

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por JUAN CARLOS
SEVERICHE MALDONADO e aprovada
pela comissão julgadora em 14 / 03 / 19 99


ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Estudo Experimental da Separação do Fluxo Bifásico em uma Ramificação Lateral Tipo "T"

**Autor: Juan Carlos Severiche Maldonado
Orientador: Sérgio Nascimento Bordalo**

03/99

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

Estudo Experimental da Separação do Fluxo Bifásico em uma Ramificação Lateral Tipo "T"

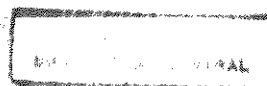
**Autor: Juan Carlos Severiche Maldonado
Orientador: Sérgio Nascimento Bordalo**

Curso: Engenharia de Petróleo

Tese de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Petróleo

Campinas, 1999
S.P. - Brasil

9912545



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	Se. 83e
V.	Es.
	37961
	229/99
	D X
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	18/06/99
N.º CPD	

CM-00124347-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Se83e

Severiche Maldonado, Juan Carlos

Estudo experimental da separação do fluxo bifásico em uma ramificação lateral tipo "T". / Juan Carlos Severiche Maldonado.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Sérgio Nascimento Bordalo
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Separação (Tecnologia). 2. Juntas (Engenharia).
3. Escoamento bifásico. 4. Teoria da bifurcação. I.
Bordalo, Sérgio Nascimento. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
Título.

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

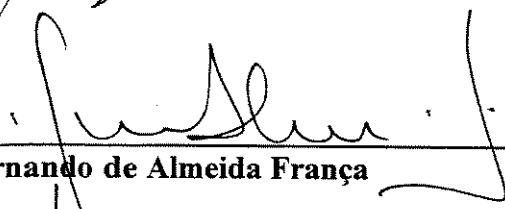
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Estudo Experimental da Separação do Fluxo Bifásico em uma Ramificação Lateral Tipo "T"

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Sérgio Nascimento Bordalo
UNICAMP



Prof. Dr. Fernando de Almeida França
UNICAMP



Prof. Dr. Luís Fernando Alzuguir Azevedo
PUC. RIO DE JANEIRO

Campinas, 19 de marzo de 1999

Dedicatória:

Dedico este trabalho àqueles que sempre me apoiaram, meus pais, Mario e Juanita, tia Clara e meus irmãos Cristhian Marcelo, Ervin e Silvia.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais expresso meus agradecimentos:

A minha família Mario, Juanita, Clara, Cristhian Marcelo, Ervin e Silvia pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, professor Sérgio Nascimento Bordalo, pelo apoio e orientação para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meus amigos Marcelo Morandin e Keyla Sarges pela ajuda e amizade que me brindaram durante os dois anos de permanência na UNICAMP.

Ao CNPq pela bolsa de estudo fornecida.

A todos os professores e colegas da turma 97 do Departamento de Engenharia de Petróleo, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

A meu amigo Pompeo, pela sua prestatividade e paciência. Também pela oportunidade de conhecer uma brilhante pessoa.

Resumo

SEVERICHE, Maldonado Juan Carlos, *Estudo Experimental da Separação do Fluxo Bifásico em uma Ramificação Lateral Tipo "T"*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 95 p. Dissertação (Mestrado)

O objetivo deste estudo é pesquisar experimentalmente a separação de um fluxo bifásico sob condições de padrão de fluxo estratificado ondulado e anular em uma junta "tê" horizontal de configuração regular e irregular. Os dados da separação foram adquiridos para uma extensa série de condições de fluxo estratificado ondulado e anular; os dados experimentais incluem medições de razões de separação gás-líquido e distribuição da pressão ao longo dos tres ramos. Analisando os dados se observa uma forte dependencia do fenômeno da separação sob o padrão de fluxo existente a montante da junta "tê". Comparando os dados de separação entre uma tê de configuração regular e irregular sob as mesmas condições de fluxo de entrada observa-se que, para condições de fluxo estratificado, ocorre uma substancial redução da fração de líquido que se desvia para o ramo lateral. Para fluxo anular, no entanto, a redução do líquido desviado para o ramo lateral é muito pequena. Grande queda de pressão ocorre no ramo lateral no "tê" de configuração irregular. Isto é mais pronunciado para fluxo anular. O modelo geométrico estudado (Shoham et al 1987) para prever o fenômeno da separação em um "tê" regular e em um "tê" irregular comparado com os dados experimentais não apresenta uma boa concordância com os resultados experimentais.

Palavras Chave

- Separação, tê, fluxo bifásico, ramificação

Abstract

SEVERICHE, Maldonado Juan Carlos, *Experimental Study of Separation of Two-Phase Flow Through a Lateral "T" Split Branch*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 95 p. Dissertação (Mestrado)

The objective of this study is to investigate experimentally the splitting of two-phase flow under conditions of stratified wavy and annular patterns in horizontal tee-junctions of regular and irregular configurations. Data were acquired for a wide range of stratified wavy and annular flow conditions; experimental data include measurements of the gas and liquid splitting ratios and the pressure distribution along the three arms of the junction. The results show a strong dependence of the splitting phenomenon on the flow pattern existing upstream of the tee. For the stratified wavy flow condition Comparison of the irregular tee and the regular tee splitting under the same inlet flow condition reveals a substantial reduction in the fraction of the liquid intake that flows to the lateral branch. For the annular flow, however, that reduction is very small. Higher pressure drop occurs in the irregular branch arm. This is more pronounced for annular flow. The geometrical model studied (Shoam et al 1987) for prediction of the splitting phenomenon through regular and irregular tees does not show a reasonable agreement with the data.

Key Words

-Splitting, tee, two-phase flow, separation, branching

Índice

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Nomenclatura.....	xiii
Capítulo 1-INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Motivação para o trabalho.....	3
1.3 Objetivo do trabalho.....	3
1.4 Tipos de “tês”.....	4
Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 Divisão do fluxo monofásico.....	8
2.2 Separação de um escoamento bifásico.....	11
Capítulo 3 - MODELO ESTUDADO.....	17
3.1 Modelo geométrico de Shoham.....	17
Capítulo 4 - APARATO EXPERIMENTAL.....	25
4.1 Descrição geral.....	25
4.2 Tubulação horizontal para o desenvolvimento do fluxo.....	25
4.3 Circulação de líquido.....	27
4.4 Circulação de gás.....	29
4.5 Seção da junta tê e medição do gradiente de pressão.....	29

4.6 Procedimento para fazer as medições das frações do líquido e gás desviado para o ramo lateral.....	30
Capítulo 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÃO COM O MODELO TEÓRICO.....	33
5.1 Resultados experimentais.....	33
5.2 Resultados experimentais para padrão de fluxo estratificado ondulado com uma junta tipo tê de configuração regular.....	35
5.3 Resultados experimentais para padrão de fluxo anular com uma junta tipo tê de configuração regular.....	37
5.4 Resultados experimentais para padrão de fluxo estratificado ondulado com uma junta tipo tê de configuração irregular.....	40
5.5 Resultados experimentais para padrão de fluxo anular com uma junta tipo tê de configuração irregular.....	42
5.6 Comparação dos resultados experimentais com o modelo geométrico.....	46
5.6.1 Resultados do modelo geométrico em padrão de fluxo estratificado para uma junta tê de configuração regular e irregular.....	46
5.6.2 Resultados do modelo geométrico em padrão de fluxo anular para uma junta tê de configuração regular e irregular.....	51
5.7 Distribuição da pressão através da junta tipo tê.....	51
Capítulo 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	59
Referencias Bibliográficas.....	62
Apêndice A.....	66
Apêndice B.....	72
Apêndice C.....	75
Apêndice D.....	85

Lista de Figuras

1.1 Vista superior de uma ramificação tipo tê.....	2
1.2 Tê horizontal regular com um ramo lateral vertical ascendente (A), horizontal (B) e vertical descendente (C).....	5
1.3 Tê vertical regular ascendente (A), irregular ascendente (B), regular descendente (C) e irregular descendente (D).....	6
1.4 Tê de impacto regular vertical descendente (A), horizontal (B) e vertical ascendente (C).....	6
1.5 Y verticais ascendentes (A), (B) e tê de aresta (C).....	7
2.1 Volume de controle para fluxo monofásico em uma ramificação tipo tê.....	9
2.2 Representação do fluxo curvado no ramo lateral.....	10
2.3 Corrente de fluxo secundário de um fluido monofásico em uma tubulação curva..	10
3.1 Descrição esquemática do campo de fluxo em uma junta tê horizontal.....	18
3.2 Raio da curvatura para uma ramificação tipo “tê” de configuração regular e irregular	20
4.1 Fluxograma simplificado do aparato experimental.....	26
4.2 Tubulação horizontal para o desenvolvimento do fluxo	28
4.3 Misturador ar-água	28
4.4 Separadores ar-água	28
4.5 Ramificação tipo tê.....	30
4.9 Seção de teste de gradientes de pressão na junta tê	32
5.1 Pontos dos testes experimentais para fluxo estratificado e anular.....	34
5.2 Razões de separação em uma junta tipo tê de configuração regular e em padrão de fluxo estratificado	36

5.3 Razões de separação em uma junta tipo “tê” de configuração regular e em padrão de fluxo anular	39
5.4 Razões de separação em uma junta tipo “tê” de configuração irregular e em padrão de fluxo estratificado	41
5.5 Razões de separação em uma junta tipo “tê” de configuração irregular e em padrão de fluxo estratificado (baixas vazões de líquido)	43
5.6 Razões de separação em uma junta tipo “tê” de configuração irregular e em padrão de fluxo estratificado (altas vazões de líquido)	44
5.7 Razões de separação em uma junta tipo “tê” de configuração irregular e em padrão de fluxo anular	45
5.8 Razões de separação em uma junta tipo “tê” de configuração irregular e em padrão de fluxo anular (baixa vazão de líquido).....	47
5.9 Razões de separação em uma junta tipo “tê” de configuração irregular e em padrão de fluxo anular (alta vazão de líquido)	48
5.10 Resultados do modelo geométrico para padrão de fluxo estratificado e junta tê de configuração regular	49
5.11 Resultados do modelo geométrico para padrão de fluxo estratificado e junta tê de configuração irregular	50
5.12 Resultados do modelo geométrico para padrão de fluxo anular e junta tê de configuração regular	53
5.13 Resultados do modelo geométrico para padrão de fluxo anular e junta tê de configuração irregular	54
5.14 Distribuição da pressão para padrão de fluxo anular	55
5.15 Distribuição da pressão para padrão de fluxo anular	56
5.16 Distribuição da pressão para padrão de fluxo estratificado	57
5.17 Distribuição da pressão para padrão de fluxo estratificado	58
A.1 Modelo geométrico para fluxo estratificado	67
A.2 Modelo geométrico para fluxo anular	70
C.1 Aferição da placa de 1/2 in	80
C.2 Aferição da placa de 3/4 in	81
C.3 Calibração da placa de medição da vazão de ar 1/2 in.....	82
C.4 Calibração da placa de medição da vazão de ar 3/4 in	83

C.5 Curva de calibração do transmissor de pressão	84
---	----

Lista de Tabelas

D-1 Testes para padrão de fluxo estratificado junta tê de configuração regular.....	85
D-2 Testes para padrão de fluxo estratificado junta tê de configuração irregular ...	86
D-3 Testes para padrão de fluxo anular junta tê de configuração regular	87
D-4 Testes para padrão de fluxo anular junta tê de configuração irregular	88
D-5 Distribuição da pressão (estratificado) junta tê de configuração regular teste # 4..	89
D-6 Distribuição da pressão(estratificado)junta tê de configuração regular teste # 5 ..	89
D-7 Distribuição da pressão (estratificado) junta tê de configuração irregular teste # 4.....	90
D-8 Distribuição da pressão (estratificado) junta tê de configuração irregular teste # 5.....	90
D-9 Distribuição da pressão (anular) junta tê de configuração regular teste # 2.....	91
D-10 Distribuição da pressão (anular) junta tê de configuração irregular teste # 2.....	91
D-11 Distribuição da pressão (anular) junta tê de configuração regular teste # 3	92
D-12 Distribuição da pressão (anular) junta tê de configuração irregular teste # 3.....	92
D-13 Distribuição da pressão (estratificado) junta tê de configuração regular teste # 15	93
D-14 Distribuição da pressão (estratificado) junta tê de configuração irregular teste # 15.....	93
D-15 Distribuição da pressão (anular) junta tê de configuração regular teste # 22	94
D-16 Distribuição da pressão (anular) junta tê de configuração irregular teste # 22..	94
D-17 Teste da separação do fluxo (regular).....	95
D-18 Teste da separação do fluxo (irregular).....	95

Nomenclatura

Letras latinas

a	distancia desde a linha de fluxo A-B até a parede da tubulação, m
d	diâmetro do ramo lateral para configuração irregular, m
f	fator de fricção
f_c	força centrífuga por unidade de massa, N/kg
h	altura do líquido em fluxo estratificado, m
k	coeficiente de <i>damping</i> (equações 3.9 e 3.10)
m	expoente (equação B.5)
n	expoente (equação B.5)
r_o	raio de curvatura, m
t	tempo, s
C	coeficiente (equação B.5)
D	diâmetro da tubulação, m
F	fração
G	fluxo mássico, kg/s.m ²
K	coeficiente de perda de carga (equações 2.1 e 2.2)
P	pressão, N/m ²
S	perímetro, m
T	temperatura, °C
V	velocidade, m/s
X	título

Letras gregas

δ	espessura do filme de líquido no escoamento anular, m
ν	viscosidade cinemática, m ² /s
ρ	densidade, kg/m ³
τ	tensão de cisalhamento, N/m ²

Subscritos

G	gás
I	interface
L	líquido
P	principal
R	ramo
S	superficial

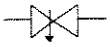
Abreviaturas

mmca	milímetro de coluna de água
mca	metro de coluna de água
scf	pé cubico padrão

Fluxograma de instrumentação



válvula globo



válvula agulha



placa de orificio

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Contexto

A separação do fluxo bifásico em uma junta "tê" é um fenômeno muito complexo que se encontra freqüentemente na indústria petroleira, e, também, nas usinas de energia nuclear e nas indústrias de produtos químicos. Na Figura 1.1 se observa uma vista em corte de uma junta "tê".

Quando o fluxo bifásico gás-líquido escoar na junta "tê" as duas fases tendem a se separar em diferentes proporções através dos ramos lateral e principal. Sob alguma condição, a fase líquida escoar preferencialmente dentro do ramo lateral, e não no ramo principal. Sob diferentes condições, se observa o oposto, ou seja, todo o líquido escoar dentro do ramo principal, e o ramo lateral recebe somente gás úmido.

Por exemplo, quando ocorre condensação em sistemas de tubulações para a distribuição de gás, o líquido condensado pode escoar através da rede da tubulação em um só sentido, e chega somente numa estação da rede da tubulação. Todas as outras estações receberão só gás úmido.

Outro exemplo de separação de fluxo ocorre quando se injeta vapor em poços de petróleo para aumentar a recuperação deste. O vapor é transportado desde uma caldeira central para vários poços através de um sistema de distribuição, mas, devido às

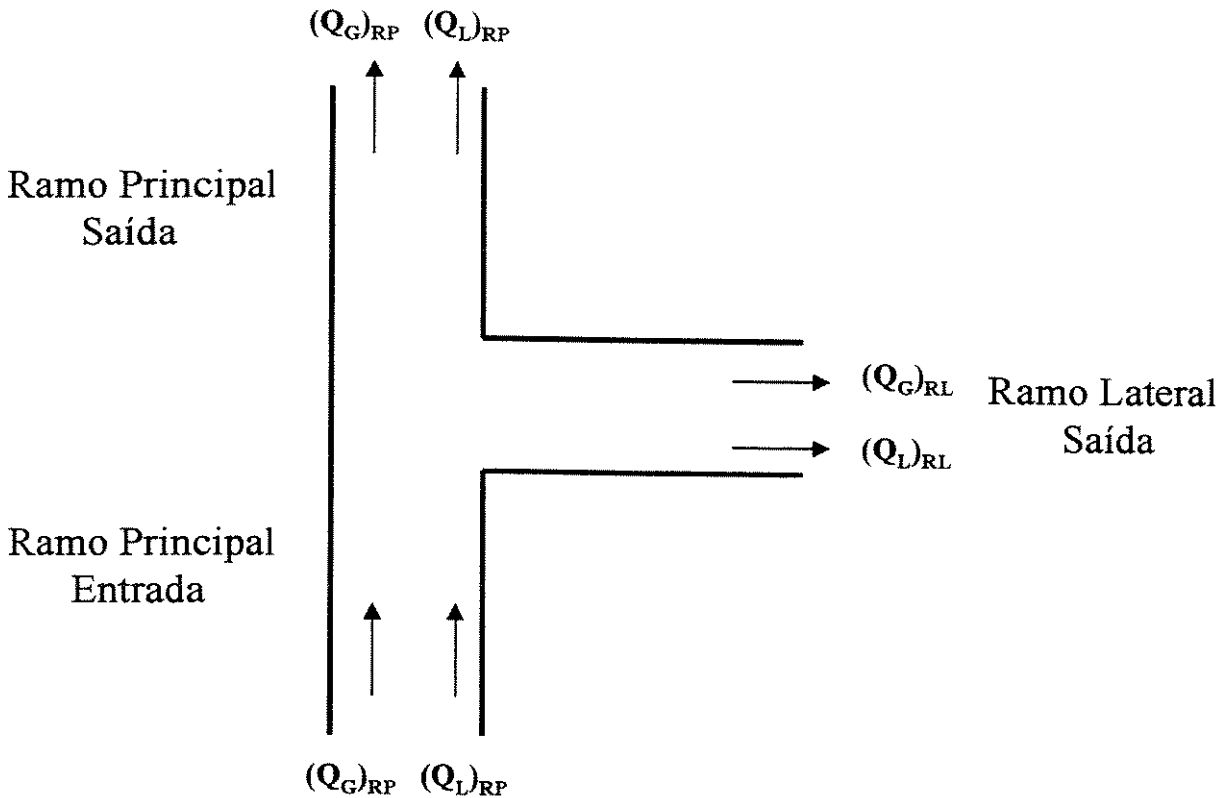


Figura 1.1 VISTA EM CORTE DE UMA RAMIFICAÇÃO TIPO "T"

prioridades do trajeto que tem a fase líquida, alguns poços receberão alto título de vapor, enquanto outros somente água quente.

Este fenômeno de distribuição desigual, impõe um sério problema que deve resolver-se antes que as duas fases sejam distribuídas na rede de tubulações, para que possam ser projetadas apropriadamente e com mais segurança. Em muitas situações é desejável dividir o gás e o líquido uniformemente através da rede. Em outros casos, é necessário prever o grau da distribuição desigual que resulta da mistura das duas fases sob condições parcialmente controláveis. Portanto, é de vital importância prever exatamente o mecanismo da divisão do fluxo bifásico para todas as condições de fluxo.

1.2 Motivação para o trabalho

A divisão de um fluxo multifásico escoando através de uma bifurcação, em uma de suas diversas geometrias e posições, geralmente muda a razão gás-líquido nas seções de saída, isto porque as fases tendem a se dividir de forma desigual.

Os "tês" são largamente utilizados em redes de tubulações encontradas em campos produtores de óleo terrestres e marinhos, principalmente com a utilização dos Manifolds Submarinos de Produção, nos sistemas de injeção de vapor, nas plantas de processo e separação das plataformas e nas refinarias. Estes "tês", quando adequadamente utilizados, poderão contribuir de forma significativa no processo de separação das fases vapor (gás natural) e líquida (óleo) dos fluidos produzidos, minimizando a necessidade de separadores nas plataformas de produção.

Sabe-se que a manutenção, operação e eficiência de muitos componentes e sistemas utilizados na engenharia de petróleo dependem da maneira pela qual as fases estão distribuídas nos ramos de uma bifurcação.

Assim, devido ao alto potencial divisor de fases dos "tês", este mecanismo necessita ser bem entendido, possibilitando-se projetar, operar e manter todos os processos que envolvam o fluxo multifásico de uma forma mais segura, eficiente e econômica. A literatura é relativamente escassa ao apresentar dados experimentais de fluxo estratificado e anular. Este trabalho busca preencher em parte esta lacuna, mostrando resultados experimentais de um escoamento horizontal, obtidos a partir de uma série de experimentos utilizando sistema água - ar.

1.3 Objetivo do trabalho

Os principais objetivos deste trabalho foram:

- * projetar e construir um aparato experimental instrumentado adequadamente para estudo da separação das fases em uma junta "tê" em padrão de fluxo estratificado e anular.
- * Obter dados experimentais para misturas água - ar escoando em padrão de

fluxo estratificado e anular

- * Aplicar as condições dos testes experimentais ao modelo geométrico de Shoham et al (1987) para comparação e verificação de suas limitações
- * Apresentar conclusões obtidas a partir dos resultados experimentais

Esta pesquisa experimental foi feita em dois tipos de configuração, a primeira, chamada de regular, onde as seções de entrada e saída da junta "tê" tem as mesmas dimensões, e a segunda configuração, chamada de irregular, onde as seções de entrada e saída do ramo principal tem as mesmas dimensões, mas o ramo lateral tem uma seção muito menor. Nas duas configurações, os ramos principal e lateral se encontram num mesmo plano horizontal.

1.4 Tipos de Tês

A indústria de petróleo, assim como qualquer outra atividade que lide com movimentação de fluidos, utiliza diversas geometrias de "tês" para combinar ou dividir fluxos.

Denominamos de "tês" toda geometria tubular, de seção reta qualquer, possuindo uma entrada e duas saídas, onde os eixos dos ramos principal e lateral sejam perpendiculares. Estes são classificados em horizontais e verticais, dependendo da posição do ramo principal; e em regulares ou irregulares, caso tenham ou não as mesmas dimensões para as seções de saída e entrada.

Se o "tê" é horizontal, pode-se ter diversas posições do ramo lateral, desde vertical ascendente até vertical descendente. A figura 1.2 mostra "tês" horizontais regulares para 3 posições diferentes do ramo lateral. Para o "tê" vertical pode-se, também, classificá-lo conforme o sentido do fluxo no ramo principal em ascendente ou descendente. Na figura 1.3 tem-se a representação do "tê" vertical ascendente, regular e irregular. Outra possibilidade é o "tê" de impacto cujo eixo de entrada é perpendicular ao eixo dos ramos de saída, sendo este também classificado em horizontal e vertical; e regular e irregular, conforme a representação da figura 1.4.

Existem, ainda, exercendo a função de elementos divisores, as ramificações em forma de Y e de aresta. No "Y", os eixos do ramo principal e do ramo lateral não são perpendiculares. Eles são, também, classificados em verticais e horizontais, e regulares e irregulares. Na ramificação de aresta, um dos ramos não é coplanar com os outros dois. Eles se classificam de forma semelhante aos outros tipos. A figura 1.5 esquematiza um "Y" vertical para duas posições do ramo lateral e uma ramificação de aresta.

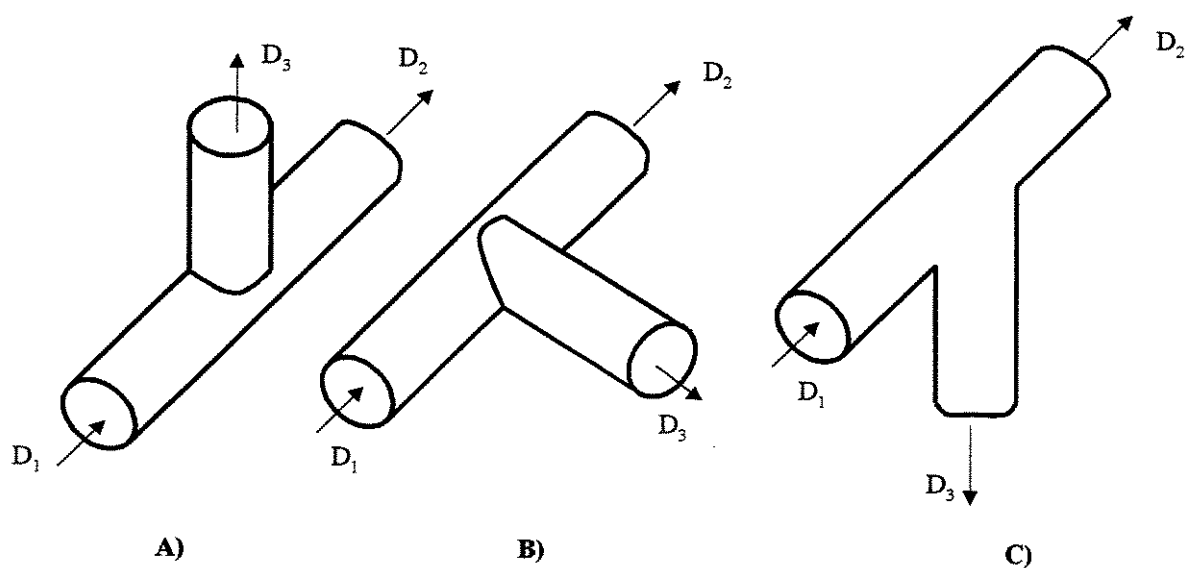


Figura 1.2 TÊ HORIZONTAL REGULAR COM RAMO LATERAL VERTICAL ASCENDENTE (A), HORIZONTAL (B) E VERTICAL DESCENDENTE (C)

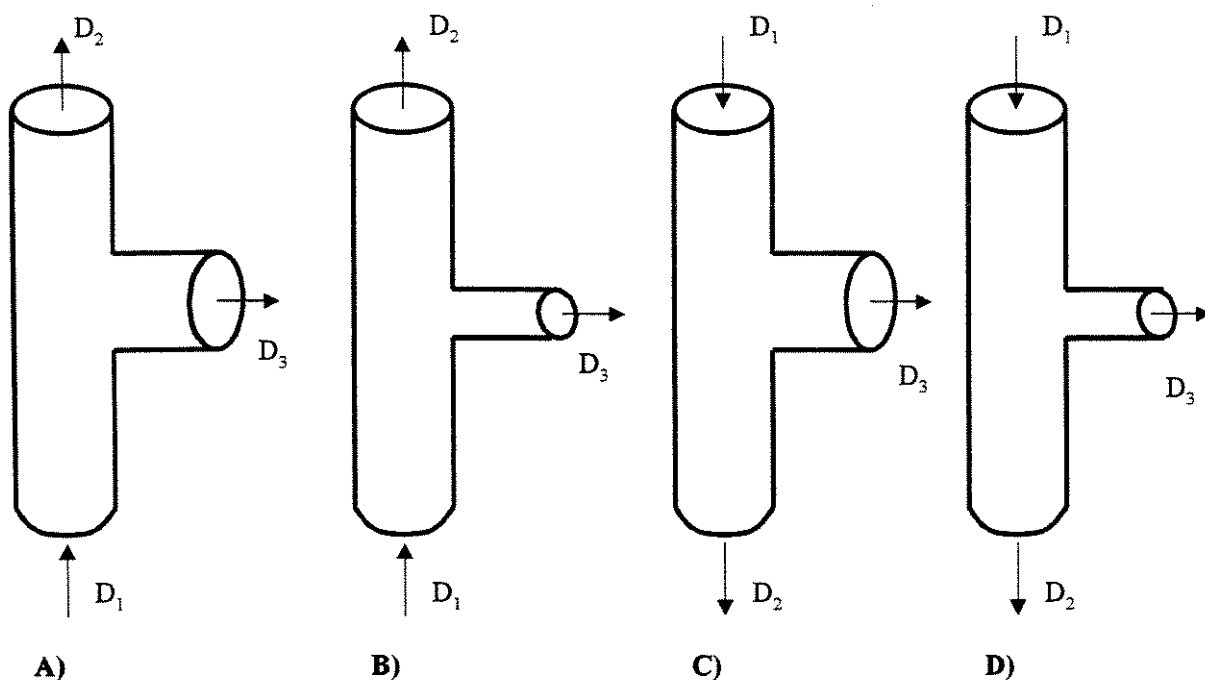


Figura 1.3 TÊ VERTICAL REGULAR ASCENDENTE (A), IRREGULAR ASCENDENTE (B), REGULAR DESCENDENTE (C) E IRREGULAR DESCENDENTE (D)

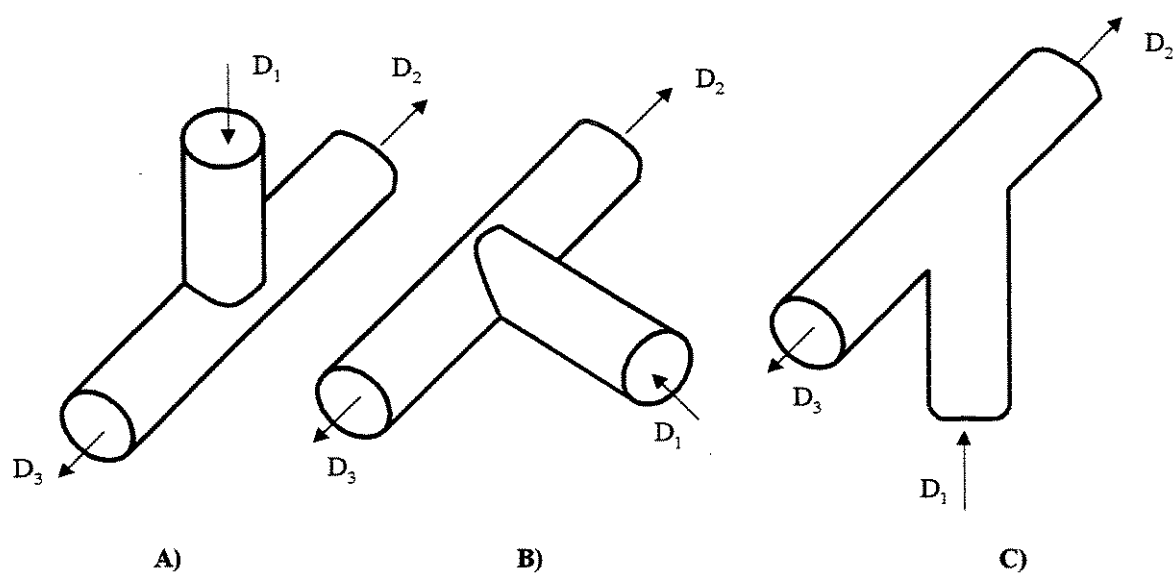


Figura 1.4 TÊ DE IMPACTO REGULAR VERTICAL DESCENDENTE (A) HORIZONTAL (B) E VERTICAL ASCENDENTE (C)

