



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO
ESCOAMENTO BIFÁSICO COM FORMAÇÃO DE
ESPUMA DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE
R134A AO LONGO DE UM TUBO RETO DE
SEÇÃO CONSTANTE**

HÉRYCA OLENIR SOUSA CASTRO



Ilha Solteira - SP

unesp



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO COM FORMAÇÃO DE ESPUMA DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE R134A AO LONGO DE UM TUBO RETO DE SECÇÃO CONSTANTE

Héryca Olenir Sousa Castro

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**

Orientador: PROF. DR. JOSÉ LUIZ GASCHE.

Ilha Solteira, Fevereiro de 2006.





FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Castro, Héryca Olenir Sousa.
C355c Caracterização experimental do escoamento bifásico com formação de espuma da mistura óleo-refrigerante R134A ao longo de um tubo reto de secção constante / Héryca Olenir Sousa Castro. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2006
xxxi, 166p. : il. (algumas color.)

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006

Orientador: José Luiz Gasche
Bibliografia: p. 93-96
650 650 650 650
1. Escoamento bifásico. 2. Espuma. 3. Refrigeração. 4. Compressores.

30500001

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Caracterização Experimental do Escoamento Bifásico com Formação de Espuma da Mistura Óleo-refrigerante R134a ao Longo de um Tubo Reto de Seção Constante

AUTORA: HERYCA OLENIR SOUSA CASTRO

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE LUIZ GASCHE

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE LUIZ GASCHE

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ANDRÉ LUIZ SEIXLACK

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. LUBEN CABEZAS GOMEZ

Professor Colaborador na Escola de Engenharia de São Carlos - USP - São Carlos/SP

Data da realização: 10 de fevereiro de 2006.

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. JOSE LUIZ GASCHE

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCN. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
22.03.06	28.04.06
REGISTRADO POR	TOMBO
Ailza	TC. 1657
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
leonoras Antti R\$10,00	C355c



Primeiramente agradeço a Deus, sem Ele não

conseguiria concluir este trabalho de conclusão de curso.

Agradeço também a meus pais, Cláudio e Wanderson, pelo apoio e incentivo.

Agradeço também a minha irmã, a

Ao meu esposo, Fernando
e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, sem Ele jamais teria chegado até aqui.

Ao orientador José Luiz Gasche. Este trabalho só foi possível graças a sua inestimável ajuda.

Agradeço aos amigos Reginaldo Cordeiro e Wanderson Partelini Conti pela ajuda na realização dos experimentos.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, que enriqueceram este trabalho com valiosas sugestões.



LISTA DE TABELAS, XIII

LISTA DE FIGURAS, XV

LISTA DE SÍMBOLOS, XXIX

RESUMO, XXXIII

ABSTRACT, XXXV

INTRODUÇÃO, 1

1.1. Exposição do Problema e Objetivo, 1

1.2. Organização do Trabalho, 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, 5

2.1. Introdução, 5

2.2. Misturas óleo-refrigerante, 6

2.2.1. Misturas óleo-refrigerante com baixa concentração de óleo, 6

2.2.2. Misturas óleo-refrigerante com alta concentração de óleo, 7

DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL, 11

3.1. Bancada experimental e instrumentação, 11

3.2. Fotografia dos equipamentos, 13

ESCOAMENTO DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE, 23

4.1. Introdução, 23

4.2. Procedimento Experimental, 23

4.3. Resultados Experimentais, 24

4.4. Cálculo dos Parâmetros Experimentais, 35



VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE, 49

MULTIPLICADORES BIFÁSICOS, 71

- 6.1. Procedimento para Cálculo do Gradiente de Pressão Experimental, 72
- 6.2. Correlação de Wang *et al.* (2000), 73
- 6.3. Resultados fornecidos pela correlação de Wang *et al.* (2000), 74
- 6.4. Correlação de Barbosa *et al.* (2004), 78
- 6.5. Resultados fornecidos pela correlação de Barbosa *et al.* (2004), 78
- 6.6. Correlação do Modelo Homogêneo, 82
- 6.7. Resultados fornecidos pelo Modelo Homogêneo, 83

CONCLUSÕES, 89

- 7.1. Sugestões e Trabalhos Futuros, 90

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, 93

APÊNDICES:

CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES, 97

CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO, 99

DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO, DENSIDADE E VISCOSIDADE DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE, 111

- C.1. Concentração, 111
- C.2. Densidade, 112
- C.3. Viscosidade Cinemática, 113

CÁLCULO DA VAZÃO EM MASSA DO ESCOAMENTO DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE, 115



INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES, 117

- E.1. Incerteza da concentração da mistura óleo-refrigerante, 117
- E.2. Incerteza da densidade da mistura óleo-refrigerante, 117
- E.3. Incerteza da viscosidade cinemática da mistura óleo-refrigerante, 117
- E.4. Incerteza da velocidade do escoamento da mistura óleo-refrigerante, 118
- E.5. Incerteza do número de Reynolds, 118
- E.6. Incerteza da vazão em massa do escoamento, 119

PROPRIEDADES DO ESCOAMENTO DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE, 121**MULTIPLICADORES BIFÁSICOS, 149**

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Condições de operação dos testes realizados, 25

Tabela 4.2 – Propriedades da mistura e do escoamento nas condições da entrada do tubo, 27

Tabela 4.3 – Gradiente de pressão, 30

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 – Desvios da razão gradiente de pressão, 88

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Calibração dos Termopares, 97

APÊNDICE B

Tabela B.1 – Resultados da calibração do transdutor 1 (carregamento), 101

Tabela B.2 – Resultados da calibração do transdutor 1 (descarregamento), 102

Tabela B.3 – Resultados da calibração do transdutor 02, 103

Tabela B.4 – Resultados da calibração do transdutor 03, 104

Tabela B.5 – Resultados da calibração do transdutor 04, 104

Tabela B.6 – Resultados da calibração do transdutor 05, 105

Tabela B.7 – Resultados da calibração do transdutor 06, 106

Tabela B.8 – Resultados da calibração do transdutor 07, 106

Tabela B.9 – Resultados da calibração do transdutor 08, 107

Tabela B.10 – Resultados da calibração do transdutor 09, 108

Tabela B.11 – Resultados da calibração do transdutor 10, 108

Tabela B.12 – Valores das incertezas em (bar) para os transdutores de pressão, 110



CAPÍTULO 3

- Figura 3.1 – Esquema da bancada experimental, 12
- Figura 3.2 – Vista parcial da bancada, mostrando o TAP e o AAP, 14
- Figura 3.3 – Vista parcial da bancada, mostrando o TBP e o ABP, 14
- Figura 3.4 – Transdutores de pressão, isolamento da seção de teste e tubo de vidro, 15
- Figura 3.5 – Visualização do início da seção de teste, 16
- Figura 3.6 – Visualização da contração de acrílico da seção de teste de tubo de vidro, 16
- Figura 3.7 – Visualização da junção dos tubos de vidro, 17
- Figura 3.8 – Visualização de um transdutor e um termopar, 17
- Figura 3.9 – Visualização da unidade condensadora e do trocador de calor, 18
- Figura 3.10 – Visualização do congelamento de vapor d'água no trocador de calor, 18
- Figura 3.11 – Visualização do compressor aberto, 19
- Figura 3.12 – Visualização do filtro separador de óleo, 19
- Figura 3.13 – Visualização do trocador de calor, 20
- Figura 3.14 – Visualização da bomba de palheta, 20
- Figura 3.15 – Visualização da parte frontal do painel de comando elétrico, 21
- Figura 3.16 – Visualização da parte interna do painel de comando elétrico, 21
- Figura 3.17 – Visualização do sistema de aquisição e microcomputadores, 22

CAPÍTULO 4

- Figura 4.1 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 29
- Figura 4.2 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 29
- Figura 4.3 – Distribuição da pressão (p) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 31
- Figura 4.4 – Distribuição da temperatura (T) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 31
- Figura 4.5 – Distribuição da pressão (p) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 32

Figura 4.6 – Distribuição da temperatura (T) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 32

Figura 4.7 – Distribuição da pressão (p) ao longo do tubo para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 33

Figura 4.8 – Distribuição da temperatura (T) ao longo do tubo para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 33

Figura 4.9 – Distribuição da pressão (p) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 34

Figura 4.10 – Distribuição da temperatura (T) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 34

Figura 4.11 – Diferença de pressão (Δp) em função do número de Reynolds (Re), 35

Figura 4.12 – Distribuição da concentração (w) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 37

Figura 4.13 – Distribuição do título (x) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 37

Figura 4.14 – Distribuição da fração de vazio (α) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 38

Figura 4.15 – Distribuição da densidade (ρ) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 38

Figura 4.16 – Distribuição da concentração (w) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 39

Figura 4.17 – Distribuição do título (x) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 39

Figura 4.18 – Distribuição da fração de vazio (α) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 40

Figura 4.19 – Distribuição da densidade (ρ) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 40

Figura 4.20 – Distribuição da concentração (w) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 41

Figura 4.21 – Distribuição do título (x) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 41

Figura 4.22 – Distribuição da fração de vazio (α) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 42



Figura 4.23 – Distribuição da densidade (ρ) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 42

Figura 4.24 – Distribuição da concentração (w) ao longo do tubo para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 43

Figura 4.25 – Distribuição do título (x) ao longo do tubo para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 43

Figura 4.26 – Distribuição da fração de vazio (α) ao longo do tubo para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 44

Figura 4.27 – Distribuição da densidade (ρ) ao longo do tubo para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 44

Figura 4.28 – Distribuição da concentração (w) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 48

Figura 4.29 – Distribuição do título (x) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 48

Figura 4.30 – Distribuição da fração de vazio (α) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 46

Figura 4.31 – Distribuição da densidade (ρ) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 46.

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 49

Figura 5.2 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 50

Figura 5.3 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,39$ a $3,43$ m para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 51

Figura 5.4 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,80$ a $3,86$ m para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 51

Figura 5.5 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,73$ a $4,78$ m para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 52

Figura 5.6 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,97$ a $5,02$ m para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 52

Figura 5.7 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,55$ a $5,60$ m para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 52

Figura 5.8 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 53

Figura 5.9 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 53

Figura 5.10 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,08$ a $3,13$ m para o teste de 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 54



Figura 5.11 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,62$ a $3,67$ m para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 55

Figura 5.12 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,95$ a $4,00$ m para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 55

Figura 5.13 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,37$ a $4,42$ m para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 56

Figura 5.14 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,85$ a $4,90$ m para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 56

Figura 5.15 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,45$ a $5,50$ m para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 57

Figura 5.16 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 57

Figura 5.17 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 58

Figura 5.18 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,63$ a $3,68$ m para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 58

Figura 5.19 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,35$ a $4,40$ m para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 59

Figura 5.20 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,96$ a $5,01$ m para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 59

Figura 5.21 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,37$ a $5,42$ m para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 60

Figura 5.22 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,83$ a $5,88$ m para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 60

Figura 5.23 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 61

Figura 5.24 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 61

Figura 5.25 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,12$ a $3,17$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 62

Figura 5.26 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,63$ a $3,68$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 62



Figura 5.27 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,20$ a $4,25$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 62

Figura 5.28 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,85$ a $4,90$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 63

Figura 5.29 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,15$ a $5,20$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 63

Figura 5.30 Padrões do escoamento na região de $z = 5,72$ a $5,77$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 64

Figura 5.31 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 64

Figura 5.32 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 65

Figura 5.33 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,07$ a $3,12$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 65

Figura 5.34 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,45$ a $3,50$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 66

Figura 5.35 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,92$ a $3,97$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 66

Figura 5.36 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,27$ a $4,32$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 67

Figura 5.37 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,68$ a $4,73$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 67

Figura 5.38 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,15$ a $5,20$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 68

Figura 5.39 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,67$ a $5,72$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 68

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar, 75

Figura 6.2 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar, 75



Figura 6.3 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 14 – 22, $p_{TAP}= 5,5$ bar, 76

Figura 6.4 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 23 – 30, $p_{TAP}= 6,0$ bar, 76

Figura 6.5 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 31 – 35, $p_{TAP}= 6,5$ bar, 77

Figura 6.6 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 01 – 35, 77

Figura 6.7 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 01 – 06, $p_{TAP}= 4,5$ bar, 79

Figura 6.8 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 07 – 13, $p_{TAP}= 5,0$ bar, 79

Figura 6.9 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 14 – 22, $p_{TAP}= 5,5$ bar, 80

Figura 6.10 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 23 – 30, $p_{TAP}= 6,0$ bar, 80

Figura 6.11 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 31 – 35, $p_{TAP}= 6,5$ bar, 81.

Figura 6.12 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 01 – 35, 81

Figura 6.13 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 01 – 06, $p_{TAP}= 4,5$ bar, 84

Figura 6.14 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 07 – 13, $p_{TAP}= 5,0$ bar, 84

Figura 6.15 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 14 – 22, $p_{TAP}= 5,5$ bar, 85

Figura 6.16 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 23 – 30, $p_{TAP}= 6,0$ bar, 85

Figura 6.17 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 31 – 35, $p_{TAP}= 6,5$ bar, 86

Figura 6.18 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 01 – 35, 86

Figura 6.19 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 01 – 35, 87

APÊNDICE A

Figura A.1 – Curva de calibração para os 15 termopares da seção de teste, 98

APÊNDICE B

Figura B.1 – Curva de calibração para carregamento e descarregamento do transdutor 01, 102

Figura B.2 – Curva de calibração média do transdutor 01, 103

Figura B.3 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 02, 103

Figura B.4 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 03, 104

Figura B.5 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 04, 105

Figura B.6 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 05, 105

Figura B.7 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 06, 106

Figura B.8 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 07, 107

Figura B.9 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 08, 107

Figura B.10 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 09, 108

Figura B.11 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 10, 109

APÊNDICE C

Figura C.1 – Diagrama pressão-temperatura-concentração para a mistura óleo éster ISO VG10 e refrigerante R134a, 112

Figura C.2 – Diagrama temperatura-concentração-densidade para a mistura óleo éster ISO VG10 e refrigerante R134a, 113

Figura C.3 – Diagrama temperatura-concentração-viscosidade cinemática para a mistura óleo éster ISO VG10 e refrigerante R134a, 114



APÊNDICE F

- Figura F.1 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 1, 121
- Figura F.2 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 1, 121
- Figura F.3 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 1, 121
- Figura F.4 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 2, 122
- Figura F.5 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 2, 122
- Figura F.6 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 2, 122
- Figura F.7 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 3, 122
- Figura F.8 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 3, 123
- Figura F.9 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 3, 123
- Figura F.10 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 4, 123
- Figura F.11 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 4, 123
- Figura F.12 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 4, 124
- Figura F.13 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 5, 124
- Figura F.14 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 5, 124
- Figura F.15 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 5, 124
- Figura F.16 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 6, 125
- Figura F.17 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 6, 125
- Figura F.18 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 6, 125
- Figura F.19 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 7, 125
- Figura F.20 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 7, 126
- Figura F.21 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 7, 126
- Figura F.22 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 8, 126
- Figura F.23 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 8, 126
- Figura F.24 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 8, 127
- Figura F.25 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 9, 127
- Figura F.26 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 9, 127
- Figura F.27 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 9, 127
- Figura F.28 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 10, 128



- Figura F.29 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 10, 128
- Figura F.30 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 10, 128
- Figura F.31 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 11, 128
- Figura F.32 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 11, 129
- Figura F.33 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 11, 129
- Figura F.34 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 12, 129
- Figura F.35 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 12, 129
- Figura F.36 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 12, 130
- Figura F.37 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 13, 130
- Figura F.38 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 13, 130
- Figura F.39 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 13, 130
- Figura F.40 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 14, 131
- Figura F.41 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 14, 131
- Figura F.42 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 14, 131
- Figura F.43 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 15, 131
- Figura F.44 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 15, 132
- Figura F.45 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 15, 132
- Figura F.46 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 16, 132
- Figura F.47 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 16, 132
- Figura F.48 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 16, 133
- Figura F.49 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 17, 133
- Figura F.50 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 17, 133
- Figura F.51 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 17, 133
- Figura F.52 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 18, 134
- Figura F.53 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 18, 134
- Figura F.54 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 18, 134
- Figura F.55 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 19, 134
- Figura F.56 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 19, 134
- Figura F.57 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 19, 135



- Figura F.58 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 20, 135
- Figura F.59 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 20, 135
- Figura F.60 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 20, 136
- Figura F.61 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 21, 136
- Figura F.62 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 21, 136
- Figura F.63 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 21, 136
- Figura F.64 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 22, 137
- Figura F.65 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 22, 137
- Figura F.66 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 22, 137
- Figura F.67 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 23, 137
- Figura F.68 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 23, 138
- Figura F.69 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 23, 138
- Figura F.70 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 24, 138
- Figura F.71 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 24, 138
- Figura F.72 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 24, 139
- Figura F.73 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 25, 139
- Figura F.74 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 25, 139
- Figura F.75 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 25, 139
- Figura F.76 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 26, 140
- Figura F.77 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 26, 140
- Figura F.78 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 26, 140
- Figura F.79 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 27, 140
- Figura F.80 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 27, 141
- Figura F.81 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 27, 141
- Figura F.82 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 28, 141
- Figura F.83 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 28, 141
- Figura F.84 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 28, 142
- Figura F.85 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 29, 142
- Figura F.86 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 29, 142



- Figura F.87 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 29, 142
- Figura F.88 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 30, 143
- Figura F.89. Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 30, 143
- Figura F.90. Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 30, 143
- Figura F.91 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 31, 143
- Figura F.92 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 31, 144
- Figura F.93 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 31, 144
- Figura F.94 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 32, 144
- Figura F.95 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 32, 144
- Figura F.96 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 32, 145
- Figura F.97 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 33, 145
- Figura F.98 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 33, 145
- Figura F.99 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 33, 145
- Figura F.100 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 34, 146
- Figura F.101 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 34, 146
- Figura F.102 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 34, 146
- Figura F.103 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 35, 146
- Figura F.104 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 35, 147
- Figura F.105 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 35, 147

APÊNDICE G

- Figura G.1 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 01, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$, 149
- Figura G.2 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 02, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$, 150
- Figura G.3 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 03, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$, 150



Figura G.4 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 04, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$, 151

Figura G.5 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 05, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$, 151

Figura G.6 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 06, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$, 152

Figura G.7 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 07, $p_{TAP} = 5,0\text{ bar}$, 152

Figura G.8 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 08, $p_{TAP} = 5,0\text{ bar}$, 153

Figura G.9 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 09, $p_{TAP} = 5,0\text{ bar}$, 153

Figura G.10 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 10, $p_{TAP} = 5,0\text{ bar}$, 154

Figura G.11 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 11, $p_{TAP} = 5,0\text{ bar}$, 154

Figura G.12 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 12, $p_{TAP} = 5,0\text{ bar}$, 155

Figura G.13 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 13, $p_{TAP} = 5,0\text{ bar}$, 155

Figura G.14 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 14, $p_{TAP} = 5,5\text{ bar}$, 156

Figura G.15 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 15, $p_{TAP} = 5,5\text{ bar}$, 156

Figura G.16 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 16, $p_{TAP} = 5,5\text{ bar}$, 157

Figura G.17 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 17, $p_{TAP} = 5,5\text{ bar}$, 157

Figura G.18 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 18, $p_{TAP} = 5,5\text{ bar}$, 158



Figura G.19 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 19, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 158

Figura G.20 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 20, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 159

Figura G.21 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 21, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 159

Figura G.22 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar, 160

Figura G.23 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 23, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 160

Figura G.24 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 24, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 161

Figura G.25 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 25, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 161

Figura G.26 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 26, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 162

Figura G.27 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 27, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 162

Figura G.28 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 28, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 163

Figura G.29 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 29, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 163

Figura G.30 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar, 164

Figura G.31 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 31, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 164

Figura G.32 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 32, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 165

Figura G.33 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 33, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 165



Figura G.34 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 34, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 166

Figura G.35 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar, 166



LISTA DE SÍMBOLOS

A, B	constantes	
a, b, c, d	constantes	
a_0, a_1	constantes	
C_1, C_2	constantes	
D	diâmetro do tubo	[m]
dp/dz	gradiente de pressão	[Pa/m]
$(dp/dz)_{ac}$	gradiente de pressão devido a aceleração	[Pa/m]
$(dp/dz)_{fL}$	gradiente de pressão devido ao atrito da mistura líquida	[Pa/m]
$(dp/dz)_{fG}$	gradiente de pressão devido ao atrito do gás	[Pa/m]
$(dp/dz)_{fTP}$	gradiente de pressão total devido ao atrito	[Pa/m]
$(dp/dz)_{Total}$	gradiente de pressão total experimental	[Pa/m]
dx/dz	gradiente do título	[1/m]
$d\rho_G/dz$	gradiente da densidade do gás	[kg/m ³ /m]
$d\rho_L/dz$	gradiente da densidade do líquido	[kg/m ³ /m]
f	fator de atrito	
FC	fator de correção	
G	fluxo de massa total	kg/ms ²
g	aceleração da gravidade	[m/s ²]
g_n	aceleração da gravidade universal	[m/s ²]
h	altitude sobre a superfície do modelo da Terra	[m]
I	incerteza	
I_D	incerteza do diâmetro	[m]
$I_{dp/dz}$	incerteza do gradiente de pressão	[Pa/m]
I_f	incerteza do fator de atrito	
$I_{\dot{m}}$	incerteza da vazão em massa	[kg/s]
I_p	incerteza da pressão	[Pa]
I_{Re}	incerteza do número de Reynolds	



$I_{\bar{V}}$	incerteza da velocidade média	[m/s]
I_T	incerteza da temperatura	[°C]
I_w	incerteza da concentração	
$I_{\rho \text{ mistura}}$	incerteza da densidade da mistura	[kg/m ³]
$I_{\nu \text{ mistura}}$	incerteza da viscosidade cinemática	[m ² /s]
$\dot{m}$	vazão em massa	[kg/s]
p	pressão	[Pa]
p_{abs}	pressão absoluta	[Pa]
p_{atm}	pressão atmosférica	[Pa]
p_{man}	pressão manométrica	[Pa]
p_{VAP}	pressão no vaso de alta pressão	[bar]
p_{VBP}	pressão no vaso de baixa pressão	[bar]
p_t	Pressão do teste	[bar]
R^2	Coeficiente de correlação	
S_{a0}, S_{a1}	desvio padrão angular	
S_{xy}	desvio padrão global	
T	temperatura	[°C]
T_{entrada}	temperatura do escoamento na entrada do tubo	[°C]
$t_{v,95\%}$	fator de Student	
V	diferença de potencial	[mV]
$\bar{V}$	velocidade média do escoamento	[m/s]
w	concentração de refrigerante na mistura	
w_e	concentração do refrigerante no óleo na posição de nucleação das bolhas de vapor refrigerante	
X	Parâmetro de Martinelli	
x	título	
x,y,z, z_e	coordenadas	[m]



SÍMBOLOS GREGOS

α	fração de vazio	
α_c	coeficiente de dilatação térmica do cilindro	[1/°C]
α_p	coeficiente de dilatação térmica do pistão	[1/°C]
ε	rugosidade do tubo	[m]
ρ_g	densidade do gás (R-134a)	[kg/m ³]
ρ_L	densidade do líquido	[kg/m ³]
$\rho_{mistura}$	densidade da mistura	[kg/m ³]
Φ	multiplicador bifásico	
μ	latitude sobre o modelo teórico da Terra	
ν	viscosidade cinemática	[m ² /s]
Δp_{tubo}	diferença de pressão medida entre o primeiro e o último transdutor	[bar]

ADIMENSIONAL

$Re = \frac{\bar{V}D}{\nu}$	número de Reynolds
Re_L	número de Reynolds calculado considerando o escoamento monofásico de líquido com vazão em massa $G(1-x)$
Re_{LO}	número de Reynolds calculado considerando o escoamento monofásico do líquido com vazão em massa G
Re_G	número de Reynolds calculado considerando o escoamento monofásico do gás com vazão em massa Gx



Este trabalho apresenta uma investigação experimental do escoamento da mistura óleo éster ISO VG10 e refrigerante R134a com formação de espuma ao longo de um tubo reto horizontal de seção circular constante. Uma bancada experimental foi projetada para permitir a medição dos perfis de pressão e de temperatura do escoamento ao longo do tubo, assim como a visualização dos padrões de escoamento. Os perfis de pressão e de temperatura foram medidos no escoamento da mistura em um tubo de aço cobreado de 3,22 mm de diâmetro e 6 m de comprimento, enquanto que as visualizações dos padrões de escoamento foram realizadas no escoamento similar da mistura em um tubo de vidro de 3,0 mm de diâmetro e do mesmo comprimento. Os testes foram realizados para diferentes vazões, várias concentrações de refrigerante na entrada do duto e temperaturas de entrada em torno de 30 °C. Os resultados mostraram que um escoamento monofásico da mistura no estado líquido, apresentando temperatura e gradiente de pressão constantes, foi observado na região de entrada do escoamento. Em seções posteriores, a queda de pressão devido ao atrito produziu uma redução da solubilidade do refrigerante na mistura, provocando a formação das primeiras bolhas de refrigerante. Inicialmente, um número reduzido de pequenas bolhas pôde ser notado e o escoamento se comportou como um escoamento intermitente em bolhas. Posteriormente, a população de bolhas aumentaram consideravelmente, conduzindo à formação de espuma na região de saída do tubo. Em razão desta grande formação de bolhas, a temperatura e a pressão do escoamento sofreram uma grande redução nesta região. A fração de vazio nesta região alcançou valores maiores do que 0,8, o que geralmente caracteriza o escoamento de espuma. Além disso, comparou-se os dados experimentais de queda de pressão com resultados obtidos de modelos de multiplicadores bifásicos encontrados na literatura, aplicados a escoamentos bifásicos em tubos de pequenos diâmetros. Todas as correlações testadas falharam ao predizer a queda de pressão do escoamento.



This work presents an experimental investigation of the ester oil ISO VG10 and refrigerant R134a mixture flow with foam formation through a straight horizontal tube with constant circular section. An experimental apparatus was designed to allow the measurement of both pressure and temperature profiles along the tube as well as the visualization of the flow patterns. The pressure and the temperature profiles were measured in the mixture flow through a 3.22 mm ID, 6 m long metallic Bundy type tube, whilst the flow patterns visualizations were performed in a similar mixture flow through a 3.0 mm ID, 6 m long glass tube. The tests were performed at different mass flow rates, several refrigerant mass fractions at the entrance region of the flow, and inlet mixture temperatures around 30°C. A single-phase liquid mixture flow with constant temperature and pressure gradient could be seen at the inlet of the tube. As the flow proceeded towards the exit of the tube the pressure drop produced a reduction of the refrigerant solubility in the oil yielding to formation of the first bubbles. Initially, small and few bubbles could be noticed and the flow behaved as an intermittent bubbly flow. Eventually, the bubble population increased and foam flow was observed at the exit of the flow. Due to the great formation of bubbles, both temperature and pressure gradient of the mixture were greatly reduced in this region of the flow, yielding to void fractions greater than 0.8. In addition, one compared the experimental pressure drop data with results obtained by using several two-phase multiplier correlations usually applied to two-phase flows in small diameter tube. All correlations tested failed for predicting the pressure drop of the flow.



INTRODUÇÃO

1.1 Exposição do Problema e Objetivo

A grande maioria das instalações de refrigeração, desde refrigeradores domésticos até grandes sistemas industriais, usa o princípio da compressão de vapor como método de refrigeração. Nos sistemas de compressão de vapor, o efeito de refrigeração é produzido pela evaporação de um líquido em baixa temperatura, provocada pelo bombeamento do vapor por intermédio do compressor.

Um componente vital no projeto de qualquer compressor durável é o seu sistema de lubrificação. O lubrificante é responsável por reduzir o atrito entre as partes móveis, aumentando a vida útil do compressor e reduzindo as perdas de energia. Uma outra função do lubrificante em compressores de refrigeração é reduzir o vazamento de gás refrigerante ao longo de suas várias folgas entre as regiões de alta e baixa pressão, resultando num aumento da eficiência volumétrica do processo de compressão.

Nos modelos de lubrificação, o fluido de trabalho, na maioria das vezes, é assumido como sendo o óleo lubrificante puro. Um fato conhecido, entretanto, é que a grande maioria dos fluidos refrigerantes usados nos sistemas de refrigeração são solúveis nos óleos lubrificantes, o que faz com que as propriedades do fluido resultante, mistura óleo-refrigerante, sejam alteradas. Além disso, quando esta mistura escoar na direção de regiões de baixa pressão, ocorre o desprendimento do refrigerante dissolvido no óleo (*outgassing*), resultando na formação de bolhas, o que altera significativamente as características do escoamento. A formação de bolhas, por sua vez, pode ser tão intensa que é possível a formação de espuma no escoamento. Estes fatos comprometem o desempenho de mancais, os cálculos de vazamentos de gás refrigerante e o dimensionamento dos sistemas de lubrificação.

Em seu trabalho, Gasche (1996) efetuou um estudo analítico/numérico do vazamento de gás refrigerante ao longo da folga radial de compressores rotativos de pistão rolante, no qual estes aspectos foram levantados, discutidos e introduzidos nos modelos propostos. Estes modelos

mostraram que o fenômeno de solubilidade, o surgimento e o crescimento de bolhas de gás e a formação de espuma ao longo do escoamento da mistura óleo-refrigerante influem significativamente nos resultados fornecidos pelos modelos. Entretanto, pela falta de conhecimento teórico completo associado ao escoamento bifásico destas misturas e pela ausência de dados experimentais, principalmente com relação ao escoamento de espuma, alguns dos modelos propostos não puderam ser validados e Gasche (1996) comentou que muitos aspectos precisam ser investigados. Entre estes, aspectos associados à nucleação e ao crescimento das bolhas de gás, por exemplo, precisavam ser criteriosamente investigados teórica e experimentalmente. Dados experimentais associados à dinâmica e à transferência de calor do escoamento bifásico, com ou sem formação de espuma, também precisavam ser levantados.

Lacerda (2000) estudou o escoamento bifásico da mistura óleo-refrigerante ao longo de um tubo usando um óleo mineral e refrigerante R-12. O autor mediu as distribuições de pressão e de temperatura do escoamento da mistura ao longo de um tubo metálico de diâmetro interno igual a 2,86 mm e 5,23 m de comprimento. Além disso, visualizou os padrões de escoamento da mesma mistura escoando ao longo de um tubo de vidro de 3,03 mm de diâmetro interno. Os resultados da visualização mostraram um escoamento de espuma no final do tubo, onde uma grande redução de temperatura e pressão foram medidas. Poiate Jr. (2001) obteve distribuições de pressão e de temperatura similares para a mesma mistura escoando ao longo de um tubo de 3,22 mm de diâmetro e 6 m de comprimento, além de resultados de visualização semelhantes para a mistura escoando ao longo de um tubo de vidro de 3,0 mm de diâmetro interno.

Neste trabalho, estuda-se experimentalmente o escoamento bifásico com formação de espuma de uma mistura composta por óleo e refrigerante HFC-134a (R-134a), um refrigerante de aplicação atual, ao longo de um tubo reto de seção transversal circular constante. Por meio da medição dos perfis longitudinais de pressão e de temperatura faz-se uma comparação entre os resultados experimentais e os padrões de escoamento observados na visualização. Além disso, estes resultados são utilizados para o cálculo do gradiente de pressão devido ao atrito em escoamentos bifásicos em tubos de pequenas dimensões. Com isso, espera-se contribuir com o desenvolvimento tecnológico relacionado ao projeto de mancais e de sistemas de lubrificação de compressores de refrigeração, problemas de vazamento de gás refrigerante nas folgas dos compressores e ao controle da formação de espuma nos compressores.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está estruturado em sete capítulos e sete apêndices. No primeiro capítulo apresenta-se uma introdução sobre o trabalho, no qual é mostrado o contexto em que o trabalho se encontra. O capítulo dois contém uma revisão bibliográfica sobre escoamento da mistura composta por óleo éster (ISO VG10) e refrigerante R-134a. No terceiro capítulo apresenta-se uma descrição da bancada experimental utilizada no desenvolvimento deste trabalho. O quarto capítulo é dedicado à apresentação e discussão dos resultados obtidos para o escoamento da mistura óleo-refrigerante. O capítulo cinco exibe os resultados da visualização do escoamento. O capítulo seis apresenta os resultados dos modelos de predição de queda de pressão do escoamento bifásico. O capítulo sete encerra o trabalho, apresentando suas principais conclusões e os desenvolvimentos posteriores deste trabalho.

Os apêndices A e B mostram as metodologias utilizadas na calibração dos termopares e transdutores de pressão, respectivamente. O Apêndice C, por sua vez, apresenta as equações para determinação da concentração, densidade e viscosidade da mistura óleo-refrigerante. O Apêndice D apresenta o procedimento detalhado para o cálculo da vazão em massa da mistura óleo-refrigerante. O Apêndice E apresenta a análise de incerteza na determinação da concentração, densidade, viscosidade cinemática da mistura óleo éster e refrigerante R-134a e velocidade, número de Reynolds e vazão do escoamento bifásico da mistura óleo-refrigerante. O Apêndice F apresenta todos os dados de distribuição de pressão, temperatura, título, fração de vazio, concentração e densidade do escoamento da mistura óleo-refrigerante, que foram apresentados no capítulo 5. O Apêndice G apresenta os resultados individuais de comparação do gradiente de pressão devido ao atrito experimental e teórico obtidos no capítulo 6.



REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**2.1 Introdução**

Dentre as grandes preocupações da comunidade científica na atualidade está a redução da camada de ozônio presente na estratosfera. A ação dos fluidos refrigerantes halogenados, os CFCs (clorofluorcarbonos) e HCFCs (hidroclorofluorcarbonetos), sobre essa camada tem motivado a realização de inúmeras pesquisas e grandes investimentos, tanto na procura de fluidos refrigerantes alternativos, quanto na análise do comportamento dessas novas misturas nos componentes dos sistemas de refrigeração.

Durante os últimos anos, vários refrigerantes alternativos (R-401a, R-401b, R-409a, R-413a e R-134a) foram avaliados. Entre eles, o refrigerante hidrofluorcarbono (HFC) R-134a se destaca por apresentar propriedades físicas e termodinâmicas relativamente semelhantes às do R-12. Com a utilização dos refrigerantes HFC surgiu a necessidade de desenvolvimento de novos óleos lubrificantes visto que o óleo mineral, atualmente utilizado em sistemas que trabalham com refrigerantes halogenados, não é compatível com os novos refrigerantes. Uma alternativa é o lubrificante poliol éster (POE) que combinado com os refrigerantes hidrofluorcarbonos apresentam alta estabilidade térmica e química.

Diante disso, torna-se necessária uma investigação mais precisa sobre o efeito dos novos fluidos refrigerantes e lubrificantes sobre as propriedades termodinâmicas e de transporte da mistura e a determinação de alguns parâmetros como o coeficiente de transferência de calor e a queda de pressão.

Apresenta-se a seguir uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos relacionados com misturas óleo-refrigerante. Por razões didáticas o assunto é subdividido em: misturas com baixa concentração de óleo e misturas com alta concentração de óleo.



2.2 Misturas óleo-refrigerante

2.2.1 Misturas óleo-refrigerante com baixa concentração de óleo

A maioria das publicações encontradas na literatura investigam o escoamento de misturas óleo-refrigerante ricas em refrigerante, ou seja, refrigerantes com pequenas quantidades de óleo lubrificante. Este interesse está relacionado com a influência da pequena quantidade de óleo lubrificante na transferência de calor e na queda de pressão em evaporadores e condensadores, Lacerda *et al.* (2002).

Um estudo interessante relacionado com evaporadores horizontais foi desenvolvido por Hambraeus (1995) para misturas óleo éster e refrigerante R-134a. Os testes foram conduzidos para fluxos de calor entre 2 e 8 kW/m² (correspondem a fluxos de massas entre 40 e 170 kg/m²s), temperatura de evaporação entre -10 e 10°C e concentração do óleo (massa) entre 0 a 4,5%. Na maioria dos casos, Hambraeus (1995) observou uma redução do coeficiente de transferência de calor com o aumento da concentração, resultado fortemente influenciado pela viscosidade do óleo. Entretanto, o autor observou um aumento do coeficiente de transferência de calor para os casos de baixas vazões e viscosidades. Este acréscimo pode ser resultado do melhor molhamento do tubo em consequência do aumento da tensão superficial.

Reduções de 10-20% no coeficiente de transferência de calor em relação ao refrigerante puro foram obtidas por Shao e Granryd (1995) para uma mistura de R-134a e óleo SW32 durante a condensação em tubo horizontais. A concentração em massa do óleo foi mantida na faixa de 1-5,1%. Os autores atribuíram a redução possivelmente ao aumento da viscosidade da mistura óleo-refrigerante, o que leva a uma diminuição do transporte molecular e turbulento no filme de condensado.

A redução do coeficiente de transferência de calor também foi observada por Bassi e Bansal (2002) durante a condensação no interior de tubos lisos, quando testados com R-134a puro e formando uma mistura com um óleo sintético à base de poliol éster. A concentração em massa do óleo na mistura foi de 2 e 5% e a faixa de temperatura de saturação analisada foi de 35 a 45°C. O coeficiente de transferência de calor na condensação reduziu de 5 e 10% quando o R-134a foi misturado, respectivamente, com 2 e 5% de óleo.

Em escoamentos forçados, o coeficiente de transferência de calor da mistura óleo-refrigerante se comporta de maneira diferente, Wongwises *et al.* (2000). Os autores investigaram o comportamento do escoamento de refrigerante R-134a e de misturas de R-134a e 5% óleo PAG (180 cSt) sujeito a fluxos de calor entre 8 e 55 kW/m² e fluxo em massa entre 160 e 470 kg/m²s.

Em todos os experimentos analisados houve um aumento no coeficiente médio de transferência de calor. O padrão de escoamento anular foi observado em todos os casos.

Outro parâmetro importante a ser reavaliado considerando as novas misturas óleo-refrigerante é a queda de pressão ao longo dos escoamentos em sistemas de refrigeração. A influência do óleo na queda de pressão depende fortemente das propriedades do óleo e do refrigerante. Eckels e Pate (1991) estudaram o escoamento da mistura de refrigerante R-134a e óleo éster (169 SUS e 369 SUS), para concentrações de óleo entre 0 e 5%, em tubos lisos e tubos com pequenas rugosidades (*micro-fin tubes*). O fluxo de massa foi variado de 85 a 375 kg/m²s num tubo de diâmetro externo de 9,52 mm. A queda de pressão nos dois tubos foi aumentada com a adição dos lubrificantes e foi de 5 a 15% superior no tubo com pequenas rugosidades.

No trabalho de Shao e Granryd (1995) para uma mistura de R-134a e óleo SW32 em condensadores, para qual a concentração em massa do óleo foi mantida na faixa de 1-5,1%, a queda de pressão foi aproximadamente 20% superior quando comparado ao refrigerante puro.

No próximo item são abordadas as misturas óleo-refrigerante com altas concentrações de óleo em função da importância deste tipo de mistura quando o foco é o compressor e não o restante do sistema de refrigeração.

2.2.2 Misturas óleo-refrigerante com alta concentração de óleo

Em compressores utilizados em sistema de refrigeração, o fluido lubrificante é, na verdade, uma mistura de óleo e refrigerante com altas concentrações de óleo. Apesar da importância deste assunto para o projeto, análise e funcionamento do compressor, um número relativamente reduzido de autores se dedicaram ao estudo destas misturas ricas em óleo.

Do ponto de vista do compressor, vários problemas podem ser abordados quando misturas óleo-refrigerante estão envolvidas. Aspectos relacionados à miscibilidade, solubilidade e pressão de vapor das misturas são alguns exemplos.

Em relação a estes aspectos encontram-se vários trabalhos realizados. Silva (1994), por exemplo, concluiu que a pressão de vapor do óleo é desprezível em relação à do refrigerante, como era de se esperar. Também esperado foi o resultado obtido por Thomas e Pham (1992) que, estudando uma mistura composta por óleo PAG (polialquileno glicol) e refrigerante R-134a, observaram que a pressão do vapor da mistura é praticamente igual à pressão do vapor do refrigerante, para concentrações de óleo de até 50%.

Outros autores abordaram o problema da miscibilidade e solubilidade das misturas óleo-refrigerante encontrados em sistemas de refrigeração. Os trabalhos de Martz *et al.* (1996),



Grebner e Crawford (1993), Baustian *et al.* (1986), Thome (1995), e Van Gaalen *et al.* (1990, 1991a, 1991b) são alguns exemplos deste tipo de estudo.

Um resultado importante relacionado ao estudo de misturas óleo-refrigerante voltado para o compressor rotativo foi obtido por Yanagisawa *et al.* (1994) que, ao estudar misturas de óleo mineral, óleo éster e óleo PAG com refrigerante R-134a e R-22, concluíram que a eficiência volumétrica do compressor para baixas velocidades de operação é maior para óleos de menor solubilidade.

Outra abordagem que pode ser feita com relação ao comportamento das misturas óleo-refrigerante do ponto de vista do compressor é o estudo do escoamento destas misturas em canais de pequena dimensão. Estes estudos têm sua importância destacada quando o foco é direcionado ao escoamento nos canais de lubrificação, em mancais radiais e ao longo das diversas folgas entre partes móveis do compressor. É importante frisar que, com relação a este tema são raros os trabalhos encontrados na literatura aberta. Ao que tudo indica, o primeiro trabalho voltado para este tema foi desenvolvido por Gasche (1996), seguido por Lacerda (2000) e Poiate Jr. (2001).

Gasche (1996) elaborou modelos para prever o vazamento de gás refrigerante através da folga radial de compressores de pistão rolante. Os resultados mostraram que a presença de bolhas no escoamento altera sensivelmente o cálculo do vazamento de gás e, portanto, deve ser incorporada ao modelo do escoamento da mistura. Devido à ausência de dados experimentais, principalmente com relação ao escoamento de espuma, alguns dos modelos propostos não puderam ser validados.

O escoamento bifásico em regime permanente de uma mistura rica em óleo mineral e refrigerante R-12 foi investigada por Lacerda (2000). Distribuições de pressão e temperatura foram medidas em um tubo horizontal de seção cilíndrica de 5,23 m de comprimento e diâmetro interno igual a 2,86 mm. Além disso, os padrões de escoamento da mesma mistura foram visualizados ao longo de um tubo de vidro de 3,03 mm de diâmetro interno. O autor observou duas regiões distintas ao longo do escoamento: uma região em que a redução de pressão é linear em consequência do atrito, prevalecendo o escoamento monofásico, e outra na qual observa-se um aumento significativo do gradiente de pressão. A liberação de gás da mistura líquida reduz substancialmente a densidade em cada seção transversal, proporcionando uma aceleração do escoamento para manter a vazão em massa constante. A queda de pressão é considerável e ocorre a formação de espuma. A visualização do escoamento permitiu que os autores comprovassem o surgimento de uma região de escoamento de espuma.

Poiate Jr. (2001) obteve distribuições de pressão e de temperatura similares para a mesma mistura escoando ao longo de um tubo de 3,22 mm de diâmetro e 6 m de comprimento, além de resultados de visualização semelhantes para a mistura escoando ao longo de um tubo de vidro de 3,0 mm de diâmetro interno. Embora as condições de operação dos testes no trabalho de Lacerda (2000) e Poiate Jr. (2001) sejam diferentes, os resultados são qualitativamente semelhantes.

Os resultados experimentais de Lacerda (2000) foram comparados com alguns modelos de predição da queda de pressão em escoamentos bifásicos por Barbosa *et al.*, (2004). Todos os métodos de predição de queda de pressão baseados nos multiplicadores bifásicos falharam para predizer a queda de pressão. Os autores adaptaram a correlação de Chisholm (1967) para o multiplicador bifásico do gás e os dados experimentais se ajustaram melhor com um desvio r.m.s de 26%. Com uma aproximação grosseira, os autores recomendaram a utilização desta nova correlação para misturas com características termodinâmicas e propriedades termofísicas similares, tal como a mistura de refrigerante R-134a e óleo éster (mistura estudada neste trabalho).

Nos trabalhos desenvolvidos por Lacerda (2000) e Poiate Jr. (2001) para a mistura óleo mineral-refrigerante R-12, ambos autores apontaram para a formação de espuma ao longo do escoamento. Este resultado é de suma importância, pois o escoamento de espumas se comporta de maneira diferente em relação aos escoamentos bifásicos conhecidos: escoamento em bolhas, pistonado, anular, e outros, chamados aqui de escoamento bifásicos convencionais. Em parte, isto é devido ao fato das espumas não se comportarem como um fluido newtoniano. Gasche (1996) apresentou uma revisão bibliográfica abrangente sobre espumas em geral e seu comportamento reológico.

A maioria dos trabalhos sobre escoamentos de espumas é relacionada ao escoamento de espumas aquosas. Os únicos trabalhos sobre escoamento de espumas óleo-refrigerante encontrados na literatura foram os estudos de Lacerda (2000) e Poiate Jr. (2001), ambos sobre o escoamento de espuma da mistura óleo mineral e refrigerante R-12. Os resultados destes trabalhos mostraram que na região onde a formação de espuma é observada, os gradientes de pressão e temperatura são superiores àqueles encontrados na região de escoamento monofásico ou na região de escoamento bifásico convencional. Resultados semelhantes foram obtidos por Castro *et al.* (2004) com uma mistura formada de óleo lubrificante ISO VG10 e refrigerante R-134a. É importante destacar que os dados obtidos por Castro *et al.* (2004) representam os resultados preliminares deste trabalho. A visualização do escoamento permitiu que os autores comprovassem o surgimento de uma região de escoamento de espuma. A maior contribuição

desse trabalho reside na investigação do escoamento bifásico com formação de espuma de uma mistura ainda em utilização em sistemas de refrigeração: uma mistura composta por óleo éster ISO VG10 e refrigerante R-134a.

O objetivo do presente trabalho é obter experimentalmente as distribuições longitudinais de pressão e de temperatura no escoamento da mistura em um tubo horizontal de 3,22 mm de diâmetro e 6 m de comprimento, definir os padrões do escoamento e calcular o gradiente de pressão devido ao atrito em escoamentos bifásicos em tubos de pequenas dimensões. Com isso, espera-se contribuir com o desenvolvimento tecnológico relacionado ao projeto de mancais e de sistemas de lubrificação de compressores de refrigeração, problemas de vazamento de gás refrigerante nas folgas dos compressores e ao controle da formação de espuma nos compressores.

A descrição da bancada experimental construída para realizar o estudo do escoamento da mistura óleo-refrigerante é apresentada no capítulo a seguir.



DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

Uma bancada experimental foi construída por Poiate Jr. (2001) para estudar o escoamento de misturas compostas por óleo e refrigerante. A bancada permite estudar o escoamento em canais de diferentes geometrias, possibilitando a medição das distribuições de temperatura e pressão, assim como a determinação dos padrões de escoamento. Em particular, esta bancada é utilizada neste trabalho para estudar o escoamento bifásico de uma mistura de poliol-éster (ISO VG10) e refrigerante R-134a ao longo de um tubo de 3,22 mm de diâmetro e 6 m de comprimento. A seguir apresenta-se a descrição da bancada experimental e da instrumentação utilizada.

3.1 Bancada experimental e instrumentação

Um esquema geral simplificado da bancada experimental é mostrado na Fig. 3.1. Uma descrição mais detalhada é apresentada por Poiate Jr. (2001). Basicamente, a bancada experimental é composta de quatro tanques, seção de testes, uma linha de retorno de gás (LRG), uma linha de retorno de óleo (LRO), instrumentação e um sistema de aquisição de dados. Todos esses equipamentos são montados de tal forma a produzir o escoamento da mistura óleo-refrigerante ao longo de um tubo metálico de aço cobreado de 3,22 mm ($\pm 0,03$) de diâmetro interno e de 6 m de comprimento ou ao longo de um tubo de vidro de 3,0 mm de diâmetro interno e 6 m de comprimento. O tubo metálico é equipado com 10 transdutores de pressão (± 2 kPa) e 15 termopares tipo T AWG36 ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) instalados na superfície do tubo. O tubo de vidro é usado para a visualização do escoamento.



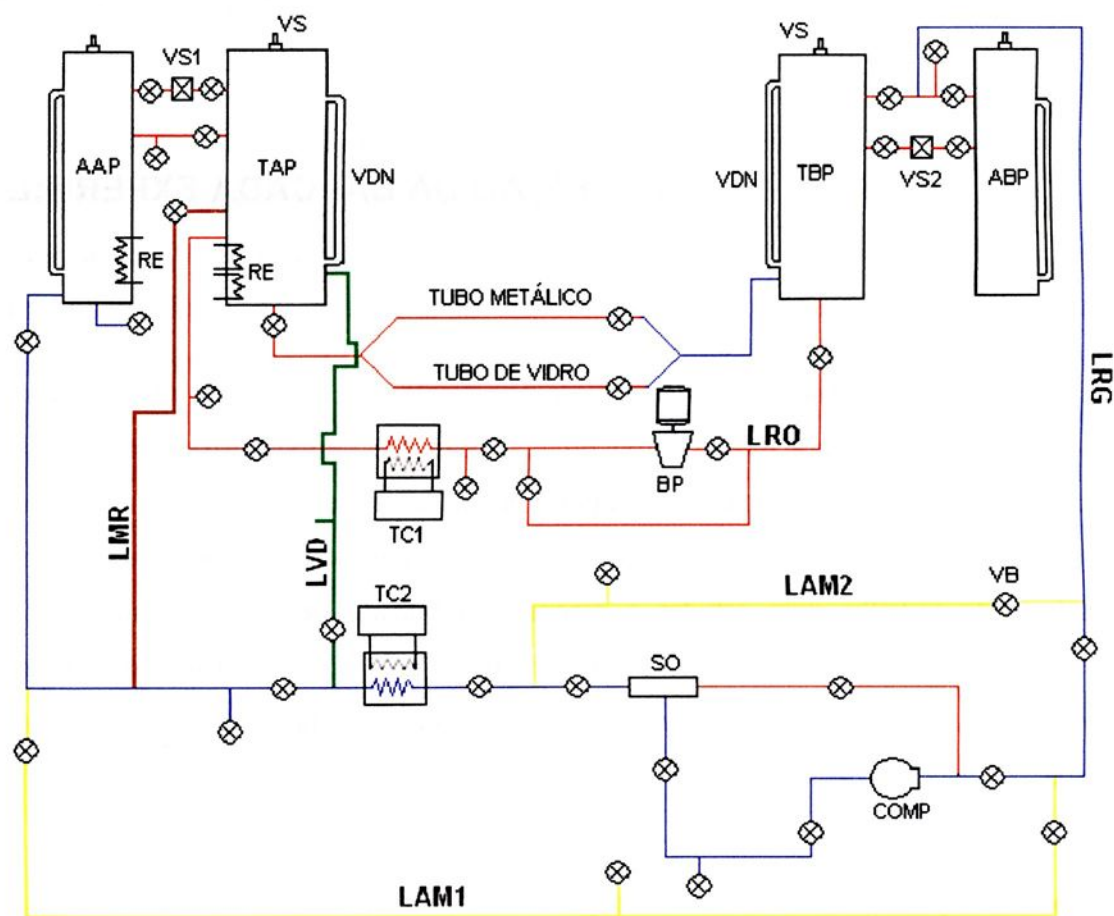


Figura 3.1 – Esquema da bancada experimental.

