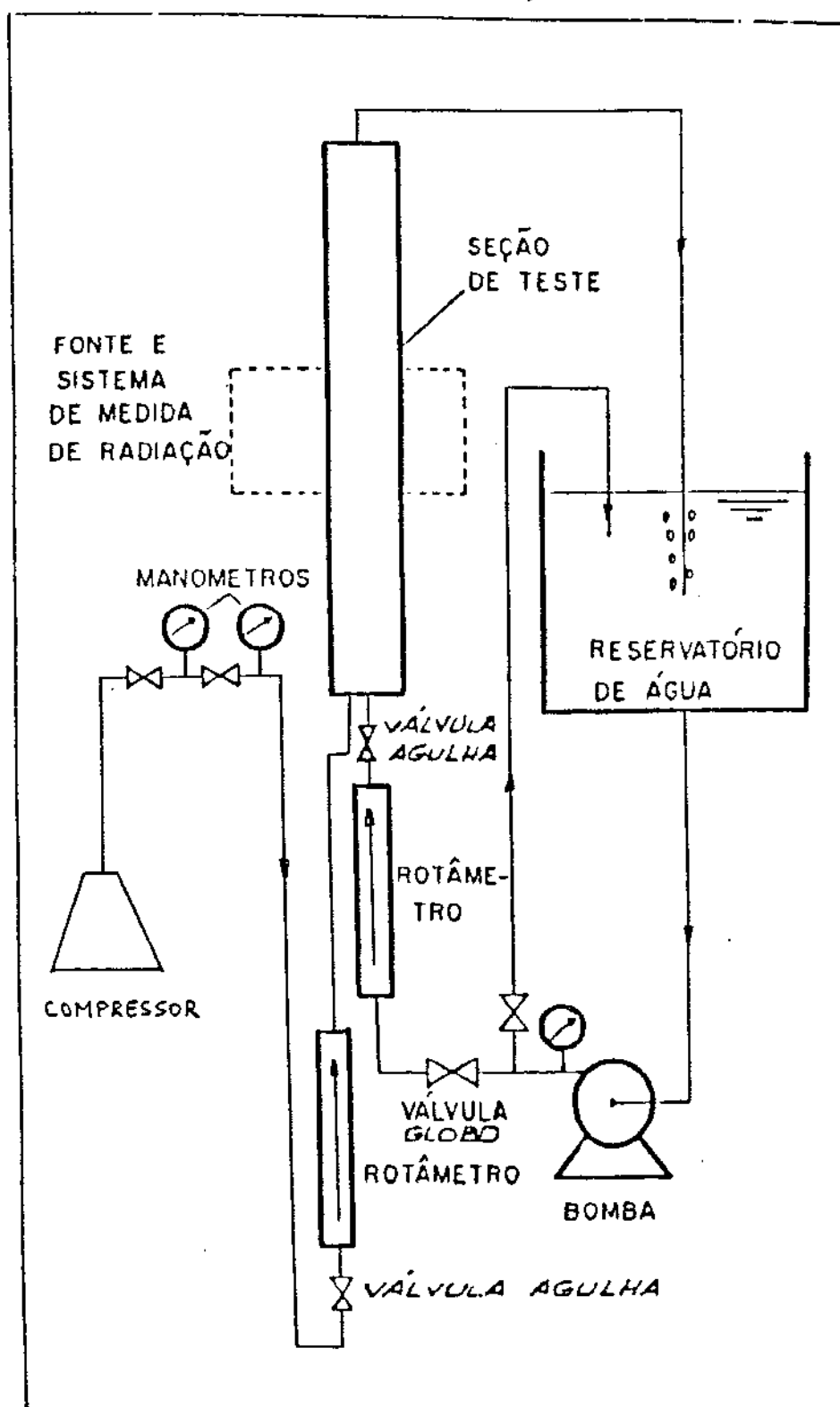


Fig.4.1. Circuito experimental de água e ar

de admissão: 1 bar, pressão máxima de trabalho: 4 bar, rotação: 1788 RPM, vazão de admissão de ar: 224,8 l/s ($P_{atm} = 697$ mmHg), 380 Volts, 60 Hz, rotação máxima: 3550 RPM. Motor de indução GE modelo 27.1754.811, número LW 50062, 100 CV, 60 Hz, FS 1,15, 1775 RPM, tipo K, carcaça 250M.

4.2. Seção de teste

A seção de teste utilizada neste experimento consiste de um tubo transparente de polycarbonato, vertical, de seção transversal circular, por onde escoia a mistura bifásica. O tubo tem 104 mm de diâmetro interno e 124 mm de diâmetro externo. Sua altura é de aproximadamente 2,5 m. O esquema da seção de teste está mostrado na Fig. 4.2, onde as cotas são dadas em centímetros.

O ar e a água encontram-se em uma câmara de mistura, situada abaixo da seção de teste, homogeneizando assim a pressão e a temperatura de ambas as fases.

4.3. Sistema de medição de radiação

O sistema de medição de fração de vazio que utiliza a técnica de radiação compõe-se basicamente de uma fonte de raios gama, situada de um lado da seção de teste, e, do lado oposto, um detetor de radiação (cintilador acoplado a um tubo fotomultiplicador), além do sistema eletrônico associado (Fig. 4.3).

O parâmetro de maior importância na escolha do detetor é a eficiência. Entre os vários detetores existentes para o uso de raios gama, os mais usados são os cintiladores; entre estes, o mais comumente usado é o de NaI ativado com Tálcio, devido à sua alta eficiência na produção de luz. A saída do equipamento é uma simples voltagem proporcional à intensidade da radiação. Em medições transientes, os plásticos (por ex.: stilbene) são preferíveis, apesar da baixa eficiência, porque apresentam pouca

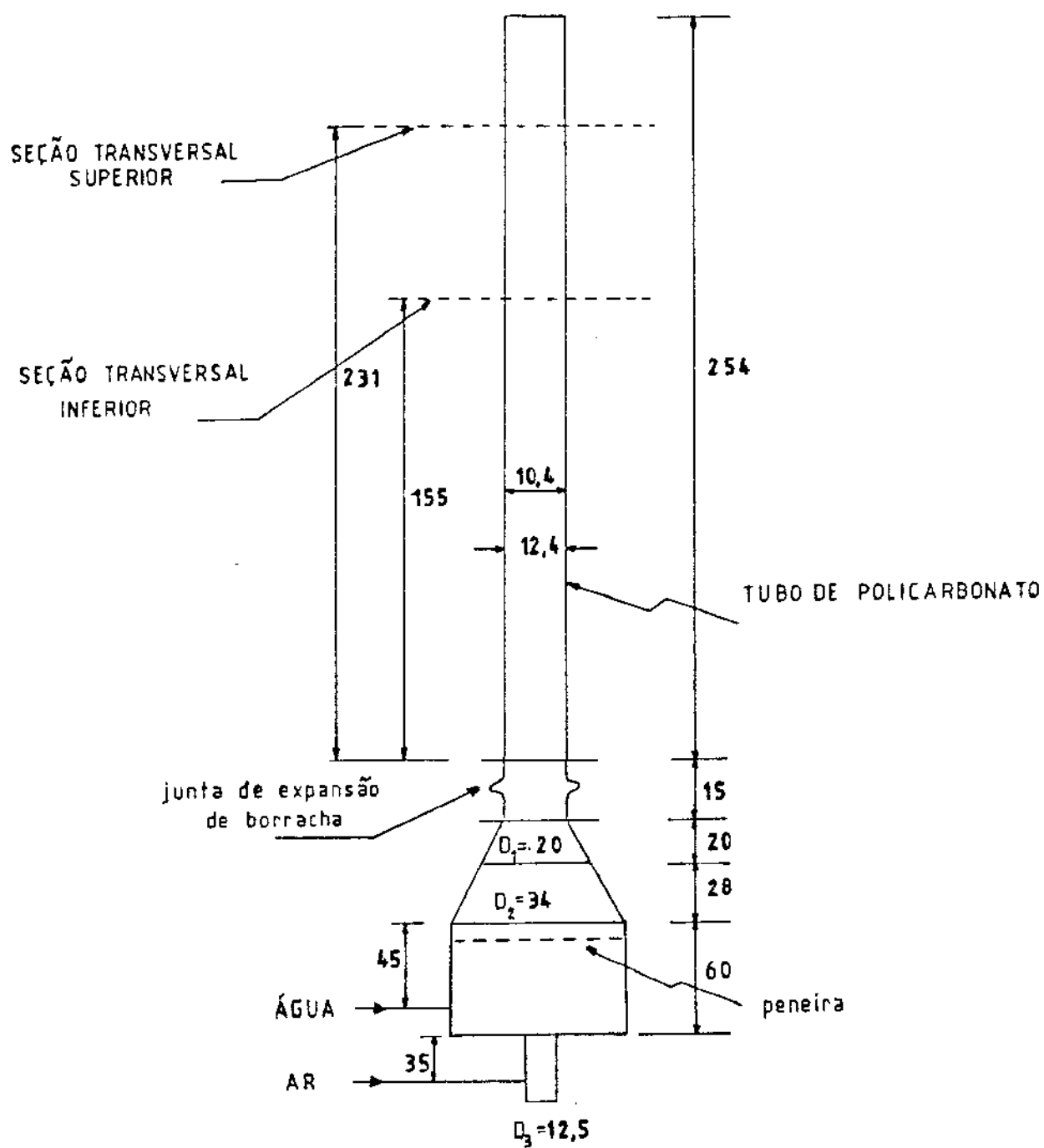


Fig. 4.2. Seção de teste
(cotas em cm)

fluorescência (portanto, tempos de recuperação curtos). Os cristais cintilantes são sensíveis à temperatura. A voltagem de entrada do fotomultiplicador deve ser excepcionalmente estável, pois a saída é proporcional a $(V_i)^2$. Por isso, deve ser sempre verificada.

Os equipamentos usados para as medições de fração de vazio foram os seguintes:

- Detetores de NaI (TI), 3" x 3", da ORTEC.
- Fonte de Cs^{137} com atividade de 240 mCi, meia-vida de 30,1 anos e energia principal na faixa de 662,0 keV.
- Estabilizador eletrônico de corrente alternada, modelo EE10A1b, BRASELE, 0 - 150 Volts.
- Fonte de alta tensão FLUKE 2559 ("High voltage power supply"), modelo 415B, de -3 a +3 kV.
- Amplificador ORTEC 575EG&G, ganho fino: 0,5 - 1,5, ganho grosseiro: 10 - 500.
- Analisador monocanal PM431, CPIO-AIE.
- Contador ORTEC ("counter"), modelo 772.
- Temporizador ORTEC ("time counter"), modelo 773.
- Impressora ORTEC ("line printer"), modelo 777.

A mesa que suporta o conjunto fonte-detetor possui um mecanismo que permite sua movimentação nas direções horizontal e vertical, o que permite a medição ao longo de todas as cordas e em diversas alturas da seção de teste.

Devido à necessidade de um feixe de raios gama bem definido, o sistema fonte-detetor foi alinhado usando um gerador de raios "laser" (Laser-Hélio-Neon, de 0,92 W). O diâmetro do feixe foi definido pelos colimadores da fonte e do detetor, ambos com 2 mm.

As Figuras 4.4 a 4.11 mostram cópias de fotografias tiradas no circuito experimental.

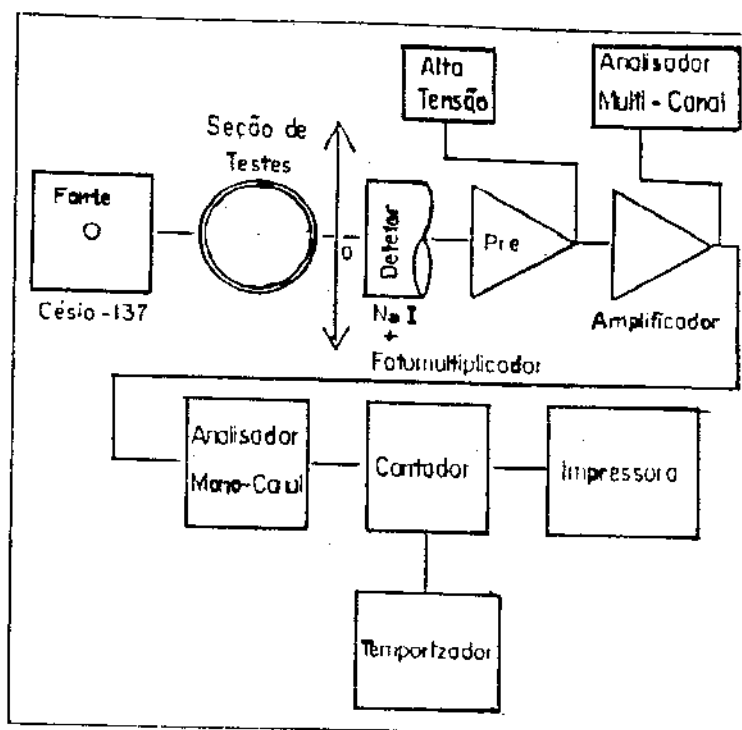


Fig.4.3. Sistema de medição de radiação

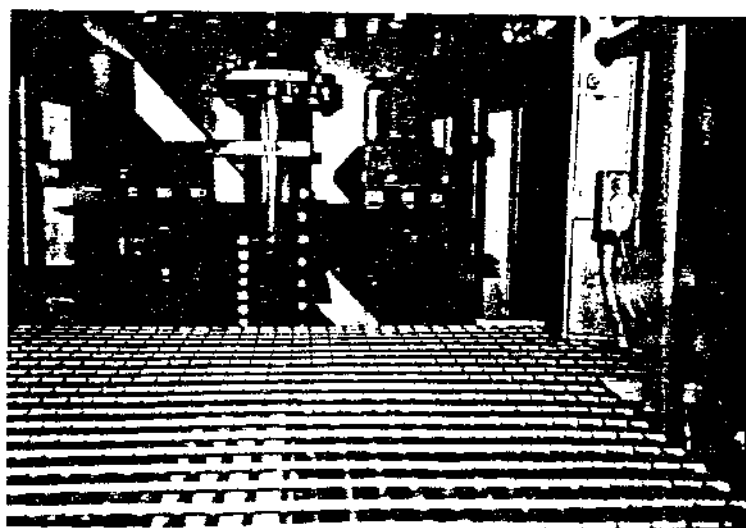


Fig.4.4. Foto: detetor (E), tubo e fonte (D)

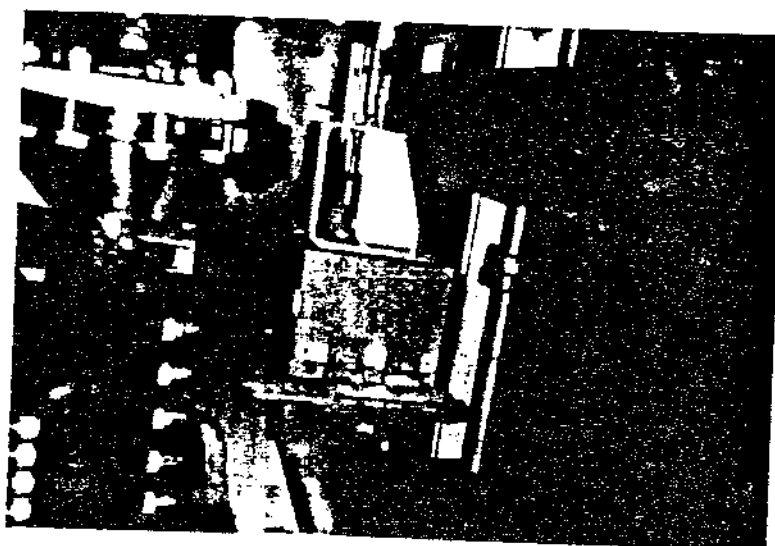


Fig.4.5. Foto: detalhe da fonte

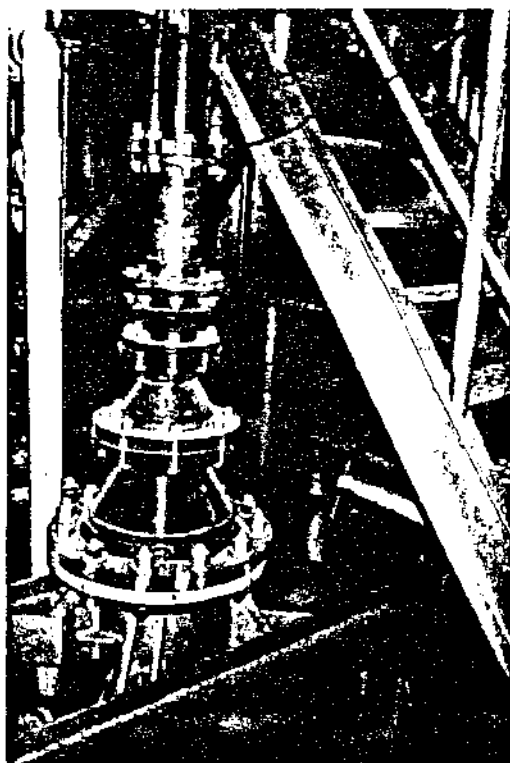


Fig.4.6. Foto: câmara de mistura e tubo vertical

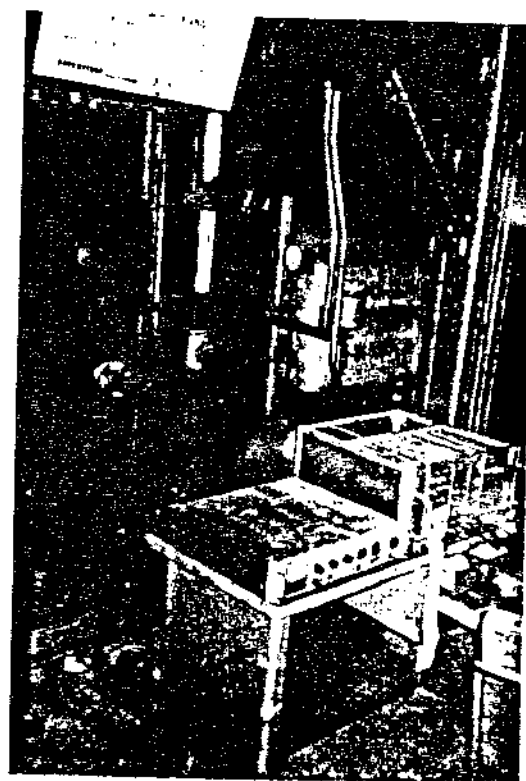


Fig.4.7. Foto: impressora e equipamentos eletrônicos

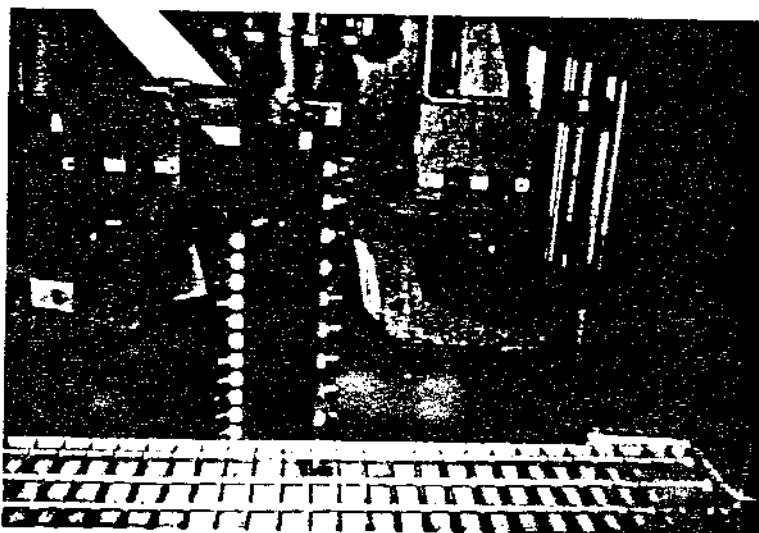


Fig.4.8. Foto: sistema de radiação

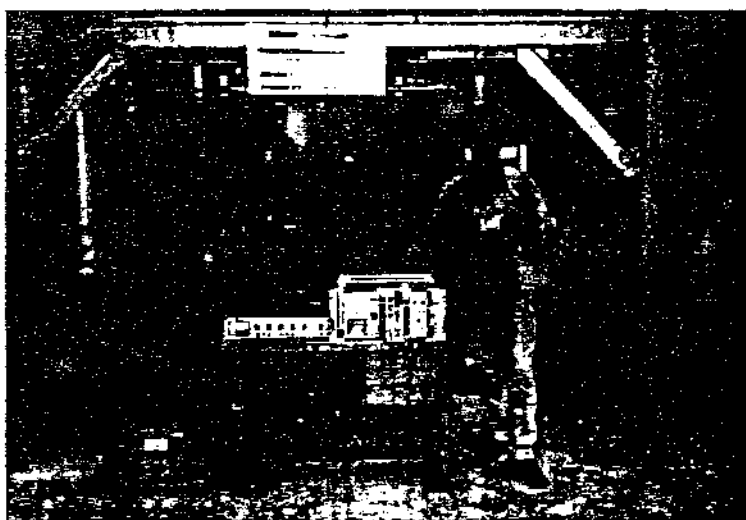


Fig.4.9. Foto: outro ângulo dos equipamentos eletrônicos

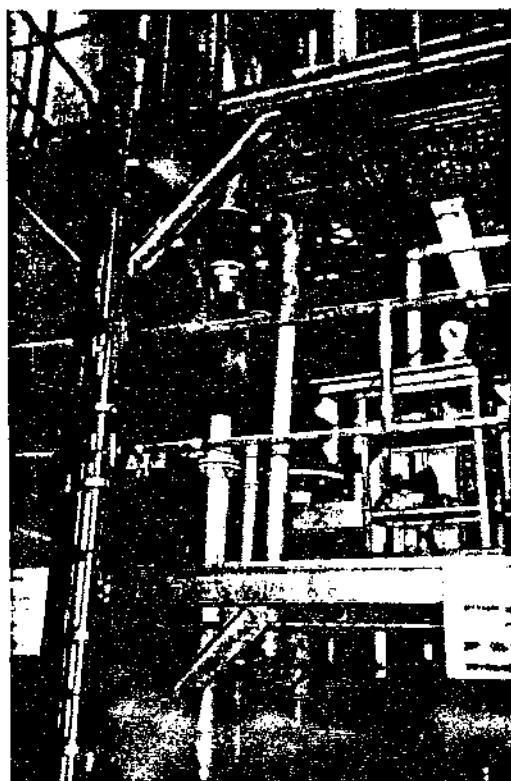


Fig.4.10.Foto: vista de parte do aparato experimental

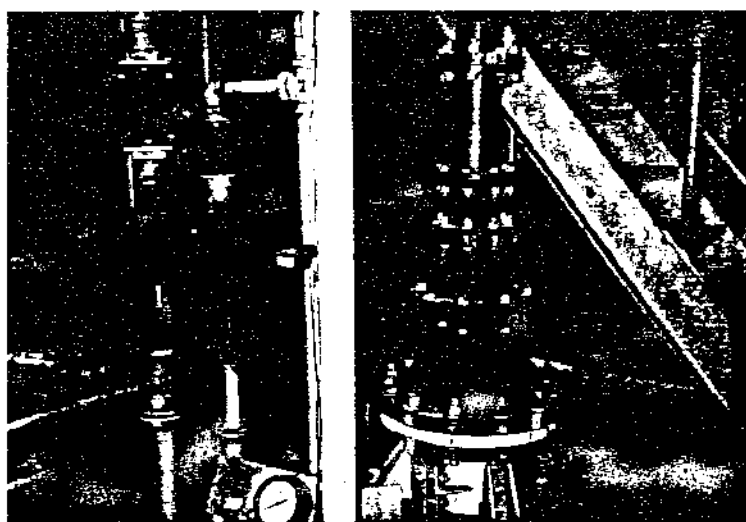


Fig.4.11.Foto: vista dos rotâmetros de gás e tubulação

4.4. Procedimento Experimental

Verificar todos os instrumentos eletrônicos e calibrá-los conforme a necessidade. Usar um analisador multicanal, durante a calibragem inicial, para mapear a "janela" do pico de energia do raio gama utilizado nas medidas de fração de vazio (servindo, portanto, de "filtro"). Proceder, a seguir, à calibração do analisador monocanal (permanente) com o analisador multicanal.

Após a instalação de todos os equipamentos, conexões e instrumentos necessários ao experimentos, proceder ao seguinte programa experimental:

(1) Calibração fora do tubo: efetuar 5 medidas (contagens) externas ao tubo. Esta medida, feita para verificar a calibração da fonte, só deve ser iniciada após a estabilização da voltagem (1.105 V) e de outras variáveis.

(2) Verificar nível da caixa d'água.

(3) Verificar se o dreno da seção de teste está fechado.

(4) Ligar a bomba d'água e verificar pressão e temperatura.

(5) Acionar lentamente a válvula de controle de ar (descarga) proveniente do compressor e verificar a pressão e temperatura.

(6) Calibração do tubo vazio: fazer 5 medidas por corda, variando de - 50 mm a + 50 mm, de 10 em 10 mm. A corda central ($x = 0$) corresponde ao eixo-y (ou seja, neste caso mede-se a intensidade local do feixe de raios gama que atravessa a corda correspondente ao diâmetro do tubo).

(7) Calibração do tubo cheio: fazer 5 medidas por corda, no intervalo [-50, +50].

(8) Verificar se o nível de água do separador água-ar já está estabilizado.

(9) Leitura do par de vazões (Q_g , Q_l). As vazões de gás (ar) utilizadas foram: 5, 15, 50, 150, 300 e 450 m³/h. As vazões de líquido (água) utilizadas foram: 5, 10, 15, 20 e 25 m³/h. As restrições nas vazões de água e ar deveram-se à capacidade dos equipamentos e à faixa de leitura dos instrumentos. Procurou-se atingir todos os padrões os padrões de escoamento possíveis.

(10) Leitura das temperaturas de água e ar.

(11) Observar o padrão de escoamento.

(12) Leitura da pressão de entrada no rotâmetro de gás e da pressão de entrada na seção de teste. Registrar as pressões no registrador HP de quatro penas.

(13) Leitura da pressão barométrica (Obs.: As pressões medidas na seção de teste ficaram bem próximas da atmosférica).

(14) Leitura das contagens da mistura bifásica. Zerar o contador e o temporizador. Acionar a contagem e ajustar o temporizador para o tempo determinado. Efetuar três leituras de cada corda, variando no intervalo [-50, +50], distando 10 mm entre uma e outra. As contagens devem ser registradas numa impressora conectada ao contador e temporizador.

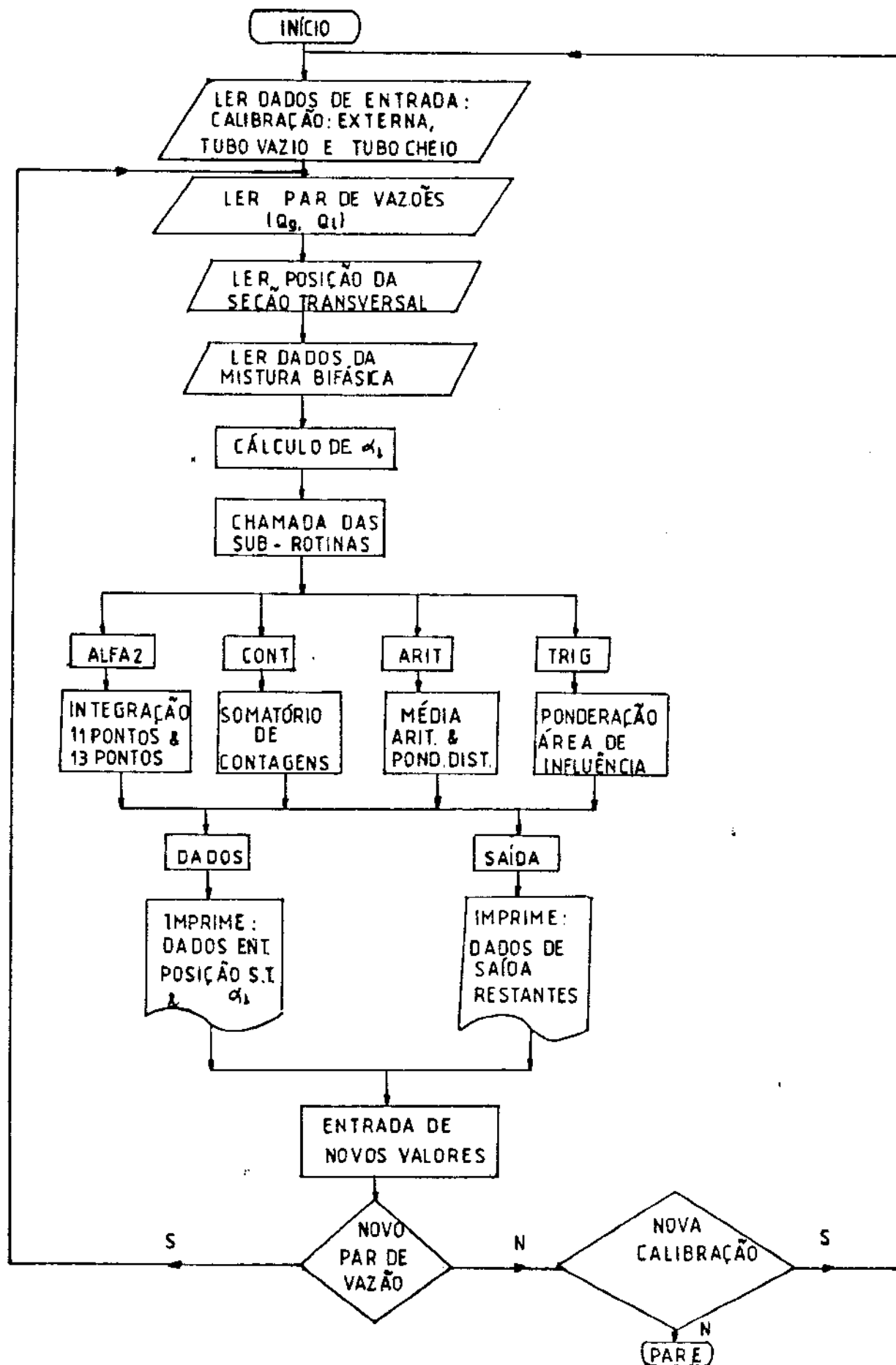
(15) Após as leituras de todas as cordas para um determinado par de vazões, mudar a vazão de água. Voltar ao item (4).

(16) Percorridas todas as vazões (para um determinado Q_g), mudar a vazão de ar, repetindo o processo a partir do item (4), para uma vazão inicial de água.

(17) Preencher folha de dados.

(18) Fazer todas estas medidas para a seção transversal inferior (a 155 cm da base do tubo de policarbonato). Repetir o processo para a seção transversal superior, situada a 231 cm da base do tubo de policarbonato, e, portanto, a 76 cm de distância da primeira seção transversal.

Foi elaborado um programa de computador, em linguagem FORTRAN, que lê todos estes dados e calcula, nas suas sub-rotinas, a fração de vazio linear para cada corda e a fração de vazio superficial por todos os métodos citados (integração 11 pontos, integração 13 pontos, somatório de contagens, média aritmética, ponderação por distância e ponderação por área). Segue o fluxograma do programa de computador.



5. ANÁLISE DE ERRO

5.1. Critérios adotados para análise de erro

A validade dos resultados experimentais depende dos cuidados tomados durante a realização dos experimentos, da qualidade e precisão dos aparelhos utilizados na medição dos parâmetros de interesse, e do número de experimentos realizados para a determinação de cada parâmetro.

A análise inicial apresentada neste capítulo é capaz de prever a propagação de erros experimentais aleatórios (ou erros estatísticos), através do método de Kline e McClintock [23]. Este método fornece as incertezas associadas a um determinado parâmetro dentro de 95 % de probabilidade, o que significa que, em cada 100 medidas realizadas, 95 terão incertezas menores ou iguais à incerteza fornecida pelo método. A análise será feita tanto para a fração de vazio linear quanto para a superficial.

A segunda análise apresentada está relacionada com as flutuações de vazios da mistura bifásica. É o chamado "erro dinâmico", erro este associado ao processo de determinação da fração de vazio média temporal quando se mede com raios gama usando um contador. É, pois, um erro específico do processo.

Outros erros sistemáticos ou mesmo erros do modelo teórico apresentado escapam destas análises.

5.2. Análise do erro na fração de vazio linear

Considerando R o resultado experimental cuja obtenção depende da medição dos parâmetros $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$, tem-se:

$$R = f(S_1, S_2, S_3, \dots, S_n) \quad (5.1)$$

A incerteza associada ao parâmetro R pode ser determinada pela seguinte expressão, segundo o método de Kline e

McClintock [23]:

$$(\Delta R)^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial S_1} \right)^2 \cdot (\Delta S_1)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial S_2} \right)^2 \cdot (\Delta S_2)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial S_n} \right)^2 \cdot (\Delta S_n)^2 \quad (5.2)$$

onde: ΔR = incerteza (ou erro estatístico) associada ao resultado
 ΔS_i = incerteza das variáveis independentes.