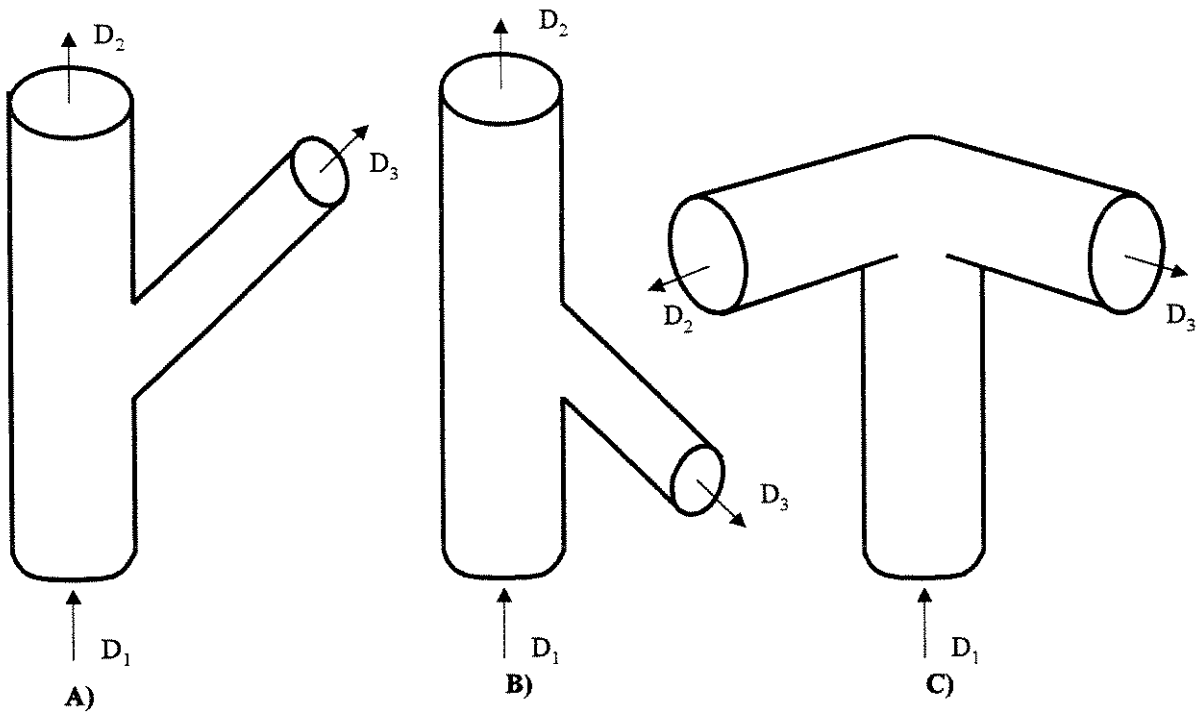


Figura 1.5 Y VERTICAIS ASCENDENTES (A), (B) E TÊ DE ARESTA (C)

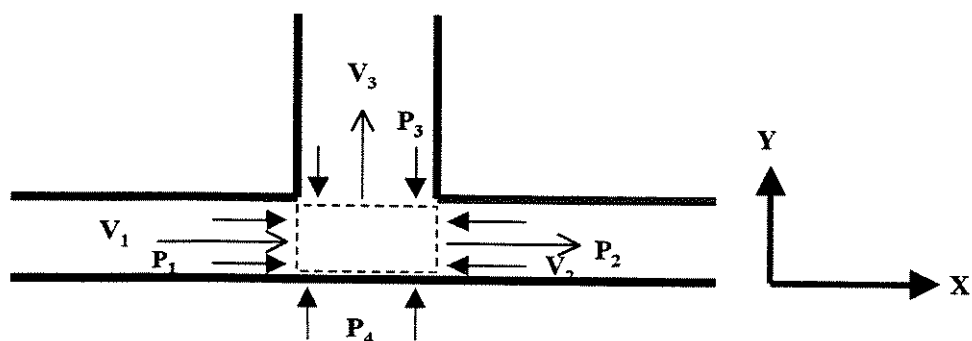


Figura 2.1 VOLUME DE CONTROLE PARA FLUXO MONOFÁSICO EM UMA RAMIFICAÇÃO TIPO "T"

$$P_2 - P_1 = K_{RP} \rho (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.1)$$

e

$$P_4 - P_3 = K_{RL} \rho \left(\frac{V_3^2}{2} \right) \quad (2.2)$$

Onde K representa o respectivo coeficiente de perda. Como V_2 é sempre menor que V_1 (devido a diminuição da vazão desde a divisão em dois fluxos), então na Equação 2.1 se pode observar uma "recuperação" de pressão no ramo principal ($P_2 > P_1$). A partir da Equação 2.2 se pode observar que existe uma "perda" de pressão no ramo lateral ($P_3 < P_4$) porque V_3 será sempre maior que zero.

Para resolver o problema da divisão do fluxo monofásico, os coeficientes de perda K_{RP} (ramo principal) e K_{RL} (ramo lateral) podem ser determinados empiricamente. Os testes para determinar os coeficientes de perda idealmente devem ser realizados sob as mesmas condições de fluxo, sistema de fluido, geometria e orientação da junta "tê". Os erros deste método para o caso de fluxo monofásico estão dentro de uma aceitável precisão.

CAPÍTULO 2

Revisão bibliográfica

Apesar da existência comum da divisão do fluxo bifásico gás-líquido em diferentes indústrias, pouco trabalho foi feito sobre o assunto antes de 1980. Desde então, modelos empíricos foram substituídos por modelos baseados em conceitos físicos, os quais são dependentes dos padrões de fluxo de entrada. Devido à natureza complexa do problema, foram realizadas contínuas melhoras, mas algumas áreas do problema ainda não foram esclarecidas.

Esta revisão bibliográfica começará com um esboço geral do problema da divisão do fluxo de uma só fase, para posteriormente entrar no problema da divisão do fluxo bifásico.

2.1 Divisão do fluxo monofásico

A divisão de um fluxo monofásico em redes de tubulações e sistemas de manifolds foram estudadas por Hoopes et al, Mc Nowen e Acrivos et al segundo Steinar (1979).

Eles estudaram a relação da distribuição de pressão em uma junta "tê" com a distribuição da vazão fazendo um balanço de quantidade de movimento sobre um volume de controle, Figura 2.1, para os ramos lateral e principal resultando em:

Outros pesquisadores, entre eles Dean, Mc Conalogue, Srivastava, e Greenspan segundo Steinar (1979), estudaram o movimento estável de um fluido incompressível através de uma tubulação curva sob fluxo laminar. Estes estudos podem ser aplicados para fluxo em uma junta "tê" que se desvia para o ramo lateral, visto como um simples conduto curvo, Figura 2.2. Estes estudos demonstraram que, quando um fluido em fluxo laminar entra num tubo curvado, um padrão de fluxo helicoidal duplo se desenvolve devido às diferenças no momentum entre o movimento rápido e lento do fluido na tubulação, Figura 2.3. Como resultado, a linha de máxima velocidade é transferida para a superfície da curva e a transferência do momentum acontece devido ao movimento da massa do fluido que circula desde uma região de baixa velocidade perto da parede interna da tubulação para uma região de máxima velocidade também perto da parede interna da tubulação. Este fluxo secundário, como foi dito, é o resultado das diferenças das velocidade do fluido que acontece na parte superior e inferior da tubulação, e é provocado por duas forças dominantes: a força centrífuga e a força da pressão, que

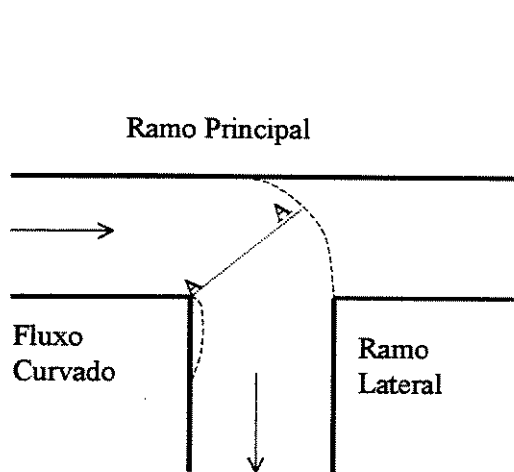


Figura.2.2 REPRESENTAÇÃO DO FLUXO CURVADO NO RAMO LATERAL

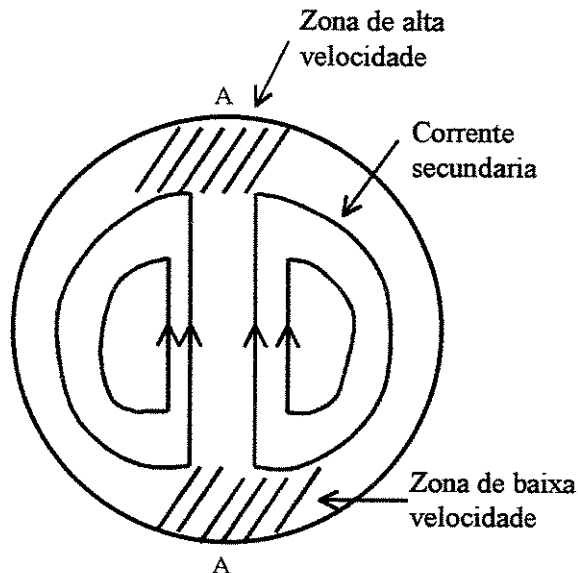


Figura 2.3 CORRENTE DE FLUXO SECUNDÁRIO DE UM FLUIDO MONOFÁSICO EM UMA TUBULAÇÃO CURVA (corte AA da figura 2.2)

ajudam a acelerar as velocidades do fluxo secundário. Ao contrário, a força viscosa que atua especialmente perto da parede interna da tubulação, restringe qualquer aumento das velocidades do fluxo secundário. Estes efeitos podem explicar a queda da vazão para uma dada queda de pressão, ou um incremento na queda da pressão para uma vazão fixa num tubo curvo, comparado com um tubo reto.

2.2 Separação de um escoamento bifásico

As primeiras tentativas para desenvolver modelos matemáticos que pudessem prever a separação de um escoamento bifásico em uma junta "tê" foram estudos feitos em escoamentos monofásicos. A continuação dos estudos em escoamento bifásico foi feita primeiramente por Tsuyana & Taya segundo Steinar (1979) que pesquisaram a separação do escoamento de uma mistura ar - água. Eles mediram a distribuição das fases e a sua variação no ramo lateral.

Fouda (1972) verificou que escoamento homogêneo tende a se separar mais uniformemente em uma junta "tê", e assim sugeriu trabalhar sob condições de fluxo anular, empregando um dispositivo à montante da junta "tê". Este dispositivo poderá homogeneizar o fluxo e provocar uma distribuição uniforme do escoamento bifásico no conduto lateral sempre que seja necessário.

Em um trabalho posterior, Fouda e Rhodes (1974), tentaram modelar o fenômeno da separação aplicando leis de conservação para as fases que estão escoando tal como foi feito para escoamento monofásico, Equação 2.1 e 2.2. Eles empregaram uma simples aproximação para mistura homogênea na qual são consideradas as densidades da mistura e a velocidade da mistura. Infelizmente, o modelo não prediz as razões de separação nos ramos da junta "tê".

Na engenharia de petróleo, este fenômeno foi inicialmente abordado por Oranje (1973), que teve como motivação para seu trabalho de pesquisa, o acúmulo desigual de condensados entre os vários trechos de uma rede de distribuição de gás natural na Holanda. Constatou-se, neste trabalho de campo, que a razão entre as vazões de óleo e gás eram desiguais em diferentes trechos. Oranje reproduziu em laboratório o

fenômeno, observando a separação de um escoamento bifásico estratificado em uma junta "tê" transparente e horizontal. Estas observações revelaram que quando um escoamento estratificado se aproxima da junta "tê", a fase líquida tende a subir na parede da tubulação e desviar-se para dentro do ramo lateral. Baseado em seus estudos, Oranje sugeriu que o mecanismo que controla a seleção do trajeto a seguir para o líquido é governado pelas seguintes fatores:

1. Criação de uma zona de baixa pressão no ramo lateral que origina uma força sobre a fase líquida para que o escoamento possa ir para dentro do ramo lateral.
2. Forças inerciais que tendem a manter a fase líquida escoando diretamente dentro do ramo principal.
3. Padrão de fluxo a montante da junta "tê".
4. A geometria do ramo lateral (regular ou irregular; horizontal ou inclinado).

Oranje não propôs um modelo matemático ou uma correlação, mas concluiu que quando se tem fluxo estratificado, cuja fração de líquido é baixa, na junta "tê" poderá ocorrer um de dois casos: uma total separação das fases ou, pelo contrário, não aconteceria nenhuma separação.

Em 1975, Bergman et al segundo Steinar (1979) desenvolveram um generalizado "mapa de separação do escoamento" depois de analisar os dados de Oranje. O mapa prediz a porcentagem de líquido que escoar dentro do ramo lateral como uma função da porcentagem de gás desviado dentro do ramo lateral e o número de Reynolds da fase gás a montante da junta "tê". Infelizmente, discrepâncias substanciais foram observadas quando o mapa foi testado novamente com dados de campo reais.

Uma correlação empírica, para a predição da vazão do gás e líquido no ramo lateral como uma função das condições de entrada à montante da junta "tê" para padrão anular foi desenvolvido por Henry (1981). Ele sugeriu que o escoamento do líquido para dentro do ramo lateral é fortemente dependente dos padrões de fluxo à montante da junta "tê", mas fracamente dependente da queda da pressão através da junta "tê". Sua observação básica experimental foi uma relação linear no ramo lateral entre as vazões

mássicas do gás e líquido. Esta relação foi usada como base para sua correlação que parece ajustar-se muito bem com seus dados experimentais.

Saba & Lahey (1984) publicaram dados experimentais para misturas ar - água escoando através de uma junta "tê" regular e horizontal. Os dados incluem razão de separação do fluxo e queda da pressão através da junta tê. A queda da pressão na junta "tê" foram obtidas extrapolando os perfis de pressão ao longo do "tê". Os pesquisadores usaram estes dados para desenvolver um modelo empírico, o qual permite calcular a distribuição das fases nos ramos lateral e principal. O modelo contém cinco equações de conservação: equação de continuidade da mistura, equação de continuidade do vapor, equação de continuidade do líquido, equação de quantidade de movimento linear da mistura para o ramo principal; e equação de quantidade de movimento linear do vapor para o ramo lateral. A solução simultânea destas cinco equações fornece a distribuição das fases gás e líquido na junta "tê". Infelizmente, embora pesquisadores tenham observado anteriormente uma forte dependência do padrão de fluxo a montante da junta "tê" no fenômeno da separação, este modelo é independente do padrão de fluxo. Também, Saba & Lahey (1984) concluíram que a fase gás preferencialmente escoava para dentro do ramo lateral, esta conclusão pode ser verdadeira para padrões de fluxo pistonado e fluxo bolhas, mas o contrário pode ser verdadeiro para fluxo anular e fluxo estratificado ondulado que tem baixa fração de líquido, na qual a fase líquida preferencialmente escoava para dentro do ramo lateral. De fato, traçando as condições de fluxo de Saba & Lahey sob um mapa de padrões de fluxo de Taitel & Duckler nos revela que muitos dos dados foram tomados sob fluxo pistonado.

Azzopardi & Whalley (1982) examinaram os efeitos de padrões de fluxo na separação do escoamento bifásico em uma junta "tê". Eles encontraram que o comportamento do fluxo é muito sensível ao padrão de fluxo existente na entrada da junta "tê". Sob fluxo anular ou agitante, a fase líquida escoava preferencialmente para o ramo lateral. Sob fluxo de bolhas, no entanto, o contrário é observado, ou seja, a fase do gás entra preferencialmente no ramo lateral. Os pesquisadores demonstraram que, sob condições de fluxo anular, o líquido que escoava dentro do ramo lateral veio da película que está escoando na tubulação do ramo principal. Além disso, a proporção de líquido da película que entra no ramo lateral, é uma função da vazão de gás desviada dentro do ramo lateral. Baseado nestas observações, Azzopardi e Whalley sugeriram um simples

modelo geométrico para comprovar seus dados experimentais. Eles concluíram que a predição do comportamento de um escoamento bifásico em uma junta "tê" é um problema complexo.

Seeger et al (1986) e Seeger e Reimann (1986) ampliaram o trabalho apresentado por Saba e Lahey (1984). A Parte I do trabalho de Seeger apresentou resultados sobre separação das fases, enquanto a Parte II do trabalho de Seeger trata da correspondente distribuição da pressão. Os experimentos foram feitos em uma junta "tê" regular de 2 in (2.54 cm), ou seja tendo o mesmo diâmetro os três ramos da junta "tê". A ampliação deste estudo foi feita para diferentes orientações do ramo lateral (horizontal, vertical ascendente, vertical descendente), diferentes sistemas de fluidos (ar-água e vapor - água), para uma ampla faixa de valores do fluxo mássico de entrada ($100 < G_{RP} < 1400 \text{ lbm/s.ft}^2$), e diferentes razões de fluxo mássico ($0 < G_{RL}/G_{RP} < 1$). Os testes foram conduzidos sob padrões de fluxo de golfadas ou pistonado, anular e bolhas.

Os resultados da separação das fases publicadas na Parte I confirmam que o fenômeno da separação depende significativamente da orientação do ramo lateral, da existência de padrões de fluxo à montante da junta "tê" e razões de fluxo mássico entre o ramo lateral e a entrada do ramo principal. Para o ramo lateral com orientação vertical e fluxo ascendente, o grau de separação das fases encontradas foi muito grande e essencialmente só escoo gás dentro do ramo lateral. Isto ocorre porque tanto a gravidade quanto concorrem para a separação. Sob condições de fluxo com o ramo lateral horizontal, o gás escoo preferencialmente para o ramo lateral quando se tem altas razões de fluxo mássico G_{RL}/G_{RP} .

A máxima razão do título X_{RL}/X_{RP} é atingido para uma razão de fluxo mássico $G_{RL}/G_{RP} \cong 0.3$. Para uma orientação vertical descendente do ramo lateral, a separação é fortemente dependente da distribuição das fases na junta "tê". Para este caso, os efeitos das forças de inércia e da gravidade são opostos. Em geral, a fase que escoo predominantemente no ramo lateral é o gás para altos valores de G_{RL}/G_{RP} , e o líquido a baixos valores de G_{RL}/G_{RP} . Correlações empíricas foram propostas para as três orientações do ramo lateral. Finalmente, os pesquisadores sugeriram que futuros

trabalhos deveriam incluir o desenvolvimento de modelos mais sofisticados baseados sob princípios físicos para prever o fenômeno da separação.

O comportamento da distribuição de pressão na junta "tê" foi apresentado na Parte II do estudo para os três ângulos de inclinação do ramo lateral, isto é, horizontal, vertical ascendente, e vertical descendente. Baseados nos dados experimentais, os pesquisadores desenvolveram uma correlação para prever a queda da pressão entre a entrada do ramo principal e o ramo lateral e entre a entrada e saída do ramo principal chamada de pressão de recuperação que ocorre na junta "tê". O modelo prevê melhor os dados experimentais que os previamente publicados. Em geral, o ajuste é bom quando o ramo lateral tem orientação horizontal e vertical descendente, e não quando a configuração do ramo lateral é vertical ascendente.

Arirachakaran (1990), estudou a separação de um escoamento bifásico sob condições de fluxo pistonado, em uma junta "tê" de configuração regular, na qual o ramo lateral e o ramo principal se encontram num mesmo plano horizontal. Os dados de separação foram adquiridos para uma ampla faixa de condições de fluxo pistonado. Foi observado que o líquido nestas condições escoava preferencialmente dentro do ramo principal devido a grande força inercial associado com o fluxo pistonado. Um modelo com dois mecanismos de separação foi introduzido. Isto inclui um mecanismo de "rompimento da estrutura" para o corpo da golfada de líquido, e um "equilíbrio da película estratificada", conceito para o bolsão de gás na região da película. Um bom ajuste foi encontrado entre as previsões do modelo e os dados obtidos nos testes experimentais.

K.C. Hong (1995) realizou um trabalho experimental que lhe deu base para formular algumas conclusões a respeito dos fenômenos físicos que determinam a divisão desigual das fases. Hong analisou a variação do título do vapor em redes de distribuição de vapor. Sugeriu, então, que o fenômeno da separação é afetado por diferentes parâmetros de fluxo: velocidades do gás e líquido, viscosidade do líquido e geometria do ramo lateral. Um importante aspecto do estudo de Hong foi a sugestão que deu acerca dos mecanismos para o fenômeno da separação. Ele propôs que uma zona de baixa pressão é criada no ramo lateral por forças centrífugas do gás que escoava para dentro do ramo lateral. Esta zona de baixa pressão força o líquido a escoar para dentro

do ramo lateral. Oposta à força centrífuga está a força inercial do líquido, que tende a forçar o líquido para dentro do ramo principal, desviando-o do ramo lateral.

Apesar destas conclusões, Hong não desenvolveu um modelo matemático. Ao invés disso, Hong sugeriu um procedimento empírico geral para determinar a separação do escoamento em manifolds de distribuição. Esta solução deverá ser tratada com precaução, porque importantes variáveis são desprezadas, tal como o diâmetro da tubulação, pressão na linha, propriedades do fluido e padrão de fluxo.

CAPÍTULO 3

Modelo Estudado

3.1 Modelo geométrico de Shoham

Shoham et al (1987), propuseram que a escolha de trajeto do líquido em uma junta "tê" é controlado pela ação de duas forças que atuam sobre a fase do líquido, estas forças são a força inercial e a força centrípeta.

A força inercial tende a fazer com que o líquido continue dentro do ramo principal e não se desvie para o ramo lateral. O gás, no entanto, tem pequena massa inercial, e pode desviar-se para o ramo lateral mais facilmente. O fluxo de gás que se desvia para o ramo lateral origina uma força centrípeta sobre o líquido. Esta força tende a desviar o fluxo de líquido da sua trajetória reta no ramo principal, para dentro do ramo lateral. As magnitudes relativas das forças inercial e centrípeta determinam o trajeto preferencial do líquido e, por conseguinte, também determinam as razões de separação da fase líquida tanto para o ramo principal como para o lateral.

A Figura 3.1 exibe uma descrição esquemática do fluxo bifásico em uma junta tê de acordo com a idealização do modelo geométrico; também se observa uma seção transversal D-D do escoamento na entrada da junta tê tanto para padrões de fluxo estratificado como para fluxo anular. A análise começa com um modelo geométrico que faz a seguinte suposição: a linha de fluxo A-C que se observa em um plano vertical,

divide a seção transversal da área do tubo em duas áreas, A_{RL} e A_{RP} . O fluxo que se encontra dentro da seção transversal da área A_{RL} entra no ramo lateral, entretanto, o fluxo que se encontra dentro da seção transversal A_{RP} continua dentro do ramo principal. As suposições anteriores nos levam a uma relação geométrica muito simples para calcular a fração de líquido que entra no ramo lateral

$$F_{LRL} = \frac{A_{LRL}}{(A_{LRL} + A_{LRP})} = \frac{A_{LRL}}{A_L} \quad (3.1)$$

como uma função da fração de gás que entra neste ramo.

$$F_{GRL} = \frac{A_{GRL}}{(A_{GRL} + A_{GRP})} = \frac{A_{GRL}}{A_G} \quad (3.2)$$

A derivação do modelo geométrico para padrões de fluxo estratificado e anular se encontra no Apêndice A. Como se observa, a separação baseada nas considerações geométricas dependem da altura adimensional do líquido h/D para o caso de fluxo estratificado, e da espessura adimensional da película de líquido ao redor da tubulação δ/D para o caso de fluxo anular.

Neste modelo a definição do trajeto da fase líquida é causada pela força centrípeta que atua sobre esta fase ao longo do trajeto da curva B-C. Dependendo das velocidades das fases, a força centrípeta pode forçar a película de líquido a escoar para dentro do ramo lateral, ou, ao contrário, o líquido escoará para dentro do ramo principal.

Na Figura 3.2 se observa a seção B-C da linha de fluxo A-C tanto para uma junta "tê" de configuração regular como para uma junta tê de configuração irregular. Se a seção B-C é um arco circular, então o raio r_c para uma junta "tê" de configuração regular, Figura 3.2 -A, vale:

$$r_o = \frac{a^2 + D^2}{2a} \quad (3.3)$$

onde “ a ” é a distância desde a parede da tubulação de lado do ramo lateral até a linha de fluxo A-B. O comprimento do arco é o seguinte:

$$L = r_o \cdot \text{Sen}^{-1} \left(\frac{D}{r_o} \right) \quad (3.4)$$

similarmente, para uma junta tê de configuração irregular

$$r_o = \frac{a^2 + d^2}{2a} \quad (3.5)$$

a Equação 3.5 é aplicada para os casos da Figura 3.2-B1 onde $a < d$, e para o caso da Figura 3.2-B2 onde $d < a < D$. O comprimento do arco para uma junta “tê” de configuração irregular é:

$$L = r_o \cdot \text{Sen}^{-1} \left(\frac{d}{r_o} \right) \quad \text{para } a < d \quad (3.6)$$

e

$$L = r_o \left[\pi - \text{Sen}^{-1} \left(\frac{d}{r_o} \right) \right] \quad \text{para } d < a < D \quad (3.7)$$

A força centrípeta que atua sobre a fase líquida (por unidade de massa) é

$$f_c = \frac{\rho_L V_L^2 - \rho_G V_G^2}{\rho_L r_o} \quad (3.8)$$

onde V_L e V_G são as velocidades médias tanto da fase líquida e da fase gás, respectivamente, que são assumidas como constantes ao longo da linha A-B-C. Os valores de V_L e V_G dependem das velocidades superficiais do líquido V_{SL} e do gás V_{SG} , como também dependem da altura do líquido h , para o fluxo estratificado, ou da espessura da película de líquido δ , para o fluxo anular. O método para calcular estes valores são fornecidos no Apêndice B.

Admite-se que o movimento de uma partícula na fase líquida na direção radial (dentro do ramo lateral ou dentro do ramo principal) é representado aproximadamente pela seguinte equação diferencial

$$\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} = f_c - k \frac{\partial r}{\partial t} \quad (3.9)$$

onde f_c é a força centrípeta por unidade de massa, Equação 3.8, que se assume como constante, e $k \frac{\partial r}{\partial t}$ é chamada de força *damping* por unidade de massa que se assume como proporcional a velocidade radial $\frac{\partial r}{\partial t}$.

O coeficiente *damping*, k , pode ser estimado considerando um escoamento laminar da película de líquido. Assim,

$$k = \frac{3\mu_L}{\rho\delta^2} \quad (3.10)$$

onde δ é a espessura da película de líquido. Em caso de fluxo estratificado, δ é aproximadamente a altura do líquido h . Note-se que o efeito *damping* é inversamente proporcional ao quadrado da espessura do filme. Logo, o efeito pode ser mais intenso para fluxo anular onde a película é usualmente muito fina e será menor para fluxo estratificado, onde a altura h do líquido é relativamente maior que a espessura δ .

A solução da Equação 3.9 do movimento da fase líquida na direção radial é

$$\Delta r = \frac{f_c}{k} \left[t - \frac{1}{k} (1 - e^{-kt}) \right] \quad (3.11)$$

na Equação 3.11, t representa o tempo de viagem de uma partícula de líquido desde o ponto B para C. Isto é igual ao comprimento do arco B-C dividido pela velocidade do líquido

$$t = \frac{L}{V_L} \quad (3.12)$$

ou

$$t = \frac{r_o \cdot \text{Sen}^{-1} \left(\frac{D}{r_o} \right)}{V_L} \quad (3.13)$$

como consequência deste movimento radial do líquido desde a linha de fluxo B-C, mais ou menos líquido, dependendo do sinal de Δr , poderá ser desviado para dentro do ramo lateral. O procedimento para calcular a variação do líquido desviado dentro do ramo lateral é a seguinte:

Se considerarmos uma fração de separação F_{GRL} , então a distância a a partir da linha de fluxo A-B, Figura 3.3, até a parede da tubulação pode ser calculada (se a é utilizada para determinar a fração de líquido que entra no ramo lateral, F_{LRL} , então o modelo geométrico é aplicado). Utilizando as Equações 3.3 a 3.13, o movimento radial da fase líquida, Δr , pode ser determinado. Devido ao movimento radial, o líquido escoar em relação a linha A-B-C. Este movimento traz como consequência uma nova distância a_L para a fase líquida que é diferente para o gás. Assim,

$$\alpha_L = a - \Delta r \quad (3.14)$$

a nova distância α_L é utilizada para calcular a fração de líquido existente na entrada do ramo lateral F_{LRL} . Se, por exemplo, o líquido escoar preferencialmente dentro do ramo lateral, então Δr é negativo, e por conseguinte α_L é maior do que a . Este procedimento permite a construção de razões de separação, plotando F_{LRL} como uma função de F_{GRL} . De qualquer modo, como foi mencionado anteriormente, é necessário conhecer os valores de h ou δ para calcular V_L e V_G , e aplicar a Equação 3.8. Portanto, a análise anterior deve ser precedido do cálculo da altura do líquido h para o caso de fluxo estratificado e a espessura da película de líquido δ para o caso de fluxo anular, conforme mostrado no Apêndice B.

CAPITULO 4

Aparato Experimental

4.1 Descrição geral

Será descrito o aparato experimental projetado para estudo da separação de um escoamento bifásico horizontal em uma junta "tê", com ênfase nos padrões de fluxo estratificado e anular. Um fluxograma simplificado do aparato experimental pode ser acompanhado pela Figura 4.1. Os equipamentos a serem descritos estão instalados no laboratório de estudos de fluxo multifásico (Multlab) dos Departamento de Energia e de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.

O aparato construído constitui-se de uma seção de testes formada por uma junta "tê" e tubulações horizontais todas em acrílico, separadores, equipamentos de circulação de ar e água, e instrumentação dedicada ao controle de vazão, pressão e medida de variáveis de interesse.

4.2 Tubulação horizontal para o desenvolvimento do fluxo

A tubulação horizontal constitui-se de duto horizontal em acrílico com um comprimento total de 10,80 m, com diâmetro externo de 50 mm e diâmetro interno de 44 mm; esta seção representa uma efetiva $L/D = 245$ a qual nos assegura um completo desenvolvimento do fluxo, como de fato foi verificado a posteriori.