O principal objetivo dos tanques acumulador de alta pressão (AAP) e acumulador de baixa pressão (ABP) é manter constante a diferença de pressão entre os tanques de alta (TAP) e de baixa pressão (TBP), que são conectados pelos dois tubos que compõem a seção de testes. O tanque TAP é abastecido com óleo e refrigerante, de tal forma que uma mistura líquida na parte inferior do tanque coexiste em equilíbrio com refrigerante no estado de vapor na parte superior do tanque, sob certas condições de pressão e temperatura desejadas. Sensores de pressão e de temperatura monitoram as condições do vapor de refrigerante e da mistura líquida nos dois tanques. Os acumuladores de alta e de baixa pressão, AAP e ABP, operando em níveis de pressão, respectivamente, maior e menor do que o nível de pressão no TAP e no TBP mantém as pressões no TAP e TBP constantes por meio da abertura e fechamento de duas válvulas solenóides, VS1 e VS2, as quais são controladas pelo sistema de aquisição de dados. Durante a operação, a mistura líquida em equilíbrio no TAP é direcionada para um dos dois tubos,

dependendo do tipo de teste desejado: para o tubo de vidro, se teste de visualização de escoamento for desejado ou para o tubo metálico instrumentado, se medições das distribuições de pressão e de temperatura são requeridas.

Os equipamentos auxiliares consistem em um compressor (COMP), uma bomba de palheta (BP) e dois trocadores de calor: TC1 e TC2. O compressor é empregado para retornar o refrigerante ao AAP e a bomba é usada para retornar a mistura líquida ao TAP após a realização dos testes. Os trocadores são utilizados no caso da realização de um ensaio em uma temperatura baixa, logo após um ensaio numa temperatura maior. Outro papel importante dos trocadores de calor é resfriar o fluido refrigerante que é succionado do TAP pelos compressores usando a tubulação LMR, a tubulação LAM1, e a tubulação LVD, durante o processo de saturação do óleo com o refrigerante. Os dados de todos os sensores, inclusive os dados de sensores de monitoramento das condições de operação dos testes, foram armazenados em um microcomputador por meio de um sistema de aquisição automático de dados.

Dois sistemas de aquisição de dados – marca HBM, Spider 8 – cada um com 8 canais multiplexados (cada canal possui um conversor A/D), que podem operar sincronizados a uma taxa de 9600 Hz, com resolução de 16 bits, foram utilizados para medir a pressão nos TAP e TBP e a pressão nos 10 transdutores instalados no tubo metálico. Um outro sistema de aquisição de dados, também da HBM (MGCplus), com 32 canais foi utilizado para o tratamento do sinal dos 15 termopares tipo T, instalados no tubo metálico. O software Catman, produzido pela HBM, foi utilizado para adquirir, controlar, tratar e converter os dados experimentais.

Todos os instrumentos foram calibrados no local usando o sistema de aquisição de dados. Detalhes da calibração dos instrumentos de medição são descritos por Poiate Jr. (2001).

A seguir são apresentadas fotografias dos principais equipamentos da bancada experimental.

3.2 Fotografias dos equipamentos

As Figuras 3.2 a 3.17 apresentam algumas fotografias mostrando as diferentes partes da bancada experimental. A Figura 3.2 mostra uma vista parcial da bancada. Nela é mostrado, à esquerda, o acumulador de alta pressão (AAP) e, à direita, o tanque de alta pressão (TAP). O tanque de alta pressão possui diâmetro de 450 mm, altura de 2190 mm e capacidade de 250 litros. O acumulador de alta pressão possui diâmetro de 400 mm, altura de 1713 mm e capacidade de 140 litros.



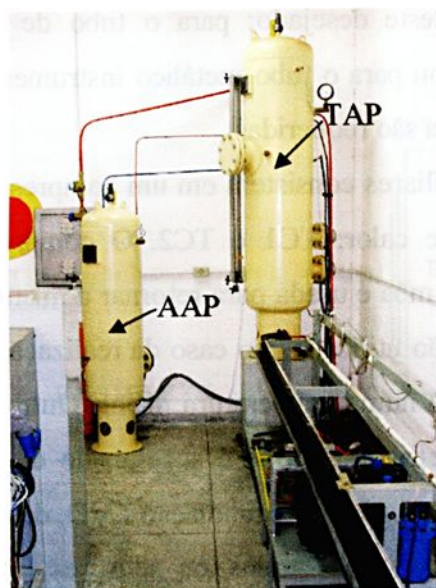


Figura 3.2 – Vista parcial da bancada, mostrando o TAP e o AAP.

A Figura 3.3. mostra outra vista parcial da bancada. À esquerda, o tanque de baixa pressão (TBP), e à direita, o acumulador de baixa pressão (ABP). O tanque de baixa pressão possui diâmetro de 500 mm, altura de 2178 mm e capacidade de 300 litros. As dimensões físicas do acumulador de baixa pressão são semelhantes ao do AAP.

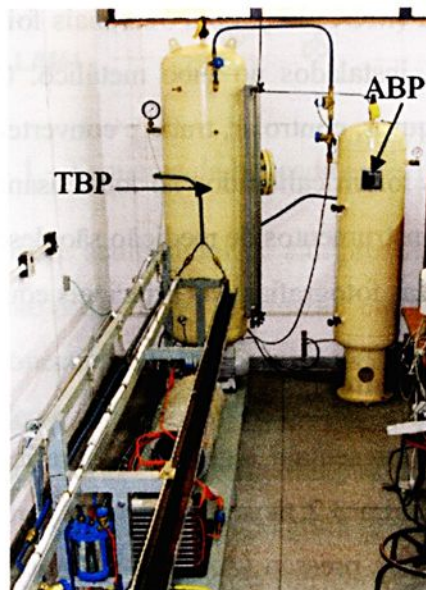


Figura 3.3 – Vista parcial da bancada, mostrando o TBP e o ABP.

A Figura 3.4. mostra os quatro últimos transdutores de pressão, o isolamento da seção de teste de aço cobreado e o tubo de vidro.

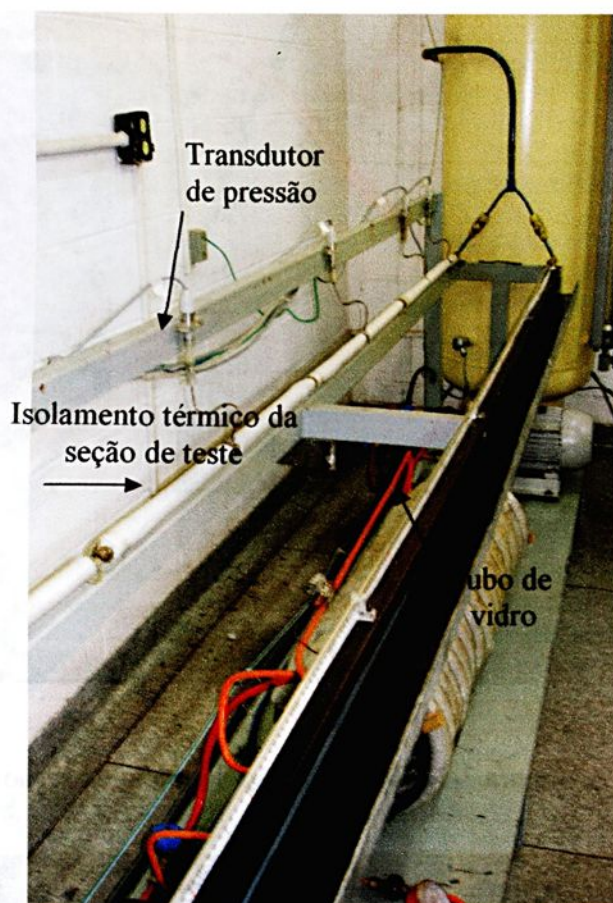


Figura 3.4 – Transdutores de pressão, isolamento da seção de teste e tubo de vidro.

A Figura 3.5. mostra o início da seção de teste. A transição da tubulação que sai do tanque de alta pressão (vermelho) com a seção de aço cobreada é construída em latão e para o tubo de vidro é construída em acrílico. A Figura 3.6. mostra detalhadamente a contração de acrílico.

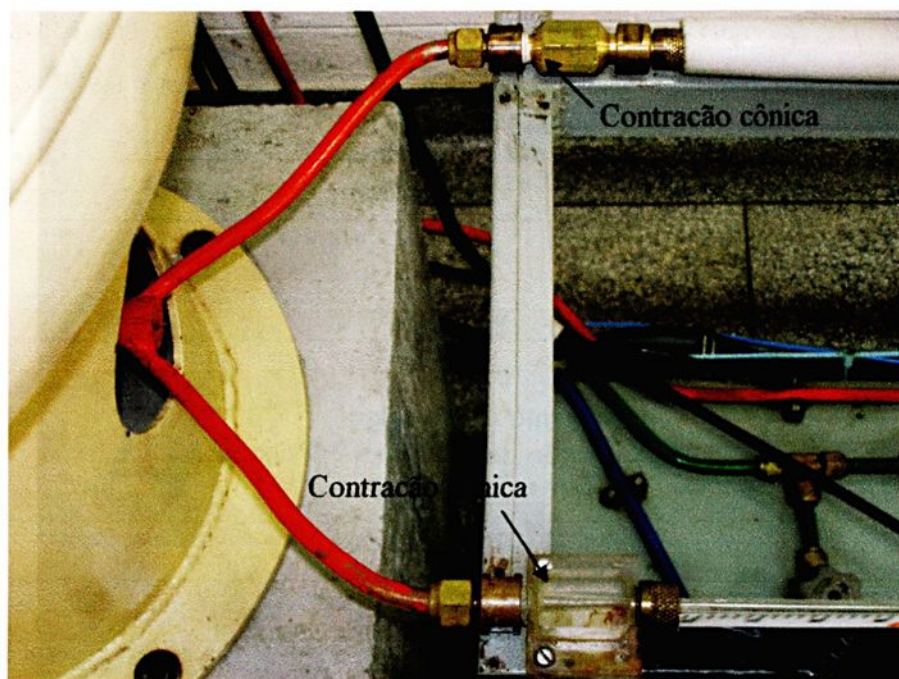


Figura 3.5 – Visualização do início da seção de teste.



Figura 3.6 – Visualização da contração de acrílico da seção de teste de tubo de vidro.

A Figura 3.7. mostra detalhadamente a junção dos tubos de vidros, construída em acrílico. Esta junção é necessária para unir dois tubos de vidro de 3 m de comprimento da seção de teste de visualização.

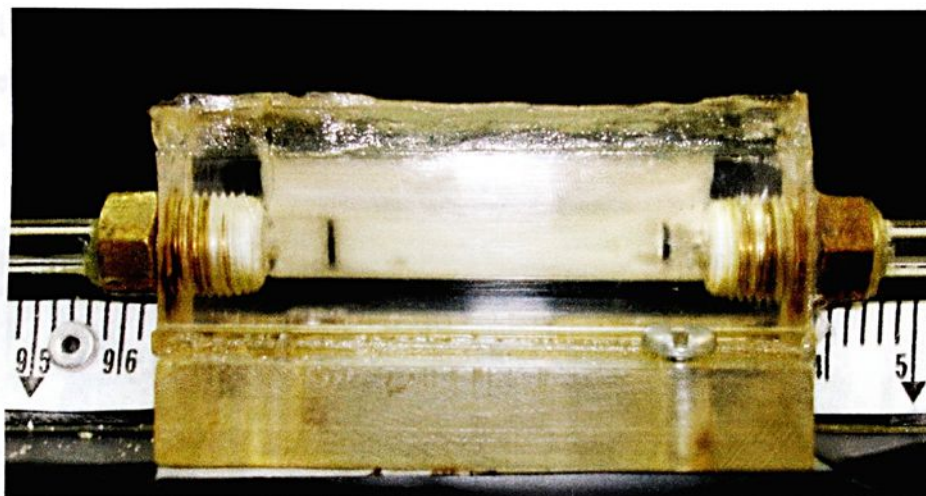


Figura 3.7 – Visualização da junção dos tubos de vidro.

A Figura 3.8. mostra detalhadamente o sétimo transdutor de pressão e o oitavo termopar na seção de teste cobreada.

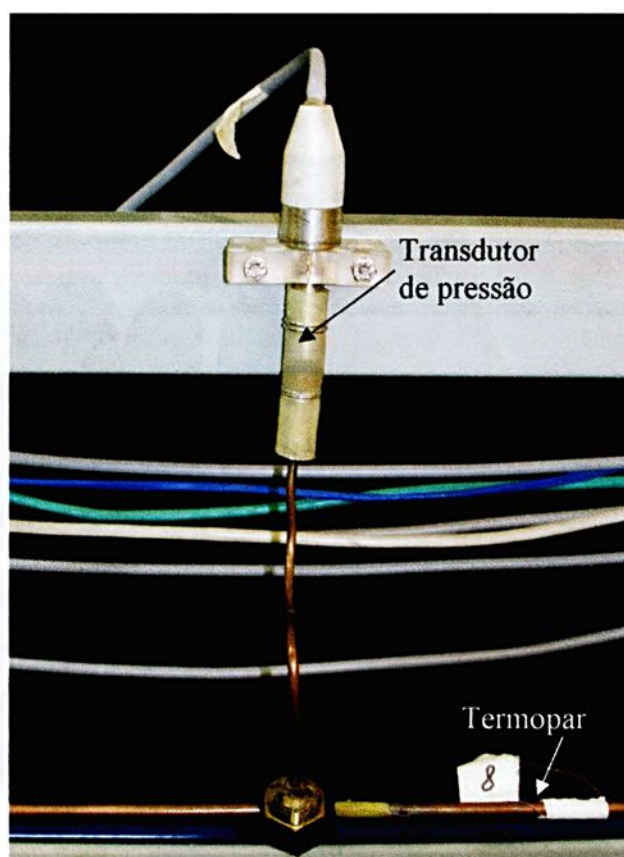


Figura 3.8 – Visualização de um transdutor e um termopar.

A Figura 3.9. mostra a unidade condensadora e o trocador de calor da linha de retorno do refrigerante R-134a. A Figura 3.10 apresenta o mesmo trocador de calor durante a realização de teste e o congelamento de vapor d'água em sua tubulação.

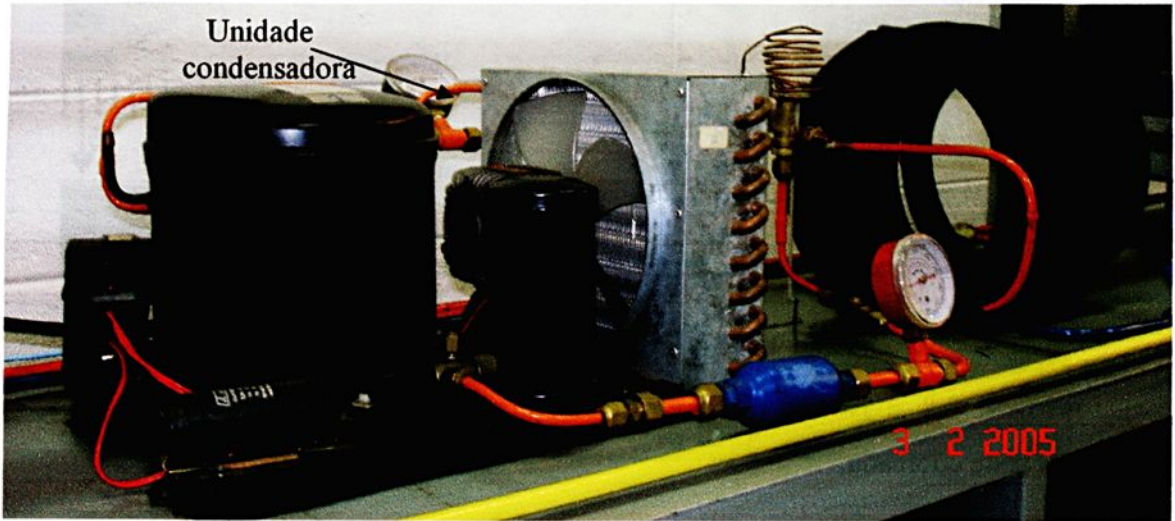


Figura 3.9 – Visualização da unidade condensadora e do trocador de calor.

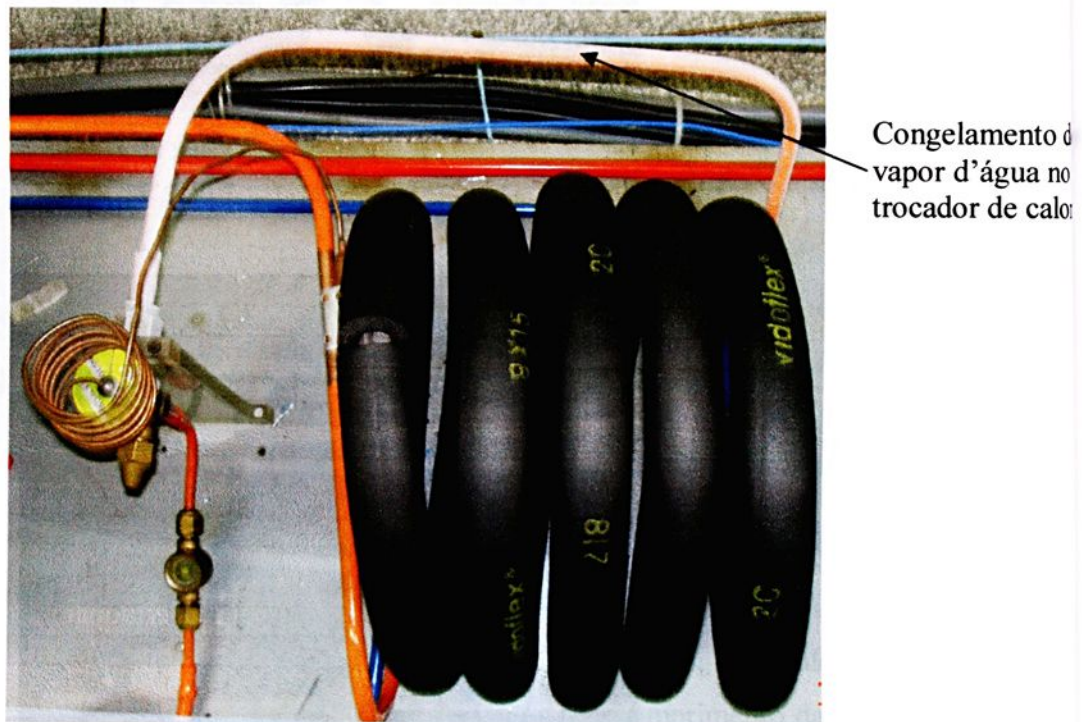


Figura 3.10 – Visualização do congelamento de vapor d'água no trocador de calor.

A Figura 3.11 mostra o compressor aberto utilizado no processo de saturação da mistura óleo-refrigerante e para manter a diferença de pressão constante durante a realização dos testes. A tubulação vermelha faz a comunicação do compressor com o separador de óleo apresentado na Fig. 3.12.

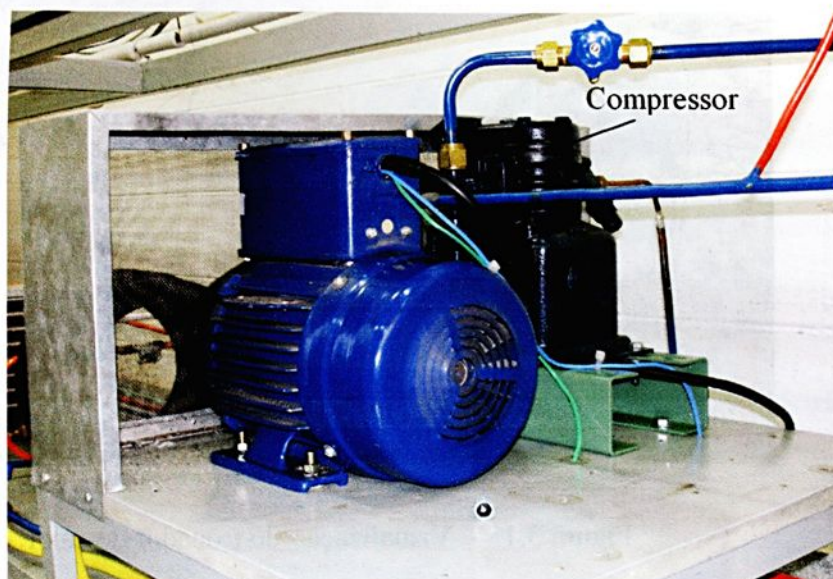


Figura 3.11 – Visualização do compressor aberto.

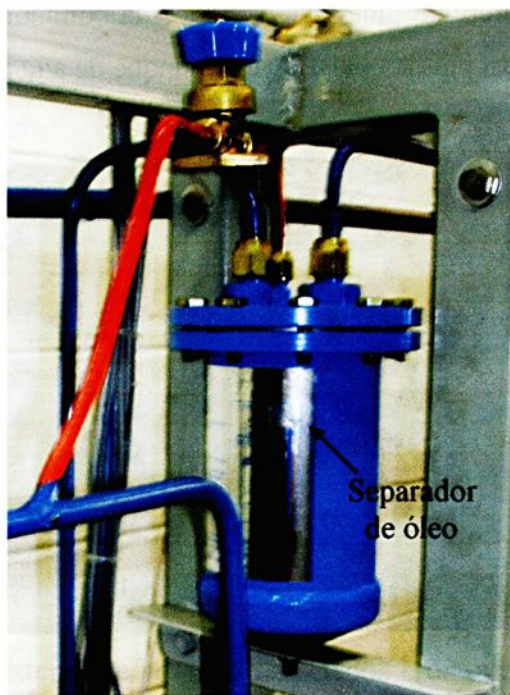


Figura 3.12 – Visualização do filtro separador de óleo.

A Figura 3.13 mostra o trocador de calor utilizado para resfriar o óleo no seu retorno para o tanque de alta pressão (TAP).



Figura 3.13 – Visualização do trocador de calor.

A Figura 3.14 apresenta uma vista superior da bomba de palheta utilizada para bombear o óleo do tanque de baixa pressão (TBP) para o tanque de alta pressão (TAP).

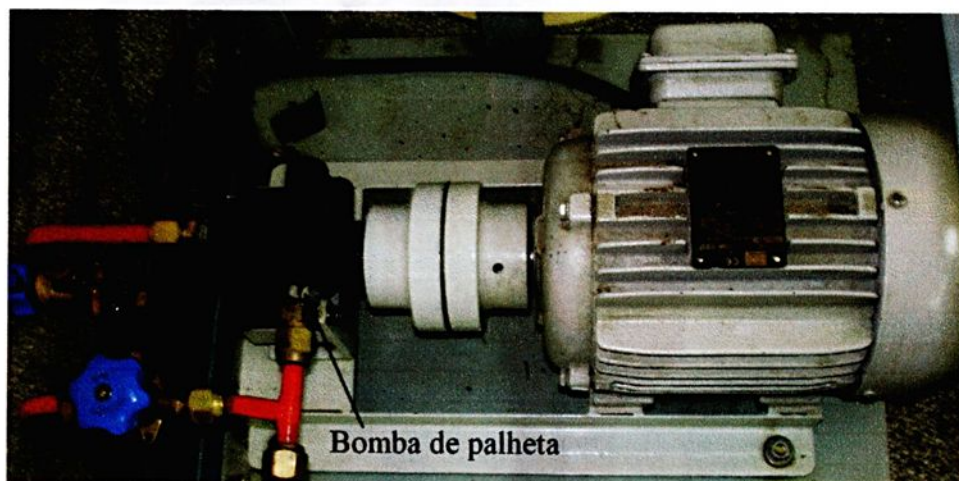


Figura 3.14 – Visualização da bomba de palheta.

A Figura 3.15 mostra a parte frontal do painel de comando elétrico da bancada e a Fig. 3.16 mostra a parte interna do painel.



Figura 3.15 – Visualização da parte frontal do painel de comando elétrico

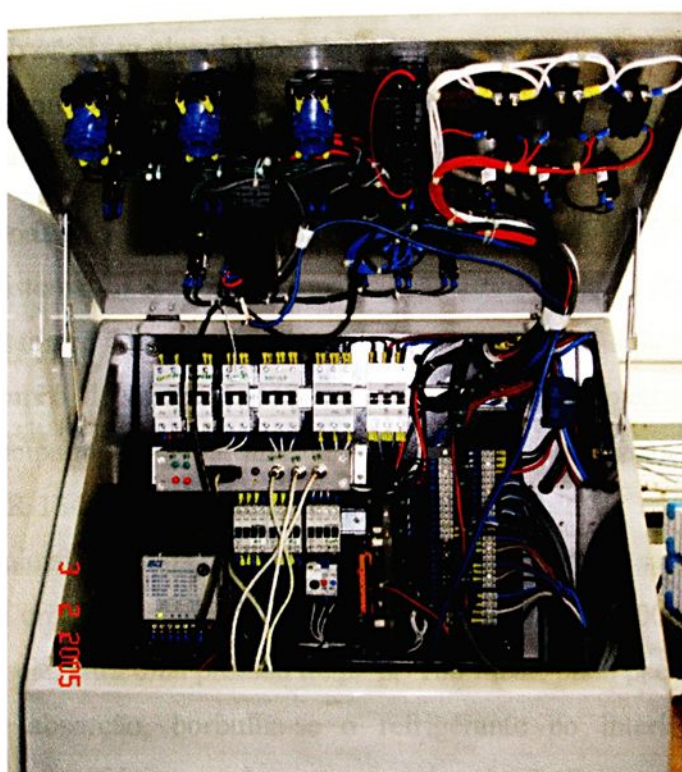


Figura 3.16 – Visualização da parte interna do painel de comando elétrico.

A Figura 3.17 mostra o sistema de aquisição de dados e os microcomputadores utilizados durante a realização dos testes.



Figura 3.17 – Visualização do sistema de aquisição e microcomputadores.

O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos da medição das distribuições de pressão e temperatura ao longo do escoamento. Além disso, usando um modelo bastante simples, apresentam-se dados para o título, fração de vazio, concentração e densidade locais, resultados que são calculados em função da pressão e temperatura medidos.

ESCOAMENTO DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados com a mistura composta de óleo éster ISO VG10 e refrigerante R-134a. Inicialmente descreve-se o procedimento experimental e apresentam-se os resultados experimentais obtidos para as distribuições de pressão e temperatura ao longo do escoamento. Posteriormente, obtêm-se algumas variáveis importantes do escoamento: título, concentração de refrigerante, fração de vazio e densidade (x , w , α e ρ), que são calculadas a partir dos perfis de temperatura e pressão experimentais.

4.2 Procedimento Experimental

Primeiramente, todas as partes necessárias da bancada experimental foram limpas com um solvente líquido e o sistema foi evacuado a uma pressão absoluta de 10 Pa. Em seguida, 80 kg de óleo éster ISO VG10 foram colocados no tanque de alta pressão e aquecidos até 60 °C durante três horas, com a bomba de vácuo em funcionamento, com o objetivo de retirar impurezas voláteis do óleo, principalmente água, uma vez que esse óleo apresenta higroscopia. A seguir, 60 kg de refrigerante R-134a foram colocados em ambos AAP e TAP.

O procedimento inicial de todos os testes consiste inicialmente na saturação do óleo no TAP com refrigerante para uma dada temperatura e para uma pressão de 100 mbar acima da pressão desejada no teste, ou seja, para uma pressão de $p_i = p_t + 100$ mbar, onde p_t é a pressão do teste. Para aumentar a taxa de absorção, borbulha-se o refrigerante no interior do TAP usando o compressor, que retira o refrigerante da parte superior do TAP e o comprime em sua parte inferior. Quando o refrigerante é absorvido pelo óleo, a pressão tende a diminuir, o que ativa a abertura da VS1, que libera refrigerante para manter a pressão no TAP constante. Esse processo continua até que a saturação do óleo seja atingida para a pressão inicial p_i . O processo de saturação pode durar até seis horas, dependendo das condições de operação desejadas no teste. Depois que a saturação é atingida para a pressão p_i , parte do refrigerante da parte superior do

TAP é liberada para reduzir a pressão até p_t , que é a pressão desejada no teste. Essa redução de pressão promove uma rápida liberação de refrigerante, na forma de bolhas de vapor, da mistura líquida (*outgassing*), assegurando que a saturação foi estabelecida na pressão p_t . Estima-se que a incerteza da pressão de saturação é de $\pm 1\%$ do valor da pressão no tanque, devido a sua flutuação causada pela abertura e fechamento da válvula solenóide. Esse novo estado de saturação é alcançado num período de 30 a 60 minutos após o início do processo e é definido quando a pressão no TAP para de aumentar, ou seja, a liberação de bolhas dentro da mistura líquida para de ocorrer. Durante todo o processo de saturação, a temperatura dentro do TAP é controlada no valor desejado com uma incerteza estimada em $\pm 1^\circ\text{C}$.

Após o processo de saturação, dependendo do tipo de teste desejado, as válvulas da seção de testes são manipuladas para promover o escoamento da mistura saturada ao longo do tubo de vidro para testes de visualização, ou ao longo do tubo metálico instrumentado, caso se deseje realizar as medições de temperatura e pressão. Durante o teste, o compressor permanece ligado para retornar o refrigerante do ABP para o AAP. A aquisição de dados inicia-se após o estabelecimento do regime permanente, que é monitorado pela temperatura de saída do escoamento.

4.3 Resultados Experimentais

Distribuições de pressão e de temperatura foram medidas e os padrões de escoamento foram visualizados em mais de 40 testes, para temperaturas de entrada em torno de 30°C e pressões no TAP de 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 e 6,5 bar. Essas pressões foram escolhidas de tal forma que escoamento de espuma pudesse ser observado na região de saída do escoamento.

Na Tabela 4.1 são mostradas as pressões no TAP e TBP, a temperatura de entrada do escoamento e a diferença de pressão entre o primeiro e o último transdutor (Δp_{tubo}).



Tabela 4.1 – Condições de operação dos testes realizados.

Ensaio	p_{TAP} (bar)	p_{TBP} (bar)	$T_{entrada}$ (°C)	Δp_{tubo} (bar)
01	4,5	1,1	30,3	2,6
02		1,0	30,1	2,6
03		1,0	30,3	2,6
04		0,7	30,4	2,6
05		0,7	30,4	2,8
06		0,8	30,5	2,8
07	5,0	1,1	30,3	2,9
08		1,1	30,0	2,8
09		1,1	30,4	2,9
10		0,9	30,5	2,9
11		0,7	30,4	2,9
12		0,9	30,4	3,0
13	5,5	0,9	30,4	3,0
14		1,1	30,4	3,2
15		1,1	30,7	3,2
16		0,9	30,5	3,2
17		0,8	30,4	3,3
18		0,8	30,9	3,3
19	6,0	0,8	30,5	3,3
20		0,9	30,3	3,3
21		0,8	30,6	3,3
22		0,9	30,6	3,3
23		0,9	30,8	3,6
24		0,8	30,3	3,6
25	6,5	0,9	30,9	3,6
26		0,9	31,0	3,6
27		0,9	29,9	3,6
28		0,9	31,6	3,6
29		0,8	31,0	3,6
30		0,9	31,0	3,6
31	4,5	1,0	30,9	3,8
32		1,0	30,9	3,9
33		1,0	30,4	3,9
34		1,0	30,7	3,9
35		1,0	31,3	3,9
36	4,5	0,6	30,1	2,9
37	5,0	0,8	29,9	3,0
38	5,5	0,9	29,9	3,4
39	6,0	0,8	31,7	3,6
40	6,5	1,1	30,4	3,9

As propriedades da mistura e do escoamento nas condições de entrada do tubo para os testes realizados são apresentados na Tabela 4.2. As equações utilizadas para o cálculo da

concentração, w , densidade, ρ , e viscosidade cinemática, ν , são apresentadas no Apêndice C. Para evitar o desprendimento de refrigerante antes que a mistura alcançasse a seção de testes, não foi utilizado nenhum medidor de vazão na entrada do escoamento. Ao invés disso, a vazão em massa foi calculada usando o gradiente de pressão linear medido na região de entrada do escoamento, onde a mistura ainda encontrava-se no estado líquido. A vazão em massa foi calculada a partir da equação:

$$\dot{m} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \bar{V} \rho_{\text{mistura}} \quad (4.1)$$

O procedimento iterativo para o cálculo da vazão em massa e do número de Reynolds são mostrados no Apêndice D. As incertezas das variáveis mostradas na Tabela 4.2 são apresentadas no Apêndice E.



Tabela 4.2 – Propriedades da mistura e do escoamento nas condições da entrada do tubo.

Ensaio	Concentração (%)	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade Cinemática (x10 ⁻⁶ m ² /s)	Vazão (g/s)	Número de Reynolds
01	23,1 ± 0,6	963 ± 1	2,8 ± 0,1	19,2 ± 0,3	2840 ± 130
02	23,4 ± 0,6	964 ± 1	2,7 ± 0,1	18,2 ± 0,2	2730 ± 130
03	23,0 ± 0,6	963 ± 1	2,8 ± 0,1	18,5 ± 0,3	2720 ± 130
04	22,7 ± 0,6	962 ± 1	2,8 ± 0,1	18,5 ± 0,3	2680 ± 120
05	22,7 ± 0,6	962 ± 1	2,8 ± 0,1	19,1 ± 0,3	2770 ± 130
06	22,7 ± 0,6	962 ± 1	2,8 ± 0,1	19,6 ± 0,3	2850 ± 130
07	27,1 ± 0,8	970 ± 2	2,1 ± 0,1	18,1 ± 0,3	3530 ± 200
08	27,9 ± 0,8	972 ± 2	2,0 ± 0,1	17,3 ± 0,2	3500 ± 200
09	26,8 ± 0,8	970 ± 2	2,1 ± 0,1	18,0 ± 0,2	3450 ± 200
10	26,4 ± 0,8	969 ± 2	2,1 ± 0,1	17,8 ± 0,2	3340 ± 190
11	26,7 ± 0,8	970 ± 2	2,1 ± 0,1	17,2 ± 0,3	3290 ± 190
12	26,6 ± 0,8	970 ± 2	2,1 ± 0,1	18,6 ± 0,3	3540 ± 200
13	26,7 ± 0,8	970 ± 2	2,1 ± 0,1	20,2 ± 0,3	3870 ± 220
14	31,4 ± 1,0	979 ± 4	1,5 ± 0,1	18,0 ± 0,3	4710 ± 320
15	30,4 ± 1,0	976 ± 3	1,6 ± 0,1	18,4 ± 0,3	4590 ± 310
16	31,0 ± 1,0	978 ± 4	1,6 ± 0,1	17,3 ± 0,2	4440 ± 300
17	31,3 ± 1,0	978 ± 4	1,6 ± 0,1	17,1 ± 0,2	4420 ± 300
18	29,6 ± 1,0	975 ± 3	1,7 ± 0,1	18,9 ± 0,3	4510 ± 310
19	31,0 ± 1,0	978 ± 4	1,6 ± 0,1	17,3 ± 0,2	4400 ± 300
20	31,8 ± 1,0	980 ± 4	1,5 ± 0,1	18,6 ± 0,3	4970 ± 340
21	30,7 ± 1,0	977 ± 3	1,6 ± 0,1	19,5 ± 0,3	4920 ± 330
22	30,8 ± 1,0	977 ± 4	1,6 ± 0,1	20,1 ± 0,3	5120 ± 350
23	35,2 ± 1,3	986 ± 6	1,2 ± 0,1	20,6 ± 0,3	6970 ± 550
24	37,6 ± 1,3	991 ± 7	1,1 ± 0,1	19,1 ± 0,3	7200 ± 570
25	34,7 ± 1,3	985 ± 6	1,2 ± 0,1	20,7 ± 0,3	6860 ± 550
26	34,3 ± 1,2	984 ± 5	1,2 ± 0,1	20,2 ± 0,3	6540 ± 520
27	39,9 ± 1,4	996 ± 8	0,9 ± 0,1	19,0 ± 0,3	7950 ± 620
28	31,9 ± 1,2	979 ± 5	1,4 ± 0,1	20,9 ± 0,3	6040 ± 480
29	34,2 ± 1,2	984 ± 5	1,2 ± 0,1	20,3 ± 0,3	6570 ± 520
30	34,4 ± 1,2	984 ± 5	1,2 ± 0,1	22,0 ± 0,3	7170 ± 570
31	41,1 ± 1,6	997 ± 10	0,8 ± 0,1	22,5 ± 0,4	10750 ± 970
32	41,1 ± 1,6	997 ± 10	0,8 ± 0,1	22,4 ± 0,4	10690 ± 970
33	44,3 ± 1,7	1004 ± 12	0,7 ± 0,1	22,3 ± 0,4	12270 ± 1100
34	42,4 ± 1,6	1001 ± 11	0,8 ± 0,1	21,8 ± 0,4	11040 ± 1000
35	38,7 ± 1,5	992 ± 8	0,9 ± 0,1	24,0 ± 0,4	10290 ± 940
36	23,4 ± 0,6	964 ± 1	2,7 ± 0,1	19,9 ± 0,3	3020 ± 140
37	28,1 ± 0,8	973 ± 2	2,0 ± 0,1	19,8 ± 0,3	4000 ± 230
38	33,3 ± 1,0	982 ± 4	1,4 ± 0,1	20,3 ± 0,3	4510 ± 390
39	31,6 ± 1,2	978 ± 4	1,4 ± 0,1	20,2 ± 0,3	8850 ± 460
40	44,1 ± 1,7	1004 ± 12	0,7 ± 0,1	25,0 ± 0,5	13340 ± 1220

As distribuições de pressão e de temperatura para os testes 01 a 06 são mostradas, respectivamente, nas Figs. 4.1 e 4.2 para uma pressão no tanque de alta pressão constante em

torno de 4,5 bar. Os resultados de pressão e de temperatura apresentados são valores médios das medições realizadas durante um período de 3 a 5 min após o estabelecimento do regime permanente no escoamento. O regime permanente é considerado estabelecido quando a variação de temperatura do último termopar for da ordem de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Essas medidas foram realizadas utilizando o sistema de aquisição de dados descrito no Capítulo 3. O número de Reynolds de cada teste está indicado na Fig. 4.1.

Como pode ser observado na Fig. 4.1, as distribuições de pressão apresentam um comportamento linear na região de entrada do tubo, até aproximadamente $z=4$ m, o que é uma indicativa de que o escoamento monofásico prevalece nesta região e a queda de pressão se deve apenas ao atrito. Os valores constantes de temperatura medidos nessa região, mostrados na Fig. 4.2, confirmam a predominância do padrão monofásico do escoamento. Após essa região, o gradiente de pressão começa a aumentar em razão do maior desprendimento de refrigerante da mistura líquida na forma de bolhas de vapor (*outgassing*), causando uma redução na massa específica do fluido (mistura bifásica) em cada seção transversal. Conseqüentemente, o escoamento acelera para satisfazer o princípio de conservação da massa e a queda de pressão aumenta. Quando a pressão diminui e o refrigerante é liberado da mistura líquida, a temperatura do escoamento diminui devido à transferência de calor (entalpia de vaporização) para o refrigerante, necessária para a sua vaporização. No final do tubo os gradientes de pressão e de temperatura se acentuam devido ao aumento significativo da formação de bolhas. Esse aumento é de tal ordem de magnitude que se observa a formação de espuma nos testes de visualização.



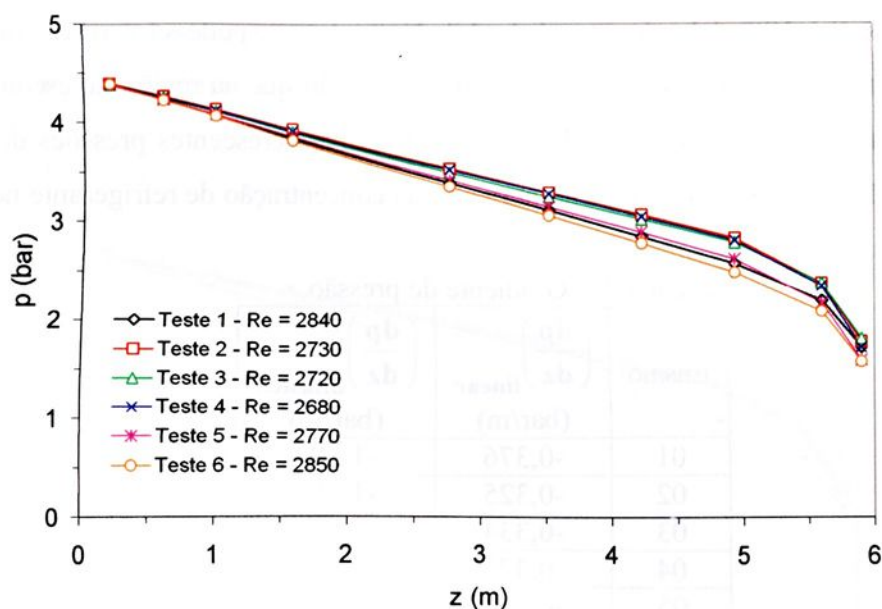


Figura 4.1 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

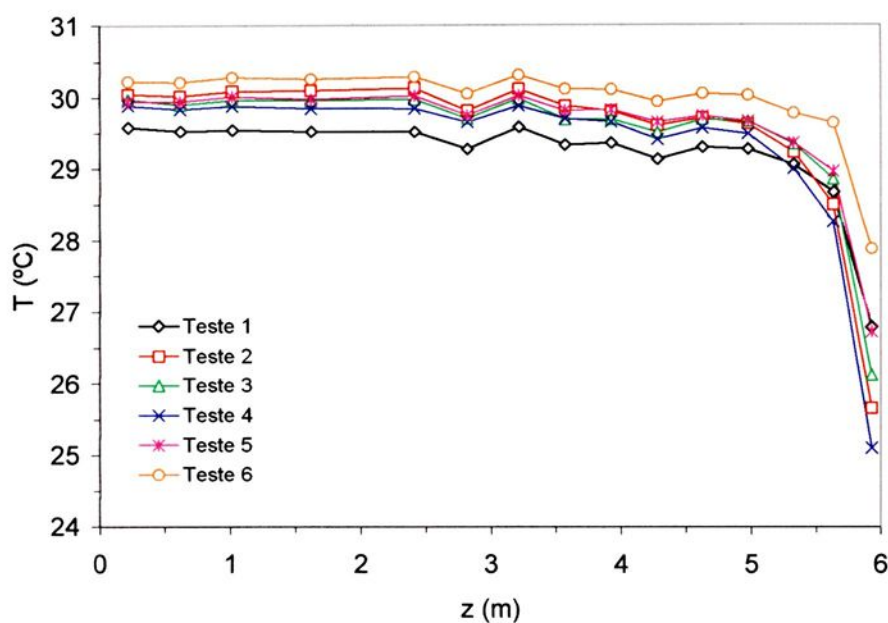


Figura 4.2 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

Como pode ser observado na Fig. 4.2, há uma redução da temperatura no termopar 6 ($z = 2,82$ m). Para verificar se havia algum problema de instalação, esse termopar foi retirado, conferido seu funcionamento e reinstalado. Contudo, continuou acusando o mesmo tipo de efeito. Portanto, esta redução de temperatura pode ser resultado da nucleação de bolhas nesta região.

Para se ter uma idéia da ordem de grandeza dos gradientes de pressão nas regiões de escoamento monofásico (região de entrada) e de espuma (gradiente de pressão calculado entre o

transdutor 9 e 10), elaborou-se a Tab. 4.3. Nessa tabela, pode-se verificar que os gradientes de pressão na região bifásica de espuma são maiores do que na região de escoamento monofásico. Além disso, nota-se que essa diferença aumenta para crescentes pressões de entrada (testes de numerações superiores), devido ao aumento da concentração de refrigerante nesses casos.

Tabela 4.3 – Gradiente de pressão.

Ensaio	$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{linear}}$ (bar/m)	$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{bifásico}}$ (bar/m)
01	-0,376	-1,582
02	-0,325	-1,989
03	-0,334	-1,886
04	-0,327	-2,082
05	-0,364	-1,938
06	-0,394	-1,692
07	-0,334	-2,384
08	-0,306	-2,434
09	-0,332	-2,345
10	-0,324	-2,471
11	-0,309	-2,572
12	-0,352	-2,391
13	-0,406	-2,089
14	-0,300	-2,716
15	-0,318	-2,750
16	-0,284	-2,814
17	-0,276	-2,808
18	-0,337	-2,741
19	-0,282	-2,794
20	-0,317	-2,747
21	-0,350	-2,688
22	-0,368	-2,642
23	-0,349	-3,016
24	-0,294	-2,941
25	-0,353	-3,001
26	-0,341	-3,040
27	-0,282	-2,970
28	-0,375	-2,965
29	-0,345	-2,936
30	-0,396	-2,884
31	-0,364	-3,232
32	-0,361	-3,238
33	-0,345	-3,169
34	-0,338	-3,240
35	-0,419	-3,1268

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam resultados para os perfis de pressão e de temperatura para os testes 7 a 13, nos quais a pressão no vaso de alta pressão foi mantida em 5,0 bar.

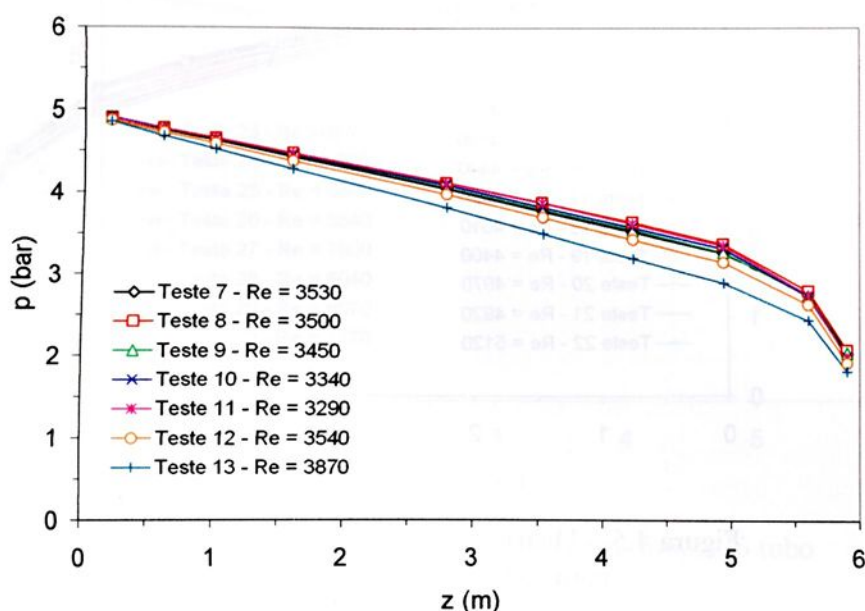


Figura 4.3 – Distribuição da pressão (p) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

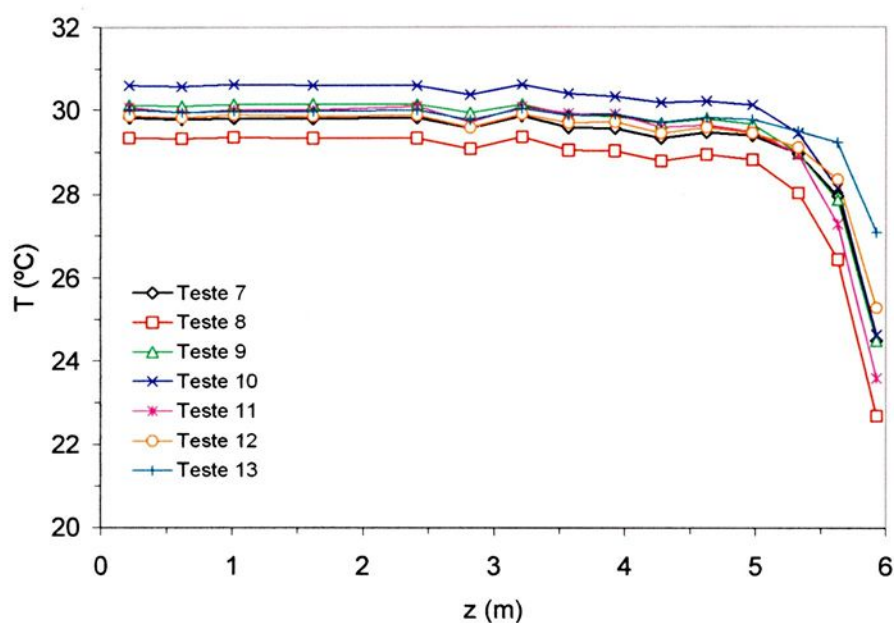


Figura 4.4 – Distribuição da temperatura (T) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam resultados semelhantes aos anteriores para os testes 14 a 22, para uma pressão no vaso de alta pressão de 5,5 bar.

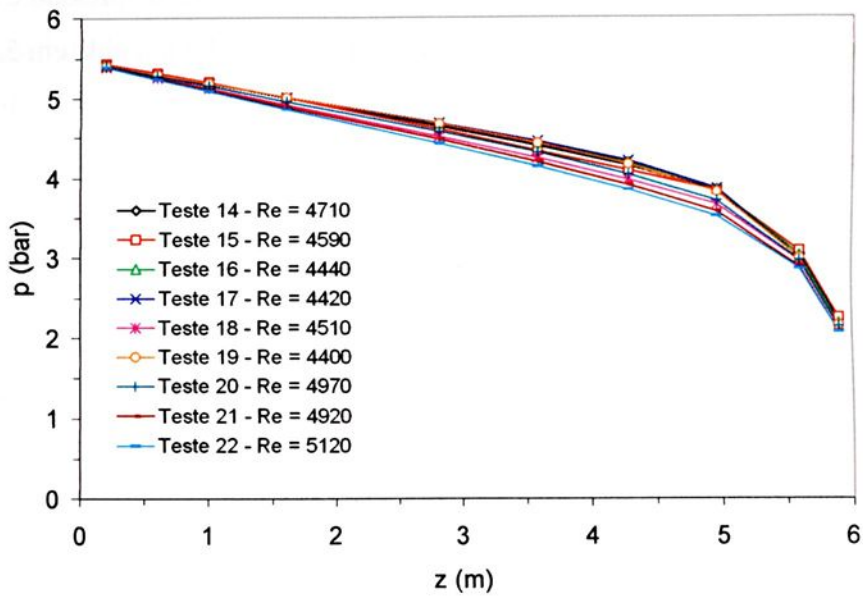


Figura 4.5 – Distribuição da pressão (p) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

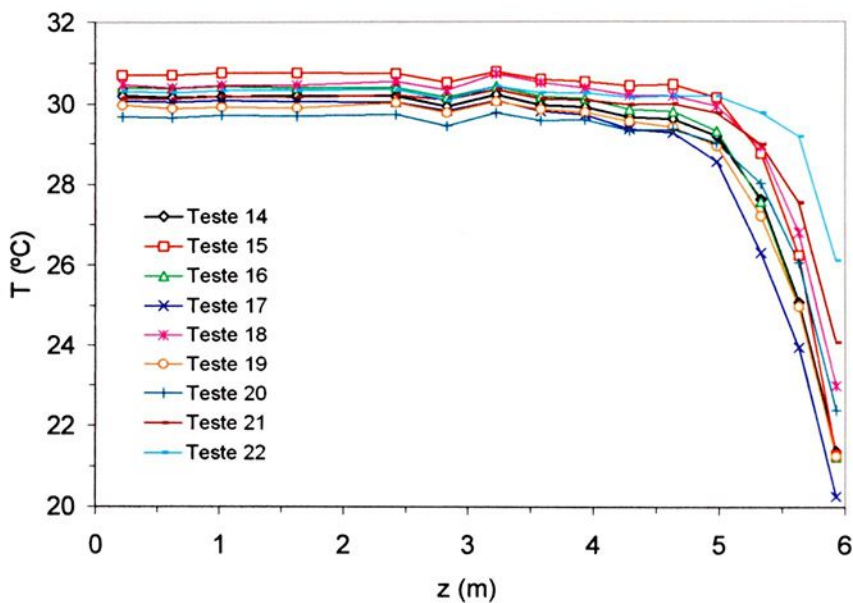


Figura 4.6 – Distribuição da temperatura (T) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam resultados semelhantes aos anteriores para os testes 23 a 30, para uma pressão no vaso de alta pressão de 6,0 bar.