A expressão usada neste trabalho para a determinação da fração de vazio linear é:

$$\alpha = \frac{\ln(I/I_1)}{\ln(I_g/I_1)} = \frac{\ln(I/I_1)}{\ln c} \quad (5.3)$$

onde: $c = I_g/I_1$.

Então, pode-se também deduzir que

$$\alpha - 1 = \frac{\ln(I/I_g)}{\ln(I_g/I_1)} = \frac{\ln(I/I_g)}{\ln c} \quad (5.4)$$

Pelo método de Kline e McClintock, tem-se:

$$(\Delta \alpha)^2 = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial I} \right)^2 \cdot (\Delta I)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial I_1} \right)^2 \cdot (\Delta I_1)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial I_g} \right)^2 \cdot (\Delta I_g)^2 \quad (5.5)$$

$$\text{onde: } \frac{\partial \alpha}{\partial I} = \frac{1}{I \cdot \ln(I_g/I_1)} = \frac{1}{I \cdot \ln c} \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial I_l} = \frac{\ln(I/I_g)}{I_l \cdot [\ln(I_g/I_l)]^2} = \frac{\alpha - 1}{I_l \cdot \ln c} \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial I_g} = - \frac{\ln(I/I_l)}{I_g \cdot [\ln(I_g/I_l)]^2} = - \frac{\alpha}{I_g \cdot \ln c} \quad (5.8)$$

Combinando a equação 5.5 com as derivadas parciais 5.6 - 5.8, tem-se:

$$\begin{aligned} (\Delta \alpha)^2 &= \left[\frac{1}{\ln c} \right]^2 \cdot \left[\frac{\Delta I}{I} \right]^2 + \\ &+ \left[\frac{\alpha - 1}{\ln c} \right]^2 \cdot \left[\frac{\Delta I_l}{I_l} \right]^2 + \left[- \frac{\alpha}{\ln c} \right]^2 \cdot \left[\frac{\Delta I_g}{I_g} \right]^2 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Como a variação estatística é independente do material da seção de teste, tem-se:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta I_l}{I_l} = \frac{\Delta I_g}{I_g} \quad (5.10)$$

Substituindo na equação 5.9, tem-se:

$$\begin{aligned} (\Delta \alpha)^2 &= \left[\frac{\Delta I}{I} \right]^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{\ln c} \right)^2 + \left(\frac{\alpha - 1}{\ln c} \right)^2 + \left(\frac{\alpha}{\ln c} \right)^2 \right] = \\ &= \left[\frac{\Delta I}{I \cdot \ln c} \right]^2 \cdot \left[2 \cdot (\alpha^2 - \alpha + 1) \right] \end{aligned} \quad (5.11)$$

Dai, tem-se que

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta I}{I \cdot \ln c} \cdot \left[2 \cdot (\alpha^2 - \alpha + 1) \right]^{0,5} \quad (5.12)$$

$\Delta\alpha$, portanto, é função de α .

$$\begin{aligned} \text{A função } f &= f(\alpha) = \left[2 \cdot (\alpha^2 - \alpha + 1) \right]^{0,5} = \\ &= \left\{ 2 \cdot \left[1 - \alpha \cdot (1 - \alpha) \right] \right\}^{0,5} \end{aligned}$$

é derivável, e sua derivada $[f'(\alpha)]$ resulta em:

$$f'(\alpha) = \frac{2\alpha - 1}{\left[2(\alpha^2 - \alpha + 1) \right]^{0,5}} \quad (5.13)$$

Fazendo $f'(\alpha) = 0$, obtém-se $\alpha = 0,5$. Como a segunda derivada de $f(\alpha)$ é positiva, tem-se que este é um ponto de mínimo. Os pontos de máximo são obtidos para $\alpha = 0$ ou $\alpha = 1$.

Observa-se, a partir dos dados experimentais, que a dispersão nas contagens resultantes das medidas de fração de vazio lineares não chega a 2 %. Foram feitas várias medidas em cada corda, durante uma corrida do programa experimental, registrando-se - nas listagens dos Anexos 1 e 2 - as médias obtidas. Portanto, considerar-se-á $(\Delta I/I)$ máximo igual a 0,02. O contraste, também a partir dos dados experimentais, será considerado igual a 2. Assim, tem-se:

$$\text{- para } \alpha = 0,50 \Rightarrow \Delta\alpha = \left(\frac{0,02}{\ln 2} \right) \cdot 1,22474 = 0,035 \text{ ou } 7,0 \%;$$

$$\text{- para } \alpha = 0,20 \Rightarrow \Delta\alpha = 0,037 \text{ ou } 18,7 \%;$$

Outros valores encontram-se na Tabela 5.1.

Para $\alpha = 0$, o erro relativo tende a infinito. Com os dados da tabela 5.1 foi plotado o gráfico da Fig. 5.1.

TABELA 5.1 - Erro Estatístico na Fração de Vazio Linear

α (%)	$\Delta\alpha$ (%)	ε_r (%)
90	3,9	4,3
80	3,7	4,7
70	3,6	5,2
60	3,6	5,9
50	3,5	7,0
40	3,6	8,9
30	3,6	12,1
20	3,7	18,7
10	3,9	38,9
5	4,0	79,6

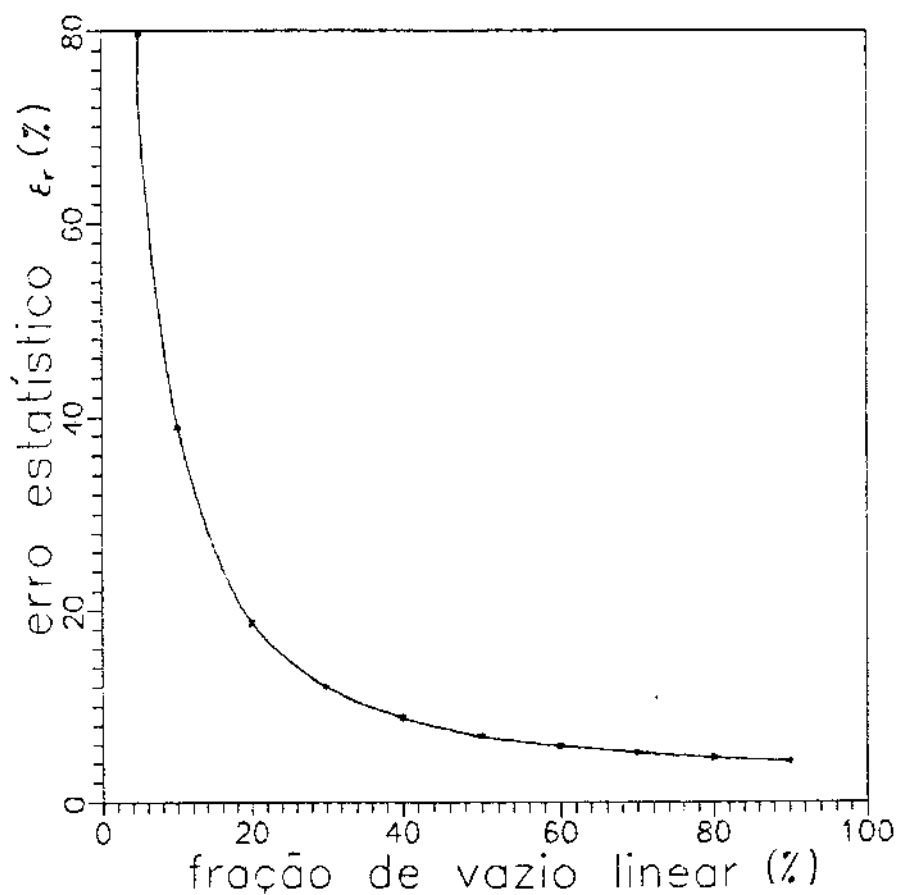


Fig.5.1. Erro estatístico da fração de vazio linear

5.3. Análise do erro na fração de vazio superficial

Aqui será feita a análise do erro na fração de vazio superficial calculada por integração numérica.

A expressão usada para a integração é:

$$\alpha_z = \frac{2}{\pi R^2} \cdot \int_{-R}^R \left[\frac{\ln(I/I_1)}{\ln(I_g/I_1)}(x) \right] \cdot \sqrt{R^2 - x^2} \, dx \quad \dots(5.14)$$

Por integração numérica (de 11 pontos), tem-se:

$$\begin{aligned} \alpha_z &= \frac{h}{3} \cdot [f_1 + 4.(f_2 + f_4 + f_6 + f_8 + f_{10}) + \\ &\quad + 2.(f_3 + f_5 + f_7 + f_9) + f_{11}] \pm \varepsilon_1 = \\ &= \frac{h}{3} \cdot [f_1 + 4.f_p + 2.f_i + f_z] \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$\text{onde: } f = \frac{2}{\pi R^2} \cdot \sqrt{R^2 - x^2} \cdot \left[\frac{\ln(I/I_1)}{\ln(I_g/I_1)}(x) \right] \quad (5.16)$$

os subscritos p, i e z significam: termos pares, ímpares e último termo (décimo-primeiro).

$$\text{Fazendo: } a = \frac{2}{\pi R^2}$$

$$b = \sqrt{R^2 - x^2}$$

$$c = \frac{I_g}{I_1}$$

$$\alpha(x) = \frac{\ln(I/I_0)}{\ln e} (x)$$

Então: $f = f(x) = a \cdot b(x) \cdot \alpha(x)$ (5.17)

Pelo método de Kline e McClintock [23], tem-se:

$$\begin{aligned} (\Delta\alpha_2)^2 &= \left(\frac{\partial\alpha_2}{\partial R} \right)^2 \cdot (\Delta R)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_2}{\partial x} \right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \\ &+ \left(\frac{\partial\alpha_2}{\partial I_1} \right)^2 \cdot (\Delta I_1)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_2}{\partial I_g} \right)^2 \cdot (\Delta I_g)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_2}{\partial I} \right)^2 \cdot (\Delta I)^2 \\ &\dots (5.18) \end{aligned}$$

onde:

$$\frac{\partial\alpha_2}{\partial R} = \frac{h}{3} \cdot \left[\frac{\partial f_1}{\partial R} + 4 \cdot \left(\frac{\partial f_P}{\partial R} \right) + 2 \cdot \left(\frac{\partial f_1}{\partial R} \right) + \frac{\partial f_2}{\partial R} \right]$$

$$\frac{\partial\alpha_2}{\partial x} = \frac{h}{3} \cdot \left[\frac{\partial f_1}{\partial x} + 4 \cdot \left(\frac{\partial f_P}{\partial x} \right) + 2 \cdot \left(\frac{\partial f_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial f_2}{\partial x} \right]$$

$$\frac{\partial\alpha_2}{\partial I_1} = \frac{h}{3} \cdot \left[\frac{\partial f_1}{\partial I_1} + 4 \cdot \left(\frac{\partial f_P}{\partial I_1} \right) + 2 \cdot \left(\frac{\partial f_1}{\partial I_1} \right) + \frac{\partial f_2}{\partial I_1} \right]$$

$$\frac{\partial\alpha_2}{\partial I_g} = \frac{h}{3} \cdot \left[\frac{\partial f_1}{\partial I_g} + 4 \cdot \left(\frac{\partial f_P}{\partial I_g} \right) + 2 \cdot \left(\frac{\partial f_1}{\partial I_g} \right) + \frac{\partial f_2}{\partial I_g} \right]$$

$$\frac{\partial\alpha_2}{\partial I} = \frac{h}{3} \cdot \left[\frac{\partial f_1}{\partial I} + 4 \cdot \left(\frac{\partial f_P}{\partial I} \right) + 2 \cdot \left(\frac{\partial f_1}{\partial I} \right) + \frac{\partial f_2}{\partial I} \right]$$

$$\text{Mas} \quad \frac{\partial f}{\partial R} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\ln(I/I_1)}{\ln c} \cdot \left[\frac{2x^2 - R^2}{R^3 \sqrt{R^2 - x^2}} \right]$$

$$\text{ou:} \quad \frac{\partial f}{\partial R} = \frac{2\alpha}{\pi} \cdot \left[\frac{2x^2 - R^2}{R^3 \sqrt{R^2 - x^2}} \right] \quad (5.19)$$

Como f é função de a , b , I , I_1 , I_g , todas estas funções de x (exceto o fator a), tem-se, pela regra da cadeia, que:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{\partial f}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial b} \cdot \frac{\partial b}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial I} \cdot \frac{\partial I}{\partial x} + \\ &+ \frac{\partial f}{\partial I_1} \cdot \frac{\partial I_1}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial I_g} \cdot \frac{\partial I_g}{\partial x} \end{aligned} \quad (5.20)$$

$$\text{Mas:} \quad \frac{\partial a}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial b} = \frac{2\alpha}{\pi R^2} ; \quad \frac{\partial b}{\partial x} = - \frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}}$$

$$\frac{\partial f}{\partial I} = \frac{2}{\pi R^2} \cdot \sqrt{R^2 - x^2} \cdot \left(\frac{1}{I \cdot \ln c} \right) ; \quad \frac{\partial I}{\partial x} \approx \frac{\Delta I}{h}$$

$$\frac{\partial f}{\partial I_1} = \frac{2}{\pi R^2} \cdot \sqrt{R^2 - x^2} \cdot \left(\frac{\alpha - 1}{I_1 \cdot \ln c} \right) ; \quad \frac{\partial I_1}{\partial x} \approx \frac{\Delta I_1}{h}$$

$$\frac{\partial f}{\partial I_g} = \frac{2}{\pi R^2} \cdot \sqrt{R^2 - x^2} \cdot \left(\frac{-\alpha}{I_g \cdot \ln c} \right) ; \quad \frac{\partial I_g}{\partial x} \approx \frac{\Delta I_g}{h}$$

onde:
$$\frac{\partial I}{\partial x} \cong \frac{I_{m+1} - I_m}{x_{m+1} - x_m} = \frac{\Delta I}{h}$$

Logo:
$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{2}{\pi R^2} \cdot \left[- \frac{\alpha \cdot x}{\sqrt{R^2 - x^2}} + \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{I \cdot \ln c} \cdot \frac{\Delta I}{h} + \right.$$

$$\left. + \frac{(\alpha - 1) \cdot \sqrt{R^2 - x^2}}{I_l \cdot \ln c} \cdot \frac{\Delta I_l}{h} - \frac{\alpha \cdot \sqrt{R^2 - x^2}}{I_g \cdot \ln c} \cdot \frac{\Delta I_g}{h} \right] \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{2}{\pi R^2} \cdot \left[- \frac{\alpha \cdot x}{\sqrt{R^2 - x^2}} + \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{\ln c} \cdot \left(\frac{\Delta I}{I} \right) \cdot \left(\frac{1}{h} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{(\alpha - 1) \cdot \sqrt{R^2 - x^2}}{\ln c} \cdot \left(\frac{\Delta I_l}{I_l} \right) \cdot \left(\frac{1}{h} \right) - \frac{\alpha \cdot \sqrt{R^2 - x^2}}{\ln c} \cdot \left(\frac{\Delta I_g}{I_g} \right) \cdot \left(\frac{1}{h} \right) \right]$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \cong \frac{2}{\pi R^2} \cdot \left[- \frac{\alpha \cdot x}{\sqrt{R^2 - x^2}} + \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{\ln c} \cdot \left(\frac{\Delta I}{I} \right) \cdot \left(\frac{1}{h} + \frac{\alpha - 1}{h} - \frac{\alpha}{h} \right) \right]$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \cong - \frac{2 \cdot \alpha \cdot x}{\pi R^2 \cdot \sqrt{R^2 - x^2}} \quad (5.22)$$

Considerando os valores de α aproximadamente simétricos em relação ao eixo-y (para simplificação dos cálculos), tem-se:

$$\alpha_2 \cong \frac{h}{3} \cdot \left[f_1 + 4 \cdot f_p + 2 \cdot f_l + f_2 \right] \cong$$

$$\cong \frac{2}{3} \cdot h \cdot \left[f_1 + 4.(f_2 + f_4) + 2.(f_3 + f_5 + f_6) \right] \quad (5.23)$$

Desmembrando $(\Delta \alpha)^2$ em S_1 e S_2 , para simplificação dos cálculos, e fazendo:

$$\beta_j = \alpha_j - 1$$

$$b_j = \sqrt{R^2 - x_j^2}$$

para $1 \leq j \leq 6$, tem-se:

$$\begin{aligned} S_1 &= \left(\frac{\partial \alpha}{\partial I} \right)^2 \cdot (\Delta I)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial I_1} \right)^2 \cdot (\Delta I_1)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial I_9} \right)^2 \cdot (\Delta I_9)^2 = \\ &= \left(\frac{2}{3h} \right)^2 \cdot \left(\frac{2}{\pi \cdot R^2 \cdot \ln c} \right)^2 \cdot \left[b_1 + 4.(b_2 + b_4) + 2.(b_3 + b_5 + b_6) \right]^2 \cdot \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 + \\ &+ \left(\frac{2}{3h} \right)^2 \cdot \left(\frac{2}{\pi \cdot R^2 \cdot \ln c} \right)^2 \cdot \left[b_1 \cdot \beta_1 + 4.(b_2 \cdot \beta_2 + b_4 \cdot \beta_4) + \right. \\ &\quad \left. + 2.(b_3 \cdot \beta_3 + b_5 \cdot \beta_5 + b_6 \cdot \beta_6) \right]^2 \cdot \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 + \\ &+ \left(\frac{2}{3h} \right)^2 \cdot \left(\frac{2}{\pi \cdot R^2 \cdot \ln c} \right)^2 \cdot \left[-b_1 \cdot \alpha_1 - 4.(b_2 \cdot \alpha_2 + b_4 \cdot \alpha_4) + \right. \end{aligned}$$

$$- 2.(b_3.\alpha_3 + b_5.\alpha_5 + b_6.\alpha_6) \Big]^2 \cdot \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2$$

$$\begin{aligned} \therefore S1 &= \left(\frac{4 \cdot h}{3 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \ln c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 \cdot \left\{ \left[b_1 + 4(b_2 + b_4) + 2(b_3 + b_5 + b_6) \right]^2 + \right. \\ &+ \left[b_1.\beta_1 + 4(b_2.\beta_2 + b_4.\beta_4) + 2(b_3.\beta_3 + b_5.\beta_5 + b_6.\beta_6) \right]^2 + \\ &\left. + \left[-b_1.\alpha_1 - 4(b_2.\alpha_2 + b_4.\alpha_4) - 2(b_3.\alpha_3 + b_5.\alpha_5 + b_6.\alpha_6) \right]^2 \right\} \quad (5.24) \end{aligned}$$

Fazendo: $d_j = 2.x_j^2 - R^2$ e $x_6 = 0$, tem-se:

$$\begin{aligned} S_2 &= \left(\frac{\partial \alpha_2}{\partial R}\right)^2 \cdot (\Delta R)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_2}{\partial x}\right)^2 \cdot (\Delta x)^2 = \\ &= \left(\frac{2h}{3}\right)^2 \cdot \left(\frac{2}{\pi \cdot R^3}\right)^2 \cdot \left[\alpha_1 \frac{d_1}{b_1} + 4\left(\alpha_2 \frac{d_2}{b_2} + \alpha_4 \frac{d_4}{b_4}\right) + \right. \\ &+ \left. 2\left(\alpha_3 \frac{d_3}{b_3} + \alpha_5 \frac{d_5}{b_5} + \alpha_6 \frac{d_6}{b_6}\right) \right]^2 \cdot (\Delta R)^2 + \\ &+ \left(\frac{2h}{3}\right)^2 \cdot \left(\frac{2}{\pi \cdot R^2}\right)^2 \cdot \left[-\alpha_1 \frac{x_1}{b_1} - 4\left(\alpha_2 \frac{x_2}{b_2} + \alpha_4 \frac{x_4}{b_4}\right) + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - 2 \left(\alpha_3 \frac{x_3}{b_3} + \alpha_5 \frac{x_5}{b_5} + \alpha_6 \frac{x_6}{b_6} \right)^2 \cdot (\Delta x)^2 \\
S_2 &= \left(\frac{4 \cdot h}{3 \cdot \pi \cdot R^3} \right)^2 \cdot \left[\alpha_1 \frac{d_1}{b_1} + 4 \left(\alpha_2 \frac{d_2}{b_2} + \alpha_4 \frac{d_4}{b_4} \right) + \right. \\
& + 2 \left(\alpha_3 \frac{d_3}{b_3} + \alpha_5 \frac{d_5}{b_5} + \alpha_6 \frac{d_6}{b_6} \right) \left. \right]^2 \cdot (\Delta R)^2 + \\
& + \left(\frac{4 \cdot h}{3 \cdot \pi \cdot R^2} \right)^2 \cdot \left[-\alpha_1 \frac{x_1}{b_1} - 4 \left(\alpha_2 \frac{x_2}{b_2} + \alpha_4 \frac{x_4}{b_4} \right) + \right. \\
& \left. - 2 \left(\alpha_3 \frac{x_3}{b_3} + \alpha_5 \frac{x_5}{b_5} \right) \right]^2 \cdot (\Delta x)^2
\end{aligned} \tag{5.25}$$

$$\therefore \Delta \alpha = \sqrt{S_1 + S_2} \tag{5.26}$$

O Apêndice D mostra o cálculo de vários exemplos do erro estatístico na fração de vazio superficial, tendo por base a análise feita acima. A tabela 5.2 mostra alguns valores calculados e a Fig. 5.2 mostra o gráfico da fração de vazio superficial versus erro estatístico.

TABELA 5.2 - Erro Estatístico na Fração de Vazio Superficial

α (%)	$\Delta\alpha$ (%)	ϵ_r (%)
85,3	2,3	2,7
46,7	3,5	7,5
18,2	3,7	20,3
17,8	3,7	20,8

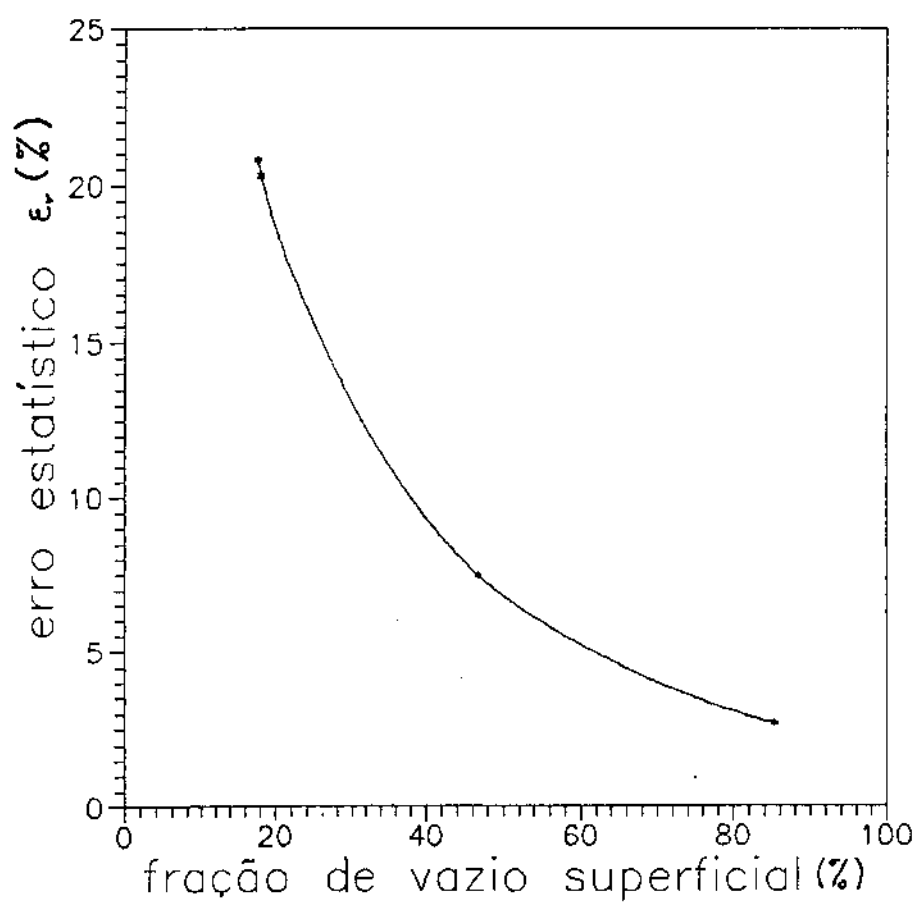


Fig.5.2. Erro estatístico da fração de vazio superficial

5.4. Erro dinâmico para vazios flutuantes

Um erro dinâmico está associado ao processo de cálculo da média temporal quando se mede a fração de vazio pela técnica da atenuação de raios gama (contagens num registrador).

Num escoamento bifásico, a intensidade emergente I é geralmente medida num certo tempo t (normalmente de 10 s a 1 min). Consequentemente a medida fornece o número N de fótons contados num intervalo de tempo t :

$$N = \int I \, dt \quad (5.27)$$

A fração de vazio linear é dada pela equação 5.3.

Um erro resulta daí porque o valor médio temporal do logaritmo natural na equação 5.3, que fornece o valor desejado, não é igual ao logaritmo da intensidade média temporal. Isto está mostrado esquematicamente na Fig. 5.3 para o caso de uma flutuação de fração de vazio entre dois extremos: $\alpha_{\max}$ e $\alpha_{\min}$. Observa-se que o valor calculado é sempre maior que o valor real, sendo a diferença ($\Delta\alpha_D$) o erro dinâmico [24].

Para propósitos de demonstração, considere um determinado padrão de escoamento, como o agitante ou o anular. Se r é a fração de tempo em que $\alpha = \alpha_{\min}$, então a fração de vazio real média temporal é dada por:

$$\bar{\alpha} = \alpha_{\min} \cdot r + \alpha_{\max} \cdot (1 - r) \quad (5.28)$$

A fração de vazio linear média-temporal calculada pela eq. 5.3 pode ser deduzida da seguinte maneira: se $I_{\max}$ é o valor de $I(t)$ quando $\alpha = \alpha_{\max}$ e $I_{\min} = I(t)$ quando $\alpha = \alpha_{\min}$ e a absorção do fóton pela fase gasosa puder ser desprezada, tem-se:

$$I_{\max} = I_0 \cdot e^{-2 \cdot \mu_a \cdot L_a} \cdot e^{-\mu_l \cdot L \cdot (1 - \alpha_{\max})} \quad (5.29)$$

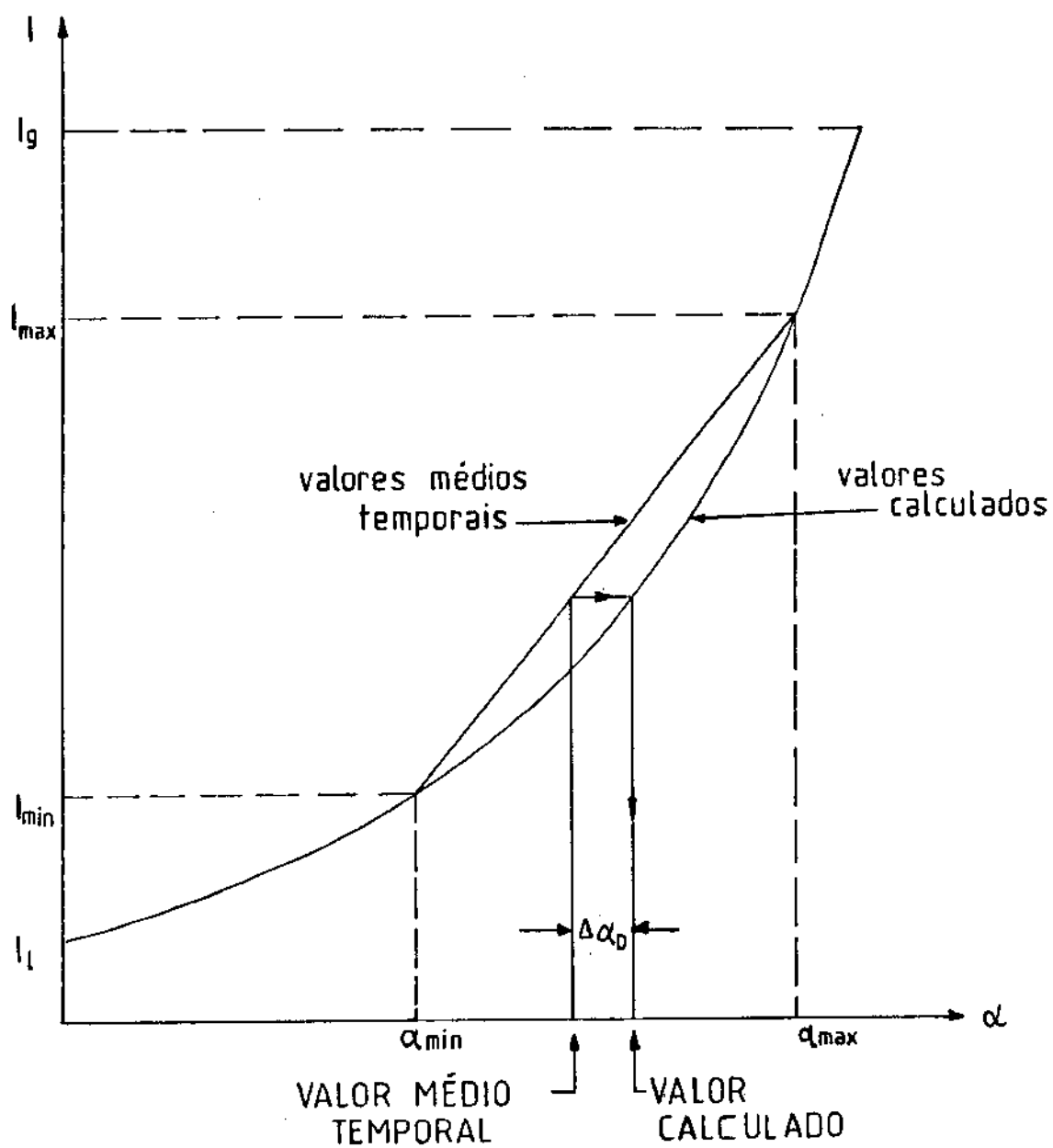


Fig.5.3. Esquema do erro dinâmico

$$I_{\min} = I_0 \cdot e^{-2 \cdot \mu_a \cdot L_s} \cdot e^{-\mu_l \cdot L \cdot (1 - \alpha_{\min})} \quad (5.30)$$

onde: $L = L_{tp}$ = comprimento do canal (duto) contendo a mistura bifásica;

L_s = espessura da parede da seção de teste.

A intensidade de fótons média-temporal é dada por:

$$\bar{I} = I_{\min} \cdot r + I_{\max} \cdot (1 - r) \quad (5.31)$$

Combinando as equações 5.29 - 5.31 resulta:

$$\bar{I} = I_0 \cdot e^{-2 \cdot \mu_a \cdot L_s} \cdot e^{-\mu_l \cdot L} \cdot \left[r \cdot e^{\mu_l \cdot L \cdot \alpha_{\min}} + (1 - r) \cdot e^{\mu_l \cdot L \cdot \alpha_{\max}} \right] \quad \dots (5.32)$$

A fração de vazio média-temporal calculada ($\bar{\alpha}_c$), dada pela eq. 5.3, fica então:

$$\bar{\alpha}_c = \frac{\ln(\bar{I}/I_l)}{\ln(I_g/I_l)} \quad (5.33)$$

onde, desprezando-se a absorção na fase gasosa, tem-se:

$$I_l = I_0 \cdot e^{-2 \cdot \mu_a \cdot L_s} \cdot e^{-\mu_l \cdot L}$$

$$I_g = I_0 \cdot e^{-2 \cdot \mu_a \cdot L_s}$$

Substituindo estes valores na eq. 5.33 e definindo $\lambda = \mu_l \cdot L$ e $k = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, tem-se:

$$\bar{\alpha}_c = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left[r \cdot e^{\lambda \cdot \alpha_{\min}} + (1 - r) \cdot e^{\lambda \cdot (k + \alpha_{\min})} \right] \quad \dots (5.34)$$

O erro dinâmico $(\Delta\alpha_D)$ pode ser calculado subtraindo-se a eq. 5.28 da eq. 5.34:

$$\Delta\alpha_D = \bar{\alpha}_c - \bar{\alpha} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left[r \cdot e^{\lambda \cdot \alpha_{min}} + (1-r) \cdot e^{\lambda \cdot (k+\alpha_{min})} \right] - \alpha_{min} \cdot r - (\alpha_{min} + k) \cdot (1 - r) \quad (5.35)$$

Uma observação importante sobre a eq. 5.35 é que

$$\frac{\partial(\Delta\alpha_D)}{\partial(\alpha_{min})} = 0.$$

Isto implica que, embora a magnitude das flutuações de vazios seja importante, o erro dinâmico é independente dos pontos extremos dessas flutuações. Daí, a eq. 5.33 pode ser simplificada pondo-se $\alpha_{min} = 0$, sem haver nenhuma mudança nos resultados. Assim:

$$\Delta\alpha_D = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left[r + (1 - r) \cdot e^{\lambda \cdot k} \right] - k \cdot (1 - r) \quad (5.36)$$

Calculando-se as derivadas parciais de $\Delta\alpha_D$ na equação acima com relação a λ e k , determina-se que o erro cresce monotonicamente com λ (e, portanto, com o aumento do coeficiente de atenuação ou o diâmetro do tubo) e com k . Como o limite superior de k é 1, o máximo erro para uma dada geometria é:

$$(\Delta\alpha_D)_{max} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left[r + (1 - r) \cdot e^{\lambda} \right] - (1 - r) \quad (5.37)$$

O gráfico de $(\Delta\alpha_D)_{max}$ versus r , para vários valores de λ , encontra-se na Fig. 5.4.