O duto horizontal para o desenvolvimento do fluxo, Figura 4.2, é composto de segmentos de 1,20 m, unidos por juntas de PVC usinadas de forma a garantir a perfeita uniformidade do diâmetro interno ao longo do escoamento. A estanqueidade é garantida por anéis de vedação de material elastomérico. A entrada dos fluidos (água + ar) no duto horizontal é feita através de uma junta "Y" a 45 graus construída em PVC, a qual foi utilizada como misturador.

4.3 Circulação de líquido

A descrição será efetuada seguindo o sentido do fluxo. A circulação de líquido ocorre em circuito fechado, podendo ser acompanhada pela Figura 4.1. Água é armazenada em um tanque pulmão de fibra de vidro com capacidade para 3 m³, mantendo-se um volume constante de aproximadamente 1m³ durante a realização dos testes. Do tanque pulmão a água flui por tubulação de 50,8 mm (2 in) para uma bomba centrífuga KSB-Meganorm modelo 40-125, rotor de 133 mm, com vazão nominal de 45 m³/h e pressão de descarga máxima de 30 mca, acionada por motor WEG de 10 CV.

A descarga da bomba se dá através de uma tubulação de PVC de 50,8 mm, passando então o fluxo por um filtro de cartuchos Metpor, com malha de retenção de 5 µm, modelo ASF 10.33.F, de vazão nominal de 3 m³/h, onde eventuais impurezas sólidas são retidas. Após o filtro há um sistema de *by-pass* ao tanque pulmão, controlado por válvula globo de 38,1 mm (1,5 in) com a finalidade de estabilizar o escoamento de líquido.

Logo a seguir, a água flui para os rotâmetros onde é medida a vazão desejada, para depois misturar-se com ar na junta "Y", ver Figura 4.3. Os dois fluidos continuam juntos por tubulação horizontal (44 mm de diâmetro interno) de acrílico, ao chegar o escoamento bifásico na junta "tê", este se separa nos dois ramos (principal e lateral) para logo entrar nos separadores, Figura 4.4. A altura do líquido dentro dos separadores é medida para cada teste, e depois o separador é drenado por meio de uma válvula globo de 38,1 mm (1,5 in), que se encontra na parte inferior de cada separador; a água flui até o tanque pulmão através de tubulação de 50,8 mm (2 in), fechando o circuito do líquido.

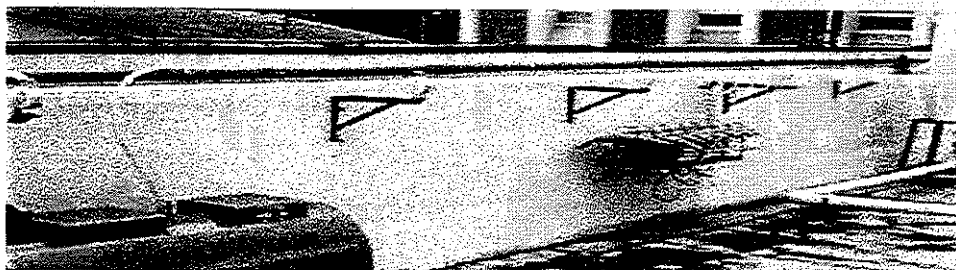


Figura 4.2 Tubulação horizontal para o desenvolvimento do fluxo

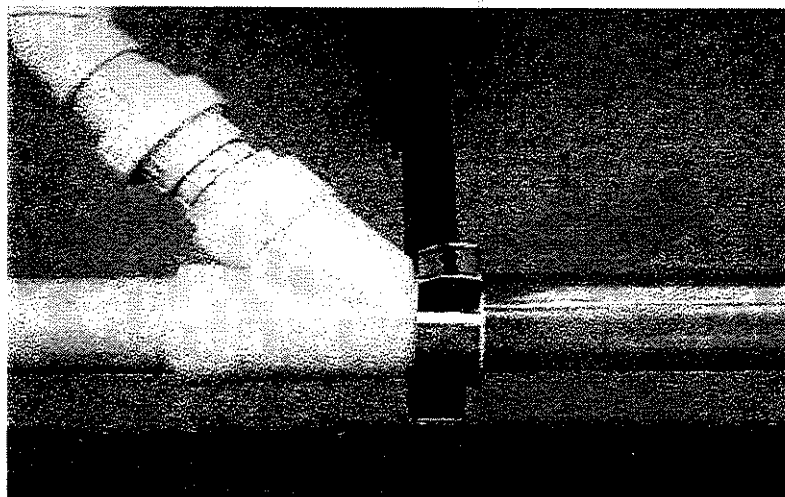


Figura 4.3 Misturador ar-água

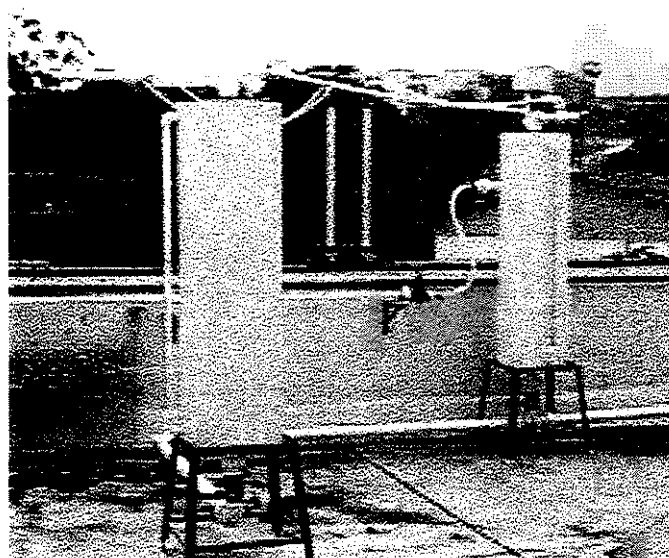


Figura 4.4 Separadores ar-água

4.4 Circulação de gás

O circuito de circulação de gás pode ser acompanhado pela Figura 4.1. A descrição será efetuada seguindo o sentido do fluxo.

Ar atmosférico é comprimido por um compressor Wayne Wetzel, modelo W960H3, acionado por motor EBERLE modelo S132M4 de 15 CV, e é mantido em um reservatório pulmão com capacidade de $0,365 \text{ m}^3$ ver . Do reservatório pulmão o ar flui através de mangueira flexível de 19,0 mm (0,75 in) até outro reservatório pulmão com capacidade de $1,5 \text{ m}^3$, e pressão de 8 kgf/cm^2 (784 kPa), a jusante deste reservatório tem-se uma válvula reguladora de pressão que permite que o ar entre na rede da tubulação com uma pressão desejada de descarga até um limite de 4 kgf/cm^2 (392 kPa). Logo a seguir o ar flui através de uma tubulação de 50,8 mm (2 in) para depois passar para uma tubulação de 25,4 mm (1 in). À montante do misturador se encontra uma placa de orifício para possibilitar a medição da vazão de ar.

Depois de escoar através do misturador, o ar juntamente com a água, flui por uma tubulação horizontal até chegar na junta "tê" onde ocorre a separação do escoamento bifásico. O fluido (ar + água) entra nos separadores, e a vazão de ar é medido por meio de uma placa de orifício, que se encontra na parte superior do separador, antes do ar ser liberado para a atmosfera, Figura 4.4. O procedimento utilizado e as curvas de calibração das placas de orifício encontram-se no apêndice C.

4.5 Seção da junta "tê" e medição do gradiente de pressão

A junta "tê" na qual ocorre o fenômeno da separação, foi usinada em um bloco de acrílico retangular tal como se observa na Figura 4.5, desta maneira torna-se possível a visualização. A medição do gradiente de pressão na junta "tê" foi feita através de 15 tomadas de pressão distribuídas de acordo com a Figura 4.6. Utilizou-se um *manifold* com uma série de válvulas esferas de 19,0 mm NPT (0,75 in) para possibilitar a medição dos gradientes de pressão entre um ponto e outro; as leituras dos gradientes de

pressão foram feitas utilizando-se um transmissor de relutância variável tipo Validyne®. As curvas de calibração se encontram no Apêndice C.

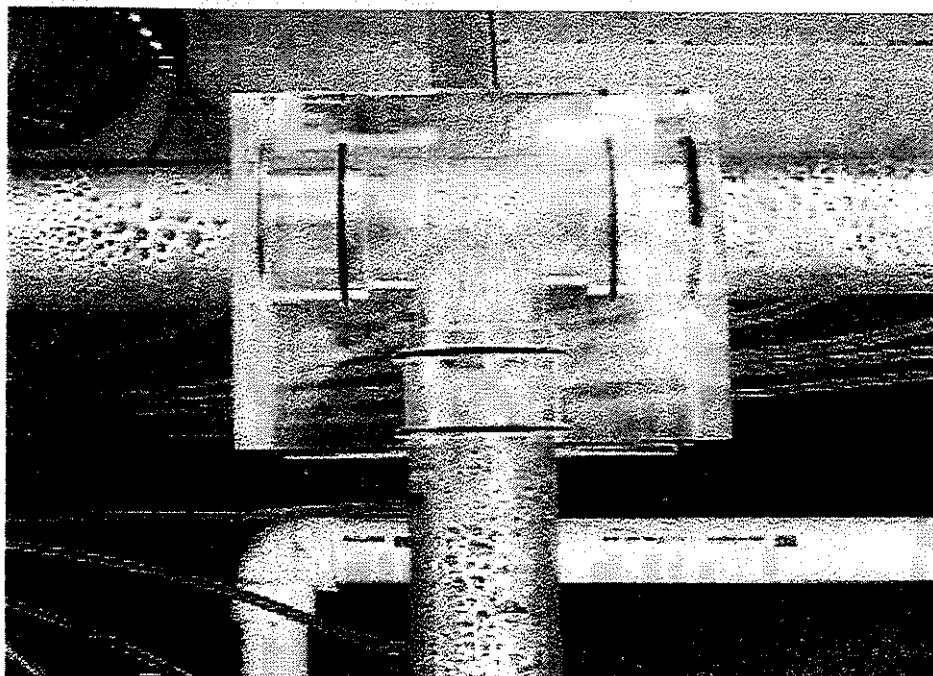


Figura 4.5 Ramificação tipo "tê"

4.6 Procedimento para fazer as medições das frações do líquido e gás desviado para o ramo lateral.

O procedimento para a medição das frações de líquido e gás foi feito, seguindo os seguintes passos:

1. A válvula do ramo principal deve estar em posição aberta
2. A válvula do ramo lateral deve estar fechada, inicialmente
3. As velocidades superficiais do líquido e gás à montante do misturador são fixadas;
4. A válvula do ramo lateral é aberta para se medir a fração de líquido e gás desviado para o ramo lateral;

5. Verifica-se se as velocidades superficiais mudaram à montante do "te", então as velocidades são reajustadas;
6. Mede-se a fração de líquido e gás desviado para o ramo lateral, a abre-se um pouco mais a válvula do ramo lateral;
7. Procede-se ao passo 5 repetindo-se as operações 6 e 7 até que a válvula do ramo lateral fique totalmente aberta.

CAPITULO 5

Resultados Experimentais e comparação com o modelo teórico

5.1 Resultados experimentais

Como foi dito nos capítulos anteriores, o objetivo deste estudo é adquirir dados experimentais utilizando um sistema de fluidos ar-água empregando as duas configurações de junta "tê". A matriz de dados experimentais tomados neste estudo experimental é feita sobre um mapa de padrões de fluxo de Taitel-Dukler, Figura 5.1. Os padrões de fluxo estratificado ondulado e anular foram desenvolvidos em condições operacionais afastadas de qualquer região de transição.

Para o propósito do estudo da separação, na qual as velocidades de ambas fases são parâmetros muito importantes, se fez uma série de combinações das velocidades superficiais do líquido e gás, além de que para cada combinação se fez diversos testes de separação para obter as diferentes frações de gás e líquido que entram no ramo lateral. Os resultados dos testes se encontram no Apêndice D.

Os dados experimentais incluem, além das condições de fluxo de entrada na junta "tê", razões de separação do gás e líquido no ramo lateral, e distribuição da pressão ao longo dos três ramos da junta "tê". Os resultados experimentais e do modelo geométrico, serão apresentados separadamente para cada padrão de fluxo.

MAPA DE PADRÃO DE FLUXO DE TAITEL & DUKLER

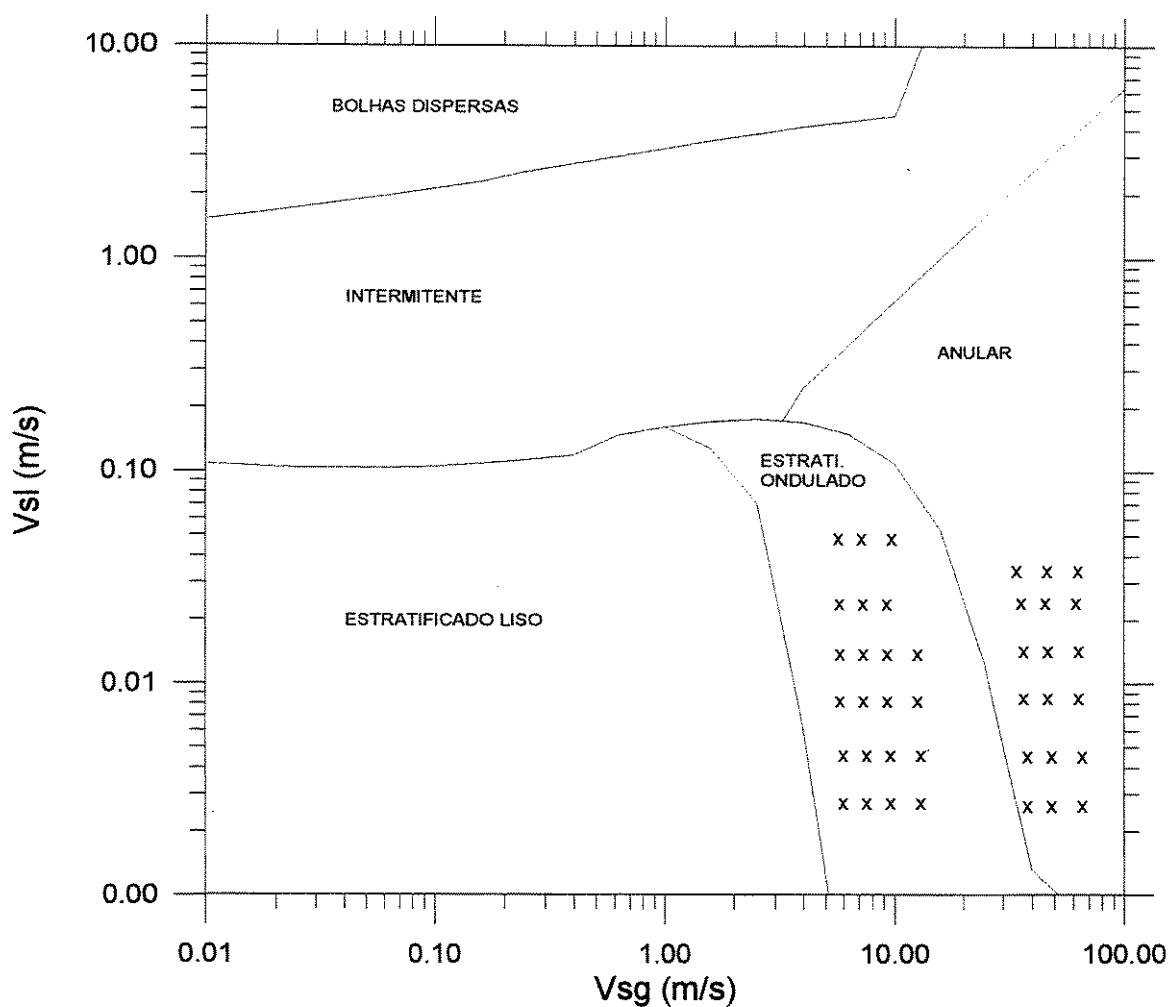


Figura 5.1 Pontos dos testes experimentais para fluxo estratificado e anular

Foram processados como válidos 109 testes com um mínimo de 5 razões de separação para cada combinação de velocidade superficial do gás e líquido.

5.2 Resultados experimentais para padrão de fluxo estratificado ondulado com uma junta tipo "tê" de configuração regular.

As razões de separação dos testes experimentais sob condições de fluxo estratificado ondulado são observados na Figura 5.2 . A abcissa e a ordenada são respectivamente as frações da vazão de líquido (F_{LRL}), e da vazão de gás (F_{GRL}) que se desviam para o ramo lateral. A linha pontilhada representa as condições de igual separação.

Na Figura 5.2 a velocidade superficial do gás durante os teste em fluxo estratificado foi em média de $\bar{V}_{SG} = 10$ m/s. O parâmetro de cada curva é a velocidade superficial do líquido, V_{SL} , a qual foi variando entre 0,247 e 5,091 cm/s, desta maneira se abrange uma grande faixa de condições de fluxo.

Pode-se observar a seguinte tendência: que para qualquer vazão de líquido inicialmente só escoa gás dentro do ramo lateral. O líquido escoa no ramo lateral apenas quando uma considerável porção de gás está escoando no ramo lateral. Existe uma **fração de gás mínima** para manter o desvio do líquido para o ramo lateral.

Por exemplo, quando a $V_{SL} = 0,247$ cm/s, a **fração de gás mínima** é perto de $F_{GRL} = 0.24$. Se a fração de gás que entra no ramo lateral está abaixo de 24% conclui-se que o líquido não poderá fluir no ramo lateral. A **fração de gás mínima** diminui quando a vazão do líquido aumenta. Pode-se ver que para uma $V_{SL} = 2,650$ cm/s, a **fração de gás mínima** está por volta de $F_{GRL} = 0.12$.

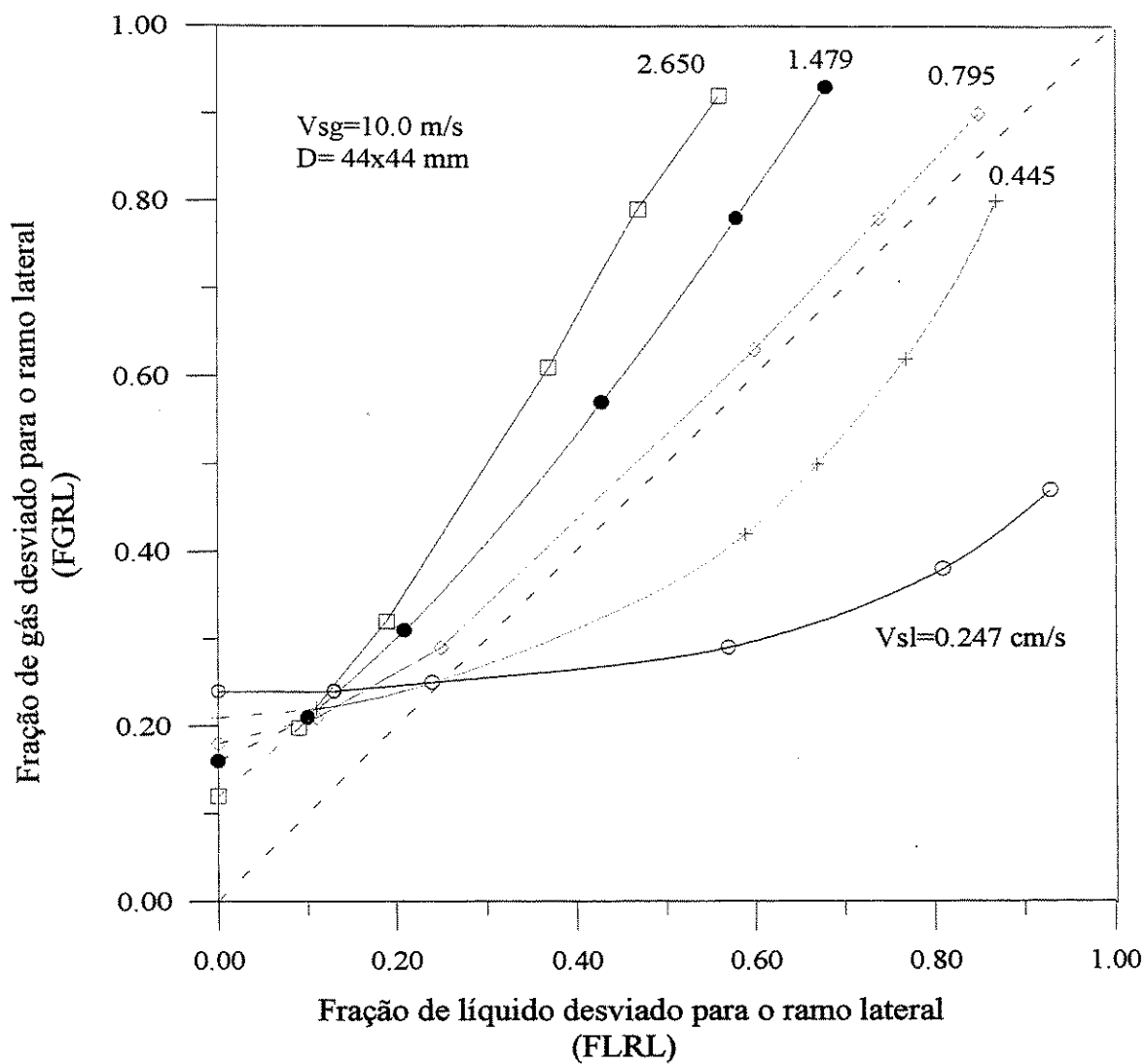


Figura 5.2 Razões de separação em uma junta tipo "T" de configuração regular e em padrão de fluxo estratificado

Analisando a preferência do trajeto que segue a fase líquida é observado o seguinte: a baixas vazões de líquido, como por exemplo, $V_{SL} = 0,247$ cm/s e $V_{SL} = 0,445$ cm/s, o líquido escoava preferencialmente para o ramo lateral. Para a vazão de líquido de $V_{SL} = 0,247$ cm/s, quando a vazão de gás desviada para o ramo lateral atinge 45%, quase todo o líquido é desviado dentro do ramo lateral e conseqüentemente o ramo principal quase só receberá gás. Continuando esta análise, agora com uma vazão intermediária de $V_{SL} = 0,795$ cm/s, o resultado experimental segue a tendência da linha de igual separação, ou seja, o gás e o líquido se separam igualmente através do ramo lateral. Para altas vazões da fase líquida, muda o trajeto do líquido a seguir, ou seja, este tende a escoar preferencialmente no ramo principal. Por exemplo, para uma vazão de $V_{SL} = 0,02650$ m/s, quando aproximadamente 95% do gás é desviado para o ramo lateral apenas 55% do líquido escoava para dentro do ramo lateral.

A seguir, apresenta-se uma breve descrição do comportamento do fluxo na junta "tê", para as condições de fluxo estratificado.

Para baixa fração de gás no ramo lateral, abaixo da *fração de gás mínima* (teste 1), o líquido que escoava dentro do ramo principal será pouco afetado. Durante tais condições, ou seja, de vazão quase zero de líquido no ramo lateral, desenvolve-se uma acumulação de líquido na saída do "tê". Esta película tem um nível de líquido maior que na linha de entrada, e diminui a zero ao longo do ramo lateral.

5.3 Resultados experimentais para padrão de fluxo anular com uma junta tipo "tê" de configuração regular.

Na Figura 5.3 se observam os resultados experimentais das razões de separação para fluxo anular. A velocidade superficial média do gás sob condições deste padrão de fluxo foi de $\bar{V}_{SG} = 41.0$ m/s. As velocidades superficiais do líquido foram as mesmas no caso do escoamento estratificado.

Os resultados experimentais em padrão de fluxo anular, são opostos aos do fluxo estratificado ondulado, porque todas as curvas de separação se encontram debaixo da linha de igual separação; isto indica que a fase líquida tende a escoar preferencialmente para o ramo lateral, não sendo necessária a *fração de gás mínima* para iniciar a separação do líquido dentro do ramo lateral. Ao contrário existe a seguinte tendência: inicialmente quase só o líquido desvia-se para o ramo lateral, enquanto que o gás só flui neste ramo quando uma considerável vazão de líquido flui no ramo lateral. Para baixas vazões de líquido, por exemplo $V_{SL} = 0,247$ cm/s, e quando F_{GRL} se aproxima de zero, a fração de líquido que escoar no ramo lateral F_{LRL} está próxima de 0,38. Se a vazão de líquido aumenta, por exemplo $V_{SL} = 2,650$ cm/s, a fração de líquido que entra no ramo lateral, quando a fração de gás se aproxima de zero, diminui para um valor próximo de 0,12

Discute-se, em seguida, o comportamento da separação em padrão de fluxo anular.

Para baixas frações de gás que entram no ramo lateral (teste 17), o fluxo na saída do "tê" do ramo principal não é perturbado. Enquanto no ramo lateral, devido as baixas vazões de gás, se desenvolve o padrão de fluxo estratificado, a parede superior da tubulação é molhada por uma película de líquido muito fina.

Nestas condições, no ramo lateral desenvolvem-se perturbações na superfície da camada estratificada ao longo de todo o ramo lateral. Quando a fração de gás que entra no ramo lateral aumenta (teste 18), a região de perturbações se reduz, e o fenômeno só acontece na entrada do ramo lateral onde grandes ondas se desenvolvem na interface. Surge também uma película de líquido na parede superior da tubulação que não permanece ao longo do ramo lateral, enquanto isso no ramo principal o fluxo anular permanece estável. Aumentando mais um pouco a fração de gás que entra no ramo lateral (teste 19), resulta numa diminuição da região de perturbações com grandes ondas na interface. Aumentando um pouco mais a fração de gás que entra no ramo lateral (teste 20), o comportamento do fluxo muda tanto no ramo lateral como no principal. Devido as altas vazões de gás no ramo lateral este se torna anular, enquanto o fluxo no ramo principal muda para estratificado.

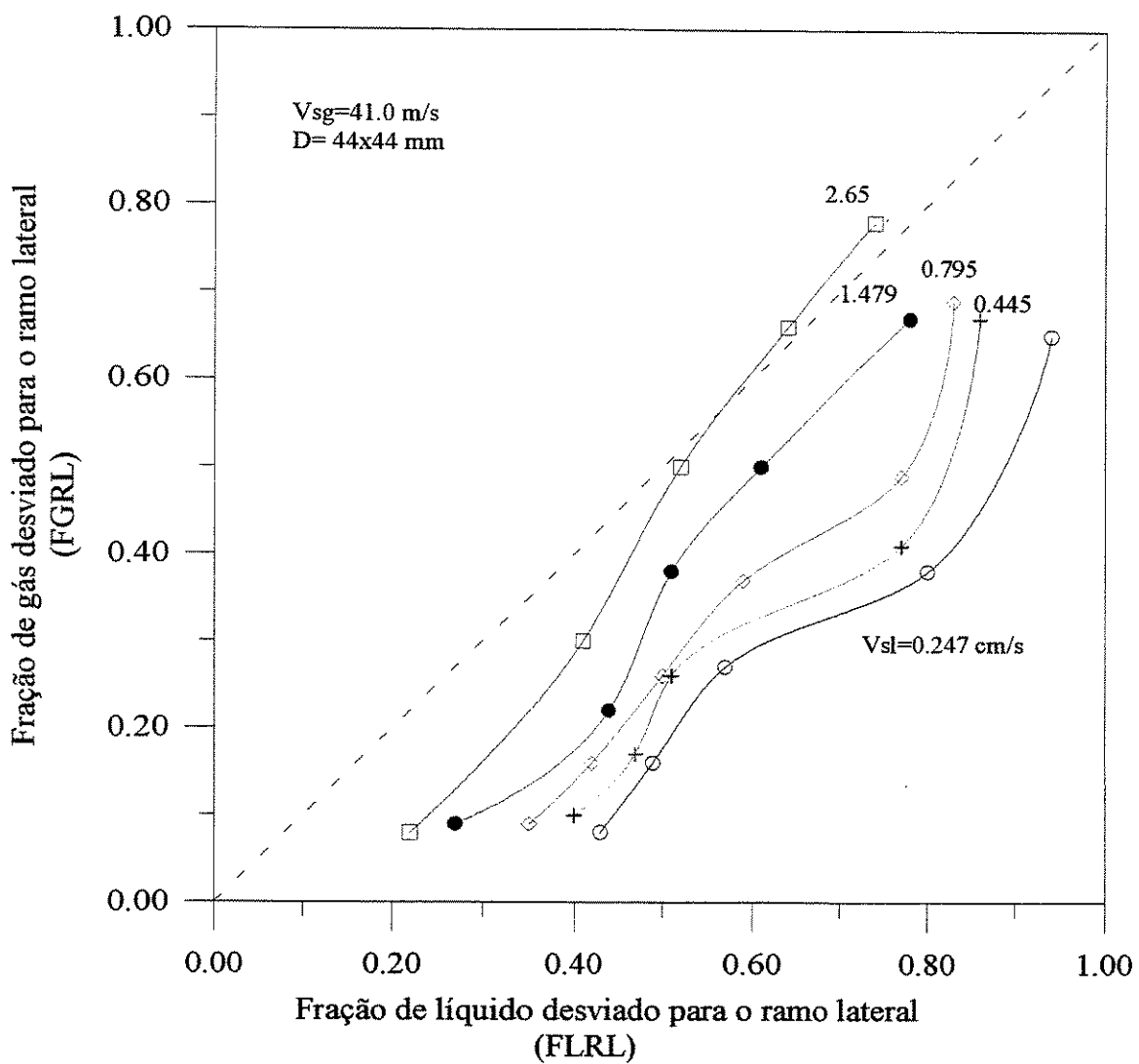


Figura 5.3 Razões de separação em uma junta tipo "T" de configuração regular e em padrão anular.

5.4 Resultados experimentais para padrão de fluxo estratificado com uma junta tipo "tê" de configuração irregular.

Foram processadas como válidos 29 testes, sob condições de fluxo estratificado. Os resultados dos testes estão tabelados no Apêndice D. As velocidades superficiais de gás e líquido foram as mesmas do caso com a junta "tê" regular, para facilitar a comparação. Na Figura 5.4 são exibidos os resultados experimentais das razões de separação sob padrão de fluxo estratificado ondulado para uma junta "tê" de configuração irregular. Estes resultados podem ser comparados com os resultados que se observam na Figura 5.2, obtidos para uma configuração regular sob as mesmas condições de entrada de fluxo.