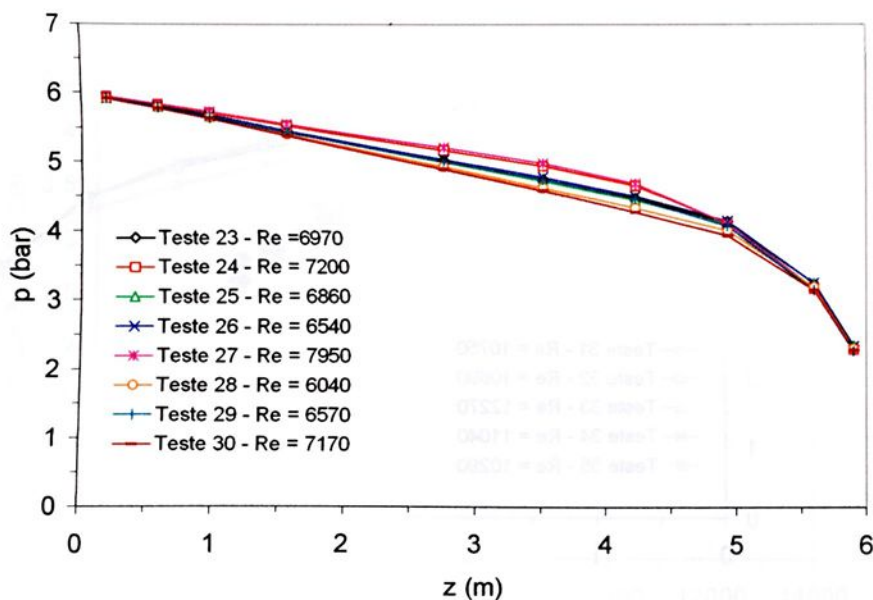


Figura 4.7 – Distribuição da pressão (p) ao longo do tubo para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

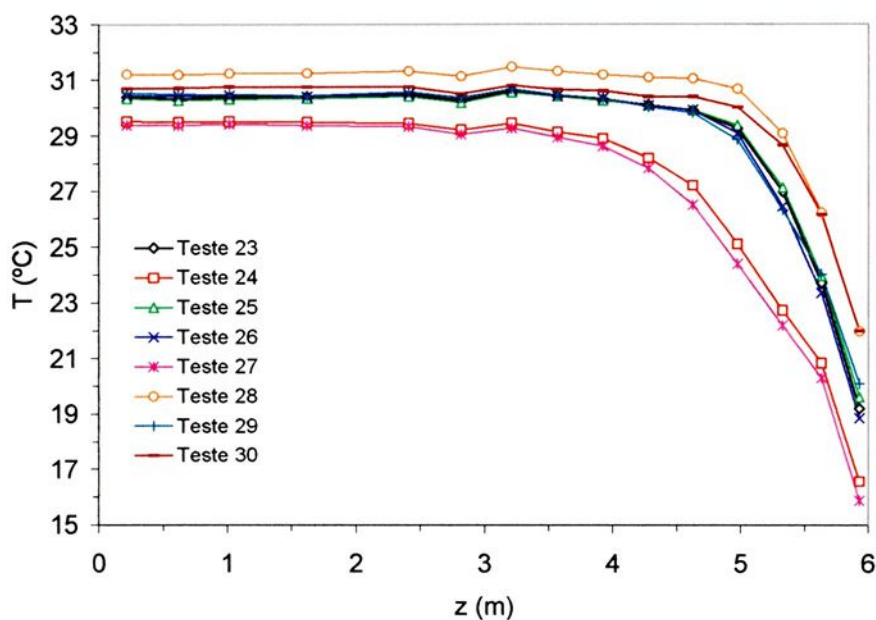


Figura 4.8 – Distribuição da temperatura (T) ao longo do tubo para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram os resultados para os testes 31 a 35. Nestes ensaios manteve-se a pressão no vaso de alta pressão em 6,5 bar. Novamente, observa-se que a tendência das distribuições de pressão e temperatura manteve-se idêntica aos demais ensaios.

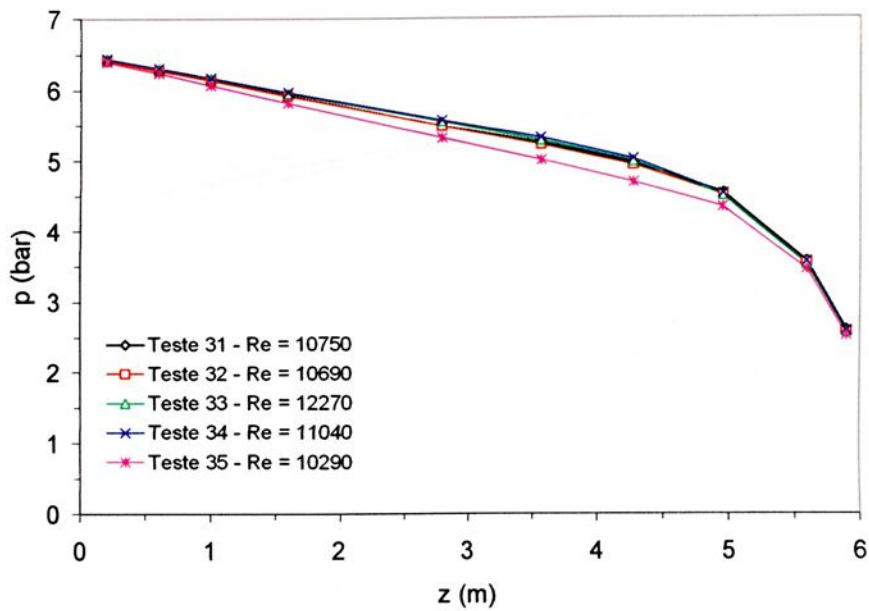


Figura 4.9 – Distribuição da pressão (p) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

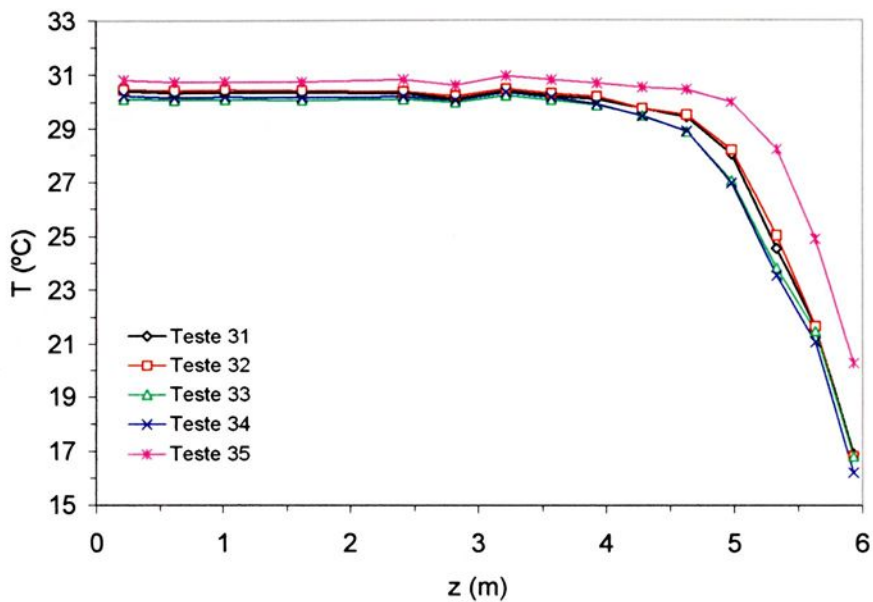


Figura 4.10 – Distribuição da temperatura (T) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

A Figura 4.11 apresenta a diferença de pressão entre o primeiro e o último transdutor de pressão (Δp_{tubo}) em função do número de Reynolds. Observa-se que para todos os testes realizados o número de Reynolds do escoamento está na região caracterizada como turbulenta. No mesmo gráfico, pode-se observar que o número de Reynolds aumenta com a diferença de pressão.

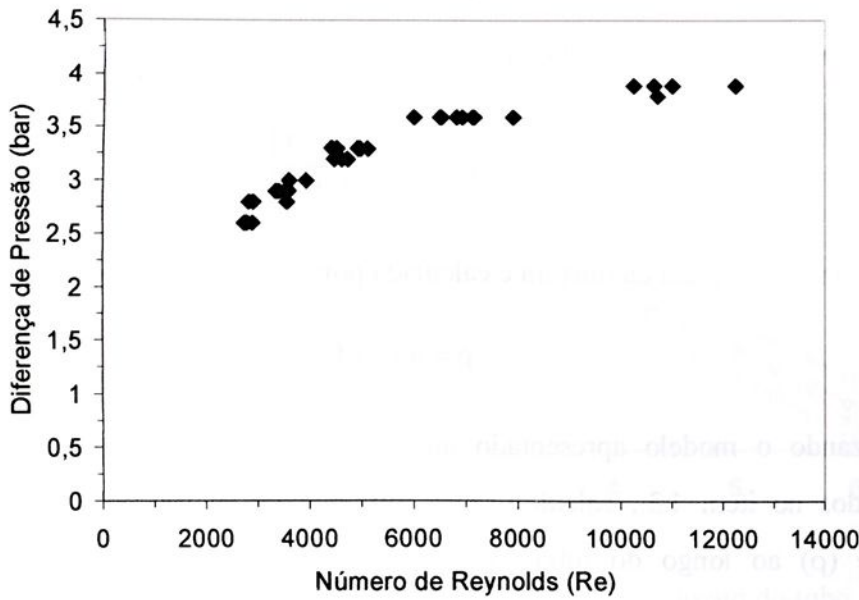


Figura 4.11 – Diferença de pressão (Δp) em função do número de Reynolds (Re).

4.4 Cálculo dos Parâmetros Experimentais

Com a intenção de obter a ordem de magnitude de outros parâmetros importantes de escoamentos bifásicos tais como título, fração de vazio e densidade, desenvolveu-se um modelo bastante simples baseado no equilíbrio local da mistura.

Supondo que em cada posição z a mistura líquida permanece sempre saturada de refrigerante, pode-se calcular o título local usando a conservação da massa para o óleo e para o refrigerante, o que fornece a seguinte equação para o título local:

$$x = \frac{w_e - w}{1 - w} \quad (4.2)$$

onde w_e é a concentração do refrigerante no óleo na posição de nucleação das bolhas de vapor refrigerante, z_e . Esta concentração é calculada por meio da equação da solubilidade, Eq. (C.1), usando a pressão e a temperatura medidas na mesma posição z_e . A posição de nucleação, z_e , é determinada assumindo que o início da formação de bolhas ocorre quando a temperatura experimental começa a reduzir. Por outro lado, w é a concentração local em uma determinada posição z a jusante de z_e , calculada por meio da mesma equação de solubilidade, Eq. (C.1), mas usando a pressão e a temperatura medidas na posição z .

A fração de vazio local, α , é calculada supondo que as velocidades das duas fases são iguais em cada posição, ou seja, assumindo-se que o modelo homogêneo pode ser aplicado localmente, o que leva a seguinte equação:

$$\alpha = \left[1 + \frac{\rho_g (1-x)}{\rho_l x} \right]^{-1} \quad (4.3)$$

A densidade local da mistura é calculada por:

$$\rho = \alpha \rho_g + (1-\alpha) \rho_L \quad (4.4)$$

Utilizando o modelo apresentado anteriormente e os dados de temperatura e pressão apresentados no item 4.3., calculou-se as distribuições do título (x), fração de vazio (α) e densidade (ρ) ao longo do tubo. As distribuições de concentração (w) foram calculadas utilizando a equação C.1.

As Figuras 4.12 a 4.15 mostram as distribuições de concentração, w , título, x , fração de vazio, α , e densidade, ρ , para as distribuições de pressão e de temperatura medidas nos testes apresentados nas Figs. 4.1 e 4.2. Nesta análise assumiu-se que a nucleação das bolhas começou em $z = 4,63$ m para os testes 1, 3 e 6 e $z = 4,98$ m para os testes 2, 4 e 5. Foi assumida uma temperatura média constante para todos os valores anteriores no ponto de nucleação das bolhas. Como era de se esperar, observa-se uma redução da concentração de refrigerante na mistura ao longo do tubo. Isso indica que parte do refrigerante dissolvido na mistura é transformada em vapor. A partir da posição onde é assumida a nucleação das bolhas (z_c) observa-se um aumento no valor do título na direção do escoamento. Conseqüentemente, após a região de nucleação das bolhas, a fração de vazio, que também é uma medida da quantidade de vapor do escoamento, aumenta longitudinalmente. Os resultados individuais de cada teste são apresentados no Apêndice F.

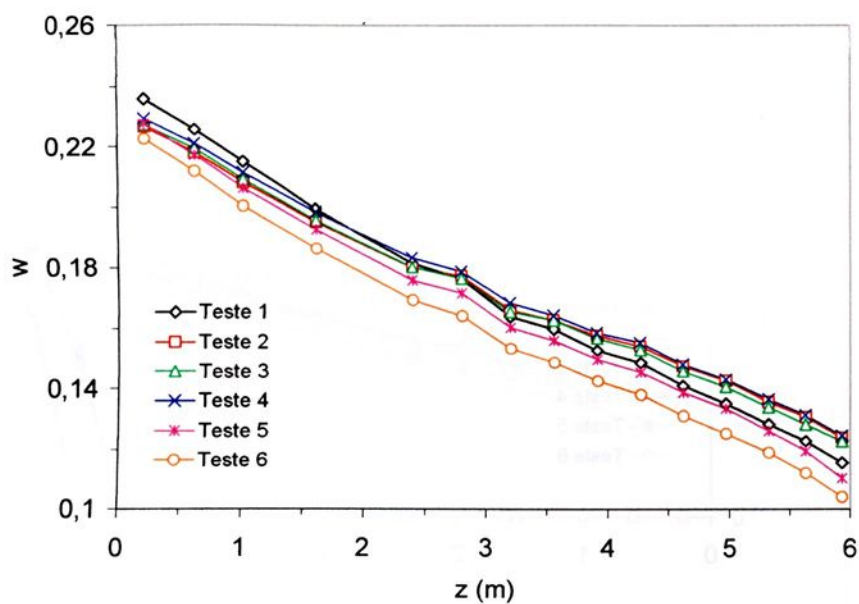


Figura 4.12 – Distribuição da concentração (w) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

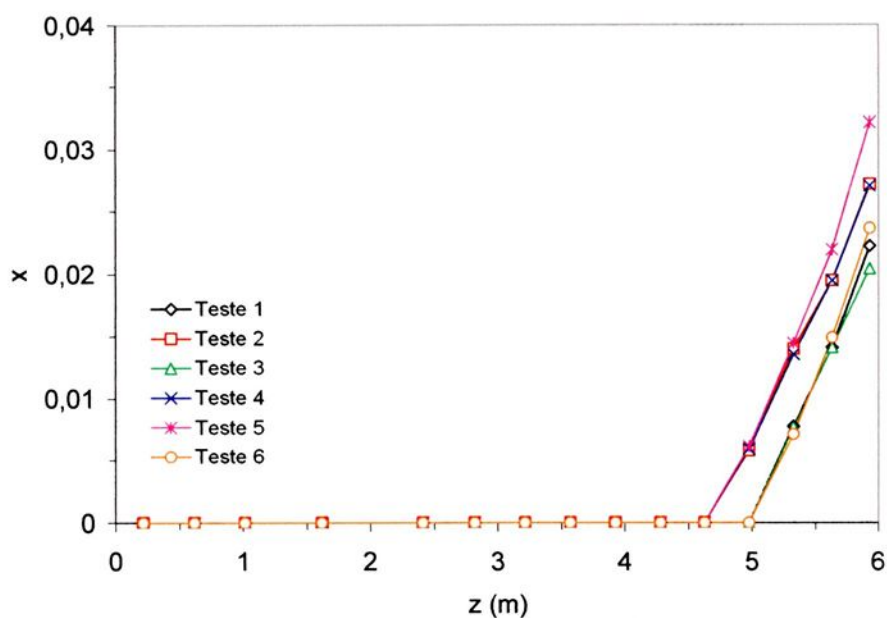


Figura 4.13 – Distribuição do título (x) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

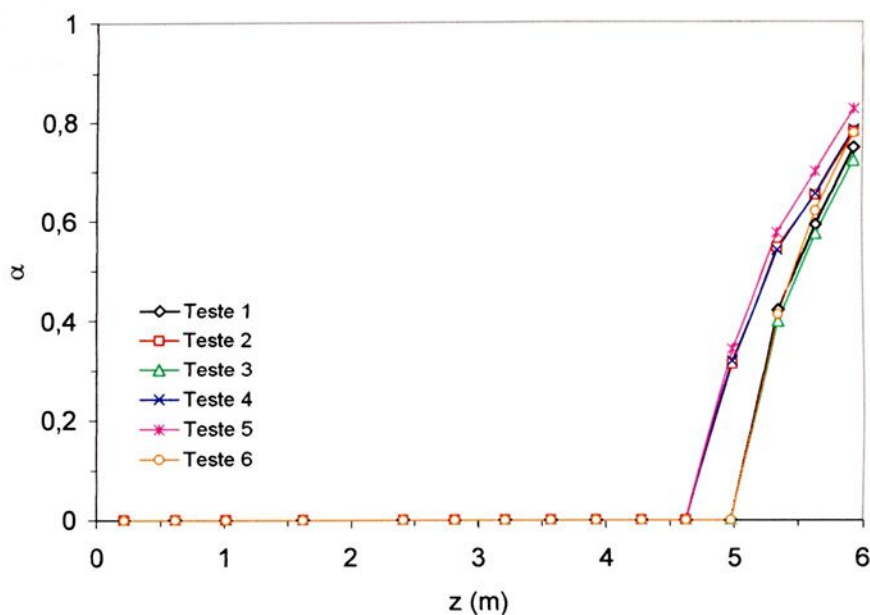


Figura 4.14 – Distribuição da fração de vazio (α) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

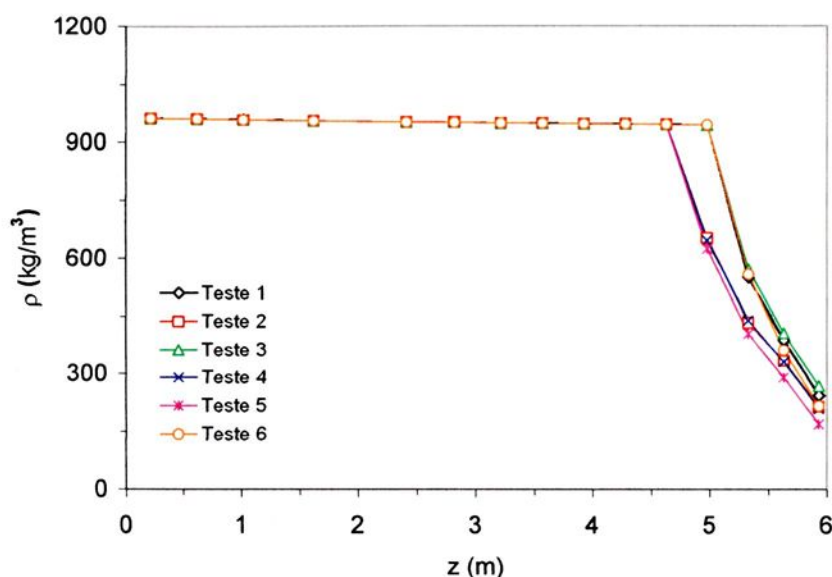


Figura 4.15 – Distribuição da densidade (ρ) ao longo do tubo para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

As Figuras 4.16 a 4.19 mostram as distribuições de concentração, w, título, x, fração de vazio, α , e densidade, ρ , para as distribuições de pressão e de temperatura medidos nos testes apresentados nas Figs. 4.3 e 4.4. Para todos os testes a nucleação de bolhas foi assumida em $z = 4,63$ m. Nestas figuras são mostrados alguns pontos sem interligação e em tamanho maior comparado com os demais. Esses pontos foram removidos dos dados porque produziram um

comportamento fisicamente inconsistente para algumas propriedades (x , w , α e ρ), ou seja, não estão em acordo com o modelo adotado de que a mistura líquida esteja localmente saturada.

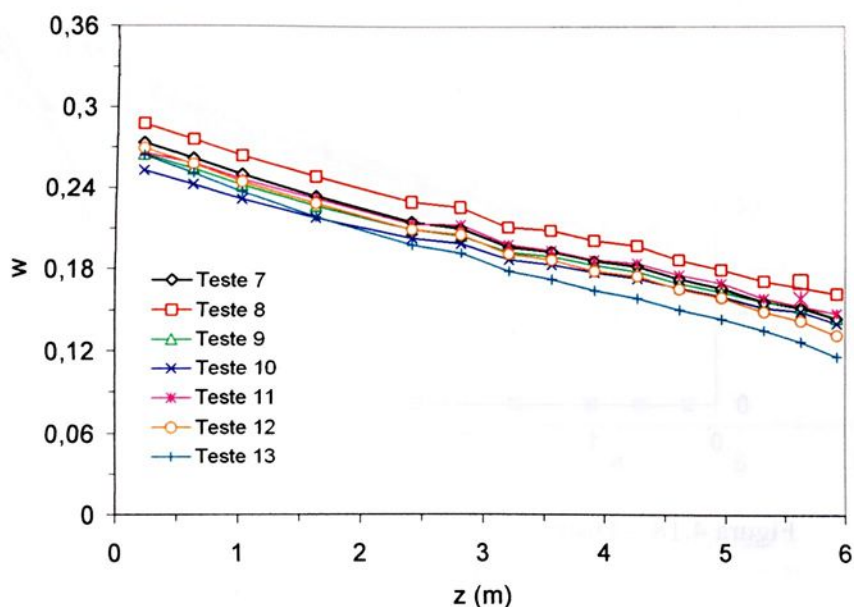


Figura 4.16 – Distribuição da concentração (w) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

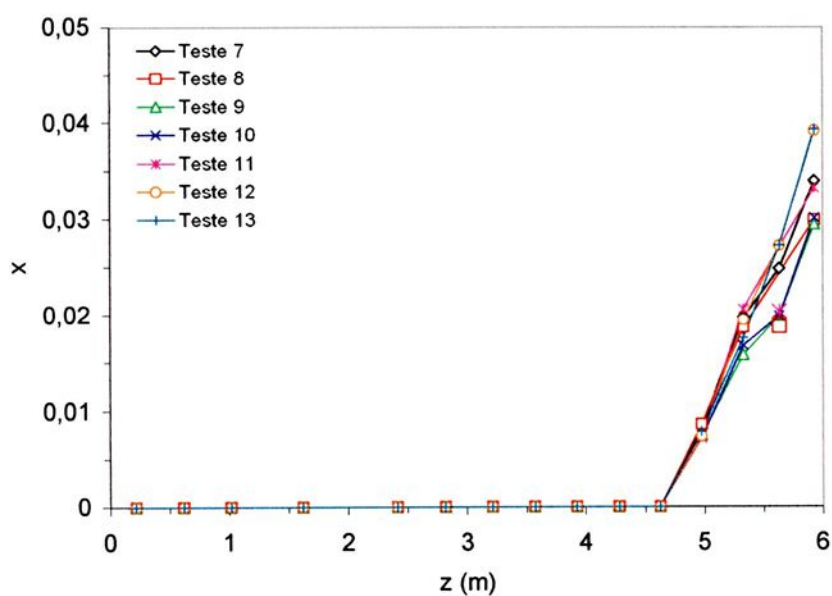


Figura 4.17 – Distribuição do título (x) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

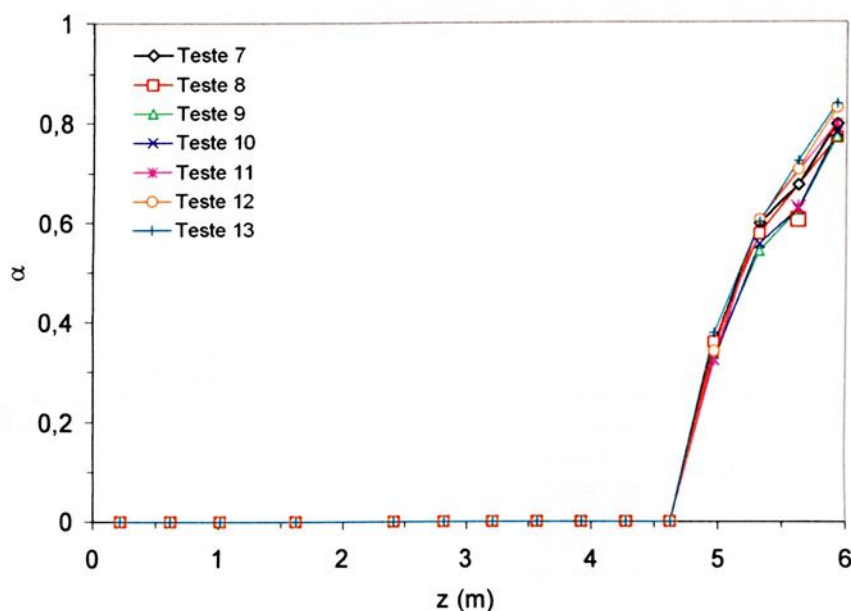


Figura 4.18 – Distribuição da fração de vazio (α) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

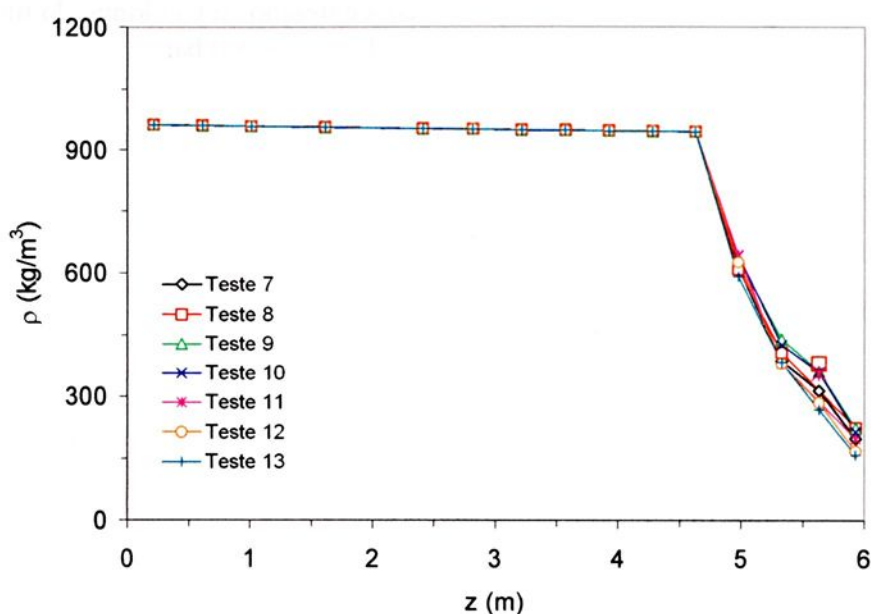


Figura 4.19 – Distribuição da densidade (ρ) ao longo do tubo para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

As Figuras 4.20 a 4.23 mostram as distribuições de concentração, w , título, x , fração de vazio, α , e densidade, ρ , para as distribuições de pressão e de temperatura medidos nos testes apresentados nas Figs. 4.5 e 4.6. Para os testes 15, 17 a 22 a nucleação de bolhas foi assumida em $z = 3,57$ m, para o teste 14, $z = 4,28$ m e teste 16, $z = 3,93$ m. Nestas figuras, o número de pontos sem interligação que foram excluídos dos cálculos das propriedades (x , w , α e ρ) foi

maior, mostrando que o modelo adotado não representa adequadamente o escoamento da mistura óleo-refrigerante.

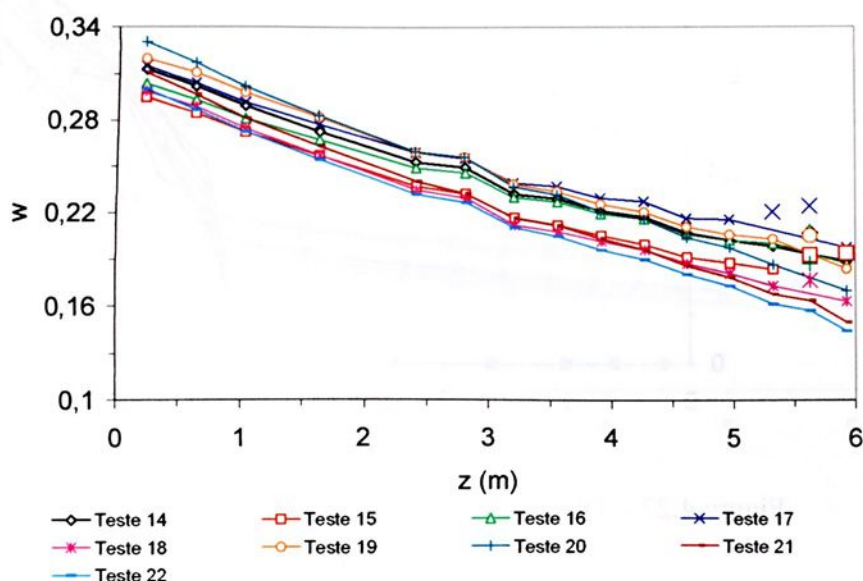


Figura 4.20 – Distribuição da concentração (w) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

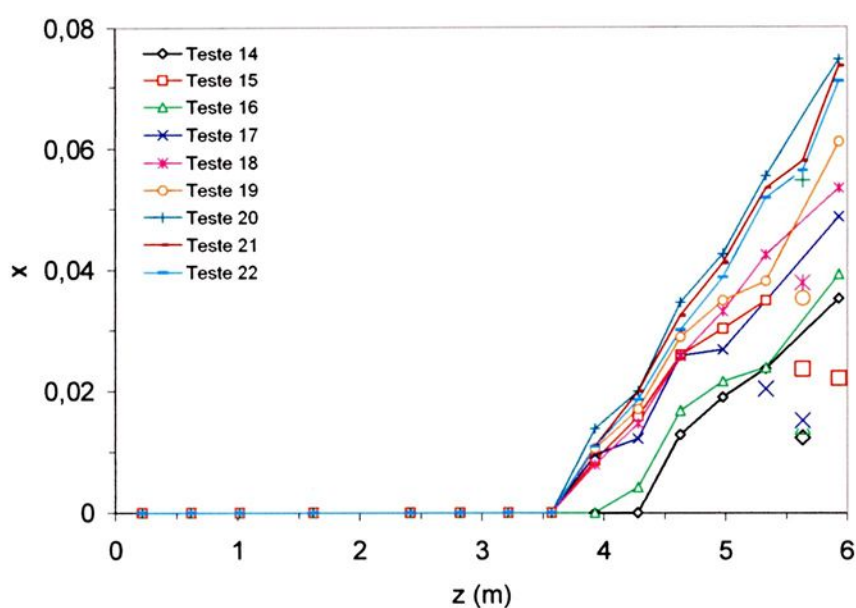


Figura 4.21 – Distribuição do título (x) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

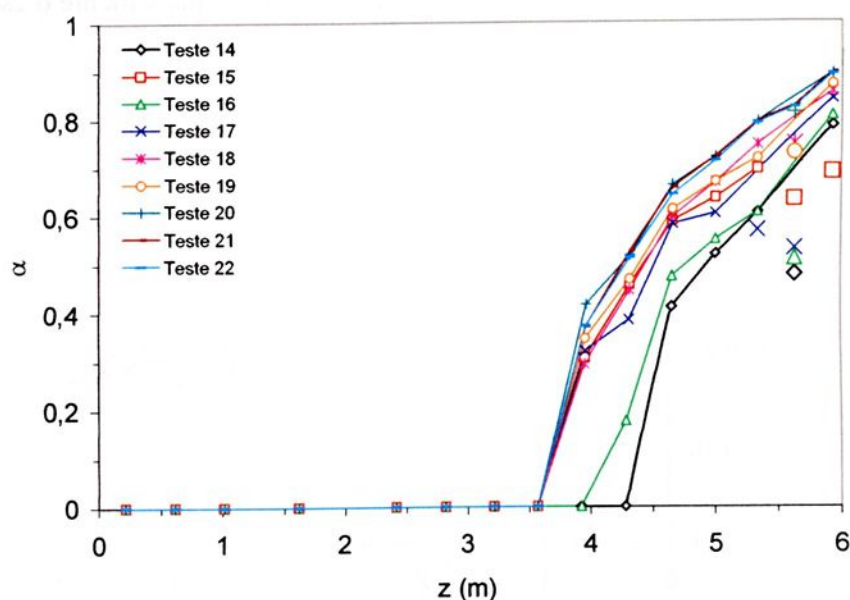


Figura 4.22 – Distribuição da fração de vazio (α) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

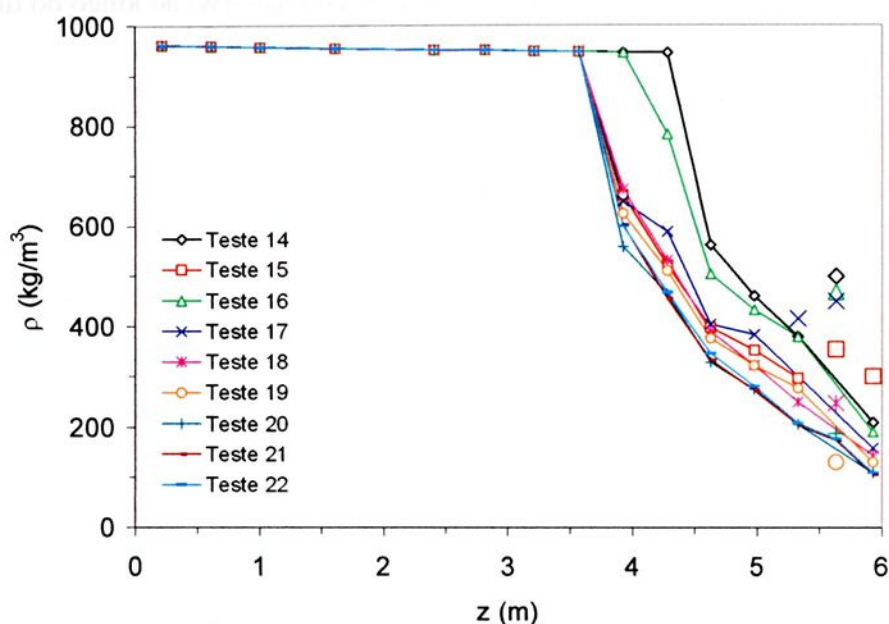


Figura 4.23 – Distribuição da densidade (ρ) ao longo do tubo para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

As Figuras 4.24 a 4.27 mostram as distribuições de concentração, w , título, x , fração de vazio, α , e densidade, ρ , para as distribuições de pressão e de temperatura medidos nos testes apresentados nas Figs. 4.7 e 4.8. Para todos os testes a nucleação de bolhas foi assumida em

$z = 3,57$ m. Nestas figuras, observa-se que a maioria dos pontos foram excluídos dos cálculos das propriedades (x , w , α e ρ).

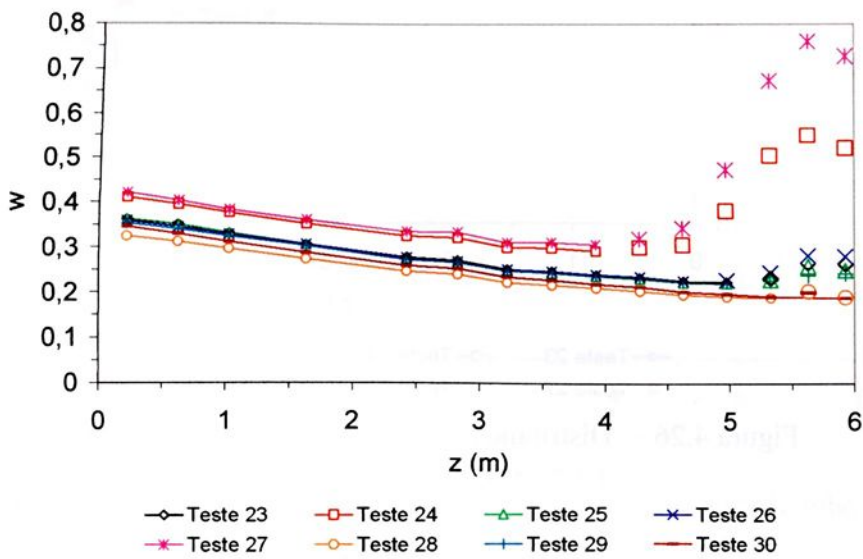


Figura 4.24 – Distribuição da concentração (w) ao longo do tubo para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

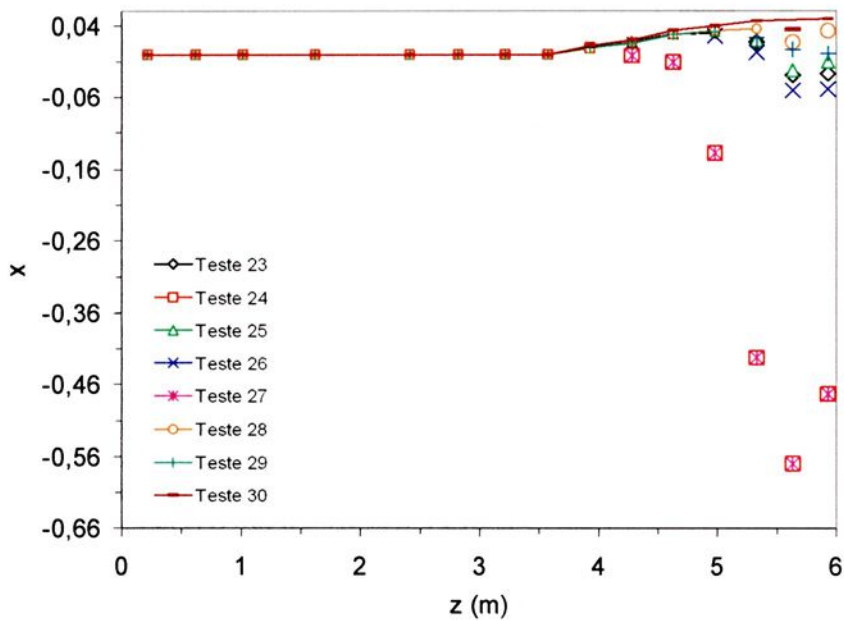
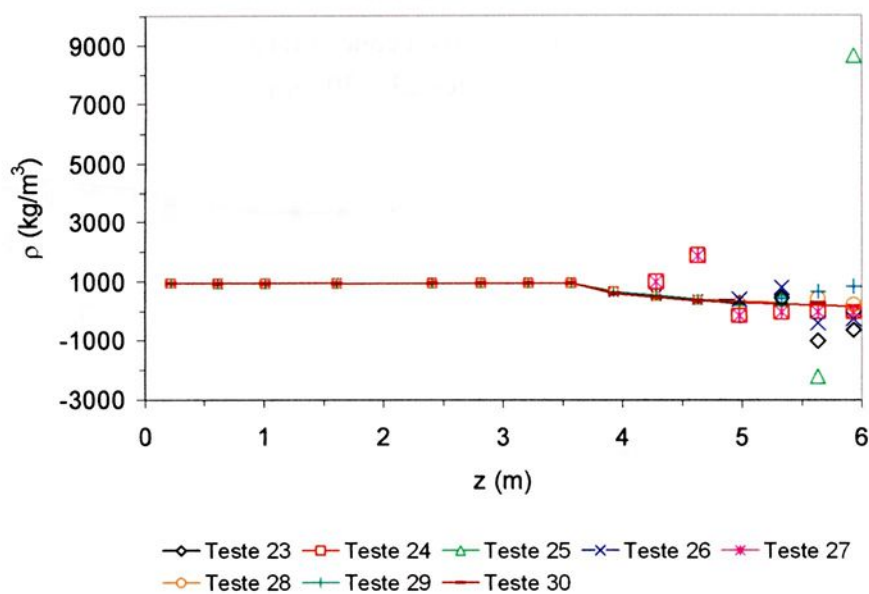
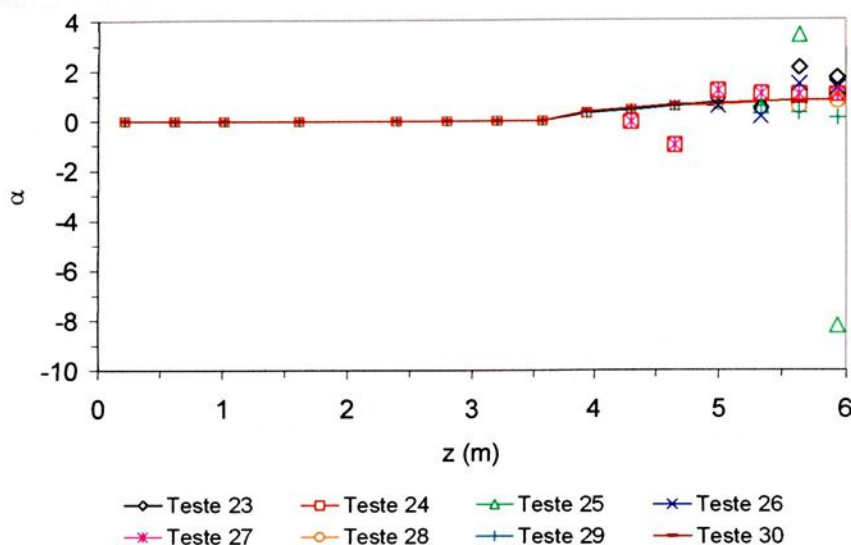


Figura 4.25 – Distribuição do título (x) ao longo do tubo para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar.



As Figuras 4.28 a 4.31 mostram as distribuições de concentração, w , título, x , fração de vazio, α , e densidade, ρ , para as distribuições de pressão e de temperatura medidos nos testes apresentados nas Figs. 4.9 e 4.10. Para todos os testes a nucleação de bolhas foi assumida em $z = 3,57$ m. Nestas figuras, novamente observa-se que a maioria dos pontos foram excluídos dos cálculos das propriedades (x , w , α e ρ).

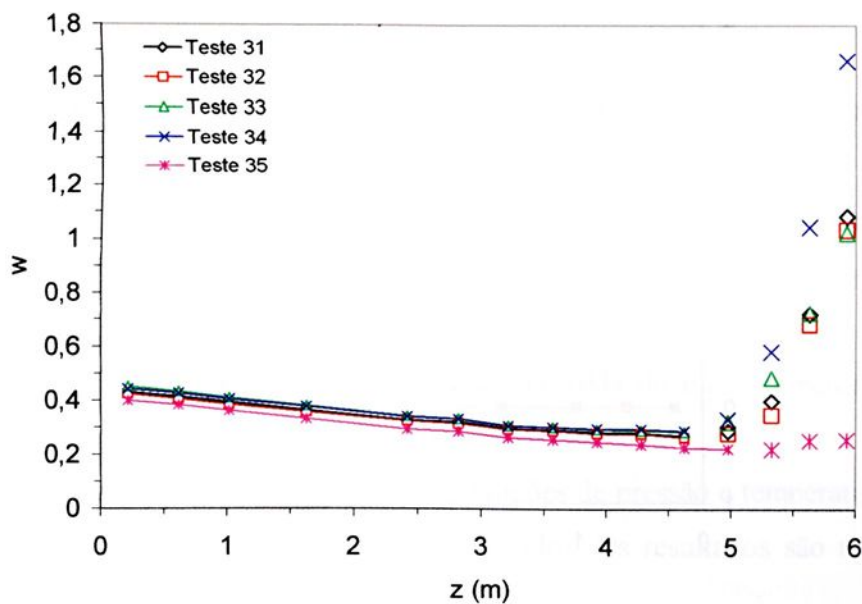


Figura 4.28 – Distribuição da concentração (w) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP}=6,5$ bar.

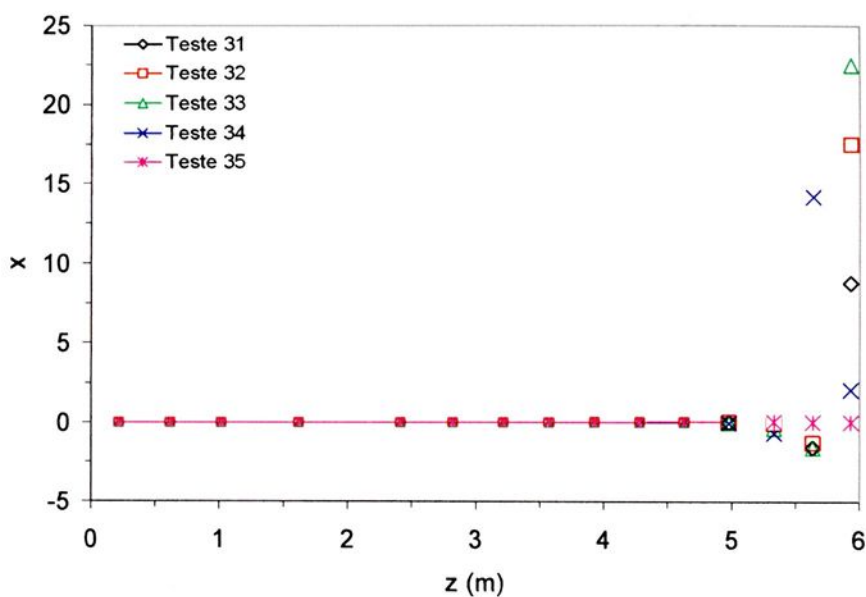


Figura 4.29 – Distribuição do título (x) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP}=6,5$ bar.

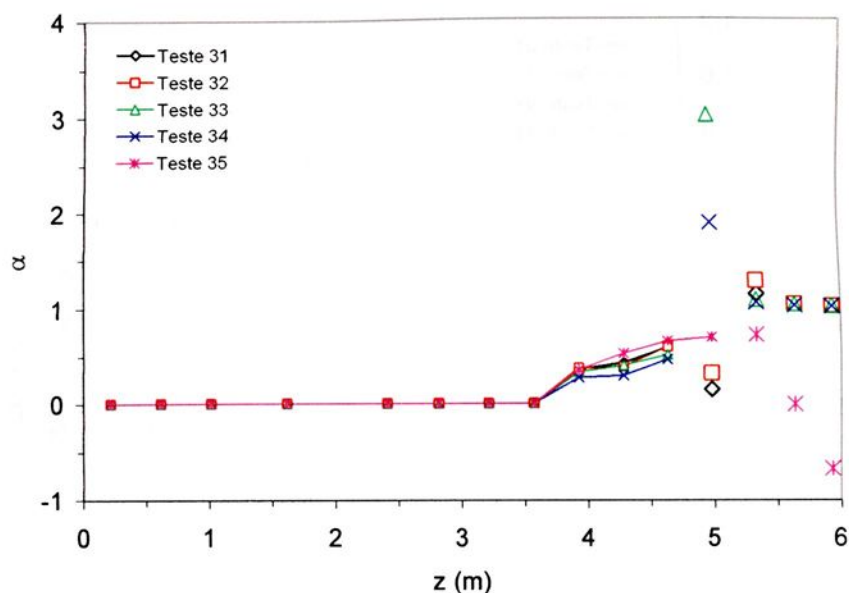


Figura 4.30 – Distribuição da fração de vazio (α) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

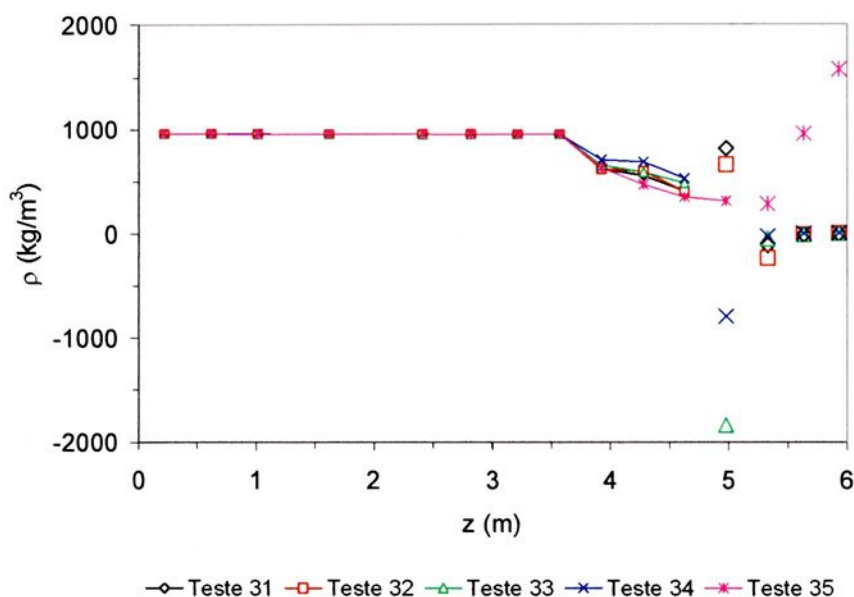


Figura 4.31 – Distribuição da densidade (ρ) ao longo do tubo para os testes 31 – 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

Como pode ser observado nas Figs. 4.14, 4.18 e 4.22, a fração de vazio atingiu valores em torno de 0,8. É importante salientar que, quando a fração de vazio atinge valores da ordem de 0,7, o padrão de escoamento é caracterizado como espuma segundo Winkler *et al.* (1994). Nos

experimentos realizados, pôde-se comprovar a existência de espuma nos testes de visualização para frações de vazio superiores a 0,8.