Uma estimativa do erro dinâmico máximo pode então ser feita pela eq. 5.37 ou pela Fig. 5.4.

Considerando $k = 0,10$, tem-se:

$$\Delta\alpha = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left[r + (1 - r) \cdot e^{0,1 \cdot \lambda} \right] - 0,1 \cdot (1 - r) \quad (5.38)$$

Para o experimento realizado, tem-se:

$\mu_l = 0,086 \text{ cm}^{-1}$ (coeficiente de absorção linear do ^{197}Cs na água em temperatura ambiente);

$L = 10,4 \text{ cm}$ (diâmetro interno da tubulação).

Então: $\lambda = \mu_l \cdot L = 0,8944$.

A Fig. 5.5 mostra um gráfico de r versus erro dinâmico ($\Delta\alpha$), onde $\lambda = 0,8944$ e o parâmetro k assume vários valores (de 0,10 a 1 - ou seja, o valor máximo).

Nota-se, das análises de erro feitas acima, que o erro total não é a soma dos erros estatístico e dinâmico. Trata-se de erros independentes um do outro. De fato, o erro dinâmico é um erro sistemático e pode, eventualmente, ser de sentido contrário ao do erro estatístico, que é de natureza aleatória, resultando num pequeno erro total.

Para minimizar o erro estatístico, deve-se, de acordo com a equação 5.12, aumentar a intensidade, aumentar o contraste ou diminuir a incerteza ($\Delta I/I$). A intensidade e o contraste são funções da energia, porém em sentidos opostos. Resulta, então, um compromisso entre essas variáveis. Deve-se notar também que a intensidade depende de uma série de outras variáveis, que, no entanto, não podem ser manipuladas. O contraste, por outro lado, é função do coeficiente linear de atenuação, que é inversamente proporcional à energia. Como cada fonte está relacionada com uma faixa ótima de energia, o contraste está, portanto, caracterizado pela fonte escolhida (mantendo constantes as outras variáveis). Quanto à incerteza ou dispersão estatística, pouco se pode fazer, pois se trata de um processo aleatório. Entretanto, pode-se melhorar a precisão através de um melhor controle experimental,

com instrumentos de boa qualidade, com calibrações confiáveis, etc.

Analisando a equação 5.36, nota-se que o erro dinâmico é função dos parâmetros λ , k e r . O parâmetro λ é definido pelo arranjo experimental (fonte, líquido e diâmetro do duto). Os parâmetros k e r não podem ser medidos diretamente com os equipamentos usados. O valor do parâmetro k - que mede a amplitude da fração de vazio linear numa determinada corda durante um dado tempo - poderia ser avaliado através de algum dispositivo eletrônico que permitisse um registro da resposta instantânea, constando dos limites mínimo e máximo. Uma interpretação destes sinais de saída possibilitaria uma melhor precisão na análise do erro, pois com uma estimativa de k e r , todos os parâmetros do erro dinâmico ficariam determinados. Usando os dados experimentais presentes ($\lambda = 0,8944$) e adotando $k = 0,5$, o erro dinâmico máximo (para o caso mais desfavorável de r) fica abaixo de 3 %. Para $k = 0,25$, este erro cairia para 0,7 % (na situação mais desfavorável), ao passo que para $k = 0,1$ ficaria em torno de 0,1 % no caso mais desfavorável. O valor de k é, portanto, preponderante na determinação deste erro, que, em todos os casos considerados, no entanto, é pequeno.

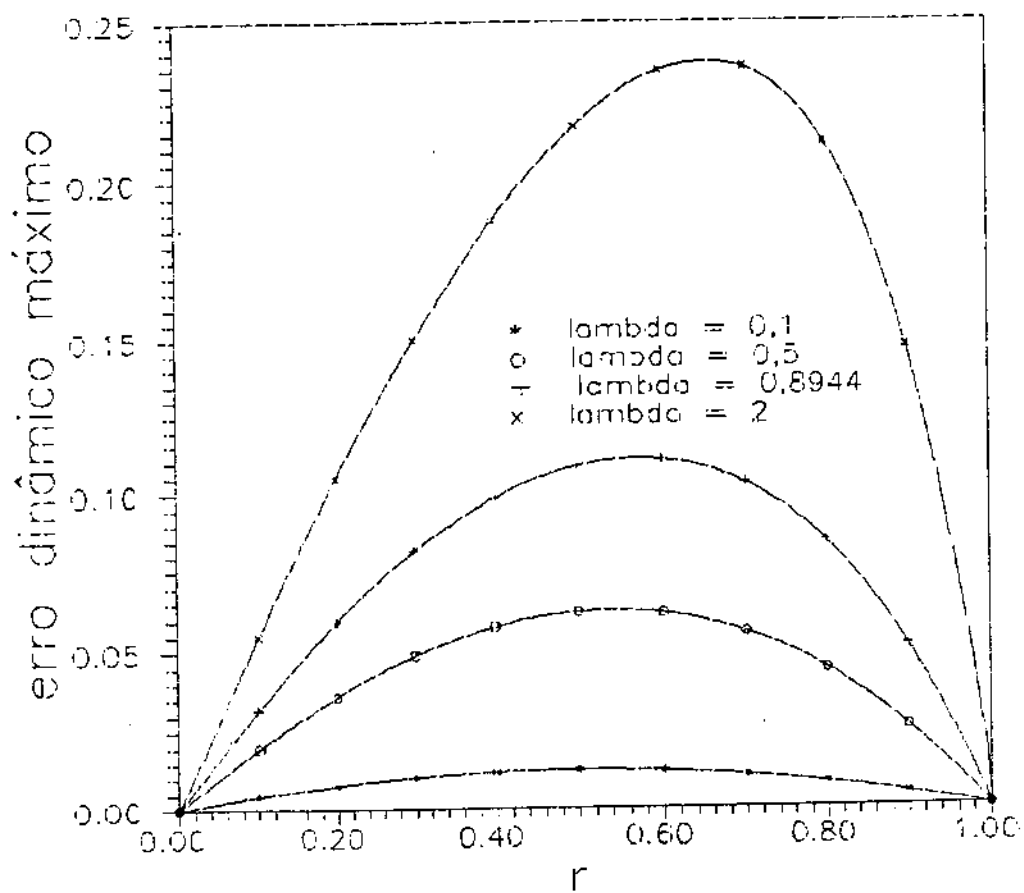


Fig. 5.4. Erro Dinâmico máximo

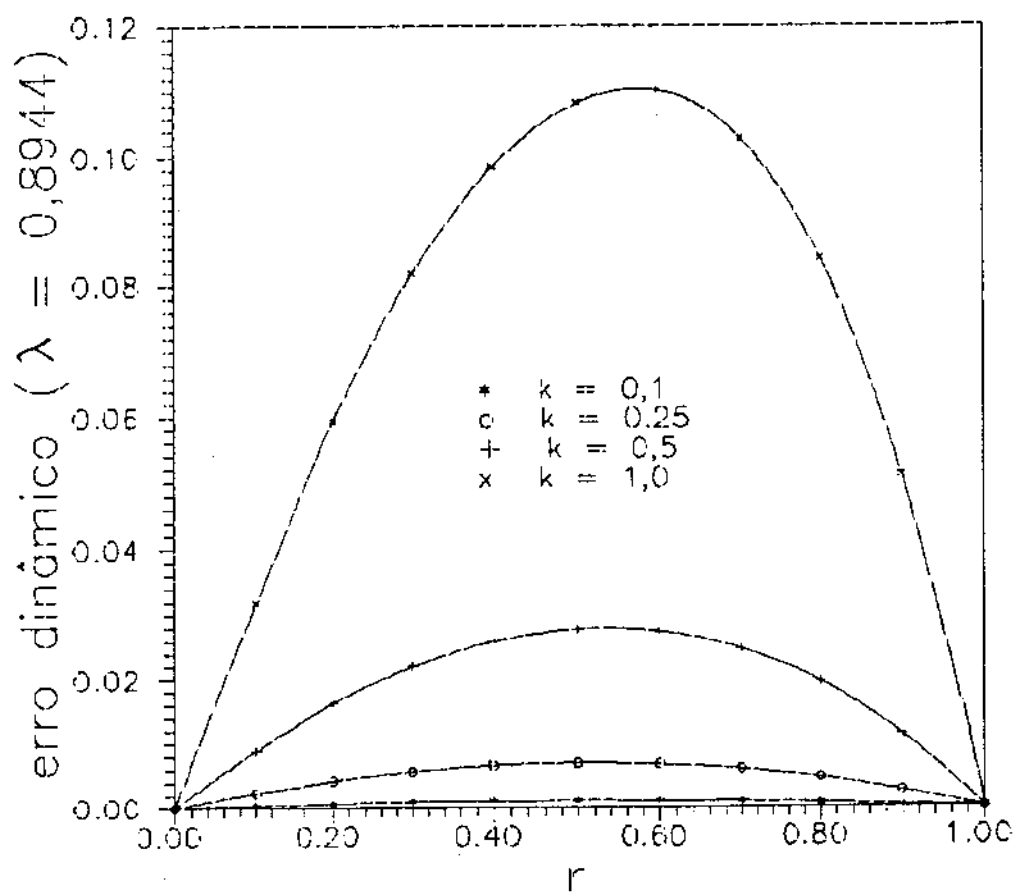


Fig.5.5. Erro dinâmico para $\lambda = 0,8944$

6. RESULTADOS

6.1. Análise geral

Nas duas seções de teste foram simulados alguns padrões de escoamento bifásico, variando a vazão de ar de 5 a 450 m³/h e a vazão de água de 5 a 25 m³/h. Os resultados obtidos são apresentados nos mapas de fluxo da Fig. 6.1 (para a seção de teste inferior) e da Fig. 6.2 (para a seção de teste superior), onde a abscissa é a velocidade superficial do gás e a ordenada é a velocidade superficial do líquido. A escala é logarítmica. As curvas traçadas representam as transições de padrões de escoamento, segundo a modelagem de Taitel et al. [25]. Nestas figuras, as letras B, P, C e N representam respectivamente o escoamento em bolhas, pistonado, agitante e anular.

As vazões foram medidas em m³/h. A área da seção transversal é dada por:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (0,104 \text{ m})^2 = 8,4949 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (6.1)$$

A velocidade superficial neste caso pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$j = \frac{Q}{A} = 0,0327 \cdot Q \dots\dots [\text{m/s}] \quad (6.2)$$

onde: $Q = Q_g$ ou $Q_l \dots\dots [\text{m}^3/\text{h}]$.

A tabela 6.1 foi gerada para mostrar os valores da velocidade superficial obtidos pela equação 6.2, a partir dos valores selecionados de vazão.

Roumy [8], utilizando a técnica de fechamento de válvulas para medir fração de vazio num escoamento em bolhas (mistura ar-água vertical ascendente), num tubo de diâmetro

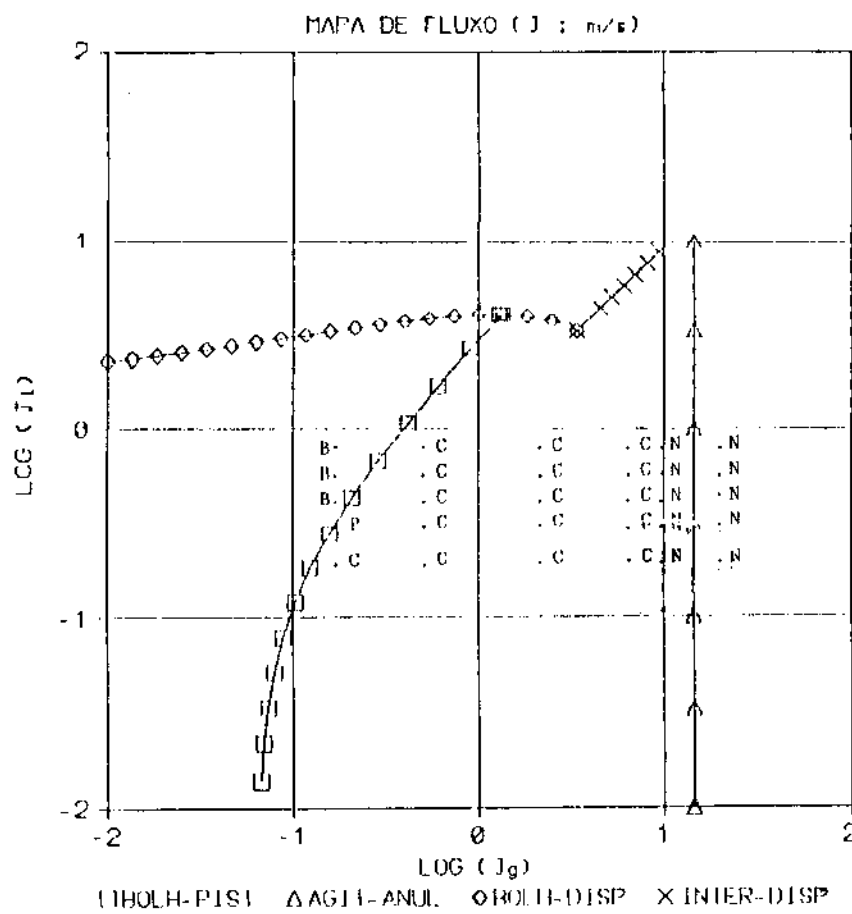
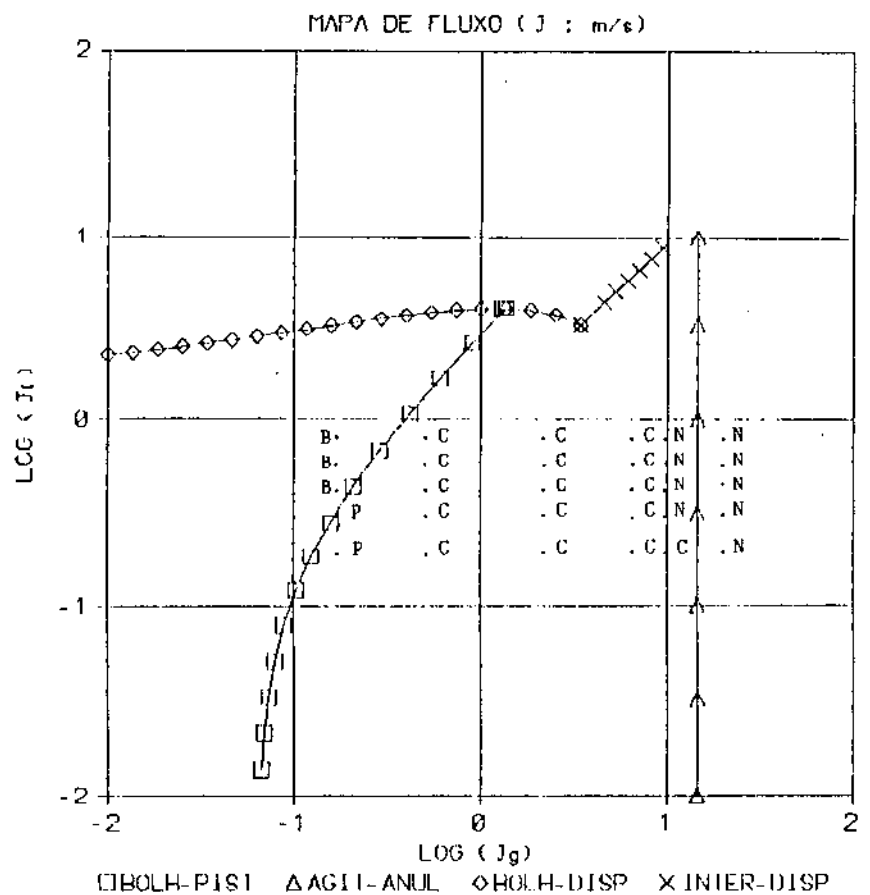


Fig.6.1. Mapa de fluxo:
seção inferior

Fig.6.2. Mapa de fluxo:
seção superior



interno de 32 mm, correlacionou a fração de vazio com as velocidades superficiais através da seguinte expressão:

$$\alpha_R = 0,9 \cdot \left[\frac{j_g}{20 + j_l} \right] \quad (6.3)$$

onde as velocidade superficiais (j_g e j_l) são dadas em cm/s.

Tabela 6.1 - Vazões e velocidades superficiais

Q (m ³ /h)	j (m/s)
5	0,1635
10	0,327
15	0,4905
20	0,654
25	0,8175
50	1,635
150	4,905
300	9,81
450	14,715

Comparando os valores encontrados no escoamento em bolhas (Tabela 6.3), e considerando que a fração de vazio superficial (α_2) não varie muito no trecho considerado (já que o valor correlacionado por Roumy refere-se à fração de vazio volumétrica), tem-se:

a) Para $Q_g = 5$ e $Q_l = 15$ m³/h (Seção superior):

$$j_g = 0,1635 \text{ m/s};$$

$$j_l = 0,4905 \text{ m/s};$$

$$\alpha_2 = 0,187 \text{ (integração 11 pontos)}$$

$$\alpha_R = 0,9 \cdot \left[\frac{j_g}{20 + j_l} \right] = 0,9 \cdot \left[\frac{16,35}{68,05} \right] = 0,213$$

b) Para $Q_g = 5$ e $Q_l = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ (Seção superior):

$$j_g = 0,1635 \text{ m/s};$$

$$j_l = 0,654 \text{ m/s};$$

$$\alpha_z = 0,124 \text{ (integração 11 pontos)}$$

$$\alpha_R = 0,9 \cdot \left(\frac{16,35}{85,40} \right) = 0,172$$

c) Para $Q_g = 5$ e $Q_l = 25 \text{ m}^3/\text{h}$ (Seção superior):

$$j_g = 0,1635 \text{ m/s};$$

$$j_l = 0,8175 \text{ m/s};$$

$$\alpha_z = 0,117 \text{ (integração 11 pontos)}$$

$$\alpha_R = 0,9 \cdot \left(\frac{16,35}{101,75} \right) = 0,145$$

Observa-se que os resultados experimentais são ligeiramente inferiores aos calculados pela equação de Roumy (para o escoamento em bolhas). Talvez essa diferença se deva ao fato dos diâmetros dos tubos utilizados serem muito diferentes. A Tabela 6.2 mostra a comparação dos resultados da fração de vazio superficial calculada pela integração e pela correlação de Roumy.

Nas faixas de vazões utilizadas, no entanto, há uma predominância de dois padrões de escoamento bifásico: agitante e anular. O padrão pistonado só apareceu em um ou dois pares de vazão. Na transição do escoamento em bolhas para o pistonado, formou-se, eventualmente, o escoamento de bolhas aglomeradas (às vezes pulsantes).

A transição do escoamento em bolhas para pistonado ocorreu em um ponto do intervalo que corresponde a frações de vazio variando de 19 a 28 % (Tabelas 6.3 e 6.4), resultado

Tabela 6.2. - Comparação de α_2 no escoamento em bolhas

J_g	J_l	α_2 (Int11)	α_R (Roumy)
0,1635	0,4905	0,187	0,213
0,1635	0,654	0,124	0,172
0,1635	0,8175	0,117	0,145

compatível com os de outros autores. Taitel e Dukler [25] determinaram que esta transição ocorre teoricamente para uma fração de vazio igual a 25 %, ao passo que Mishima e Ishii [26] estabeleceram o valor de 30 % para esta transição.

A transição agitante-anular ocorreu, nas duas seções medidas, antes da curva semi-analítica prevista por Taitel et al [25]. Isto sugere, pelo menos para as condições experimentais usadas, o deslocamento desta curva para a esquerda (Figs. 6.1 e 6.2), principalmente para velocidades superficiais do líquido maiores. Ou seja, uma curva mais inclinada para a esquerda - à medida que se aumenta a velocidade superficial do líquido - ou mesmo uma reta mais à esquerda talvez seja mais adequada que a reta prevista para a transição agitante-anular da modelagem de Taitel et al.

6.2. Fração de vazio linear

As frações de vazio lineares medidas foram colocadas em função da distância do centro do tubo, obtendo-se, assim, os perfis ao longo do tubo. As figuras seguintes mostram vários perfis de fração de vazio para os vários padrões de escoamento obtidos durante o programa experimental. Observa-se claramente a predominância do escoamento de gás na região central do tubo, configurando estes exemplos os casos típicos (Figuras 6.3 a 6.8). Observa-se que a maior fração de vazio ocorre geralmente na corda

central. São mostrados alguns casos atípicos onde isso não ocorre (Figuras 6.9 a 6.13). Observa-se, entretanto, que não houve anomalias grandes nos casos atípicos.

Analisando os perfis obtidos nos ensaios experimentais, pode-se dizer que há uma certa simetria da fração de vazio em relação ao eixo-y. Os valores correspondentes às cordas extremas (ou seja, -50 e +50 mm) apresentam às vezes diferenças maiores; no entanto, deve-se levar em conta que, neste caso, os erros relativos também são maiores (devido à pequena fração de vazio) e que podem existir pequenas irregularidades na parede do tubo (variação na espessura, excentricidade, etc.), que, por pequenas que sejam, afetariam bastante o resultado. Levando em conta estes fatores e o fato de alguns padrões de escoamento apresentarem um movimento bastante desordenado, pode-se considerar (com uma pequena tolerância) a fração de vazio simétrica em relação ao eixo central. Os casos atípicos aqui citados ficariam por conta dessas irregularidades do tubo ou dos fluxos empregados.

Cabe aqui ressaltar um fato interessante: se o fluxo for considerado axi-simétrico, é possível calcular a fração de vazio local (α_m) a partir da fração de vazio linear ($\alpha(x)$). Neste caso, a fração de vazio local é a solução da seguinte equação integral de Abel [27]:

$$\int_x^R \alpha_m(r) r \, dr = \int_x^R \frac{r \cdot \alpha_m(r)}{\sqrt{r^2 - x^2}} \, dr = \alpha(x) \cdot \sqrt{R^2 - x^2} \quad (6.3)$$

Como $\alpha_m(r)$ pertence ao integrando, a solução da equação integral pode ser buscada através de algum processo numérico, o que foge ao escopo deste trabalho.

Para a seção inferior da seção de teste, os dados experimentais encontram-se listados no Anexo 1. Os dados da seção superior encontram-se no Anexo 2.

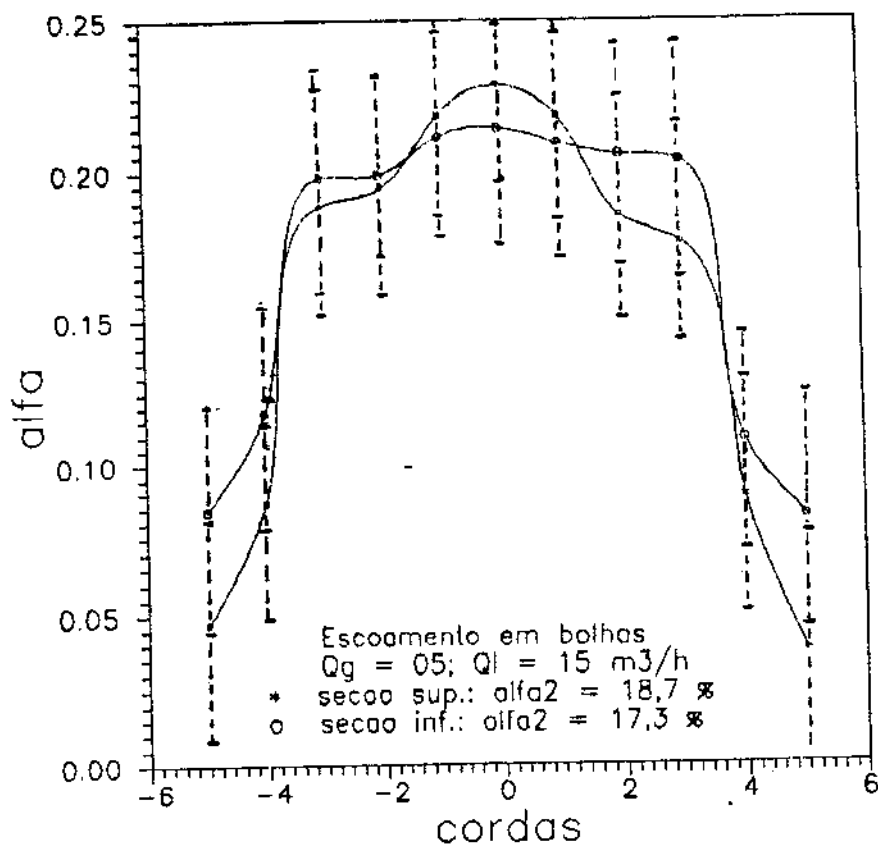


Fig.6.3. Fração de vazio x cordas (bolhas)

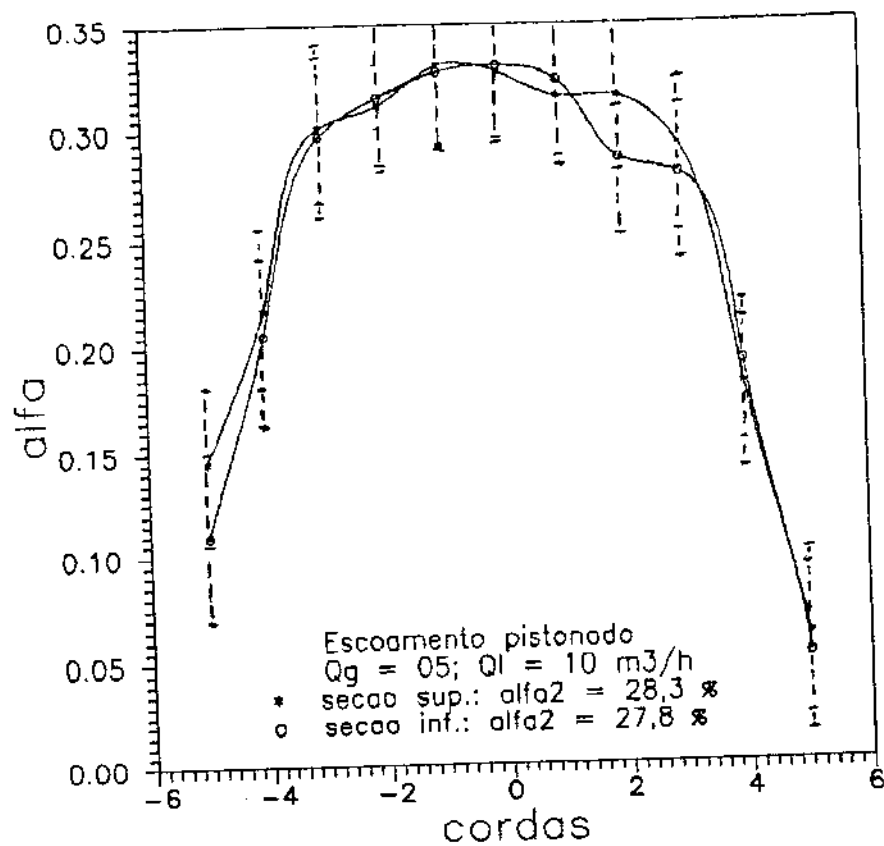


Fig.6.4. Fração de vazio x cordas (pistonado)

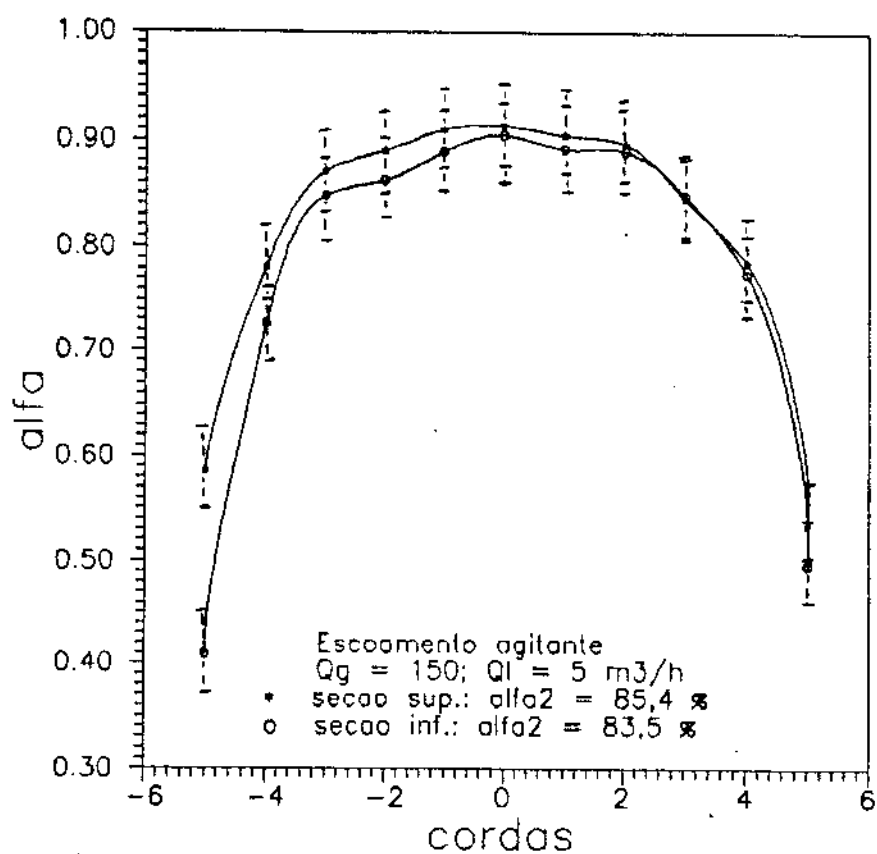


Fig.6.5. Fração de vazio x cordas (agitante)

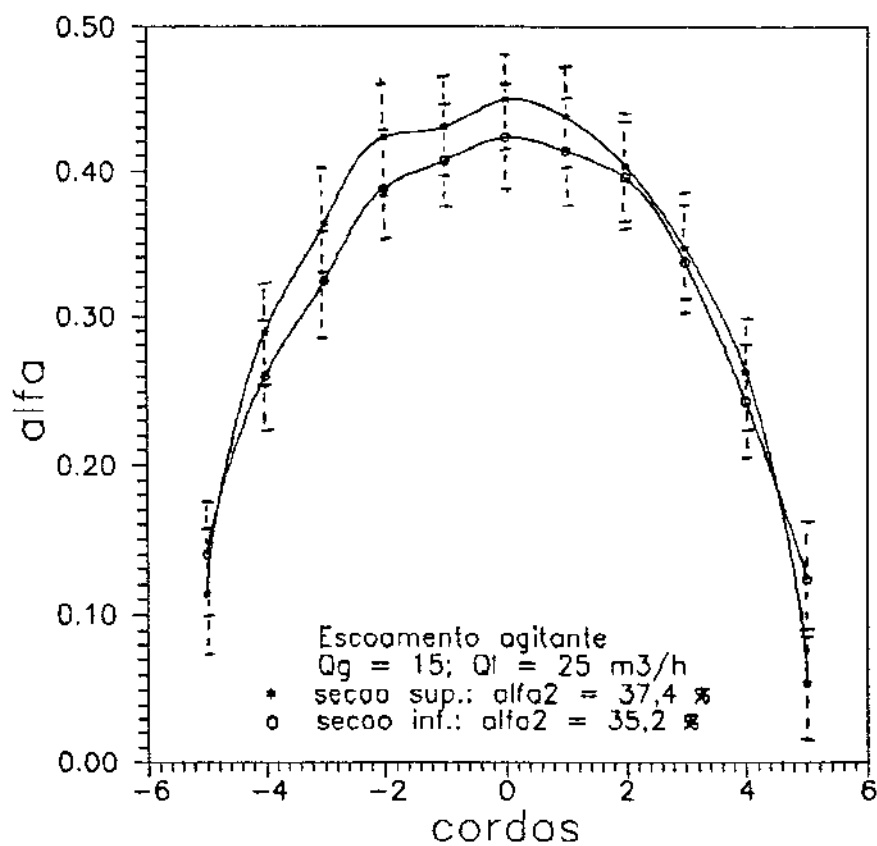


Fig.6.6. Fração de vazio x cordas (agitante)