Comparando os resultados experimentais para as duas configurações de junta "tê", pode-se observar que menos líquido é desviado para o ramo lateral da junta "tê" de configuração irregular em relação à de configuração regular. A redução de diâmetro para o ramo lateral resulta num deslocamento ascendente das correspondentes curvas de separação. Para baixas vazões de líquido, Figura 5.5, observa-se que a vazão de líquido que desvia para o ramo lateral para uma junta "tê" de configuração irregular diminui ao redor de 15% em relação à junta regular. Aumentando a vazão de líquido, Figura 5.6, se observa que a fração de líquido que entra no ramo lateral de uma junta "tê" de configuração irregular se reduz até 40% em relação a junta regular.

Desta maneira, conclui-se que para padrão de fluxo estratificado numa junta "tê" de configuração irregular o líquido escoar preferencialmente dentro do ramo principal, exceto para baixas vazões de líquido, onde o líquido escoar preferencialmente para o ramo lateral.

Um fenômeno comum da separação para ambas configurações de junta "tê" é a aparente necessidade da *fração de gás mínima* para iniciar o desvio do líquido dentro do ramo lateral. As *frações de gás mínima* são aproximadamente as mesmas para ambas configurações de junta "tê".

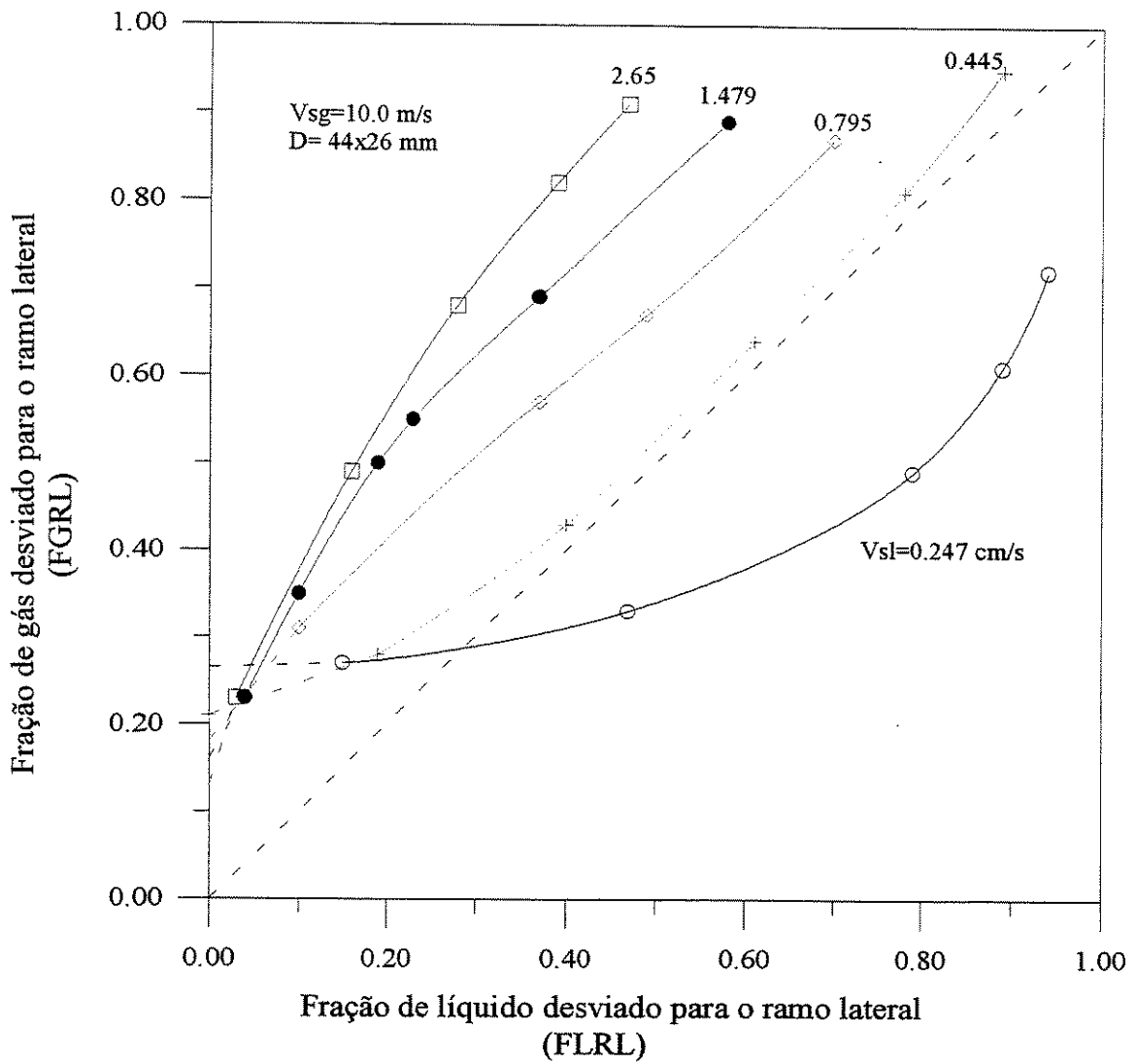


Figura 5.4 Razões de separação em uma junta tipo "T" de configuração irregular e em padrão de fluxo estratificado.

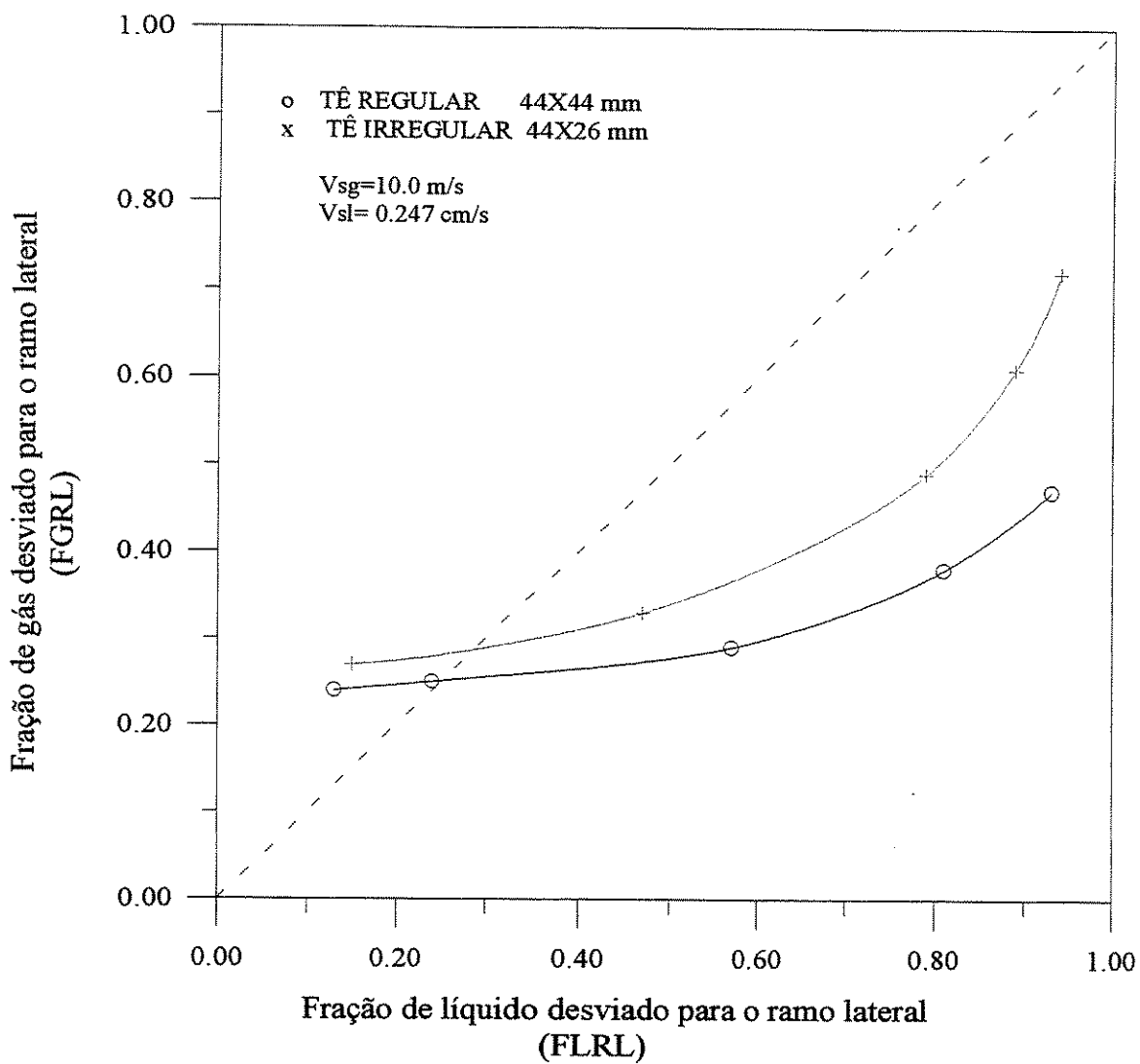


Figura 5.5 Razão de separação em uma junta tipo "T" de configuração irregular e padrão de fluxo estratificado (baixas vazões de líquido)

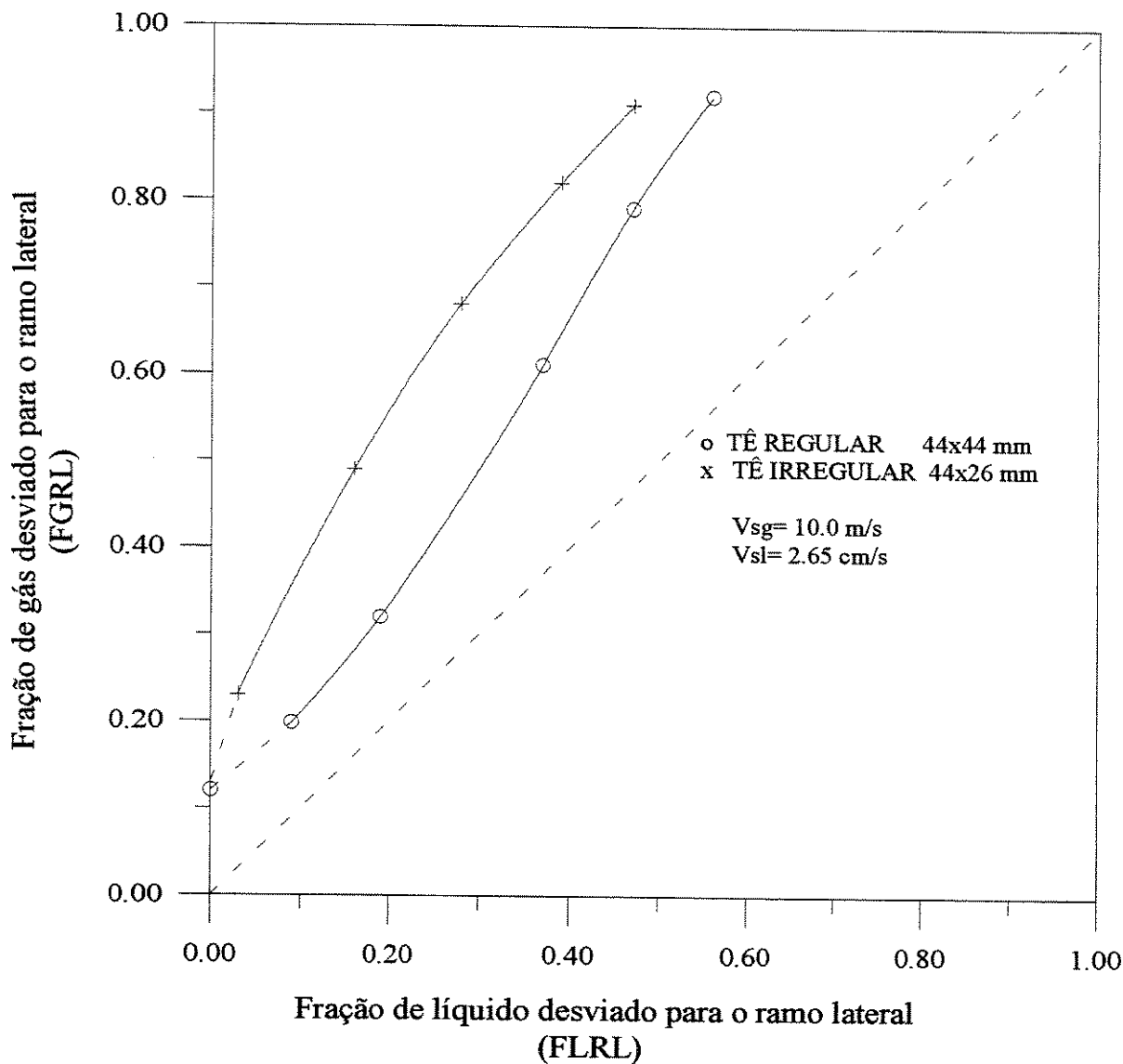


Figura 5.6 Razão de separação em uma junta tipo "T" de configuração irregular e padrão de fluxo estratificado (altas vazões de líquido)

5.5 Resultados experimentais para padrão de fluxo anular com uma junta tipo "tê" de configuração irregular.

As razões de separação para padrão de fluxo anular através de uma junta "tê" de configuração irregular são observadas na Figura 5.7. As condições de entrada do fluxo são as mesmas do caso dos testes experimentais para junta "tê" de configuração regular.

Comparando os dados experimentais das Figuras 5.3 (configuração regular) e Figura 5.7 (configuração irregular), pode-se observar que existe uma pequena diferença; em geral, as curvas de separação estão localizadas abaixo da linha de igual separação. Isto indica que a fase líquida tende a escoar dentro do ramo lateral

Também se pode observar que para baixa fração de gás que entra no ramo lateral, a razão de separação do líquido é maior que a razão de separação do gás. Se extrapolarmos a fração de gás que entra no ramo lateral, ou seja, $F_{GRL} \rightarrow 0$ há uma aparente *fração de líquido inicial*, conseqüentemente a fase líquida tende a escoar na direção do ramo lateral junto com uma insignificante fração de gás. A *fração de líquido inicial* aumenta quando diminui a vazão de líquido na entrada.

Na Figura 5.8 observa-se que, para baixas vazões de líquido, ocorre uma diminuição da fração de líquido que entra no ramo lateral especialmente quando a fração de gás que entra no ramo lateral está abaixo de ($F_{GRL} < 0.25$). Para altos valores de F_{GRL} , as diferenças entre as curvas de separação para junta "tê" com configuração regular e irregular são pequenas.

Na Figura 5.9 faz-se uma comparação similar para altas vazões de líquido; para este caso, uma pequena redução na fração de líquido se observa para qualquer fração de gás que entra no ramo lateral.

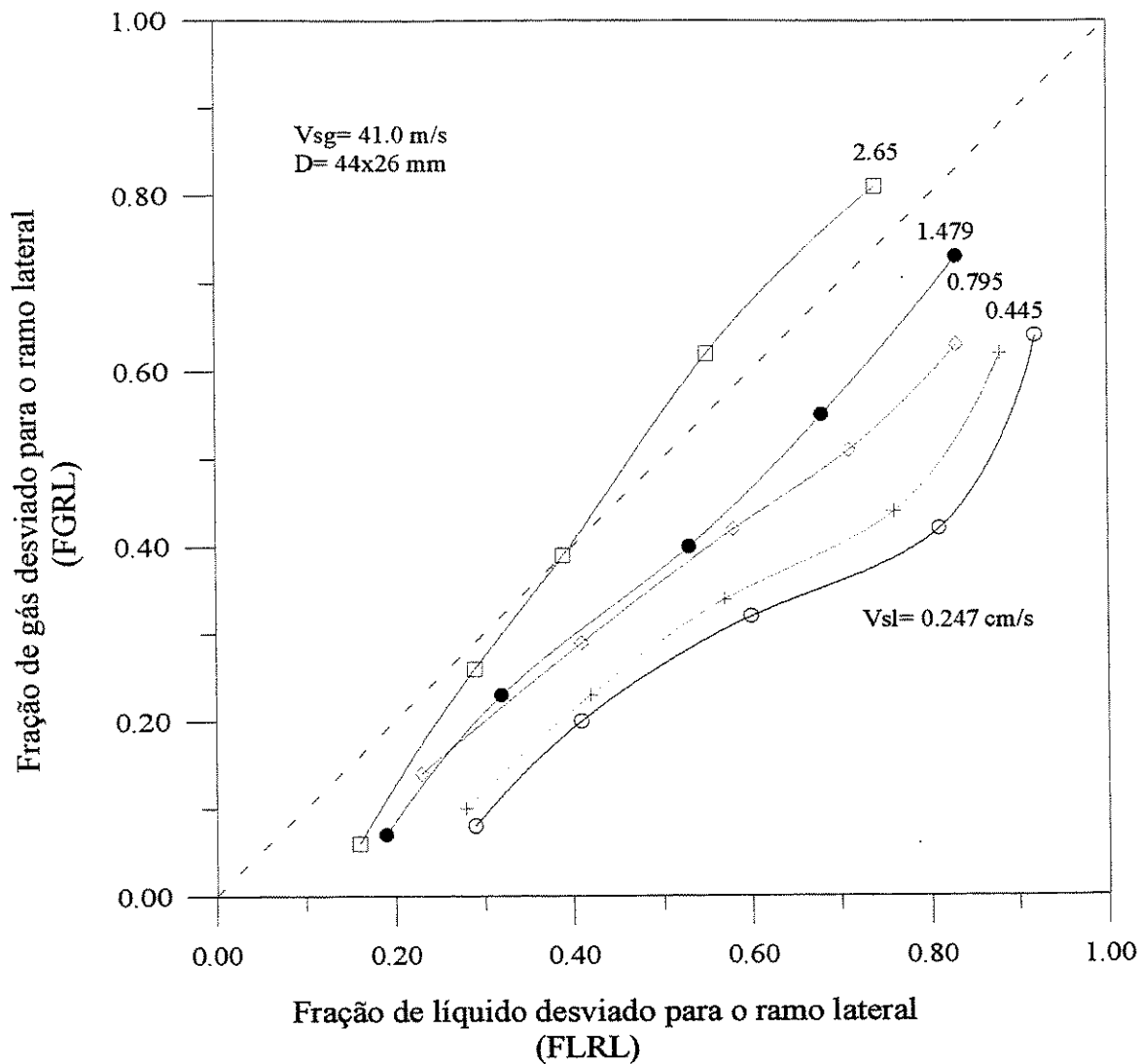


Figura 5.7 Razões de separação em uma junta tipo "T" de configuração irregular e em padrão de fluxo anular.

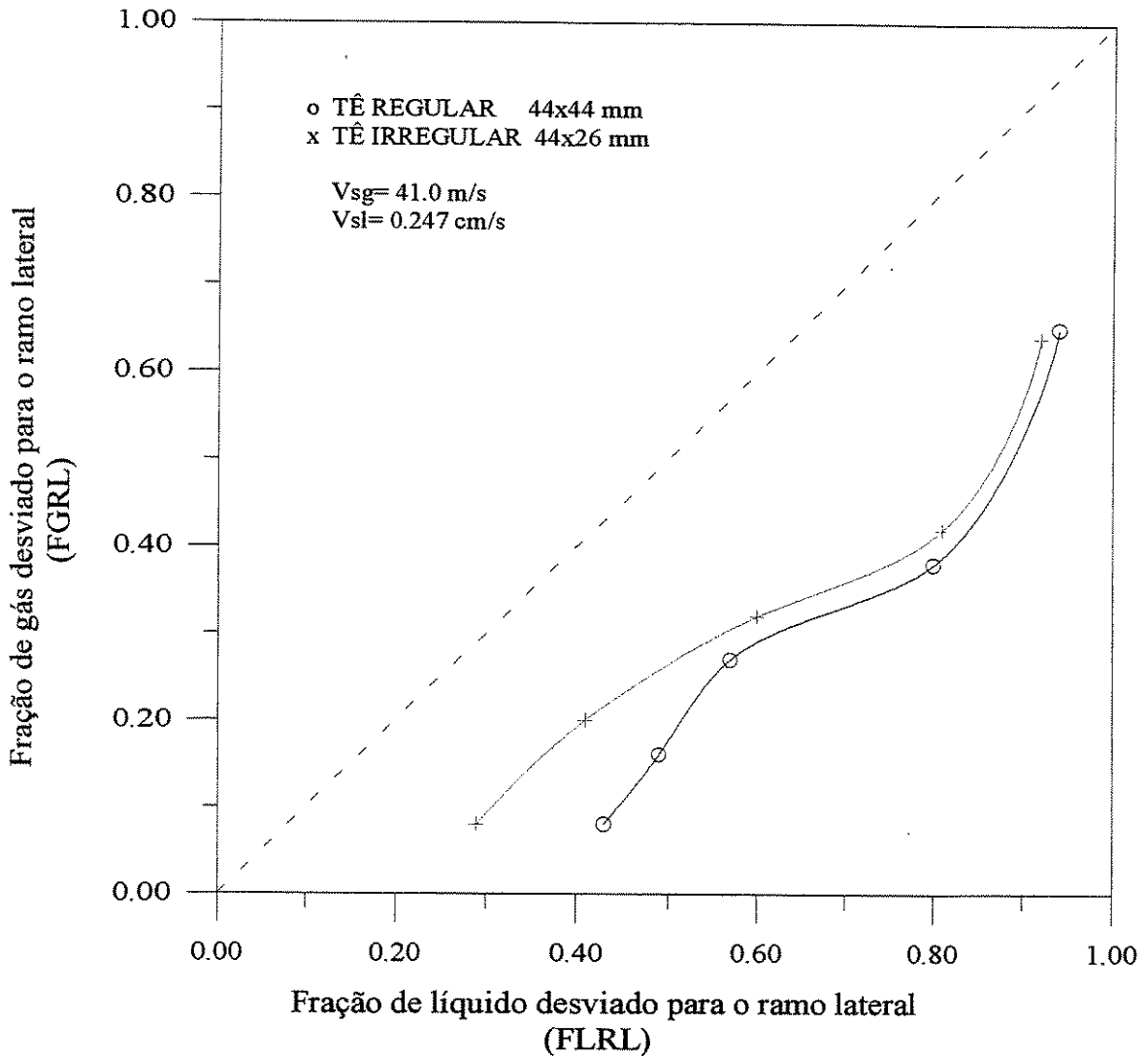


Figura 5.8 Razão de separação em uma junta tipo "T" de configuração irregular e em padrão de fluxo anular (baixa vazão de líquido)

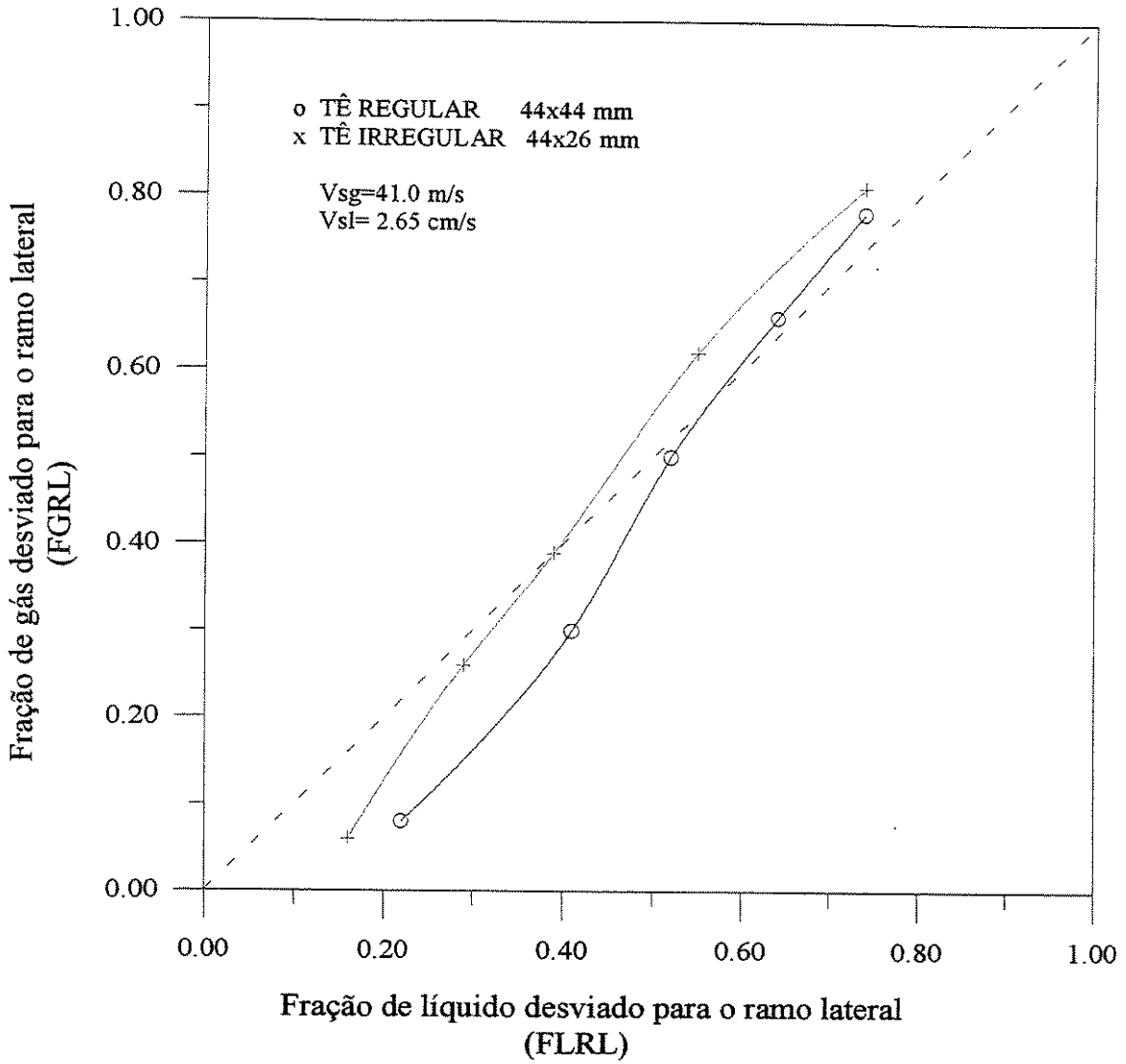


Figura 5.9 Razão de separação em uma junta tipo "T" de configuração irregular e em padrão de fluxo anular (alta vazão de líquido)

5.6 Comparação dos resultados experimentais com o modelo geométrico.

O modelo geométrico foi testado utilizando os mesmos dados de fluxo dos testes experimentais. Nas Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 se observam os resultados teóricos do modelo geométrico tanto em padrão de fluxo estratificado como anular, e para os casos de uma junta "tê" de configuração regular é irregular.

5.6.1 Resultados do modelo geométrico em padrão de fluxo estratificado para uma junta "Tê" de configuração regular e irregular.

Na Figura 5.10 se pode ver os resultados do modelo geométrico para o caso de uma junta tipo "tê" de configuração regular, e na Figura 5.11 para o caso de uma junta tipo "tê" de configuração irregular. Comparações feitas com os dados experimentais sugerem que o modelo geométrico é inadequado para prever o fenômeno da separação, mas de qualquer forma apresenta algumas características básicas observadas experimentalmente.

Por exemplo, pode-se observar que o modelo geométrico prediz com certa aproximação a *fração de gás mínima* requerida para iniciar o desvio do líquido em fluxo estratificado.

Para uma junta "tê" de configuração irregular, Figura 5.11, o modelo geométrico prediz uma menor quantidade de líquido a ser desviada para dentro do ramo lateral comparado com os resultados do modelo para uma junta "tê" de configuração regular. Apesar de que os valores absolutos dos resultados do modelo e experimentais não se ajustam rigorosamente, a tendência das curvas de separação tem uma certa similaridade.

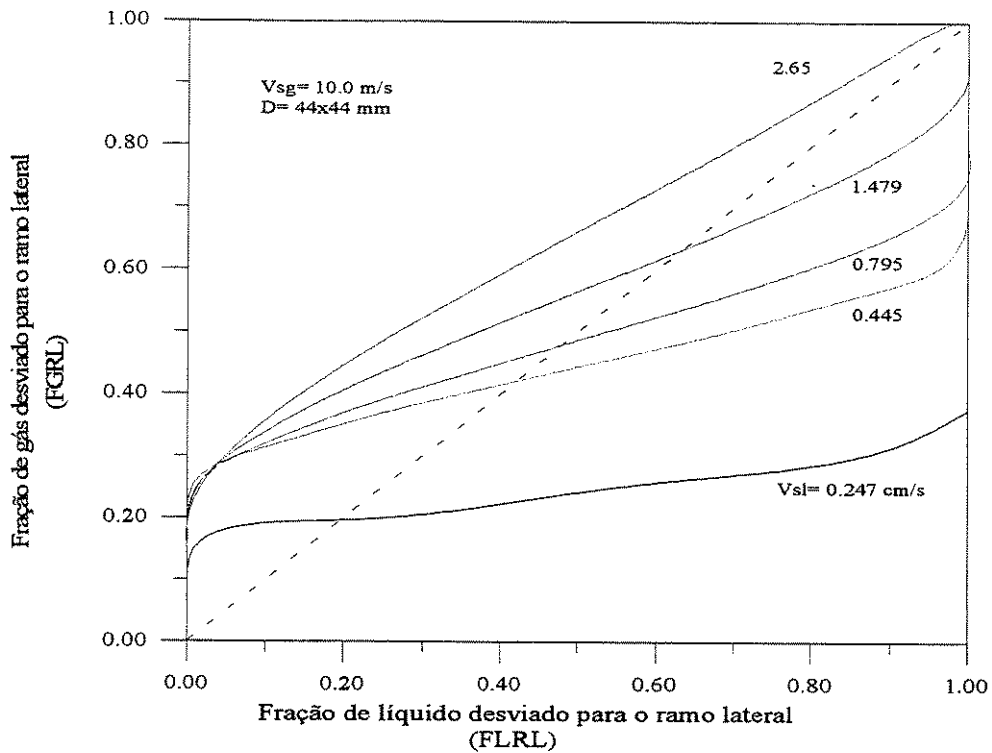


Figura 5.10 Resultados do modelo geométrico para padrão de fluxo estratificado e junta "T" de configuração regular.