Distribuições de pressão, temperatura, concentração de refrigerante, título, fração de vazio e densidade da mistura foram apresentados para escoamentos com temperaturas em torno de 30 °C e pressões de 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 e 6,5 bar na entrada do escoamento. Os resultados mostram a existência de duas regiões características no escoamento. Uma região na entrada do tubo onde o gradiente de pressão e a temperatura do escoamento são constantes, indicando a predominância de escoamento monofásico da mistura e uma região na saída do tubo, caracterizada por uma grande redução de pressão e de temperatura.

Em alguns testes, além da medição das distribuições de pressão e temperatura, realizou-se a visualização do escoamento ao longo do tubo de vidro. Os resultados são apresentados no próximo capítulo.



1. The first part of the text is a title page.

2. The second part of the text is a title page.

3. The third part of the text is a title page.

4. The fourth part of the text is a title page.

5. The fifth part of the text is a title page.

6. The sixth part of the text is a title page.

7. The seventh part of the text is a title page.

8. The eighth part of the text is a title page.

9. The ninth part of the text is a title page.

10. The tenth part of the text is a title page.

VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE

A visualização dos padrões de escoamento foi realizada para os testes 36 - 40. As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam, respectivamente, as distribuições de pressão e de temperatura para o teste 36, cuja pressão de saturação no tanque de alta pressão foi, aproximadamente, de 4,5 bar e temperatura de entrada do escoamento em torno de 30 °C.

As visualizações foram realizadas usando uma câmera fotográfica digital Fuji Finepix 6.0 Mpixel com uma objetiva macro. As fotos foram capturadas em formato compactado JPEG, com o auxílio de um tripé, utilizando o flash interno da câmera e balanço automático de branco. As imagens foram processadas no Microsoft Office Picture Manager apenas para pequenos ajustes de cor, controle de contraste e reforço da imagem.

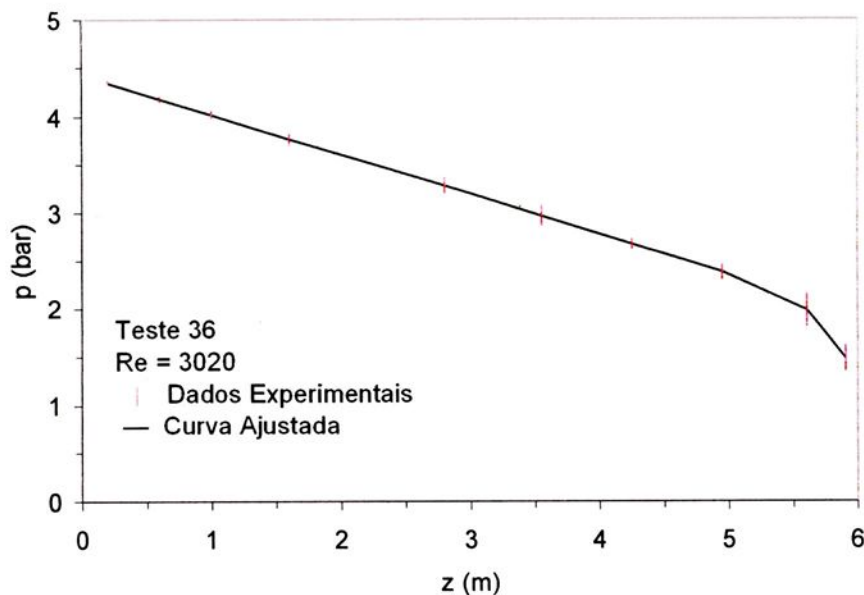


Figura 5.1 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

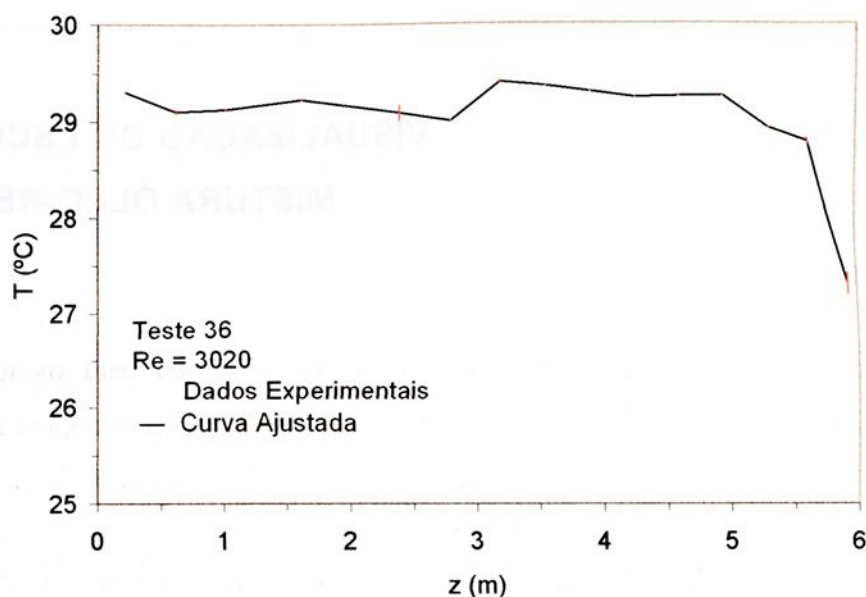


Figura 5.2 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

As Figuras 5.3 a 5.7 apresentam os resultados da visualização do teste mostrado nas Figs. 5.1 e 5.2. Essas figuras apresentam fotografias tiradas na mesma posição, em diferentes instantes de tempo. Na região de entrada do tubo, não mostrado aqui, o escoamento é predominantemente monofásico. Em raros instantes é possível observar a passagem de minúsculas bolhas. Na Figura 5.3, $z = 3,39$ a $3,43$ m, na primeira e segunda fotografia, observa-se a presença de um pequeno número de bolhas de vapor distribuídas aleatoriamente. Na terceira imagem, bolhas de vapor maiores estão localizadas na parte superior do tubo e as menores na parte inferior.

Na posição $z = 3,80$ a $3,85$ m, Figura 5.4, a primeira e a terceira fotografias mostram bolhas de diferentes diâmetros ao longo do escoamento. Novamente, observa-se que as bolhas de maior diâmetro se concentram na parte superior do tubo. Na segunda fotografia não é possível visualizar nenhuma bolha. Para a posição $z = 4,73$ a $4,78$ m, Fig. 5.5, a primeira fotografia mostra bolhas não esféricas (forma de bala de revólver) escoando em linha e na parte superior do tubo. Na segunda fotografia observa-se que este tipo de bolha está acompanhado de bolhas de pequenas dimensões. Na Figura 5.6, $z = 4,97$ a $5,02$ m, a primeira e a segunda fotografia apresentam comportamento semelhante ao encontrado na Fig. 5.5. A primeira fotografia apresenta dois tipos de configurações: algumas regiões contendo muitas bolhas agrupadas e outras regiões apresentando bolhas alongadas. A terceira fotografia mostra algumas bolhas isoladas. Na quarta fotografia, a quantidade de bolhas de vapor aumenta e ocupa grande parte da tubulação.

A Figura 5.7 mostra a parte final do tubo, $z = 5,55$ a $5,60$ m. Como pode ser visto, a primeira fotografia observa-se que o refrigerante no estado de vapor já ocupa grande parte da tubulação já na segunda fotografia, mostra um instante em que não é observada a presença de bolhas de vapor. As diferentes configurações do escoamento observadas em imagens tomadas na mesma posição em diferentes instantes mostram que o escoamento é intermitente.

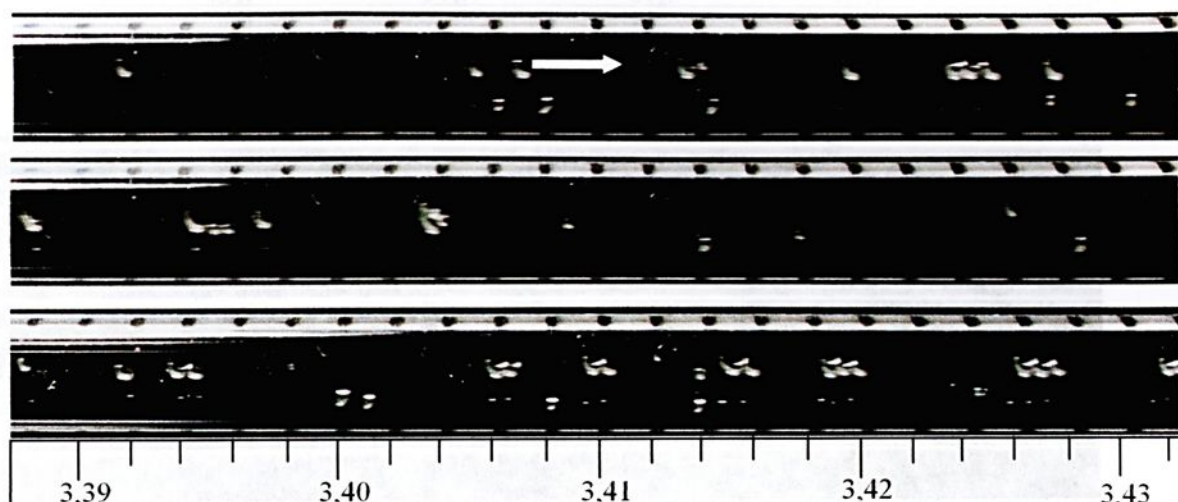


Figura 5.3 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,39$ a $3,43$ m para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

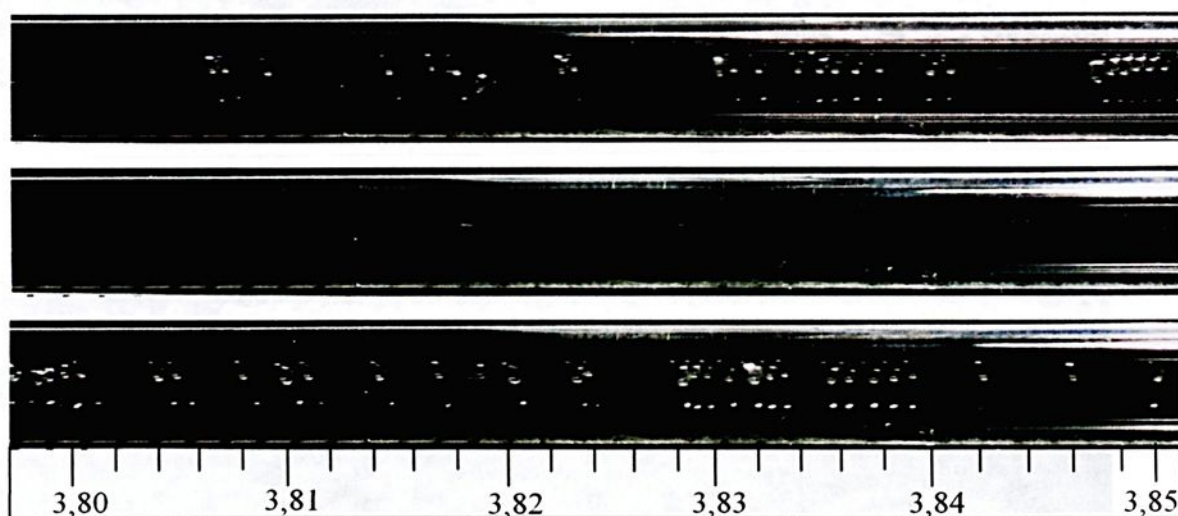


Figura 5.4 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,80$ a $3,86$ m para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

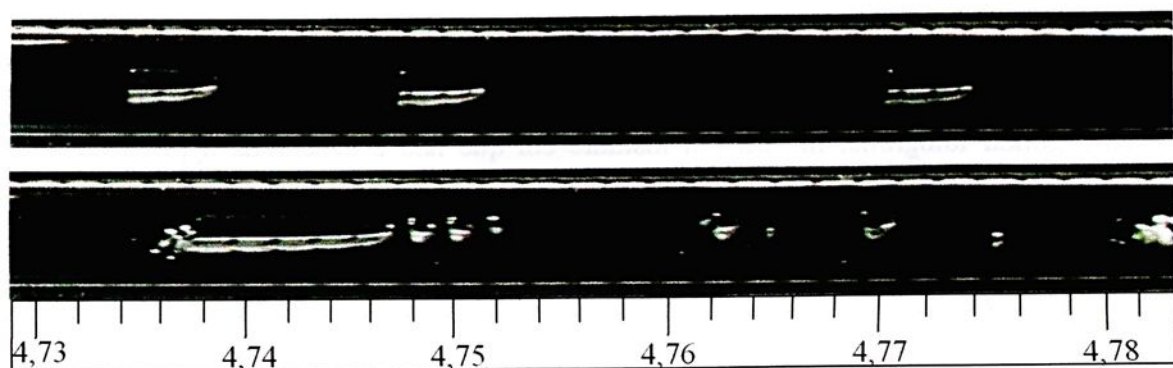


Figura 5.5 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,73$ a $4,78$ m para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

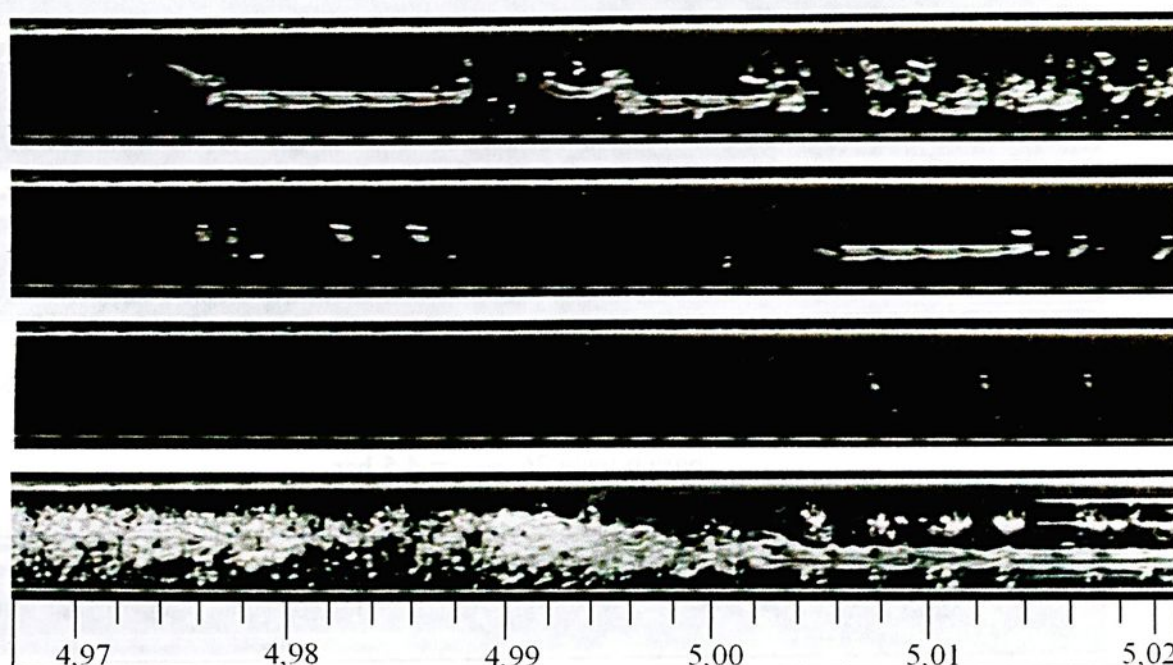


Figura 5.6 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,97$ a $5,02$ m para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

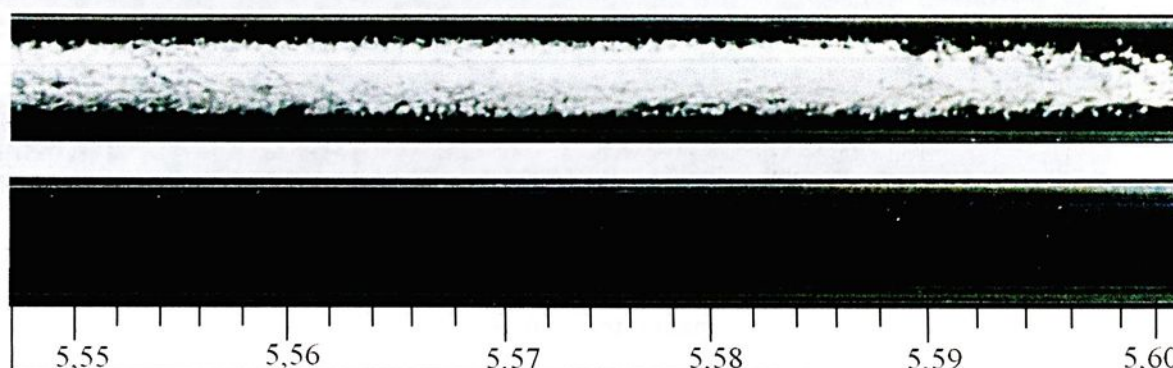


Figura 5.7 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,55$ a $5,60$ m para o teste 36, $p_{TAP} = 4,5$ bar.

As Figuras 5.10 a 5.15 apresentam resultados da visualização do teste 37, cujos resultados de distribuições de temperatura e de pressão são mostrados, respectivamente, nas Figs. 5.6 e 5.7, para uma pressão de entrada de 5,0 bar e temperatura de entrada do escoamento em torno de 30°C. As Figuras 5.10 a 5.15 apresentam imagens semelhantes às do teste 36.

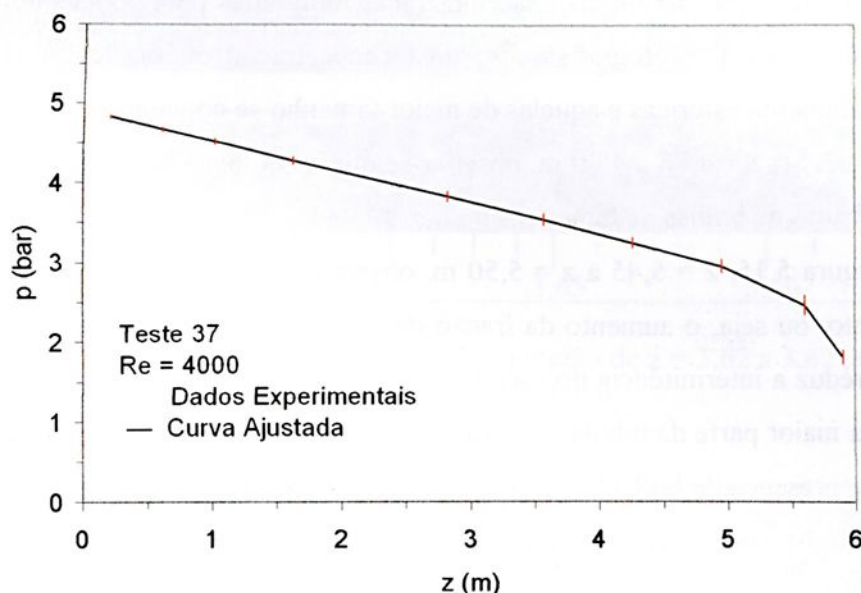


Figura 5.8 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

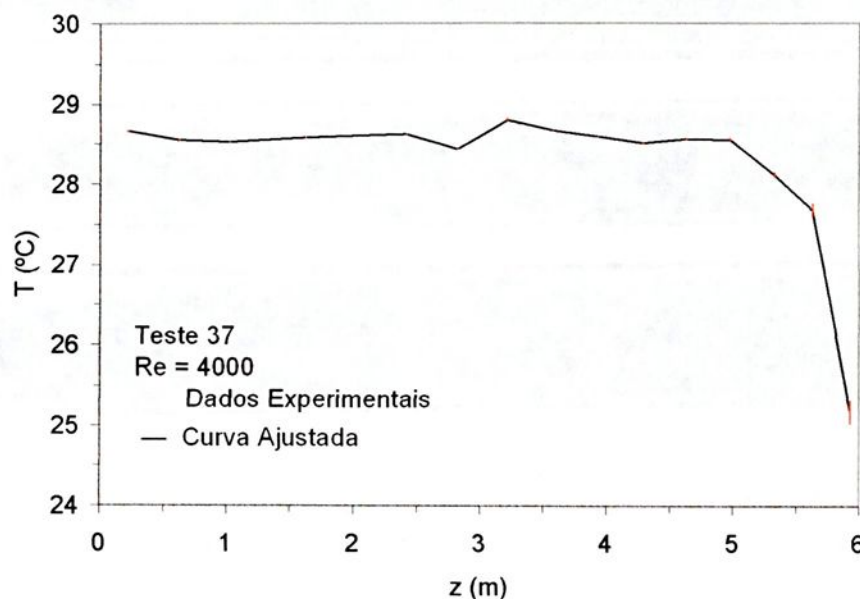


Figura 5.9 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

Na Figura 5.10 observa-se que a formação de bolhas se inicia numa posição inferior, $z = 3,08$ a $3,13$ m, quando comparado ao teste 36 onde as primeiras bolhas de vapor foram

visualizadas na posição $z = 3,39$ a $3,43$ m. Nesta região, a distribuição de pressão é linear, mostrando que a presença destas pequenas bolhas não são suficientes para provocar uma significativa redução da pressão e temperatura. O escoamento ainda pode ser tratado como monofásico.

Nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 são mostradas fotografias com poucas bolhas de vapor, e para uma mesma posição, fotografias com uma concentração maior de bolhas. Essas bolhas são aproximadamente esféricas e aquelas de maior tamanho se concentram na parte superior do tubo. Na Figura 5.14, $z = 4,85$ a $4,90$ m, observa-se que as bolhas são mais alongadas e estão sempre acompanhadas de bolhas de tamanhos menores.

Na Figura 5.15, $z = 5,45$ a $z = 5,50$ m, observa-se uma maior uniformidade nos padrões de escoamento, ou seja, o aumento da fração de vazio, devido à maior redução da solubilidade da mistura, reduz a intermitência do escoamento. Observa-se que o refrigerante no estado de vapor já ocupa a maior parte da tubulação, principalmente na quarta imagem, onde não é mais possível perceber a presença de bolhas. Nesse caso, o padrão de escoamento se assemelha a uma espuma. Nesta região há uma redução significativa da pressão e temperatura da mistura.

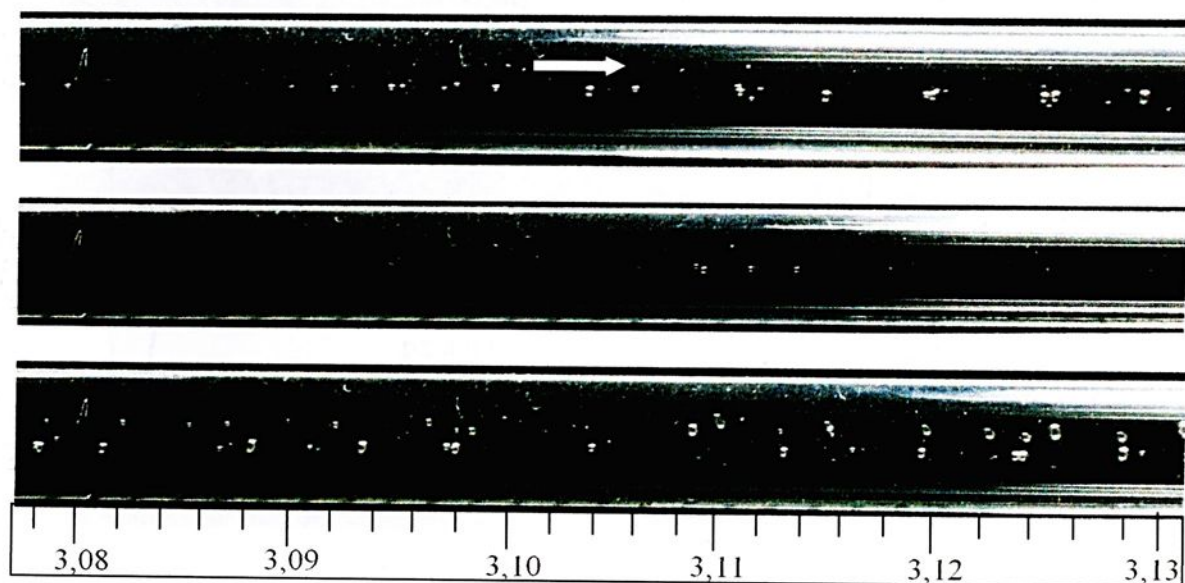


Figura 5.10 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,08$ a $3,13$ m para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

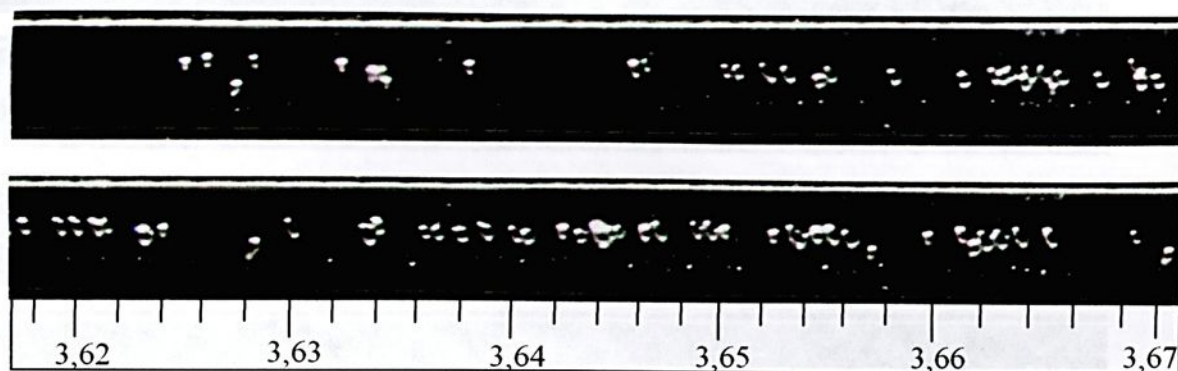


Figura 5.11 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,62$ a $3,67$ m
para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

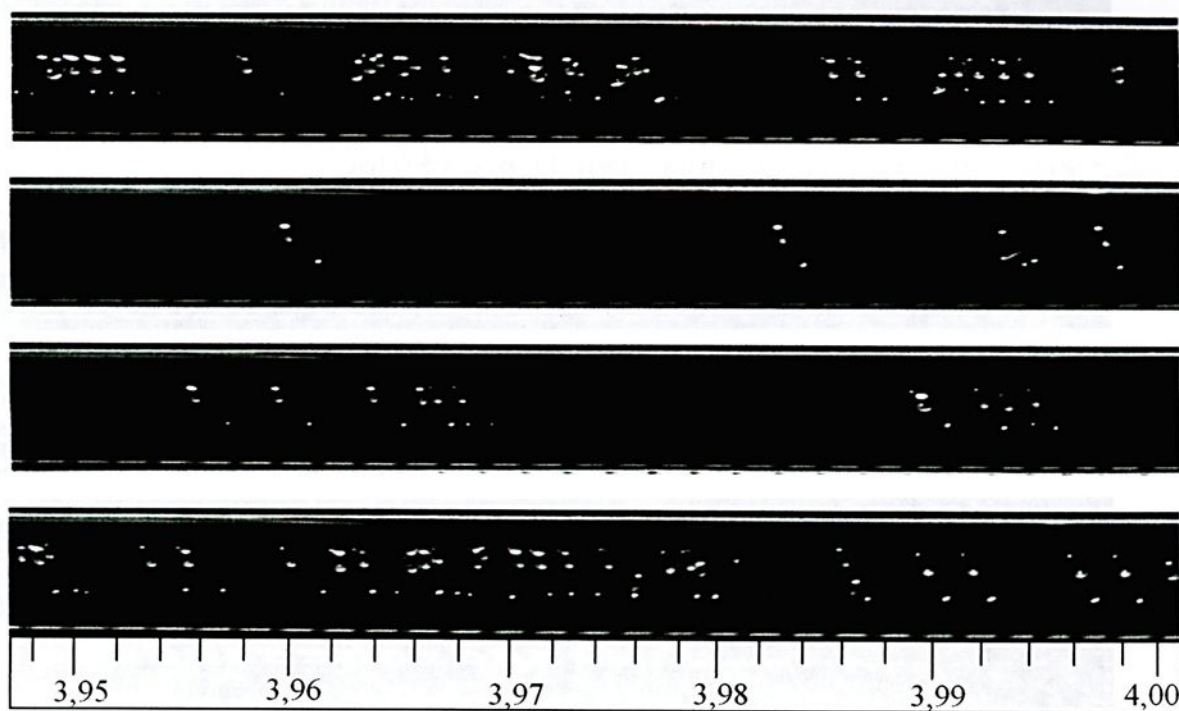


Figura 5.12 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,95$ a $4,00$ m
para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

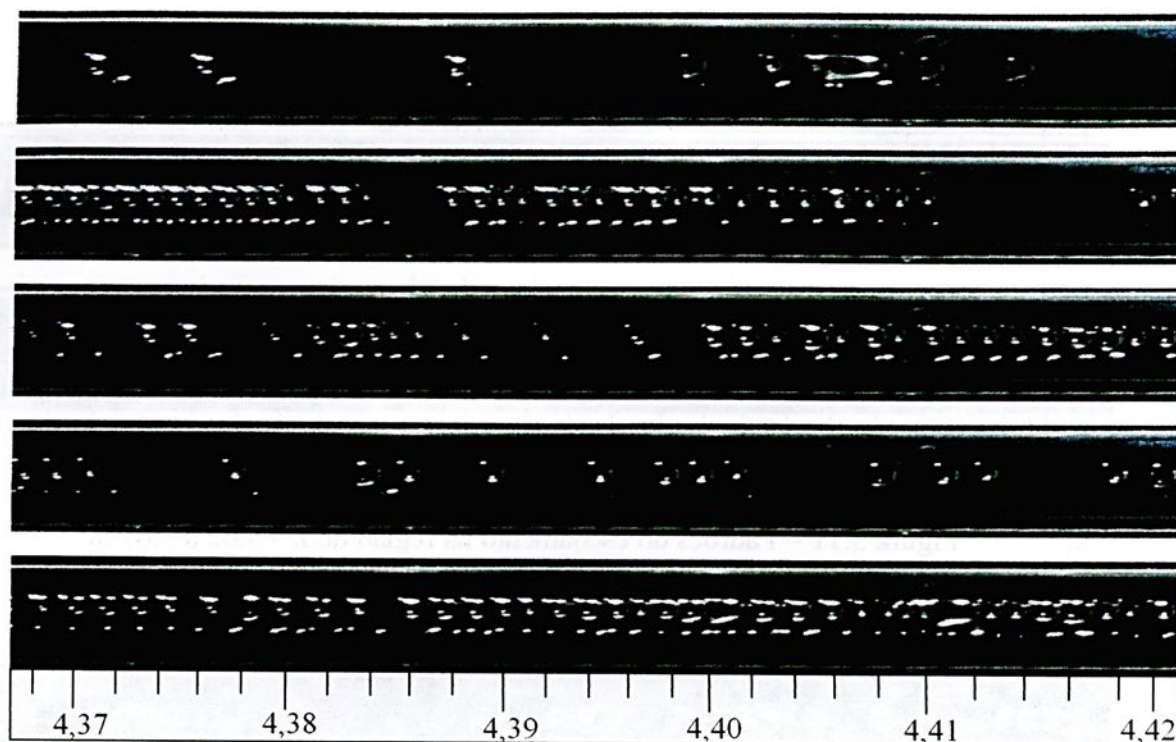


Figura 5.13 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,37$ a $4,42$ m para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

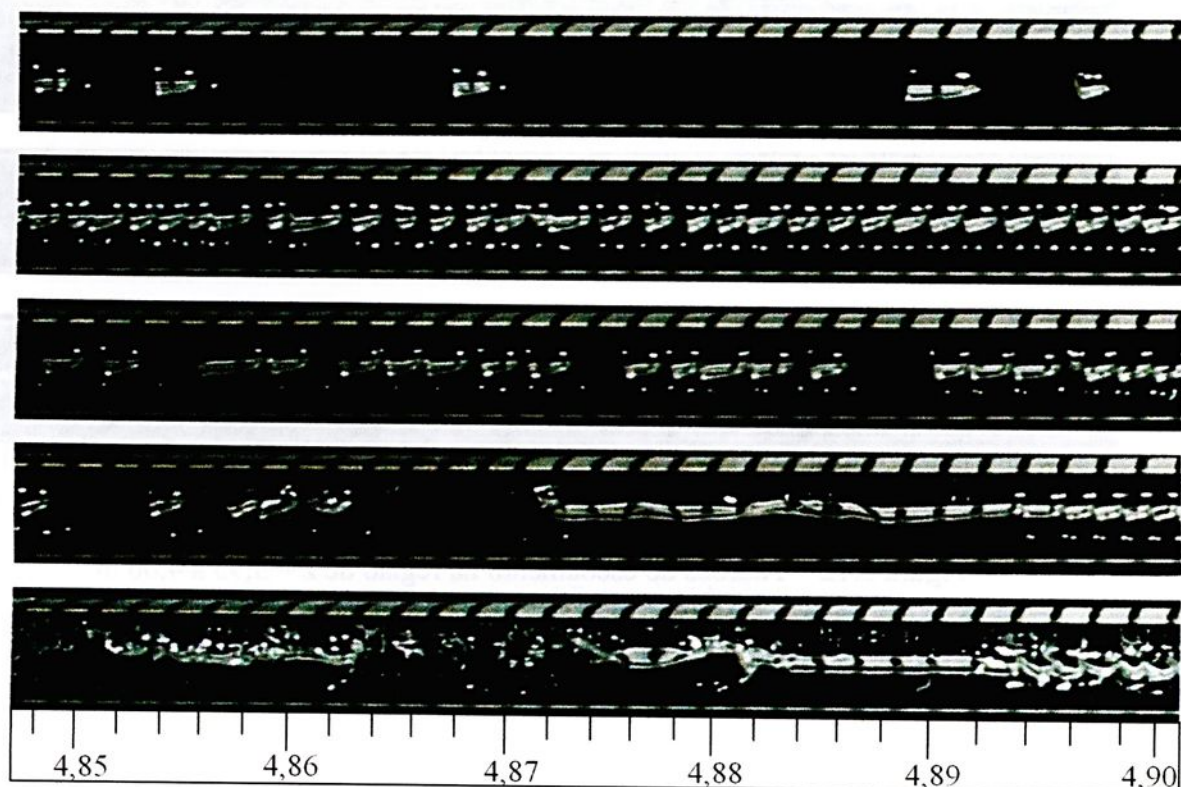


Figura 5.14 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,85$ a $4,90$ m para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

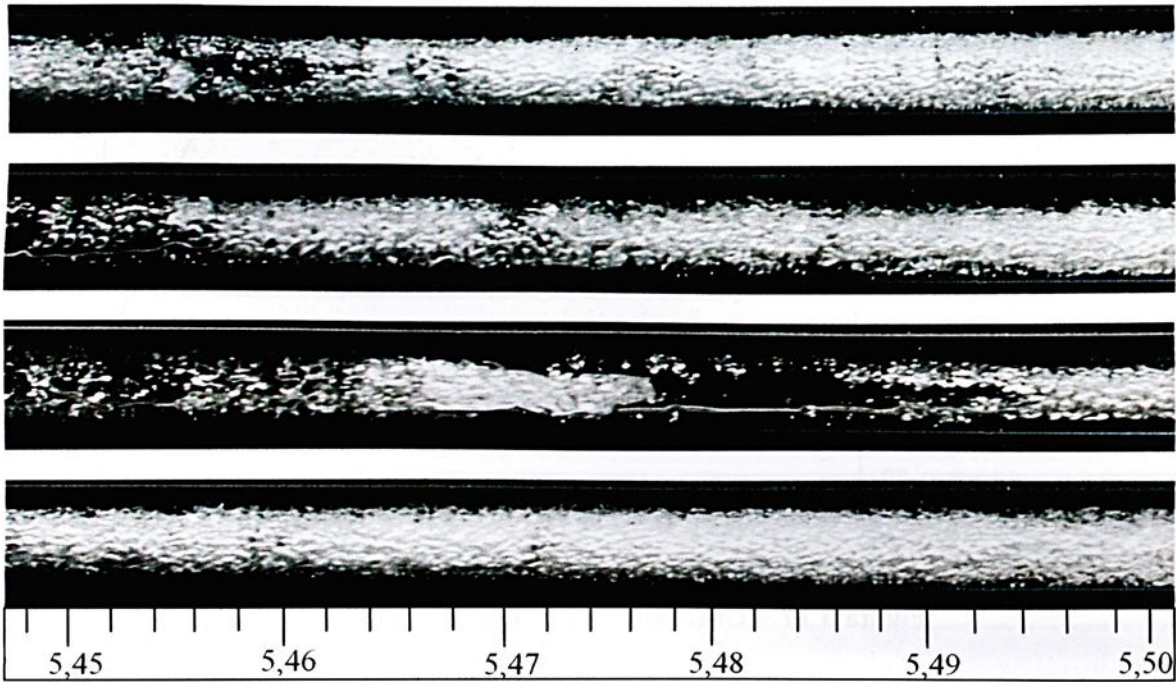


Figura 5.15 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,45$ a $5,50$ m para o teste 37, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

As Figuras 5.18 a 5.22 apresentam resultados da visualização do teste 38, cujas distribuições de pressão e de temperatura são mostradas, respectivamente, nas Figs. 5.16 e 5.17, para uma pressão de saturação no tanque de alta pressão de 5,5 bar e temperatura de entrada do escoamento em torno de 30°C.

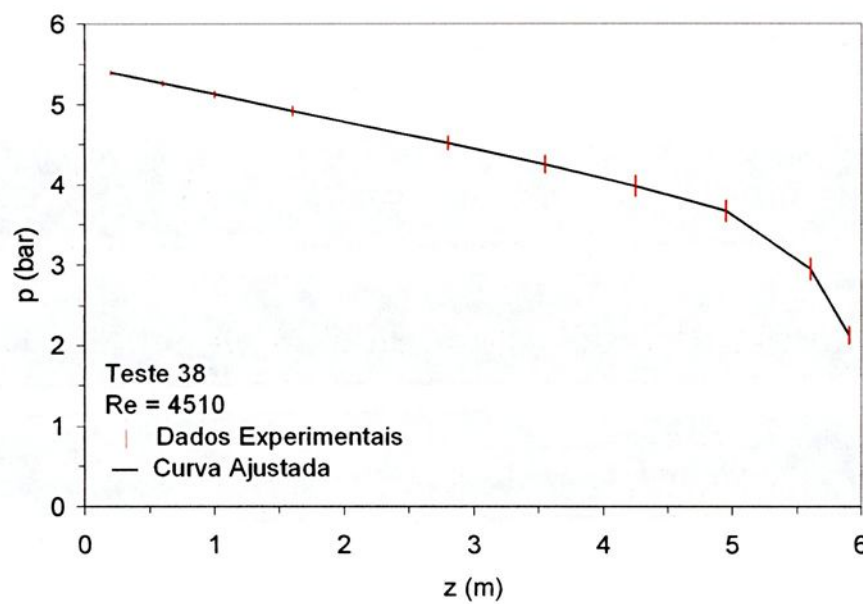


Figura 5.16 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

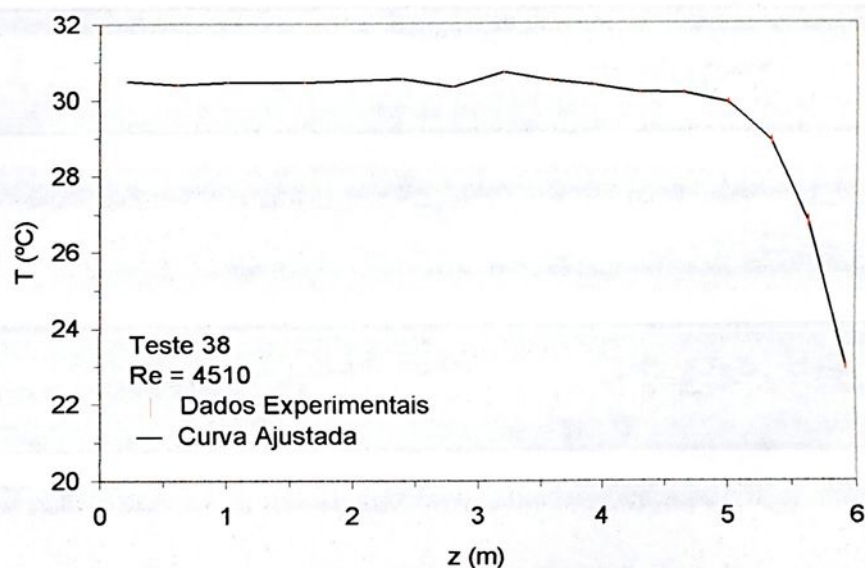


Figura 5.17 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

A Figura 5.19 mostra que já existe formação de espuma entre $z = 4,35$ a $4,40$ m. Entretanto, as distribuições de pressão e temperatura ainda não indicam a existência do escoamento bifásico nesta região. Esse comportamento pode ser explicado pela diferença entre o diâmetro e a rugosidade do tubo de vidro, onde são feitas as visualizações, e o tubo de aço cobreado, onde são realizadas as medidas. O diâmetro do tubo de vidro ($3,03$ mm) é menor do que o tubo de aço ($3,22$ mm), o que possivelmente antecipa a formação de bolhas no tubo de vidro, embora sua rugosidade seja menor. As demais fotografias apresentam resultados semelhantes aos testes 36 e 37 discutidos anteriormente.

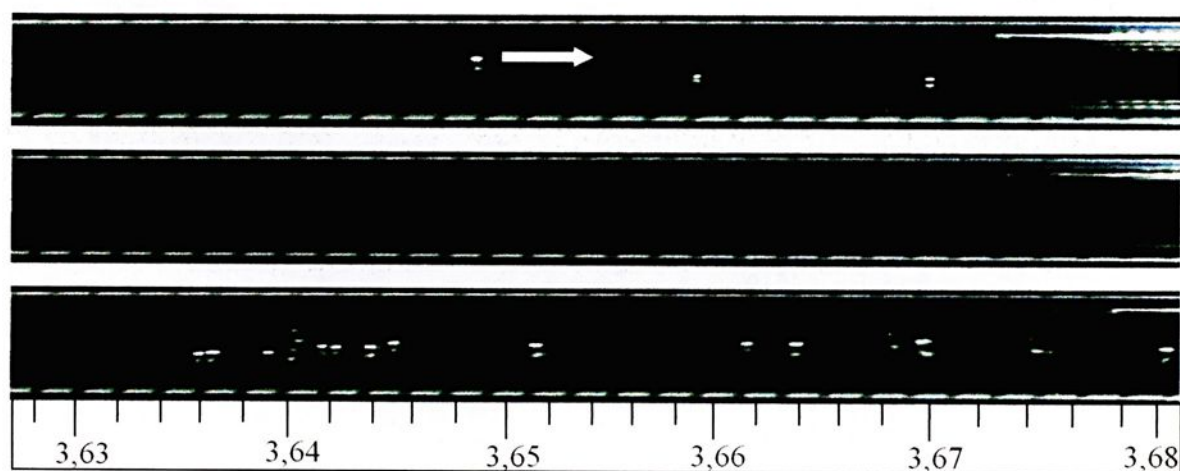


Figura 5.18 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,63$ a $3,68$ m para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

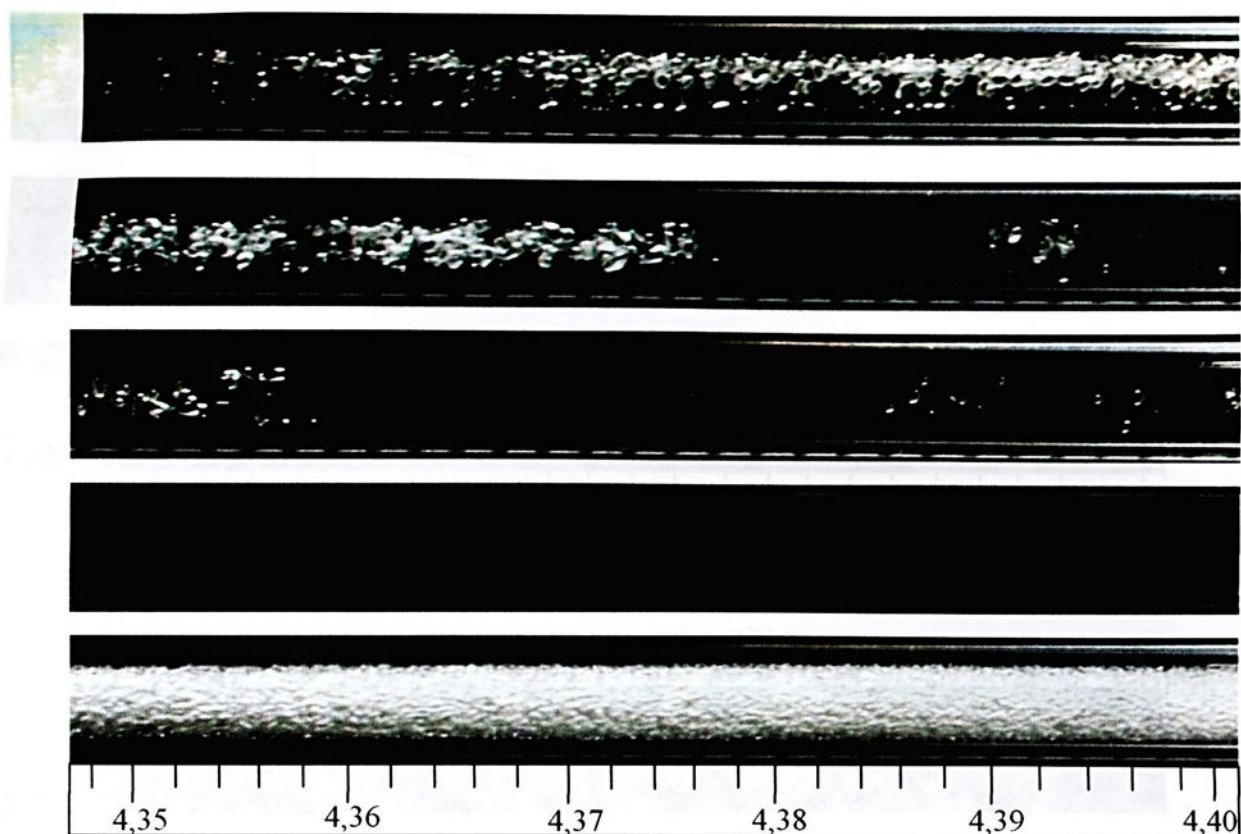


Figura 5.19 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,35$ a $4,40$ m para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

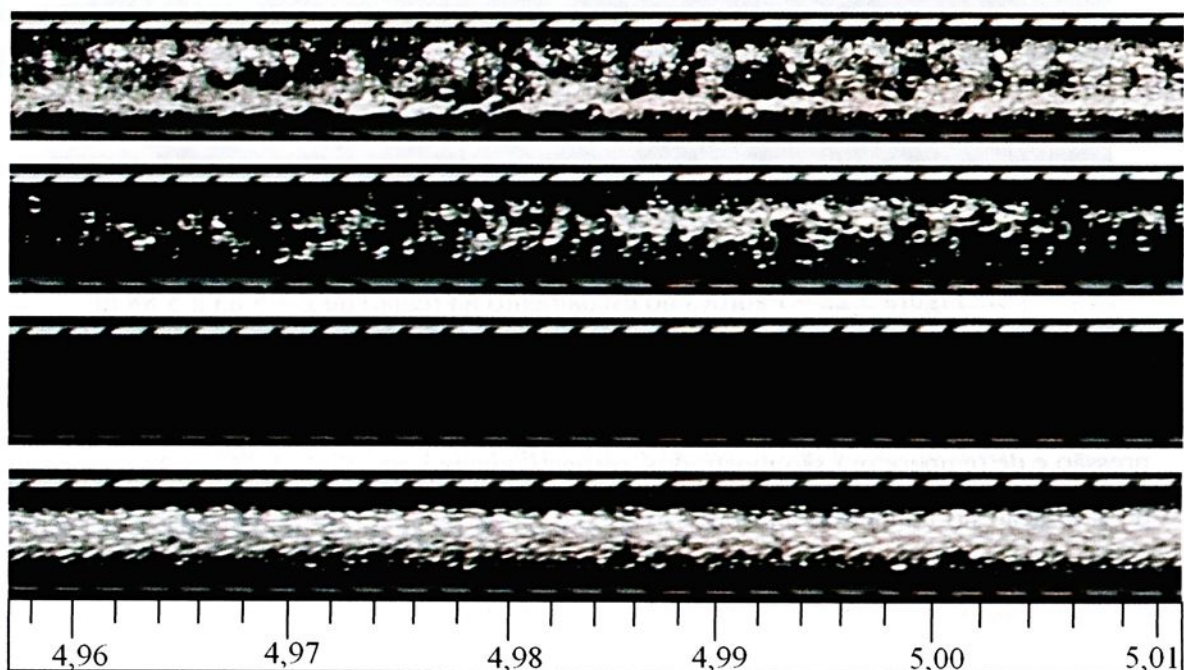


Figura 5.20 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,96$ a $5,01$ m para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

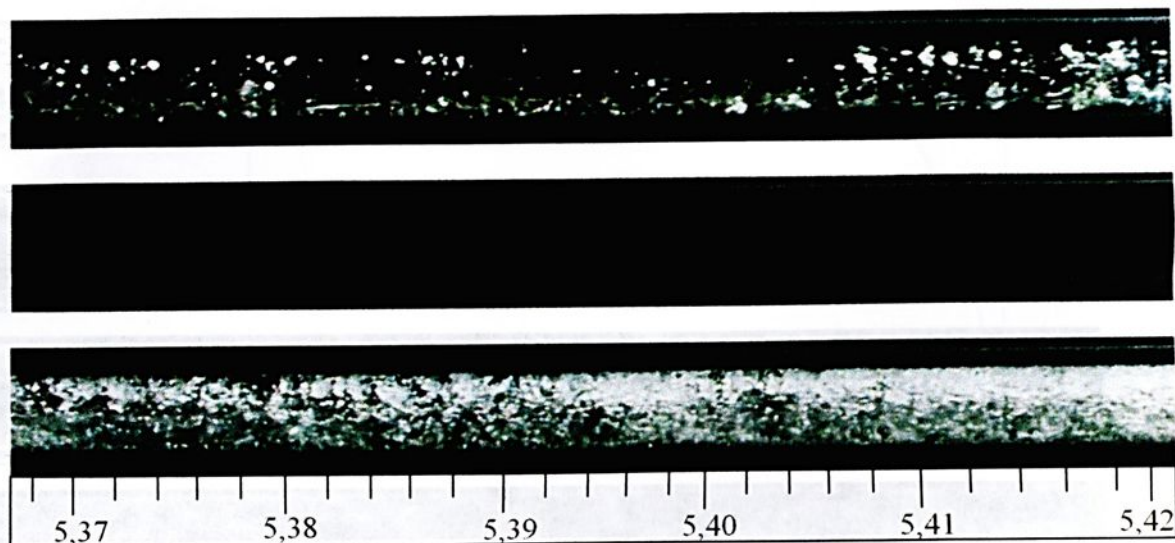


Figura 5.21 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,37$ a $5,42$ m para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

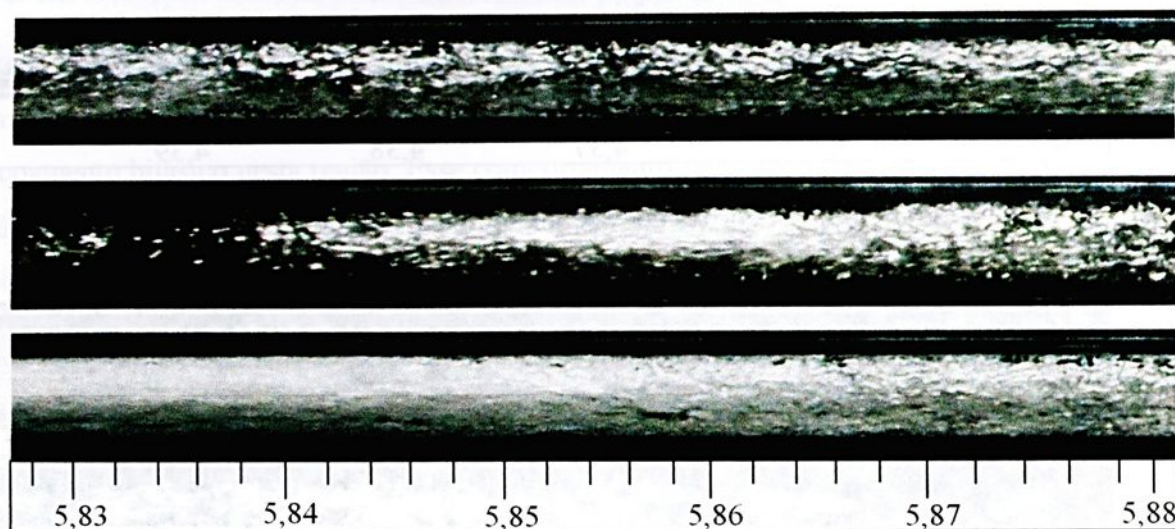


Figura 5.22 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,83$ a $5,88$ m para o teste 38, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

As Figuras 5.25 a 5.30 apresentam resultados da visualização do teste 39 cujos perfis de pressão e de temperatura são mostrados, respectivamente, nas Figs. 5.23 e 5.24 para uma pressão de saturação no tanque de alta pressão de 6,0 bar e temperatura de entrada do escoamento em torno de 30°C .