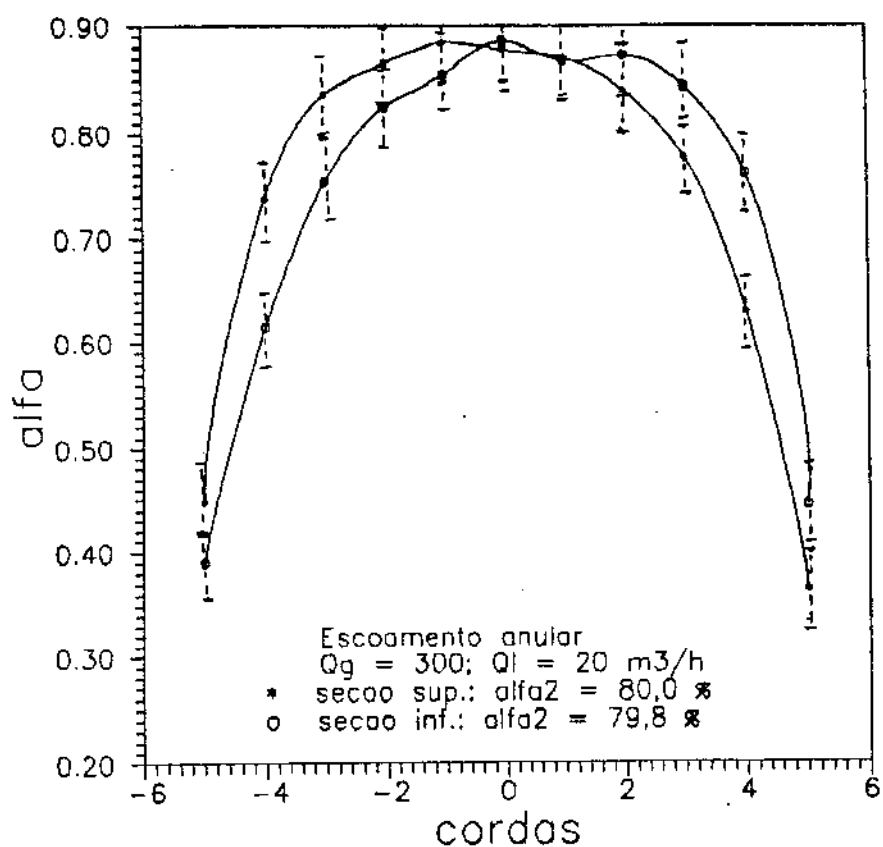


Fig.6.7. Fração de vazio x cordas (anular)

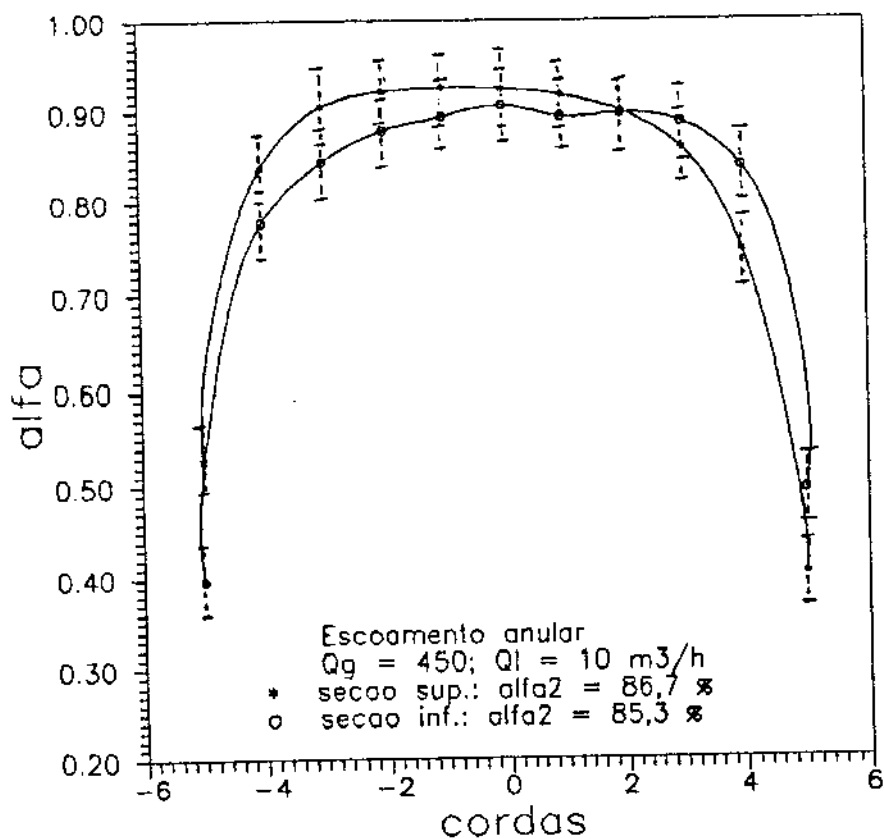


Fig.6.8. Fração de vazio x cordas (anular)

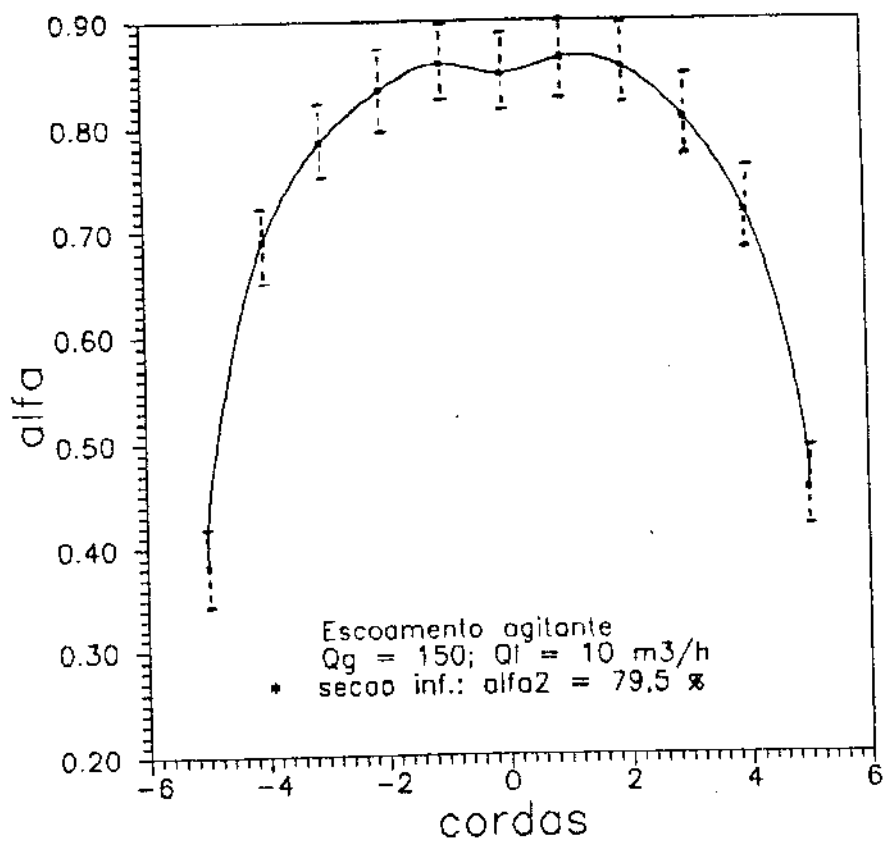


Fig.6.9. Fração de vazio x cordas (agitante)

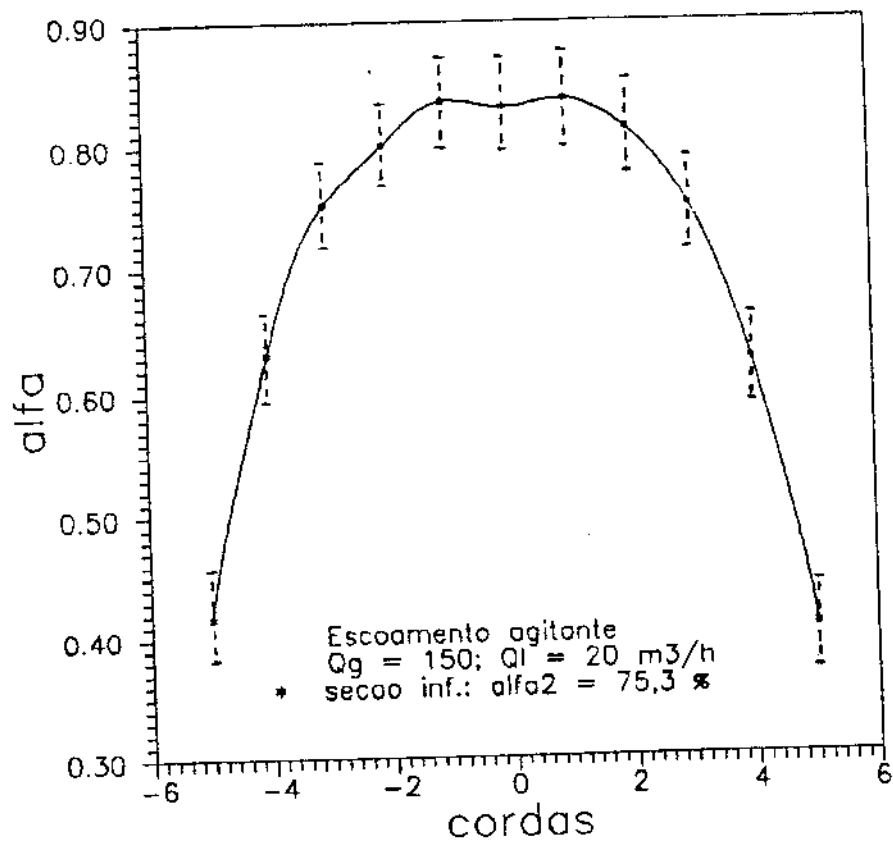


Fig.6.10. Fração de vazio x cordas (agitante)

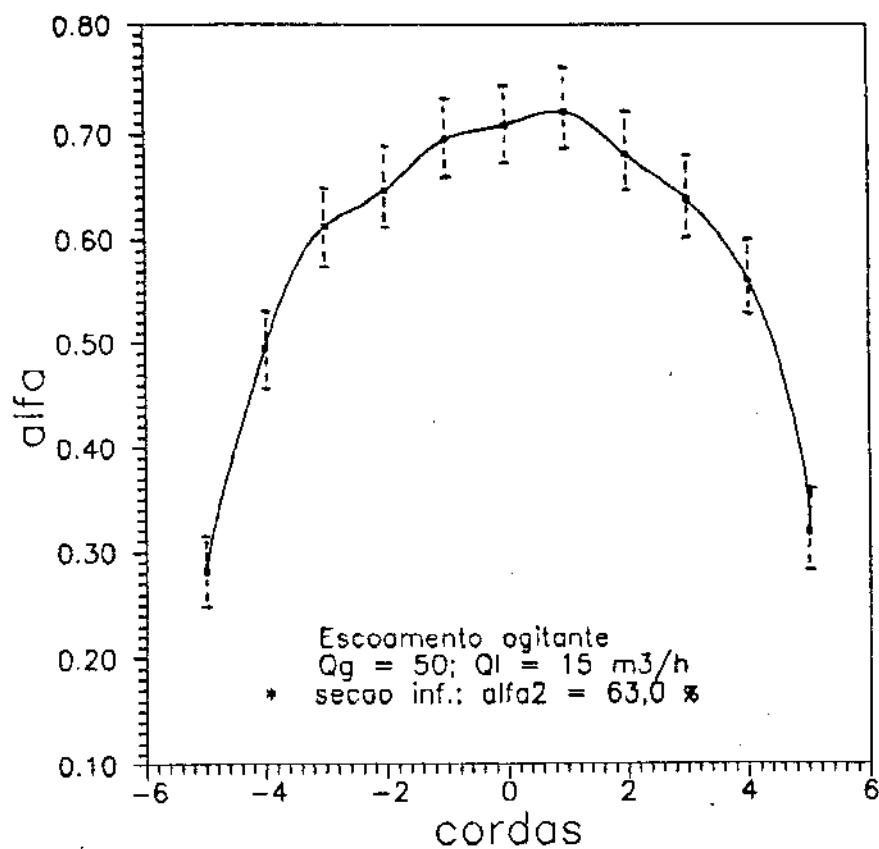


Fig.6.11. Fração de vazio x cordas (agitante)

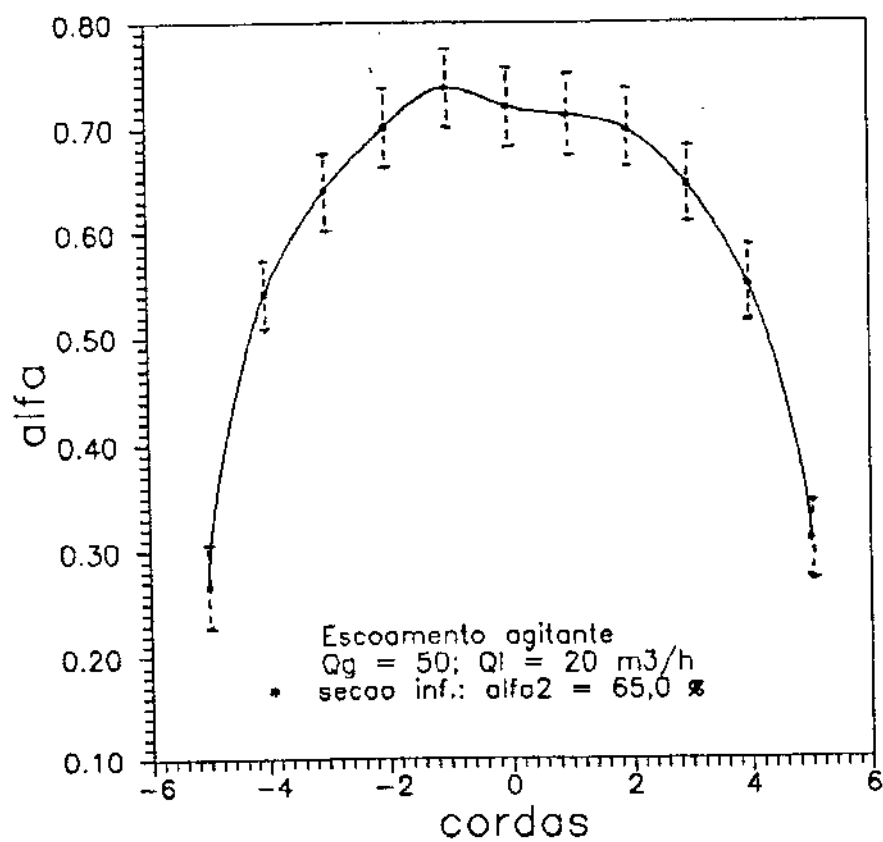
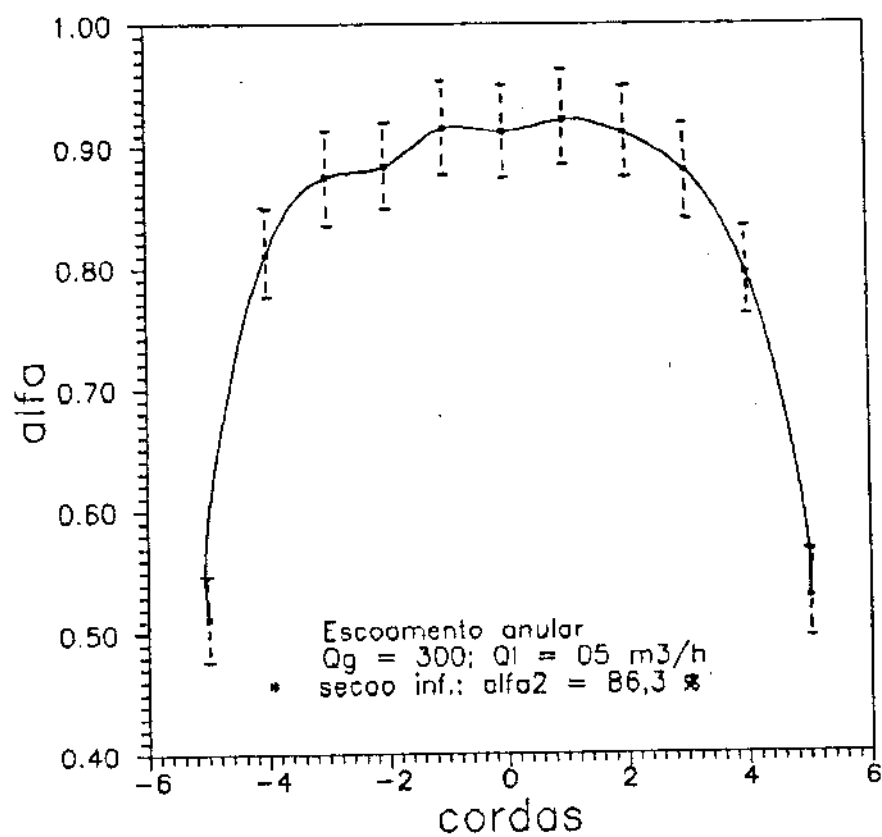


Fig.6.12. Fração de vazio x cordas (agitante)



6.13. Fração de vazio x cordas (anular)

6.3. Fração de vazio superficial

A Tabela 6.3 mostra os resultados da fração de vazio superficial para a seção inferior, calculados por todos os métodos usados: integração 11 pontos, integração 13 pontos, somatório de contagens, média aritmética, ponderação por distância e ponderação por área. Os pontos (jg, jl) estão agrupados por padrão de escoamento.

A Tabela 6.4 mostra os resultados obtidos para a seção superior.

Observa-se que, de modo geral, os resultados obtidos no plano superior são ligeiramente maiores que os do plano inferior. Isto talvez resulte do fato de haver um desenvolvimento maior do padrão de escoamento na seção transversal superior, permitindo uma coalescência adicional de bolhas.

Dos métodos apresentados para a medida de fração de vazio superficial, pode-se concluir que a integração 11 pontos, a integração 13 pontos e a ponderação por área apresentam resultados bem semelhantes, podendo ser considerados métodos alternativos de cálculo (embora uma corrida do programa de computador com valores lineares iguais tenha apontado uma precisão ligeiramente maior para a integração 13 pontos e a de ponderação por área). Quanto ao método do somatório de contagens, este apresentou resultados um pouco abaixo dos resultados dos métodos citados, embora possa ainda ser usado como um método expedito, devido à sua simplicidade de cálculo. Os métodos restantes (média aritmética e ponderação por distância), todavia, não fornecem resultados confiáveis e devem ser evitados. Seus resultados ficaram bem aquém dos obtidos por todos os outros tipos de quadratura e, apesar de serem citados em alguns trabalhos mais antigos, não levam em conta a posição e a influência de cada corda medida.

O parâmetro de distribuição Co , usado no modelo de Zuber e Findlay [2], é diretamente relacionado com a não uniformidade do fluxo e com os perfis de concentração das fases. Este parâmetro já foi usado nos escoamentos em bolha e pistonado

Tabela 6.3: Resultados de α_2 - Plano Inferior

Pt	Jg (m/s)	Jl (m/s)	α_2						Pad. Esc.
			Int11	Int13	Cont	Arit	Dist	Area	
1	0,1635	0,8175	17,6	17,7	16,6	15,9	15,4	17,6	Bolh
2	0,1635	0,654	18,2	18,8	17,4	16,7	16,2	18,5	
3	0,1635	0,4905	17,3	17,9	16,3	15,2	15,0	17,6	
4	0,1635	0,327	27,8	28,1	26,3	24,7	24,2	27,9	Pist
5	0,1635	0,1635	37,7	38,1	36,4	34,6	33,6	37,8	Agit
6	0,4905	0,8175	35,2	35,1	33,5	31,4	30,7	35,1	
7	0,4905	0,654	39,6	39,6	37,8	35,4	34,6	39,5	
8	0,4905	0,4905	38,6	38,3	36,7	34,1	33,5	38,4	
9	0,4905	0,327	43,0	42,6	41,0	37,8	37,2	42,7	
10	0,4905	0,4905	46,7	46,3	44,6	41,5	40,7	46,4	
11	1,635	0,8175	61,1	61,2	59,6	55,7	54,2	61,0	
12	1,635	0,654	65,0	65,0	63,5	59,3	57,7	64,9	
13	1,635	0,4905	63,0	63,4	61,7	57,9	56,2	63,1	
14	1,635	0,327	64,2	64,2	62,7	58,3	56,8	64,1	
15	1,635	0,1635	69,8	69,8	68,4	63,4	61,8	69,6	
16	4,905	0,8175	75,9	75,8	74,6	69,8	67,7	75,7	
17	4,905	0,654	75,3	76,0	74,4	70,0	67,7	75,5	
18	4,905	0,4905	79,9	80,2	79,0	74,1	71,7	79,9	
19	4,905	0,327	79,5	79,7	78,5	73,7	71,4	79,4	
20	4,905	0,1635	83,5	83,7	82,6	77,7	75,2	83,4	
21	9,81	0,8175	77,1	77,4	76,3	71,7	69,3	77,1	Anul
22	9,81	0,654	79,8	79,9	78,9	73,8	71,5	79,7	
23	9,81	0,4905	78,6	78,5	77,5	72,3	70,2	78,4	
24	9,81	0,327	82,1	81,7	80,8	75,2	73,1	81,7	
25	9,81	0,1635	86,3	86,9	85,6	81,4	78,5	86,4	
26	14,715	0,8175	86,6	86,7	86,0	81,4	78,5	86,5	
27	14,715	0,654	85,9	85,6	85,0	80,4	77,7	85,6	
28	14,715	0,4905	88,1	88,0	87,3	82,0	79,4	87,9	
29	14,715	0,327	85,3	84,9	84,2	79,2	76,7	84,9	
30	14,715	0,1635	91,0	91,0	90,3	85,2	82,7	90,8	

Tabela 6.4: Resultados de α_2 - Plano Superior

Pt	jg (m/s)	jl (m/s)	α_2 (%)						Pad. Esc.
			Int11	Int13	Cont	Arit	Dist	Area	
1	0,1635	0,8175	11,7	11,9	10,6	10,1	9,9	11,7	Bolh
2	0,1635	0,654	12,4	12,7	11,3	10,7	10,5	12,6	
3	0,1635	0,4905	18,7	18,5	17,3	16,8	16,4	18,6	
4	0,1635	0,327	28,3	28,6	26,5	25,4	24,8	28,4	Pist
5	0,1635	0,1635	28,6	28,9	26,8	25,8	25,2	28,7	
6	0,4905	0,8175	37,4	36,9	35,3	32,5	32,0	37,1	Agit
7	0,4905	0,654	39,3	39,2	37,4	34,5	34,0	39,2	
8	0,4905	0,4905	42,4	42,0	40,4	37,3	36,7	42,1	
9	0,4905	0,327	44,9	44,3	42,8	39,6	38,9	44,5	
10	0,4905	0,1635	47,6	47,4	45,7	42,3	41,5	47,4	
16	4,905	0,8175	75,7	75,8	74,4	69,4	67,5	75,6	
17	4,905	0,654	77,7	77,7	76,5	71,5	69,4	77,5	
18	4,905	0,4905	80,0	80,1	79,0	74,1	71,8	79,9	
19	4,905	0,327	82,8	83,0	82,5	73,7	71,4	79,4	
20	4,905	0,1635	83,5	83,7	82,6	77,7	75,2	83,4	
25	9,81	0,1635	86,3	86,9	85,6	81,4	78,5	86,4	
21	9,81	0,8175	77,1	77,4	76,3	71,7	69,3	77,1	Anul
22	9,81	0,654	79,8	79,9	78,9	73,8	71,5	79,7	
23	9,81	0,4905	78,6	78,5	77,5	72,3	70,2	78,4	
24	9,81	0,327	82,1	81,7	80,8	75,2	73,1	81,7	
26	14,715	0,8175	86,6	86,7	86,0	81,4	78,5	86,5	
27	14,715	0,654	85,9	85,6	85,0	80,4	77,7	85,6	
28	14,715	0,4905	88,1	88,0	87,3	82,0	79,4	87,9	
29	14,715	0,327	85,3	84,9	84,2	79,2	76,7	84,9	
30	14,715	0,1635	91,0	91,0	90,3	85,2	82,7	90,8	

por diversos autores (Nicklin, Wilkes, Davidson [28], Neal [29]). Ishii [30] também o utilizou para o escoamento agitante. O inverso deste parâmetro foi usado por Bankoff [31], num artigo anterior ao de Zuber e Findlay. Este parâmetro é definido como:

$$Co = \frac{\langle \alpha \cdot j \rangle}{\langle \alpha \rangle \cdot \langle j \rangle} = \frac{\frac{1}{A} \cdot \int \alpha \cdot j \, dA}{\left[\frac{1}{A} \cdot \int \alpha \, dA \right] \cdot \left[\frac{1}{A} \cdot \int j \, dA \right]} \quad (6.4)$$

O valor de Co pode ser determinado a partir dos perfis assumidos de fração de vazio e da velocidade superficial total [10], ou a partir de dados experimentais (Zuber et al. [32]). Assumindo perfis que sigam uma lei de potência num tubo para j e α , tem-se [2]:

$$\frac{j}{j_o} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^m \quad (6.5)$$

$$\frac{\alpha_d - \alpha_v}{\alpha_{do} - \alpha_v} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^n \quad (6.6)$$

onde: j = velocidade superficial local;
 j_o = valor de j no centro do tubo;
 r = distância radial;
 R = raio do tubo;
 α_d = fração de vazio local;
 α_{do} = fração de vazio local no centro;
 α_v = fração de vazio local na parede (mistura água-vapor).

Substituindo estes perfis na definição de Co , dada na equação 6.4, obtém-se:

$$Co = 1 + \frac{2}{m+n+2} \cdot \left[1 - \frac{\alpha_v}{\langle \alpha \rangle} \right] \quad (6.7)$$

Fisicamente este efeito provém do fato de que a fase dispersa é localmente transportada pela velocidade de deslizamento V_{gj} em relação à velocidade superficial local j e não em relação à velocidade superficial média $\langle j \rangle$. A velocidade de deslizamento é definida por [2]:

$$V_{gj} = V_g - j \quad (\text{em valores locais}) \quad (6.8)$$

Se as variáveis são consideradas por seus valores médios, a velocidade do gás é dada por:

$$V_g = \frac{\langle j_g \rangle}{\langle \alpha z \rangle} = C_o \cdot \langle j \rangle + V_{gj} \quad (6.9)$$

onde $\langle j_g \rangle$ e $\langle \alpha z \rangle$ são parâmetros facilmente obtidos em experimentos, particularmente em condições adiabáticas. Esta equação sugere um gráfico da velocidade média do gás V_g versus a velocidade superficial média $\langle j \rangle$. Se o perfil de concentração é uniforme ao longo do tubo, então o valor do parâmetro de distribuição é igual à unidade. Uma característica importante deste gráfico é que, para padrões de escoamento bifásico com perfis de fração de vazio e de velocidade bem desenvolvidos, os pontos obtidos neste gráfico tendem a se alinhar [30]. Assim, dado um padrão de escoamento o parâmetro de distribuição pode ser obtido pela inclinação da reta formada. De fato, traçando-se gráficos com estes parâmetros com dados experimentais obtidos para cada padrão de escoamento, observa-se esta tendência. As Figuras 6.14 a 6.16 mostram gráficos de $(j_g/\alpha z)$ versus $\langle j \rangle$ para os diversos padrões obtidos na seção superior. Os padrões bolhas e pistonado foram usados em um só gráfico devido à escassez de dados para estes padrões. Na Tabela 6.5 encontram-se as retas obtidas por regressão linear, onde o coeficiente angular corresponde ao parâmetro procurado C_o . Para os dados experimentais usados, este parâmetro varia de 1,10 a 1,46. Ishii [30] apresenta em seu trabalho vários gráficos ilustrando esta dependência, onde C_o varia de 1,13 a 1,30.

A fim de ilustrar a relação entre as velocidades superficiais, a fração de vazio e o parâmetro de distribuição (Co), mostra-se, no Apêndice E, uma análise da transição bolhas-pistonado através da modelagem mecanicista.

Tabela 6.5 - Determinação do Parâmetro de Distribuição

Padrão de escoamento	Regressão linear	Co
Bolhas + pistonado	$y = 1,4631.x - 0,0090$	1,4631
Agitante	$y = 1,1047.x + 0,1114$	1,1047
Anular	$y = 1,1977.x - 0,4315$	1,1977

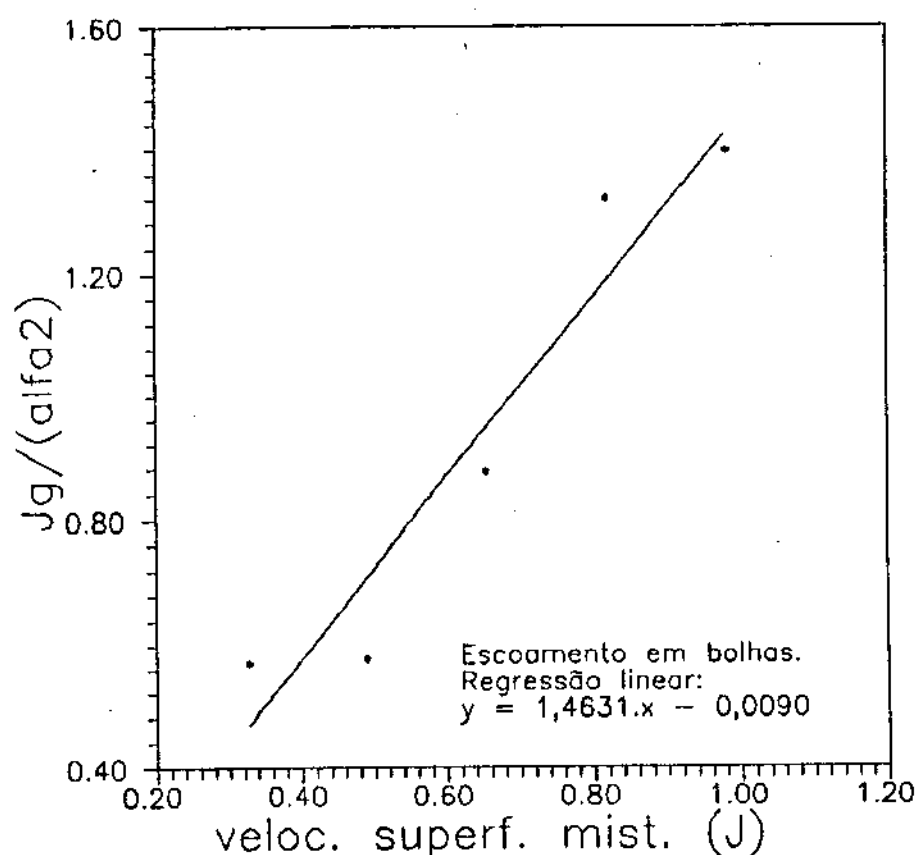
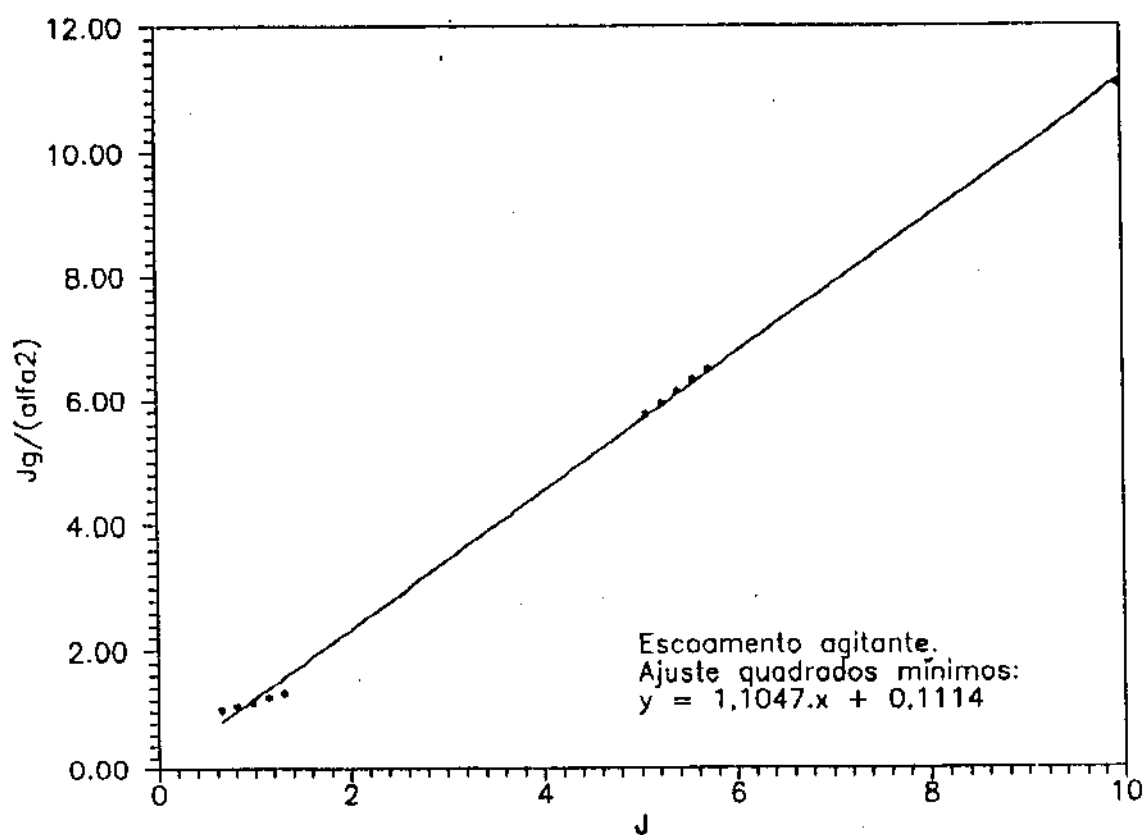
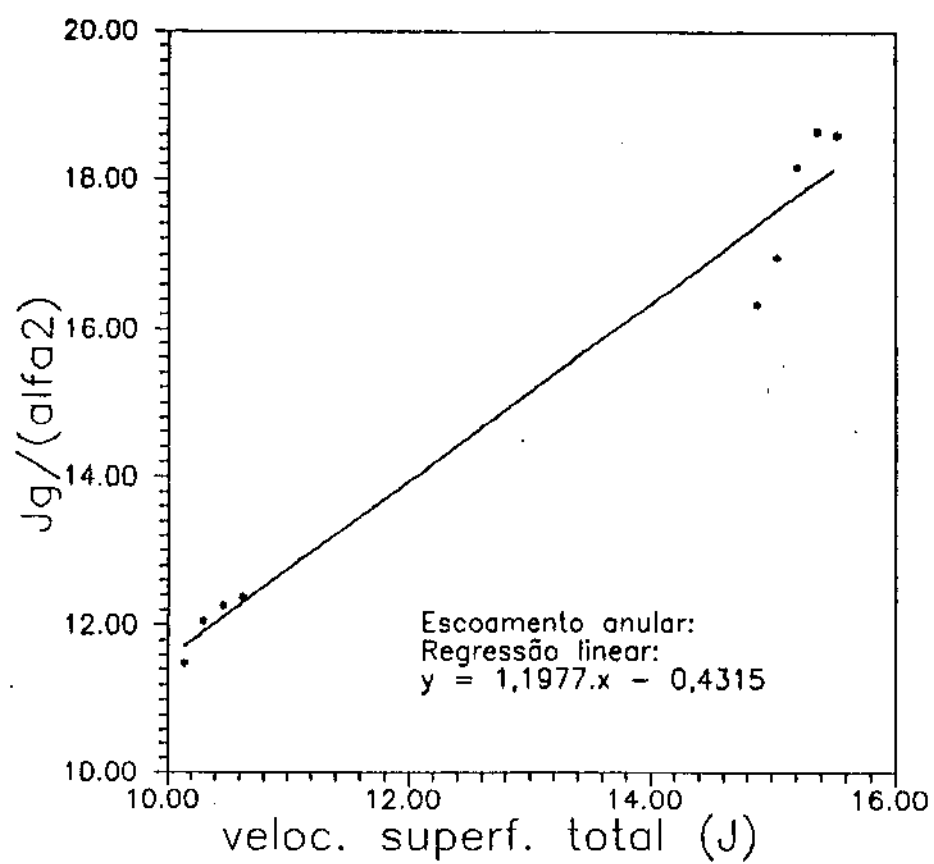