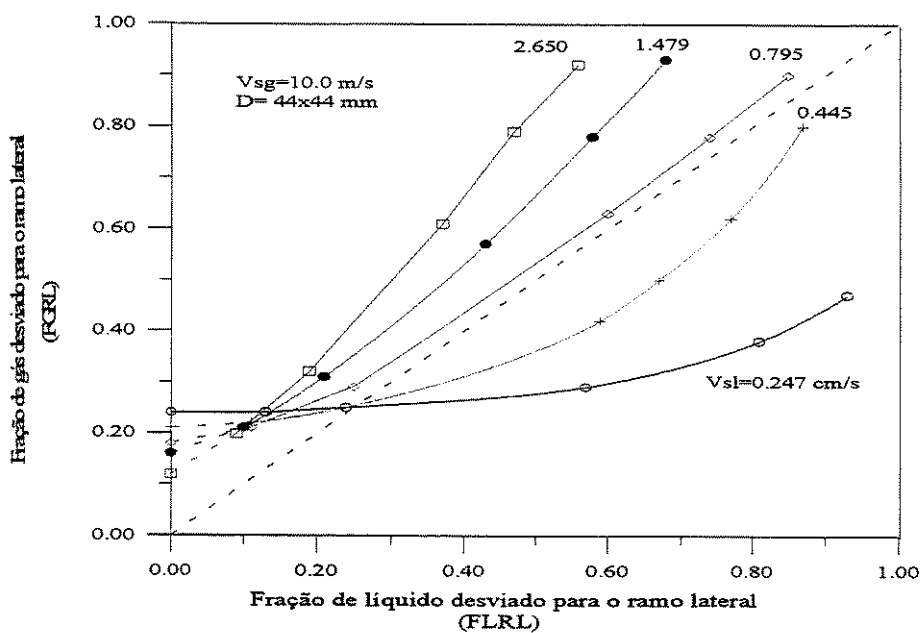


Figura 5.2 Razões de separação em uma junta tipo "T" de configuração regular e em padrão de fluxo estratificado.

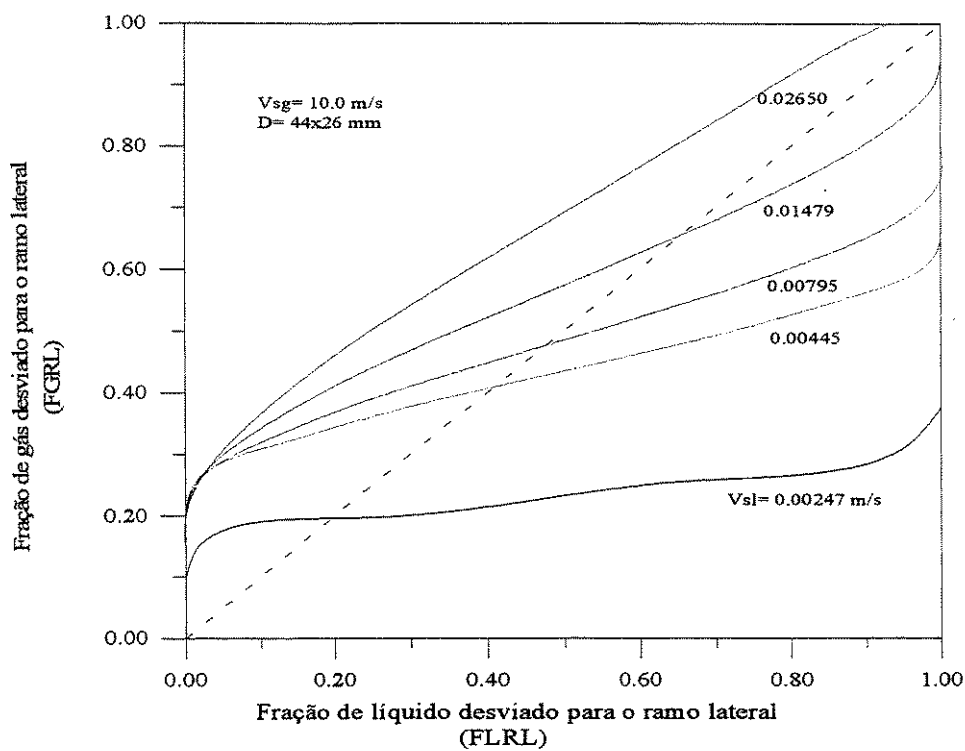


Figura 5.11 Resultados do modelo geométrico para padrão de fluxo estratificado e junta "T" de configuração irregular.

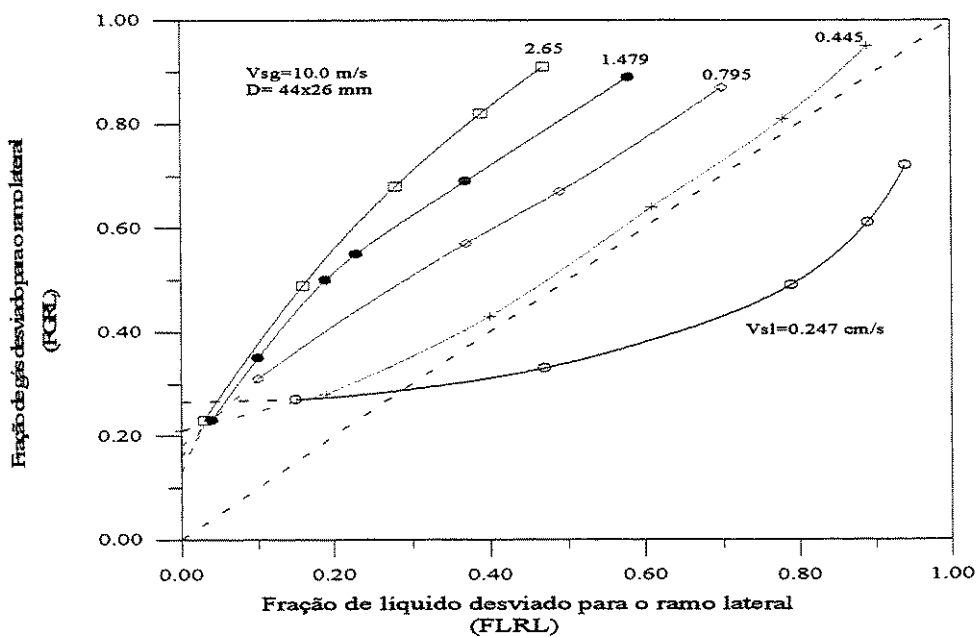


Figura 5.4 Razões de separação em uma junta tipo "T" de configuração irregular e em padrão de fluxo estratificado

5.6.2 Resultados do modelo geométrico em padrão de fluxo anular para uma junta "tê" de configuração regular e irregular.

Para fluxo anular, os resultados do modelo geométrico, Figuras 5.12 e 5.13 e os resultados experimentais, Figuras 5.3 e 5.7, não têm um bom ajuste especialmente em relação ao cálculo da *fração de líquido mínima*. A forma geral das curvas de separação não tem boa similaridade com as curvas experimentais.

5.7 Distribuição da pressão através da junta tipo "T"

Se pode observar nas Figuras 5.14 e 5.15 para fluxo anular, e nas Figuras 5.16 e 5.17 para fluxo estratificado, alguns exemplos da distribuição da pressão para as duas configurações de junta "tê". Nas figuras a abcissa representa a localização das tomadas de pressão, cada tomada de pressão é designado por um número, as tomadas de 1 a 5 se encontram na entrada da junta "tê" (ramo principal), as tomadas de 6 a 10 posicionadas na saída da junta "tê" (ramo principal), e as tomadas de pressão de 11 a 15 se encontram na saída da junta "tê" (ramo lateral). A ordenada representa a queda da pressão relativa a tomada número 1 que se encontra no ramo principal.

A distribuição da pressão nos três ramos da junta tipo "tê" dependem fundamentalmente do padrão de fluxo a montante da "tê" e das razões de separação do gás tanto no ramo lateral como no ramo principal.

A distribuição da pressão para os padrões de fluxo estratificado e anular segue a mesma tendência através da junta "tê" de configuração regular e irregular.

Na entrada do ramo lateral (saída da junta "tê"), a queda da pressão é provocada pela irregularidade do fluxo, esta região é caracterizada pela separação e vorticidade do campo de fluxo. Depois de definida a queda da pressão, há uma gradual recuperação da pressão ao longo do ramo lateral até estabilizar-se as condições do fluxo. Em todos os casos, a queda de pressão no ramo lateral é maior para o "tê" irregular.

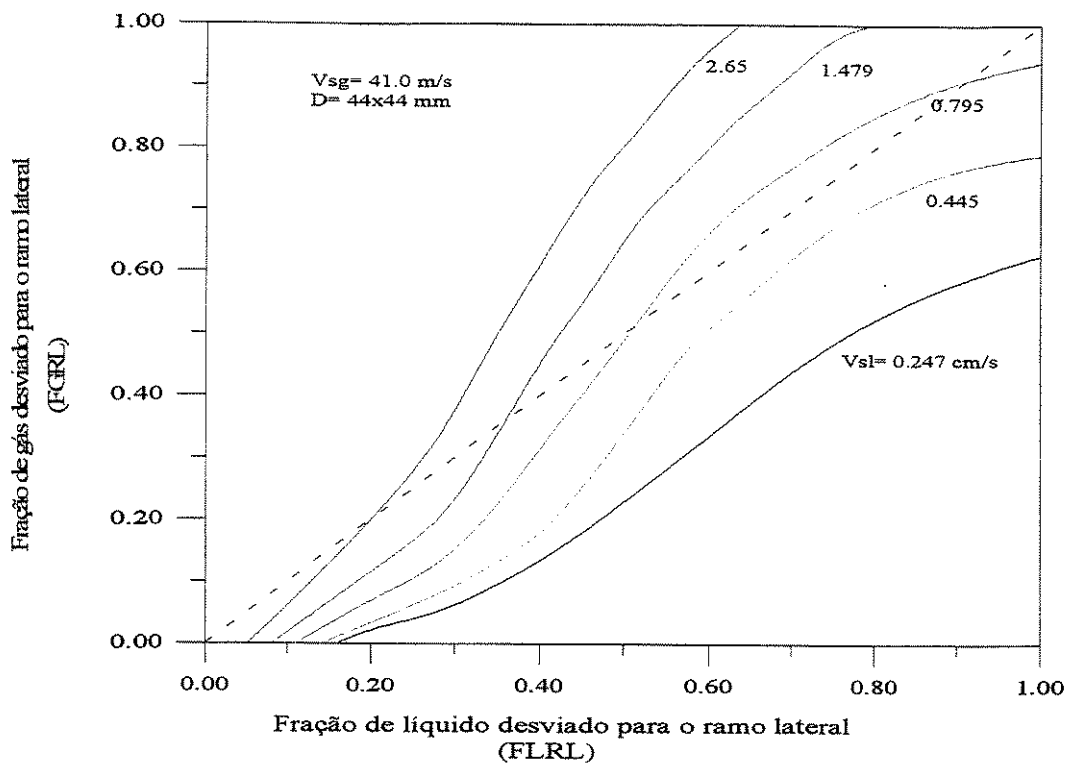


Figura 5.12 Resultado do modelo geométrico para padrão de fluxo anular e junta "T" de configuração regular

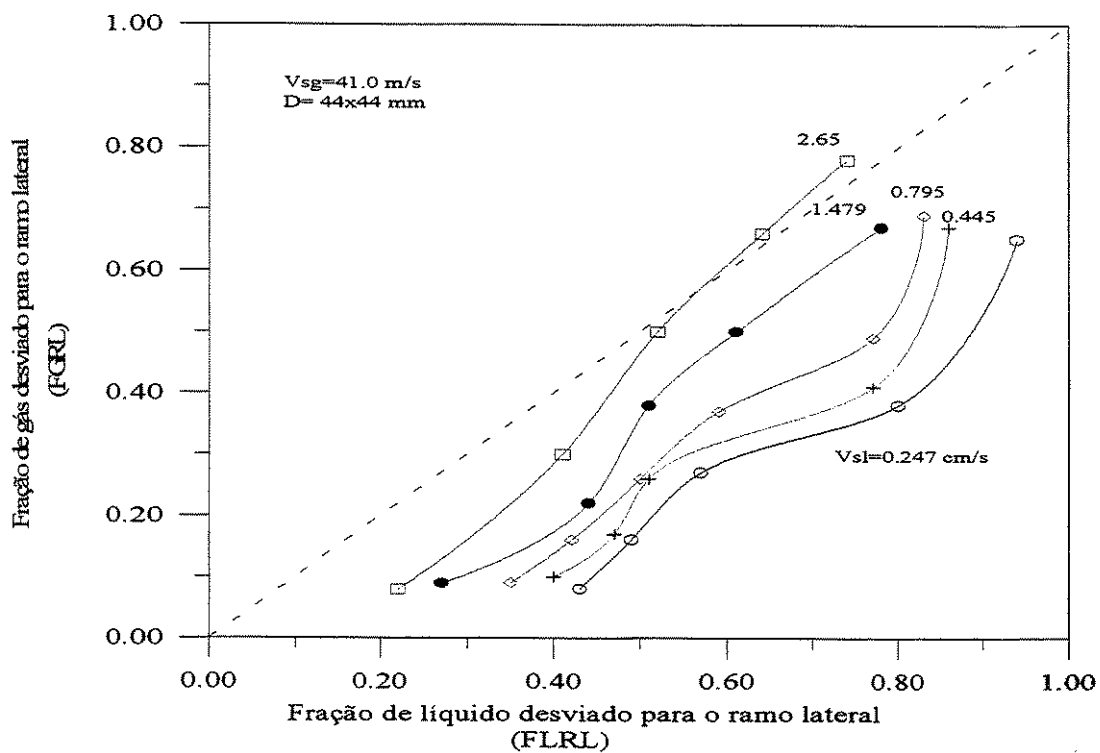


Figura 5.3 Razão de separação em uma junta tipo "T" de configuração regular e em padrão anular

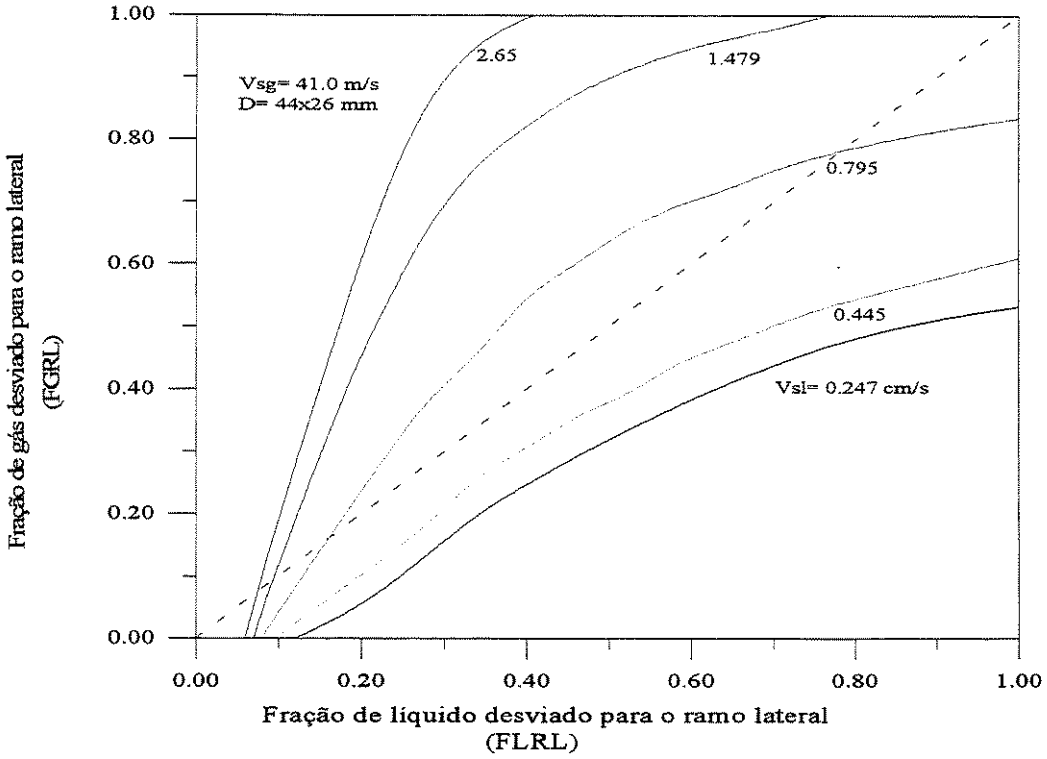


Figura 5.13 Resultado do modelo geométrico para padrão de fluxo anular e junta "T" de configuração irregular.

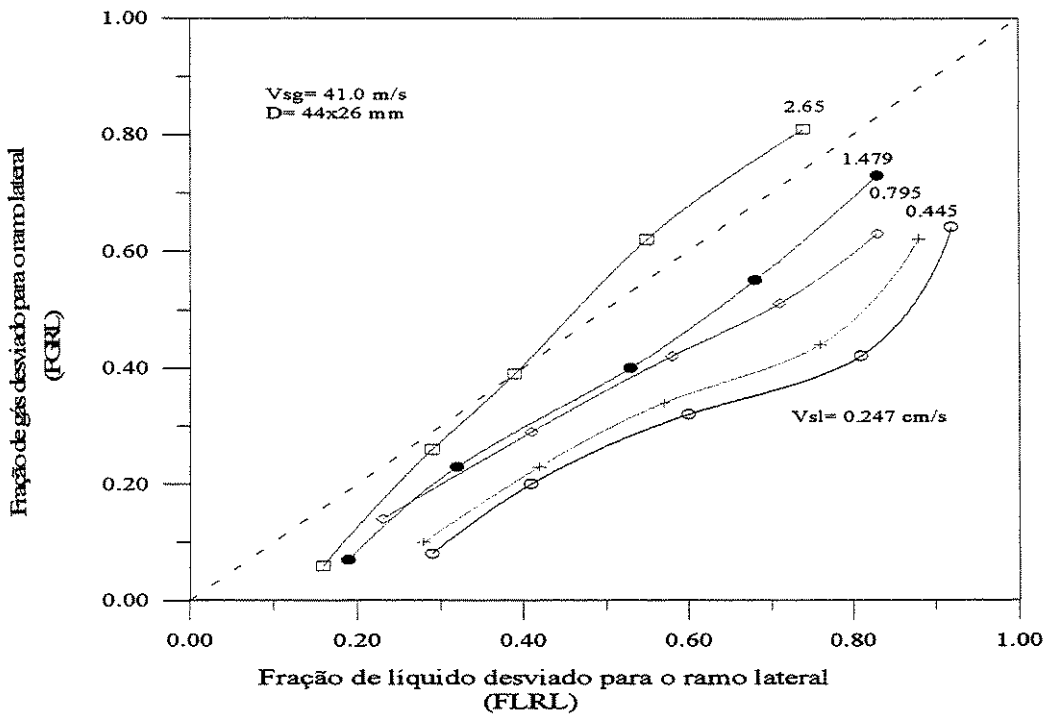


Figura 5.7 Razões de separação em uma junta tipo "T" de configuração irregular e em padrão de fluxo anular

A distribuição da pressão no ramo principal é completamente diferente, como parte da vazão é desviado para o ramo lateral, então baixas velocidades das fases são encontradas no ramo principal, isto produz um aumento da pressão no ramo principal (saída da junta "tê"). A variação de pressão tanto no ramo lateral como no principal é mais acentuada para fluxo anular do que para o fluxo estratificado ondulado.

A extensão da queda da pressão no ramo lateral e o aumento da pressão no ramo principal dependem da fração de gás que entra no ramo lateral.

Comparando-se as Figuras 5.14 e 5.15, fluxo anular nota-se que com o aumento da fração de gás que escoava para o ramo lateral, a queda da pressão no ramo lateral sofreu um pequeno aumento. A recuperação da pressão no ramo principal quase não se alterou. O fluxo estratificado apresentou comportamento similar, Figuras 5.16 e 5.17.