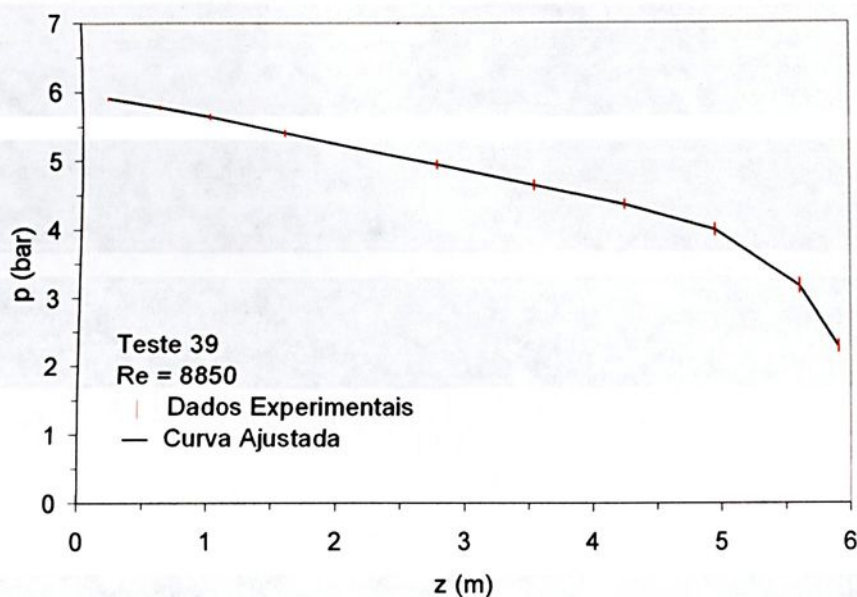


Figura 5.23 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

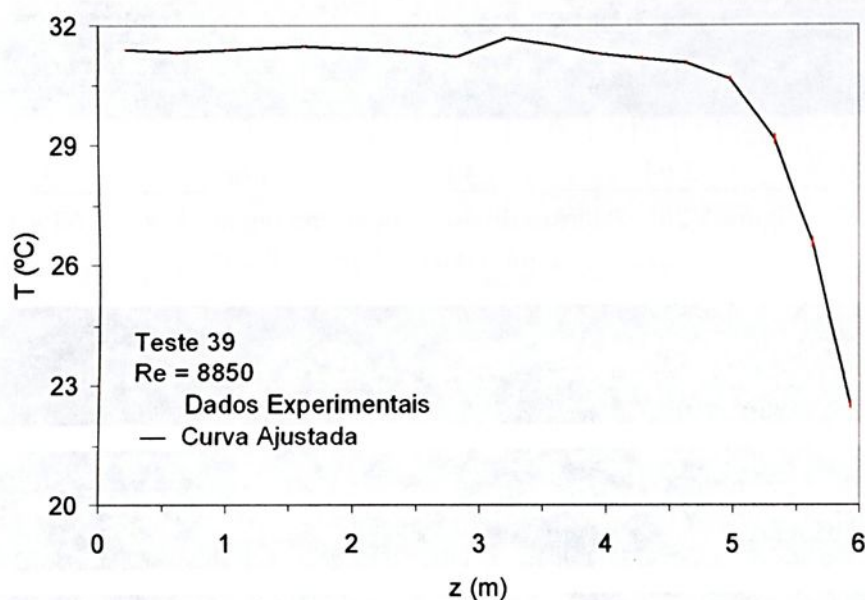


Figura 5.24 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

As Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 mostram que existem bolhas de vapor no escoamento da mistura óleo-refrigerante até a posição $z = 4,25$ m. Esta sequência de imagens mostra que a existência de bolhas de vapor no escoamento não foi suficiente para reduzir significativamente a pressão e a temperatura nesta região. Na Figura 5.28 é possível visualizar a presença da espuma, concordando com as reduções significativas da pressão e da temperatura apresentadas nas Figs. 5.23 e 5.24.

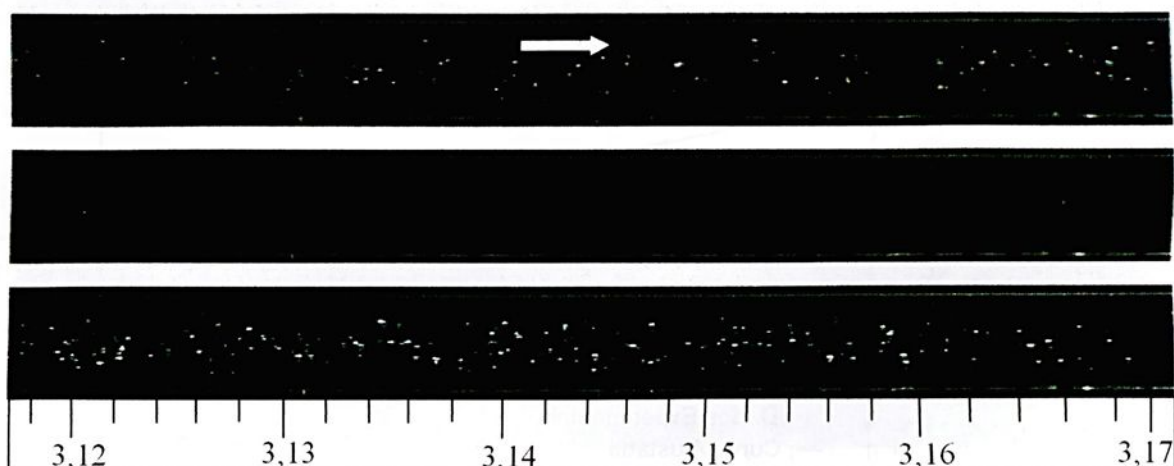


Figura 5.25 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,12$ a $3,17$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

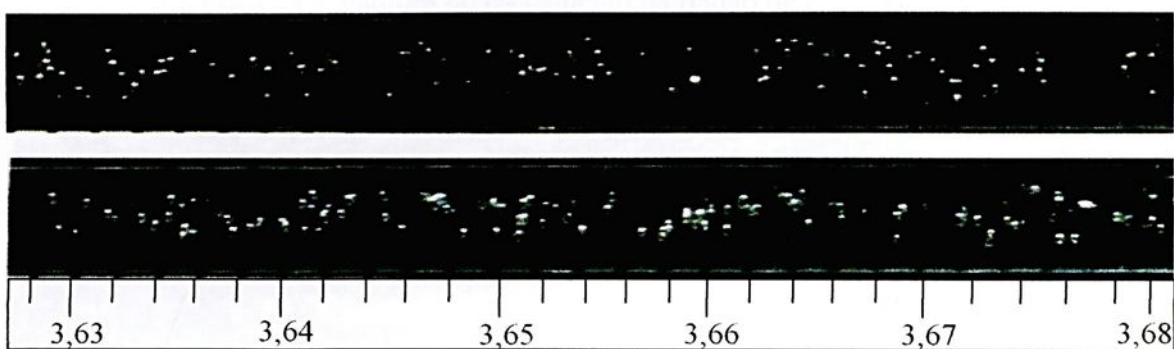


Figura 5.26 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,63$ a $3,68$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

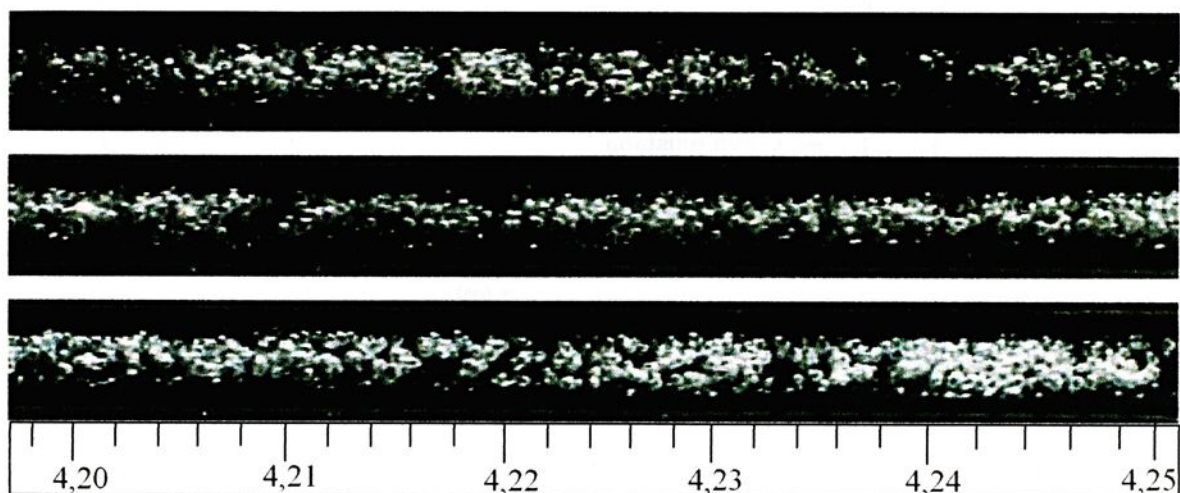


Figura 5.27 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,20$ a $4,25$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

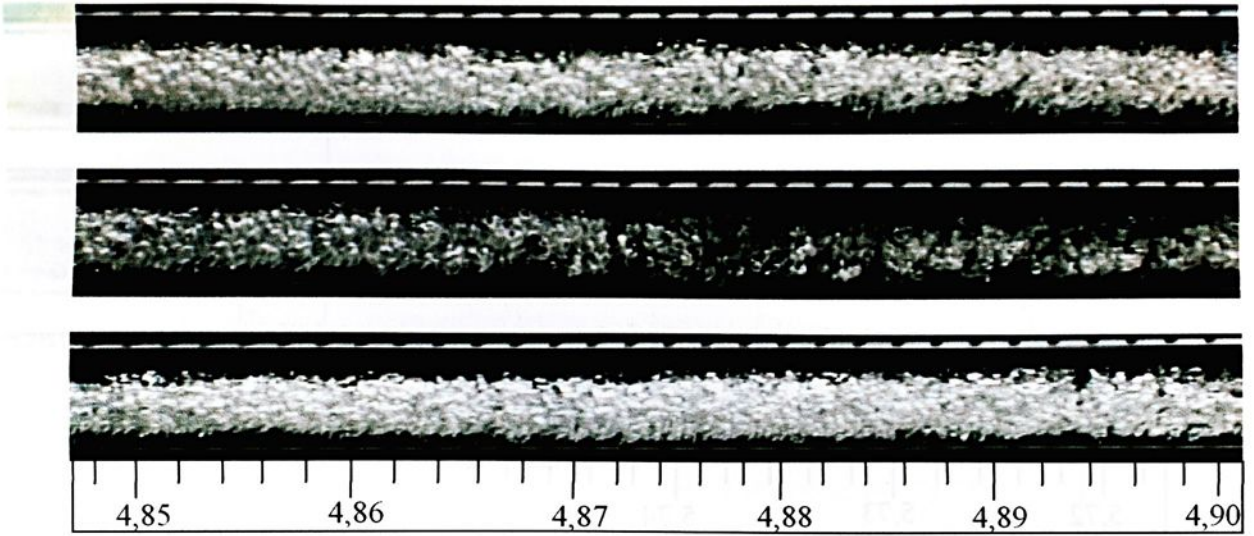


Figura 5.28 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,85$ a $4,90$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

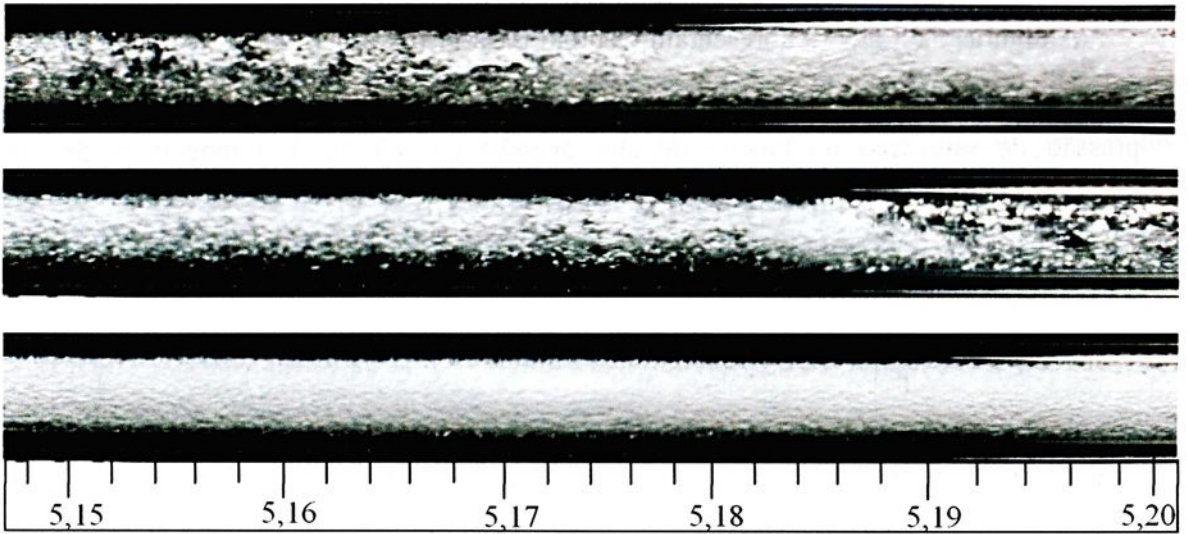


Figura 5.29 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,15$ a $5,20$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

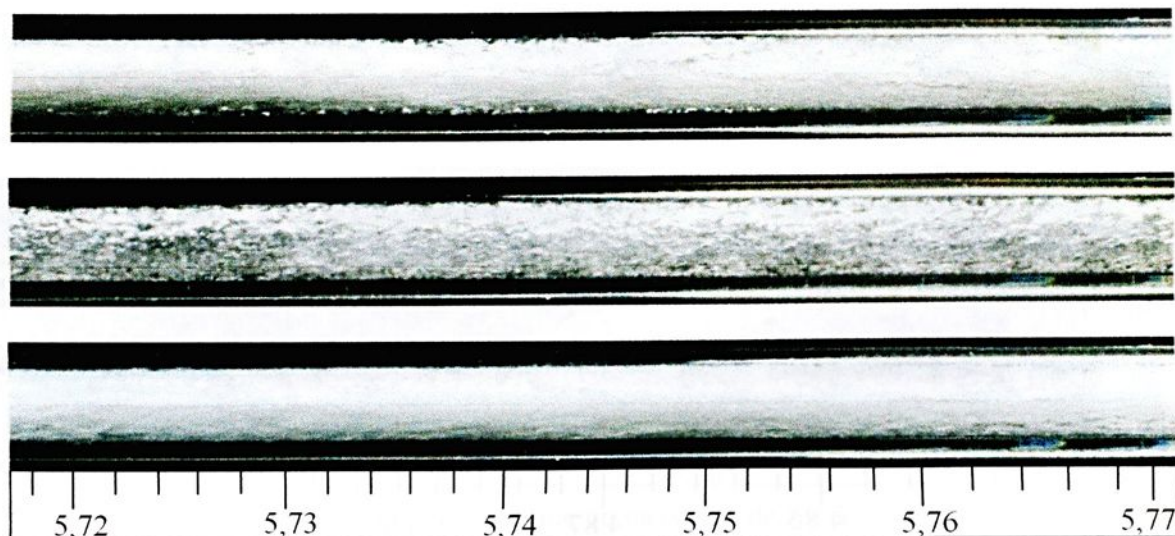


Figura 5.30 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,72$ a $5,77$ m para o teste 39, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

As Figuras 5.33 a 5.39 apresentam resultados da visualização do teste 40 cujos resultados de pressão e de temperatura são mostrados, respectivamente, nas Figs. 5.31 e 5.32 para uma pressão de saturação no tanque de alta pressão de 6,5 bar e temperatura de entrada do escoamento em torno de 30°C .

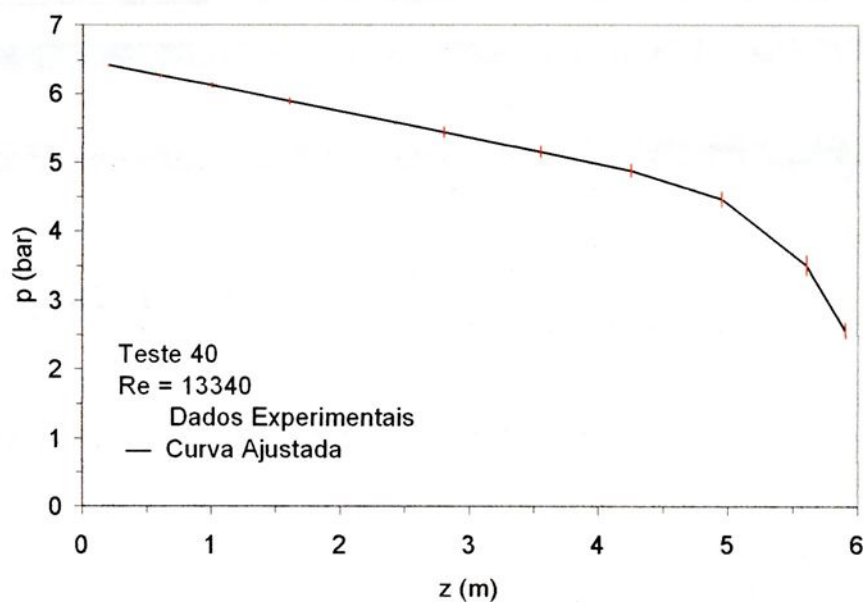


Figura 5.31 – Distribuição de pressão (p) ao longo do tubo para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

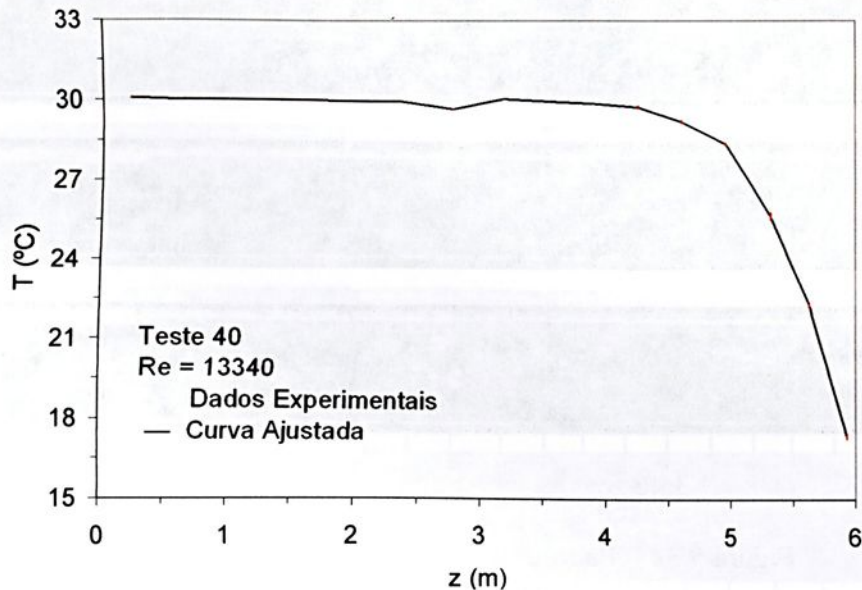


Figura 5.32 – Distribuição de temperatura (T) ao longo do tubo para o teste 40, $p_{TAP}= 6,5$ bar.

No teste 40, a seqüência de imagens mostra que a concentração de bolhas aumenta consideravelmente com a evolução do tempo. A Figura 5.35, $z = 3,92$ a $3,97$ m, mostra que as bolhas de vapor já estão concentradas, caracterizando o escoamento de espuma numa posição anterior àquelas mostradas nos teste 36 a 39. As demais fotografias apresentam resultados semelhantes àqueles dos testes 36 a 39.

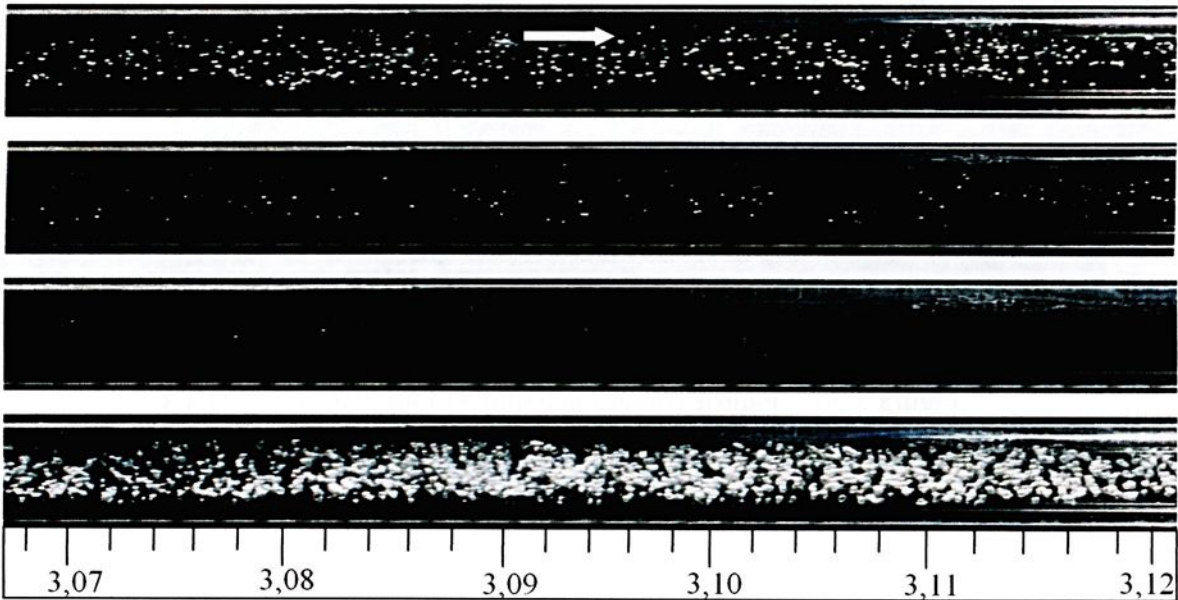


Figura 5.33 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,07$ a $3,12$ m para o teste 40, $p_{TAP}= 6,5$ bar.

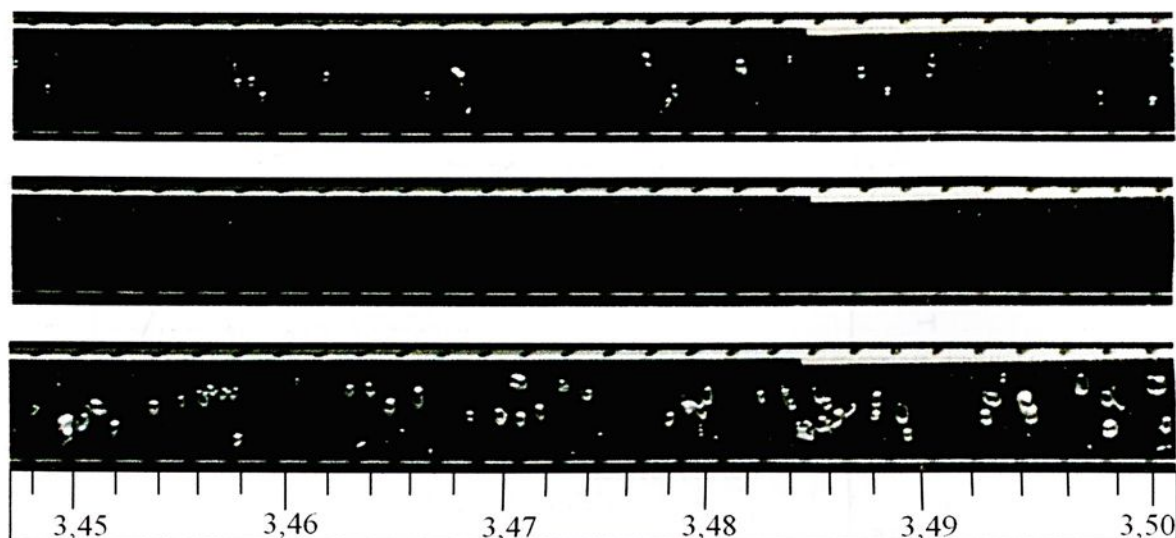


Figura 5.34 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,45$ a $3,50$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

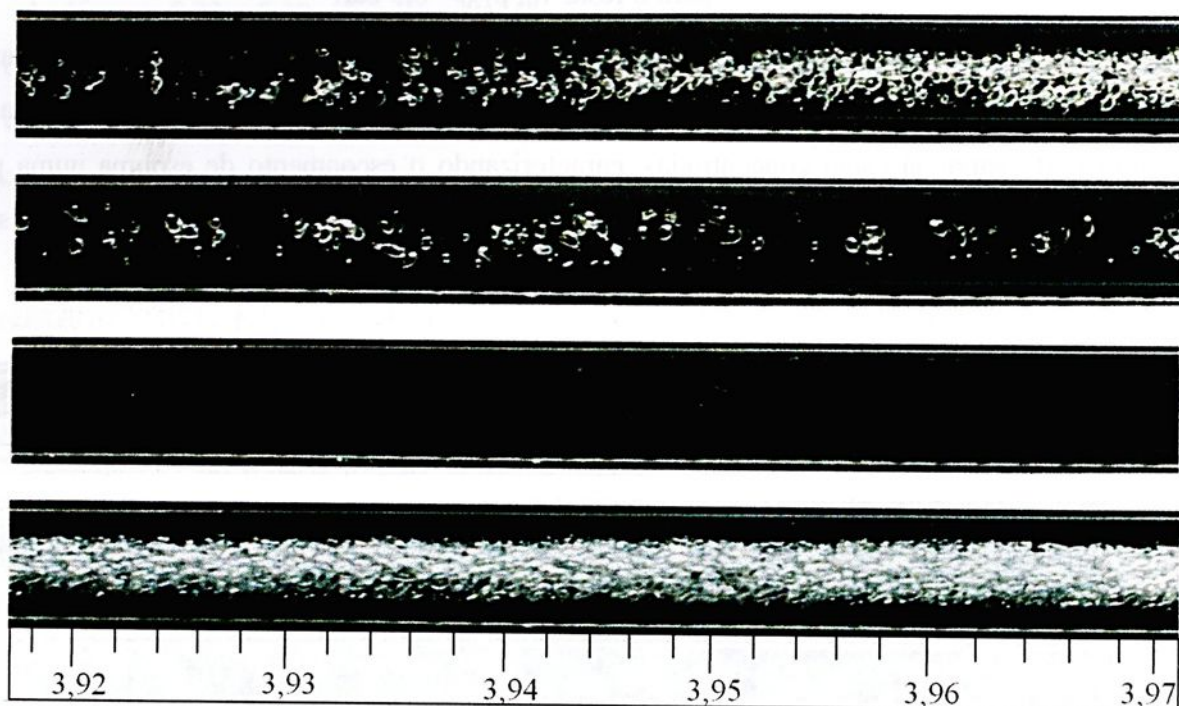


Figura 5.35 – Padrões do escoamento na região de $z = 3,92$ a $3,97$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

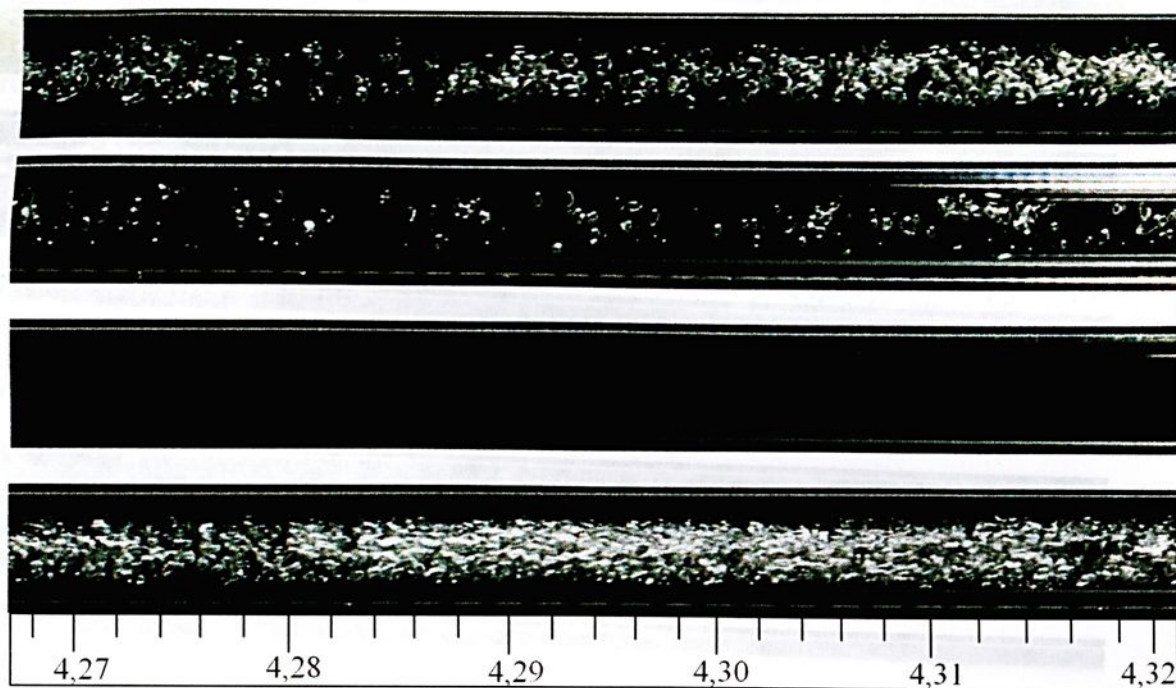


Figura 5.36 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,27$ a $4,32$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

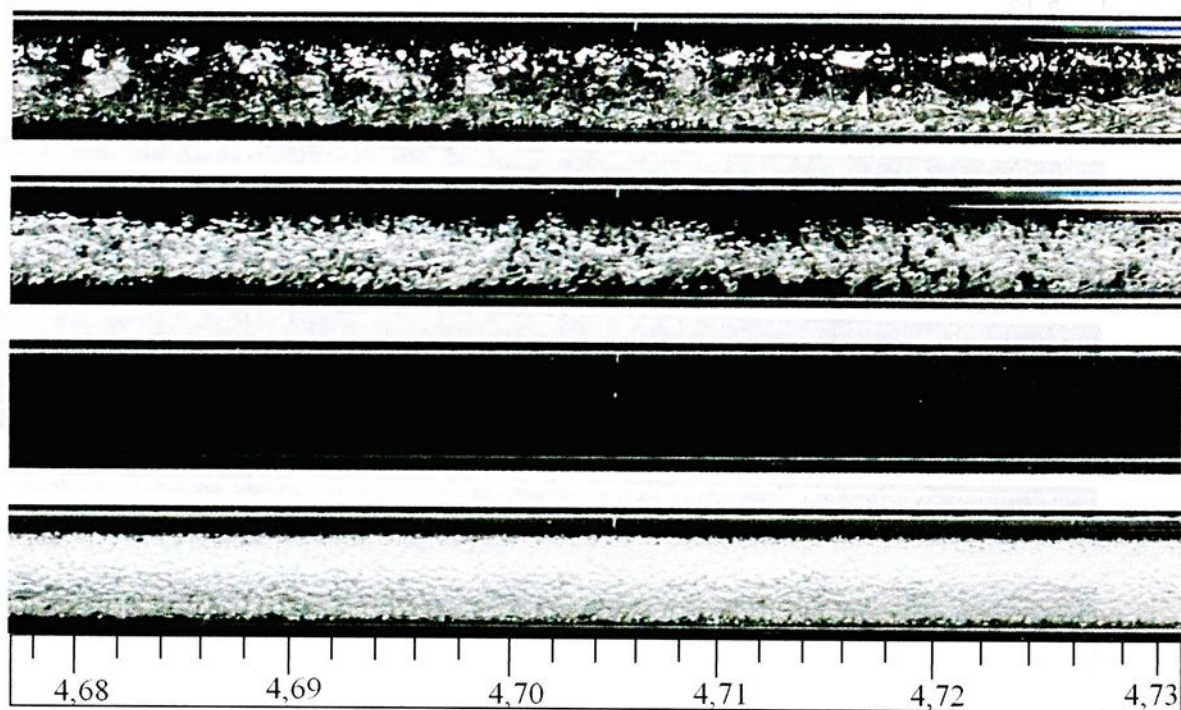


Figura 5.37 – Padrões do escoamento na região de $z = 4,68$ a $4,73$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

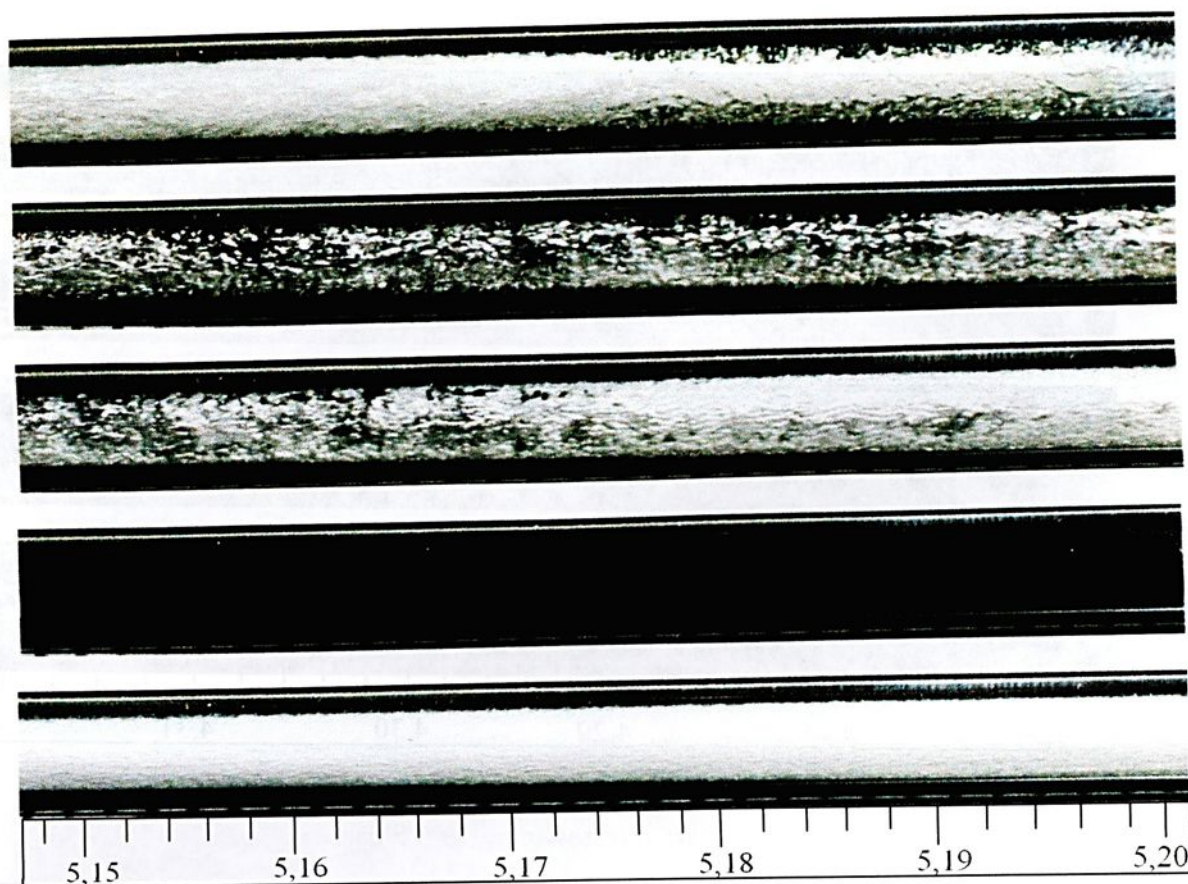


Figura 5.38 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,15$ a $5,20$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

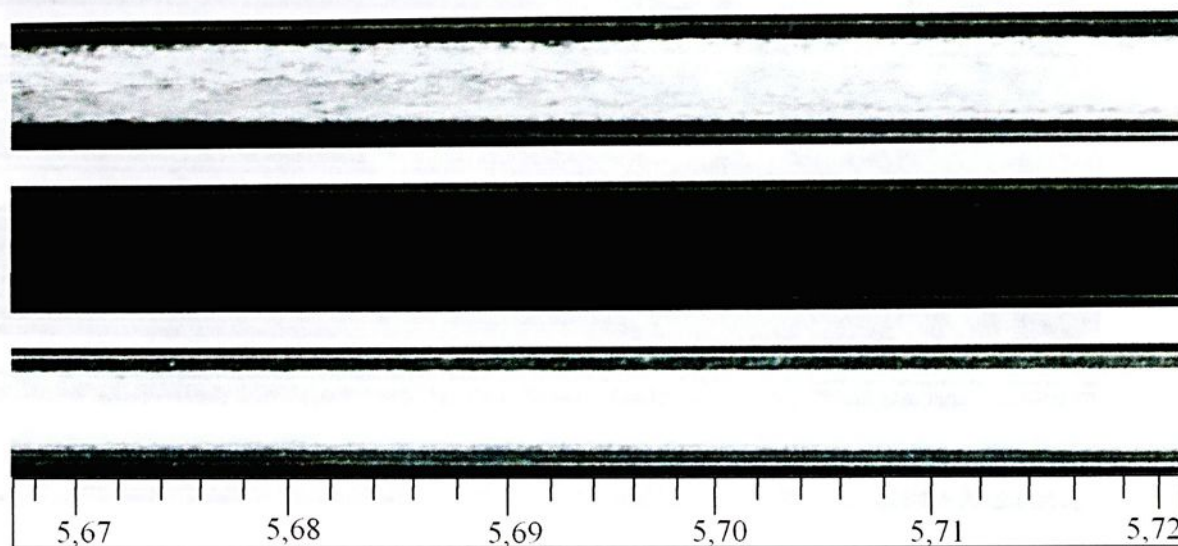


Figura 5.39 – Padrões do escoamento na região de $z = 5,67$ a $5,72$ m para o teste 40, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

Os resultados da visualização mostraram que na região na entrada do tubo, onde o gradiente de pressão e a temperatura do escoamento são constantes, observa-se o escoamento em

em bolhas (bubbly flow). Na região na saída do tubo, caracterizada por uma grande redução de pressão e de temperatura, observa-se a presença de escoamento de espuma. Além disso, notou-se a característica intermitente do escoamento, comprovada pelos vários padrões de escoamento em uma mesma posição ao longo do tubo.

O próximo capítulo apresenta uma comparação entre os resultados experimentais e alguns modelos de predição de queda de pressão em escoamento bifásico em tubos de pequenas dimensões.





MULTIPLICADORES BIFÁSICOS

Em escoamentos bifásicos em tubos, de uma maneira geral, o gradiente total de pressão ao longo do escoamento poder ser dividido em quatro termos. Um dos termos leva em consideração a contribuição da variação da área da seção transversal do tubo no gradiente de pressão total. Um outro termo inclui a contribuição da força gravitacional na variação de pressão e existirá apenas no caso do tubo estar inclinado em relação à horizontal. Um terceiro termo incorpora o efeito da aceleração do escoamento causado pelo aumento da fração de vazio do escoamento. Finalmente, o quarto termo contabiliza a variação da pressão devido ao atrito. Para tubos de seção transversal constante posicionado na horizontal o primeiro e o segundo termos são nulos, restando apenas as contribuições do termo de aceleração e de atrito.

Usualmente, o termo de atrito do escoamento bifásico é substituído por um termo de atrito monofásico, acompanhado de um coeficiente de correção denominado multiplicador bifásico. O gradiente de pressão monofásico é calculado usando as correlações usuais aplicadas aos escoamentos monofásicos. Os multiplicadores bifásicos, por sua vez, são estimados por meio de diversas correlações obtidas a partir de dados experimentais para diversas situações de escoamentos bifásicos.

Barbosa *et al.* (2004) estudaram a aplicabilidade de várias correlações (Alofs e Hasan (1990), Chen *et al.* (2001), Friedel (1979), Mishima e Hibiki (1996), Tran *et al.* (2000), Wang *et al.* (2000), Modelo Homogêneo) no cálculo dos multiplicadores bifásicos para o caso de uma mistura de óleo mineral e refrigerante R-12. Nesse trabalho, os autores concluíram que as correlações usadas falharam na predição do gradiente de pressão para o escoamento bifásico da mistura. Os autores, então, propuseram uma correlação diferente para essa mistura, que conseguiu correlacionar os seus dados experimentais com um erro r.m.s de 26%. Além disso, Barbosa *et al.* (2004) sugeriram que a correlação proposta poderia ser usada, como uma primeira aproximação, para misturas compostas de óleo polioléster e refrigerante R-134a.



Neste capítulo duas correlações citadas por Barbosa *et al.* (2004) (Wang *et al.* (2000) e Modelo Homogêneo) e aquela proposta pelos próprios autores são usadas para correlacionar os dados experimentais de gradiente de pressão obtidos neste trabalho. A seguir apresenta-se o procedimento usado para obter o gradiente de pressão experimental e posteriormente, apresentam-se os modelos de multiplicadores bifásicos usados e as comparações entre os resultados obtidos usando as várias correlações.

6.1 Procedimento para Cálculo do Gradiente de Pressão Experimental

O gradiente de pressão experimental devido ao atrito da mistura em uma determinada posição z é calculado pela seguinte equação:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{f,TP} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{Total} - \left(\frac{dp}{dz}\right)_{ac} \quad (6.1)$$

onde

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Total} = \frac{p_{i+1} - p_i}{z_{i+1} - z_i}, \quad i = 1 \text{ a } 9 \quad (6.2)$$

sendo $(dp/dz)_{Total}$ o gradiente de pressão total medido experimentalmente, p_i a pressão medida pelo transdutor “ i ” e z_i é a posição do transdutor ao longo do tubo.

Segundo Barbosa *et al.* (2004), o gradiente de pressão devido à aceleração do fluido, $(dp/dz)_{ac}$, é calculado por:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{ac} = G^2 \left[\left(\frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dx}{dz} - \frac{x}{\rho_G^2} \frac{d\rho_G}{dz} - \frac{(1-x)}{\rho_L^2} \frac{d\rho_L}{dz} \right] \quad (6.3)$$

onde G é o fluxo de massa total, ρ_G é a densidade do R-134a no estado vapor, ρ_L é a densidade da mistura óleo-refrigerante líquida, x é o título do escoamento e z é uma determinada posição ao longo do tubo. Os gradientes dx/dz , $d\rho_G/dz$ e $d\rho_L/dz$ são estimados de maneira similar ao $(dp/dz)_{Total}$:

$$\left(\frac{dx}{dz}\right) = \frac{x_{i+1} - x_i}{z_{i+1} - z_i}, \quad i = 1 \text{ a } 9 \quad (6.4)$$

$$\left(\frac{dp_G}{dz}\right) = \frac{(\rho_G)_{i+1} - (\rho_G)_i}{z_{i+1} - z_i}, \quad i = 1 \text{ a } 9 \quad (6.5)$$

$$\left(\frac{dp_L}{dz}\right) = \frac{(\rho_L)_{i+1} - (\rho_L)_i}{z_{i+1} - z_i}, \quad i = 1 \text{ a } 9 \quad (6.6)$$

Supondo que em cada posição z a mistura líquida permaneça saturada de refrigerante, pode-se calcular o título local usando a Eq. (4.2), com w_e sendo a concentração do refrigerante no óleo dentro do tanque de alta pressão. Esta concentração é calculada por meio da equação da solubilidade, Eq. (C.1), usando a pressão e a temperatura medidas dentro do tanque de alta pressão. Por outro lado, w é a concentração local em uma determinada posição z ao longo do tubo, calculada por meio da mesma equação de solubilidade, Eq. (C.1), mas usando a pressão e a temperatura medidas na posição z .

O gradiente de pressão devido ao atrito, calculado pela Eq. (6.1), será denominado de gradiente de pressão viscoso experimental. Este gradiente será comparado com gradientes de pressão obtidos de correlações empíricas encontradas na literatura, que usam multiplicadores bifásicos como metodologia. A seguir são apresentadas as correlações, aqui denominados gradientes teóricos, no presente trabalho.

6.2 Correlação de Wang *et al.* (2000)

Wang *et al.* (2000) propôs uma correlação empírica para a mistura ar-água escoando em um tubo de 3 mm de diâmetro interno. Os autores dividiram os dados experimentais em duas regiões: uma região onde os multiplicadores bifásicos são dependentes do fluxo de massa e outra, onde os multiplicadores são independentes do fluxo de massa. Todos os resultados da mistura óleo éster e refrigerante R-134a estudadas neste trabalho estão incluídas na região onde os multiplicadores são independentes do fluxo de massa. Para esta região, o multiplicador bifásico é dado por:

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C_1}{X} + \frac{C_2}{X^2} \quad (6.7)$$



onde

$$C_1^2 = \left[5 + \left(\frac{Re_G}{Re_L} \right)^{0,3} \right] + \frac{Re_{LO}}{17} \quad (6.8)$$

$$C_2 = \frac{0,05 Re_L}{Re_G} \quad (6.9)$$

$$X^2 = \frac{(dp/dz)_{f,L}}{(dp/dz)_{f,G}} \quad (6.10)$$

e Re_G é o número de Reynolds calculado considerando o escoamento monofásico do gás com vazão em massa Gx , Re_L é o número de Reynolds calculado considerando o escoamento monofásico de líquido com vazão em massa $G(1-x)$ e Re_{LO} é o número de Reynolds calculado considerando o escoamento monofásico do líquido com vazão em massa G .

Os gradientes de pressão monofásicos foram estimados utilizando-se as equações:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,L} = 2f \frac{[G(1-x)]^2}{\rho d} \quad (6.11)$$

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,G} = 2f \frac{(Gx)^2}{\rho d} \quad (6.12)$$

onde f é o fator de atrito de Fanning. Neste trabalho foi utilizada a equação de Churchill (1977) para o cálculo do fator de atrito pois é aplicável a todos os regimes de escoamento: laminar, transição e turbulento.

Assim o gradiente de pressão bifásico devido ao atrito pode ser calculado pela equação:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,TP} = \Phi_L^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,L} \quad (6.13)$$

6.3 Resultados fornecidos pela correlação de Wang *et al.* (2000)

Utilizando o modelo de Wang *et al.* (2000) e os dados experimentais de pressão e temperatura apresentados no capítulo 4, calculou-se a razão entre o gradiente de pressão experimental e o gradiente de pressão teórico, que será denominado de razão de gradiente de pressão. Estes resultados são apresentados nas Figs. 6.1 a 6.6.

Para todas as pressões testadas, as maiores diferenças entre o gradiente de pressão experimental e o gradiente de pressão teórico ocorreram numa região intermediária do tubo, aqui denominada de região de escoamento bifásico convencional. Para a maioria dos dados, o modelo superestimou o gradiente de pressão devido ao atrito.

Os pontos removidos dos dados porque produziram um comportamento fisicamente inconsistente para algumas propriedades apresentados no capítulo 4 foram excluídos desta análise.

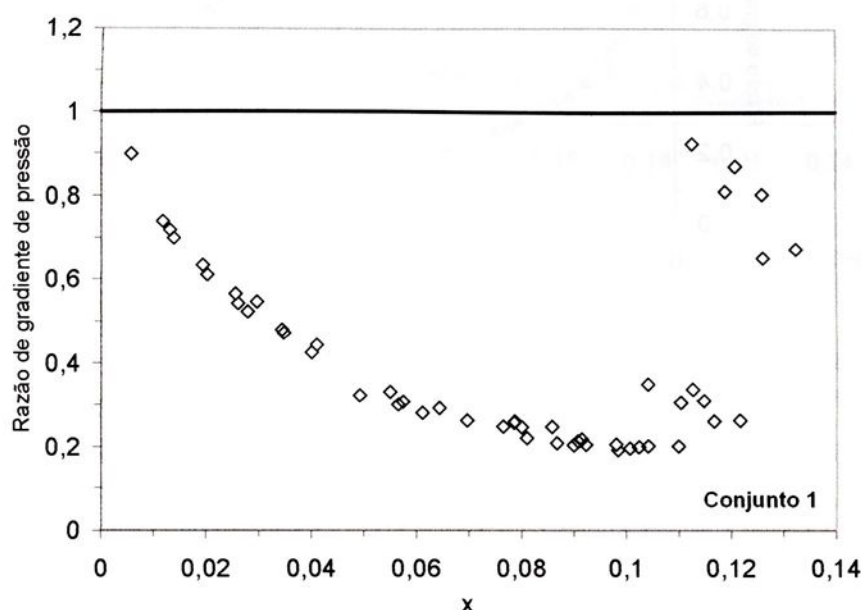


Figura 6.1 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar .

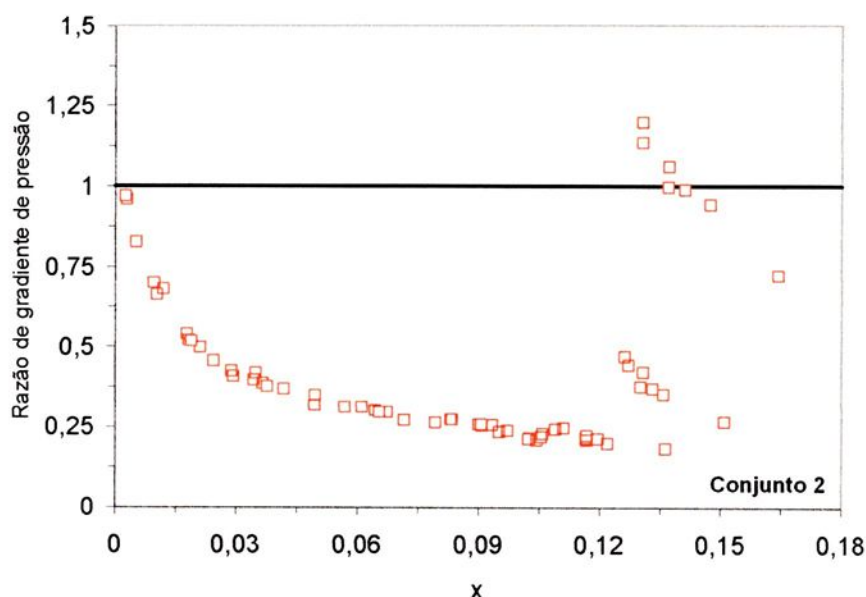


Figura 6.2 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar .

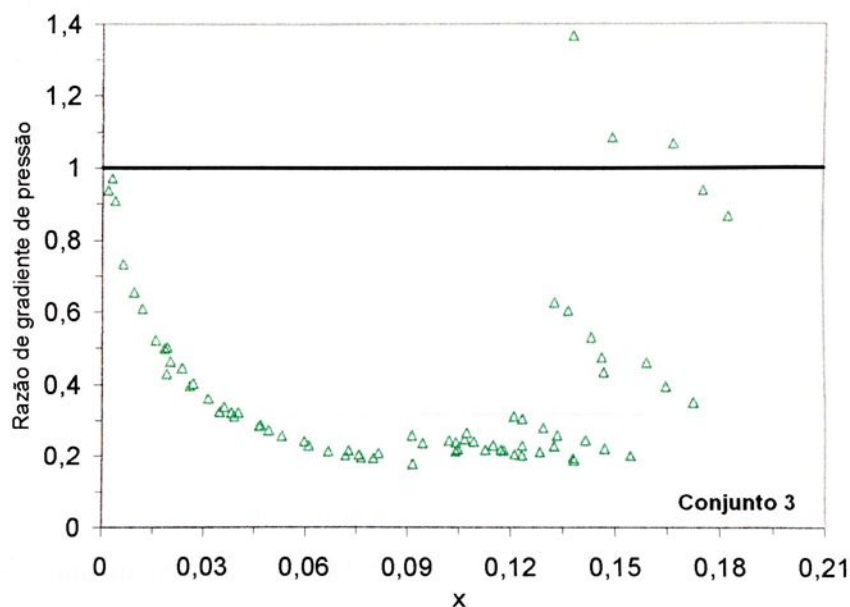


Figura 6.3 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar .

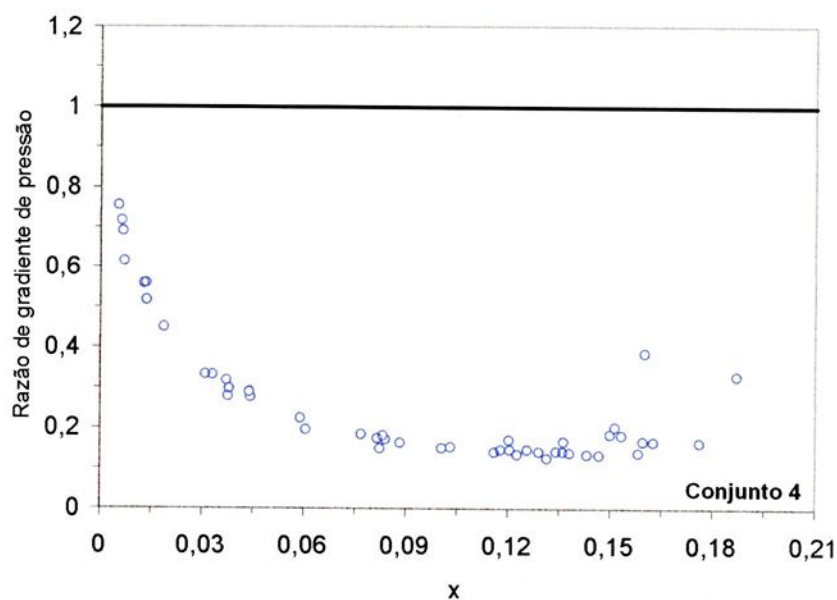


Figura 6.4 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar .

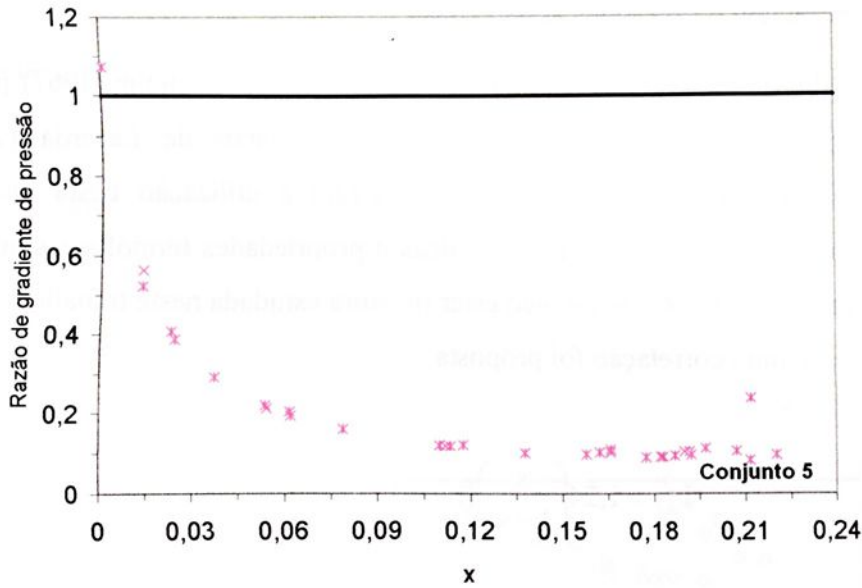


Figura 6.5 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 31 – 35, $p_{TAP}=6,5$ bar .

Na Figura 6.6 são apresentados os resultados de todos os testes utilizando o modelo de Wang *et al.* (2000). Exceto para o Conjunto 5, a razão de gradiente de pressão está mais próxima da unidade na região de maiores títulos, na qual é observado a formação de espuma no escoamento. Na região de escoamento bifásico convencional os resultados obtidos são praticamente independentes da pressão no tanque de alta pressão.

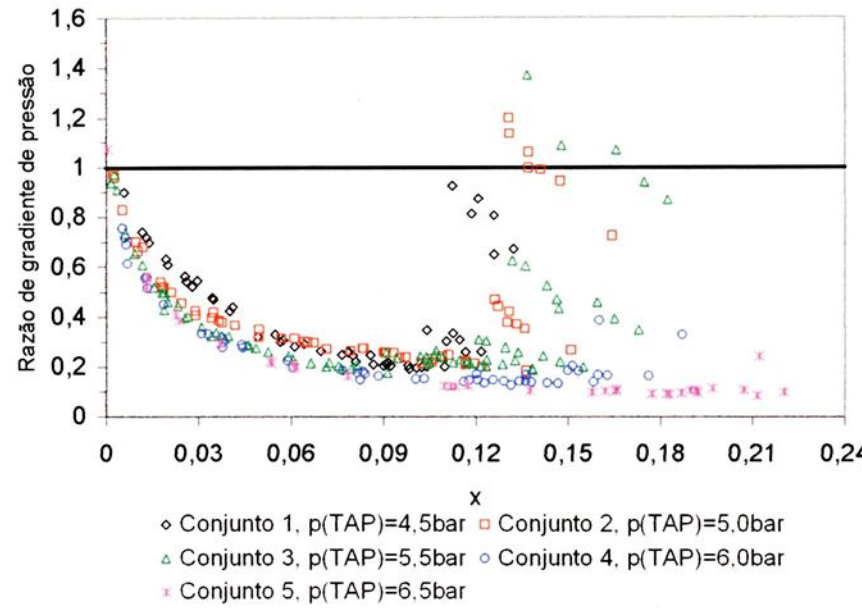


Figura 6.6 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Wang *et al.*, 2000) para os testes 01 – 35.

6.4 Correlação de Barbosa *et al.* (2004)

Barbosa *et al.* (2004) adaptaram a correlação de Chisholm (1967) para o multiplicador bifásico do gás utilizando os resultados experimentais de Lacerda (2000). Como uma aproximação grosseira, os autores recomendaram a utilização desta nova correlação para misturas com características termodinâmicas e propriedades termofísicas similares, tal como a mistura de refrigerante R-134a e óleo éster (mistura estudada neste trabalho).

A seguinte correlação foi proposta:

$$\Phi_G^2 = 1,24 \left(\frac{x}{1-x} \right) (1-w) + \left[1,95 \exp \left(6,94 \times 10^{-3} \frac{Re_G}{Re_L} \right) X \right] + X^2 \quad (6.14)$$

Assim o gradiente de pressão bifásico viscoso pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,TP} = \Phi_G^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,G} \quad (6.15)$$

onde

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{f,G} = 2f_G \frac{(Gx)^2}{\rho_G d} \quad (6.16)$$

6.5 Resultados fornecidos pela correlação de Barbosa *et al.* (2004)

Utilizando o modelo de Barbosa *et al.* (2004) e os dados experimentais de temperatura e pressão apresentados no capítulo 4, calculou-se a razão entre o gradiente de pressão experimental e o gradiente de pressão teórico. Estes resultados são apresentados nas Figs. 6.7 a 6.12.

Para todos os testes, a razão entre o gradiente de pressão experimental e o gradiente de pressão calculado pela correlação de Barbosa *et al.* (2004) apresentou resultados próximos da unidade. Os maiores desvios em relação à unidade ocorreram na região de altos valores para o título, na qual o escoamento de espuma é frequentemente observado.

A Figura 6.12 mostra todos os resultados em um único gráfico. Similar aos resultados obtidos pelo modelo de Wang *et al.* (2000), observa-se que a razão de gradiente de pressão é

independente da pressão no tanque de alta pressão na região de escoamento bifásico convencional.

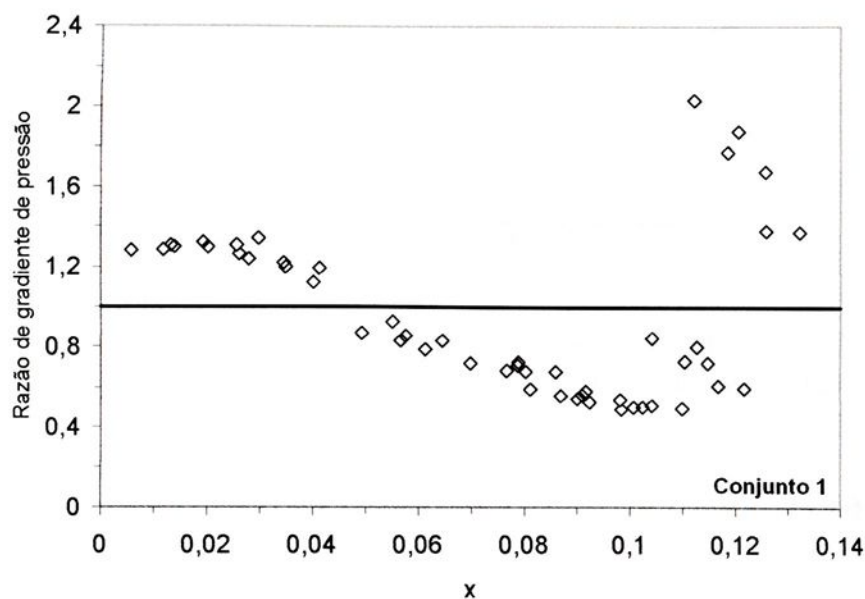


Figura 6.7 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar .

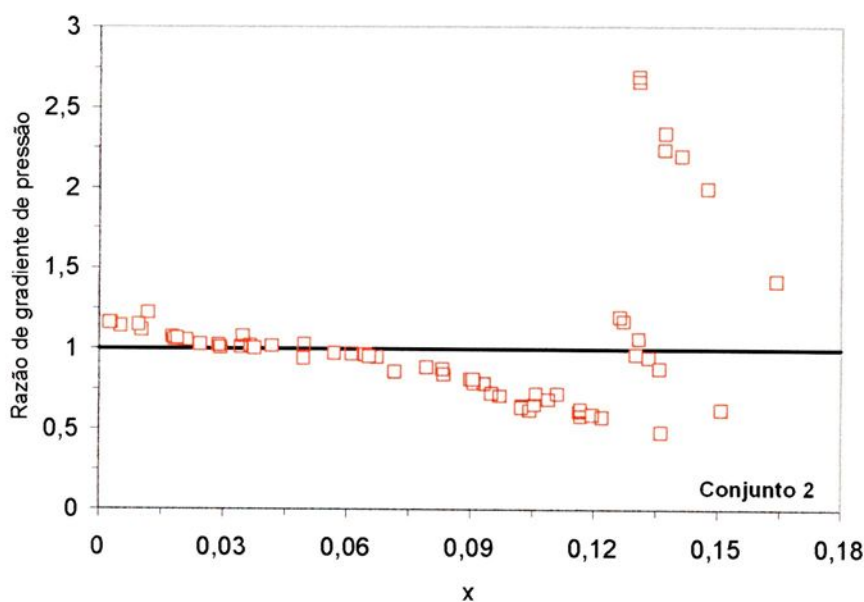


Figura 6.8 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar .

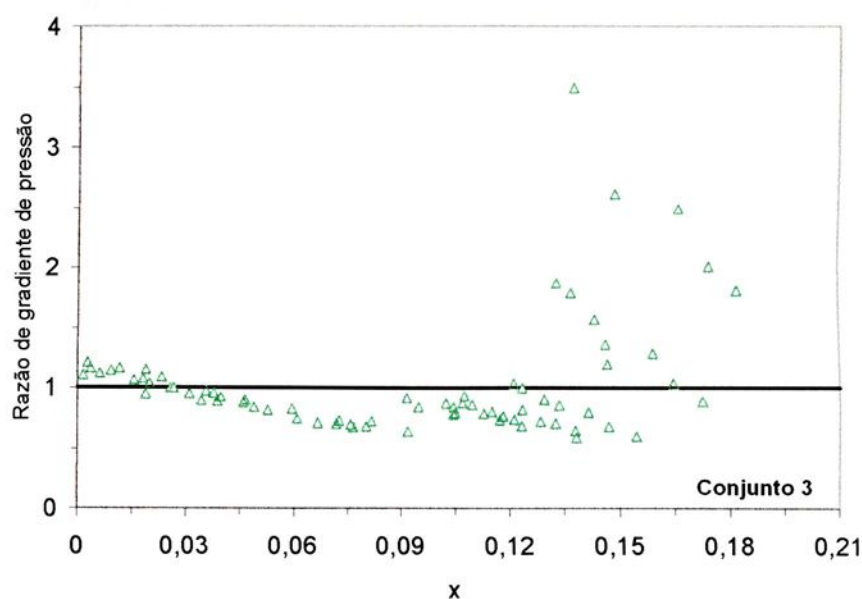


Figura 6.9 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar .

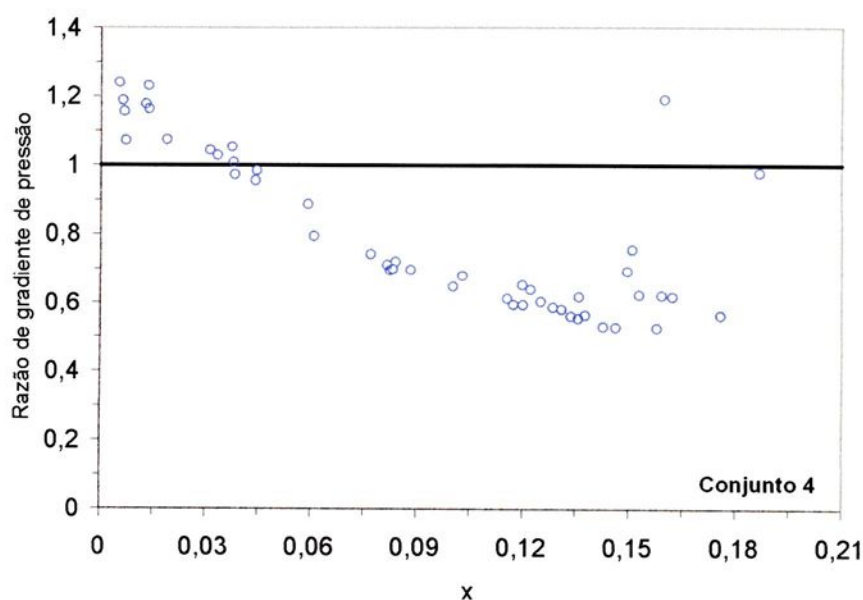


Figura 6.10 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar .

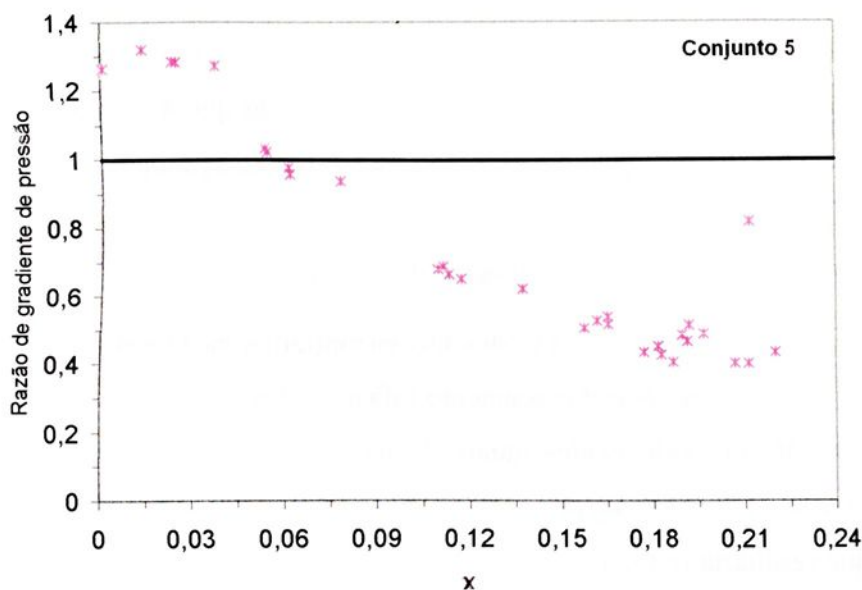


Figura 6.11 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 31 – 35, $p_{TAP}=6,5$ bar .

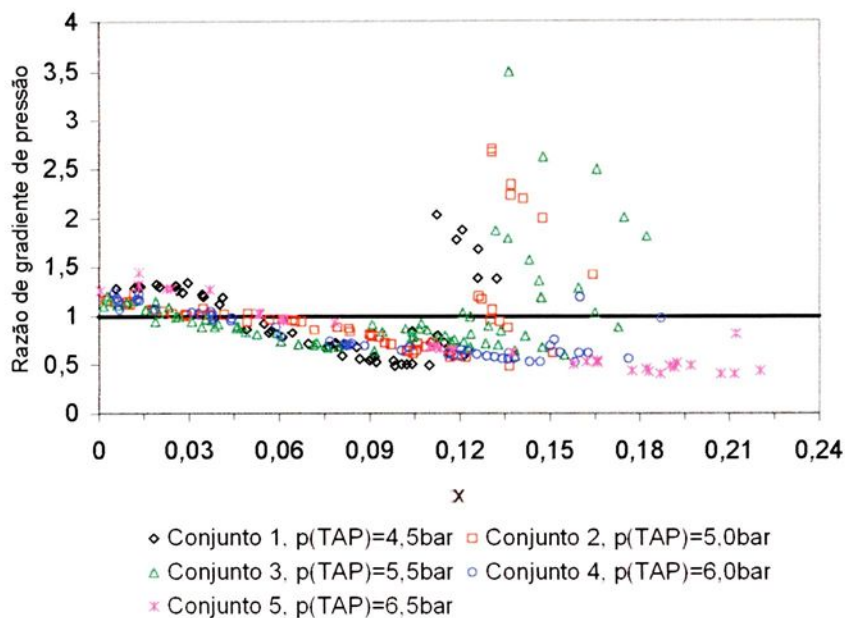


Figura 6.12 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (Barbosa *et al.* 2004) para os testes 01 – 35.

Nota-se na Fig. 6.12 que existe uma região de título na qual o gradiente de pressão experimental torna-se maior do que o teórico. Os resultados de visualização mostram que nesta

região o padrão de escoamento de espuma é predominante. Ao estudar o escoamento de espumas aquosas, Calvert (1990), mostrou que a estimativa de queda de pressão usando o parâmetro de Lockart-Martinelli foi cerca de até 200 vezes menor do que a queda de pressão experimental. Portanto, este tipo de resultado era esperado para a região de espuma.

6.6 Correlação do Modelo Homogêneo

Nos modelos de análise do escoamento encontrados na literatura a abordagem geralmente empregada consiste em tratar o escoamento bifásico como homogêneo, isto é, considerar as fases líquida e vapor com velocidades iguais. O modelo homogêneo fornece bons resultados se $\rho_l/\rho_g < 10$ ou se $G > 2000 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Em termos do fator de atrito de Fanning, o multiplicador bifásico que resultaria se toda a vazão em massa do escoamento fosse somente de líquido, é dado pela seguinte equação:

$$\Phi_{LO}^2 = \frac{f_H \rho_L}{f_{LO} \rho_H} \quad (6.17)$$

onde ρ_H é a densidade homogênea dada por:

$$\frac{1}{\rho_H} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \quad (6.18)$$

e f_{LO} é o fator de atrito monofásico calculado considerando que toda a vazão em massa do escoamento seja somente de líquido, f_H é o fator de atrito homogêneo calculado pelas equações padrões do escoamento monofásico e utilizando o número de Reynolds homogêneo dado por:

$$Re = \frac{Gd}{\mu_H} \quad (6.19)$$

A equação para a viscosidade homogênea, μ_H , proposta por Beattie e Whalley (1982) é usada neste trabalho:

$$\mu_H = \mu_L (1 - \alpha_H) (1 + 2,5 \alpha_H) + \mu_G \alpha_H \quad (6.20)$$



onde μ_L é a viscosidade dinâmica da mistura óleo-refrigerante, μ_G é a viscosidade dinâmica do refrigerante R-134a e α_H é a fração de vazio.

Assim o gradiente de pressão de atrito bifásico é calculado por:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{f,TP} = \Phi_{LO}^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_{f,LO} \quad (6.21)$$

na qual,

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{f,LO} = 2f_L \frac{G^2}{\rho_L d} \quad (6.22)$$

6.7 Resultados fornecidos pelo Modelo Homogêneo

Utilizando o modelo homogêneo e os dados experimentais de temperatura e pressão apresentados no capítulo 4, calculou-se a razão entre o gradiente de pressão experimental e o gradiente de pressão teórico. Estes resultados são apresentados nas Figs. 6.13 a 6.18.

Independentemente da pressão no tanque de alta pressão, o gradiente de pressão experimental foi menor do que o gradiente de pressão teórico calculado pelo modelo homogêneo para a maioria dos casos. As maiores diferenças ocorreram na região intermediária de título, aqui chamada de escoamento bifásico convencional. As regiões de escoamento em espuma apresentaram resultados mais próximos da unidade.

A Figura 6.18 apresenta todos os testes realizados. De maneira similar aos resultados obtidos quando as comparações foram feitas usando-se as correlações de Wang *et al.* (2000) e Barbosa *et al.* (2004), observa-se que a razão de gradiente de pressão é independente da pressão no tanque de alta pressão nas regiões de escoamento monofásico e escoamento bifásico convencional.



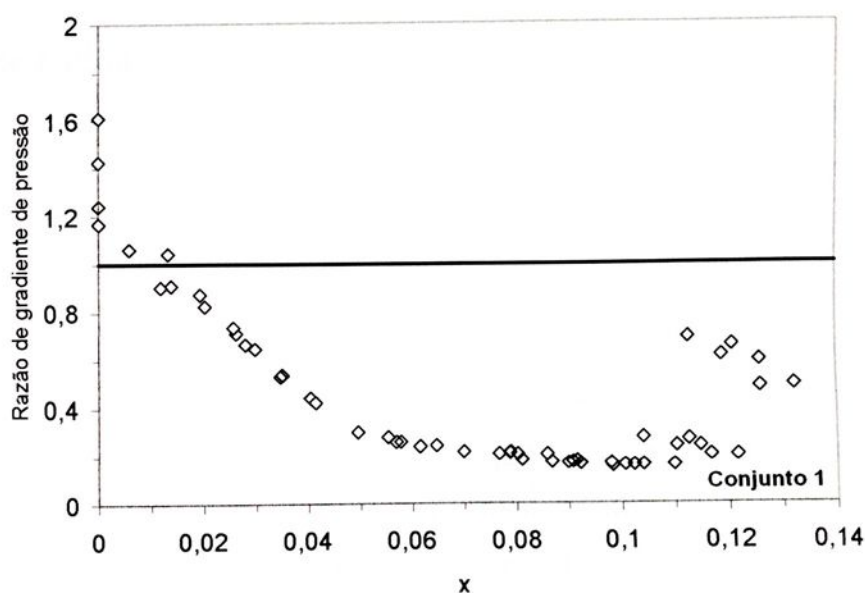


Figura 6.13 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 01 – 06, $p_{TAP} = 4,5$ bar .

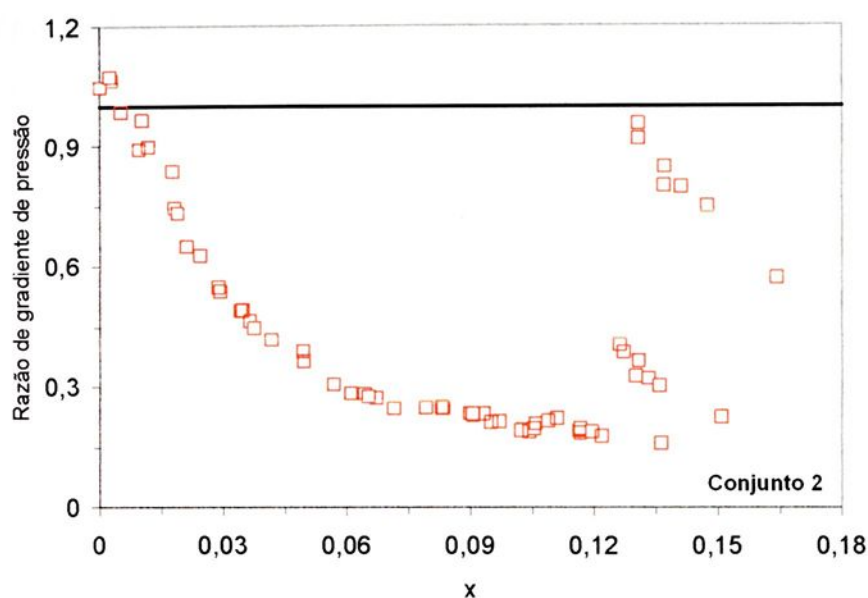


Figura 6.14 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 07 – 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar .

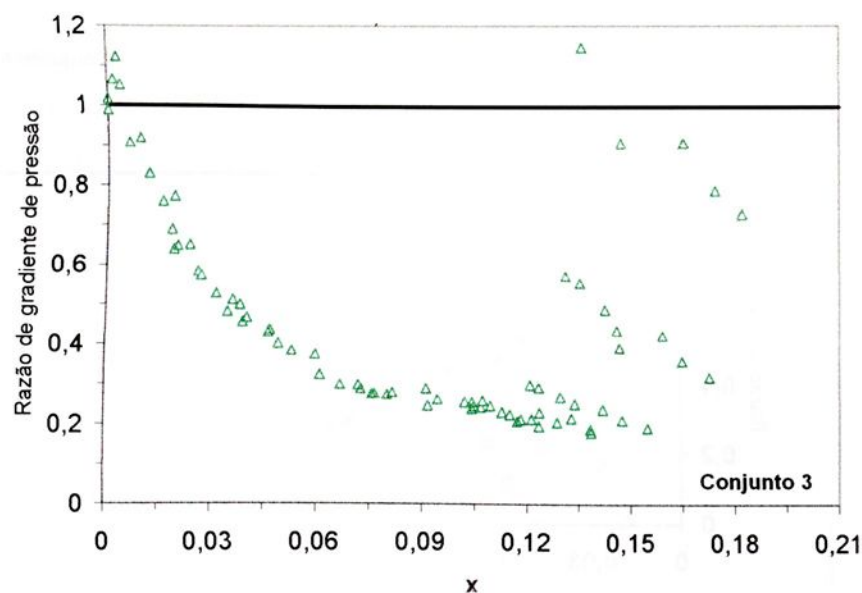


Figura 6.15 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 14 – 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar .

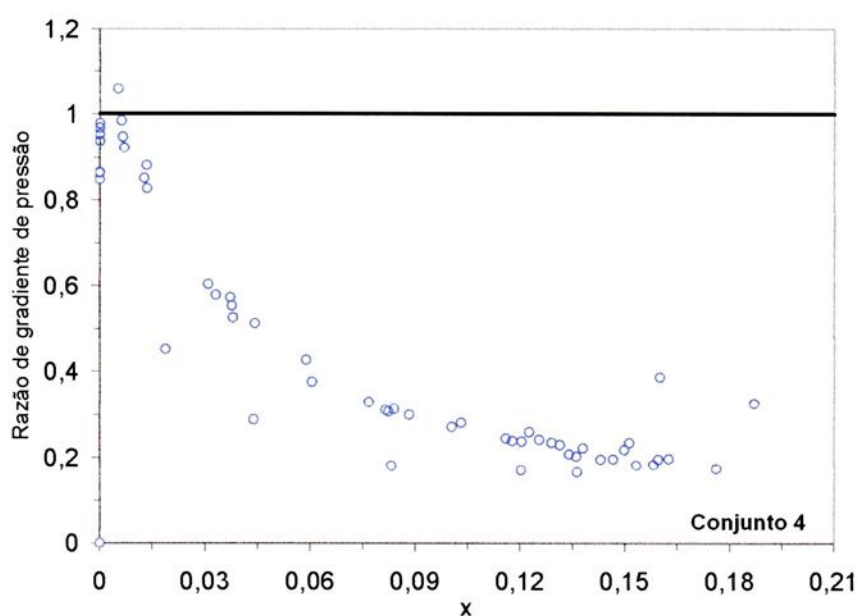


Figura 6.16 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 23 – 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar .

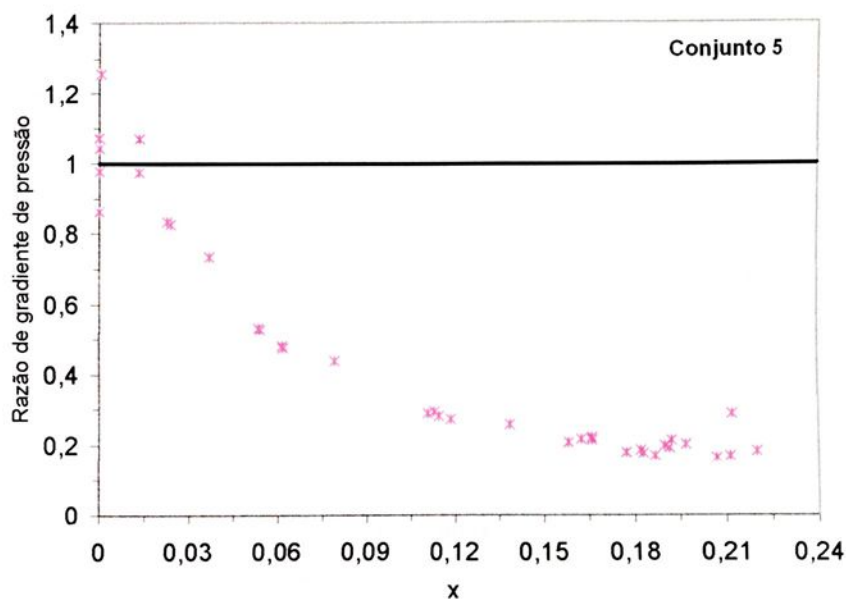


Figura 6.17 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 31 – 35, $p_{TAP}=6,5$ bar .

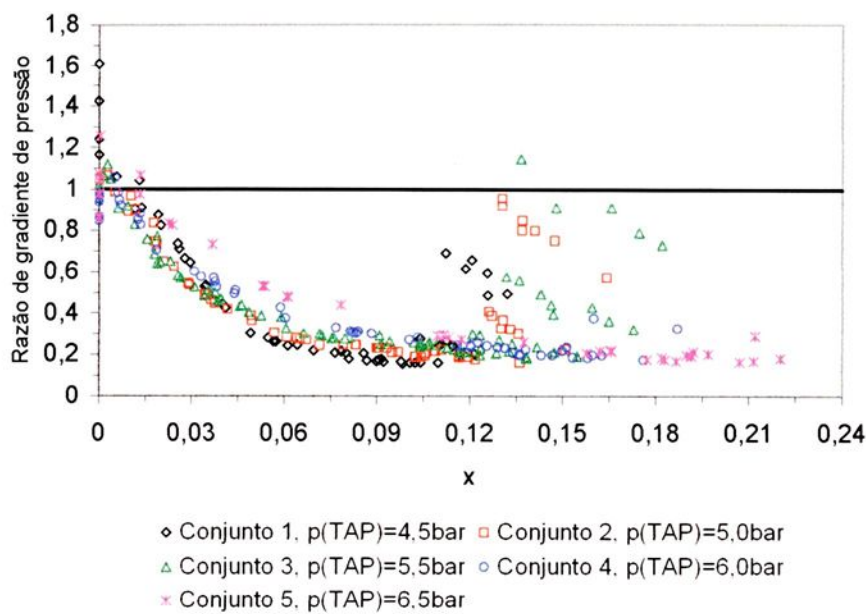


Figura 6.18 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico (modelo homogêneo) para os testes 01 – 35.

Na Figura 6.19 são plotados os resultados de todos os testes realizados, utilizando-se os modelos de Wang *et al.* (2000), Barbosa *et al.* (2004) e o modelo homogêneo. Observa-se que a

correlação de Barbosa *et al.* (2004) descreve melhor os dados experimentais, ou seja, apresenta os resultados mais próximos da unidade. Os resultados obtidos utilizando-se a correlação de Wang *et al.* (2000) e o modelo homogêneo são bastante similares na região de escoamento bifásico convencional.

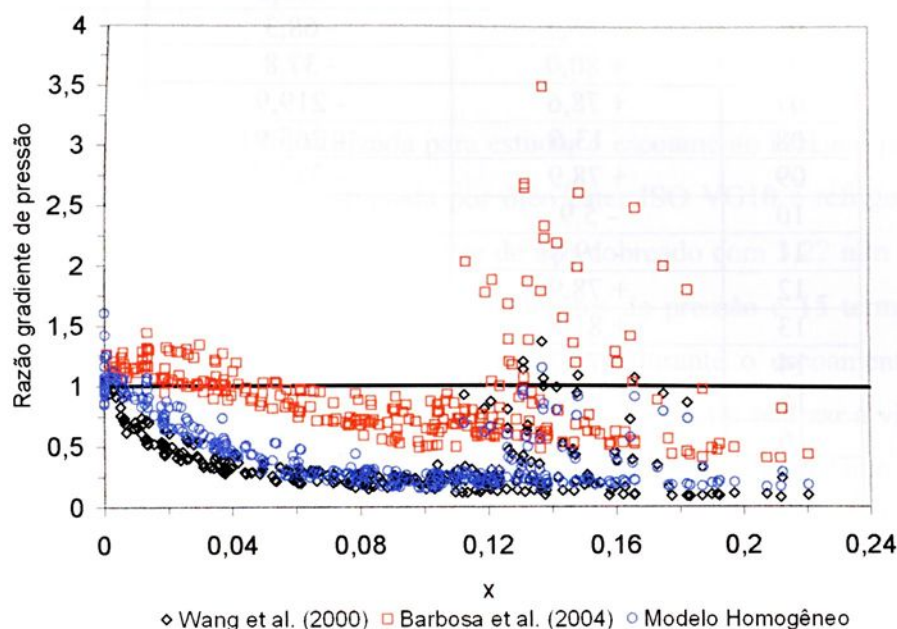


Figura 6.19 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 01 – 35.

Na Tabela 6.1 são apresentados os maiores desvios em relação à unidade para a razão do gradiente de pressão. O sinal negativo (-) foi utilizado para representar os dados que subestimaram o gradiente de pressão teórico e o sinal positivo (+) para aqueles que superestimaram.

Tabela 6.1 – Desvios da razão gradiente de pressão.

Ensaio	Wang <i>et. al</i> (2000) (%)	Barbosa <i>et. al</i> (2004) (%)	Modelo Homogêneo (%)
01	+ 79,9	- 38,5	- 16,6
02	+ 83,8	- 88,3	- 60,9
03	+ 80,9	- 78,0	- 42,4
04	+ 79,6	- 203,8	- 24,1
05	+ 80,1	- 68,3	- 6,2
06	+ 80,0	- 37,8	+ 83,8
07	+ 78,6	- 219,9	- 6,8
08	- 13,6	- 265,9	- 0,5
09	+ 78,9	- 223,8	+ 80,9
10	- 5,9	- 234,1	+ 81,4
11	- 19,8	- 269,6	78,6
12	+ 78,9	- 99,6	- 7,7
13	+ 81,8	- 41,8	+ 84,0
14	+ 78,7	- 57,0	+ 78,6
15	+ 80,0	- 35,6	+ 81,9
16	+ 79,6	- 79,1	+ 77,4
17	+ 78,6	- 16,3	- 5,1
18	- 8,6	- 261,6	- 6,5
19	- 36,7	- 349,7	-14,6
20	- 6,9	-249,2	- 1,6
21	+ 80,7	- 200,7	- 12,1
22	+ 82,4	80,8	+ 81,1
23	+ 86,7	- 23,1	+ 80,4
24	+ 86,0	- 16,3	+ 75,5
25	+ 86,6	- 18,8	+ 80,4
26	+ 85,8	- 15,6	+ 79,2
27	+ 87,5	- 24,0	- 5,8
28	+ 83,4	- 19,0	+ 81,4
29	+ 85,9	- 17,7	+ 79,7
30	+ 86,2	- 7,2	+ 82,6
31	+ 91,0	- 31,9	+ 82,3
32	+ 90,9	- 28,2	- 7,3
33	- 7,2	- 27,1	- 25,8
34	+ 90,9	- 44,5	- 7,0
35	+ 90,5	- 28,3	-4,3

Os resultados individuais dos testes realizados, usando-se os três modelos, são apresentados no Apêndice G.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Uma bancada experimental foi utilizada para estudar o escoamento bifásico provocado pela redução de pressão de uma mistura composta por óleo éster ISO VG10 e refrigerante R-134a. Esta bancada é constituída por uma seção de teste de aço cobreado com 3,22 mm de diâmetro e 6 m de comprimento, onde são instalados 10 transdutores de pressão e 15 termopares. Nesta seção são medidos os perfis de pressão e de temperatura durante o escoamento em regime permanente da mistura óleo-refrigerante. A bancada também permitiu realizar a visualização do escoamento em outra seção de teste de vidro de 3,0 mm de diâmetro e de mesmo comprimento. Com estes dados, foi possível relacionar os padrões de escoamento com as distribuições de pressão e de temperatura medidas.

Os resultados mostraram a existência de três regiões características no escoamento. Uma região na entrada do tubo, onde o gradiente de pressão e a temperatura do escoamento são constantes, indicando a predominância de escoamento monofásico líquido da mistura. Posteriormente, a queda de pressão reduz a solubilidade do óleo, proporcionando a liberação de bolhas de vapor refrigerante. Nesta região intermediária de escoamento bifásico observou-se a presença de algumas bolhas de tamanho reduzido e notou-se uma pequena redução no gradiente de pressão e na temperatura. Na região próxima a saída do tubo observou-se uma grande redução de pressão e de temperatura. O refrigerante no estado de vapor já ocupa a maior parte da tubulação e não foi mais possível perceber a presença de bolhas. A fração de vazio nesta região alcançou valores maiores do que 0,8, o que geralmente caracteriza o escoamento de espuma. Além disso, notou-se a característica intermitente do escoamento, o que pôde ser comprovada pelos diferentes padrões de escoamento observados em uma mesma posição ao longo do tubo. A intermitência do escoamento também foi comprovada por meio dos dados de pressão, que apresentaram grandes oscilações na região de escoamento bifásico.

Comparou-se, também, os resultados experimentais de queda de pressão com alguns modelos de predição de queda de pressão em escoamento bifásico em tubos de pequenas dimensões. Todas as correlações testadas (Wang *et al.* (2000), Modelo Homogêneo,

Barbosa *et al.* (2004)) falharam ao predizer a queda de pressão do escoamento, evidenciando a necessidade de se obter uma correlação para melhor ajustar os resultados para o escoamento da mistura óleo éster ISO VG10 e refrigerante R-134a.

Na região de escoamento bifásico convencional, a correlação proposta por Barbosa *et al.* (2004) foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais. A maior parte dos resultados obtidos na região de escoamento de espuma, observada no final do tubo, utilizando a correlação de Wang *et al.* (2000) e o modelo homogêneo superestimaram o gradiente de pressão viscoso em relação aos dados experimentais. Entretanto, a correlação proposta por Barbosa *et al.* (2004) subestimou os resultados nesta região. Segundo Calvert (1990) nos escoamentos de espumas as quedas de pressão podem ser da ordem de até 200 vezes maiores do que nos escoamentos bifásicos convencionais, o que pode justificar este comportamento dos dados na região de escoamento de espuma.

7.1 Sugestões e Trabalhos Futuros

Como uma sequência deste trabalho pretende-se utilizar estes dados para produzir uma correlação para o gradiente de pressão viscoso válida apenas para a região de escoamento de espuma. Além disso, pretende-se realizar estudos semelhantes em tubos de menores diâmetros, nos quais, tanto as medições de pressão e de temperatura, como as visualizações dos padrões de escoamento, serão realizadas em um mesmo tubo. Este procedimento permitirá estabelecer uma melhor correlação entre os perfis de temperatura e pressão com os padrões de escoamento.

Algumas sugestões são fornecidas aqui com o objetivo de reduzir as incertezas dos resultados, assim como de melhorar a eficiência da bancada experimental.

Uma primeira sugestão diz respeito à instalação de um medidor de vazão na entrada do tubo, com o objetivo de melhorar a metodologia de determinação da vazão do escoamento.

Uma outra sugestão é medir diretamente da concentração da mistura no tanque de alta pressão (ou entrada do tubo), por meio de extração de uma quantidade de mistura líquida e medição da massa de óleo e refrigerante.

Uma terceira sugestão é feita para melhorar a eficiência da bancada, fazendo-se a condensação do refrigerante no acumulador de baixa pressão, com o objetivo de melhor controlar a pressão no vaso de baixa pressão.

Pequenas alterações na bancada experimental também podem melhorar seu desempenho, tais como a instalação de uma válvula de retenção na linha de borbulhamento de vapor e a



instalação de um maior número de transdutores de pressão, principalmente na região de saída do escoamento, onde existem os maiores gradientes.



Alofs D. J.; Hasan M. M.; 1990, Influence of oil on pressure drop in refrigerant compressor suction lines, *ASRHAЕ Transactions*, Vol. 96, p. 249-255.

Barbosa Fr.; J.R., Lacerda V.T.; Prata, A.T.; 2004, Prediction of pressure drop in refrigerant-lubricant oil flows with high contents of oil and refrigerant outgassing in small diameter tubes, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 27, p. 129-139.

Bassi, R.; Bansal, P. K.; 2002, In-tube condensation of mixture of R134a and ester oil: empirical correlations, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 26, p. 402 – 409.

Baustian, J. J.; Pate, M. B. e Bergles, A. E.; 1986, Properties of oil-refrigerant mixtures liquid with applications to oil concentration measurements: part I – thermophysical and transport properties,” *ASRHAЕ Transactions*, Vol. 92, p. 55-73.

Beattie, D. R. H.; Whalley, P. B.; 1982, A simple two-phase frictional pressure drop calculation method, *International Journal Multiphase Flow*, Vol. 8, p. 83 – 87.

Calvert, J. R.; 1990, Pressure drop for foam flow through pipes, *Internacional Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 11, nº 3, p. 236 -241.

Chen, I. Y.; Yang, K. S.; Chang, Y. J.; Wang, C. C.; 2001, Two-phase pressure drop of air-water and R- 401a in a small horizontal tubes, *International Journal Multiphase Flow*, Vol. 27, p. 1293 – 1299.

Castro, H. O. S.; Gasche, J. L.; Conti, W. P.; 2004 , Foam flow of oil-refrigerant R134a mixture in a small diameter tube. *International Compressor Engineering Conference at Purdue*, West Lafayette, Anais em CD-Room, Código R171.

Chisholm D.; 1967, A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. *NEL Report nº.310*.

Churchill, S.W.; 1977, Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes, *Chemistry Engineering*, n.7, p. 91-92.

Drost, R. T.; 1994, Outgassing and absorption of oil/refrigerant mixtures, *Proceeding of the International Compressor Engineering Conference at Purdue*, West Lafayette, Vol. 1, p.361-367.

Eckels, S. J.; Pate, M.B.; 1991, In-tube evaporation and condensation of refrigerant-lubrificant mixtures of HFC-134a and CFC-12, *ASRHAЕ Transactions*, Vol. 97, Parte 2, p. 62-70.

Friedel, L.; 1979, Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow, *Europe Two_Phase Flow Group Meeting*, Ispra, Itália [paper E2].

Gasche, J. L.; 1996, Escoamento de óleo e refrigerante pela folga radial de compressors rotativos de pistão rolante, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

Grebner, J. J.; Crawford, R. R.; 1993, Measurement of pressure temperature-concentration relations for mixtures of R12/mineral oil and R134a/synthetic oil, *ASHRAE Transactions*, Vol. 99, Part 1, p. 387-396.

Hambraeus, K.; 1995, Heat transfer of oil-contaminated HFC134a in a horizontal evaporator, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 18, N. 2, p. 87-99.

Lacerda, V. T.; 2000, Caracterização experimental do escoamento bifásico da mistura óleo-refrigerante em tubos de pequenos diâmetros, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

Lacerda, V.T.; Prata, A.T; Fagotti, F.; 2002, Refrigerant Outgassing from Compressor Lubricant Oil Flowing Through Pipes, HEFAT'2002 - International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, LV1, pp. 195-200.

Martz, W.L.; Burton, C.M.; Jacobi, A.M.; 1996, Local composition modelling of the thermodynamic properties of refrigerant and oil mixtures, *Internatioanl Journal of Refrigeration*, Vol. 19, N° 1, p. 25-33.

Mishima, K.; Hibiki, T.; 1996, Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes, *International Journal Multiphase Flow*, Vol. 22, p. 703 – 12.

Moffat, R.J.; 1988, Describing the uncertainties in experimental results, *Experimental Thermal and Fluid Science.*, Vol. 1, p 3-17.



Poiate Jr. E.; 2001, Escoamento bifásico da mistura óleo mineral-refrigerante R-12 ao longo de um tubo reto de seção circular, Dissertação de Mestrado, UNESP- Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP, Brasil, 216 p.

Shao, D. W.; Granryd, E.; 1995, Heat transfer and pressure drop of HFC134a-oil mixtures in a horizontal condensing tube, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 18, N. 8, p. 524 – 533.

Silva, A.; 2004, Cinemática e Dinâmica do Processo de Absorção de Gás Refrigerante em Óleo Lubrificante, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 203 p.

Tran, T. N.; Chy, M. C.; Wambsganss, M. W; France, Dm.; 2000, Two-phase pressure drop of refrigerants during flow boiling in small channels: an experimental investigation and correlation development, *International Journal Multiphase Flow*, Vol. 26, p. 1739-54.

Thomas, R. H. P.; Pham, H. T.; 1992, Solubility and miscibility of environmentally safer refrigerant/lubricant mixtures, *ASHRAE Transactions*, Vol. 98, Part 1, p. 783-788.

Thome, J.R., 1995, Comprehensive thermodynamic approach to modeling refrigerant-lubricant oil mixtures, *HVAC & R. Research*, Vol. 1, N° 2, p. 110-126.

Van Gaalen, N.A.; Pate, M.B.; Zoz, S.C.; 1990, The measurement of solubility and viscosity of oil/refrigerant mixtures at high pressures and temperatures: test facility and initial results for R22/naphthenic oil mixtures, *ASHRAE Transactions*, Vol. 96(2), p.183-190.

Van Gaalen, N.A.; Zoz, S.C.; Pate, P.E.; 1991a, The solubility and viscosity of solutions of R502 in a naphthenic oil and in an alkylbenzene at high pressures and temperatures, *ASHRAE Transactions*, Vol. 97(2), p. 100-108.

Van Gaalen, N.A.; Zoz, S.C.; Pate, P.E.; 1991b, The solubility and viscosity of solutions of HCFC-22 in a naphthenic oil and in an alkylbenzene at high pressures and temperatures, *ASHRAE Transactions*, Vol. 97(1), p. 285-292.

Yanagisawa, T.; Fukuta, M.; Shimizu T.; Zushi T.; 1994, Influence of oil-refrigerant solubility on the performance of rotary compressors, *Internacional Compressor Engineering Conference at Purdue*, West Lafayette, Vol. 1, p. 109 – 115.

Wang, C. C.; Yang, K. S.; Chang, Y. J.; Lu, D. C.; 2000, Characteristics of air-water two-phase flow in a 3 mm smooth tube, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 38, p. 1011-7.



Winkler, W.; Valkó, P. P.; Economides, M. J.; 1994, A rheological model for polymers foams," *Society of Petroleum Engineers*, Vol. 3, p. 897-906.

Wongwises, S.; Disawas, S.; 2000, Two-phase evaporative heat transfer coefficients of refrigerant HFC-134a under forced flow conditions in a small horizontal tube, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 27, nº 1, p. 35- 48.



CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

A calibração dos 15 termopares tipo T instalados na seção de teste foi efetuada usando-se um banho termostático e um termômetro de bulbo de mercúrio, com incremento de escala de 0,1 °C como instrumento de referência. Foi utilizado um banho de referência a zero grau Celsius, com o mesmo sistema de aquisição de dados usado no experimento. As medidas foram efetuadas em intervalos igualmente espaçados de 5 °C, tanto no aquecimento quanto no resfriamento. Para maior confiabilidade dos resultados, o ciclo aquecimento-resfriamento foi repetido três vezes.