Fig. G.14. Gráfico $(j_g/\alpha_2) \times j$: escoamento em bolhas



6.15. Gráfico $(Jg/\alpha^2) \times J$: escoamento agitante



6.16. Gráfico (Jg/α^2) x J : escoamento anular

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1. Conclusões

De acordo com desenvolvimento do trabalho e análise dos resultados, conclui-se que:

a) a técnica de atenuação de raios gama apresenta uma série de vantagens sobre as outras técnicas de medição de fração de vazio, possibilitando ampla aplicação em escoamentos bifásicos para tubos com qualquer inclinação;

b) o sistema utilizado para medida de fração de vazio por atenuação de raios gama mostrou-se adequado. Este sistema permite visualizar os perfis de fração de vazio ao longo das cordas. A partir da medida linear, através de processos de quadratura numérica, pode-se determinar a fração de vazio superficial. Ademais, partindo-se da fração de vazio linear e usando outros processos numéricos (equação de Abel), pode-se determinar a fração de vazio local para qualquer ponto da seção transversal, se o escoamento for axi-simétrico;

c) os resultados obtidos mostraram-se concordantes com os de outros autores;

d) foram calculados os erros devido à escolha de modelos diferentes (série e paralelo), bem como os erros estatísticos (ou aleatórios) e o erro dinâmico, inerente ao método selecionado. Para frações de vazio baixas, observaram-se erros estatísticos elevados. A técnica desenvolvida, portanto, é mais adequada para medidas de fração de vazio superficial acima de 10 %, onde a confiabilidade dos resultados é maior;

e) os resultados de fração de vazio superficial obtidos pelos métodos da integração 11 pontos, integração 13 pontos e ponderação

de área apresentaram boa concordância entre si. O método do somatório de contagens também pode ser usado, embora apresente resultados ligeiramente abaixo daqueles já citados. Este tem como vantagem a simplicidade de aplicação;

f) os outros métodos usados para o cálculo da fração de vazio (média aritmética e ponderação por distância) não apresentaram bons resultados, pois são insensíveis às flutuações estatísticas das contagens em relação à posição do feixe de raios gama. Portanto, seu uso não é recomendado;

g) as transições dos padrões de escoamento concordam com os dados da literatura. A transição bolhas-pistonado ocorre para frações de vazio da ordem de 26 %;

h) a transição agitante-pistonado ocorreu para velocidades superficiais de gás menores que a prevista pela teoria de Taitel et al, ou seja, a transição situou-se numa região à esquerda da reta teórica traçada no mapa de fluxo destes autores;

h) o parâmetro de distribuição (Co), calculado para vários padrões de escoamento, apresentou resultados concordantes com os dados de outros autores.

7.2. Sugestões

a) Desenvolver um sistema unifeixe ("one-shot") em uma seção de teste semelhante, com o objetivo de comparar a técnica estudada com a técnica unifeixe. As vazões de líquido e gás devem variar de modo que a fração de vazio varie de 0 a 100 %.

b) Desenvolver uma técnica que permita a aplicação para sistemas óleo-água-gás. Pode-se, por exemplo, considerar a fase líquida (óleo-água) com propriedades uniformes, de modo que o

coeficiente de atenuação linear seja único para esta fase.

c) Desenvolver um sistema com uma mesa giratória que permita a medição da fração de vazio ou do filme de líquido em vários ângulos no escoamento horizontal.

d) Desenvolver um tratamento diferente de resposta de sinal que permita um cálculo mais preciso do erro dinâmico. O sistema eletrônico poderia incluir um osciloscópio ou um outro equipamento que fornecesse uma resposta instantânea, de modo a possibilitar a determinação da "amplitude" da fração de vazio, ou seja, a variação entre os valores mínimo e máximo para cada corda.

e) Se possível usar, para o sistema acima, duas fontes de radiação gama, de energias diferentes, para verificar a influência do contraste na precisão da fração de vazio.

f) Usar, de preferência, uma visualização dinâmica dos padrões de escoamento, através de filme ou fita de videocassete.

NOMENCLATURA

Letras latinas

A	área da seção transversal, m^2
a	atividade da fonte, Bq
Co	parâmetro de distribuição, -
c	contraste, -
D	diâmetro interno do tubo, m
e	taxa de emissão da fonte, -
f	fator de atrito, -
f	função
f	função
f ₁	fator geométrico, -
f ₂	eficiência do cintilador, -
g	aceleração da gravidade, $m.s^{-2}$
H	distância fonte-detetor, m
H _l	fração volumétrica líquida ("hold-up"), -
h	distância entre duas cordas consecutivas, m
I(L)	intensidade local do feixe, $(fótons).cm^{-2}.s^{-1}$
I _g	intensidade com tubo vazio (gás), $cm^{-2}.s^{-1}$
I _l	intensidade com tubo cheio (líquido), $cm^{-2}.s^{-1}$
I _o	intensidade incidente do feixe, $cm^{-2}.s^{-1}$
i	corrente elétrica, A
j	velocidade superficial, $m.s^{-1}$
j _o	velocidade superficial no centro do tubo, $m.s^{-1}$
k	parâmetro, $\alpha_{max} - \alpha_{min}$, -
k ₁	fator de proporcionalidade, eficiência
L	espessura, comprimento, m
L _g	soma dos comprimentos das camadas de gás numa corda, m
L _{tp}	soma dos comprimentos das camadas de mistura bifásica, m
L _v	soma dos comprimentos das camadas de líquido numa corda, m
M	massa atômica, g/átomo-grama
m	vazão mássica, $kg.s^{-1}$

N	contagem de radiação detectada, -
N ₀	número de Avogadro, átomos/átomo-grama
p	pressão, Pa
Q	vazão (volumétrica), m ³ .s ⁻¹
R	raio interno do duto, m
R	resultado experimental
r	raio do detetor, m
r	fração de tempo em que $\alpha = \alpha_{\min}$
S	razão de deslizamento ("slip ratio"), -
S ₁	soma de vários termos, conforme eq. 5.24, -
S ₂	soma de vários termos, conforme eq. 5.25, -
S _i	parâmetro ou variável independente
T	tempo (total), s
T _g	duração cumulativa do tempo de residência da fase gasosa, s
t	tempo de contagem, s
V	velocidade "in situ", m.s ⁻¹
V _f	voltagem da fonte, V
V _g	voltagem na saída quando $\alpha = 1$ (só gás), V
V _l	voltagem na saída quando $\alpha = 0$ (só líquido), V
V _o	voltagem de saída, V
V	volume, m ³
X	parâmetro de Lockhart-Martinelli, -
X _g	diâmetro característico da fase gasosa, m
X _o	comprimento da corda atravessada, m
x	título ou fração mássica ("quality"), -
x	distância da corda central, m

Letras gregas

α	fração de vazio (linear), -
α_z	fração de vazio superficial
α_c	fração de vazio por somatório de contagens
α_d	fração de vazio local
α_{do}	fração de vazio local no centro do tubo

α_h	fração de vazio em um meio homogêneo
α_p	fração de vazio pelo modelo das camadas paralelas
α_v	fração de vazio na parede
ϵ_r	erro relativo, %
ϵ_t	erro de truncamento
ϕ	fluxo total de raios gama, (fótons).s ⁻¹
ϕ_l	parâmetro de Lockhart-Martinelli para a fase líquida
μ	coeficiente de absorção linear, cm ⁻¹
ρ	densidade (ou massa específica), kg.m ⁻³
λ	parâmetro, μ L, -
λ_d	taxa de decaimento, s ⁻¹
λ_l	fração volumétrica líquida sem escorregamento ("no-slip hold-up), -
θ	inclinação em relação à horizontal, -
σ_m	seção transversal microscópica de absorção, cm ² /átomo
τ	coeficiente de absorção de massa por efeito fotoelétrico, cm ² .g ⁻¹
κ	coef. de absorção de massa por efeito Compton, cm ² .g ⁻¹
π	coef. de absorção de massa por produção de pares, cm ² .g ⁻¹

Subscritos

ac	aceleração
c	somatório de contagens
g	gás
h	homogêneo
i	termos ímpares
j	de ordem j
k	cinético
l	líquido
m	médio, mistura, de ordem m
m+1	de ordem (m+1)
max	máximo
min	mínimo

n	sem escorregamento ("no-slip")
o	centro do tubo
p	modelo paralelo
p	termos pares
r	relativa
s	com escorregamento ("slip")
s	estrutura (parede do tubo)
t	contagens transformadas
tp	mistura bifásica ("two-phase")
v	água, líquido
z	último termo

Sobrescritos

-	média temporal
---	----------------

Símbolos e operadores

$\langle \rangle$	valor médio
Δ	diferença
$\Delta\alpha$	erro estatístico da fração de vazio
$\Delta\alpha_D$	erro dinâmico da fração de vazio
σ	flutuação estatística
dp/dz	gradiente de pressão, Pa/m
μ/ρ	coeficiente de absorção de massa, $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
$f'(x)$	$= df/dx$ = derivada primeira de $f(x)$
$f^{(4)}(x)$	$= d^4f/dx^4$ = derivada de ordem 4 de $f(x)$
$\partial f/\partial x$	derivada parcial de $f(x)$
$\int$	integral
$\sum$	somatório
$\exp(x)$	$= e^x$, onde $e = 2,718281828...$

$\ln(x) = \log_e x = \text{logaritmo natural ou neperiano de } x$

$\log x = \log_{10} x = \text{logaritmo decimal de } x$

$$b_j = \sqrt{R^2 - x_j^2}$$

$$d_j = 2 \cdot x_j^2 - R^2$$

$$\beta_j = \alpha_j - 1$$

BIBLIOGRAFIA

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Wallis, G.B., & Griffith, P. Two-Phase Slug Flow. In: Journal of Heat Transfer. Trans. ASME, Series C, V. 84: 22 - 39, 1962.
- [2] Zuber, N., & Findlay, J.A. Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems. In: Journal of Heat Transfer. Trans. ASME, p. 453 - 468, Nov. 1965.
- [3] Lockhart, R.W., & Martinelli, R.C. Proposed Correlation Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes. In: Chemical Engineering Progress, 45 (1), jan. 1949.
- [4] Harms, A.A., & Forrest, C.F. Dynamic Effects in Radiation Diagnosis of Fluctuating Voids. In: Nuclear Science and Engineering, V. 46: 408 - 413, 1971.
- [5] Lukong, Peter B. Measurement of Local Void Fraction and Velocity Profiles for Horizontal Slug Flow. Universidade de Tulsa, 1982. (Tese de Mestrado)
- [6] Hewitt, G.F. Measurement of Two-Phase Flow Parameters. N.Y., Academic Press, 1978.
- [7] Jones, O.C., & Delhaye, J. Transient and Statistical Measurement Techniques for Two-Phase Flows: A Critical Review. In: Int. J. of Multiphase Flow, V. 3: 89 - 116, 1976.
- [8] Roumy, R. Structure des écoulements diphasiques eau-air, étude de la fraction de vide moyenne et des configura-

tions d'écoulements. Grenoble, France, Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble, 1969. (CEA-R-3892).

- [9] Cook, W.H. Boiling Density in Vertical Rectangular Multi-channel Section with Natural Circulation. USA, Argonne National Laboratory, 1956. (ANL - 5621)
- [10] Levert, F.E., & Helminski, E. A Dual-Energy Method for Measuring Void Fraction in Flowing Mediums. In: Nuclear Technology, 19 (1): 58 - 60, 1973.
- [11] Kennett, T.J.; Prestwich, W.V., & Robertson, A. Dynamic Density Measurement by High Energy Photon Scattering. In: Int. Journal Appl. Rad. Isotops, 27: 529, 1976.
- [12] Ferrel, J.K., & McGee, J.W. An Accurate One-Shot Gamma Attenuation Technique for Measuring Void Fractions. In: Nuclear Engineering, Part XVI, 68 (62): 113 - 120, 1970.
- [13] Gardner, R.P.; Bean, R.H. & Ferrell, J.K. On the Gamma-Ray One-Shot Collimator Measurement of Two-Phase-Flow Void Fractions. In: Nuclear Applications & Technology, 8: 88 - 94, 1970.
- [14] Jones, O.C. Statistical Considerations in Heterogeneous, Two-Phase Flowing Systems. Troy, N.Y., , Rensselaer Polytechnic Institute, 1973. (Tese de Doutorado)
- [15] Jones, O.C., & Zuber, N. The Interrelation Between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow. In: Int. J. Multiphase Flow, V. 2: 273 - 306, 1975.
- [16] Schrock, V.E. - Radiation Attenuation Techniques in Two-Phase Measurements. In: ASME Symposium Volume,

Two-Phase Flow Instrumentation. Minnesota, p. 24 - 35, 1969. (National ASME/AICHE Heat Transfer Conference, 11).

- [17] Galaup, J.P. Contribution a l'Etude des Methodes de Mesure em Ecoulement Diphasique. Univesité Scientifique et Medicale de Grenoble. Institut National Polytechnique de Grenoble, 1975. (Tese de doutorado)
- [18] Petrick, Michael, & Swanson, Bernet S. Radiation Attenuation Method of Measuring Density of a Two-Phase Fluid. In: The Review of Scientific Instruments, V. 29: 1079 - 1085, out. 1958.
- [19] Schrock, V.E., & Selph, F.B. An X-Ray Densitometer for Transient Steam Void Measurement. S. 1. p., mar. 1963. (USAEC Report SAN - 1005).
- [20] Bergles, A.E., org. Two-Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries. Washington, 1961, Hemisphere Publ. Corp.
- [21] Silva, Raimundo Dias da; Madi Filho, Tufic, & Pires, Antônio Luiz. Medida de Fração de Vazio em Tubos Verticais Utilizando a Técnica de Raios Gama. IPEN/CNEN, São Paulo, 1986, 11 p.
- [22] Radiological Health Handbook. Rockville, Md, USA Department of Health, Education and Welfare, 1970, 458 p.
- [23] Kline, S.J., & McClintock, F.A. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. In: Mechanical Engineering, p. 3 - 8, 1953.
- [24] Honan, T.J., & Lahey Jr., R.T. The Analysis of Dynamic Bias in Gamma Densitometer Measurements. Atlanta, Georgia,

jun. 1979. (Summary of a paper prepared for the 1979 ANS Annual Meeting)

- [25] Taitel, Y.; Bornea, D., & Dukler, A.E. Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes. In: AIChE Journal, V. 26 (3): 345 - 354, 1980.
- [26] Mishima, K. & Ishii, M. - Flow Regimes Transition Criteria for Upward Two-Phase Flow in Vertical Tubes. In: International Journal of Heat and Mass Transfer, V. 27 (5): 723 - 737, 1984.
- [27] Courant, R. - Cálculo Diferencial e Integral. Rio de Janeiro, Editora Globo. V. 2.
- [28] Nickling, D.J.; Wilkes, J.O. & Davidson, J.F. Two-Phase Flow in Vertical Tubes. In: Trans. Inst. Chem. Eng., 40 (61), 1962.
- [29] Neal, L.G. An Analysis of Slip in Gas-Liquid Flow Applicable to the Bubble and Slug Flow Regimes. Noruega, Kjeller Research Establishment. (Report KR-2)
- [30] Ishii, M. - One-Dimensional Drift-Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion Between Phases in Various Two-Phase Flow Regimes. USA, Argonne National Laboratory, out. 1977. (ANL-77-47).
- [31] Bankoff, S.G. A Variable Density Single-Fluid Model for Two-Phase Flow with Particular Reference to Steam-Water Flow. In: J. Heat Transfer, Trans. ASME, V. 82: 265, 1960.
- [32] Zuber, N. et al. Steady State and Transient Void Fraction

in Two-Phase Flow Systems. General Electric Co., 1967.
Vol. 1. (Report GEAP-5417)

BIBLIOGRAFIA SUPLEMENTAR

* Shoham, Ovadia Two-Phase Flow Modeling. The University of Tulsa, dez. 1987.

* Wallis, G.B. One-Dimensional Two-Phase Flow. N.Y., McGraw-Hill, 1969.

* Baker, Ovid. Simultaneous Flow of Oil and Gas. In: Oil and Gas Journal, n. 53: 185 - 195, 1954.

* Hewitt, G.F., & Roberts, D.N. Studies of Two-Phase Flow Patterns by Simultaneous X-Rays and Flash Photography. Harwell, UKAEA, 1969. (Rept. AERE-M2159)

* Govier, G.W., & Aziz, K. The Flow of Complex Mixtures in Pipes. N.Y., Van Nostrand, Reinhold, 1972.

* Lekach, S. Development of a Computer Code for Thermal-Hydraulics of Reactor (THOR). Brookhaven National Laboratory, 1975. (Quarterly Progress Report, BNL-19978).

* Hetsroni, Gad, ed. Handbook of Multiphase Systems. Washington; Hemisphere Publ. Corp.

* Martin, R. Measurement of the Local Void Fraction at High Pressure in the Heating Channel. In: Nuclear Science and Engineering, V. 48: 125 - 136, 1972.

* Hooker, H.H., & Popper, G.F. A Gamma-Ray Attenuation Method for Void Fraction Determinations in Experimental Boiling Heat Transfer Test Facilities. Argonne National Laboratory, nov. 1958. (ANL - 5766).

*Duns Jr., H., & Ros, N.C.J. Vertical Flow of Gas and Liquid Mixtures from Boreholes. In: Proceedings of the 6th. World Petroleum Congress. Frankfurt, 1963.

* Ishii, M. One-Dimensional Drift-Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion Between Phases in Various Two-Phase Flow Regimes. Argonne National Laboratory, 1977. (ANL Report, 77-47).

* Harmathy, T.Z. Velocity of Large Drops and Bubbles in Media of Infinite or Restricted Extent. In: AIChE J., p. 6281, 1960.

* Hinze, J.O. Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes. In: AIChE Journal, 1289, 1955.

* Sevik, M., & Park, S.H. The Splitting of Drops and Bubbles by Turbulent Fluid Flow. In: Trans ASME J., Fluid Eng., p. 9553, 1973.

* Nicklin, D.J. & Davidson, J.D. The Onset of Instability. In: Proc. of Symp. on Two-Phase Slug Flow, 4. London, Inst. Mech. Eng., 1962.

* Nicklin, D.J., Wilkers, J.O., & Davidson, J.F., Two-Phase Flow in Vertical Tubes. In: Trans. Inst. Chem. Eng. London, V. 40 (61), 1974.

* The SI Metric System of Units and SPE's Tentative Metric Standard. In: Journal of Petroleum Technology, p. 1575 - 1611, dez. 1977.

APÊNDICES

APÊNDICE A

OS PADRÕES DE ESCOAMENTO

A.1. Definições

Uma grande variedade de padrão de escoamento (também chamado de regime de escoamento) tem sido definida na literatura. Isto deve-se em parte à natureza subjetiva das definições de padrão de escoamento, mas também se deve à multiplicidade de nomes dados essencialmente ao mesmo padrão.

Dois trabalhos publicados na literatura tratam, de acordo com a abordagem mecanicista, da modelagem dos padrões de escoamento e suas transições num fluxo bifásico gás-líquido vertical ascendente: são os trabalhos de Taitel, Bornea e Dukler e o de Mishima e Ishii. Estes autores reconhecem os seguintes padrões para o fluxo vertical:

(1) Escoamento em bolhas ("bubble flow")

No escoamento em bolhas (ou escoamento borbulhante), a fase gasosa se encontra dispersa no líquido (fase contínua), na forma de bolhas discretas. Este escoamento ocorre tipicamente para baixas velocidades superficiais de gás.

Taitel *et al* propõem ainda uma subdivisão do escoamento em bolhas, que poderia apresentar-se como bolhas finamente dispersas ("finely dispersed bubble flow").

(2) Escoamento pistonado ("slug or plug flow")

Aumentando a vazão de gás, as bolhas coalescem e o diâmetro da bolha atinge quase o do tubo. Quando isto ocorre, formam-se bolhas grandes em formato de bala (ou pistão), também denominadas "bolhas de Taylor". Então, pistões de gás e líquido se sucedem na tubulação, com o pistão de líquido (golfada) apresentando bolhas dispersas. Tipicamente, a fase líquida esco

por fora do gás (ao longo da parede do tubo), constituindo um filme descendente.

(3) Escoamento agitante ("churn flow")

Com vazões maiores de gás e líquido, a quebra das bolhas do escoamento pistonado conduz a um padrão instável e desordenado, onde existe um movimento oscilatório de líquido para cima e para baixo na tubulação. Esta transição do escoamento pistonado para o anular pode ser bem mais suave em tubos de pequeno diâmetro.

Alguns pesquisadores se referem ao "froth flow" (escoamento espumante) para altas vazões de gás e líquido, onde a mistura já aparece mais dispersa.

Os escoamentos pistonado e agitante são às vezes agrupados no chamado escoamento intermitente ("intermittent flow")

(4) Escoamento anular ("annular flow")

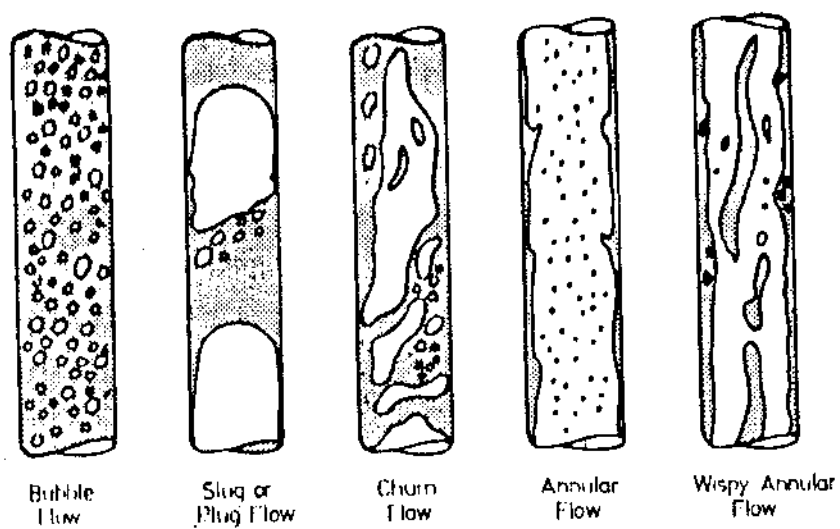
O líquido escoar na periferia do tubo, formando um filme, podendo conter bolhas dispersas, e o gás, com maior velocidade, escoar no centro do tubo, carregando gotas de líquido (arrasto ou "entrainment").

Há autores que ainda citam o escoamento anular-misto ("wispy annular flow"), quando algumas partículas de líquido penetram na região do gás no escoamento anular.

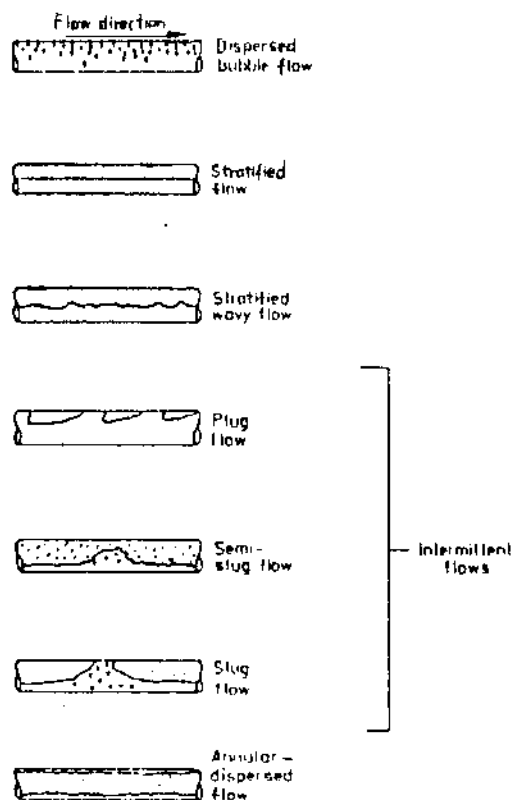
A Fig. A.1 mostra os padrões de escoamento para o fluxo vertical.

O fluxo horizontal apresenta, além dos padrões citados acima, o escoamento estratificado, onde há uma segregação gravitacional completa, com o líquido ocupando a parte inferior do tubo (Fig. A.2).

Cada padrão de escoamento acima descrito possui particularidades que podem ser desejadas ou evitadas, de acordo com a necessidade do processo. A troca de massa, de energia e de quantidade de movimento entre o gás e o líquido dependem da extensão da área interfacial, da fração de vazio, do padrão de escoamento. Uma das primeiras motivações para os investigadores de



A.1. Padrões de escoamento num fluxo vertical



A.2. Padrões de escoamento num fluxo horizontal

fluxo bifásico foi a escolha de um padrão de escoamento apropriado que resultasse na mínima perda de carga no transporte simultâneo de gás e líquido, com aplicação na indústria petrolífera.

A.2. Mapas de fluxo

A definição de transições entre padrões de escoamento bifásico gás-líquido (isto é, os limites de ocorrência das configurações) é um ponto controvertido, pois as variações de estrutura das interfaces ou as características topográficas das fases se processam de forma gradual e contínua. Este fato, aliado à subjetividade da análise do observador, explica a grande variedade de configurações encontrada na literatura e que, na verdade, representam configurações intermediárias entre os padrões principais.

A maior parte dos trabalhos dedicados à identificação dos padrões de fluxo e suas transições se apóia em observações visuais diretas ou de fotografias. A partir destas observações, os padrões são associados a parâmetros característicos do escoamento. O conjunto de fronteiras seria representado como um diagrama ou mapa de padrão de escoamento (ou ainda mapa de fluxo). Os mapas divulgados na literatura podem ser classificados em dois tipos, de acordo com os parâmetros das coordenadas do gráfico cartesiano: mapas com parâmetros dimensionais ou adimensionais.

A.2.1. Mapas com parâmetros dimensionais

O mapa mais antigo (1954) deve-se a Ovid Baker, um dos primeiros investigadores a usar grupos de variáveis para descrever as transições dos padrões de fluxo. O mapa é aplicável ao escoamento horizontal de gás e petróleo. Baker considerou as propriedades físicas ao introduzir os seguintes parâmetros:

$$\lambda = \left[\frac{\rho_g}{\rho_a} \cdot \frac{\rho_l}{\rho_v} \right]^{0,5} \quad (\text{A.1})$$

$$\psi = \frac{\sigma_v}{\sigma} \cdot \left[\frac{\mu}{\mu_v} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (\text{A.2})$$

onde ρ , σ e μ representam a densidade, a tensão superficial e a viscosidade; os subscritos g e l representam as fases gás e líquido; os subscritos a e v representam os valores de ar e água nas condições atmosféricas (20°C e pressão atm). Portanto λ e ψ são iguais à unidade para fluxos de ar-água na pressão atmosférica. Nas unidades SI, os valores apropriados para a condição padrão ar-água são:

$$\begin{aligned} \rho_a &= 1,205 \text{ kg/m}^3; & \mu_v &= 0,001002 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1} \\ \rho_v &= 1000 \text{ kg/m}^3; & \sigma_v &= 0,0728 \text{ N/m} \end{aligned}$$

No mapa original de Baker, os parâmetros eram:

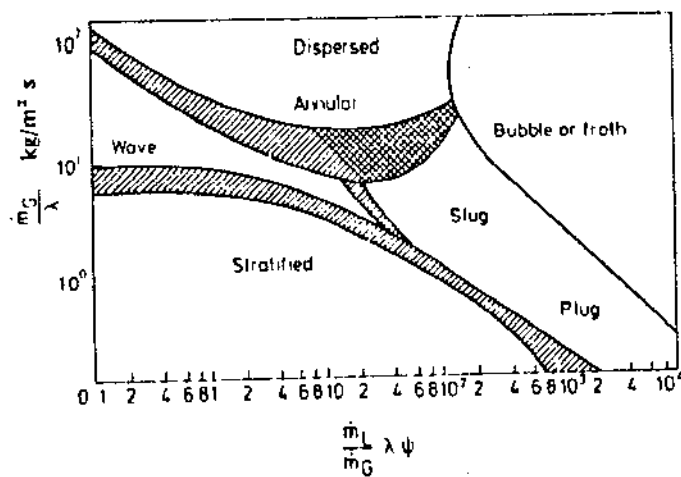
$$\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g} \cdot \psi \cdot \lambda \quad \text{e} \quad \frac{\dot{m}_g}{\lambda} \quad (\text{A.3})$$

Estas coordenadas podem ser expressas alternativamente como:

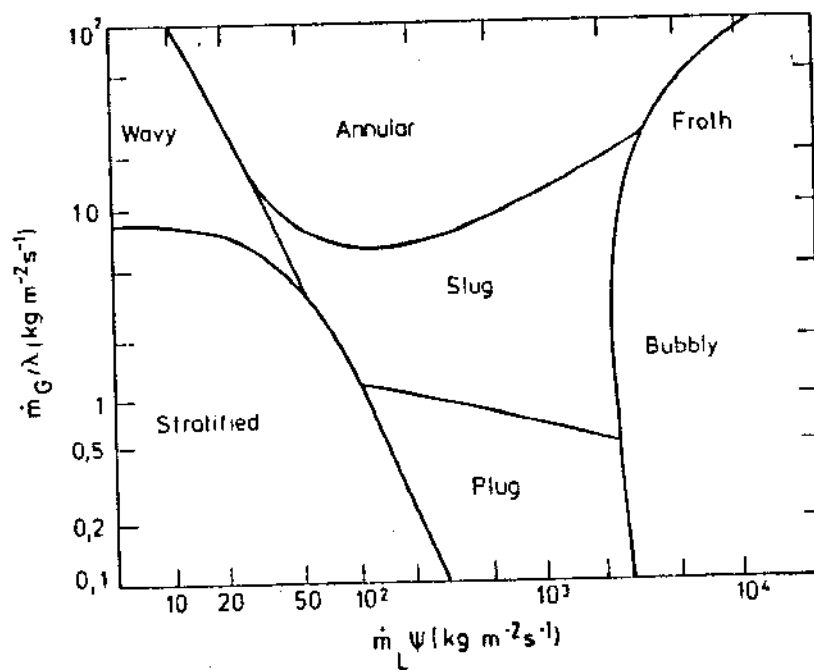
$$\left(\frac{1-x}{x} \right) \cdot \psi \cdot \lambda \quad \text{e} \quad \frac{\dot{m} \cdot x}{\lambda} \quad (\text{A.4})$$

onde: $x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}} =$ título ou fração mássica.