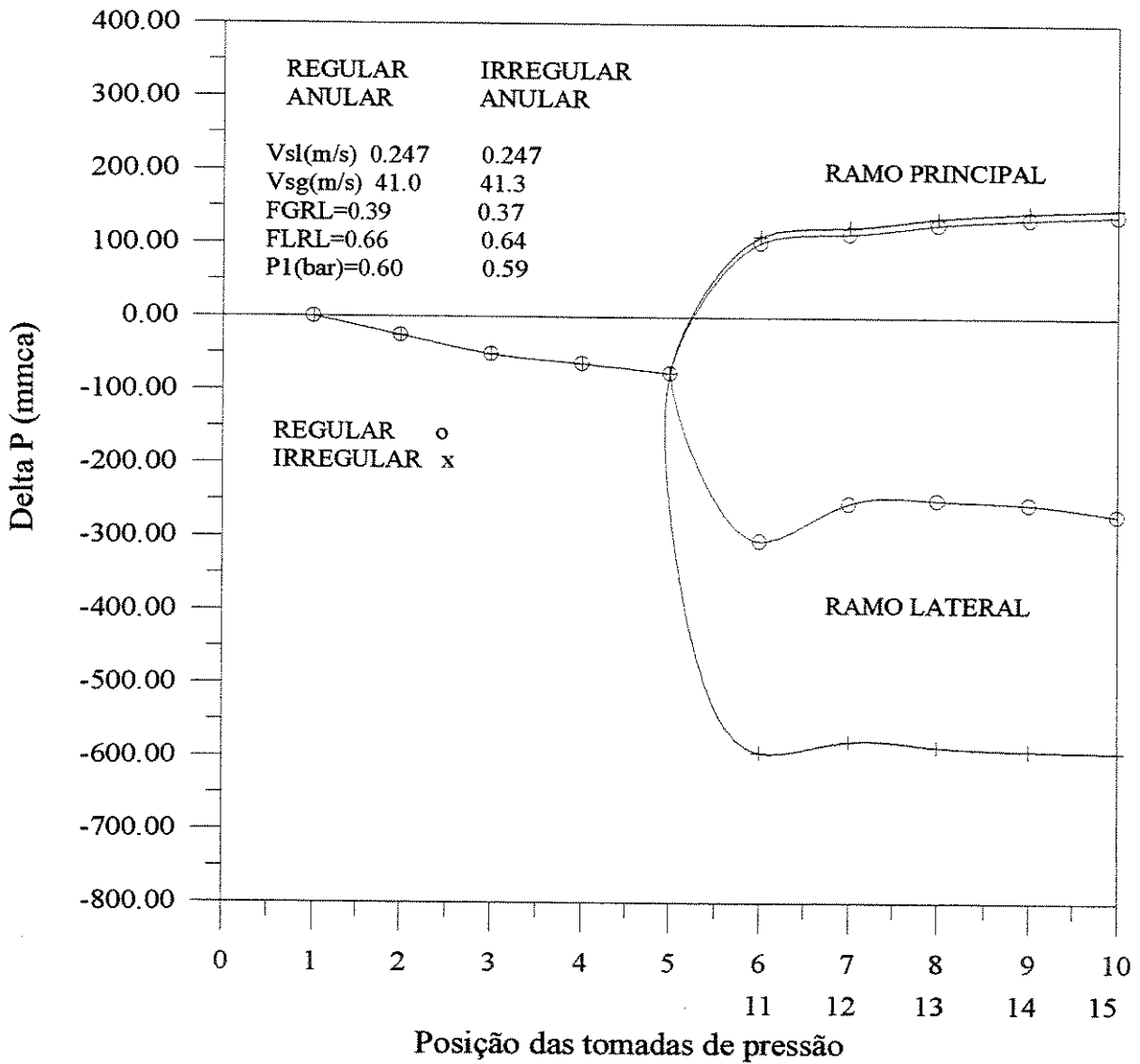


Figura 5.14 Distribuição da pressão para padrão de fluxo anular

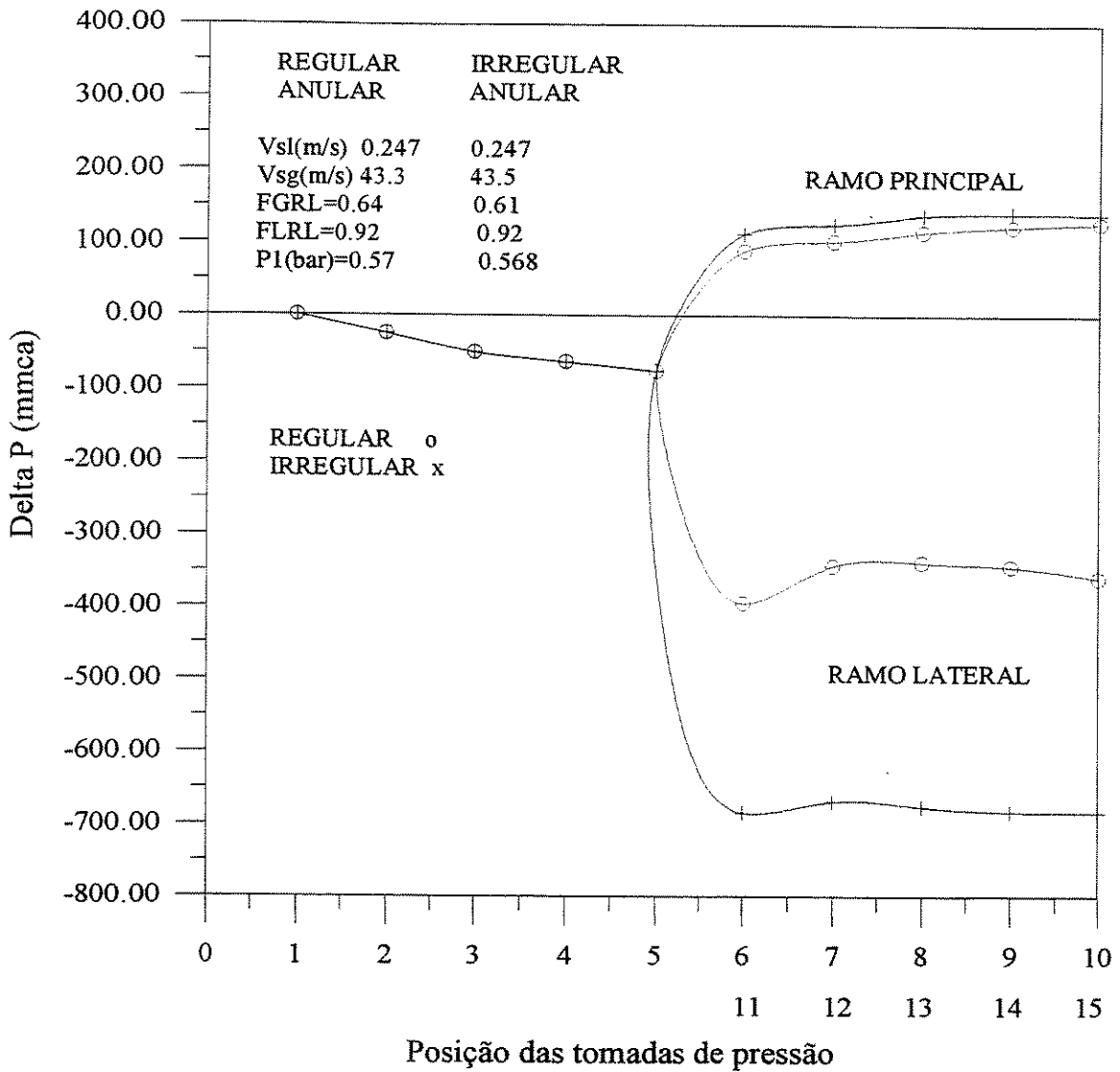


Figura 5.15 Distribuição da pressão para padrão de fluxo anular

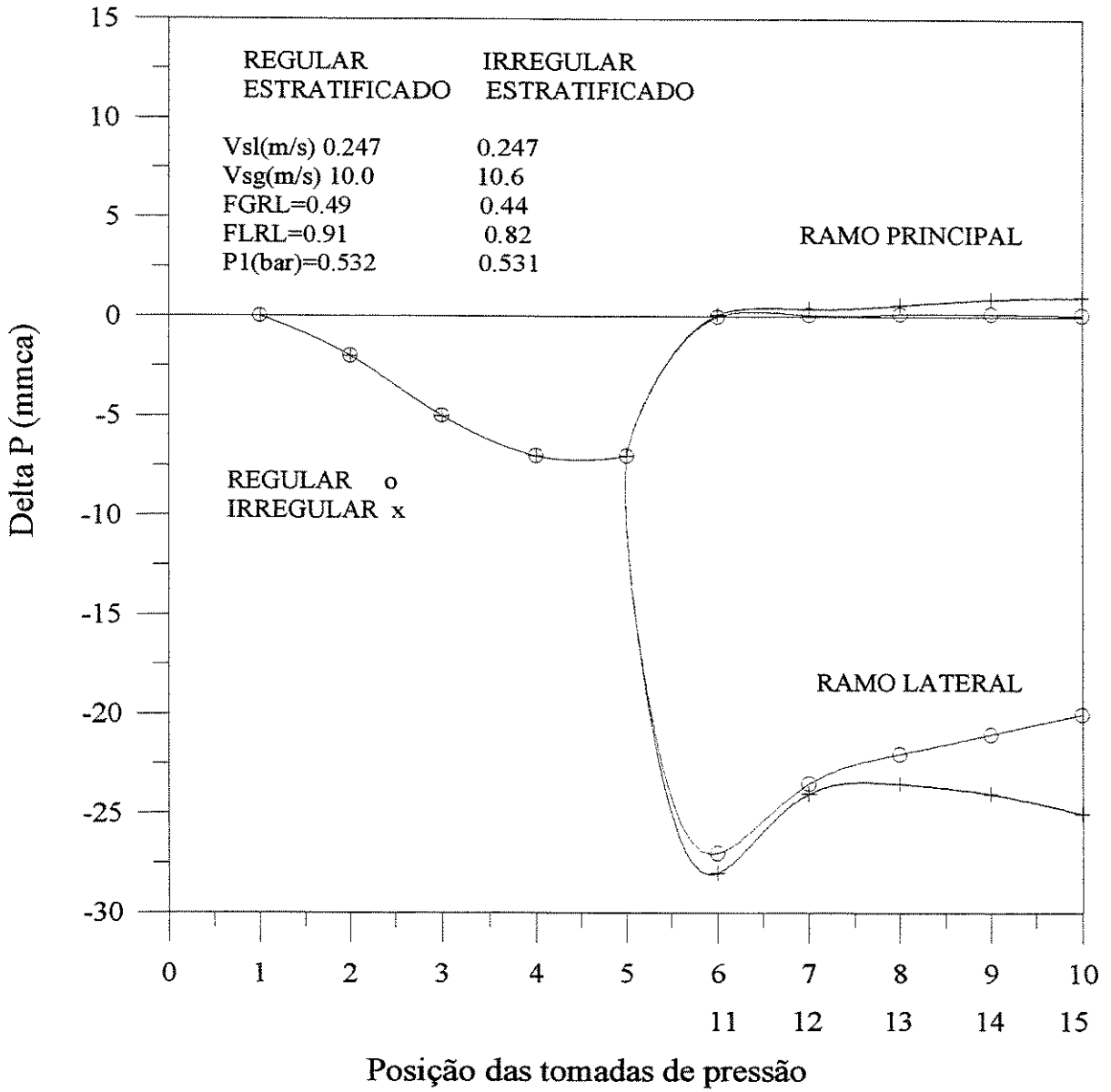


Figura 5.16 Distribuição da pressão para padrão fluxo estratificado

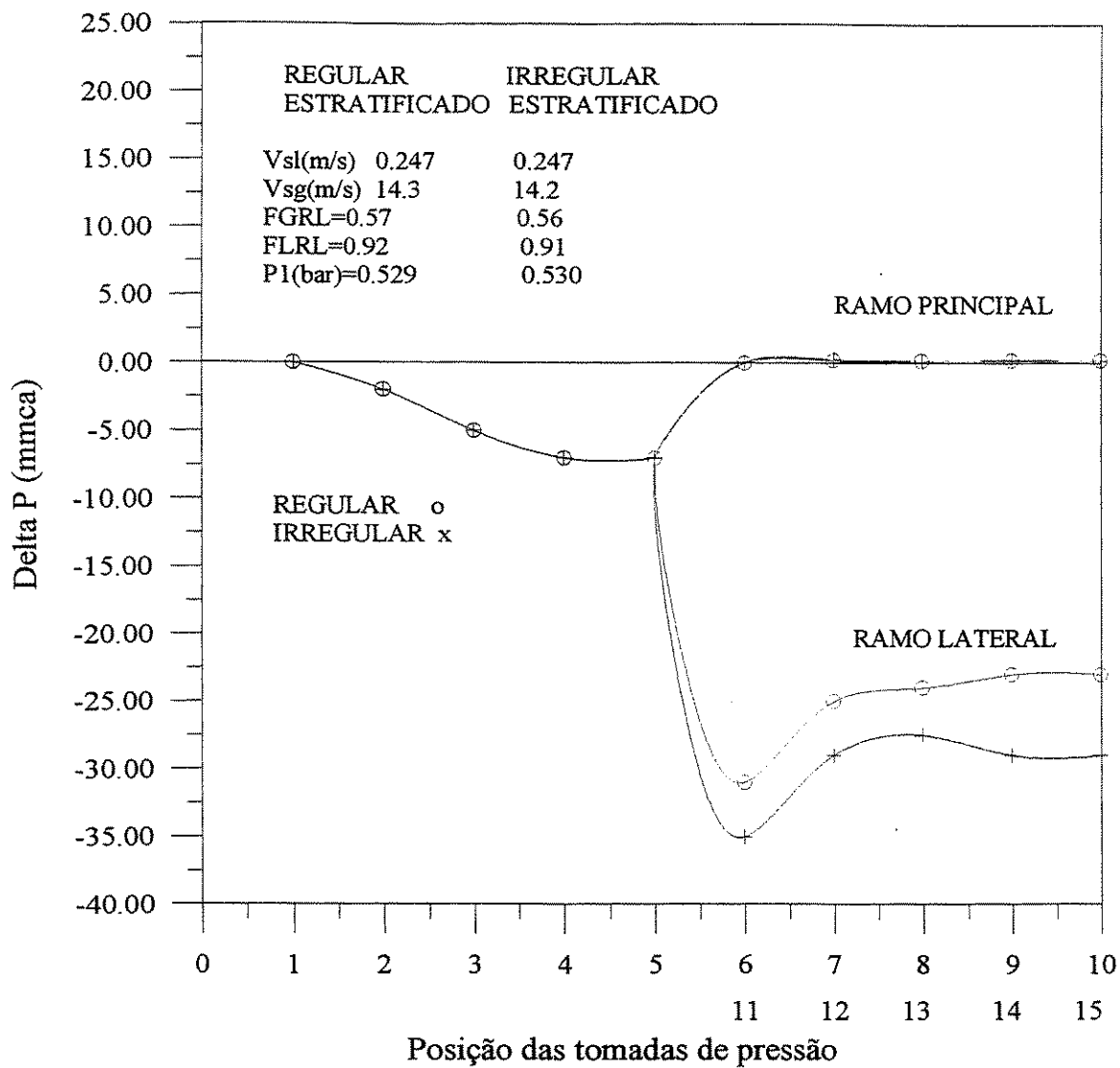


Figura 5.17 Distribuição da pressão para padrão de fluxo estratificado

CAPÍTULO 6

Conclusões e Sugestões

A viabilidade econômica é freqüentemente um ditame nas decisões do engenheiro para o desenvolvimento de campos de petróleo, especialmente nos casos de campos *offshore* marginais. Na maioria das vezes, os engenheiros são requisitados para projetar tanques de armazenamento e redes de distribuição para cobrir as necessidades do desenvolvimento do campo, porém, só utilizando um mínimo dos custos da plataforma.

Esta postura invariável significa um desafio para os problemas da separação do gás e líquido, já que é um fenômeno muito complicado e que não foi resolvido completamente. Indubitavelmente, a capacidade de prever exatamente a trajetória que segue o líquido, ou a distribuição desigual das duas fases nas redes de tubulações, é crítica e muito necessária à produção de petróleo.

Assim, é de fundamental importância desenvolver um modelo que possa prever as frações de separação do gás e líquido para todas as condições de fluxo. Espera-se que um completo entendimento do fenômeno possa proporcionar um modelo geral ou um método de engenharia para prever a distribuição do fluxo bifásico para qualquer configuração de redes de tubulações. Para se atingir este fim, são necessários trabalhos experimentais para subsidiar a modelagem.

Neste estudo experimental procurou-se verificar e conhecer alguns dos aspectos que envolvem ao fenômeno da separação; como consequência delineam-se as seguintes conclusões:



1. Analisando os dados experimentais, tanto para fluxo estratificado ondulado como para fluxo anular, pode-se observar que os resultados do fenômeno da separação dependem fortemente do padrão de fluxo a montante da junta "tê".
2. Comparando os dados experimentais da separação entre uma junta "tê" de configuração irregular e uma junta "tê" de configuração regular sob as mesmas condições de fluxo pode-se concluir que:
 - (a) Existe uma substancial redução da fração de líquido que entra no ramo lateral de até um 40% para as condições de fluxo estratificado ondulado.
 - (b) Para as condições de fluxo anular a redução da fração de líquido que entra no ramo lateral é de até 10%.
 - (c) A queda da pressão no ramo lateral é mais acentuado tanto para fluxo anular quanto para fluxo estratificado.
3. Comparando os dados experimentais com o modelo geométrico, conclui-se que:
 - (a) O modelo geométrico prediz com uma fraca aproximação a *fração de gás mínima* requerida para iniciar o desvio do líquido em padrão de fluxo estratificado.
 - (b) Para fluxo anular o modelo não se ajusta com os dados experimentais especialmente no cálculo da *fração de líquido mínima* que entra no ramo lateral quando a fração de gás no ramo lateral tende a zero.

Finalmente, algumas sugestões para a melhoria e continuidade deste trabalho são dados a seguir:

1. O trabalho experimental deve estender-se para outros padrões de fluxo, tal como pistonado e bolhas.
2. Devem ser investigados os efeitos das propriedades dos fluidos no fenômeno

do desvio para o ramo lateral.

3. Deve-se desenvolver algum modelo para estudar o comportamento da distribuição da pressão na junta "tê".
4. Deve-se pesquisar o desvio do gás e líquido em diferentes geometrias de junta "tê", como por exemplo "tê" de impacto, e as juntas em forma de "Y".
5. Deve-se estudar as mudanças da espessura da película de líquido (padrão anular) tanto no ramo principal e ramo lateral quando se faz variar as velocidades superficiais do líquido e gás
6. Deve-se estudar a variação da altura do líquido (padrão estratificado) tanto no ramo principal e ramo lateral quando se faz variar as velocidades superficiais do líquido e gás

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZZOPARDI, B.J ; WHALLEY, P.B The effect of flow patterns on two-phase flow in a T junction . Int. J. Multiphase Flow, v.8, n.5, p.491-507, 1982.

ARIRACHAKARAN, S Two-Phase Slug Flow Splitting Phenomenon at a Regular Horizontal Side-Arm Tee. PhD dissertation University of Tulsa . 1990

AZZOPARDI, B. J The Effect of the Side Arm Diameter on the two-phase flow split at a “T” junction Int. J. Multiphase Flow, v.10, n.4, p.509-512, 1984

AZZOPARDI, B. J Dividing two-phase flow at a unction part 1 : annular flow at a vertical T 3 rd International Conference on Multi-Phase Flow Netherlands 1987

AZZOPARDI, B. J; PURVIS, A; GOVAN, H. A Annular Two-Phase Flow Split at an Impacting T Int. J. Multiphase Flow v.13, n.5, p.605-614, 1987

AZZOPARDI, B. J Measurements and Observations of the Split of Annular Flow at a vertical T-Junction Int. J. Multiphase Flow v.14, n.6, p.701-710, 1988

- AZZOPARDI, B. J; SMITH, P. A Two-Phase Flow Split at T Junction: Effect of Side Arm Orientation and Downstream Geometry Int. J. Multiphase Flow v.18, n.6, p.861-875, 1992
- AZZOPARDI, B. J; ROBERTS, P. A; HIBBERD, S The Split of Horizontal Semi-Annular Flow at a large Diameter T-Junction Int. J. Multiphase Flow v.21, n.3, p.455-466, 1995
- BANERJEE, S; McCREERY, G. E Phase Separation of Dispersed Mist and Dispersed annular (Rivulet or Thin Film) Flow in a Tee-I Int. J. Multiphase Flow v.16, n.3, p.429-445, 1990
- BANERJEE,S; McCREERY, G.E Phase Separation of Dispersed Mist and Dispersed annular (Rivulet or Thin Film) Flow in a Tee-II Int. J. Multiphase Flow v.17, n.3, p.309-325, 1991
- BOLONHINI, EDSON HENRIQUE Geometria de Interfase e Gradiente de Pressão em Escoamentos Horizontais Estratificados e Anulares com Dispersão Tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1995
- BUELL, J. R; SOLIMAN, H. M; SIMS, G. E Two-Phase Pressure Drop and Drop and phase distribution at an horizontal Tee Junction Int.J. Multiphase Flow v.20, n.5, p.819-836, 1994
- CHIEN, FOO-SZE Phase Splitting of Wet Steam in Annular Flow Through Horizontal Branch Tee Journal of Petroleum Technology September 1994
- CHIEN, FOO-SZE Phase Splitting of Wet Steam in Annular Flow Through a Horizontal Branching Tee Journal of Petroleum Technology May 1996
- FOUDA, A. E. and Rhodes, E. Two-Phase Annular Flow Stream Division Trans. Instn. Chem. Engrs. p. 353-363, 1972
- FOUDA, A. E. and Rhodes, E. Two-Phase Annular Flow Stream Division

- in a simple Tee. Trans. Instn. Chem. Engrs. p. 354-360, 1974
- GROEN, J. S; MUDDE, R. F; VAN DEN AKKER, H. E. A Two-Phase Flow Redistribution Phenomena in a Large -Junction Int. J. Multiphase Flow v.19, n.4, p563-573, 1993
- HONG, K.C; GRISTON, S. Two-phase flow splitting at na impacting tee Journal of petroleum technology, Production & Facilities, august 1995
- HONG, K.C Two-phase flow splitting at a pipe tee Journal of petroleum technology april 1977
- HENRY, J.A.R Dividing annular flow in a horizontal tee Int. J. Multiphase Flow, v.7, p.343-355 1981
- HWANG, S. T; SOLIMAN, H. M; LAHEY JR, R. T Phase Separation in Dividing Two-Phase Flows Int. J. Multiphase Flow v.14, n.4, p.439-458, 1988
- LAHEY JR, R.T; AZZOPARDI, B.J; COX, M Modelling two-phase flow Division at T junctions 2nd International Conference on Multi-phase Flow London, England 1988
- ORANJE, L Condensate Behavior in gas pipelines is predictable The Oil and Gas p.39-44, 1973
- SLIWICKI, E ; MIKIELEWICZ, J Analysis of an annular-mist flow model in a T-junction. Int. J. Multiphase Flow, v.14, n.3, p.321-331, 1981
- SALLET, D. W; POPP, M. Experimental investigation of one and two-phase flow through a tee junction. International Conference on the Physical Modelling of Multi-Phase Flow, England 1983

- SABA, N; LAHEY JR, R.T The analysis of phase separation phenomena in branching conduits. Int. J. Multiphase Flow, v.10, n.1, p. 1-20, 1984
- SEEGER, W; REIMANN, J; MULLER, U Two-Phase Flow in a T-Junction with a Horizontal Inlet Part I : Phase Separation Int. J. Multiphase Flow, v.12, n.4, p.575-585, 1986
- SEEGER, W; REIMANN, J Two-Phase Flow in a T-Junction with a Horizontal Inlet Part II: Pressure Differences Int. J. Multiphase Flow, v.12, n.4, p.587-608, 1986
- SHOHAM, O; BRILL, J.P; TAITEL, Y Two-phase flow splitting in a tee junction – experiment and modelling Chemical Engineering Science, v.42, n.11, p.2667-2676, 1987
- SIMÕES CARNEIRO, F. A Simulação Numérica da Separação de um escoamento Bifásico Gás-Líquido em um Tê Tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991
- SHOHAM, O; MARTI, S A Unified Model for Stratified-Wavy Two-Phase Flow Splitting at a Reduced T-Junction with an inclined Branch Arm Int. J. Multiphase Flow v.23, n.4, p.725-748, 1997
- STEINAR, E Experimental study of gas-liquid flow in a pipe tee. Tese de mestrado. The University of Tulsa. 1979
- TAITEL, Y ; DUKLER, A.E A model for predicting flow regime transitions in Horizontal and near horizontal gas-liquid flow IChE Journal v.22, n.1, p.47-54, 1976
- UEDA, T; KIM, K Dryout Heat Flux and Size of Entrained Drops in a Flow Boiling System Bulletin of the JSME, v.25, n.200, p.225-233, 1982

APÊNDICE A

Modelo geométrico para fluxo estratificado e fluxo anular

A.1 Fluxo estratificado

A figura A1 exibe as relações geométricas para calcular $F_{LRL} = A_{LRL}/A_L$ como uma função de $F_{GRL} = A_{GRL}/A_G$.

Considerando h , a altura do líquido, é “ a ”, a distancia desde a linha de fluxo A-B-C (ver as figuras 3.1 e 3.2) até a parede da tubulação. Então:

$$A_L = A_{LRP} + A_{LRL} = \frac{1}{4}D^2 \left[\pi - \text{Cos}^{-1} \left(2 \frac{h}{D} - 1 \right) + \left(2 \frac{h}{D} - 1 \right) \sqrt{1 - \left(2 \frac{h}{D} - 1 \right)^2} \right]$$

$$A_{RL} = A_{GRL} + A_{LRL} = \frac{1}{4}D^2 \left[\pi - \text{Cos}^{-1} \left(2 \frac{a}{D} - 1 \right) + \left(2 \frac{a}{D} - 1 \right) \sqrt{1 - \left(2 \frac{a}{D} - 1 \right)^2} \right]$$

$$S_i = D \sqrt{1 - \left(2 \frac{h}{D} - 1 \right)^2}$$

$$b = \frac{1}{2}(D - S_i)$$

$$A_b = \frac{1}{4}D^2 \left[\pi - \text{Cos}^{-1} \left(2 \frac{b}{D} - 1 \right) + \left(2 \frac{b}{D} - 1 \right) \sqrt{1 - \left(2 \frac{b}{D} - 1 \right)^2} \right]$$

$$S_b = D \sqrt{1 - \left(2 \frac{b}{D} - 1 \right)^2}$$

Assim

$$A_{LRL} = \frac{1}{2} [A_{RL} - (a-b)S_b - A_b]$$

$$A_{GRL} = A_{RL} - A_{LRL}$$

e finalmente

$$F_{GRL} = \frac{A_{GRL}}{A_G}$$

$$F_{LRL} = \frac{A_{LRL}}{A_L}$$

Observar que para $b > a$ $A_{LRL} = 0$ é $A_{GRL} = A_G$, enquanto para $a > b + S_i$
 $A_{LRL} = A_L$ é $A_{GRL} = A_{RL} - A_L$.

;

A 2 Fluxo anular

A figura A2 exibe as relações geométricas utilizadas para desenvolver o modelo geométrico para fluxo anular.

Considerando δ , a espessura da película de líquido, é a , a distancia desde a linha de fluxo A-B-C (ver as figuras 3.1 e 3.2) até a parede da tubulação. Então:

$$A_{RL} = A_{GRL} + A_{LRL} = \frac{1}{4} D^2 \left[\pi - \text{Cos}^{-1} \left(2 \frac{a}{D} - 1 \right) + \left(2 \frac{a}{D} - 1 \right) \sqrt{1 - \left(2 \frac{a}{D} - 1 \right)^2} \right]$$

$$D_G = D - 2\delta$$

$$A_G = A_{GRP} + A_{GRL} = \frac{\pi}{4} D_G^2$$

$$A_L = A_{LRL} + A_{LRP} = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_G^2)$$

$$b = a - \delta$$

Assim

$$A_{GRL} = \frac{1}{4} D_G^2 \left[\pi - \text{Cos}^{-1} \left(2 \frac{b}{D_G} - 1 \right) + \left(2 \frac{b}{D_G} - 1 \right) \sqrt{1 - \left(2 \frac{b}{D_G} - 1 \right)^2} \right]$$

$$A_{LRL} = A_{RL} - A_{GRL}$$

e finalmente

$$F_{LRL} = \frac{A_{LRL}}{A_L}$$

$$F_{GRL} = \frac{A_{GRL}}{A_G}$$

Observar que para $\alpha < \delta$ $A_{GRL} = 0$ é $A_{LRL} = A_{RL}$, enquanto que para $\alpha > D_G + \delta$ $A_{GRL} = A_G$ e $A_{LRL} = A_{RL} - A_G$.

APÊNDICE B

Calculo da altura do líquido e espessura da película de líquido

O calculo da altura do líquido, h , para fluxo estratificado é a espessura da película de líquido δ para fluxo anular será feito, seguindo o método de Taitel e Dukler (1976). Os balanços de momentum sobre as fases do líquido e gás são:

$$-A_L \frac{dP}{dX} - \tau_L S_L + \tau_i S_i = 0 \quad (\text{B.1})$$

$$-A_G \frac{dP}{dX} - \tau_G S_G - \tau_i S_i = 0 \quad (\text{B.2})$$

onde (ver figura A1 e A2) A_L e A_G são as áreas ocupadas pôr o líquido e o gás respectivamente . τ_L , τ_G , é τ_i são as tensões de cisalhamento do líquido, gás é interfacial que atuam sobre os perímetros S_L , S_G e S_i , respectivamente.

Colocando em evidencia, $\frac{dP}{dX}$, nas equações (B.1) e (B.2) e logo combinando as dois equações o resultado é o seguinte

$$\tau_G \frac{S_G}{A_G} - \tau_L \frac{S_L}{A_L} + \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_L} + \frac{1}{A_G} \right) = 0 \quad (\text{B.3})$$

As tensões de cisalhamento são determinadas da seguinte forma

$$\tau_L = f_L \frac{\rho_L V_L^2}{2}; \quad \tau_G = f_G \frac{\rho_G V_G^2}{2}; \quad \tau_i = f_i \frac{\rho_G V_G^2}{2} \quad (\text{B.4})$$

$$f_L = C_L \left(\frac{D_L V_L}{\nu_L} \right)^{-n} \quad ; \quad f_G = C_G \left(\frac{D_G V_G}{\nu_G} \right)^{-m} \quad (\text{B.5})$$

D_L e D_G são os diâmetros hidráulicos avaliados da seguinte forma

$$D_L = \frac{4A_L}{S_L} \quad ; \quad D_G = \frac{4A_G}{S_L + S_i} \quad (\text{B.6})$$

As equações (B.3) até (B.6) são válidas tanto para fluxo estratificado como para fluxo anular, com a só diferença que $S_G = 0$ para fluxo anular. O apêndice A descreve as relações geométricas para calcular A_L , A_G , S_L , S_G e S_i como função de h ou δ . Observe que as velocidades das fases são também funções de h ou δ , porque

$$V_L = V_{sl} \frac{A}{A_L} \quad \text{e} \quad V_G = V_{sg} \frac{A}{A_G} \quad (\text{B.7})$$

Os coeficientes do fator de fricção são determinados da seguinte maneira. Para fluxo turbulento, $C_G = C_L = 0.046$, $m = n = 0.2$; para fluxo laminar, $C_G = C_L = 16$, $m = n = 1.0$.

O problema mais difícil é a determinação do fator interfacial de fricção f_i ; Shoham et al (1987) sugerem utilizar a correlação de Wallis para fluxo anular,

$$f_i = f_G \left(1 + 300 \frac{\delta}{D} \right) \quad (\text{B.8})$$

e para fluxo estratificado, Shoham et al (1987) sugerem utilizar o valor constante de $f_i = 0.009$.

A equação (B.3) com o auxílio das equações (B.4) até (B.8) formam um sistema de equações implícitas para h e δ . Este sistema pode ser resolvido facilmente com qualquer técnica iterativa.

APÊNDICE C

Calibrações de Instrumentos

C.1 Placas de orifício

C.1.1 Placas de medição da vazão de ar

Na medição da vazão de ar no sistema experimental foram usadas seis placas de orifício, sendo tres placas com diâmetro de orifício de 1/2 in e tres placas com diâmetro de orifício de 3/4 in, instaladas em tubulação de 1 in . A pressão diferencial e a pressão a montante da placa foram medidas com manômetros de coluna de água. A temperatura de escoamento foi medida com um termômetro de mercúrio e a pressão atmosférica com um barômetro digital. A equação utilizada para a medição de vazões mássicas de gás com placas de orifício foi (Streeter & Wylie 1980):

$$W_g = (CY)A_0\sqrt{2\rho_g\Delta P_p} \quad (C-1)$$

onde W_g é a vazão mássica de ar na placa (kg/s), C o coeficiente de descarga (adimensional), Y o fator de expansão (adimensional), A_0 a área do orifício (m^2), ρ_g a massa específica do ar (kg/m^3) e ΔP_p a pressão diferencial na placa (N/m^2). O ar, nas condições do experimento, foi admitido como um gás ideal, ou seja:

$$\rho_{g,p} = \frac{P_{mon,p}}{RT_{mon,p}} \quad (C-2)$$

onde $P_{mon,p}$ é a pressão a montante da placa (N/m^2), $T_{mon,p}$ a temperatura do ar a montante da placa e (K) e R é a constante do gás.

Para a aferição das placas de orifício tomou-se como referência um laminador de fluxo marca MERIAN INSTRUMENTS, modelo 50MW20-2, cuja curva de vazão volumétrica (Q_{LF} em SCF), fornecida pelo fabricante, é função da pressão diferencial no equipamento. A pressão a montante e a pressão diferencial do laminador de fluxo foram medidas com manômetros de coluna de água. Para a temperatura de escoamento foi considerado o mesmo valor medido para a placa de orifício.

Por sugestão do fabricante, usou-se a seguinte equação para determinação da vazão mássica de ar através do laminador:

$$W_{g_{LF}} = \left(\frac{Q_{LF}}{1766} \right) \left(\frac{P_{mon_{LF}}}{101320} \right) \left(\frac{294,44}{T_{mon_{LF}}} \right) \left(\frac{1,8187 * 10^{-5}}{\mu_{g_{LF}}} \right) \quad (C-3)$$

onde $W_{g_{LF}}$ é a vazão mássica de ar medida com o laminador (kg/s), Q_{LF} a vazão lida na curva de aferição do fabricante em função da pressão diferencial no laminador de fluxo (SCF), $P_{mon_{LF}}$ a pressão a montante do laminador (N/m²), $T_{mon_{LF}}$ a temperatura a montante do laminador (K) e $\mu_{g_{LF}}$ a viscosidade dinâmica do ar (N.s/m²) que foi determinada pela seguinte equação:

$$\mu_{g_{LF}} = 4,612 * 10^{-8} (T_{mon_{LF}} - 294,44) + 1,8187 * 10^{-5} \quad (C-4)$$

Assim, a aferição das placas consistiu na determinação de valores adequados para o grupo (CY) da equação (C-1). Esses valores foram levantados através da equação:

$$(CY) = \frac{W_{g_{LF}}}{A_0 \sqrt{2 \rho_{g_{LF}} \Delta P_P}} \quad (C-5)$$

os valores experimentais de (CY) assim obtidos foram correlacionadas com $\left(\frac{\Delta P}{P} \right)$, como pode ser visto nas Figuras (C-1) e (C-2). Por regressão linear foram então determinadas as seguintes curvas de ajuste para os valores de (CY):

$$\text{Placa de 1/2 in} \quad (CY) = 0.7313 - 0.384 \left(\frac{\Delta P_P}{P_{mon_p}} \right) \quad (C-6)$$

$$\text{Placa de 3/4 in} \quad (CY) = 0.8991 - 1.0957 \left(\frac{\Delta P_P}{P_{mon_p}} \right) \quad (C-7)$$

Substituindo-se (C-6) e (C-7) em (C-1) tem-se:

$$\text{Placa de 1/2 in} \quad W_g = \left[0,7313 - 0,384 \left(\frac{\Delta P_P}{P_{mon_p}} \right) \right] A_0 \sqrt{2\rho_{g_p} \Delta P_P} \quad (C-8)$$

$$\text{Placa de 3/4 in} \quad W_g = \left[0,8991 - 1,0957 \left(\frac{\Delta P_P}{P_{mon_p}} \right) \right] A_0 \sqrt{2\rho_{g_p} \Delta P_P} \quad (C-9)$$

O resultado final deste procedimento de medição e aferição pode ser apreciado nas Figuras (C-3) e (C-4).

;

C-1.2 Análise de erro

A seguir será feita uma estimativa aproximada da incerteza na determinação da vazão de ar.

Da equação de medição (C-1), pode-se escrever:

$$\left| \frac{\Delta W_g}{W_g} \right| = \left[\left(\frac{\Delta CY}{CY} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho_g}{2\rho_g} \right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta P)}{2(\Delta P)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (C-10)$$

E da equação de aferição (C-5):

$$\left| \frac{\Delta CY}{CY} \right| = \left[\left(\frac{\Delta W_g}{W_g} \right)_{LF}^2 + \left(\frac{\Delta \rho_g}{2\rho_g} \right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta P)}{2(\Delta P)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (C-11)$$

considerando-se uma incerteza de $\pm 2.0 \%$ na determinação da vazão mássica com o laminador de fluxo, $\pm 2.0 \%$ no cálculo da massa específica do ar a montante da placa, $\pm 2.0 \%$ na leitura da pressão diferencial, nas vazões mais baixas (pior caso), encontra-se:

$$\left| \frac{\Delta(CY)}{CY} \right| = \left[(0,020)^2 + \left(\frac{0,020}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,020}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = 0,024$$

ou seja, a incerteza na definição do grupo (CY) é de $\pm 2,4 \%$. Substituindo estes valores na equação (C-10), chega-se finalmente a:

$$\left| \frac{\Delta W_g}{W_g} \right| = \left[(0,024)^2 + \left(\frac{0,020}{2} \right)^2 + \left(\frac{0,020}{2} \right)^2 \right]^{1/2} = 0,028$$

Consequentemente, as medições de vazão de ar foram calculadas com uma incerteza estimada em $\pm 2,80 \%$.

C.2 Medidores de pressão

Os gradientes de pressão através da junta “tê”, foram medidas com um transmissor de membrana tipo Validyne® e foram calibrados utilizando-se como padrão de pressão um tubo em “U” com água e capacidade para medir pressões de até 1400 mmca. Uma das hastes do tubo em “U” foi aberta para a atmosfera e a outra interligada ao transmissor de membrana a ser calibrado através de uma mangueira. A esta mangueira foi também interligada uma seringa de 20 ml cujo acionamento, pela adição ou retirada de ar, fornecia a pressão desejada, que era lida no tubo em “U”. Segue procedimento utilizado na calibração do medidor.

- O lado positivo do transmissor de membrana é interligado a haste do tubo em “U” que encontra-se submetida à pressão, e o lado negativo é mantido aberto para a atmosfera.
- Conecta-se, via cabo, o Validyne® ao transmissor de membrana.
- Liga-se o Validyne® através da chave liga - desliga localizada em sua parte frontal.
- Posiciona-se a chave Range, localizada ao lado da chave liga x desliga, na posição LOW.
- Neste momento os níveis de água do tubo em “U” devem ser iguais, pois nenhuma pressão deve estar aplicada ao transmissor de membrana.
- Na parte frontal do Validyne® há um ajustador para o zero e um outro para o Span. O ajustador do zero deve ser posicionado de tal forma que o visor do Validyne® indique 0,00. Feito isto, trava-se este ajustador de modo que não haja qualquer mudança de seu posicionamento enquanto o Validyne® for utilizado.
- Muda-se a chave Range para a posição HI.
- Devido aos baixos valores de pressão esperadas através da junta “tê”, utilizou-se o diafragma N°30 que tem uma faixa de pressão de trabalho de (0 – 880 mmca).
- Ajusta-se o Span, localizado ao lado da chave liga - desliga de tal forma que o visor do Validyne® apresente o valor 100,00. Trava-se este ajustador.
- Feito isto, o Validyne® está pronto para ser utilizado.

No Gráfico (C-5) observa-se a calibração do transmissor de pressão com o diafragma N°30. A pressão absoluta (tomada 1) foi medida com um transmissor de pressão tipo Validyne® que tem o diafragma N°40 e foi calibrado com um manômetro de tubo de Bourdon. Segundo o fabricante o transmissor de pressão tipo Validyne® tem um erro de leitura de $\pm 0.5\%$ do fundo de escala.