A Tabela A.1 apresenta as médias dos dados experimentais obtidos na calibração dos termopares da seção de teste.

Tabela A.1 – Calibração dos Termopares.

Temp. Referência (°C)	Temp. Medida (°C)
10,0	9,65
15,0	14,62
20,0	19,70
25,0	24,79
30,0	29,61
35,0	34,70
40,0	39,70
45,0	44,65
50,0	49,65
55,0	54,63
60,0	59,53
65,0	64,55
70,0	69,44

A Figura A.1 apresenta os dados da Tab. A.1 na forma gráfica com as curvas de calibração ajustadas.

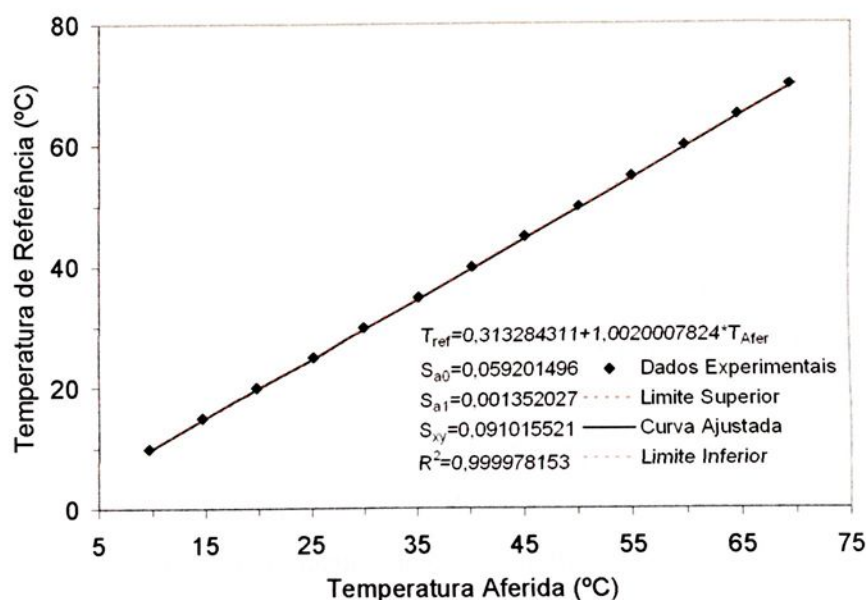


Figura A.1 – Curva de calibração para os 15 termopares da seção de teste.

S_{a0} e S_{a1} são os desvios padrões dos coeficientes linear e angular, respectivamente. S_{xy} é o desvio padrão do ajuste e R^2 é o coeficiente de covariância, que mede a qualidade do ajuste.

A incerteza de medição da temperatura, I_T , é calculada por,

$$I_T = t_{v,95\%} S_{xy} = 0,165^\circ\text{C}$$

na qual $t_{v,95\%} = 1,81$ para $v = N - 2 = 10$ graus de liberdade.

A incerteza inerente ao termômetro padrão utilizado não foi inserida visto que o laboratório não possui o certificado de calibração deste termômetro.

Não houve variação significativa das medidas dos quinze termopares e, por isso, foi utilizada uma única curva de calibração para todos os termopares.

CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO

A calibração dos transdutores de pressão foi realizada usando-se uma balança de peso morto fabricada pela ABSi- Indústria e Comércio Ltda, modelo B.P.M. 101, faixa 1 a 10 bar, classe 0,025% de precisão com certificado de calibração número 219/05 pela Rede Brasileira de Certificação.

Todos os transdutores foram calibrados usando-se as seguintes etapas:

1. instalação do transdutor na balança de peso morto;
2. sangria de ar da linha de conexão da balança de peso morto com o transdutor;
3. aplicação de uma carga na balança de peso morto e leitura da voltagem pelo sistema de aquisição de dados;
4. aumento da carga na balança gradativamente até uma pressão de 8 bar;

Este procedimento foi repetido 10 vezes para o transdutor 01. Em função do comportamento linear observado no transdutor 01, o procedimento foi repetido apenas 5 vezes para os demais transdutores.

A pressão absoluta aplicada na balança de peso morto é calculada por,

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man} * FC \quad (B.1)$$

na qual P_{abs} é a pressão absoluta, P_{atm} é pressão barométrica, P_{man} é a pressão manométrica e FC o fator de correção.

O fator de correção, FC, é utilizado para medições de pressão fora das condições de referência (temperatura de 20°C e aceleração da gravidade Universal) e considera o valor local da aceleração da gravidade e a variação das dimensões do cilindro e pistão da balança de peso morto em função da temperatura, e é dada por,

$$FC = \frac{g}{g_n} * \left[\frac{1}{1 + (\alpha_c + \alpha_p)(T - 20)} \right] \quad (B.2)$$



na qual, g é a aceleração da gravidade de Ilha Solteira (m/s^2), g_n é a aceleração da gravidade universal (m/s^2), α_c é o coeficiente de dilatação térmica do cilindro, α_p é o coeficiente de dilatação térmica do pistão e T é a temperatura em ($^\circ\text{C}$).

O valor teórico da aceleração da gravidade em Ilha Solteira foi determinado pela seguinte equação fornecida pelo Observatório Nacional:

$$g = \frac{9.7803267714 * (1 + 0,00193185138639 \text{sen}^2 \mu)}{\sqrt{1 - 0,00669437999013 \text{sen}^2 \mu}} - 0,000003086h \quad (\text{B.3})$$

na qual, μ é a latitude do ponto sobre o modelo teórico da terra e h é a altitude (em metros) sobre a superfície do modelo.

O modelo teórico considerado é o de um elipsóide de revolução com a mesma massa e a mesma velocidade angular reais da Terra. A primeira parcela do lado direito da Eq. B.3 refere-se à formula da gravidade teórica – ou normal – recomendada pela União Internacional de Geofísica e Geodésia, e é conhecida como a equação Somigliana. A segunda parcela é a estimativa teórica do gradiente vertical da gravidade. O sinal negativo é para levar em conta o afastamento em relação ao centro de massa do modelo de Terra, quando $h > 0$. O valor calculado pela Eq. B.3 é uma estimativa teórica de g . O valor real pode ser substancialmente diferente devido à distribuição de densidades em subsuperfícies e discrepâncias do gradiente real da gravidade em relação ao gradiente teórico.

Para o marco RV 1240V do IBGE, instalado em frente da faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, tem-se a seguinte aceleração teórica para a aceleração da gravidade,

$$g = 9,785 \pm 0,001 \text{ m/s}^2.$$

Os resultados da calibração dos transdutores são apresentados nas Tabelas (B.1) a (B.11) e Fig. (B.1) a (B.11) onde plota-se a curva ajustada dos dados levantados. Os limites superior e inferior indicados nas figuras referem-se à variação da curva ajustada, calculada pelo desvio padrão do ajuste S_{xy} , corrigido pelo fator de Student, t :

Limite superior $y = a_1x + (a_0 + t.S_{xy})$ (B.4)

Limite inferior $y = a_1x + (a_0 - t.S_{xy})$ (B.5)

Para o ajuste da curva foi considerado a média das 10 medidas efetuadas em cada carga aplicada à balança de peso morto para o transdutor 01 e 5 medidas para os demais transdutores. S_{a0} e S_{a1} são os desvios padrões dos coeficientes linear e angular, respectivamente, e R^2 é o coeficiente de covariância, que mede a qualidade do ajuste.

Tabela B.1 – Resultados da calibração do transdutor 1 (carregamento).

Carga aplicada (kg)	P _{abs} (bar)	Voltagem (mV)										P _{atm} (mbar)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1,0	1,992	0,551	0,551	0,551	0,551	0,551	0,549	0,550	0,551	0,550	0,551	995
1,5	2,491	0,651	0,651	0,652	0,651	0,652	0,650	0,651	0,651	0,651	0,651	995
2,0	2,990	0,751	0,752	0,752	0,752	0,752	0,750	0,751	0,751	0,751	0,752	995
2,5	3,489	0,852	0,852	0,852	0,853	0,852	0,850	0,851	0,851	0,852	0,852	995
3,0	3,987	0,952	0,952	0,952	0,953	0,952	0,951	0,951	0,952	0,952	0,952	995
3,5	4,486	1,052	1,052	1,052	1,052	1,052	1,051	1,051	1,052	1,052	1,052	995
4,0	4,984	1,152	1,152	1,153	1,153	1,152	1,151	1,152	1,152	1,152	1,152	995
4,5	5,484	1,251	1,252	1,252	1,252	1,252	1,251	1,252	1,251	1,251	1,252	995
5,0	5,982	1,351	1,352	1,352	1,352	1,352	1,350	1,351	1,351	1,351	1,352	995
5,5	6,481	1,451	1,452	1,452	1,451	1,451	1,450	1,450	1,451	1,451	1,451	995
6,0	6,980	1,551	1,551	1,551	1,551	1,551	1,549	1,549	1,551	1,550	1,550	995
6,5	7,479	1,650	1,650	1,650	1,650	1,649	1,649	1,649	1,650	1,649	1,650	995
7,0	7,977	1,749	1,749	1,749	1,750	1,749	1,748	1,749	1,749	1,749	1,749	995
7,5	8,476	1,848	1,848	1,848	1,849	1,848	1,847	1,848	1,848	1,848	1,848	995
8,0	8,974	1,948	1,947	1,947	1,947	1,947	1,946	1,946	1,947	1,947	1,947	995



Tabela B.2 – Resultados da calibração do transdutor 1 (descarregamento).

Carga aplicada (kg)	P _{abs} (bar)	Voltagem (mV)										P _{atm} (mbar)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1,0	1,992	0,551	0,552	0,552	0,552	0,552	0,550	0,550	0,551	0,551	0,551	996
1,5	2,491	0,651	0,652	0,652	0,652	0,652	0,651	0,651	0,651	0,651	0,651	996
2,0	2,990	0,751	0,752	0,752	0,753	0,753	0,751	0,752	0,752	0,752	0,752	996
2,5	3,489	0,852	0,853	0,853	0,852	0,853	0,852	0,852	0,852	0,852	0,852	996
3,0	3,987	0,952	0,953	0,954	0,953	0,953	0,952	0,952	0,952	0,952	0,953	996
3,5	4,486	1,053	1,053	1,053	1,053	1,053	1,052	1,052	1,052	1,052	1,052	996
4,0	4,984	1,153	1,153	1,153	1,153	1,153	1,151	1,152	1,152	1,152	1,152	996
4,5	5,484	1,253	1,253	1,253	1,253	1,252	1,252	1,252	1,252	1,252	1,252	996
5,0	5,982	1,353	1,352	1,352	1,352	1,353	1,351	1,352	1,352	1,352	1,352	996
5,5	6,481	1,451	1,452	1,452	1,453	1,452	1,451	1,451	1,451	1,452	1,452	996
6,0	6,980	1,552	1,551	1,551	1,551	1,551	1,550	1,551	1,551	1,551	1,551	996
6,5	7,479	1,650	1,650	1,651	1,651	1,651	1,649	1,650	1,650	1,650	1,650	996
7,0	7,977	1,750	1,749	1,750	1,750	1,750	1,748	1,748	1,749	1,749	1,749	996
7,5	8,476	1,849	1,848	1,849	1,848	1,849	1,847	1,848	1,848	1,848	1,848	996
8,0	8,974	1,948	1,948	1,948	1,948	1,947	1,946	1,947	1,947	1,947	1,947	996

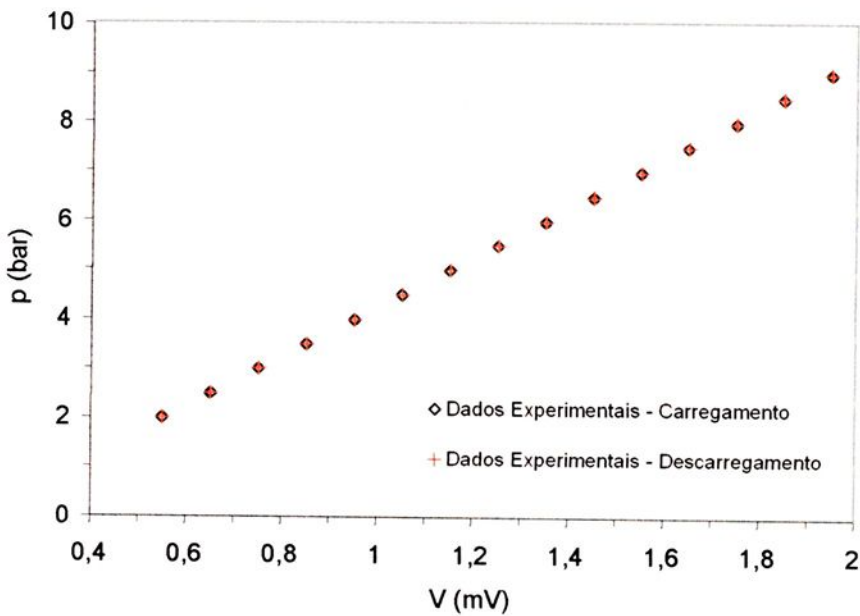


Figura B.1 – Curva de calibração para carregamento e descarregamento do transdutor 01.

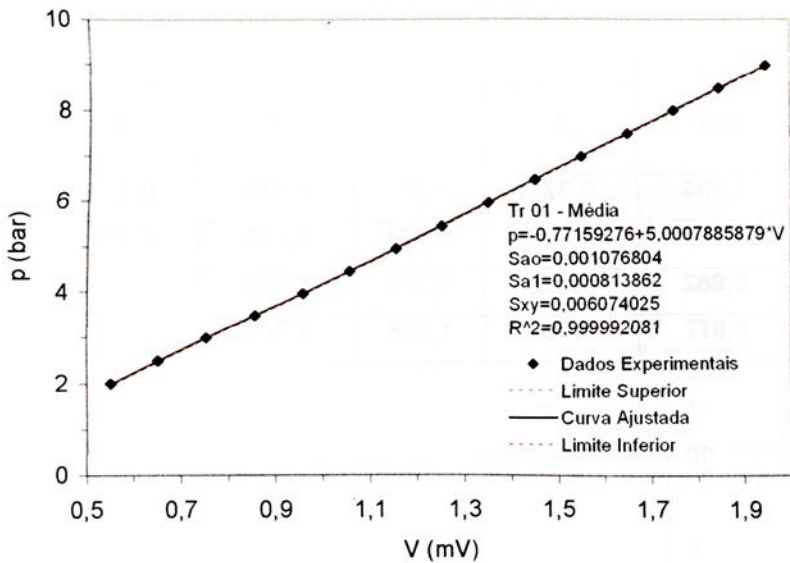


Figura B.2 – Curva de calibração média do transdutor 01.

Tabela B.3 – Resultados da calibração do transdutor 02.

Carga aplicada (kg)	P _{abs} (bar)	Voltagem (mV)					P _{atm} (mbar)
		1	2	3	4	5	
1	1,994	0,438	0,438	0,438	0,439	0,438	996
3	3,989	0,839	0,840	0,840	0,840	0,840	996
6	6,982	1,439	1,440	1,439	1,439	1,439	996
8	8,977	1,836	1,836	1,836	1,836	1,836	996

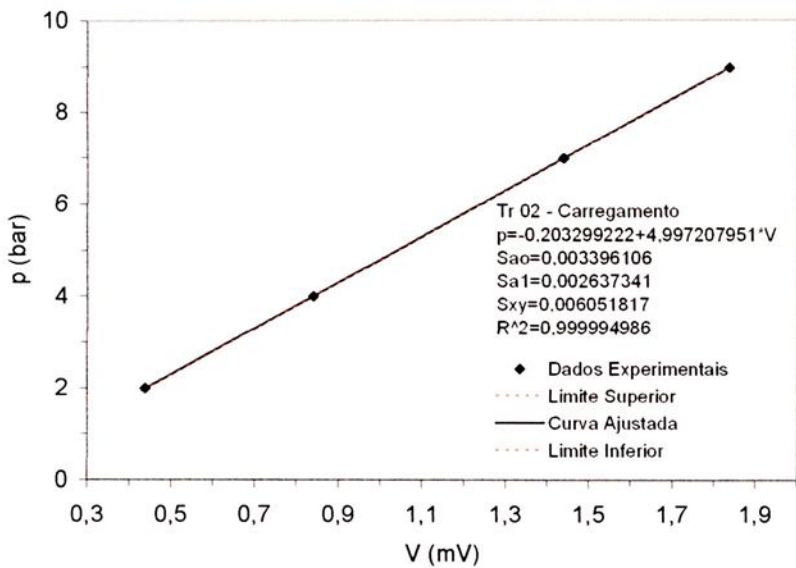


Figura B.3 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 02.

Tabela B.4 – Resultados da calibração do transdutor 03.

Carga aplicada (kg)	P _{abs} (bar)	Voltagem (mV)					P _{atm} (mbar)
		1	2	3	4	5	
1	1,994	0,372	0,373	0,373	0,373	0,373	996
3	3,989	0,774	0,774	0,775	0,775	0,775	996
6	6,982	1,372	1,373	1,373	1,373	1,373	996
8	8,977	1,768	1,768	1,769	1,769	1,769	996

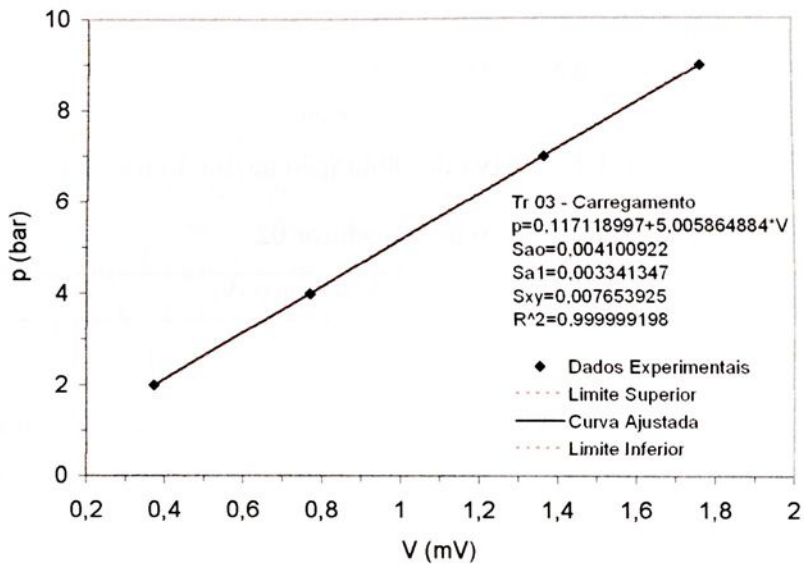


Figura B.4 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 03.

Tabela B.5 – Resultados da calibração do transdutor 04.

Carga aplicada (kg)	P _{abs} (bar)	Voltagem (mV)					P _{atm} (mbar)
		1	2	3	4	5	
1	1,992	0,389	0,389	0,389	0,389	0,389	995
3	3,988	0,788	0,789	0,789	0,789	0,789	995
6	6,981	1,384	1,384	1,384	1,384	1,385	995
8	8,976	1,779	1,780	1,780	1,780	1,780	995

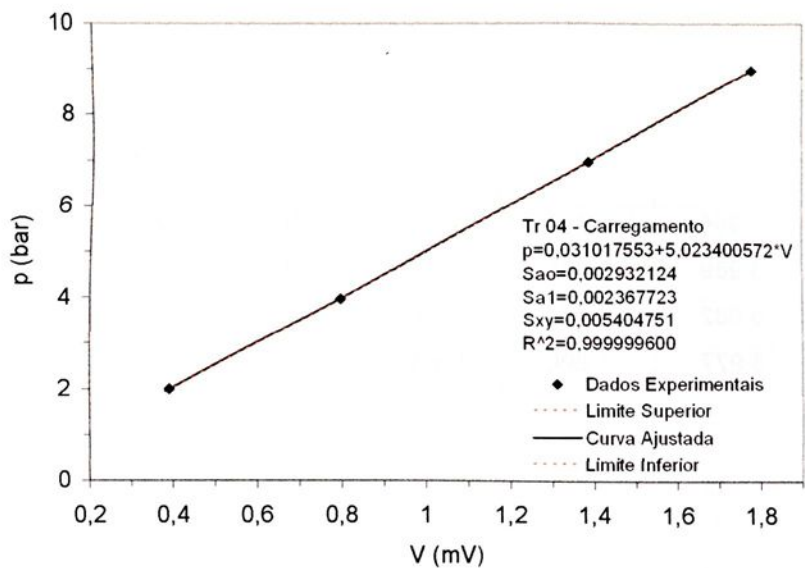


Figura B.5 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 04.

Tabela B.6 – Resultados da calibração do transdutor 05

Carga aplicada (kg)	P _{abs} (bar)	Voltagem (mV)					P _{atm} (mbar)
		1	2	3	4	5	
1	1,994	0,442	0,443	0,443	0,443	0,443	995
3	3,989	0,847	0,847	0,847	0,847	0,847	995
6	6,982	1,449	1,449	1,449	1,450	1,449	995
8	8,977	1,848	1,848	1,848	1,848	1,848	995

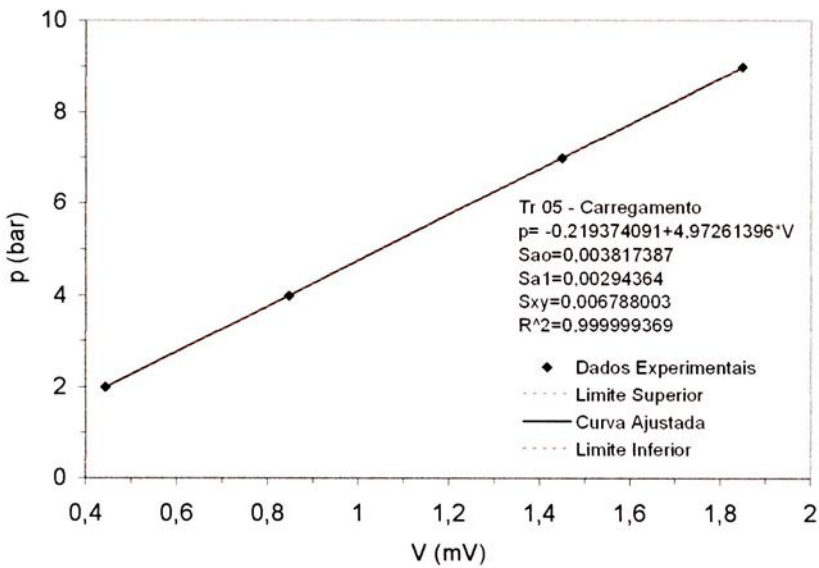


Figura B.6 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 05.

Tabela B.7 – Resultados da calibração do transdutor 06

Carga aplicada (kg)	P _{abs} (bar)	Voltagem (mV)					P _{atm} (mbar)
		1	2	3	4	5	
1	1,994	0,407	0,408	0,408	0,408	0,408	995
3	3,989	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	995
6	6,982	1,404	1,405	1,405	1,405	1,405	995
8	8,977	1,800	1,800	1,800	1,801	1,800	995

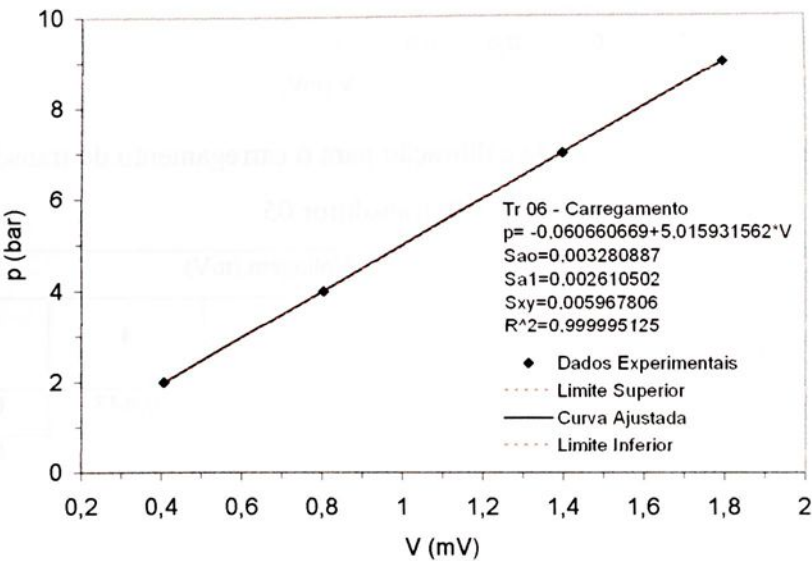


Figura B.7 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 06.

Tabela B.8 – Resultados da calibração do transdutor 07.

Carga aplicada (kg)	P _{abs} (bar)	Voltagem (mV)					P _{atm} (mbar)
		1	2	3	4	5	
1	1,994	0,430	0,430	0,431	0,431	0,431	995
3	3,989	0,829	0,8230	0,830	0,830	0,830	995
6	6,982	1,425	1,425	1,424	1,425	1,425	995
8	8,977	1,820	1,820	1,820	1,820	1,820	995

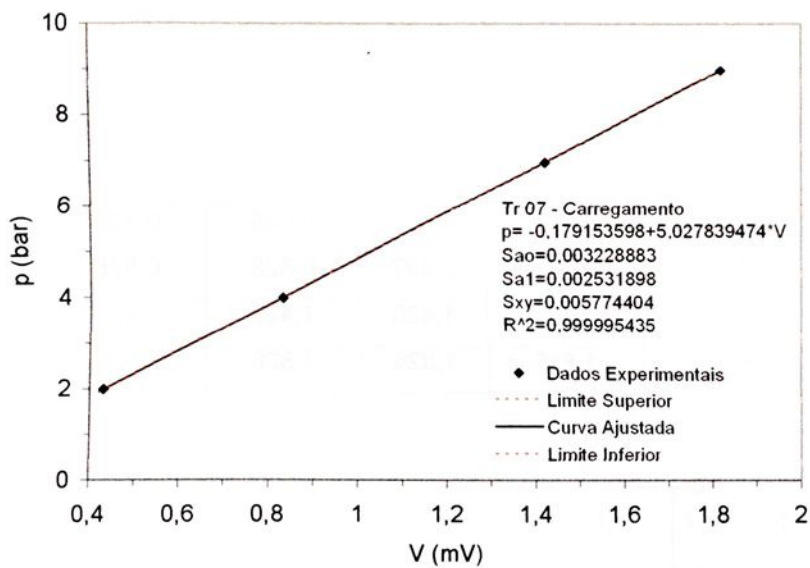


Figura B.8 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 07.

Tabela B.9 – Resultados da calibração do transdutor 08.

Carga aplicada (kg)	P _{abs} (bar)	Voltagem (mV)					P _{atm} (mbar)
		1	2	3	4	5	
1	1,994	0,428	0,428	0,428	0,428	0,429	995
3	3,989	0,826	0,827	0,827	0,827	0,830	995
6	6,982	1,421	1,422	1,422	1,422	1,422	995
8	8,977	1,816	1,816	1,816	1,816	1,817	995

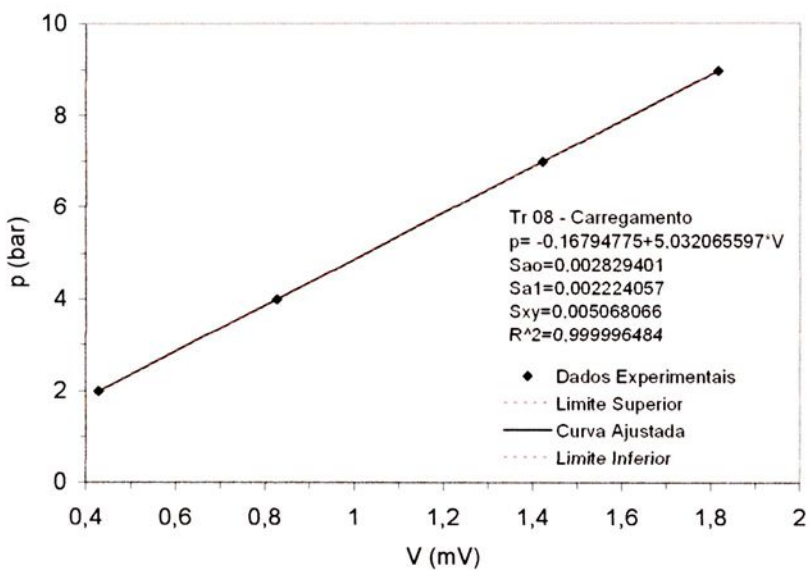


Figura B.9 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 08.

Tabela B.10 – Resultados da calibração do transdutor 09.

Carga aplicada (kg)	P _{abs} (bar)	Voltagem (mV)					P _{atm} (mbar)
		1	2	3	4	5	
1	1,994	0,424	0,425	0,425	0,425	0,425	995
3	3,989	0,827	0,827	0,828	0,828	0,828	995
6	6,982	1,428	1,428	1,428	1,429	1,428	995
8	8,977	1,826	1,826	1,826	1,826	1,826	995

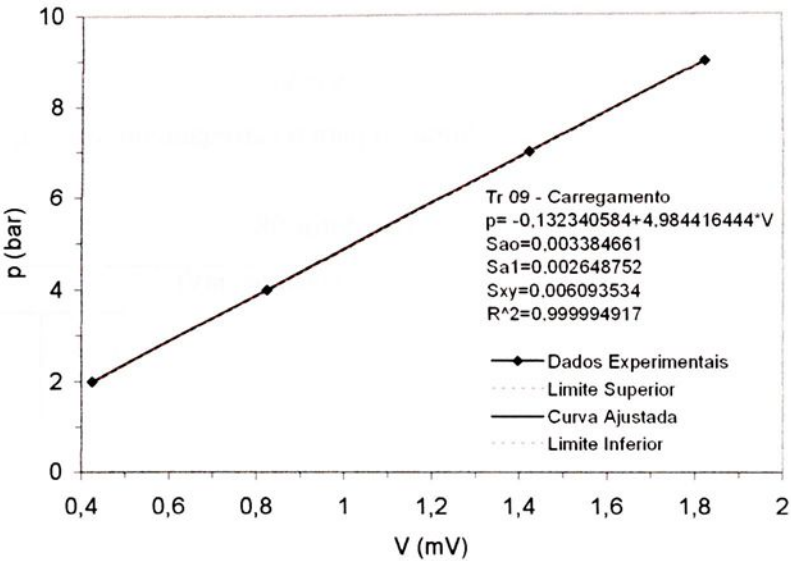


Figura B.10 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 09.

Tabela B.11 – Resultados da calibração do transdutor 10.

Carga aplicada (kg)	P _{abs} (bar)	Voltagem (mV)					P _{atm} (mbar)
		1	2	3	4	5	
1	1,994	0,432	0,432	0,432	0,433	0,433	995
3	3,989	0,830	0,830	0,830	0,831	0,830	995
6	6,982	1,424	1,424	1,424	1,425	1,425	995
8	8,977	1,818	1,818	1,818	1,818	1,819	995

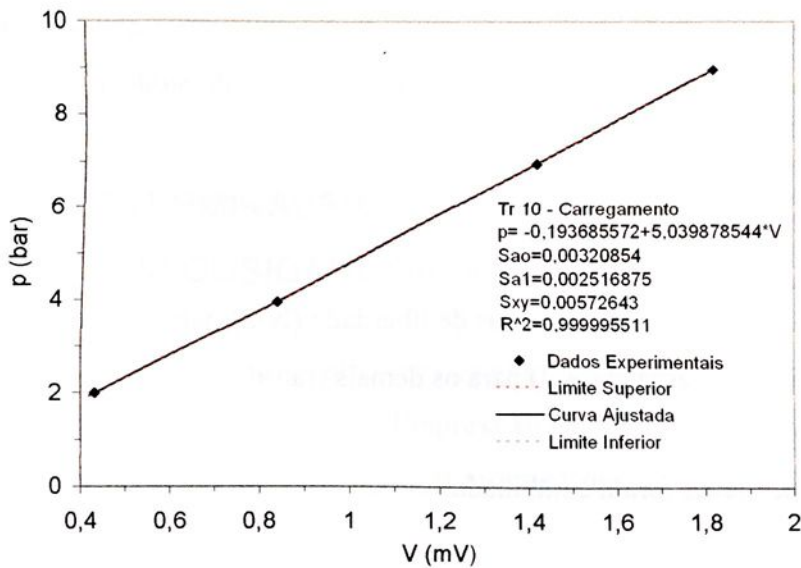


Figura B.11 – Curva de calibração para o carregamento do transdutor 10.

Apresenta-se a seguir a análise de incerteza da calibração dos transdutores de pressão. A incerteza de cada transdutor foi estimada considerando a contribuição das seguintes incertezas:

- Incerteza de calibração da balança de peso morto obtida da Rede Brasileira de Calibração,

$$I_{\text{Prel}} = 0,025$$

- Incerteza da pressão absoluta aplicada à balança de peso morto, I_{Pabs} , calculada usando-se a metodologia de Moffat (1998), por meio da equação,

$$I_{\text{Pabs}} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{\text{abs}}}{\partial P_{\text{atm}}} I_{\text{Patm}}\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{\text{abs}}}{\partial g} I_g\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{\text{abs}}}{\partial P_{\text{rel}}} I_{\text{Prel}}\right)^2} \quad (\text{B.6})$$

na qual, $I_{\text{Prel}} = \pm 0,025\%$ da pressão medida, $I_{\text{Patm}} = \pm 0,0005\text{bar}$ (metade da resolução do barômetro) e $I_g = \pm 0,001 \text{ m/s}^2$

- Incerteza associada ao ajuste da curva, I_y . Foi estimada usando-se o desvio padrão global do ajuste no carregamento S_{xy} , corrigido pelo fator de Student,

$$I_y = t_{v,95\%} S_{xy} \tag{B.7}$$

na qual $t_{v,95\%} = 2,306$, para $v = 9$ graus de liberdade (N-2) para o transdutor 01 e $t_{v,95\%} = 2,707$, para $v = 2$ graus de liberdade (N-2) para os demais transdutores.

Estas incertezas foram combinadas usando-se a seguinte equação,

$$I = \sqrt{(I_{Pabs})^2 + (I_y)^2} \tag{B.8}$$

A Tabela (B.12) apresenta os valores das incertezas calculadas.

Tabela B.12 – Valores das incertezas em (bar) para os transdutores de pressão

	TR01	TR02	TR03	TR04	TR05	TR06	TR07	TR08	TR09	TR10
I_{Pabs}	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013
I_y	0,014	0,017	0,021	0,015	0,018	0,016	0,015	0,014	0,017	0,016
I	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02

DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO, DENSIDADE E VISCOSIDADE DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE

As propriedades da mistura óleo-refrigerante foram obtidas a partir de dados experimentais fornecidos pela EMBRACO – Empresa Brasileira de Compressores. O programa Tablecurve foi utilizado no ajuste das equações das propriedades.

C.1 Concentração

A correlação para o cálculo da concentração foi obtida ajustando-se uma curva a partir de dados retirados de um diagrama pressão-temperatura-concentração. A correlação é dada por:

$$w = a \times \exp\left(\frac{-p}{b}\right) + c \times \exp\left(\frac{-p}{d}\right) \quad (C.1)$$

$$a = 0,00037439864 + 5,78313 \times 10^{-18} \times \exp(T) \quad (C.1a)$$

$$b = -0,0092492822 \times \exp\left(\frac{T}{7,2044458}\right) - 0,092147488 \times \exp\left(\frac{T}{107,31007}\right) \quad (C.1b)$$

$$c = 8,1926642 - 0,0026502986 \times T^2 \quad (C.1c)$$

$$d = -0,17407102 \times \exp\left(\frac{T}{14,275292}\right) - 0,82779598 \times \exp\left(\frac{T}{38,539725}\right) \quad (C.1d)$$

onde, a concentração é fornecida em %, para a pressão absoluta em bar e a temperatura em °C.

A faixa de aplicação desta equação é de $0 < p < 7$ bar e $0 < T < 40^\circ\text{C}$. Os resultados não devem ser extrapolados.

A Figura C.1 mostra a forma gráfica da equação ajustada.

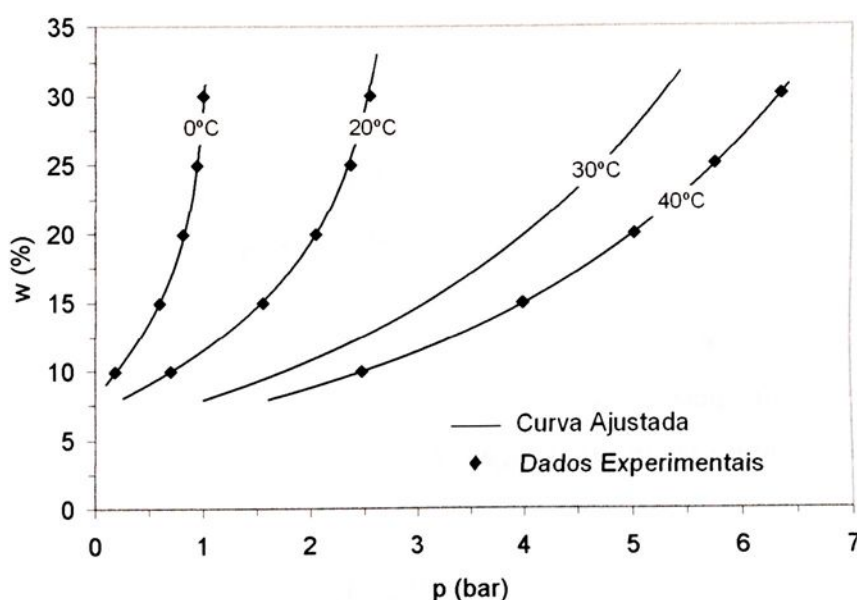


Figura C.1 – Diagrama pressão-temperatura-concentração para a mistura óleo éster ISO VG10 e refrigerante R134a.

C.2 Densidade

A correlação para o cálculo da densidade foi obtida de maneira semelhante à concentração. A correlação ajustada é dada por:

$$\rho = \left[0,94108616 + 0,0019054134 \times w + 1,2193319 \times 10^{-18} \times w^3 - 0,00074 \times T \right] \times 10^3 \quad (C.2)$$

onde, a densidade da mistura óleo-refrigerante é fornecida em kg/m^3 , a concentração em % e a temperatura em °C.

A faixa de aplicação desta equação é de $0 < w < 30\%$ e $0 < T < 140^\circ\text{C}$. Os resultados não devem ser extrapolados.

A Figura C.2 mostra a forma gráfica da equação ajustada.

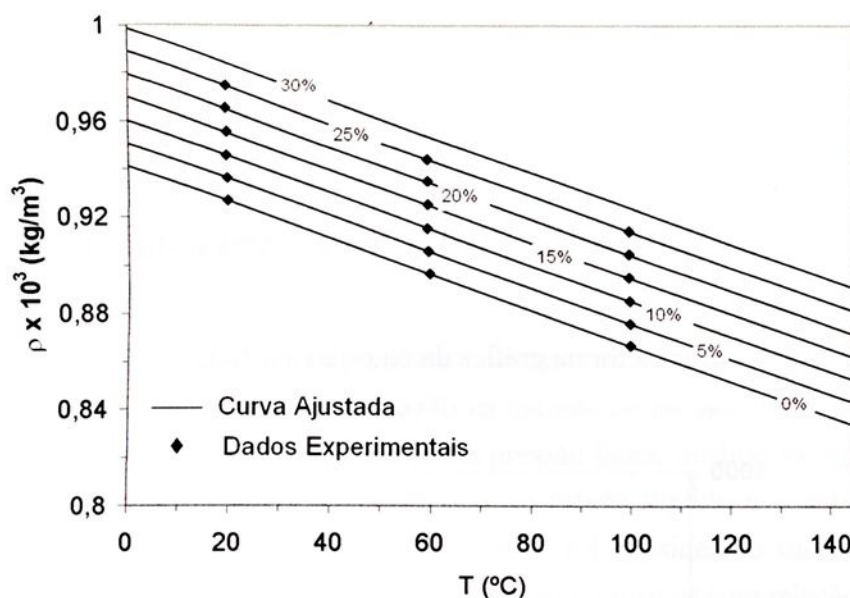


Figura C.2 – Diagrama temperatura-concentração-densidade para a mistura óleo éster ISO VG10 e refrigerante R134a

C.3 Viscosidade Cinemática

A correlação para o cálculo da viscosidade cinemática foi obtida de maneira semelhante à concentração. A correlação é dada por:

$$v = \left(\frac{1}{a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4} \right) \times 10^{-6} \quad (\text{C.3})$$

$$a = 0,014138299 + 0,0014898648w + 6,2747529 \times 10^{-5} w^2 + 7,7374536 \times 10^{-7} w^3 - 2,1416701 \times 10^{-27} \exp(w) \quad (\text{C.3a})$$

$$b = 0,0009679898993 + 0,00013450303w - 4,2158391 \times 10^{-5} w^{3/2} + 9,4269616 \times 10^{-6} w^2 - 6,3823134 \times 10^{-8} w^3 \quad (\text{C.3b})$$

$$c = 2,0454395 \times 10^{-5} + 5,2076916 \times 10^{-6} w - 1,1168835 \times 10^{-6} w^2 + 2,8237022 \times 10^{-7} w^{5/2} - 1,9551952 \times 10^{-8} w^3 \quad (\text{C.3c})$$

$$d = 2,7496729 \times 10^{-9} + 1,3716994 \times 10^{-8} w + 6,699814 \times 10^{-9} w^2 - 3,5511931 \times 10^{-12} w^3 + 4,3567826 \times 10^{-12} w^4 \quad (\text{C.3d})$$

$$e = -5,7896238 \times 10^{-11} - 2,8532821 \times 10^{-10} w - 8,3873587 \times 10^{-11} w^2 + 4,6564966 \times 10^{-12} w^3 - 5,8575675 \times 10^{-14} w^4 \quad (C.3e)$$

onde, a viscosidade cinemática da mistura óleo-refrigerante é fornecida em Pa.s, a concentração em % e a temperatura em °C.

A faixa de aplicação desta equação é de $0 < w < 55\%$ e $-10 < T < 50^\circ\text{C}$. Os resultados não devem ser extrapolados.

A Figura C.3 mostra a forma gráfica da equação ajustada.

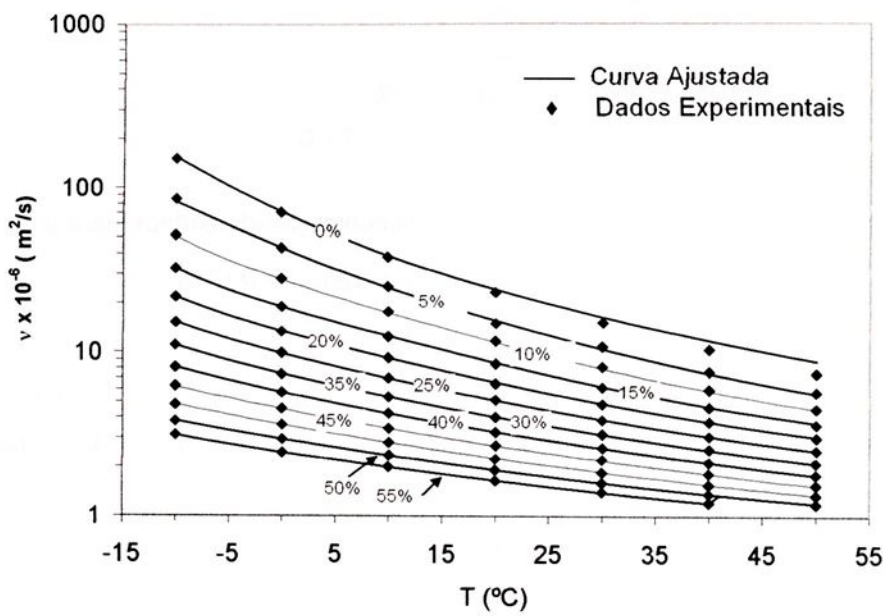


Figura C.3 – Diagrama temperatura-concentração-viscosidade cinemática para a mistura óleo éster ISO VG10 e refrigerante R134a.

CÁLCULO DA VAZÃO EM MASSA DO ESCOAMENTO DA MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE

Para evitar o desprendimento de refrigerante antes que a mistura alcançasse a secção de testes, não foi utilizado nenhum medidor de vazão na entrada do escoamento. Ao invés disso, a vazão em massa foi calculada usando o gradiente de pressão linear medido na região de entrada do escoamento, onde a mistura ainda encontrava-se no estado líquido e o escoamento já era completamente desenvolvido. Além disso, o escoamento foi considerado unidimensional e as propriedades como a velocidade e densidade da mistura são uniformes com relação à posição.

Adotou-se um procedimento iterativo para a determinação da vazão em massa do escoamento da mistura óleo-refrigerante utilizando a correlação de Churchill (1977) para estimar o fator de atrito. A sequência iterativa é:

1. Calcular concentração (w), densidade (ρ) e viscosidade (ν) em função da temperatura e pressão do tanque de alta pressão (Apêndice C);
2. Estimar o fator de atrito (f) – valor aleatório para primeira iteração. Este valor será corrigido ainda na primeira iteração;
3. Calcular a velocidade média

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{2D}{\rho_{\text{mistura}} f} \left(-\frac{dp}{dz} \right)} \quad (\text{D.1})$$

onde D é o diâmetro do tubo de aço cobreado, ρ é a densidade da mistura óleo-refrigerante, dp/dz , o gradiente de pressão na região monofásica do escoamento da mistura e f, fator de atrito calculado pela correlação de Churchill;

4. Calcular o número de Reynolds

$$\text{Re} = \frac{\bar{V}D}{\nu_{\text{mistura}}} \quad (\text{D.2})$$

onde ν é a viscosidade cinemática da mistura óleo-refrigerante;

5. Calcular o fator de atrito utilizando a correlação de Churchill (1977), que abrange todos os regimes de escoamento: laminar, transição e turbulento, dada por,

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (\text{D.3})$$

$$A = \left\{ 2,457 \ln \left[\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \frac{\varepsilon}{D} \right]^{-1} \right\}^{16} \quad (\text{D.4})$$

$$B = \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16} \quad (\text{D.5})$$

onde $\varepsilon/D = 0,000214$, valor medido no laboratório (Poiate Jr., 2001).

6. Calcular a nova velocidade média usando a Eq. (1);
7. Comparar as velocidades médias calculadas nos itens 3 e 6. Se a diferença for inferior a 10^{-9} , a convergência foi atingida. Em caso negativo, retornar ao passo 3;
8. Após a convergência calcular a vazão em massa do escoamento

$$\dot{m} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \bar{V} \rho_{\text{mistura}} \quad (\text{D.6})$$

INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES

E.1 Incerteza da concentração da mistura óleo-refrigerante.

A incerteza da equação C.1, utilizada para a determinação da concentração da mistura óleo-refrigerante pode ser estimada segundo Moffat (1988) pela seguinte equação:

$$I_w = \sqrt{\left(\frac{\partial w}{\partial p} I_p\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial T} I_T\right)^2} \quad (\text{E.1})$$

onde I_w é a incerteza da concentração, $I_p = 0,02$ bar (Apêndice B) e $I_T = 0,15$ °C (Apêndice A).

E.2 Incerteza da densidade da mistura óleo-refrigerante.

A incerteza da equação C.2, utilizada para a determinação da densidade da mistura óleo-refrigerante pode ser estimada segundo Moffat (1988) pela seguinte equação:

$$I_\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial w} I_w\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} I_T\right)^2} \quad (\text{E.2})$$

onde I_ρ é a incerteza da densidade, I_w foi calculado pela equação E.1 e $I_T = 0,15$ °C.

E.3 Incerteza da viscosidade cinemática da mistura óleo-refrigerante.

A incerteza da equação C.3, utilizada para a determinação da viscosidade cinemática da mistura óleo-refrigerante pode ser estimada segundo Moffat (1988) pela seguinte equação:

$$I_v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial w} I_w\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial T} I_T\right)^2} \quad (\text{E.3})$$

onde I_v é a incerteza da viscosidade cinemática, I_w foi calculado pela equação E.1 e $I_T=0,165^\circ\text{C}$.

E.4 Incerteza da velocidade do escoamento da mistura óleo-refrigerante.

A incerteza da equação D.1, utilizada para o cálculo da velocidade do escoamento da mistura óleo-refrigerante pode ser estimada segundo Moffat (1988) pela seguinte equação:

$$I_{\bar{V}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial f} I_f\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial D} I_D\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial \rho_{\text{mistura}}} I_{\rho_{\text{mistura}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial dp/dz} I_{dp/dz}\right)^2} \quad (\text{E.4})$$

onde $I_{\bar{V}}$ é a incerteza da velocidade do escoamento, I_f é a incerteza do fator de atrito (estimada em $0,05 \cdot f$), I_D é a incerteza do diâmetro, $I_D = 0,02 \cdot 10^{-3}$ (Poiate Jr., 2001), I_ρ é a incerteza da densidade (Equação E.2) e $I_{dp/dz}$ é a incerteza do gradiente de pressão.

E.5 Incerteza do número de Reynolds.

A incerteza da equação D.2, utilizada para o cálculo do número de Reynolds do escoamento da mistura óleo-refrigerante pode ser estimada segundo Moffat (1988) pela seguinte equação:

$$I_{\text{Re}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial \bar{V}} I_{\bar{V}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial D} I_D\right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial v_{\text{mistura}}} I_{v_{\text{mistura}}}\right)^2} \quad (\text{E.5})$$

onde I_{Re} é a incerteza do número de Reynolds, $I_{\bar{V}}$ é a incerteza da velocidade do escoamento (Equação E.4), I_D é a incerteza do diâmetro, $I_D = 0,02 \cdot 10^{-3}$ (Poiate Jr., 2001), I_v é a incerteza da viscosidade cinemática calculada usando a Eq. E.3.

E.6 Incerteza da vazão em massa do escoamento.

A incerteza da equação D.6, utilizada para o cálculo da vazão em massa do escoamento da mistura óleo-refrigerante pode ser estimada segundo Moffat (1988) pela seguinte equação:

$$I_{\dot{m}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \bar{V}} I_{\bar{V}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial D} I_D\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho_{\text{mistura}}} I_{\rho_{\text{mistura}}}\right)^2} \quad (\text{E.6})$$

onde $I_{\dot{m}}$ é a incerteza da vazão em massa, $I_{\bar{V}}$ é a incerteza da velocidade do escoamento (equação E.4), I_D é a incerteza do diâmetro, $I_D = 0,02 \cdot 10^{-3}$ (Poiate Jr., 2001), I_{ρ} é a incerteza da densidade (Equação E.2).

Os resultados das incertezas estão apresentados na Tab. 4.2.

PROPRIEDADES DO ESCOAMENTO DA
MISTURA ÓLEO-REFRIGERANTE

Para melhor visualizar os resultados obtidos no escoamento da mistura óleo-refrigerante apresentados no Capítulo 4, foram plotados gráficos individuais de cada teste. Os resultados são mostrados abaixo.