Scott (1963) modificou o mapa original de Baker, introduzindo regiões de transição (incerteza) entre vários padrões de fluxo e omitindo a transição do anular para o fluxo disperso (Fig. A.3). Outros autores (por ex., Collier, 1972, Bell, 1969) têm preferido usar outras coordenadas para o mapa de Baker. A



A.3. Mapa de Baker modificado por Scott (1963)



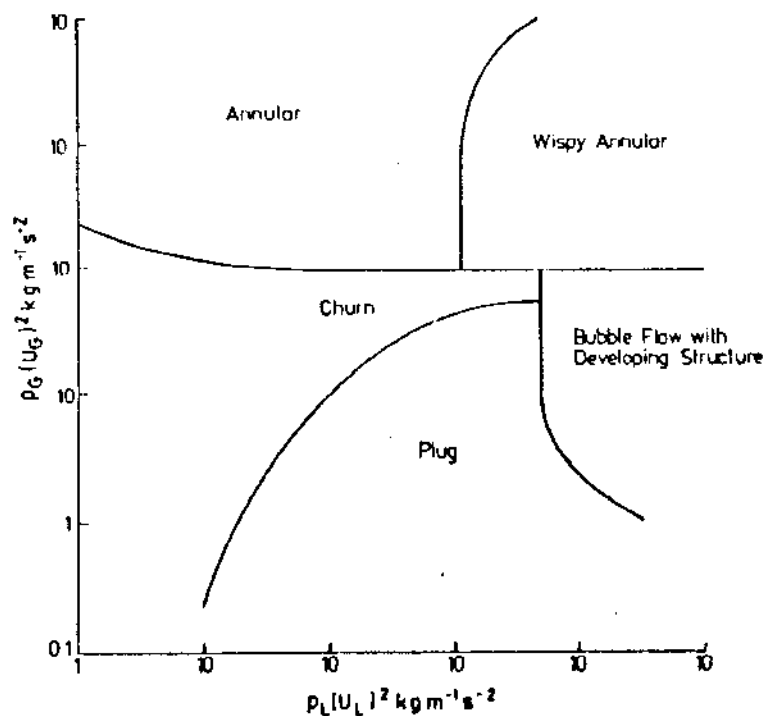
A.4. Mapa de Baker modificado por Bell (1969)

forma sugerida por Bell é mostrada na Fig. A.4, onde as seguintes coordenadas são usadas:

$$\dot{m}_l \cdot \psi \dots \left[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \right] \quad \text{e} \quad \dot{m}_g / \lambda \dots \left[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2} \right]$$

Embora as coordenadas do mapa de Baker aparentemente incluam variáveis relevantes para diversas situações, estudos posteriores mostram que este mapa não é adequado para todos os padrões existentes.

Hewitt e Roberts, em 1969, sugeriram os parâmetros $\rho_l \cdot j_l^2$ e $\rho_g \cdot j_g^2$ para abscissa e ordenada, em escoamentos verticais ascendentes. Tanto ar-água quanto água-vapor poderiam ser representados por estes parâmetros, o que cobre uma grande variedade de propriedades físicas, podendo ser considerado um mapa "generalizado", segundo Hewitt, embora os experimentos tenham sido feitos apenas com o diâmetro de 2,5 cm (Fig. A.5).



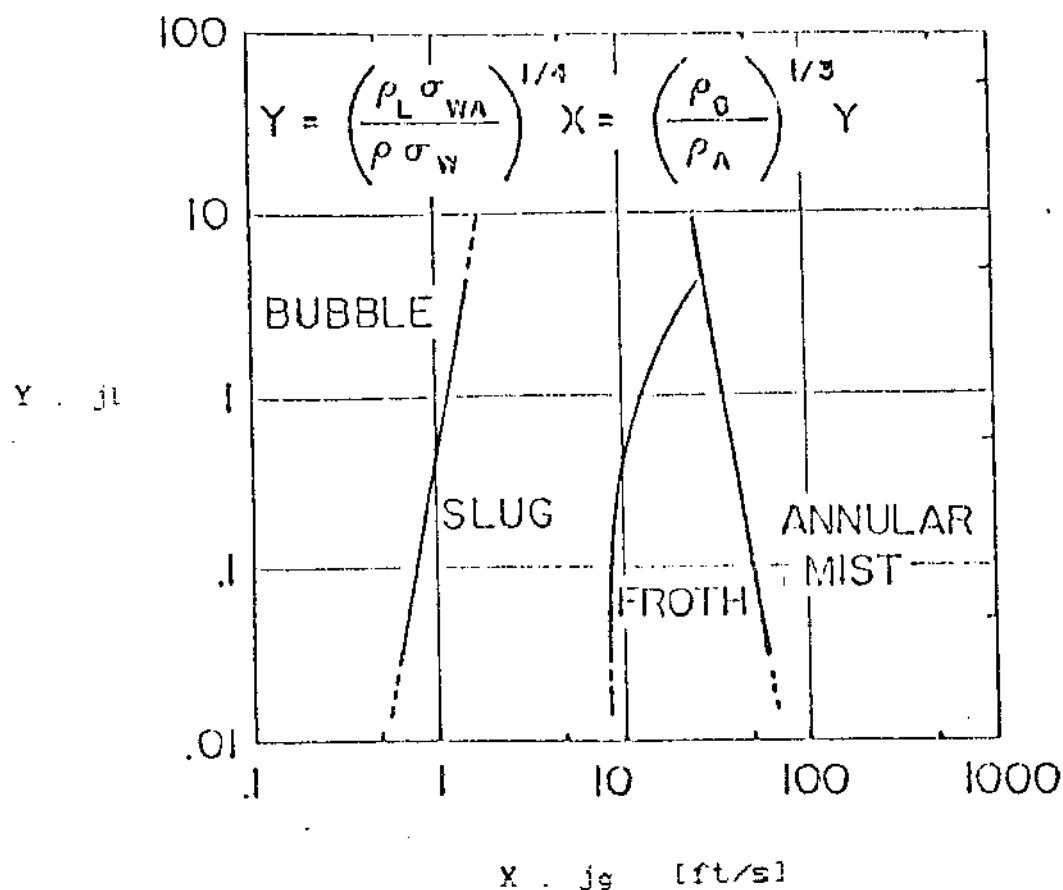
A.5. Mapa de Hewitt & Roberts (1969)

Hoogendoorn sugeriu (1959) um mapa em termos de velocidade superficial média (j_m) versus $(1 - \lambda)$, onde λ é o "no-slip hold-up" ($\lambda = Q_l/Q$).

Govier e Aziz (1972), a partir de dados experimentais, mapearam o escoamento bifásico para baixas pressões em tubos verticais (Fig. A.6), utilizando as coordenadas $X = j_g$ e $Y = j_l$, onde:

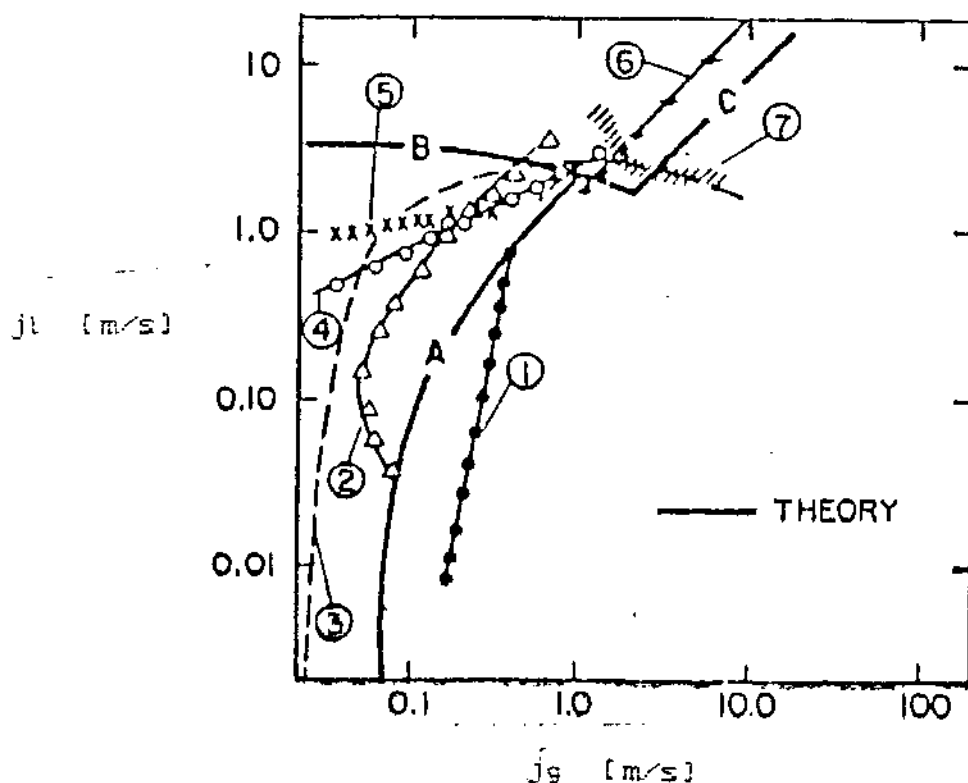
$$Y = \left(\frac{\rho_l \cdot \sigma_{wa}}{\rho_v \cdot \sigma_v} \right)^{1/4} \quad (\text{A.5})$$

$$X = \left(\frac{\rho_g}{\rho_a} \right)^{1/3} \cdot Y \quad (\text{A.6})$$



A.6. Mapa de Govier & Aziz (1972)

Os primeiros autores a adotarem o tão difundido mapa j_g versus j_l foram Sternling (1965) e Wallis (1965). A Fig. A.7 mostra um destes mapas característicos, onde é destacada a transição bolhas-pistonado, e os dados de vários autores são confrontados com a curva de transição semi-analítica proposta por Dukler (1980) para o escoamento vertical.



- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1. Govier & Aziz (1972) | 5. Oshinawa & Charles (1974) |
| 2. Griffith & Wallis (1961) | 6. Wallis (1969) |
| 3. Sternling (1965) | 7. Hewitt & Roberts (1969) |
| 4. Gould (1974) | — Taitel et al (1980) |

A.7. Mapa de fluxo $j_g \times j_l$

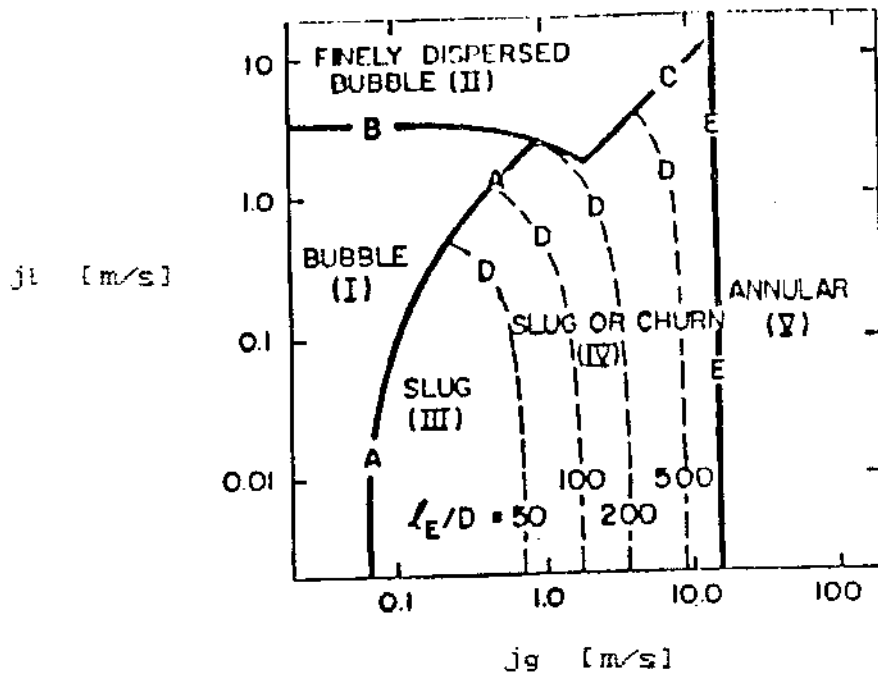
Lekach introduziu um conjunto de coordenadas que consistiam de fluxo de massa total (ou vazão específica, G_m) versus a fração de vazio (α), onde G_m é definido como:

$$G_l = \frac{\dot{m}_l}{A} = \rho_l \cdot j_l \quad (\text{A.7})$$

$$G_g = \frac{\dot{m}_g}{A} = \rho_g \cdot j_g \quad (\text{A.8})$$

$$G_m = G_l + G_g = \frac{\dot{m}}{A} \dots [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{A.9})$$

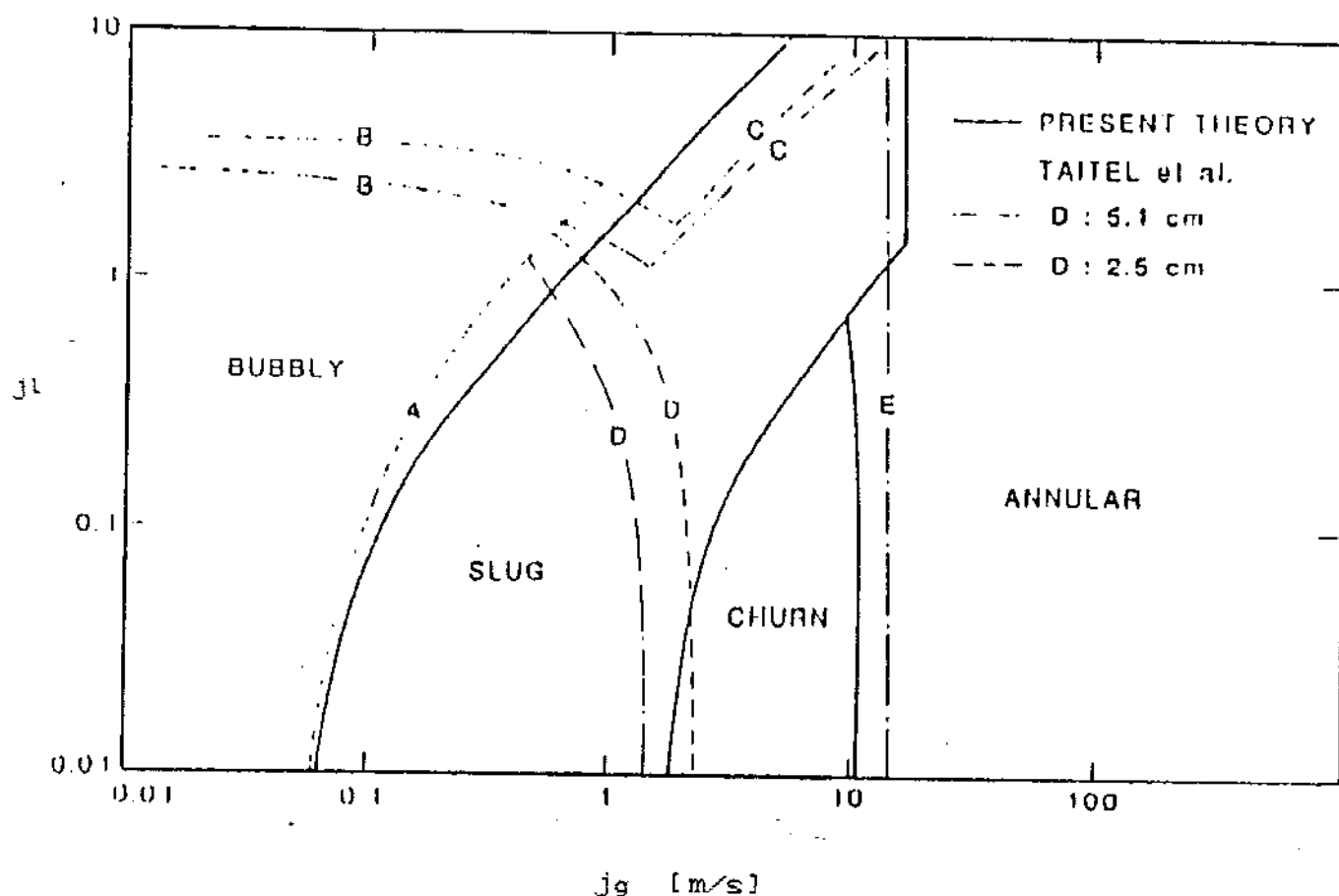
Em 1980, Taitel et al construíram um mapa baseado na abordagem mecanicista, para tubulações verticais de 2,5 e 5,0 cm, usando ar-água a 25°C, com pressão de 10 kPa. Um exemplo do mapa para tubos de 5,0 cm está na Fig. A.8.



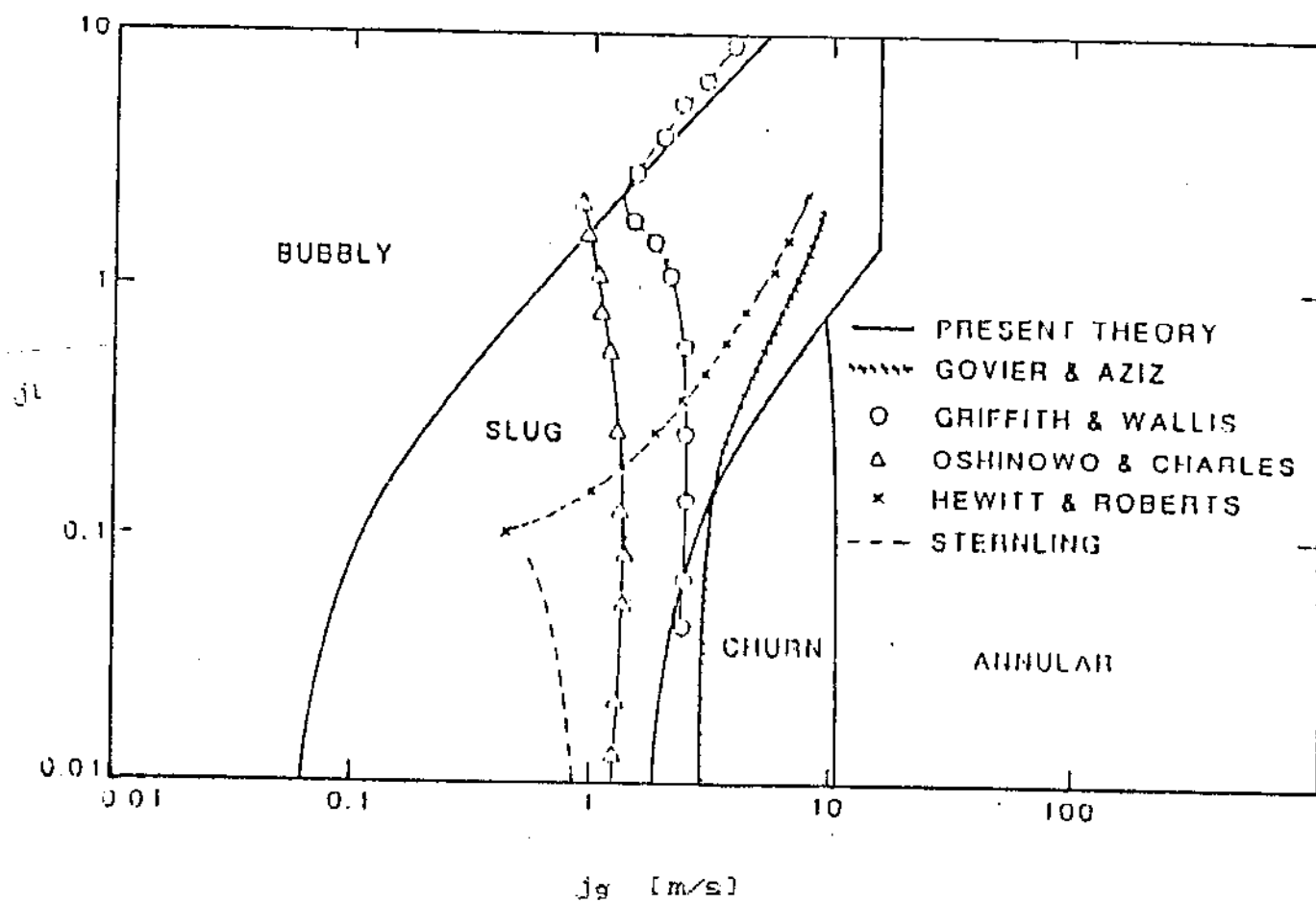
A.8. Mapa de Taitel et al (1980)

Os pesquisadores Mishima e Ishii, em 1984, chegaram a resultados semelhantes, conforme pode ser notado na Fig. A.9. Nesta figura, as curvas em linha cheia referem-se aos resultados de Mishima e Ishii, ao passo que as tracejadas referem-se às transições mapeadas por Taitel et al. Na Fig. A.10 compara-se a transição pistonado-agitante obtida pela teoria de Mishima e Ishii com as curvas obtidas por outros autores.

Com alguns dados referentes ao circuito experimental (diâmetro da tubulação, ângulo de inclinação, etc.) e outros arbitrados coerentemente, rodou-se um programa computacional (FLOWPAT) que gera um mapa de fluxo a partir das equações de transição de Taitel et al (Fig. A.11).



A.9. Mapa de Mishima & Ishii (1984)

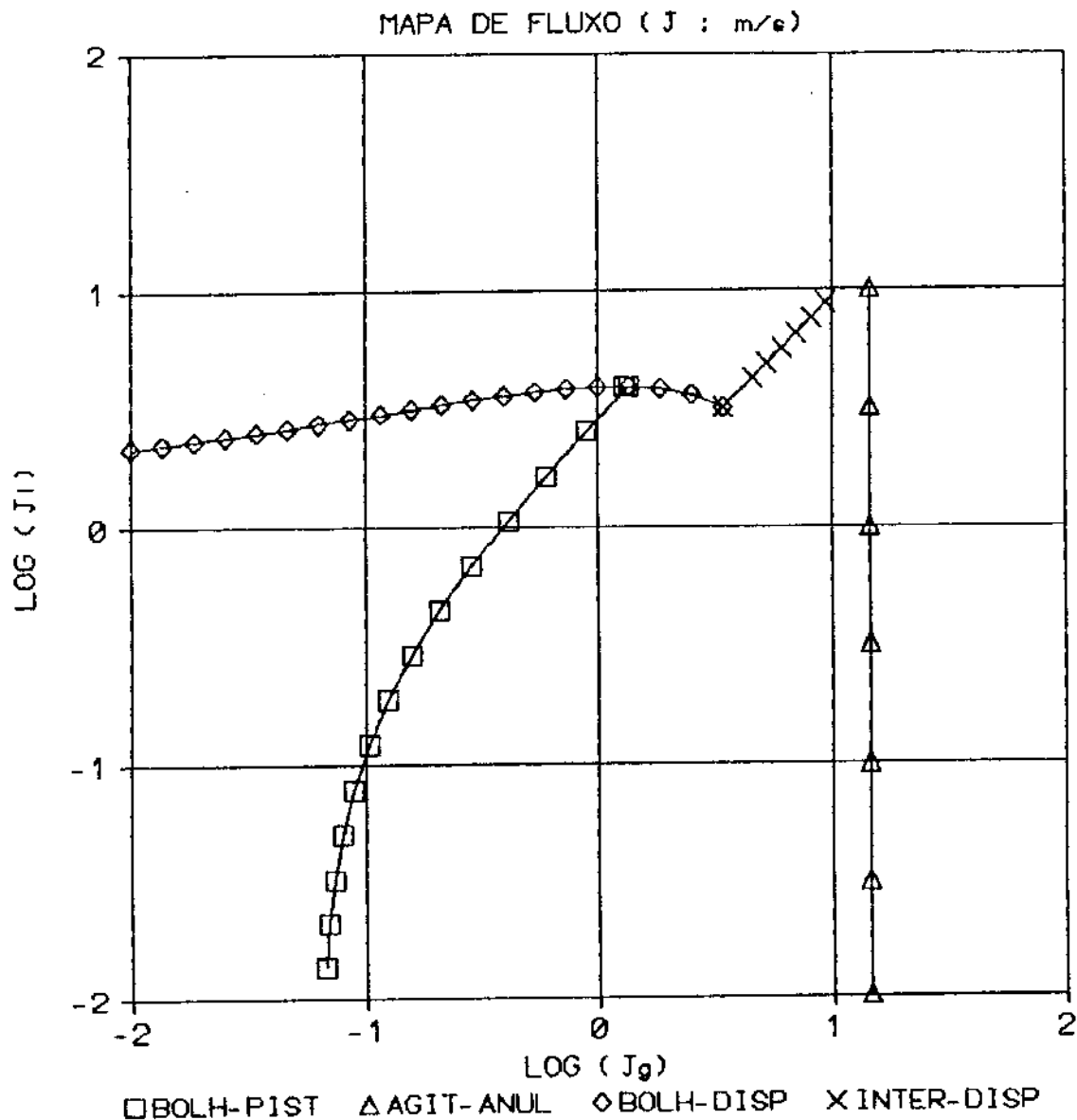


A.10. Mapa de fluxo comparando a transição pistonado-agitante

```

>PRNP REFERENCIA ----->TESTE VERTICAL JOSAPHAT
DIAMETRO DA TUBULACAO -->0.104 ( FT M )
RUGOSIDADE DA TUBULACAO->0.000045 ( FT M )
DENSIDADE DO LIQUIDO----->1000. ( LBM/FT3 KGM/M3 )
DENSIDADE DO GAS ----->1.2050 ( LBM/FT3 KGM/M3 )
VISCOSIDADE DO LIQUIDO -->0.001 ( CP KG/M.S )
VISCOSIDADE DO GAS ----->0.0000100 ( CP KG/M.S )
ANGULO DE INCLINACAO --->90. ( + UPWARD - DOWNWARD )
TENSÃO SUPERFICIAL ----->0.0728 ( DYNE/CM N/M )
FATOR DE INTERFACE L-G -->1 ( 1- SHOOT 2 - SMALL WAVES )
INDICADOR DE UNIDADES (0) ( 1 - BRITISH 0 - SI )
OPÇÃO DE CÁLCULO ----->1 ( 1 - TRANSICOES 2 - MAPA 3-PT 4 - DET )
VELOC SUPERF LIQUIDO --->1.0 ( FT/S M/S )
VELOC SUPERF GAS ----->1.0 ( FT/S M/S )

```

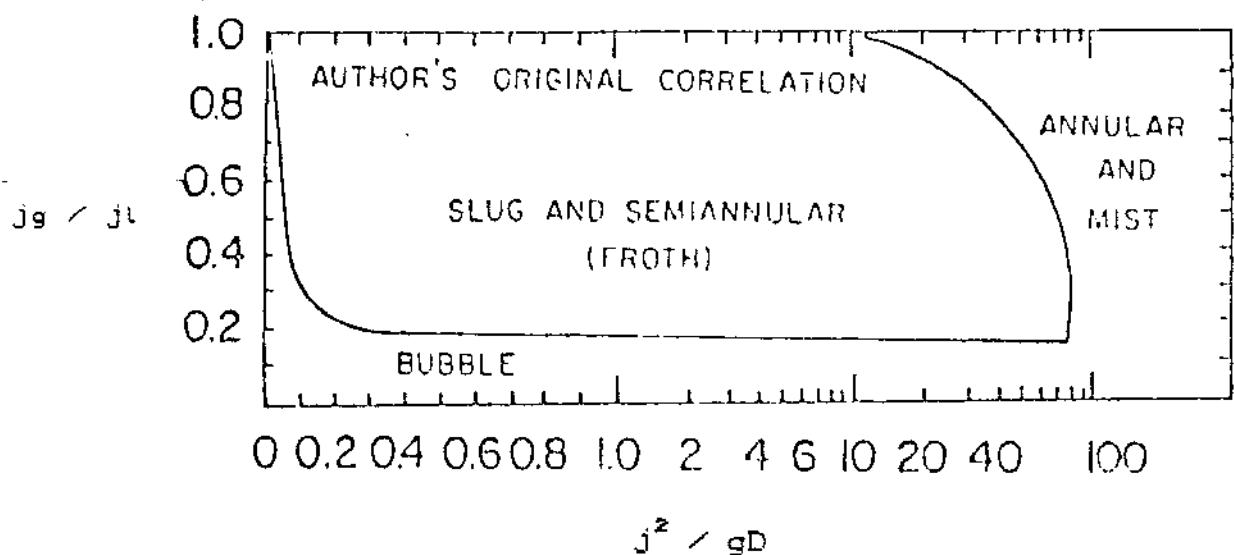


A.11. Mapa de fluxo de Taitel et al para as condições experimentais

A.2.2. Mapas com parâmetros adimensionais

A tentativa de utilizar parâmetros adimensionais nos mapas de transição relaciona-se com a possibilidade de generalização dos resultados. Entretanto, na falta de uma base teórica, sua utilização não é mais geral que a resultante da adoção de mapas com parâmetros dimensionais, já que diferentes forças controlam as várias transições nos escoamentos horizontal e vertical. Assim, um certo par adimensional pode se aplicar a uma dada transição, mas não se aplicará a outras ou a todo o conjunto de transições.

Apesar da tentativa, por ex., de Griffith e Wallis (1961) de mostrar que os parâmetros adimensionais j^2/gD versus j_g/j_l governam a transição pistonado-anular, recorrendo a uma análise teórico-empírica destes padrões de escoamento, não se pode considerar que os mesmos parâmetros governem as outras transições no fluxo vertical, como sugeriram os autores (Fig. A.12).



A.12. Mapa de Griffith & Wallis (1961)

A Fig. A.13 mostra o mapa proposto por Duns e Ros (1963), cujas coordenadas são denominadas de número de velocidade líquida (j_l^*) ou gasosa (j_g^*), onde:

$$j_l^* = j_l \cdot \left(\frac{\rho_l}{g \cdot \sigma} \right)^{0,25} \quad (\text{A.10})$$

$$j_g^* = j_g \cdot \left(\frac{\rho_g}{g \cdot \sigma} \right)^{0,25} \quad (\text{A.11})$$

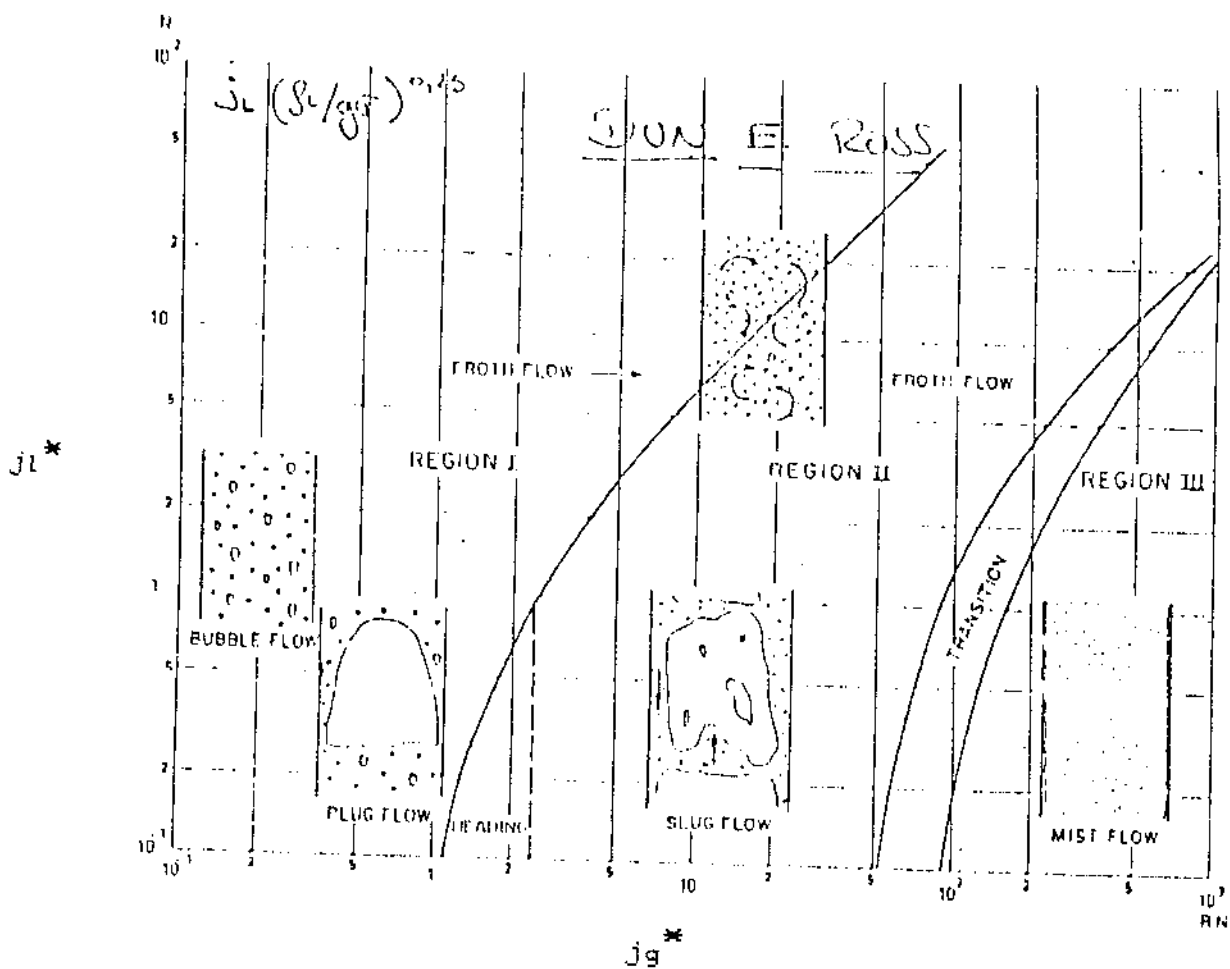
Na Fig. A.14 tem-se o mapa proposto por Oshinowo e Charles (1974), em termos de $\text{Fr}_{tp} / \Lambda^{0,5}$ versus $(R_v)^{0,5}$, onde:

$$\Lambda = \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right) \cdot \left[\frac{\rho_l}{\rho_v} \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_v} \right)^3 \right]^{-0,25} \quad (\text{A.12})$$

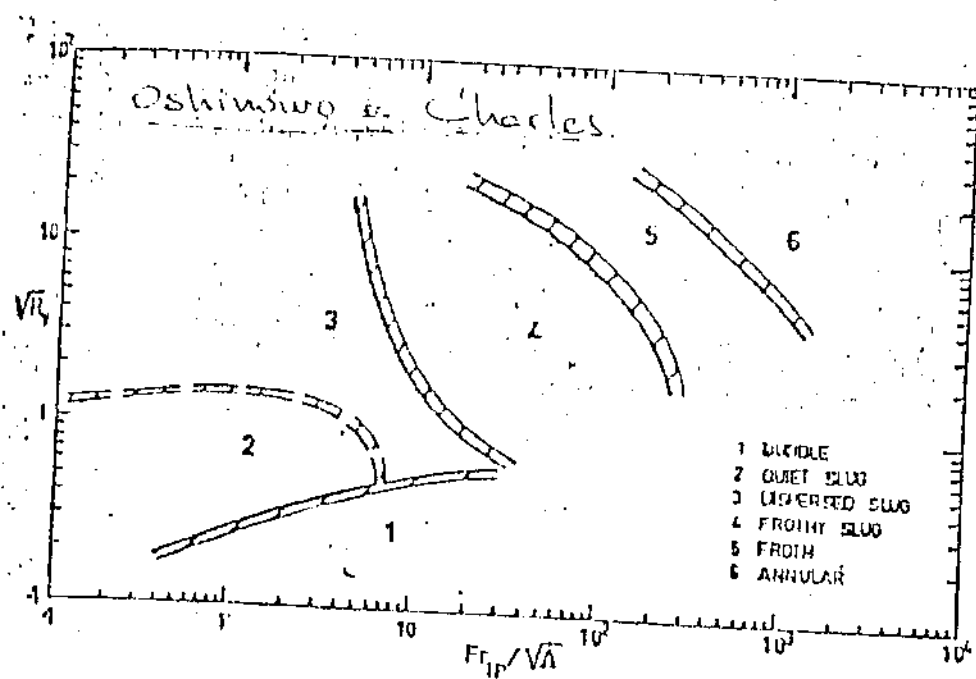
$$\text{Fr}_{tp} = \frac{j^2}{gD} \quad (\text{A.13})$$

$$R_v = \frac{Q_g}{Q_l} \quad (\text{A.14})$$

O que se pode concluir da comparação de todos estes mapas (dimensionais ou adimensionais) é que, segundo Taitel et al, "os problemas estão associados ao fato de que, em quase todos os casos, as curvas de transição obtidas são empíricas e não derivam de um modelo físico apropriado. Torna-se então importante obter analiticamente as curvas de transição, seja para generalizar a previsão de ocorrência dos padrões de escoamento, seja para se poder classificar os padrões estabelecidos experimentalmente."