Ajuste de curva para os valores de (CY)

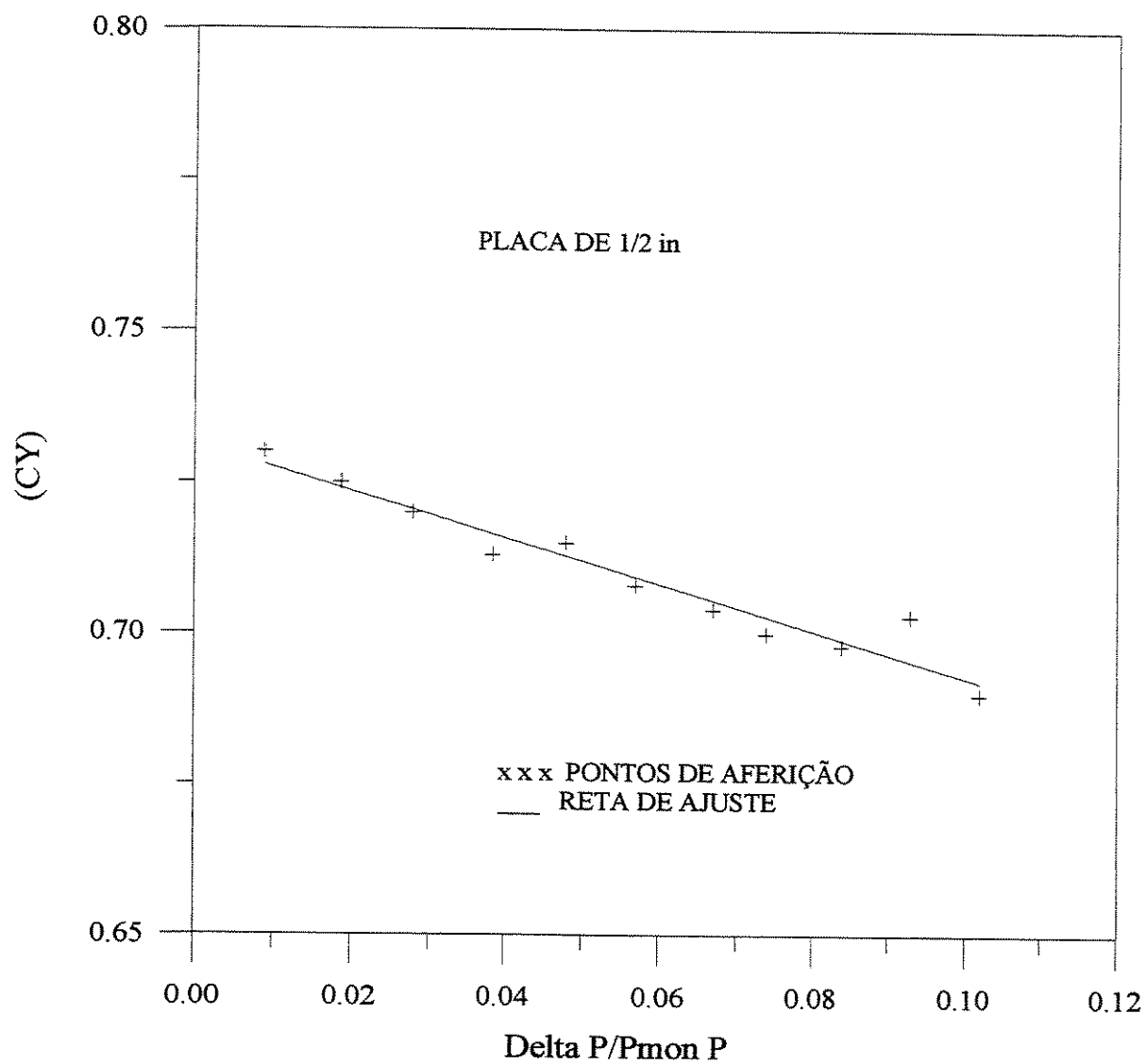


Figura C-1 Aferição da placa de 1/2 in

Ajuste de curva para os valores de (CY)

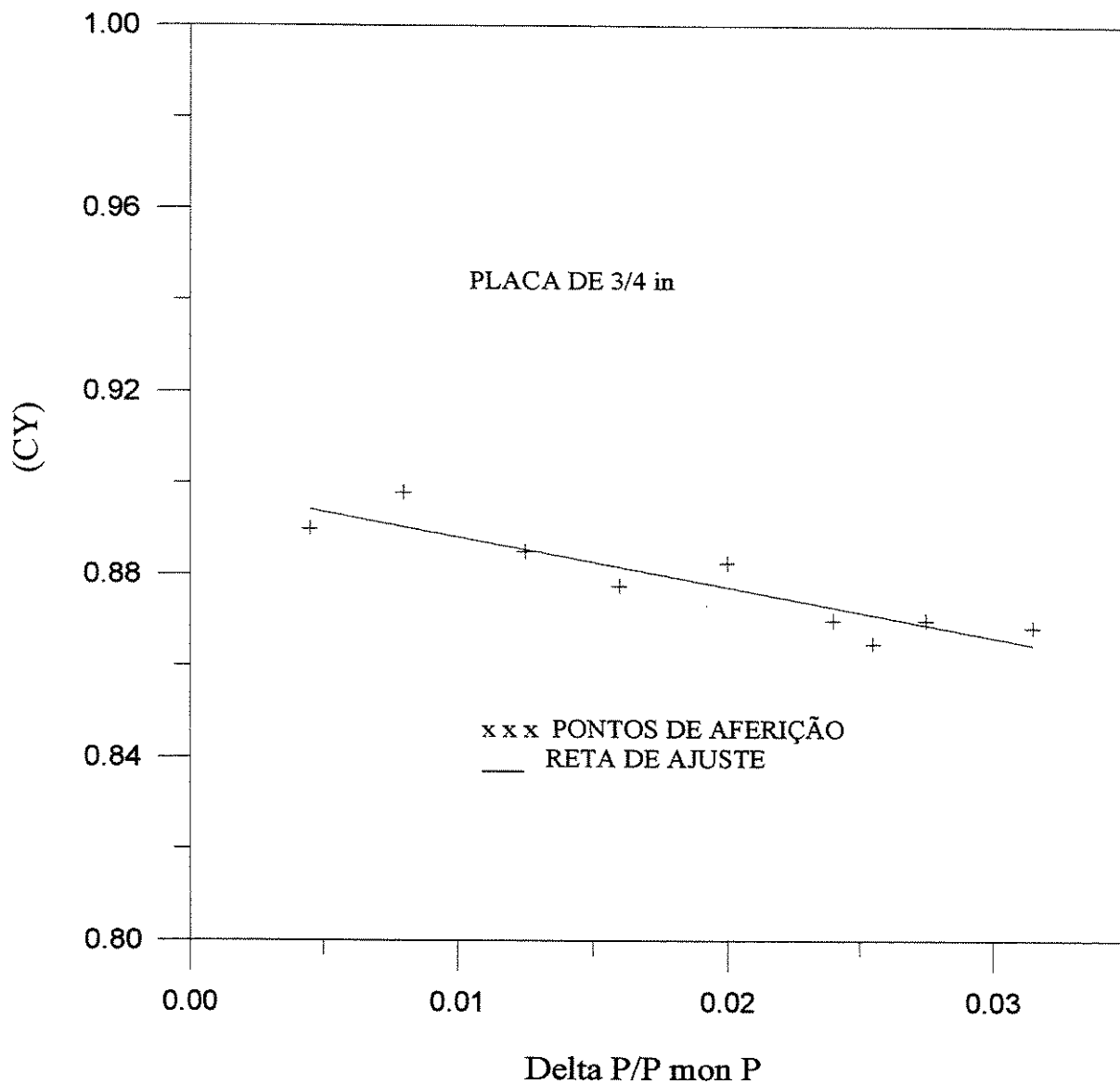


Figura C-2 Aferição da placa de 3/4 in

Vazão de ar vs Delta H

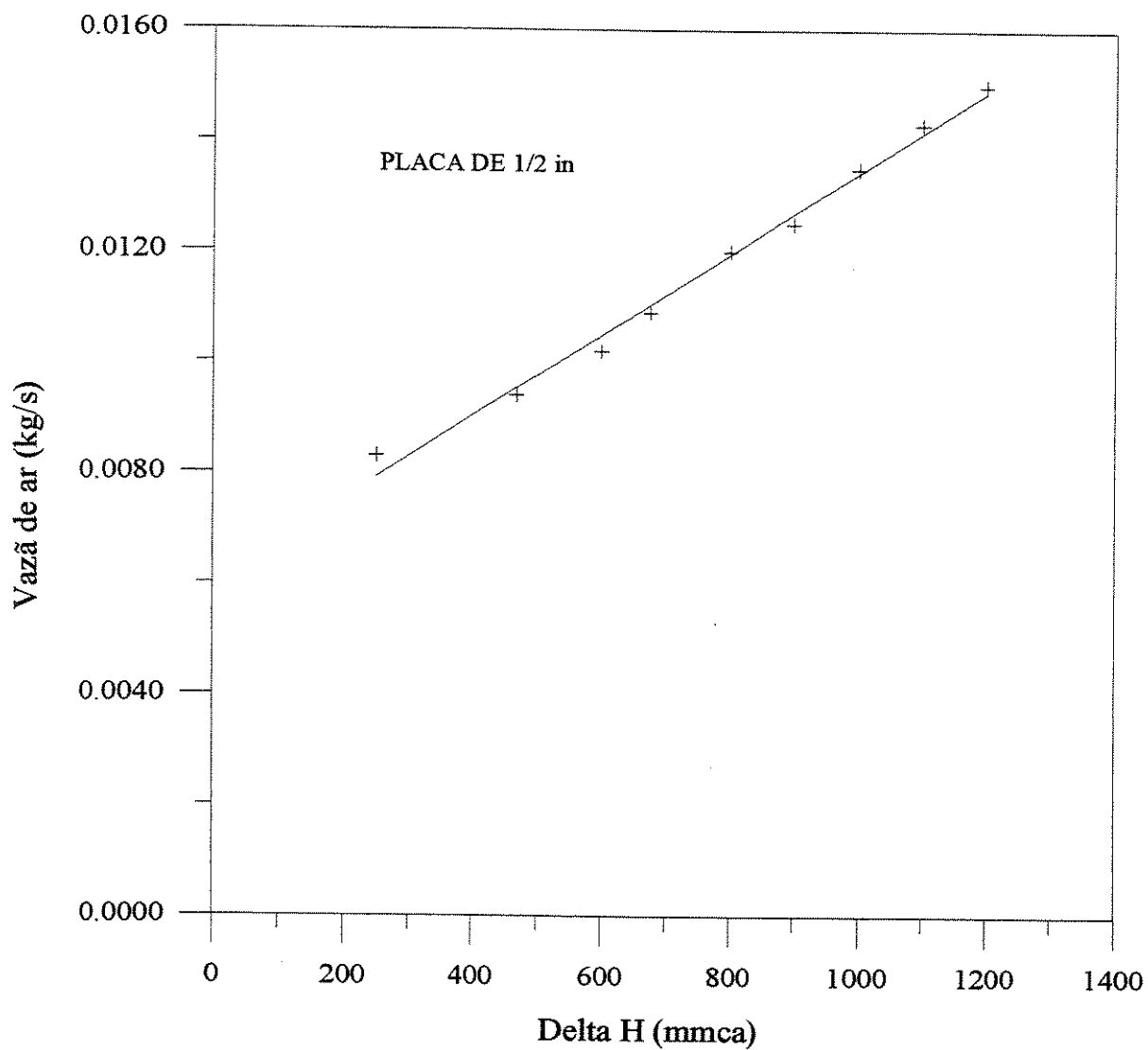


Figura C-3 Calibração da placa de medição da vazão de ar

Vazão de ar vs Delta H

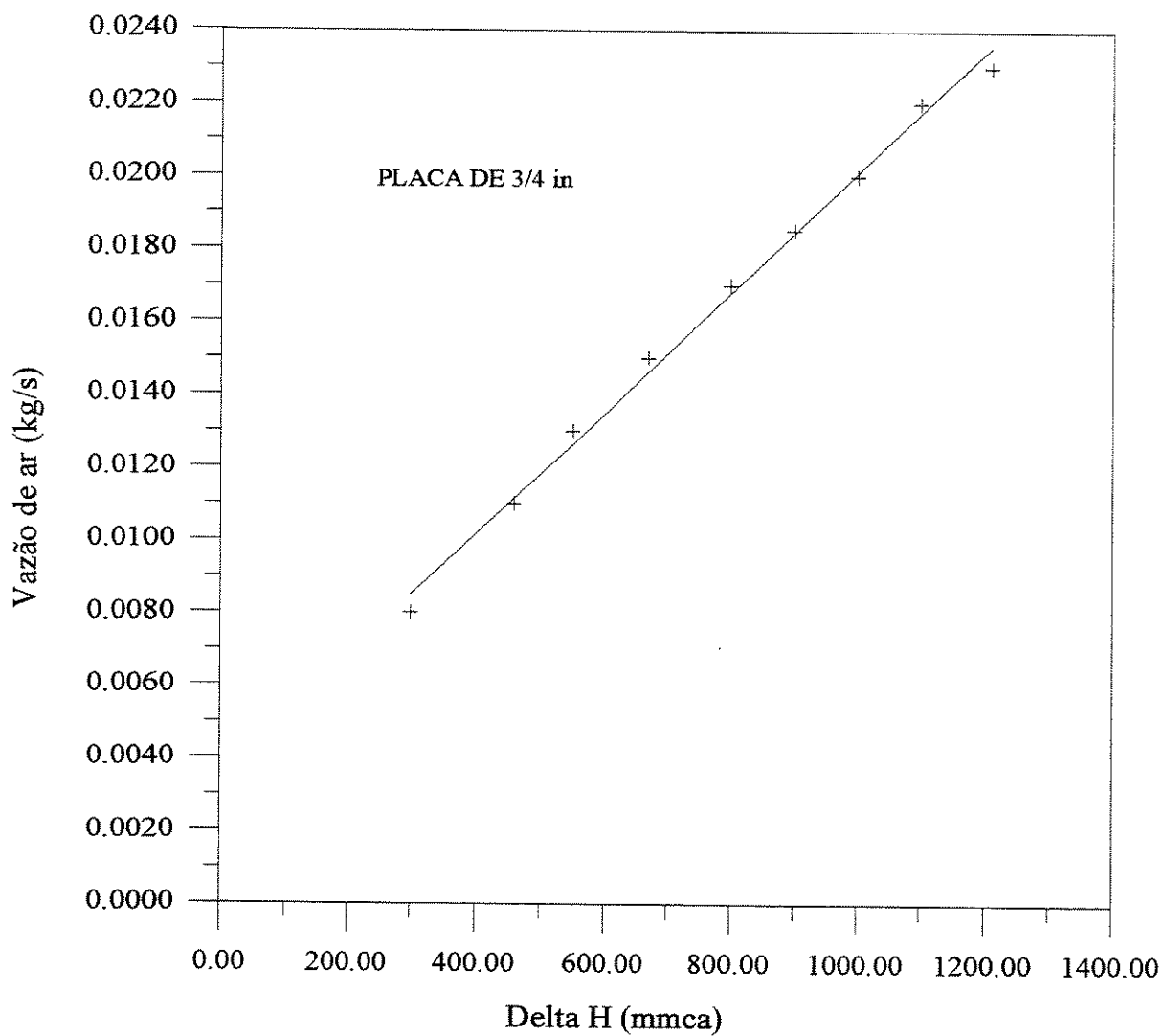


Figura C-4 Calibração da placa de medição da vazão de ar

Calibração do transmissor de pressão

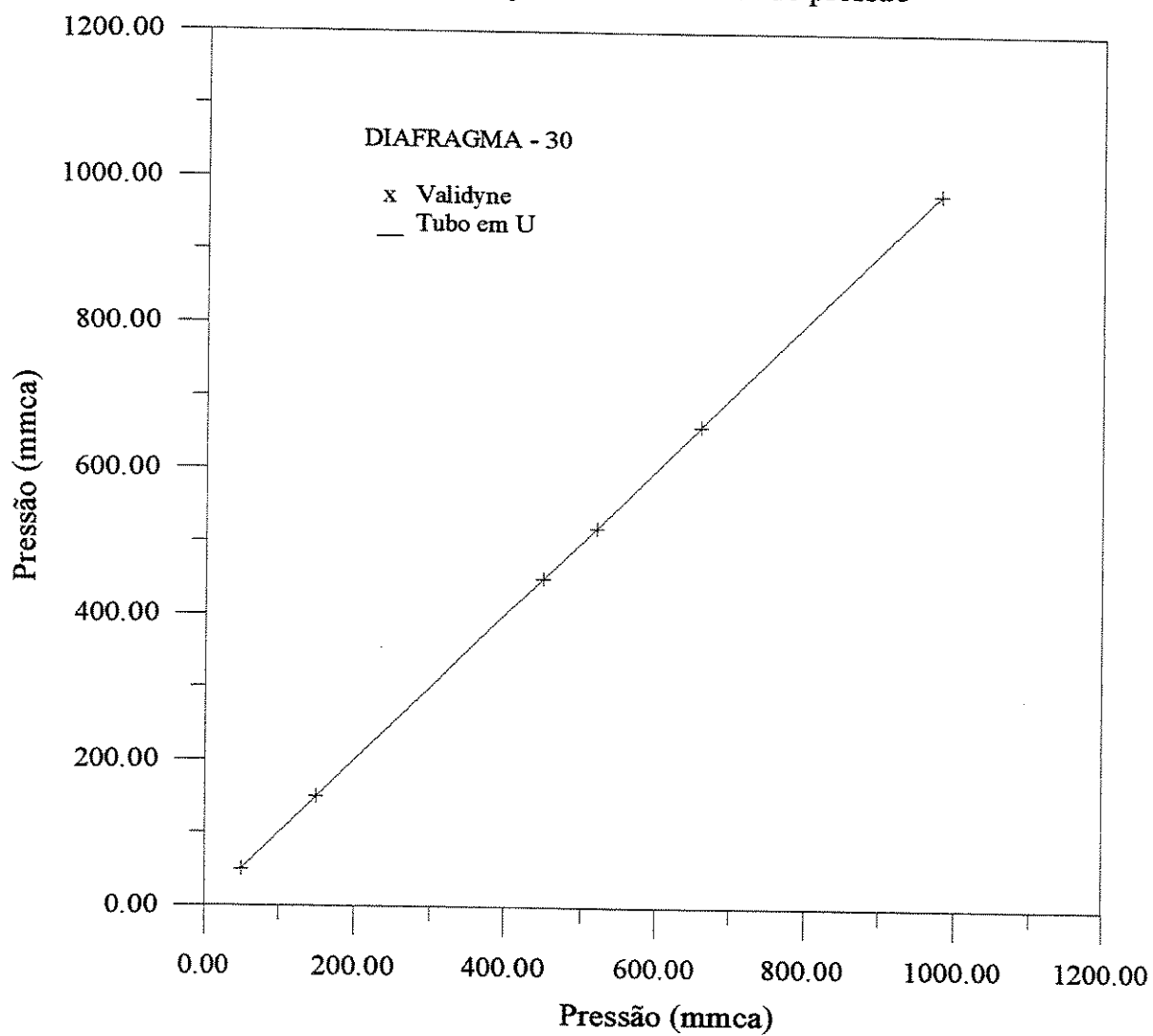


Figura C-5 Curva de calibração do transmissor de pressão

APÊNDICE D

D-1 TESTES PARA PADRÃO DE FLUXO ESTRATIFICADO JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO REGULAR

TESTE --	TEMPO min.	VSG m/s	VSL cm/s	P1 bar	T °C	FGRL (%)	FLRL (%)
1	3	5.80	0.247	0.557	26.4	10.7	0.46
2	3	5.81	0.247	0.583	26.4	22.4	36.7
3	3	7.50	0.247	0.567	26.4	36.8	67.9
4	3	10.00	0.247	0.532	26.8	49.1	91.3
5	3	14.3	0.247	0.529	26.2	57.7	92.1
6	3	5.82	0.445	0.564	26.2	22.9	1.76
7	3	7.48	0.445	0.623	26.4	52.8	52.9
8	3	10.2	0.445	0.684	26.4	78.4	86.6
9	3	14.3	0.445	0.685	26.4	79.4	88.4
10	3	14.2	0.445	0.685	26.2	77.2	89.8
11	3	14.5	0.445	0.685	26.2	78.3	90.2
12	3	5.82	0.795	0.674	25.8	36.9	5.86
13	3	6.45	0.795	0.685	25.8	66.4	53.4
14	3	7.36	0.795	0.686	25.8	78.2	71.9
15	3	10.26	0.795	0.670	25.8	91.3	82.1
16	3	13.8	0.795	0.673	25.8	96.3	83.8
17	3	5.80	1.479	0.672	25.8	41.9	10.1
18	3	7.53	1.479	0.676	25.8	73.4	48.3
19	3	10.4	1.479	0.679	25.8	93.6	66.4
20	3	14.2	1.479	0.683	25.8	92.4	73.6
21	3	14.3	1.479	0.683	25.8	93.7	79.3
22	3	5.81	2.65	0.682	27.2	36.9	16.3
23	3	6.66	2.65	0.685	27.2	58.8	46.8
24	3	7.22	2.65	0.688	27.2	72.9	49.1
25	3	10.31	2.65	0.689	27.2	92.2	54.8
26	3	14.3	2.65	0.689	27.2	93.4	73.3
27	3	5.80	5.091	0.681	27.2	38.4	22.3
28	3	7.51	5.091	0.683	27.2	66.8	38.7
29	3	10.2	5.091	0.691	27.2	93.8	51.1
30	3	14.4	5.091	0.690	27.2	93.6	61.2
31	3	14.3	5.091	0.692	27.2	92.1	69.8

D-2 **TESTE PARA PADRÃO DE FLUXO ESTRATIFICADO**
JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO IRREGULAR

TESTE ---	TEMPO min.	Vsg m/s	Vsl cm/s	P1 bar	T °C	FGRL (%)	FLRL (%)
1	3	5.80	0.247	0.506	27.4	10.6	1.3
2	3	5.78	0.247	0.574	27.4	10.1	29.8
3	3	7.54	0.247	0.563	27.4	28.9	79.6
4	3	10.60	0.247	0.529	27.6	44.2	82.4
5	3	14.27	0.247	0.530	27.6	56.8	91.1
6	3	5.80	0.445	0.572	27.4	19.4	6.6
7	3	7.44	0.445	0.644	27.4	49.8	31.6
8	3	10.4	0.445	0.687	27.4	58.4	84.1
9	3	10.8	0.445	0.687	27.4	60.1	89.3
10	3	14.4	0.445	0.689	27.4	75.8	90.6
11	3	14.2	0.445	0.688	27.4	74.3	91.2
12	3	5.78	0.795	0.678	27.4	33.8	11.8
13	3	6.46	0.795	0.682	27.2	61.6	35.2
14	3	7.33	0.795	0.689	27.2	72.3	58.7
15	3	10.11	0.795	0.670	26.4	86.7	69.3
16	3	13.8	0.795	0.673	26.4	95.2	86.8
17	3	5.67	1.479	0.677	26.4	36.8	21.9
18	3	7.44	1.479	0.679	26.4	61.9	49.9
19	3	10.2	1.479	0.680	26.4	87.1	60.1
20	3	14.5	1.479	0.683	26.4	89.6	77.7
21	3	5.78	2.65	0.679	26.4	33.8	26.5
22	3	6.64	2.65	0.682	26.4	51.3	31.4
23	3	7.31	2.65	0.688	26.4	69.8	40.6
24	3	10.35	2.65	0.692	26.8	92.3	48.2
25	3	14.27	2.65	0.695	26.8	93.1	66.6
26	3	5.84	5.091	0.683	26.8	35.9	33.6
27	3	7.53	5.091	0.684	26.8	62.6	37.2
28	3	10.5	5.091	0.691	27.2	91.6	41.9

D-3

TESTE PARA PADRÃO DE FLUXO ANULAR
JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO REGULAR

TESTE	TEMPO min.	Vsg m/s	Vsl cm/s	P1 bar	T °C	FGRL (%)	FLRL (%)
1	3	36.6	0.247	0.59	26	33.3	33.4
2	3	41.1	0.247	0.60	26	39.6	66.8
3	3	43.3	0.247	0.57	26	64.2	92.4
4	3	55.1	0.247	0.61	26	65.4	94.6
5	3	37.5	0.445	0.60	26	35.8	32.1
6	3	39.7	0.445	0.62	26	42.6	64.3
7	3	42.2	0.445	0.61	26	66.2	83.4
8	3	54.3	0.445	0.62	26	68.9	91.2
9	3	36.9	0.795	0.59	26	36.8	30.7
10	3	40.2	0.795	0.63	26	70.1	80.6
11	3	54.2	0.795	0.61	26	71.4	85.3
12	3	55.3	0.795	0.64	26	72.6	89.4
13	3	37.2	1.479	0.62	26	37.4	30.6
14	3	41.8	1.479	0.65	26	67.8	77.4
15	3	40.2	1.479	0.63	26	69.4	80.9
16	3	55.5	1.479	0.64	26	72.4	85.6
17	3	36.6	2.65	0.59	26	39.8	30.7
18	3	41.1	2.65	0.62	26	79.4	72.8
19	3	56.6	2.65	0.60	26	80.2	77.3
20	3	56.9	2.65	0.63	26	81.1	80.2
21	3	37.4	2.53	0.61	26	41.4	29.4
22	3	42.1	2.53	0.59	26	50.6	47.6
23	3	54.3	2.53	0.63	26	67.4	59.9
24	3	56.1	2.53	0.62	26	83.9	78.4

D-4

TESTE PARA PADRÃO DE FLUXO ANULAR
 JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO IRREGULAR

TESTE	TEMPO min.	Vsg m/s	Vsl m/s	P1 bar	T °C	FGRL (%)	FLRL (%)
1	3	36.4	0.247	0.57	25.4	30.9	31.2
2	3	41.3	0.247	0.59	25.4	37.4	64.3
3	3	43.5	0.247	0.568	25.6	61.1	92.1
4	3	55.0	0.247	0.60	25.6	63.2	93.7
5	3	37.1	0.445	0.62	25.8	33.8	31.1
6	3	39.4	0.445	0.60	26.4	40.7	63.1
7	3	43.2	0.445	0.61	26.2	61.6	80.9
8	3	54.5	0.445	0.61	26.0	65.4	89.4
9	3	35.6	0.795	0.58	25.6	33.9	26.8
10	3	40.3	0.795	0.64	26.4	63.3	71.4
11	3	54.5	0.795	0.62	26.8	69.8	84.2
12	3	55.1	0.795	0.63	27.4	69.9	84.6
13	3	37.3	1.479	0.60	27.2	36.8	26.8
14	3	42.0	1.479	0.62	27.2	61	70.4
15	3	40.2	1.479	0.62	27.4	62.7	79.1
16	3	55.4	1.479	0.64	26.6	66.8	81.2
17	3	36.4	2.65	0.60	26.0	38.8	28.2
18	3	41.2	2.65	0.63	26.2	72.4	68.4
19	3	56.6	2.65	0.62	26.4	79.8	72.8
20	3	56.9	2.65	0.64	26.4	79.8	77.3
21	3	37.2	2.53	0.60	26.8	40.5	31.7
22	3	42.1	2.53	0.6	26.2	47.4	45.9
23	3	54.1	2.53	0.62	26.0	59.1	55.2

D-5

DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ESTRATIFICADO)
 JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO REGULAR

TESTE # 4

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO LATERAL
---	mmca	mmca	mmca
2	-2.3	*****	*****
3	-5.1	*****	*****
4	-7.4	*****	*****
5	-7.3	*****	*****
6	*****	0.12	*****
7	*****	0.23	*****
8	*****	0.24	*****
9	*****	0.33	*****
10	*****	0.21	*****
11	*****	*****	-27.7
12	*****	*****	-24.3
13	*****	*****	-23.1
14	*****	*****	-20.2
15	*****	*****	-19.6

D-6

DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ESTRATIFICADO)
 JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO REGULAR

TESTE # 5

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO LATERAL
---	mmca	mmca	mmca
2	-2.2	*****	*****
3	-5.2	*****	*****
4	-7.2	*****	*****
5	-7.1	*****	*****
6	*****	0.11	*****
7	*****	0.21	*****
8	*****	0.22	*****
9	*****	0.33	*****
10	*****	0.22	*****
11	*****	*****	-30.3
12	*****	*****	-24.8
13	*****	*****	-24.1
14	*****	*****	-23.3
15	*****	*****	-22.7

D-7

DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ESTRATIFICADO)
 JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO IRREGULAR

TESTE # 4

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA	SAIDA	SAIDA
	RAMO PRINCIPAL	RAMO PRINCIPAL	RAMO LATERAL
—	mmca	mmca	mmca
2	-2.3	*****	*****
3	-5.1	*****	*****
4	-7.4	*****	*****
5	-7.3	*****	*****
6	*****	0.21	*****
7	*****	0.31	*****
8	*****	0.41	*****
9	*****	0.52	*****
10	*****	1	*****
11	*****	*****	-28.6
12	*****	*****	-24.9
13	*****	*****	-25.1
14	*****	*****	-25.8
15	*****	*****	-26.1

D-8

DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ESTRATIFICADO)
 JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO IRREGULAR

TESTE # 5

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA	SAIDA	SAIDA
	RAMO PRINCIPAL	RAMO PRINCIPAL	RAMO LATERAL
—	mmca	mmca	mmca
2	-2.3	*****	*****
3	-5.1	*****	*****
4	-7.4	*****	*****
5	-7.3	*****	*****
6	*****	0.2	*****
7	*****	0.32	*****
8	*****	0.44	*****
9	*****	0.52	*****
10	*****	1	*****
11	*****	*****	-35.2
12	*****	*****	-29.6
13	*****	*****	-28.4
14	*****	*****	-30.2
15	*****	*****	-30.3

D-9

DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ANULAR)
JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO REGULAR

TESTE # 2

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO LATERAL
---	mmca	mmca	mmca
2	-25.6	*****	*****
3	-52.8	*****	*****
4	-60.4	*****	*****
5	-71.6	*****	*****
6	*****	116.4	*****
7	*****	122.8	*****
8	*****	138.5	*****
9	*****	149.3	*****
10	*****	168.4	*****
11	*****	*****	-297.5
12	*****	*****	-258.2
13	*****	*****	-256.6
14	*****	*****	-260.4
15	*****	*****	-268.8

D-10

DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ANULAR)
JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO IRREGULAR

TESTE # 2

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO LATERAL
---	mmca	mmca	mmca
2	-25.6	*****	*****
3	-52.8	*****	*****
4	-60.4	*****	*****
5	-71.6	*****	*****
6	*****	120.6	*****
7	*****	129.3	*****
8	*****	142.8	*****
9	*****	152.9	*****
10	*****	172.5	*****
11	*****	*****	-610.2
12	*****	*****	-593.7
13	*****	*****	-598.9
14	*****	*****	-611.3
15	*****	*****	-621.5

D-11

DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ANULAR)
 JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO REGULAR
 TESTE # 3

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO LATERAL
---	mmca	mmca	mmca
2	-28.7	*****	*****
3	-58.8	*****	*****
4	-64.6	*****	*****
5	-77.4	*****	*****
6	*****	111.3	*****
7	*****	124.2	*****
8	*****	153.5	*****
9	*****	161.8	*****
10	*****	171.4	*****
11	*****	*****	-394.3
12	*****	*****	-322.7
13	*****	*****	-320.4
14	*****	*****	-324.6
15	*****	*****	-336.1

D-12

DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ANULAR)
 JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO IRREGULAR
 TESTE # 3

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO LATERAL
---	mmca	mmca	mmca
2	-28.7	*****	*****
3	-58.8	*****	*****
4	-64.6	*****	*****
5	-77.4	*****	*****
6	*****	118.9	*****
7	*****	138.4	*****
8	*****	167.1	*****
9	*****	174.6	*****
10	*****	175.8	*****
11	*****	*****	-711.8
12	*****	*****	-686.3
13	*****	*****	-696.5
14	*****	*****	-707.8
15	*****	*****	-712.4

D-13 DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ESTRATIFICADO)
JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO REGULAR

TESTE # 15

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO LATERAL
—	mmca	mmca	mmca
2	-2.54	*****	*****
3	-5.08	*****	*****
4	-7.62	*****	*****
5	-9.16	*****	*****
6	*****	-0.25	*****
7	*****	0.1	*****
8	*****	0.1	*****
9	*****	0.1	*****
10	*****	0.1	*****
11	*****	*****	-35.56
12	*****	*****	-30.48
13	*****	*****	-25.4
14	*****	*****	-23.7
15	*****	*****	-23.8

D-14 DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ESTRATIFICADO)
JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO IRREGULAR

TESTE # 15

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO LATERAL
—	mmca	mmca	mmca
2	-7.62	*****	*****
3	-7.54	*****	*****
4	-7.71	*****	*****
5	-7.73	*****	*****
6	*****	-1.54	*****
7	*****	0.2	*****
8	*****	0.2	*****
9	*****	0.1	*****
10	*****	0.1	*****
11	*****	*****	-30.48
12	*****	*****	-25.4
13	*****	*****	-25.8
14	*****	*****	-25.9
15	*****	*****	-26.7

D-15 DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ANULAR)
 JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO REGULAR

TESTE # 22

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO LATERAL
—	mmca	mmca	mmca
2	-76.2	*****	*****
3	-101.6	*****	*****
4	-127	*****	*****
5	-132.7	*****	*****
6	*****	25.4	*****
7	*****	76.2	*****
8	*****	103.5	*****
9	*****	105.2	*****
10	*****	103.6	*****
11	*****	*****	-355.6
12	*****	*****	-279.4
13	*****	*****	-304.8
14	*****	*****	-355.6
15	*****	*****	368.8

D-16 DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO (ANULAR)
 JUNTA "T" DE CONFIGURAÇÃO IRREGULAR

TESTE # 22

TOMADAS DE PRESSÃO	ENTRADA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO PRINCIPAL	SAIDA RAMO LATERAL
—	mmca	mmca	mmca
2	-50.8	*****	*****
3	-101.6	*****	*****
4	-152.4	*****	*****
5	-165.1	*****	*****
6	*****	50.8	*****
7	*****	64.7	*****
8	*****	68.3	*****
9	*****	66.1	*****
10	*****	66.9	*****
11	*****	*****	-812.8
12	*****	*****	-762.3
13	*****	*****	-736.6
14	*****	*****	-735.7
15	*****	*****	-734.5

D-17 TESTE DA SEPARAÇÃO DO FLUXO (REGULAR)

Vsl=0.247 cm/s		Vsl=0.445 cm/s		Vsl=0.795 cm/s		Vsl=1.479 cm/s		Vsl=2.650 cm/s	
ESTRATIFICADO									
Vsg=10.0 m/s D=44x44 mm									
FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL
0.13	0.24	0.11	0.22	0.11	0.21	0.1	0.21	0.09	0.198
0.24	0.25	0.59	0.42	0.25	0.29	0.21	0.31	0.19	0.32
0.57	0.29	0.67	0.5	0.6	0.63	0.43	0.57	0.37	0.61
0.81	0.38	0.77	0.62	0.74	0.78	0.58	0.78	0.47	0.79
0.93	0.47	0.87	0.8	0.85	0.9	0.68	0.93	0.56	0.92

Vsl=0.247 cm/s		Vsl=0.445 cm/s		Vsl=0.795 cm/s		Vsl=1.479 cm/s		Vsl=2.65 cm/s	
ANULAR									
Vsg=41.0 m/s D=44x44 mm									
FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL
0.43	0.08	0.22	0.08	0.4	0.1	0.35	0.09	0.27	0.09
0.49	0.16	0.41	0.3	0.47	0.17	0.42	0.16	0.44	0.22
0.57	0.27	0.52	0.5	0.51	0.26	0.5	0.26	0.51	0.38
0.8	0.38	0.64	0.66	0.77	0.41	0.59	0.37	0.61	0.5
0.94	0.65	0.74	0.78	0.86	0.67	0.77	0.49	0.78	0.67
						0.83	0.69		

D-18 TESTE DA SEPARAÇÃO DO FLUXO (IRREGULAR)

Vsl=0.247 cm/s		Vsl=0.445 cm/s		Vsl=0.795 cm/s		Vsl=1.479 cm/s		Vsl=2.650 cm/s	
ESTRATIFICADO									
Vsg=10.0 m/s D=44x26 mm									
FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL
0.15	0.27	0.19	0.28	0.1	0.31	0.04	0.23	0.03	0.23
0.47	0.33	0.4	0.43	0.37	0.57	0.1	0.35	0.16	0.49
0.79	0.49	0.61	0.64	0.49	0.67	0.19	0.5	0.28	0.68
0.89	0.61	0.78	0.81	0.7	0.87	0.23	0.55	0.39	0.82
0.94	0.72	0.89	0.95			0.37	0.69	0.47	0.91
						0.58	0.89		

Vsl=0.247 cm/s		Vsl=0.445 cm/s		Vsl=0.795 cm/s		Vsl=1.479 cm/s		Vsl=2.650 cm/s	
ANULAR									
Vsg=41.0 m/s D=44x26 mm									
FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL	FGRL	FLRL
0.29	0.08	0.28	0.1	0.23	0.14	0.19	0.07	0.16	0.06
0.41	0.2	0.42	0.23	0.41	0.29	0.32	0.23	0.29	0.26
0.6	0.32	0.57	0.34	0.58	0.42	0.53	0.4	0.39	0.39
0.81	0.42	0.76	0.44	0.71	0.51	0.68	0.55	0.55	0.62
0.92	0.64	0.88	0.62	0.83	0.63	0.83	0.73	0.74	0.81

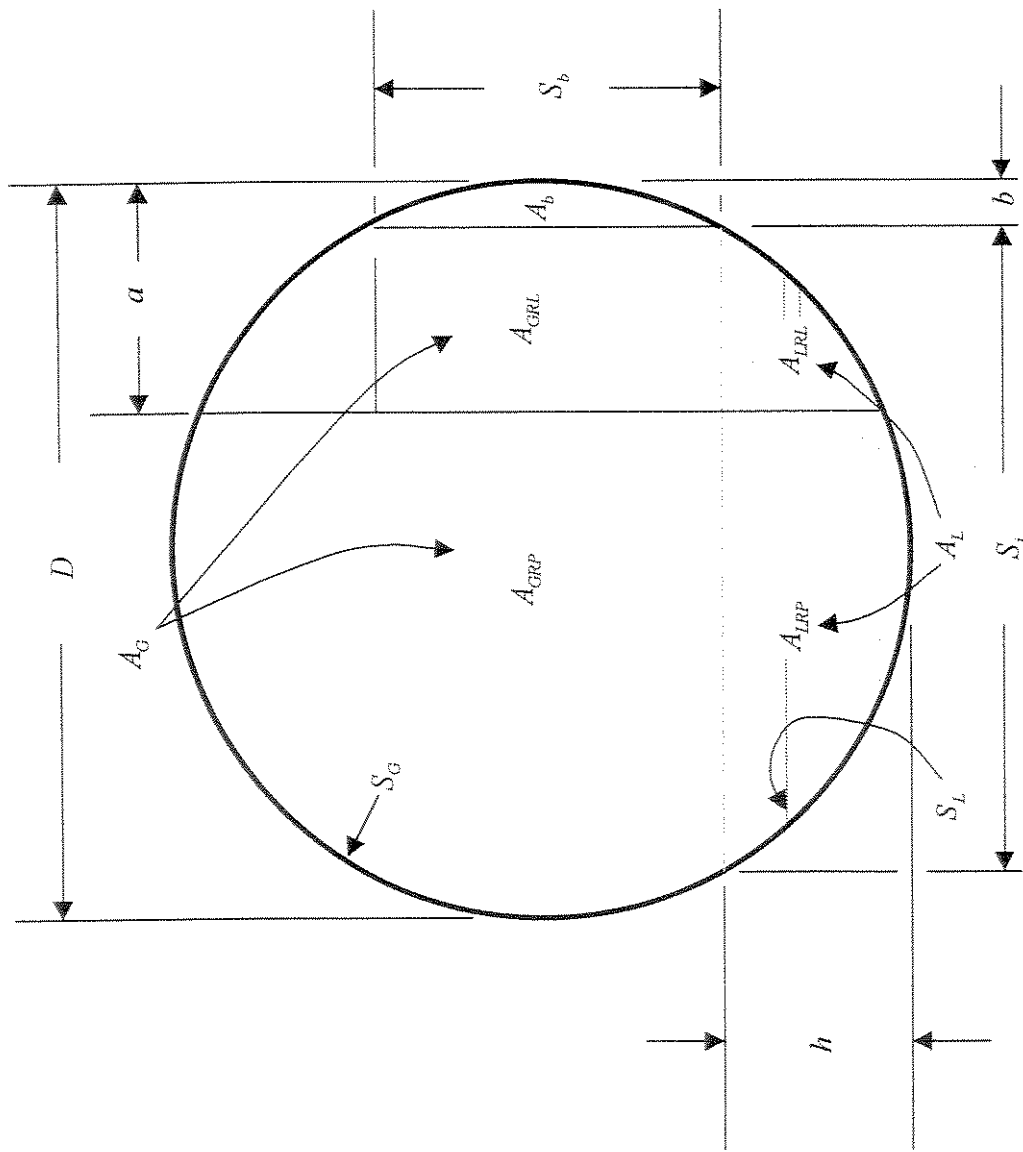


Figura :A1 MODELO GEOMÉTRICO PARA FLUXO ESTRATIFICADO

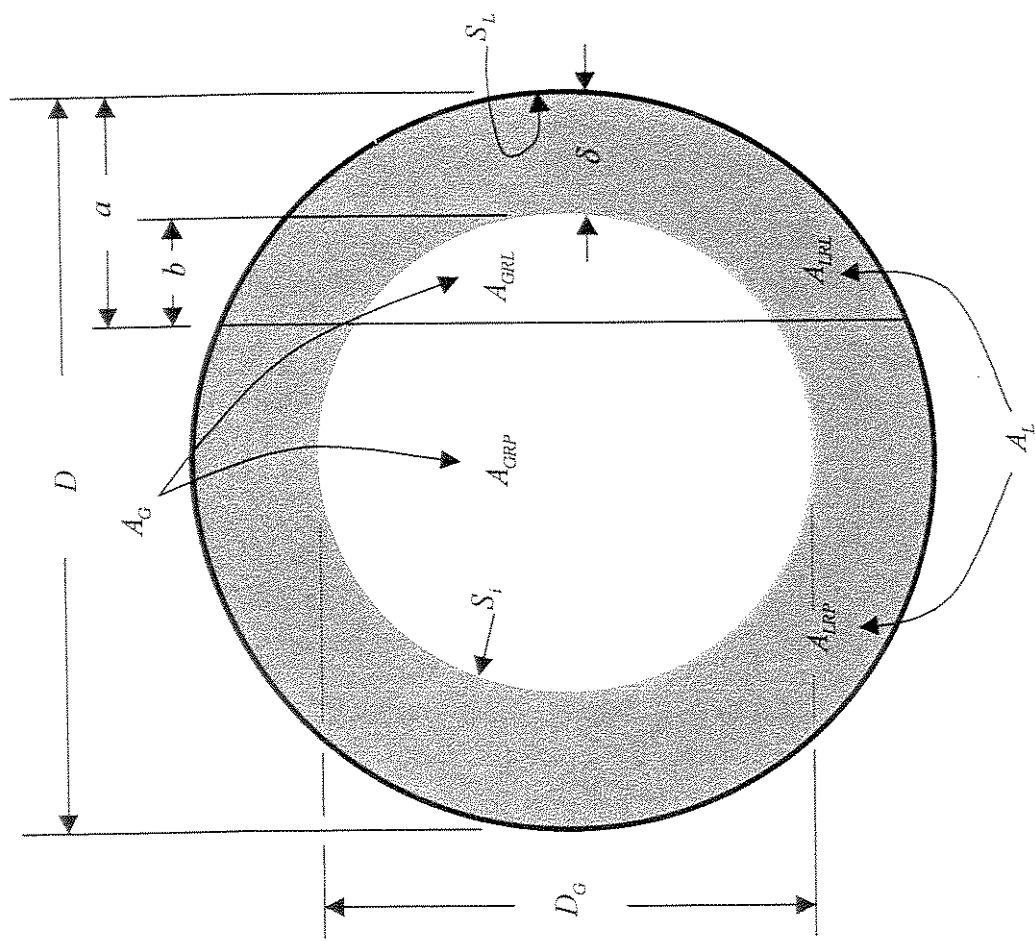


Figura A2 MODELO GEOMÉTRICO PARA FLUXO ANULAR

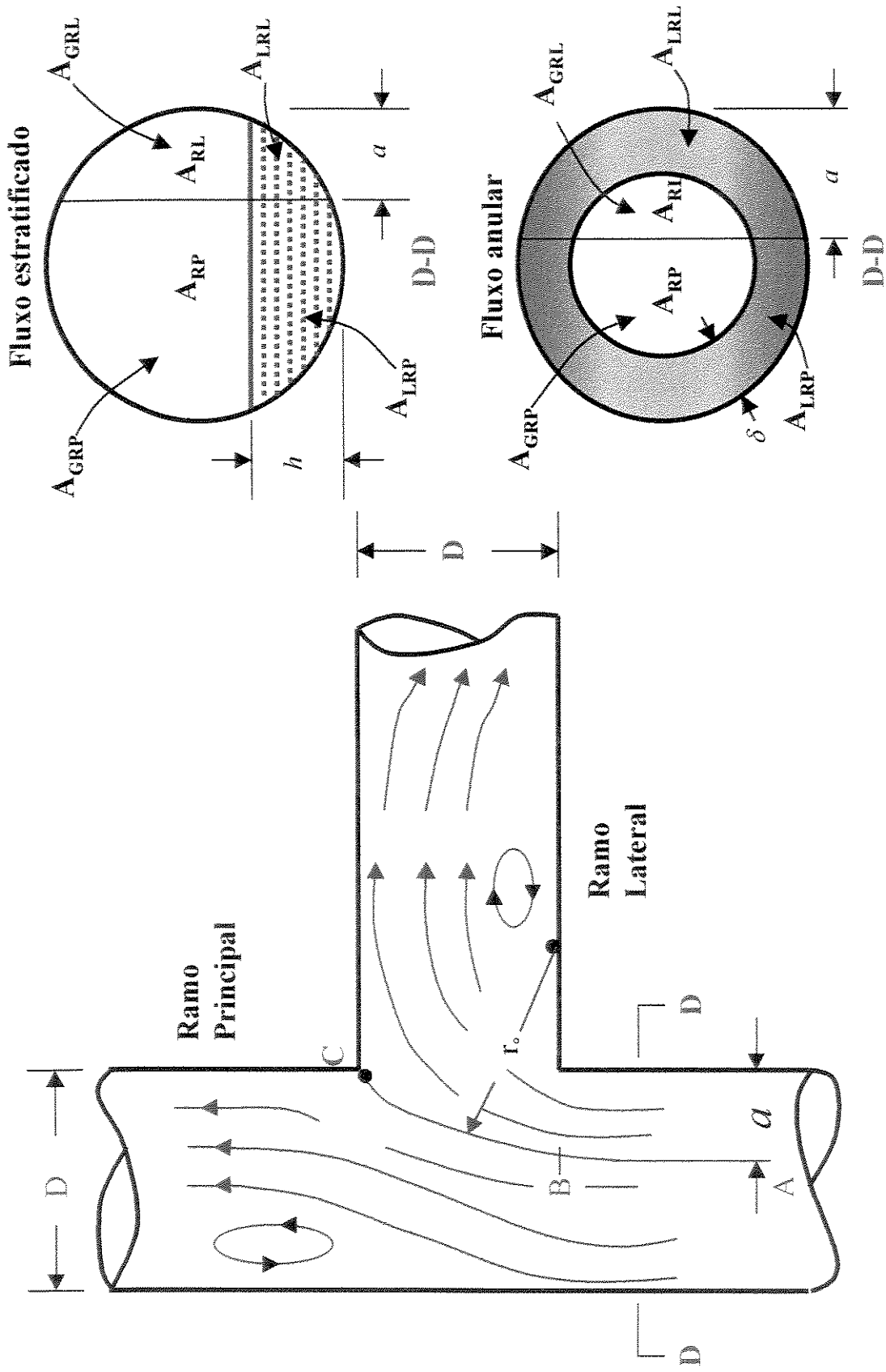
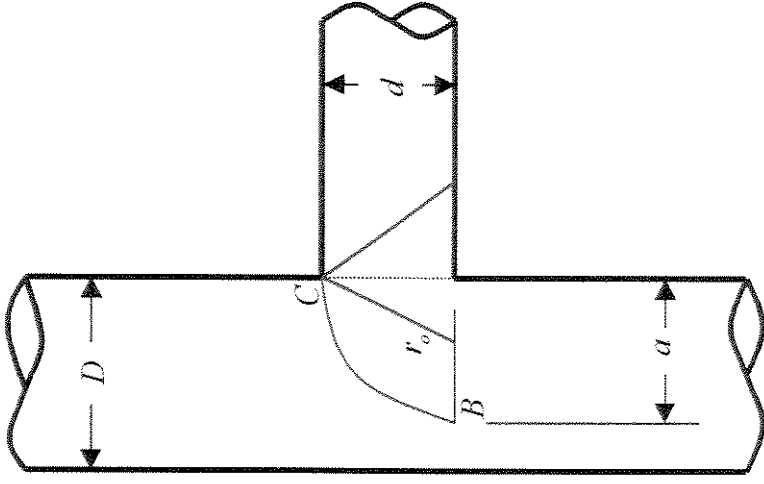
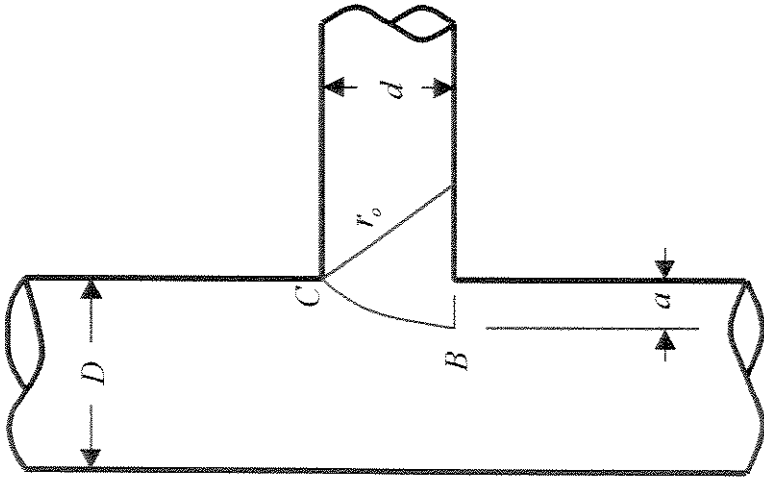


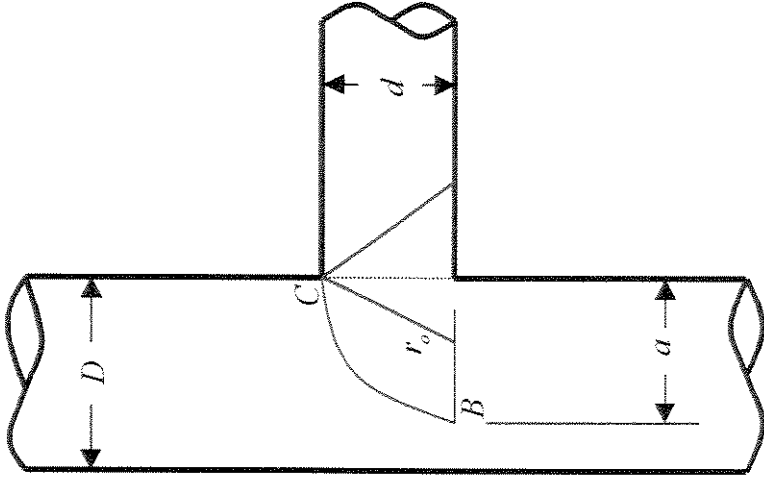
Figura 3.1 DESCRIÇÃO ESQUEMÁTICA DO CAMPO DE FLUXO EM UMA JUNTA "TÊ" HORIZONTAL (MODELO GEOMÉTRICO)



(A)



(B1)



(B2)

**Figura 3.2 RAI0 DA CURVATURA PARA UMA RAMIFICAÇÃO TIPO “T”
DE CONFIGURAÇÃO REGULAR E IRREGULAR**

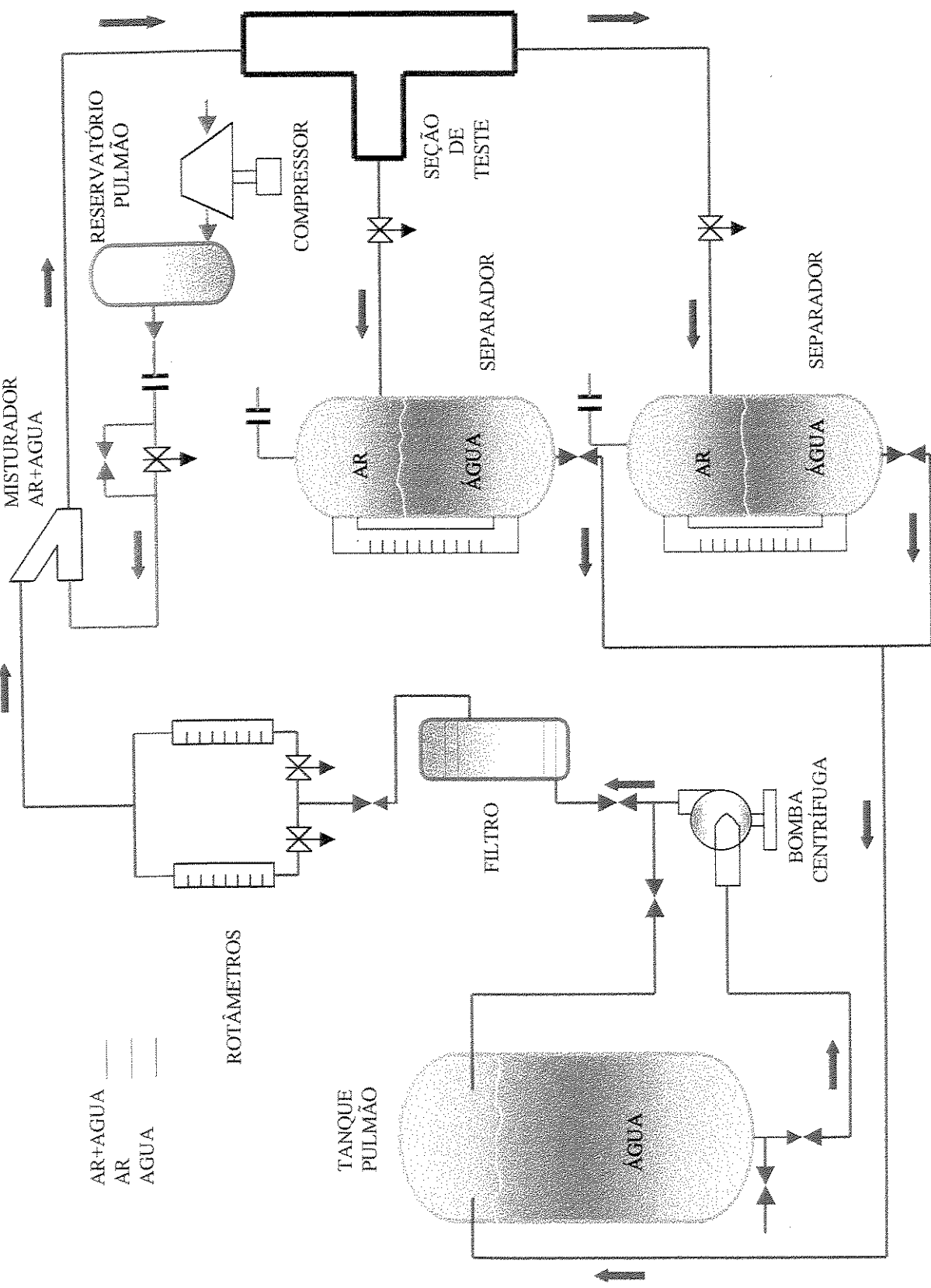


Figura 4.1 FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO APARATO EXPERIMENTAL

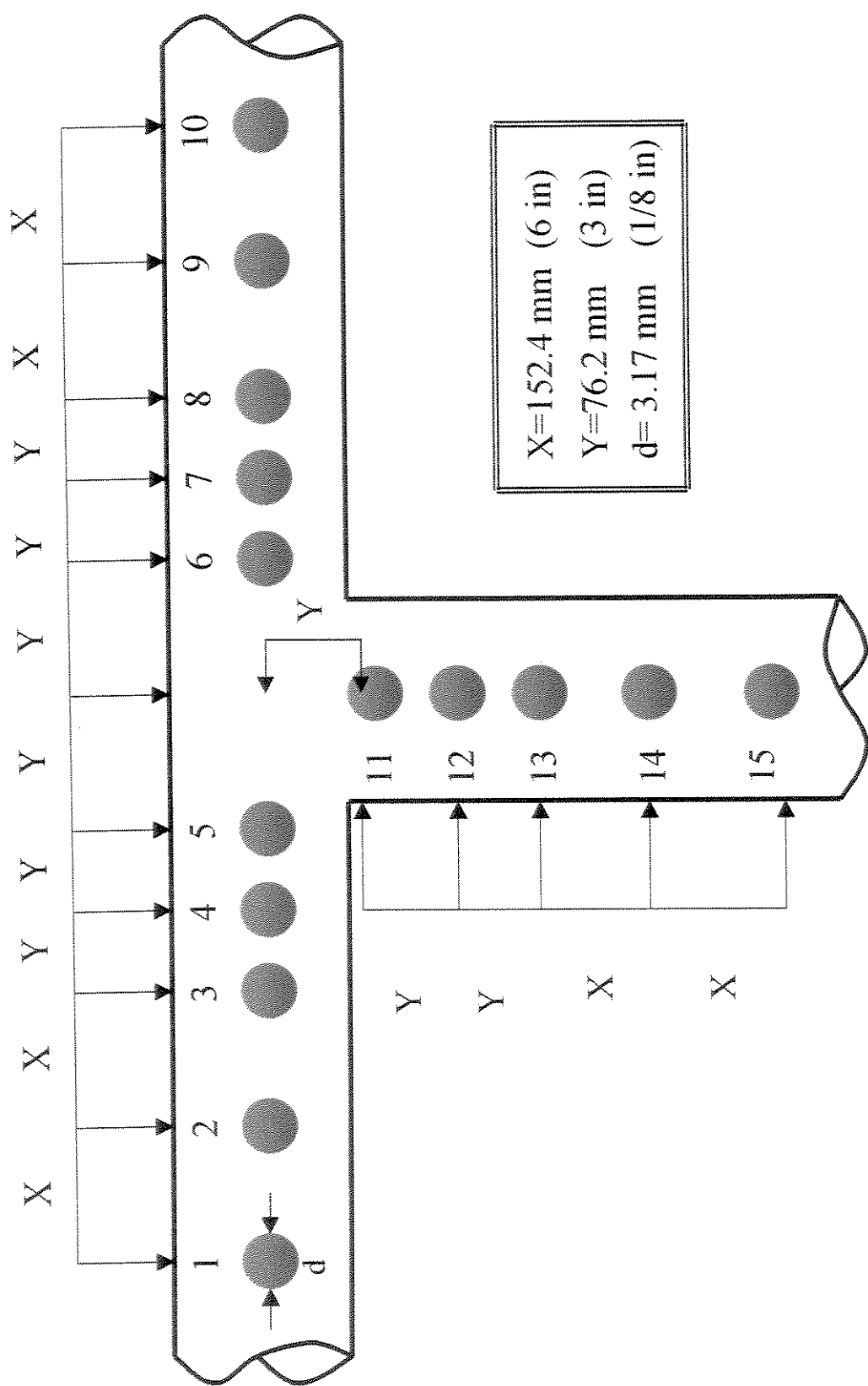


Figura 4.6 SEÇÃO DE TESTE DE GRADIENTES DE PRESSÃO NA JUNTA "TÊ"