A.13. Mapa de Dus & Ros (1963)



A.14. Mapa de Oshinowo & Charles (1974)

APENDICE B

FRAÇÃO DE VAZIO SUPERFICIAL POR PONDERAÇÃO DE ÁREA

A área de influência - que se deseja calcular - representa o dobro da área hachurada na Fig. B.1. A Fig. B.2 mostra as duas laterais verticais de uma determinada área de influência.

Pelas Figuras B.1 e B.2, observa-se que a área procurada pode ser subdividida em duas: a área de um trapézio e a área hachurada (A_h) da Fig. B.2, ou seja:

$$A_{proc} = A_{trap} + A_h \quad (B.1)$$

Pela Fig. B.2 nota-se que a área A_h representa a diferença entre o setor circular e o triângulo:

$$A_h = A_{sc} - A_{tri} \quad (B.2)$$

Pela Fig. B.3, obtêm-se as seguintes expressões:

$$p = R \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (B.3)$$

$$q = R \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (B.4)$$

Dai, obtém-se facilmente:

$$A_{tri} = p \cdot q = R^2 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (B.5)$$

A área do setor circular é dada por:

$$A_{sc} = \pi \cdot R^2 \cdot \left[\frac{\beta}{2\pi}\right] = R^2 \cdot \left[\frac{\beta}{2}\right] \quad (B.6)$$

onde: β = Ângulo em radianos.

Portanto, a área hachurada vale:

$$A_h = R^2 \cdot \left[\left(\frac{\beta}{2} \right) - \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \quad (B.7)$$

O ângulo β pode ser facilmente determinado, já que se conhece o valor dos parâmetros x_1 , x_2 e R :

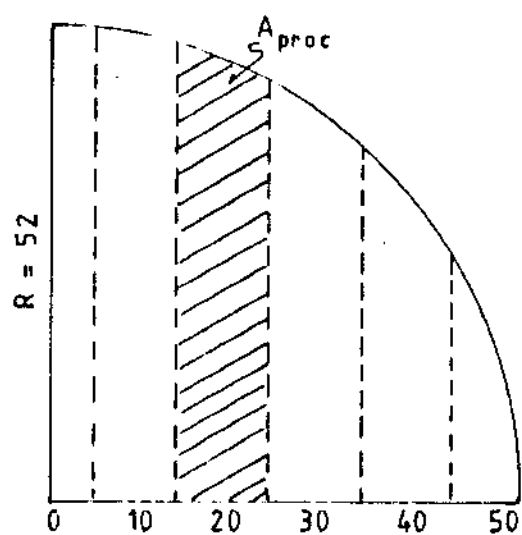
$$\beta = \beta_1 - \beta_2 \quad (B.8)$$

onde: $\beta_1 = \arccos\left(\frac{x_1}{R}\right) \quad (B.9)$

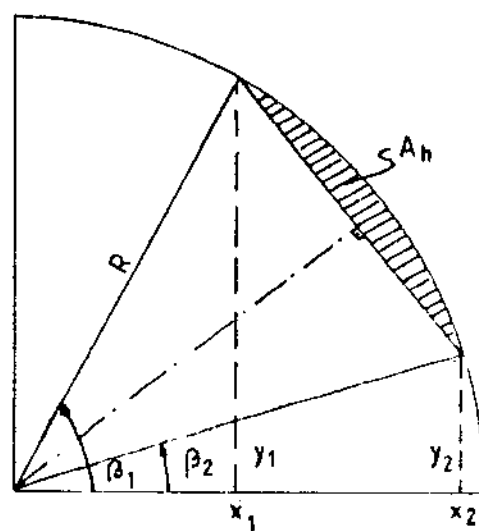
$$\beta_2 = \arccos\left(\frac{x_2}{R}\right) \quad (B.10)$$

A área de influência, por simetria, resulta:

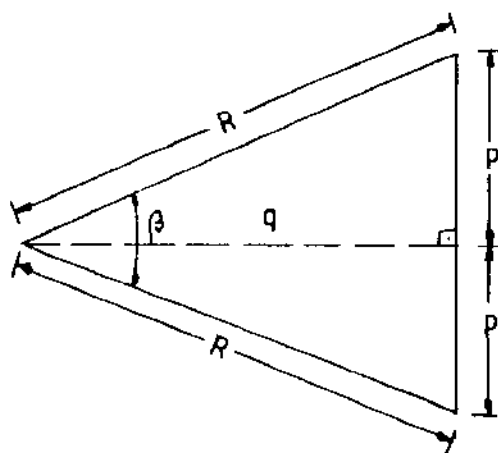
$$\begin{aligned} A_{infl} &= 2 \cdot A_{proc} = \\ &= 2 \cdot \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right) \cdot |x_2 - x_1| + 2 \cdot R^2 \cdot \left[\frac{\beta}{2} - \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \\ \therefore A_{infl} &= (y_1 + y_2) \cdot |x_2 - x_1| + 2 \cdot R^2 \cdot \left[\frac{\beta}{2} - \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \end{aligned} \quad (B.11)$$



B.1. Esquema da área de influência



B.2. Laterais verticais da área de influência



B.3. Detalhe do triângulo

APÊNDICE C

TAXA DE DECAIMENTO E MEIA-VIDA

Sabe-se que a taxa de decaimento de uma substância (radionuclídeo) é diretamente proporcional à sua massa a cada instante. Considerando m_0 a massa inicial quando o tempo $t = 0$, e m a massa no tempo t , durante Δt a massa Δm decai. O limite desta razão quando $\Delta t \rightarrow 0$ é a taxa de decaimento no tempo t :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} \quad (C.1)$$

Mas
$$\frac{dm}{dt} = -\lambda \cdot m \quad (C.2)$$

Resolvendo a equação diferencial tem-se:

$$m = C \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (C.3)$$

Satisfazendo as condições de contorno:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (C.4)$$

A meia-vida ($t_{1/2}$), que é o intervalo de tempo durante o qual metade da massa original da substância decai, pode ser determinada colocando-se $(m_0/2)$ em lugar de m na última equação:

$$\frac{m_0}{2} = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot (t_{1/2})} \quad (C.5)$$

$$-\ln 2 = -\lambda \cdot (t_{1/2}) \quad (C.6)$$

A meia-vida, então, é determinada pela expressão:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (C.7)$$

E a taxa de decaimento, portanto, pode ser dada por:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cong \frac{0,693}{t_{1/2}} \quad (C.8)$$

APÊNDICE D

EXEMPLOS DE CÁLCULO DO ERRO ESTATÍSTICO

Nos exemplos a seguir, os seguintes dados são pertinentes (foram considerados a partir dos resultados experimentais):

$$\begin{aligned}
 * h &= 10 \text{ mm} \Rightarrow h^2 = 100 \\
 * R &= 52 \text{ mm} \Rightarrow R^2 = 2704 \\
 * \Delta R &= 1 \text{ mm} \Rightarrow (\Delta R)^2 = 1 \\
 * \Delta x &= 0,5 \text{ mm} \Rightarrow (\Delta x)^2 = 0,25 \\
 * c &= 2 \\
 * \frac{\Delta I}{I} &= 0,02
 \end{aligned}$$

D.1. Exemplo nº 1. Dados:

- * Vazões: $Q_g = 450$; $Q_l = 10 \text{ m}^3/\text{h}$;
- * Seção inferior;
- * $\alpha_2 = 0,853$ (integração 11 pontos).

Corda (i)	α_i	x_i	b_i	$\alpha_i \cdot x_i$	$\alpha_i \cdot b_i$	$\beta_i \cdot b_i$	$\alpha_i \cdot \frac{x_i}{b_i}$	$\alpha_i \cdot \frac{d_i}{b_i}$
1	0,397	50	14,283	19,85	5,670	-8,612	1,390	63,818
2	0,777	40	33,226	31,08	25,817	-7,409	0,935	11,599
3	0,844	30	42,474	25,32	35,848	-6,626	0,596	-17,963
4	0,879	20	48,000	17,58	42,192	-5,808	0,366	-34,867
5	0,894	10	51,029	8,94	45,620	-1,060	0,175	-43,869
6	0,906	0	52,000	0	47,112	-4,000	0	-47,112

$$S_1 = \left[\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^2 \cdot \ln c} \right]^2 \cdot \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 \cdot \left[(630,193)^2 + (-84,852)^2 + (-1350,974)^2 \right]$$

$$= \left(\frac{40}{3\pi \cdot 52^2 \cdot \ln 2} \right)^2 \cdot (0,02)^2 \cdot 2,229 \cdot 10^5 =$$

$$= (2,051 \cdot 10^{-9}) \cdot (2,229 \cdot 10^5) = 4,572 \cdot 10^{-4} ;$$

$$S_z = \left(\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^3} \right)^2 \cdot (\Delta R)^2 \cdot (-247,142)^2 + \left(\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^2} \right)^2 \cdot (\Delta x)^2 \cdot (-8,136)^2 =$$

$$= 9,111 \cdot 10^{-10} \cdot 6,108 \cdot 10^4 + 2,464 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25 =$$

$$= 5,565 \cdot 10^{-5} + 6,160 \cdot 10^{-7} = 5,627 \cdot 10^{-5} ;$$

$$\therefore (\Delta \alpha z)^2 = S_1 + S_z = 5,135 \cdot 10^{-4}$$

$$\Rightarrow \Delta \alpha z = 0,023 \text{ (ou } 2,7 \% \text{)}.$$

D.2. Exemplo nº 2. Dados:

* Vazões: $Q_g = 15$; $Q_l = 5 \text{ m}^3/\text{h}$;

* Seção inferior;

* $\alpha z = 0,467$ (integração 11 pontos).

Corda (i)	α_i	x_i	b_i	$\alpha_i \cdot x_i$	$\alpha_i \cdot b_i$	$\beta_i \cdot b_i$	$\alpha_i \cdot \frac{x_i}{b_i}$	$\alpha_i \cdot \frac{d_i}{b_i}$
1	0,120	50	14,283	6	1,714	-12,569	0,420	19,290
2	0,386	40	33,226	15,44	12,825	-20,401	0,465	5,762
3	0,459	30	42,474	13,77	19,496	-22,978	0,324	-9,769
4	0,496	20	48,000	9,92	23,808	-24,192	0,207	-19,675
5	0,519	10	51,029	5,19	26,484	-24,545	0,102	-25,467
6	0,540	0	52,000	0	28,080	-23,920	0	-28,080

$$S_1 = \left[\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^2 \cdot \ln c} \right]^2 \cdot \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 \cdot \left[(630,193)^2 + (-333,827)^2 + (-296,366)^2 \right]$$

$$= (2,051 \cdot 10^{-9}) \cdot (5,964 \cdot 10^5) = 1,223 \cdot 10^{-4} ;$$

$$S_2 = \left[\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^3} \right]^2 \cdot (\Delta R)^2 \cdot (-162,994)^2 + \left[\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^2} \right]^2 \cdot (\Delta x)^2 \cdot (-3,96)^2 =$$

$$= 9,111 \cdot 10^{-10} \cdot 2,657 \cdot 10^4 + 6,159 \cdot 10^{-7} \cdot 15,682 =$$

$$= 2,421 \cdot 10^{-5} + 9,659 \cdot 10^{-6} = 3,387 \cdot 10^{-5} ;$$

$$\therefore (\Delta \alpha_2)^2 = S_1 + S_2 = 1,257 \cdot 10^{-9}$$

$$\Rightarrow \Delta \alpha_2 = 0,035 \text{ (ou } 7,5 \% \text{).}$$

D.3. Exemplo nº 3. Dados:

* Vazões: $Q_g = 5$; $Q_l = 20 \text{ m}^3/\text{h}$;

* Seção inferior;

* $\alpha_2 = 0,182$ (integração 11 pontos).

Corda (i)	α_i	x_i	b_i	$\alpha_i \cdot x_i$	$\alpha_i \cdot b_i$	$\beta_i \cdot b_i$	$\alpha_i \cdot \frac{x_i}{b_i}$	$\alpha_i \cdot \frac{d_i}{b_i}$
1	0,084	50	14,283	4,20	1,200	-13,083	0,294	13,503
2	0,118	40	33,226	4,75	3,921	-29,305	0,421	1,762
3	0,198	30	42,474	5,94	8,410	-34,064	0,140	-4,214
4	0,199	20	48,000	3,98	9,552	-38,448	0,083	-7,894
5	0,212	10	51,029	2,12	10,818	-40,211	0,042	-10,403
6	0,215	0	52,000	0	11,180	-40,820	0	-11,180

$$S_1 = \left[\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^2 \cdot \ln c} \right]^2 \cdot \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 \cdot \left[(630,193)^2 + (-514,285)^2 + (-115,908)^2 \right]$$

$$= (2,051 \cdot 10^{-9}) \cdot (6,751 \cdot 10^5) = 1,385 \cdot 10^{-3}$$

$$S_2 = \left[\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^3} \right]^2 \cdot (\Delta R)^2 \cdot (-62,661)^2 + \left[\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^2} \right]^2 \cdot (\Delta x)^2 \cdot (-2,674)^2 =$$

$$= 9,111 \cdot 10^{-10} \cdot 3,920 \cdot 10^9 + 6,159 \cdot 10^{-7} \cdot 7,150 =$$

$$= 3,572 \cdot 10^{-6} + 4,404 \cdot 10^{-6} = 7,976 \cdot 10^{-6}$$

$$\therefore (\Delta \alpha_2)^2 = S_1 + S_2 = 1,393 \cdot 10^{-3}$$

$$\rightarrow \Delta \alpha_2 = 0,037 \text{ (ou } 20,3 \%).$$

D.4. Exemplo nº 4. Dados:

* Vazões: $Q_g = 5$; $Q_l = 25 \text{ m}^3/\text{h}$;

* Seção inferior;

* $\alpha_2 = 0,178$ (integração 11 pontos).

Corda (i)	α_i	x_i	b_i	$\alpha_i \cdot x_i$	$\alpha_i \cdot b_i$	$\beta_i \cdot b_i$	$\alpha_i \cdot \frac{x_i}{b_i}$	$\alpha_i \cdot \frac{d_i}{b_i}$
1	0,084	50	14,283	4,20	1,200	-13,083	0,294	13,503
2	0,117	40	33,226	4,68	3,887	-29,339	0,141	1,747
3	0,143	30	42,474	4,29	6,074	-36,400	0,010	-3,043
4	0,208	20	48,000	4,16	9,984	-38,016	0,087	-8,251
5	0,209	10	51,029	2,09	10,665	-40,364	0,041	-10,256
6	0,214	0	52,000	0	11,128	-40,872	0	-11,128

$$S_1 = \left(\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^2 \cdot \ln c} \right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 \cdot \left[(630,193)^2 + (-517,775)^2 + (-112,418)^2 \right]$$

$$= (2,051 \cdot 10^{-9}) \cdot (6,779 \cdot 10^5) = 1,390 \cdot 10^{-3}$$

$$S_2 = \left(\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^3} \right)^2 \cdot (\Delta R)^2 \cdot (-61,367)^2 + \left(\frac{4 \cdot h}{3\pi \cdot R^2} \right)^2 \cdot (\Delta x)^2 \cdot (-1,308)^2 =$$

$$= 9,111 \cdot 10^{-10} \cdot 3,766 \cdot 10^9 + 6,159 \cdot 10^{-7} \cdot 1,711 =$$

$$= 3,431 \cdot 10^{-6} + 1,054 \cdot 10^{-6} = 4,485 \cdot 10^{-6}$$

$$\therefore (\Delta \alpha_2)^2 = S_1 + S_2 = 1,394 \cdot 10^{-3}$$

$$\Rightarrow \Delta \alpha_2 = 0,037 \text{ (ou } 20,8 \%).$$

APÊNDICE E

ANÁLISE DA TRANSIÇÃO BOLHAS - PISTONADO

Taitel, Bornea e Dukler e, posteriormente, Mishima e Ishii sugeriram modelagens mecanicistas para as transições entre os padrões de escoamento bifásico em dutos circulares. Aqui será abordada a transição bolhas-pistonado num escoamento vertical ascendente.

Segundo Taitel et al., no escoamento borbulhante as bolhas se deslocam em relação ao líquido com uma velocidade relativa resultante da força de empuxo que age sobre elas. O escoamento em bolhas perdura até que a concentração de bolhas se eleva (aumentando-se a vazão de gás) o suficiente para permitir que um processo de aglomeração ou coalescência em bolhas maiores (bolhas de Taylor) se estabeleça, formando o escoamento pistonado.

A partir da definição das velocidades superficiais médias do gás e do líquido:

$$j_g = \alpha \cdot V_g \quad \text{e} \quad j_l = (1 - \alpha) \cdot V_l$$

sendo as variáveis dadas por seus valores médios na seção transversal, tem-se que a velocidade relativa média é dada por:

$$V_r = V_g - V_l = \frac{j_g}{\alpha} - \frac{j_l}{1 - \alpha}$$

Pode-se, então, expressar a ocorrência de escoamento em bolhas pela equação:

$$j_l = \left[\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right] \cdot j_g - (1 - \alpha) \cdot V_r$$

A velocidade relativa média, segundo os autores, deve ser dada pela velocidade terminal de uma bolha isolada num meio

fluido infinito. Segundo Harmathy, esta velocidade terminal se relaciona com as propriedades físicas do fluido pela expressão:

$$V_r = V_\infty = C \cdot \left[\frac{g \cdot \Delta \rho \cdot \sigma}{\rho_l^2} \right]^{0,25}$$

onde: $C = C_1 = 1,53$ (valor adotado por Harmathy);

$$\Delta \rho = \rho_l - \rho_g$$

A expressão de Harmathy aplica-se a escoamentos "em bolha deformada", quando a velocidade relativa da bolha não depende do seu diâmetro. Outros autores sugeriram valores diferentes para a constante C:

* Peebles e Garber: $C_2 = 1,18$;

* Ishii e Zuber: $C_3 = \sqrt{2}$.

Segundo Taitel *et al.*, a análise de dados experimentais próprios e de outros autores indica o valor médio de 0,25 para α na transição bolhas-pistonado. O valor máximo possível (teórico) de ocorrência do escoamento em bolhas vem da análise do empacotamento das bolhas em um elemento cúbico, ou seja, $\alpha_{max} = 0,52$.

Substituindo estes valores na equação acima e usando C_1 :

a) Para o valor médio de α na transição B-P ($\alpha = \alpha_{BP} = 0,25$):

$$j_l = \left[\frac{1 - \alpha_{BP}}{\alpha} \right] \cdot j_g - (1 - \alpha_{BP}) \cdot \left[1,53 \cdot \left[\frac{g \cdot \Delta \rho \cdot \sigma}{\rho_l^2} \right]^{0,25} \right]$$

ou:

$$j_l = 3,0 \cdot j_g - 1,15 \cdot \left[\frac{g \cdot \Delta \rho \cdot \sigma}{\rho_l^2} \right]^{0,25}$$

que é a transição do escoamento em bolhas para o pistonado (Curva

A do mapa de Taitel *et al.*).

b) Para o valor máximo possível de α ($\alpha_{\max} = 0,52$):

$$j_l = 0,92 \cdot j_g - 0,73 \cdot \left(\frac{g \cdot \Delta \rho \cdot \sigma}{\rho_l^2} \right)^{0,25}$$

Esta é a Curva B do mapa de fluxo de Taitel *et al.*

Os autores destacam a ocorrência de um "escoamento finamente disperso", que estaria associado a altas vazões de líquido. Nesta condição, a alta taxa de dissipação de energia (turbulência) promoveria o rompimento das bolhas de gás em outras bolhas de menor diâmetro. O diâmetro máximo estável das bolhas resultantes foi investigado por Hinze e confirmado por Sevik e Park. Segundo Hinze:

$$d_{\max} = K \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_l} \right)^{3/5} \cdot \epsilon^{-2/5}$$

onde: ϵ = taxa de dissipação de energia por unidade de massa;

$K = 0,725$ (segundo Hinze).

$$\epsilon = \left| \frac{dp}{dz} \right| \cdot \frac{j}{\rho_m}$$

onde: $j = j_g + j_l$;

ρ_m = densidade média da mistura.

O trabalho de Sevik e Park (1973), mais recente, sugere o valor de 1,14 para K .

A queda de pressão é determinada por:

$$\frac{dp}{dz} = 2 \cdot \frac{f}{D} \cdot \rho_m \cdot j^2$$

O fator de atrito é o da equação de Blasius:

$$r = C \cdot \left(\frac{j \cdot D}{\nu_l} \right)^{-n}$$

onde: $\nu_l = \frac{\mu_l}{\rho_l}$ = viscosidade cinemática do líquido.

Assim, à medida que aumenta a turbulência, bolhas maiores se rompem formando bolhas menores (que, entretanto, continuam coalescendo para formar novas bolhas). Este processo de coalescência só é suprimido se as bolhas formadas pelo rompimento tiverem um diâmetro tão pequeno que as permita deslocarem-se com um movimento uniforme retilíneo. Neste caso as pequenas bolhas são esféricas. Segundo Brodkey, o máximo valor para que o diâmetro de uma bolha esférica que se desloca em um meio fluido é:

$$d_{\text{crít}} = \left[\frac{0,4 \cdot \sigma}{(\rho_l - \rho_g) \cdot g} \right]^{0,5}$$

Quando $d_{\text{max}} < d_{\text{crít}}$, as bolhas são esféricas e de pequeno diâmetro, se deslocando através do líquido com um movimento uniforme e retilíneo. Neste caso, o escoamento em bolhas poderia ocorrer para valores de α superiores a 0,25, até o limite máximo de 0,52. Estas são as características do escoamento em bolhas finamente dispersas. Como ele está associado a altas velocidades superficiais, a velocidade relativa entre as fases (V_r) pode ser considerada desprezível quando comparada à velocidade superficial do gás. Então, se $V_r \ll j_g$, a fração de vazio na seção transversal pode ser calculada de (modelo homogêneo):

$$\alpha = \frac{j_g}{j_g + j_l} = \frac{j_g}{j}$$

Fazendo $d_{\text{max}} = d_{\text{crít}} = D$ e combinando as equações acima, tem-se:

$$j_l = 4,0 \cdot \left[\frac{D^{0,429} \cdot (\sigma/\rho_l)^{0,089}}{\nu_l^{0,072}} \right] \cdot \left[\frac{g \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right]^{0,046} - j_g$$

onde se assumiu para a constante e o expoente da equação de Blasius os valores $C = 0,046$ e $n = 0,2$. Esta é a curva C do gráfico j_g versus j_l de um escoamento água-ar, a pressão de 10 kPa e temperatura de 25°C. Somente acima da curva C pode ocorrer o escoamento em bolhas finamente dispersas.

Os autores levantaram a hipótese de que, em tubos de pequeno diâmetro, o escoamento em bolhas seja somente uma condição de entrada. Para uma tubulação de 5 cm de diâmetro, por exemplo, a velocidade relativa das bolhas que sobem na tubulação com um movimento aleatório (bolha deformada) é função apenas das propriedades dos fluidos e independe de seu diâmetro:

$$V_{\infty} = 1,53 \cdot \left[\frac{g \cdot \Delta\rho \cdot \sigma}{\rho_l^2} \right]^{0,25} \cong 0,25 \text{ m/s}$$

A velocidade de uma bolha de Taylor (BT) incipiente (em formação) é, por sua vez, função somente do diâmetro da tubulação, segundo Nicklin et al., sendo dada por:

$$V_{BT} = 0,35 \cdot \sqrt{g \cdot D}$$

Para diâmetros menores ou iguais a 5 cm,

$$V_{BT} \cong 0,25 \text{ m/s.}$$

Então, se a coalescência das bolhas dispersas permite a formação de uma BT incipiente, esta poderá ter (dependendo do diâmetro do tubo) uma velocidade relativa inferior à de uma pequena bolha dispersa. Se isto ocorrer, as pequenas bolhas dispersas se agregarão a bolhas de Taylor incipientes, à medida

que sobem. Assim, o escoamento em bolhas só existiria como condição de entrada em tubos de pequenos diâmetros.

Da identidade $V_m = V_{BT}$ determina-se o diâmetro D^* . Se $D^* > D$, o escoamento em bolhas ocorre na tubulação. Desta forma, a curva A no gráfico $j_g \times j_l$ tem sua condição de existência associada ao diâmetro da tubulação na qual escoar a mistura bifásica. Ou seja, conforme Taitel et al., ocorre o escoamento em bolhas se

$$\left(\frac{\rho_l^2 \cdot g \cdot D^2}{\Delta \rho \cdot \sigma} \right)^{1/4} \leq 4,36$$

Já os pesquisadores Mishima e Ishii recorreram a relações próprias do modelo de deslizamento para expressar o escoamento em bolhas. Se as variáveis são consideradas por seus valores médios, a velocidade do gás é dada por:

$$V_g = V_{gj} + C_o \cdot j$$

onde: $V_{gj} = V_g - j$ (em valores locais);

$$j = j_g + j_l$$

Zuber e Findlay levam em consideração o fluxo não uniforme e os perfis de concentração, bem como o efeito da velocidade relativa local. Estes fatores são responsáveis pelo parâmetro de distribuição (C_o), definido como:

$$C_o = \frac{\langle \alpha j \rangle}{\langle \alpha \rangle \cdot \langle j \rangle} = \frac{\frac{1}{A} \cdot \int \alpha j \, dA}{\left(\frac{1}{A} \cdot \int \alpha \, dA \right) \cdot \left(\frac{1}{A} \cdot \int j \, dA \right)}$$

Para o escoamento em bolhas este parâmetro pode ser dado por:

$$C_o = 1,2 - \sqrt{\rho_g/\rho_l}$$

Mishima et al. consideram que o movimento relativo entre as fases deve ser expresso pela velocidade de deslizamento (V_{gj}):

$$V_{gj} = V_{\infty} \cdot (1 - \alpha)^{1,75} = \sqrt{2} \cdot \left[\frac{g \cdot \Delta \rho \cdot \sigma}{\rho_l^2} \right]^{0,25} \cdot (1 - \alpha)^{1,75}$$

A equação que expressa o escoamento em bolhas pode ser escrita:

$$j_l = j_g \cdot \left[\frac{1}{\alpha \cdot C_o} - 1 \right] = \frac{\sqrt{2}}{C_o} \cdot \left[\frac{g \cdot \Delta \rho \cdot \sigma}{\rho_l^2} \right] \cdot (1 - \alpha)^{1,75}$$

Considerando $\alpha = \alpha_{BP} = 0,25$, para um escoamento ar-água à pressão de 10 kPa e $T = 25^\circ\text{C}$, tem-se, aproximadamente:

$$j_l = 2,33 \cdot j_g - 0,11 \dots \dots \dots [\text{m/s}]$$

transição esta "atrasada" em relação à de Taitel et al., que é dada por:

$$j_l = 3,0 \cdot j_g - 0,18 \dots \dots \dots [\text{m/s}]$$

para as mesmas condições.

A N E X O 1

DADOS EXPERIMENTAIS - SECAO INFERIOR

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 5.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33154.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20789.0	15833.0	16358.0	.120
2	23717.0	13201.0	16554.0	.386
3	24859.0	12072.0	16819.0	.459
4	25734.0	11132.0	16873.0	.496
5	26145.0	10728.0	17026.0	.519
6	26397.0	10677.0	17401.0	.540
7	26563.0	11014.0	17562.0	.530
8	26553.0	11465.0	17575.0	.509
9	26400.0	12370.0	17483.0	.456
10	25576.0	14116.0	17616.0	.373
11	22843.0	16535.0	17510.0	.177

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .467
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .463
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .446
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .415
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .407
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .464

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 10.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33154.00

*** CORDAS (X):
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20789.0	15833.0	16071.0	.055
2	23717.0	13201.0	16097.0	.339
3	24859.0	12072.0	16183.0	.406
4	25734.0	11132.0	16522.0	.471
5	26145.0	10728.0	16605.0	.490
6	26397.0	10677.0	16948.0	.510
7	26563.0	11014.0	17051.0	.496
8	26553.0	11465.0	16799.0	.455
9	26400.0	12370.0	17057.0	.424
10	25576.0	14116.0	17232.0	.336
11	22843.0	16535.0	17514.0	.178

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .430
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .426
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .410
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .378
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .372
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .427

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 5.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 15.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33323.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20826.0	15749.0	15957.0	.047
2	23691.0	13680.0	14350.0	.087
3	24980.0	12180.0	13949.0	.189
4	25442.0	11798.0	13692.0	.194
5	26081.0	11291.0	13560.0	.219
6	26190.0	11174.0	13581.0	.229
7	26390.0	11517.0	13807.0	.219
8	26473.0	11973.0	13877.0	.186
9	26211.0	12302.0	14064.0	.177
10	25632.0	13858.0	14638.0	.089
11	23137.0	16426.0	16635.0	.037

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .173
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .179
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .163
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .152
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .150
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .176

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 5.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 20.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33323.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20826.0	15749.0	16123.0	.084
2	23691.0	13680.0	14598.0	.118
3	24980.0	12180.0	14038.0	.198
4	25442.0	11798.0	13751.0	.199
5	26081.0	11291.0	13482.0	.212
6	26190.0	11174.0	13421.0	.215
7	26390.0	11517.0	13702.0	.210
8	26473.0	11973.0	14098.0	.206
9	26211.0	12302.0	14357.0	.204
10	25632.0	13858.0	14817.0	.109
11	23137.0	16426.0	16895.0	.082

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .182
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .188
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .174
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .167
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .162
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .185

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 5.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 25.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33323.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20826.0	15749.0	16122.0	.084
2	23691.0	13680.0	14587.0	.117
3	24980.0	12180.0	13495.0	.143
4	25442.0	11798.0	13844.0	.208
5	26081.0	11291.0	13451.0	.209
6	26190.0	11174.0	13413.0	.214
7	26390.0	11517.0	13675.0	.207
8	26473.0	11973.0	14031.0	.200
9	26211.0	12302.0	14103.0	.181
10	25632.0	13858.0	14784.0	.105
11	23137.0	16426.0	16883.0	.080

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .176
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .177
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .166
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .159
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .154
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .176

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 5.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33154.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20789.0	15833.0	16358.0	.120
2	23717.0	13201.0	16554.0	.386
3	24859.0	12072.0	16819.0	.459
4	25734.0	11132.0	16873.0	.496
5	26145.0	10728.0	17026.0	.519
6	26397.0	10677.0	17401.0	.540
7	26563.0	11014.0	17562.0	.530
8	26553.0	11465.0	17575.0	.509
9	26400.0	12370.0	17483.0	.456
10	25576.0	14116.0	17616.0	.373
11	22843.0	16535.0	17510.0	.177

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .467
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .463
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .446
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .415
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .407
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .464

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
VAZAO DE LIQUIDO: QL = 10.00 M3/H
POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33154.00

*** CORDAS (X);
*** VALORES DAS CALIBRACOES:
TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
*** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
*** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20789.0	15833.0	16071.0	.055
2	23717.0	13201.0	16097.0	.339
3	24859.0	12072.0	16183.0	.406
4	25734.0	11132.0	16522.0	.471
5	26145.0	10728.0	16605.0	.490
6	26397.0	10677.0	16948.0	.510
7	26563.0	11014.0	17051.0	.496
8	26553.0	11465.0	16799.0	.455
9	26400.0	12370.0	17057.0	.424
10	25576.0	14116.0	17232.0	.336
11	22843.0	16535.0	17514.0	.178

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .430
CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .426
CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .410
CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .378
CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .372
CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .427

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 15.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33154.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20789.0	15833.0	16265.0	.099
2	23717.0	13201.0	15589.0	.284
3	24859.0	12072.0	15644.0	.359
4	25734.0	11132.0	15724.0	.412
5	26145.0	10728.0	15787.0	.434
6	26397.0	10677.0	16294.0	.467
7	26563.0	11014.0	16383.0	.451
8	26553.0	11465.0	16436.0	.429
9	26400.0	12370.0	16537.0	.383
10	25576.0	14116.0	16830.0	.296
11	22843.0	16535.0	17303.0	.140

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .386
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .383
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .367
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .341
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .335
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .384

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 20.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33154.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20789.0	15833.0	16514.0	.155
2	23717.0	13201.0	15990.0	.327
3	24859.0	12072.0	15993.0	.389
4	25734.0	11132.0	16154.0	.444
5	26145.0	10728.0	16223.0	.464
6	26397.0	10677.0	16261.0	.465
7	26563.0	11014.0	16407.0	.453
8	26553.0	11465.0	16296.0	.419
9	26400.0	12370.0	16435.0	.375
10	25576.0	14116.0	16556.0	.266
11	22843.0	16535.0	17287.0	.136

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .396
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .396
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .376
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .354
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .346
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .395

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 25.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33154.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20789.0	15833.0	16450.0	.140
2	23717.0	13201.0	15369.0	.260
3	24859.0	12072.0	15256.0	.324
4	25734.0	11132.0	15406.0	.388
5	26145.0	10728.0	15421.0	.407
6	26397.0	10677.0	15654.0	.423
7	26563.0	11014.0	15858.0	.414
8	26553.0	11465.0	15988.0	.396
9	26400.0	12370.0	15967.0	.337
10	25576.0	14116.0	16311.0	.243
11	22843.0	16535.0	17208.0	.123

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .352
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .351
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .335
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .314
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .307
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .351

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 150.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 25.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 32996.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20467.0	15585.0	17314.0	.386
2	23416.0	13502.0	19115.0	.631
3	24995.0	12095.0	20582.0	.732
4	25649.0	11569.0	21987.0	.807
5	25758.0	11025.0	22288.0	.829
6	26328.0	10900.0	23102.0	.852
7	26312.0	11019.0	22763.0	.834
8	26165.0	11674.0	22857.0	.833
9	26053.0	12370.0	21735.0	.757
10	25300.0	13910.0	20349.0	.636
11	23000.0	16491.0	18706.0	.379

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .759
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .758
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .746
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .698
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .677
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .757

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 50.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 5.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33154.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20789.0	15833.0	16852.0	.229
2	23717.0	13201.0	18569.0	.582
3	24859.0	12072.0	20034.0	.701
4	25734.0	11132.0	20593.0	.734
5	26145.0	10728.0	21523.0	.782
6	26397.0	10677.0	21780.0	.788
7	26563.0	11014.0	21865.0	.779
8	26553.0	11465.0	21387.0	.742
9	26400.0	12370.0	20776.0	.684
10	25576.0	14116.0	20164.0	.600
11	22843.0	16535.0	18508.0	.349

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .698
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .698
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .684
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .634
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .618
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .696

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 50.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 10.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33154.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20789.0	15833.0	16707.0	.197
2	23717.0	13201.0	18109.0	.540
3	24859.0	12072.0	19257.0	.646
4	25734.0	11132.0	19766.0	.685
5	26145.0	10728.0	20314.0	.717
6	26397.0	10677.0	20315.0	.711
7	26563.0	11014.0	20654.0	.714
8	26553.0	11465.0	20538.0	.694
9	26400.0	12370.0	20023.0	.635
10	25576.0	14116.0	19393.0	.534
11	22843.0	16535.0	18450.0	.339

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .642
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .642
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .627
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .583
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .568
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .641

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 50.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 15.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 32996.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20467.0	15585.0	16832.0	.282
2	23416.0	13502.0	17733.0	.495
3	24995.0	12095.0	18872.0	.613
4	25649.0	11569.0	19363.0	.647
5	25758.0	11025.0	19893.0	.696
6	26328.0	10900.0	20362.0	.709
7	26312.0	11019.0	20636.0	.721
8	26165.0	11674.0	20241.0	.682
9	26053.0	12370.0	19915.0	.639
10	25300.0	13910.0	19482.0	.563
11	23000.0	16491.0	18340.0	.319

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .630
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .634
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .617
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .579
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .562
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .631

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 50.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 20.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 32996.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20467.0	15585.0	16758.0	.266
2	23416.0	13502.0	18197.0	.542
3	24995.0	12095.0	19250.0	.640
4	25649.0	11569.0	20203.0	.700
5	25758.0	11025.0	20610.0	.737
6	26328.0	10900.0	20574.0	.720
7	26312.0	11019.0	20482.0	.712
8	26165.0	11674.0	20511.0	.698
9	26053.0	12370.0	19995.0	.645
10	25300.0	13910.0	19328.0	.550
11	23000.0	16491.0	18278.0	.309

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .650
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .650
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .635
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .593
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .577
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .649

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 50.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 25.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 32996.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20467.0	15585.0	16644.0	.241
2	23416.0	13502.0	17735.0	.495
3	24995.0	12095.0	18470.0	.583
4	25649.0	11569.0	19158.0	.634
5	25758.0	11025.0	19816.0	.691
6	26328.0	10900.0	20092.0	.693
7	26312.0	11019.0	20131.0	.692
8	26165.0	11674.0	19829.0	.656
9	26053.0	12370.0	19520.0	.612
10	25300.0	13910.0	19050.0	.526
11	23000.0	16491.0	18238.0	.303

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .611
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .612
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .596
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .557
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .542
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .610

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 150.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 5.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 32996.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20467.0	15585.0	17422.0	.409
2	23416.0	13502.0	20136.0	.726
3	24995.0	12095.0	22391.0	.848
4	25649.0	11569.0	22989.0	.862
5	25758.0	11025.0	23443.0	.889
6	26328.0	10900.0	24217.0	.905
7	26312.0	11019.0	23959.0	.892
8	26165.0	11674.0	23950.0	.890
9	26053.0	12370.0	23287.0	.849
10	25300.0	13910.0	22129.0	.776
11	23000.0	16491.0	19456.0	.497

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .835
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .837
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .826
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .777
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .752
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .834

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 150.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 10.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 32996.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20467.0	15585.0	17290.0	.381
2	23416.0	13502.0	19751.0	.691
3	24995.0	12095.0	21367.0	.785
4	25649.0	11569.0	22500.0	.835
5	25758.0	11025.0	22872.0	.860
6	26328.0	10900.0	23080.0	.851
7	26312.0	11019.0	23388.0	.865
8	26165.0	11674.0	23321.0	.857
9	26053.0	12370.0	22594.0	.809
10	25300.0	13910.0	21404.0	.720
11	23000.0	16491.0	19179.0	.454

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .795
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .797
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .785
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .737
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .714
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .794

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 150.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 20.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 32996.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20467.0	15585.0	17460.0	.417
2	23416.0	13502.0	19106.0	.631
3	24995.0	12095.0	20876.0	.752
4	25649.0	11569.0	21879.0	.800
5	25758.0	11025.0	22398.0	.835
6	26328.0	10900.0	22662.0	.830
7	26312.0	11019.0	22814.0	.836
8	26165.0	11674.0	22504.0	.813
9	26053.0	12370.0	21645.0	.751
10	25300.0	13910.0	20218.0	.625
11	23000.0	16491.0	18885.0	.407

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .753
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .760
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .744
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .700
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .677
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .755

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 300.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 5.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 32996.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20467.0	15585.0	17920.0	.512
2	23416.0	13502.0	21106.0	.811
3	24995.0	12095.0	22808.0	.874
4	25649.0	11569.0	23359.0	.883
5	25758.0	11025.0	23987.0	.916
6	26328.0	10900.0	24376.0	.913
7	26312.0	11019.0	24597.0	.923
8	26165.0	11674.0	24377.0	.912
9	26053.0	12370.0	23830.0	.880
10	25300.0	13910.0	22396.0	.796
11	23000.0	16491.0	19674.0	.530

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .863
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .869
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .856
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .814
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .785
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .864

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 300.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 10.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33218.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20512.0	16008.0	17626.0	.388
2	23895.0	13058.0	20385.0	.737
3	25567.0	11902.0	22576.0	.837
4	26034.0	11212.0	23433.0	.875
5	26570.0	10743.0	23994.0	.887
6	26684.0	10632.0	24536.0	.909
7	27401.0	11022.0	24147.0	.861
8	26836.0	11558.0	23964.0	.866
9	26679.0	12416.0	23407.0	.829
10	25786.0	13998.0	21572.0	.708
11	23500.0	16462.0	18799.0	.373

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .821
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .817
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .808
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .752
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .731
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .817

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 300.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 15.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33218.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20512.0	16008.0	17564.0	.374
2	23895.0	13058.0	19237.0	.641
3	25567.0	11902.0	21182.0	.754
4	26034.0	11212.0	22273.0	.815
5	26570.0	10743.0	23105.0	.846
6	26684.0	10632.0	23534.0	.863
7	27401.0	11022.0	23963.0	.853
8	26836.0	11558.0	23770.0	.856
9	26679.0	12416.0	23312.0	.824
10	25786.0	13998.0	21880.0	.731
11	23500.0	16462.0	18951.0	.396

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .786
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .785
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .775
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .723
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .702
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .784

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 300.00 M3/H
VAZAO DE LIQUIDO: QL = 20.00 M3/H
POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33218.00

*** CORDAS (X);
*** VALORES DAS CALIBRACOES:
TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
*** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
*** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20512.0	16008.0	17631.0	.390
2	23895.0	13058.0	18934.0	.615
3	25567.0	11902.0	21169.0	.753
4	26034.0	11212.0	22465.0	.825
5	26570.0	10743.0	23311.0	.855
6	26684.0	10632.0	24031.0	.886
7	27401.0	11022.0	24287.0	.868
8	26836.0	11558.0	24123.0	.873
9	26679.0	12416.0	23691.0	.845
10	25786.0	13998.0	22290.0	.762
11	23500.0	16462.0	19290.0	.445

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .798
CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .799
CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .789
CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .738
CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .715
CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .797

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 300.00 M3/H
VAZAO DE LIQUIDO: QL = 25.00 M3/H
POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33218.00

*** CORDAS (X);
*** VALORES DAS CALIBRACOES:
TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
*** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
*** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20512.0	16008.0	17653.0	.395
2	23895.0	13058.0	18614.0	.587
3	25567.0	11902.0	20585.0	.717
4	26034.0	11212.0	22154.0	.808
5	26570.0	10743.0	22951.0	.838
6	26684.0	10632.0	23329.0	.854
7	27401.0	11022.0	23632.0	.838
8	26836.0	11558.0	23480.0	.841
9	26679.0	12416.0	23202.0	.817
10	25786.0	13998.0	21782.0	.724
11	23500.0	16462.0	19425.0	.465

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .771
CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .774
CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .763
CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .717
CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .693
CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .771

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 450.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 5.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33218.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20512.0	16008.0	18291.0	.538
2	23895.0	13058.0	22563.0	.905
3	25567.0	11902.0	24006.0	.918
4	26034.0	11212.0	24700.0	.938
5	26570.0	10743.0	25817.0	.966
6	26684.0	10632.0	25520.0	.952
7	27401.0	11022.0	25718.0	.930
8	26836.0	11558.0	25441.0	.937
9	26679.0	12416.0	25283.0	.930
10	25786.0	13998.0	23831.0	.871
11	23500.0	16462.0	19911.0	.534

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .910
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .910
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .903
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .856
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .827
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .908

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 450.00 M3/H
VAZAO DE LIQUIDO: QL = 10.00 M3/H
POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33218.00

*** CORDAS (X);
*** VALORES DAS CALIBRACOES:
TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
*** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
*** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20512.0	16008.0	17663.0	.397
2	23895.0	13058.0	20887.0	.777
3	25567.0	11902.0	22690.0	.844
4	26034.0	11212.0	23512.0	.879
5	26570.0	10743.0	24143.0	.894
6	26684.0	10632.0	24466.0	.906
7	27401.0	11022.0	24871.0	.894
8	26836.0	11558.0	24600.0	.897
9	26679.0	12416.0	24492.0	.888
10	25786.0	13998.0	23373.0	.839
11	23500.0	16462.0	19625.0	.494

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .853
CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .849
CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .842
CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .792
CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .767
CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .849

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 450.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 15.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33218.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20512.0	16008.0	17818.0	.432
2	23695.0	13058.0	20986.0	.785
3	25567.0	11902.0	23523.0	.891
4	26034.0	11212.0	24116.0	.909
5	26570.0	10743.0	25124.0	.938
6	26684.0	10632.0	25526.0	.952
7	27401.0	11022.0	25295.0	.912
8	26836.0	11558.0	25073.0	.919
9	26679.0	12416.0	24923.0	.911
10	25786.0	13998.0	23591.0	.854
11	23500.0	16462.0	19802.0	.519

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .881
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .880
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .873
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .820
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .794
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .879

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 450.00 M3/H
VAZAO DE LIQUIDO: QL = 20.00 M3/H
POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 33218.00

*** CORDAS (X);
*** VALORES DAS CALIBRACOES:
TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
*** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
*** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20512.0	16008.0	17773.0	.422
2	23895.0	13058.0	20890.0	.778
3	25567.0	11902.0	22807.0	.851
4	26034.0	11212.0	23675.0	.887
5	26570.0	10743.0	24047.0	.890
6	26684.0	10632.0	24845.0	.922
7	27401.0	11022.0	24814.0	.891
8	26836.0	11558.0	24794.0	.906
9	26679.0	12416.0	24514.0	.889
10	25786.0	13998.0	23368.0	.839
11	23500.0	16462.0	20155.0	.569

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .859
CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .856
CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .850
CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .804
CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .777
CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .856

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 450.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 25.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: INFERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = .33218.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	20512.0	16008.0	17965.0	.465
2	23895.0	13058.0	20551.0	.751
3	25567.0	11902.0	22873.0	.854
4	26034.0	11212.0	23957.0	.901
5	26570.0	10743.0	24584.0	.914
6	26684.0	10632.0	25065.0	.932
7	27401.0	11022.0	25234.0	.910
8	26836.0	11558.0	24996.0	.916
9	26679.0	12416.0	24461.0	.887
10	25786.0	13998.0	23425.0	.843
11	23500.0	16462.0	20254.0	.582

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .866
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .867
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .860
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .814
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .785
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .865

A N E X O 2

DADOS EXPERIMENTAIS - SECAO SUPERIOR

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 5.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 5.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 47094.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	29407.0	18970.0	20432.0	.169
2	33453.0	16468.0	19190.0	.216
3	35226.0	14680.0	19113.0	.301
4	35953.0	14202.0	19097.0	.319
5	36874.0	13568.0	18918.0	.332
6	37013.0	13453.0	18754.0	.328
7	36679.0	13869.0	18889.0	.318
8	35036.0	14214.0	19011.0	.322
9	34664.0	14815.0	19047.0	.296
10	36848.0	16669.0	19179.0	.177
11	30897.0	19703.0	20200.0	.055

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .286
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .289
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .268
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .258
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .252
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .287

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 5.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 10.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 47094.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	29407.0	18970.0	20219.0	.145
2	33453.0	16468.0	19203.0	.217
3	35226.0	14680.0	19108.0	.301
4	35953.0	14202.0	18959.0	.311
5	36874.0	13568.0	18863.0	.330
6	37013.0	13453.0	18739.0	.327
7	36679.0	13869.0	18849.0	.315
8	35036.0	14214.0	18890.0	.315
9	34664.0	14815.0	18985.0	.292
10	36848.0	16669.0	19221.0	.180
11	30897.0	19703.0	20243.0	.060

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .283
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .286
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .265
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .254
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .248
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .284

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 5.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 15.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 47094.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	29407.0	18970.0	19632.0	.078
2	33453.0	16468.0	18458.0	.161
3	35226.0	14680.0	17193.0	.181
4	35953.0	14202.0	16895.0	.187
5	36874.0	13568.0	16923.0	.221
6	37013.0	13453.0	17065.0	.235
7	36679.0	13869.0	16917.0	.204
8	35036.0	14214.0	16837.0	.188
9	34664.0	14815.0	17108.0	.169
10	36848.0	16669.0	18902.0	.158
11	30897.0	19703.0	20284.0	.065

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .187
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .185
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .173
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .168
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .164
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .186

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 5.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 20.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 47094.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	29407.0	18970.0	19248.0	.033
2	33453.0	16468.0	17127.0	.055
3	35226.0	14680.0	16250.0	.116
4	35953.0	14202.0	16207.0	.142
5	36874.0	13568.0	16201.0	.177
6	37013.0	13453.0	16134.0	.180
7	36679.0	13869.0	16213.0	.161
8	35036.0	14214.0	16119.0	.139
9	34664.0	14815.0	16241.0	.108
10	36848.0	16669.0	17198.0	.039
11	30897.0	19703.0	19921.0	.024

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .124
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .127
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .113
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .107
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .105
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .126

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 5.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 25.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 47094.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	29407.0	18970.0	19223.0	.030
2	33453.0	16468.0	17092.0	.052
3	35226.0	14680.0	16213.0	.113
4	35953.0	14202.0	16193.0	.141
5	36874.0	13568.0	15971.0	.163
6	37013.0	13453.0	15899.0	.165
7	36679.0	13869.0	15890.0	.140
8	35036.0	14214.0	15921.0	.126
9	34664.0	14815.0	16178.0	.104
10	36848.0	16669.0	17281.0	.045
11	30897.0	19703.0	19932.0	.026

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .117
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .119
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .106
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .101
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .099
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .117

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 5.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =173917.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	125193.0	89568.0	95548.0	.193
2	138327.0	75801.0	96856.0	.407
3	142904.0	68044.0	97073.0	.479
4	145409.0	62792.0	97663.0	.526
5	146450.0	61195.0	98358.0	.544
6	147473.0	60354.0	98122.0	.544
7	147248.0	61464.0	99362.0	.550
8	145610.0	64835.0	97370.0	.503
9	144090.0	69770.0	96833.0	.452
10	138581.0	78919.0	96123.0	.350
11	119090.0	92963.0	95434.0	.106

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .476
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .474
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .457
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .423
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .415
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .474

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 10.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =173917.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	125193.0	89568.0	94647.0	.165
2	138327.0	75801.0	95245.0	.380
3	142904.0	68044.0	95055.0	.451
4	145409.0	62792.0	96034.0	.506
5	146450.0	61195.0	95408.0	.509
6	147473.0	60354.0	95882.0	.518
7	147248.0	61464.0	95750.0	.507
8	145610.0	64835.0	95050.0	.473
9	144090.0	69770.0	94359.0	.416
10	138581.0	78919.0	95180.0	.333
11	119090.0	92963.0	95328.0	.101

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .449
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .443
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .428
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .396
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .389
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .445

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 15.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =173917.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	125193.0	89568.0	94042.0	.146
2	138327.0	75801.0	93521.0	.349
3	142904.0	68044.0	93569.0	.429
4	145409.0	62792.0	93107.0	.469
5	146450.0	61195.0	93429.0	.485
6	147473.0	60354.0	93792.0	.493
7	147248.0	61464.0	93781.0	.484
8	145610.0	64835.0	93691.0	.455
9	144090.0	69770.0	93276.0	.400
10	138581.0	78919.0	94181.0	.314
11	119090.0	92963.0	94834.0	.080

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .424
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .420
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .404
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .373
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .367
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .421

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 20.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =173917.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	125193.0	89568.0	93125.0	.116
2	138327.0	75801.0	91197.0	.307
3	142904.0	68044.0	91283.0	.396
4	145409.0	62792.0	90713.0	.438
5	146450.0	61195.0	90870.0	.453
6	147473.0	60354.0	91426.0	.465
7	147248.0	61464.0	91633.0	.457
8	145610.0	64835.0	91206.0	.422
9	144090.0	69770.0	92221.0	.385
10	138581.0	78919.0	92047.0	.273
11	119090.0	92963.0	94885.0	.083

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .393
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .392
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .374
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .345
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .340
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .392

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 15.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 25.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =173917.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	125193.0	89568.0	93067.0	.114
2	138327.0	75801.0	90174.0	.289
3	142904.0	68044.0	89161.0	.364
4	145409.0	62792.0	89562.0	.423
5	146450.0	61195.0	89033.0	.430
6	147473.0	60354.0	90125.0	.449
7	147248.0	61464.0	90030.0	.437
8	145610.0	64835.0	89935.0	.404
9	144090.0	69770.0	89717.0	.347
10	138581.0	78919.0	91537.0	.263
11	119090.0	92963.0	94228.0	.055

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .374
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .369
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .353
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .325
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .320
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .371

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 150.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 5.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =173917.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	125193.0	89568.0	108986.0	.586
2	138327.0	75801.0	121296.0	.782
3	142904.0	68044.0	129720.0	.870
4	145409.0	62792.0	132550.0	.890
5	146450.0	61195.0	135378.0	.910
6	147473.0	60354.0	136543.0	.914
7	147248.0	61464.0	135471.0	.905
8	145610.0	64835.0	133979.0	.897
9	144090.0	69770.0	128892.0	.846
10	138581.0	78919.0	122925.0	.787
11	119090.0	92963.0	106141.0	.535

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .854
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .861
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .849
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .811
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .780
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .856

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 150.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 10.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =173917.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	125193.0	89568.0	105651.0	.493
2	138327.0	75801.0	120045.0	.764
3	142904.0	68044.0	127675.0	.848
4	145409.0	62792.0	130889.0	.875
5	146450.0	61195.0	133660.0	.895
6	147473.0	60354.0	134329.0	.896
7	147248.0	61464.0	133062.0	.884
8	145610.0	64835.0	130804.0	.867
9	144090.0	69770.0	126762.0	.823
10	138581.0	78919.0	118866.0	.727
11	119090.0	92963.0	102498.0	.394

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .828
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .830
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .820
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .770
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .746
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .827

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 150.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 15.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =173917.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	125193.0	89568.0	103969.0	.445
2	138327.0	75801.0	116765.0	.718
3	142904.0	68044.0	124208.0	.811
4	145409.0	62792.0	127909.0	.847
5	146450.0	61195.0	130712.0	.870
6	147473.0	60354.0	131344.0	.870
7	147248.0	61464.0	130888.0	.865
8	145610.0	64835.0	127912.0	.840
9	144090.0	69770.0	124005.0	.793
10	138581.0	78919.0	117212.0	.703
11	119090.0	92963.0	102237.0	.384

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .800
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .801
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .790
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .741
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .718
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .799

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 150.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 20.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =173917.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	125193.0	89568.0	103059.0	.419
2	138327.0	75801.0	115294.0	.697
3	142904.0	68044.0	121752.0	.784
4	145409.0	62792.0	125792.0	.827
5	146450.0	61195.0	128825.0	.853
6	147473.0	60354.0	129721.0	.856
7	147248.0	61464.0	128158.0	.841
8	145610.0	64835.0	126119.0	.822
9	144090.0	69770.0	121313.0	.763
10	138581.0	78919.0	114032.0	.654
11	119090.0	92963.0	101241.0	.344

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .777
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .777
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .765
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .715
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .694
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .775

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 150.00 M3/H
VAZAO DE LIQUIDO: QL = 25.00 M3/H
POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =170370.00

*** CORDAS (X);
*** VALORES DAS CALIBRACOES:
TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
*** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
*** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	123754.0	88781.0	101087.0	.391
2	135617.0	74700.0	111861.0	.677
3	140703.0	67225.0	119219.0	.776
4	143881.0	62814.0	123284.0	.814
5	144781.0	60647.0	125552.0	.836
6	146057.0	59964.0	126223.0	.836
7	145530.0	60877.0	125463.0	.830
8	144899.0	63639.0	122511.0	.796
9	142455.0	69249.0	118236.0	.742
10	137171.0	77398.0	110639.0	.624
11	121008.0	91939.0	100077.0	.309

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .757
CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .758
CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .744
CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .694
CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .675
CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .756

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 300.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 5.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =170370.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	123754.0	88781.0	106832.0	.557
2	135617.0	74700.0	124902.0	.862
3	140703.0	67225.0	131775.0	.911
4	143881.0	62814.0	135447.0	.927
5	144781.0	60647.0	137076.0	.937
6	146057.0	59964.0	137940.0	.936
7	145530.0	60877.0	137698.0	.937
8	144899.0	63639.0	135122.0	.915
9	142455.0	69249.0	132724.0	.902
10	137171.0	77398.0	124068.0	.825
11	121008.0	91939.0	104614.0	.470

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .889
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .891
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .881
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .834
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .806
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .888

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 300.00 M3/H
VAZAO DE LIQUIDO: QL = 10.00 M3/H
POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =170370.00

*** CORDAS (X);
*** VALORES DAS CALIBRACOES:
TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
*** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
*** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	123754.0	88781.0	105233.0	.512
2	135617.0	74700.0	120334.0	.800
3	140703.0	67225.0	128221.0	.874
4	143881.0	62814.0	132583.0	.901
5	144781.0	60647.0	134766.0	.918
6	146057.0	59964.0	135264.0	.914
7	145530.0	60877.0	135116.0	.915
8	144899.0	63639.0	132579.0	.892
9	142455.0	69249.0	128061.0	.852
10	137171.0	77398.0	119566.0	.760
11	121008.0	91939.0	102804.0	.407

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .854
CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .856
CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .845
CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .795
CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .770
CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .853

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 300.00 M3/H
VAZAO DE LIQUIDO: QL = 15.00 M3/H
POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =170370.00

*** CORDAS (X);
*** VALORES DAS CALIBRACOES:
TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
*** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
*** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	123754.0	88781.0	103261.0	.455
2	135617.0	74700.0	118300.0	.771
3	140703.0	67225.0	127235.0	.864
4	143881.0	62814.0	130317.0	.881
5	144781.0	60647.0	132059.0	.894
6	146057.0	59964.0	132371.0	.889
7	145530.0	60877.0	131237.0	.881
8	144899.0	63639.0	127836.0	.848
9	142455.0	69249.0	121260.0	.777
10	137171.0	77398.0	112328.0	.651
11	121008.0	91939.0	100703.0	.331

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .814
CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .815
CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .804
CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .749
CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .728
CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .813

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 300.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 20.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 170370.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	123754.0	88781.0	103021.0	.448
2	135617.0	74700.0	115999.0	.738
3	140703.0	67225.0	124742.0	.837
4	143881.0	62814.0	128693.0	.865
5	144781.0	60647.0	130856.0	.884
6	146057.0	59964.0	130976.0	.878
7	145530.0	60877.0	130111.0	.871
8	144899.0	63639.0	127163.0	.841
9	142455.0	69249.0	121310.0	.777
10	137171.0	77398.0	111015.0	.630
11	121008.0	91939.0	101677.0	.366

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .800
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .804
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .791
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .740
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .717
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .801

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 300.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 25.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) = 170370.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	123754.0	88781.0	102513.0	.433
2	135617.0	74700.0	113956.0	.708
3	140703.0	67225.0	122458.0	.812
4	143881.0	62814.0	127083.0	.850
5	144781.0	60647.0	129128.0	.869
6	146057.0	59964.0	130243.0	.871
7	145530.0	60877.0	129671.0	.868
8	144899.0	63639.0	126820.0	.838
9	142455.0	69249.0	121896.0	.784
10	137171.0	77398.0	112113.0	.648
11	121008.0	91939.0	102282.0	.388

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .793
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .797
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .783
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .733
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .711
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .793

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 450.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 5.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =170370.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	123754.0	68781.0	108780.0	.612
2	135617.0	74700.0	125322.0	.868
3	140703.0	67225.0	132586.0	.920
4	143881.0	62814.0	136389.0	.935
5	144781.0	60647.0	137911.0	.944
6	146057.0	59964.0	138639.0	.941
7	145530.0	60877.0	138367.0	.942
8	144899.0	63639.0	137059.0	.932
9	142455.0	69249.0	133624.0	.911
10	137171.0	77398.0	126210.0	.854
11	121008.0	91939.0	104826.0	.477

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .900
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .902
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .893
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .849
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .819
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .899

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 450.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 10.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =169449.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	122631.0	88067.0	104872.0	.527
2	133872.0	74029.0	121589.0	.838
3	139382.0	66276.0	129861.0	.905
4	142469.0	62389.0	133605.0	.922
5	144154.0	60043.0	135164.0	.926
6	144580.0	59491.0	135289.0	.925
7	144877.0	60595.0	134906.0	.918
8	143720.0	63526.0	132437.0	.900
9	141480.0	68553.0	127870.0	.860
10	136581.0	77399.0	118325.0	.747
11	119332.0	91382.0	101756.0	.403

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .867
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .868
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .859
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .807
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .781
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .866

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 450.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 15.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =156768.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	114398.0	82949.0	94242.0	.397
2	125684.0	68589.0	107709.0	.745
3	130469.0	61156.0	115529.0	.839
4	133530.0	56843.0	118677.0	.862
5	135065.0	54845.0	121083.0	.879
6	135989.0	54376.0	121889.0	.881
7	136535.0	55048.0	121179.0	.869
8	135107.0	57739.0	119641.0	.857
9	133526.0	62188.0	115226.0	.807
10	128900.0	70628.0	106209.0	.678
11	112288.0	82505.0	92619.0	.375

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .810
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .810
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .798
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .744
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .723
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .808

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 450.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 20.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =156768.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	114398.0	82949.0	93735.0	.380
2	125684.0	68589.0	103754.0	.683
3	130469.0	61156.0	112668.0	.806
4	133530.0	56843.0	116567.0	.841
5	135065.0	54845.0	118467.0	.855
6	135989.0	54376.0	119458.0	.859
7	136535.0	55048.0	119048.0	.849
8	135107.0	57739.0	118265.0	.843
9	133526.0	62188.0	114693.0	.801
10	128900.0	70628.0	106799.0	.687
11	112288.0	82505.0	93725.0	.414

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .789
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .791
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .778
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .729
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .707
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .789

UNICAMP/MESTRADO EM ENGENHARIA DE PETROLEO
 PROGRAMA ALFA: CALCULA A FRACAO DE VAZIO
 LINEAR (ALFA1) E SUPERFICIAL (ALFA2)
 AUTOR: JOSAPHAT DIAS DA MATA

DADOS DE ENTRADA:

VAZAO DE GAS: QG = 450.00 M3/H
 VAZAO DE LIQUIDO: QL = 25.00 M3/H
 POSICAO DA SECAO TRANSVERSAL: SUPERIOR
 CALIBRACAO FORA DO TUBO (IF) =156768.00

*** CORDAS (X);
 *** VALORES DAS CALIBRACOES:
 TUBO VAZIO [IG(X)] E TUBO CHEIO [IL(X)];
 *** CONTAGENS DA MISTURA BIFASICA [I(X)];
 *** FRACAO DE VAZIO LINEAR (ALFA1).

CORDA	IG	IL	I	ALFA1
1	114398.0	82949.0	94720.0	.413
2	125684.0	68589.0	103130.0	.673
3	130469.0	61156.0	112522.0	.805
4	133530.0	56843.0	116225.0	.837
5	135065.0	54845.0	118743.0	.857
6	135989.0	54376.0	119511.0	.859
7	136535.0	55048.0	119590.0	.854
8	135107.0	57739.0	118644.0	.847
9	133526.0	62188.0	115200.0	.807
10	128900.0	70628.0	107295.0	.695
11	112288.0	82505.0	94660.0	.446

FRACAO DE VAZIO SUPERFICIAL MEDIA (ALFA2):

CALCULADA POR INTEGRACAO (11 PONTOS) = .791
 CALCULADA POR INTEGRACAO (13 PONTOS) = .796
 CALCULADA POR SOMATORIO DE CONTAGENS = .781
 CALCULADA POR MEDIA ARITMETICA = .736
 CALCULADA POR PONDERACAO DE DISTANCIA = .712
 CALCULADA POR PONDERACAO DE AREA = .792