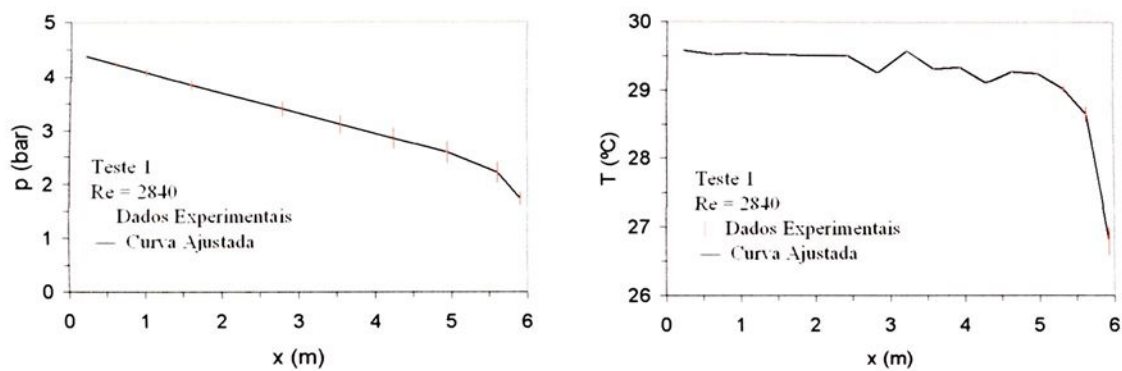


Figura F.1 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 1.

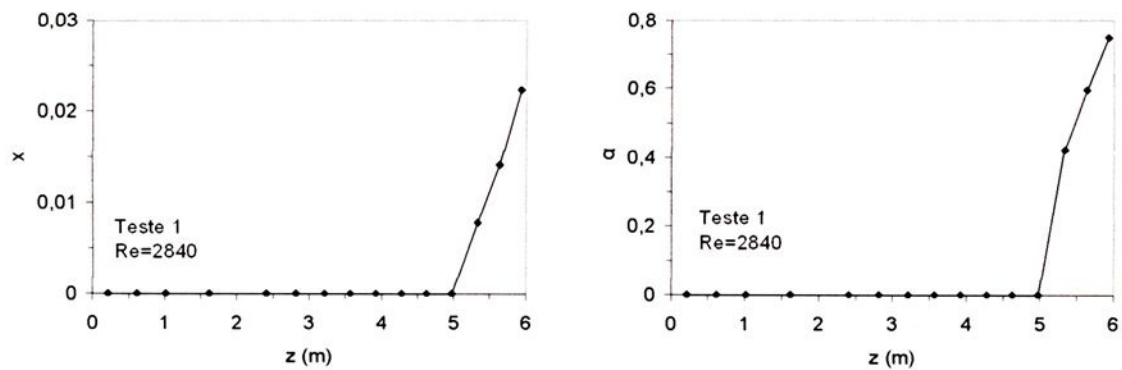


Figura F.2 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 1.

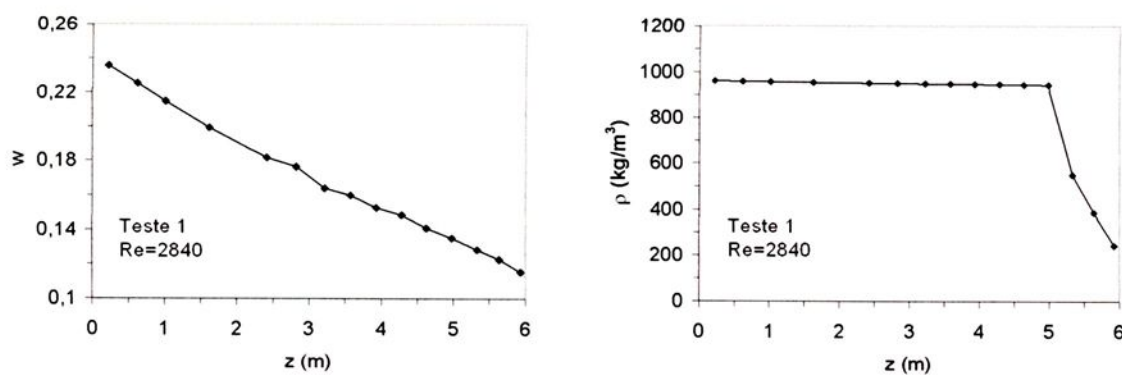


Figura F.3 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 1.

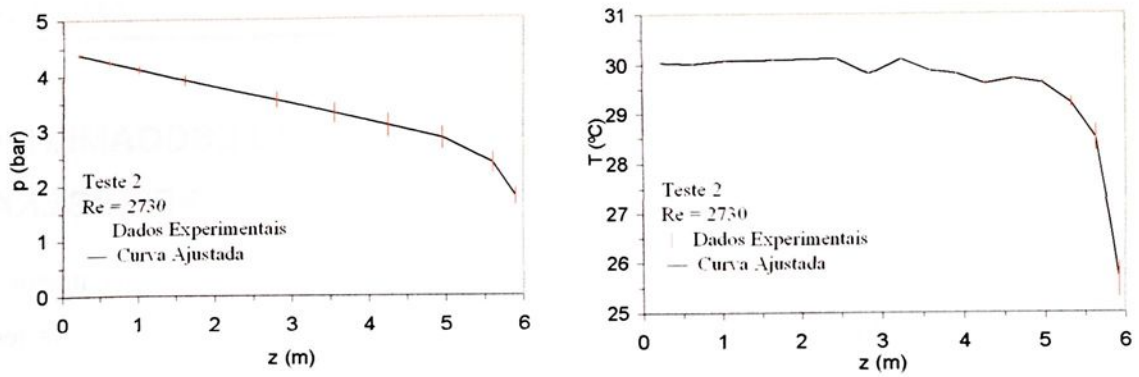


Figura F.4 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 2.

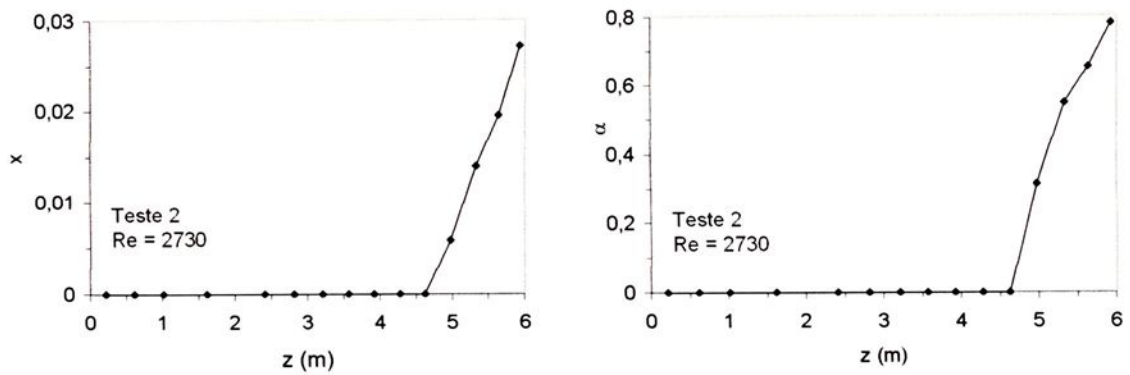


Figura F.5 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 2.

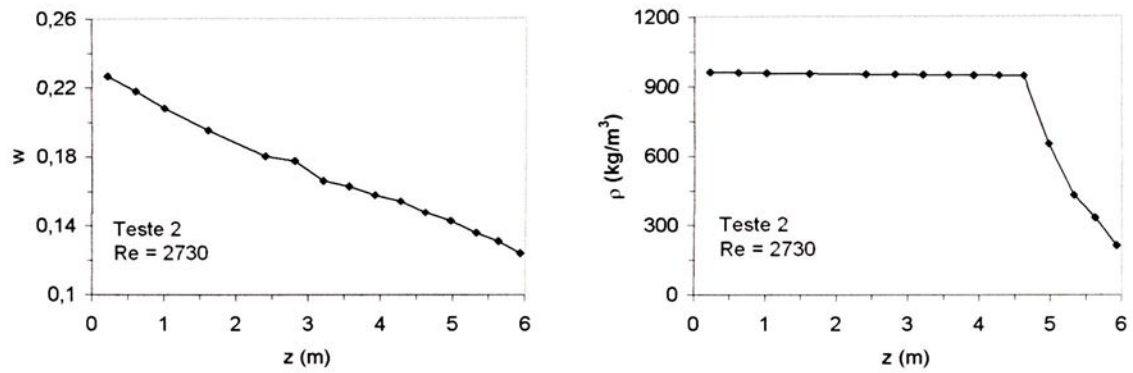


Figura F.6 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 2.

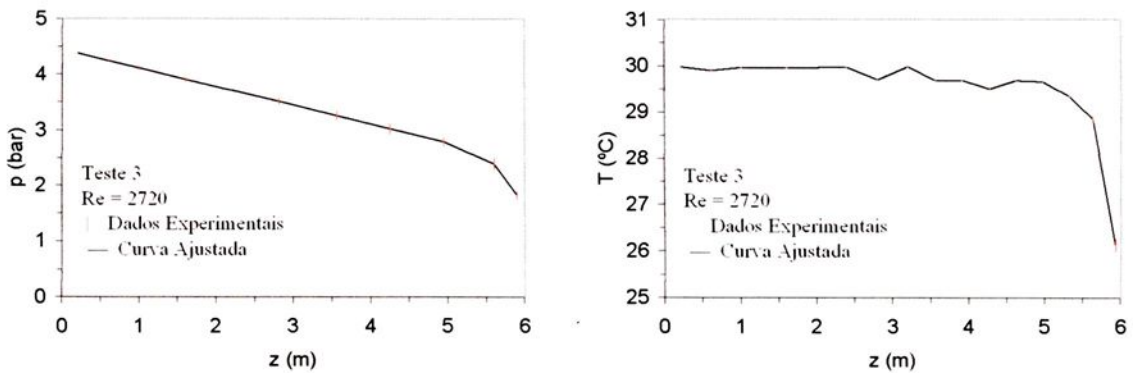


Figura F.7 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 3.

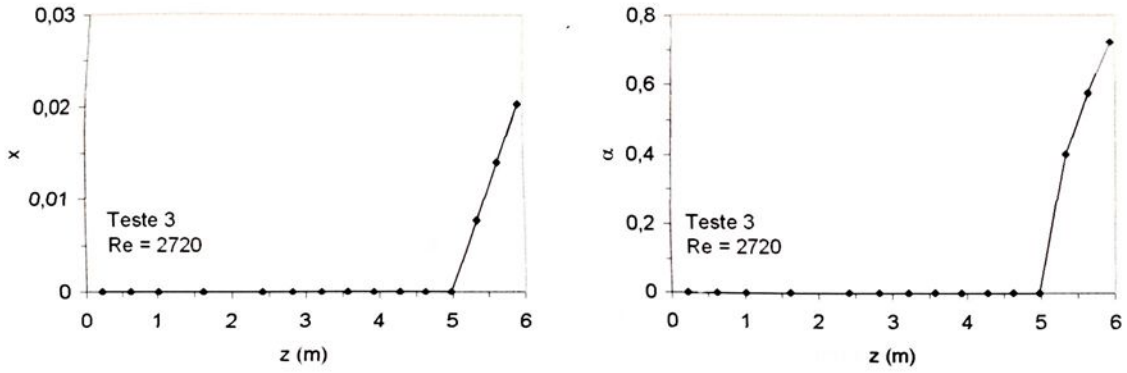


Figura F.8 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 3.

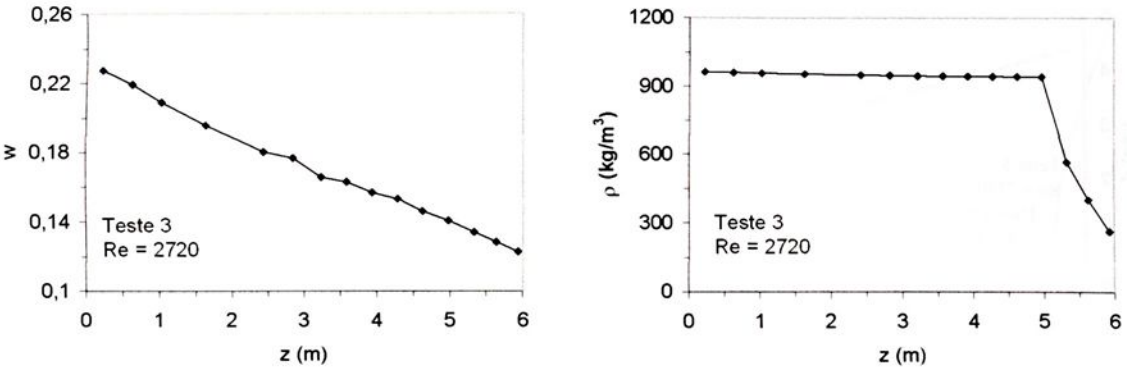


Figura F.9 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 3.

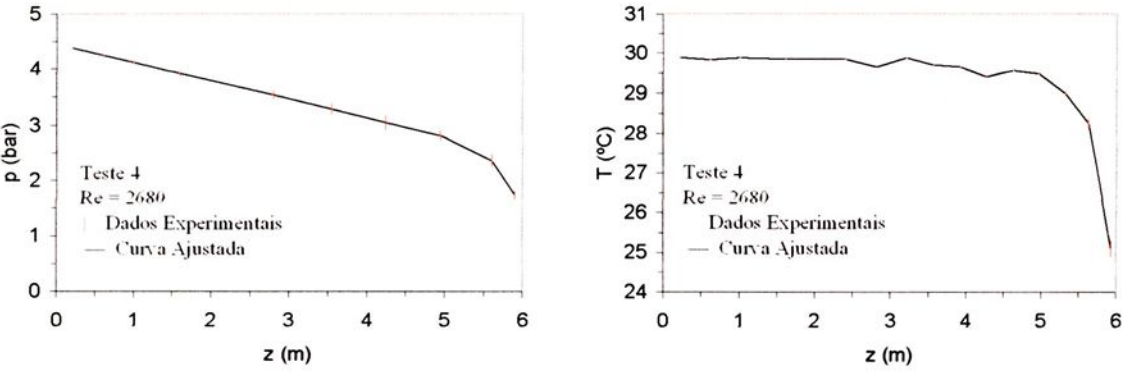


Figura F.10 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 4.

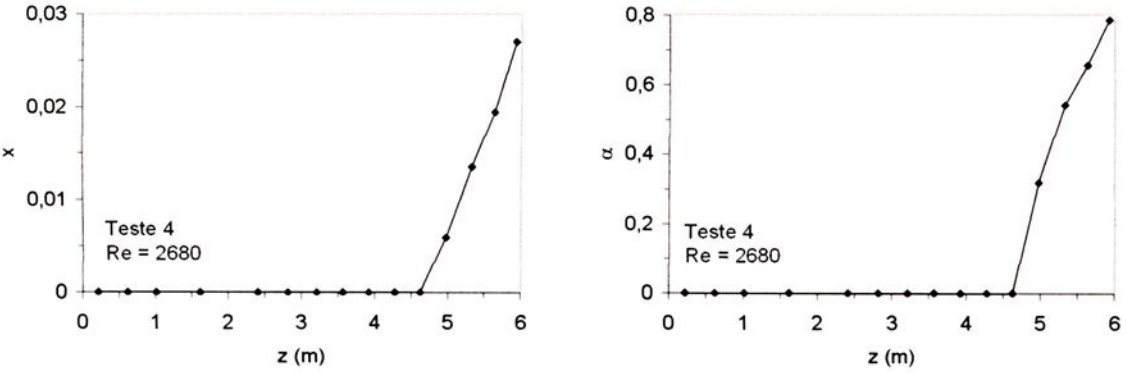


Figura F.11 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 4.

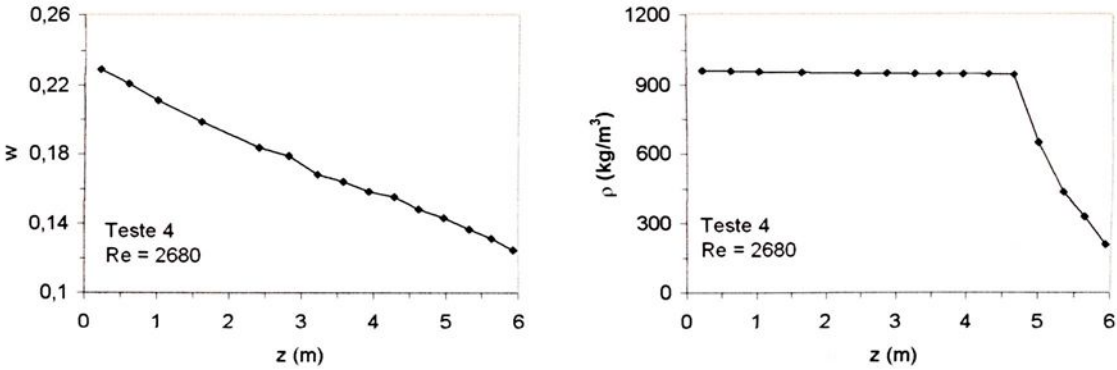


Figura F.12 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 4.

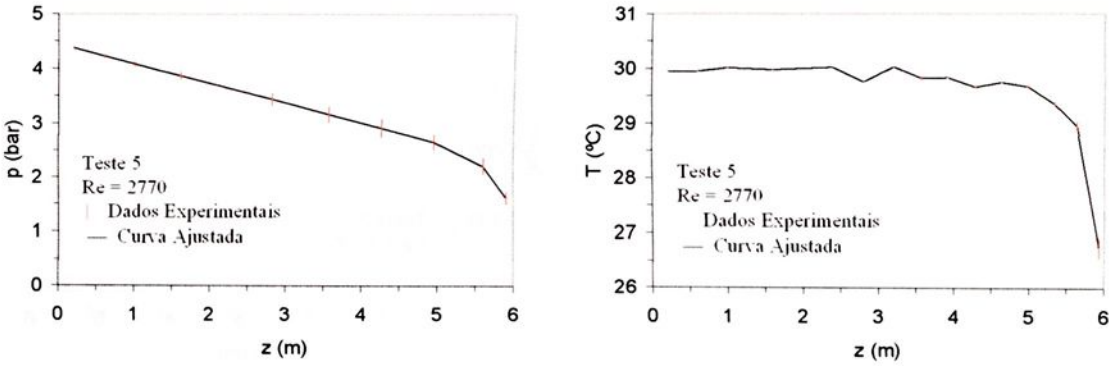


Figura F.13 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o o teste 5.

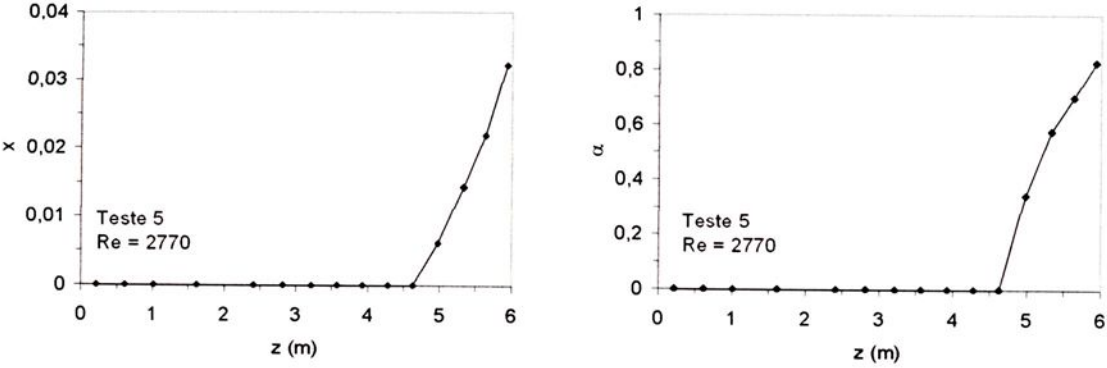


Figura F.14 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 5.

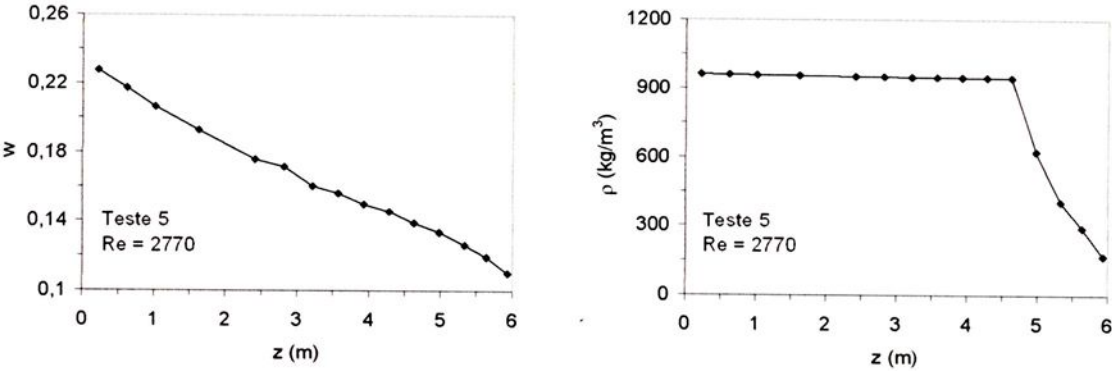


Figura F.15 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 5.

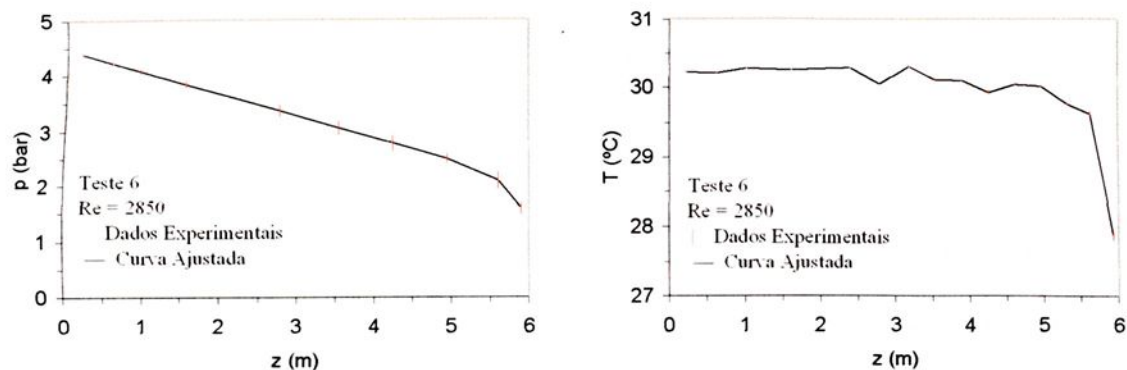


Figura F.16 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 6.

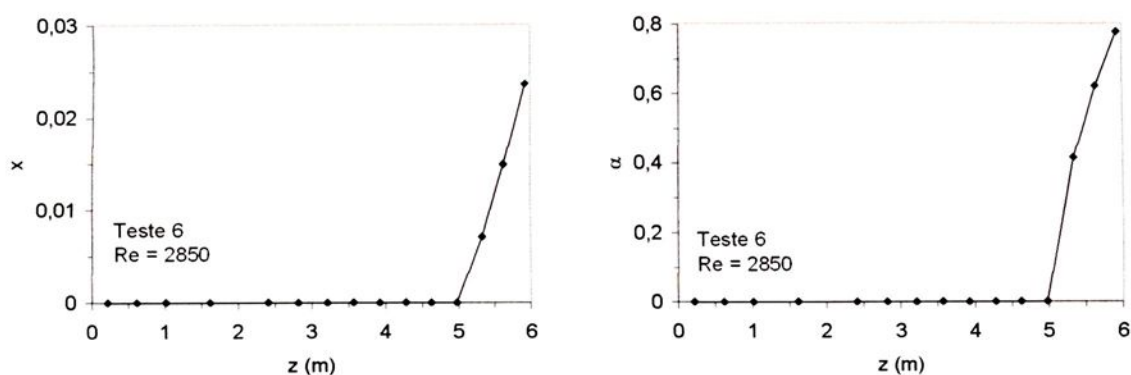


Figura F.17 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 6.

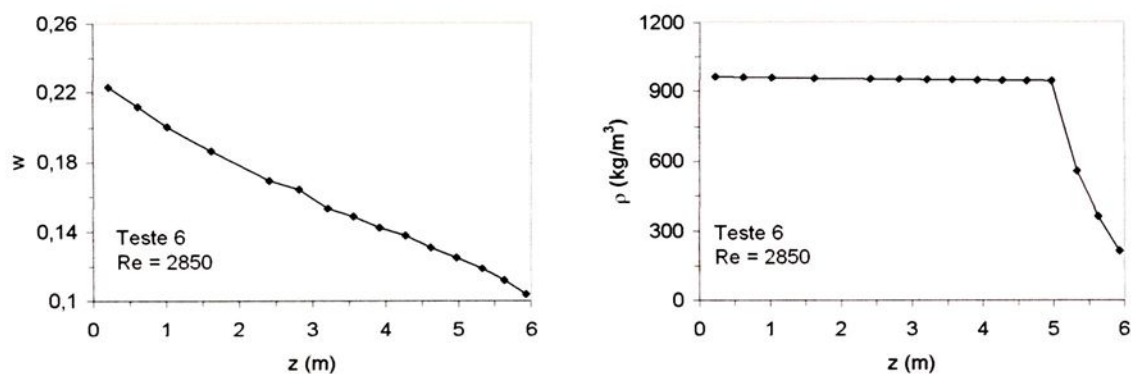


Figura F.18 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 6.

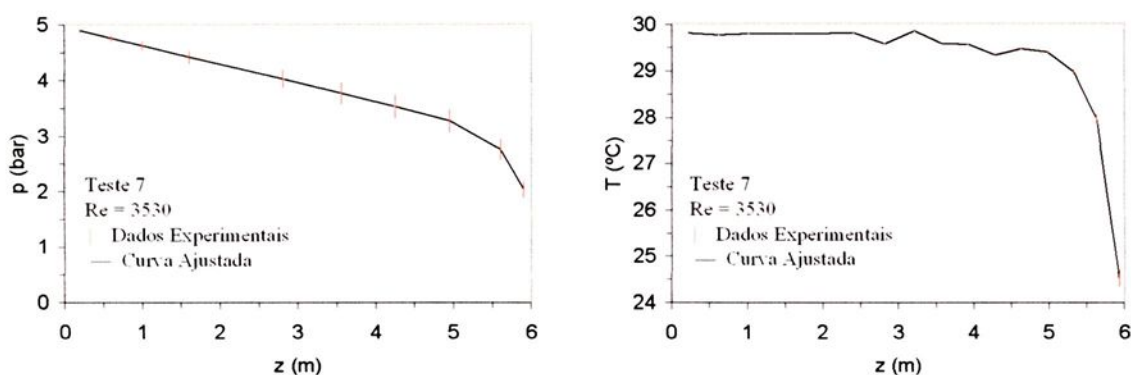


Figura F.19 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 7.

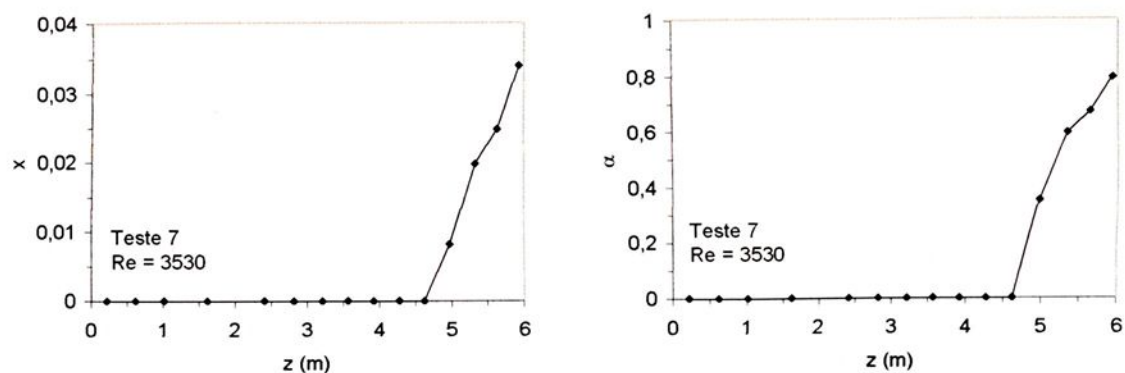


Figura F.20 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 7.

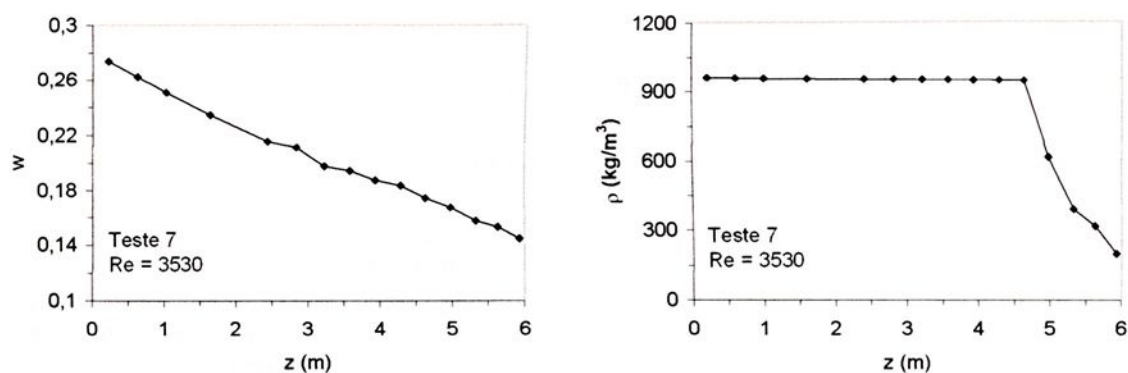


Figura F.21 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 7.

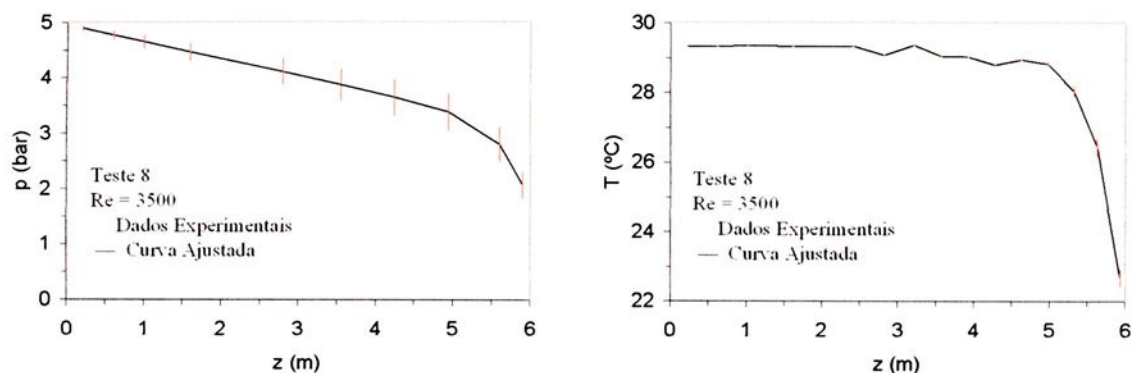


Figura F.22 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 8.

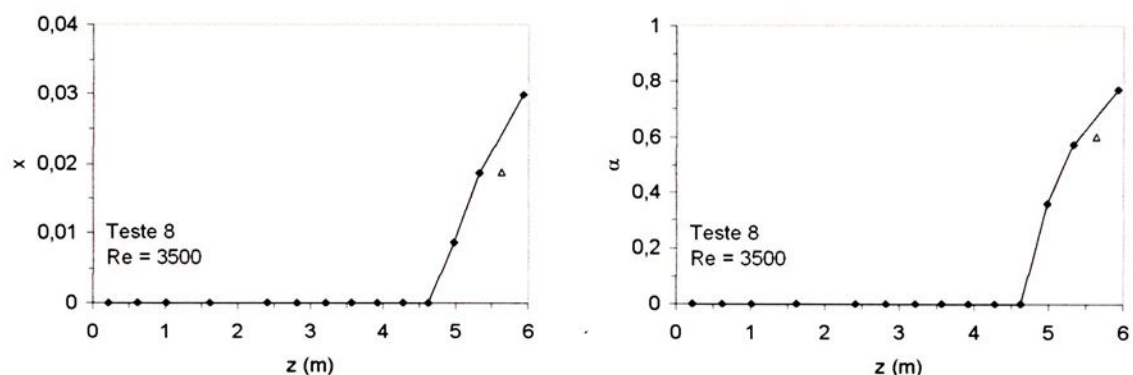


Figura F.23 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 8.

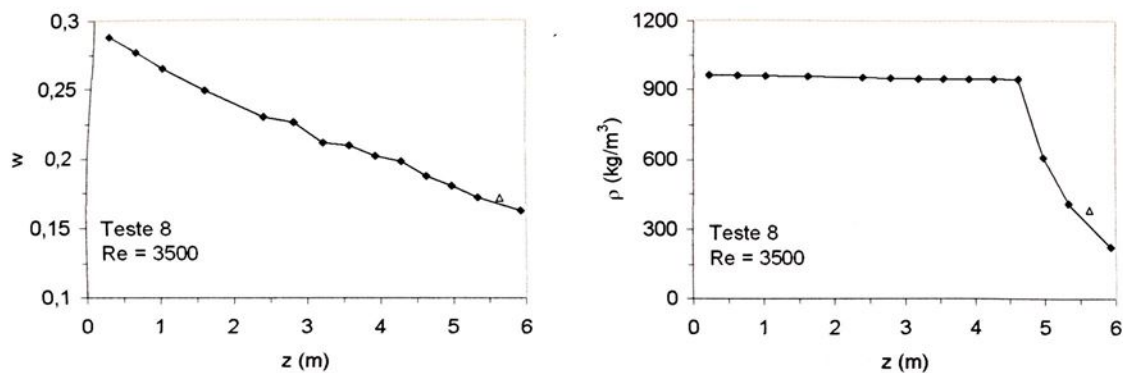


Figura F.24 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 8.

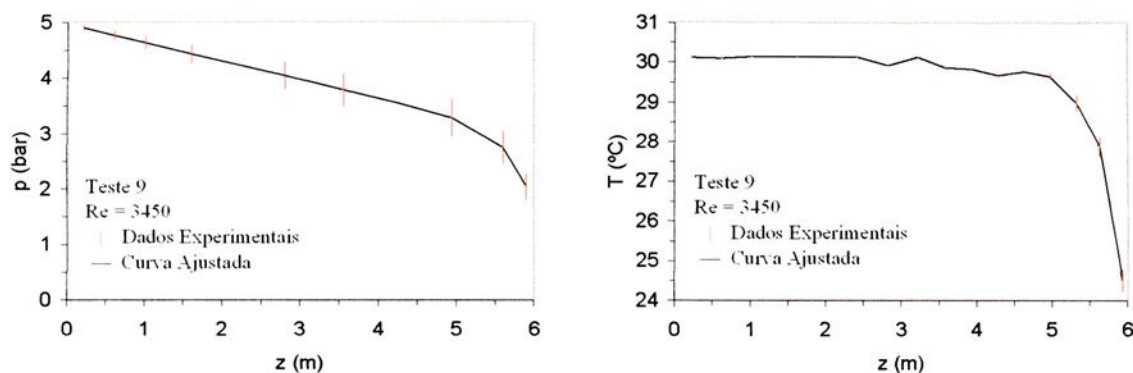


Figura F.25 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 9.

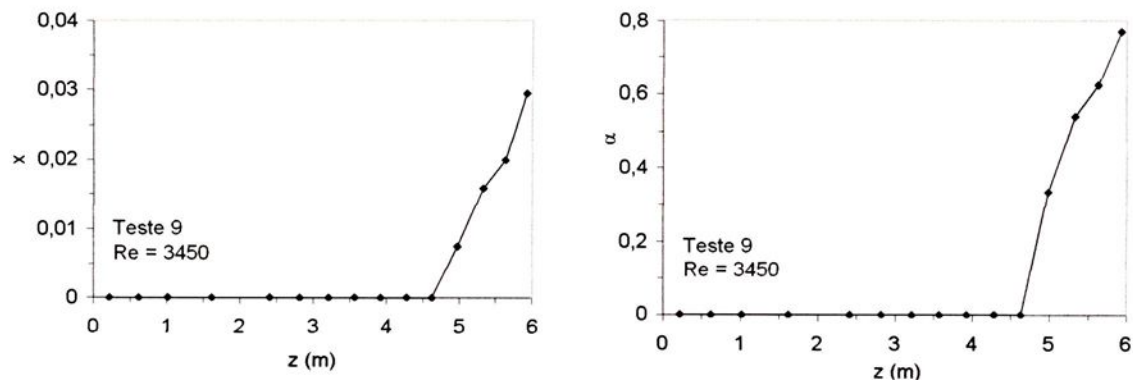


Figura F.26 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 9.

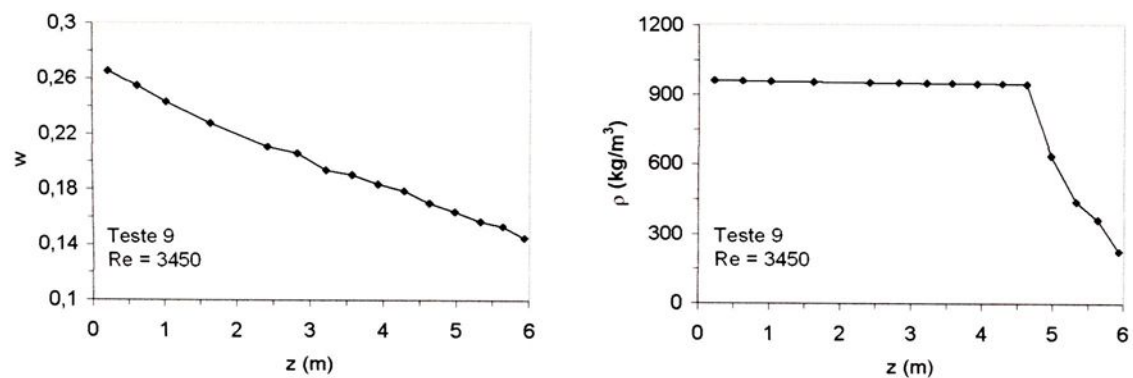


Figura F.27 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 9.

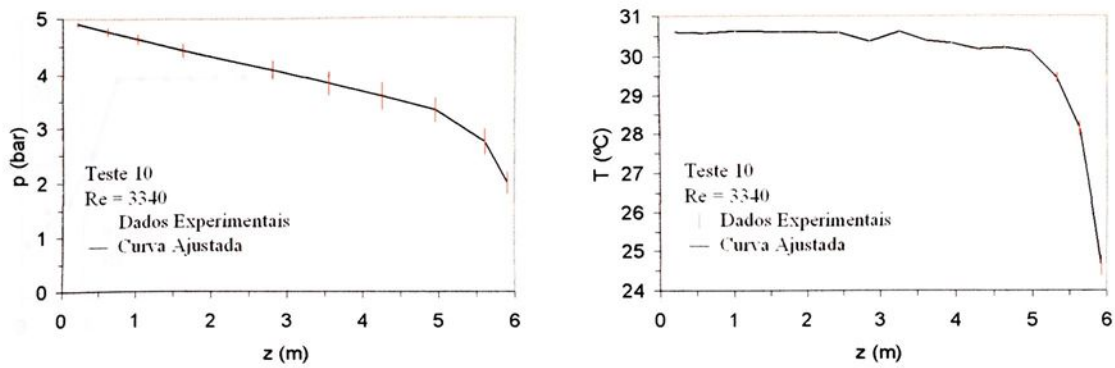


Figura F.28 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 10.

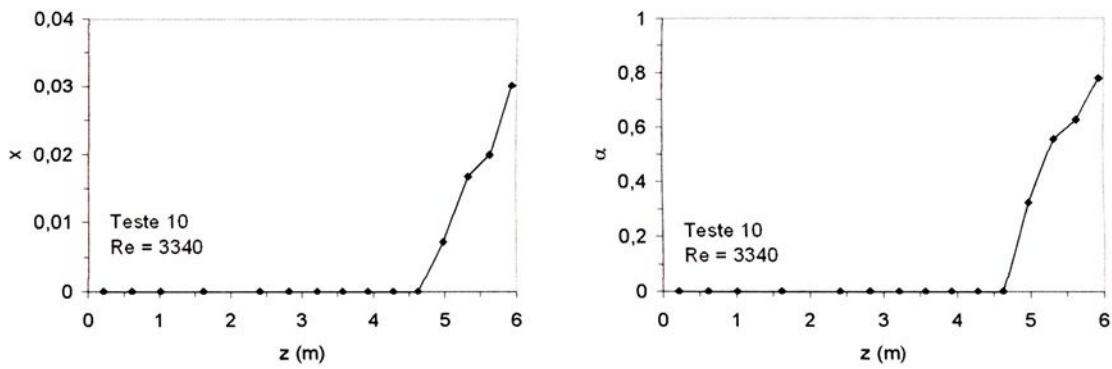


Figura F.29 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 10.

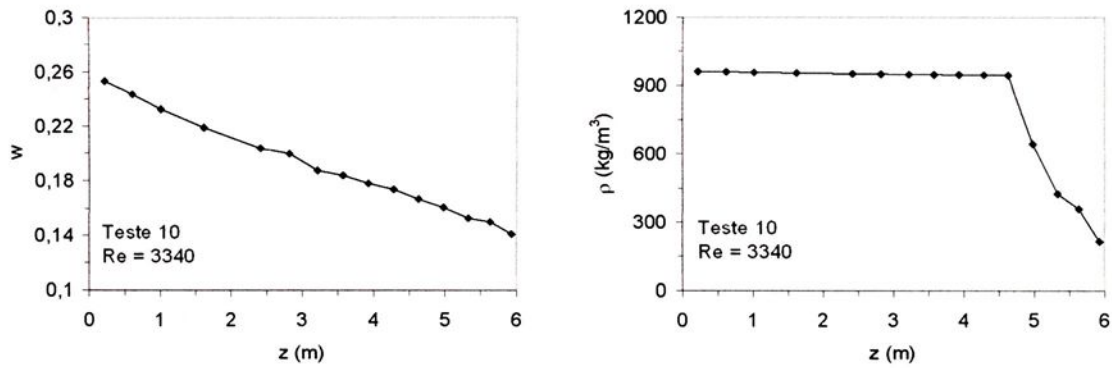


Figura F.30 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 10.

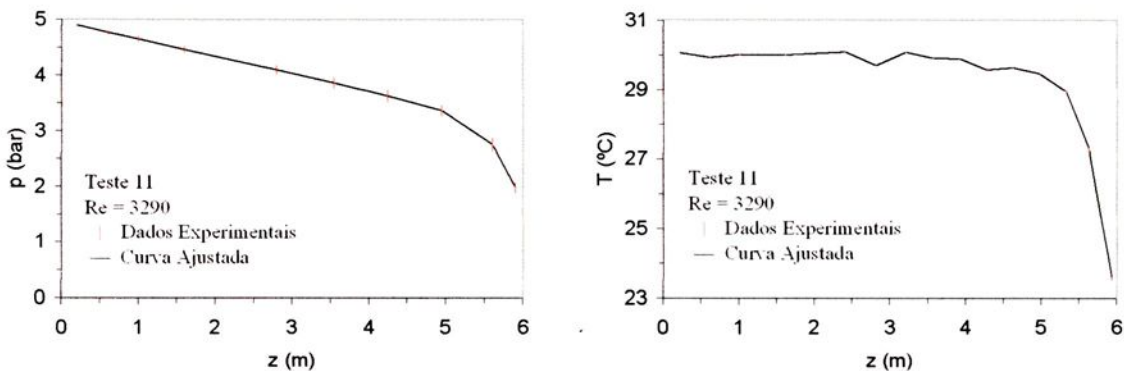


Figura F.31 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 11.

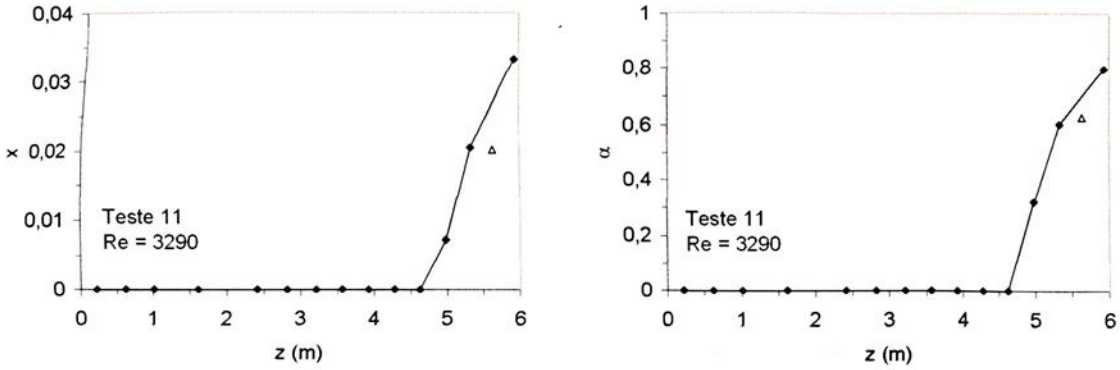


Figura F.32 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 11.

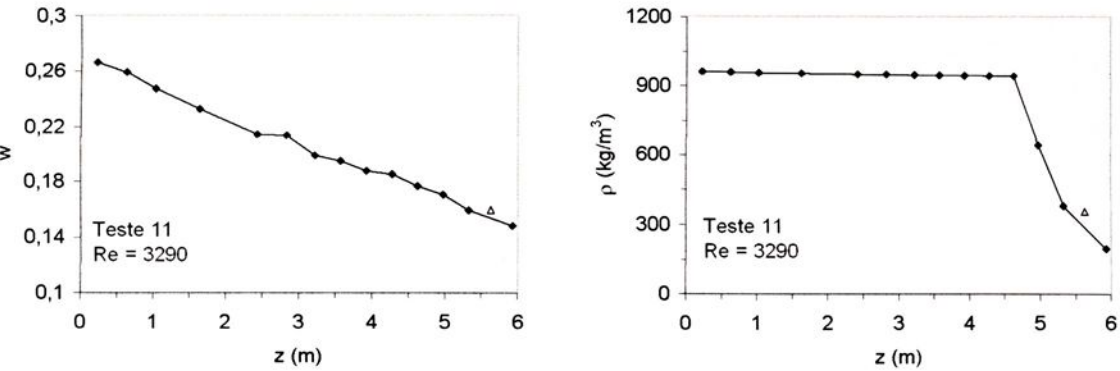


Figura F.33 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 11.

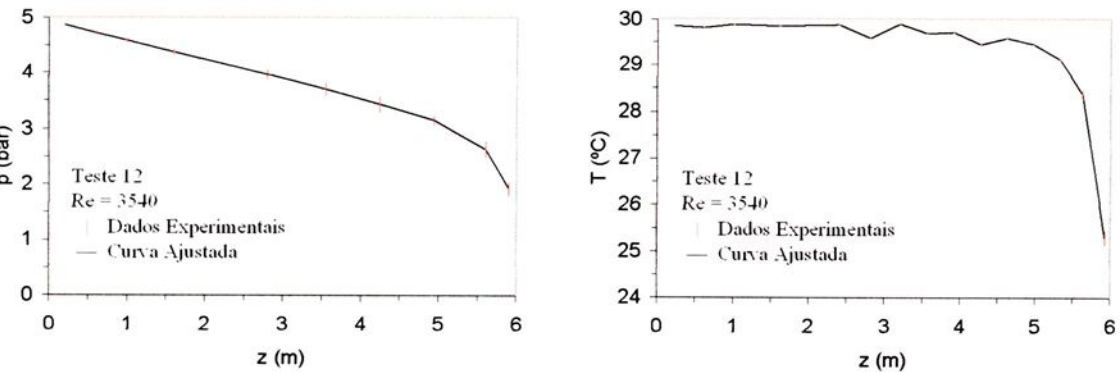


Figura F.34 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 12.

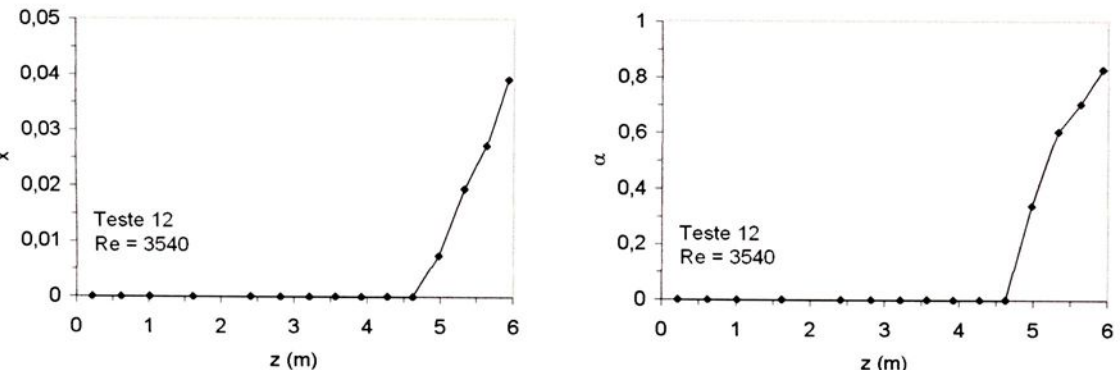


Figura F.35 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 12.

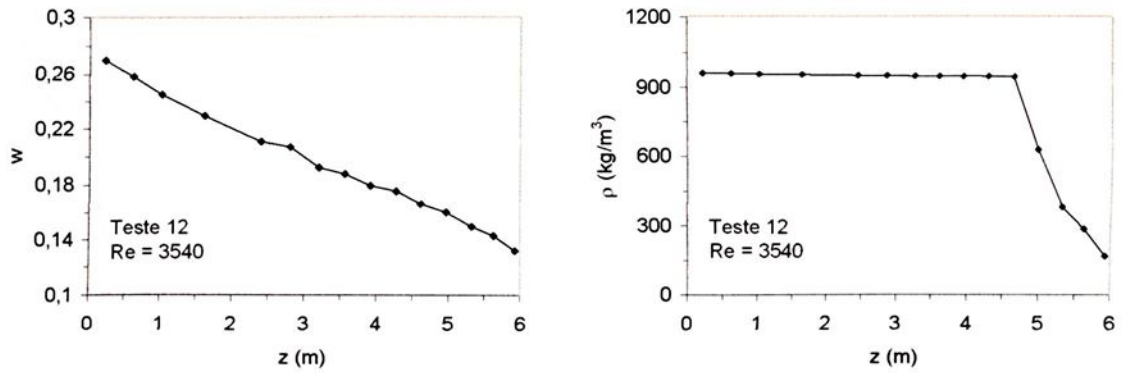


Figura F.36 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 12.

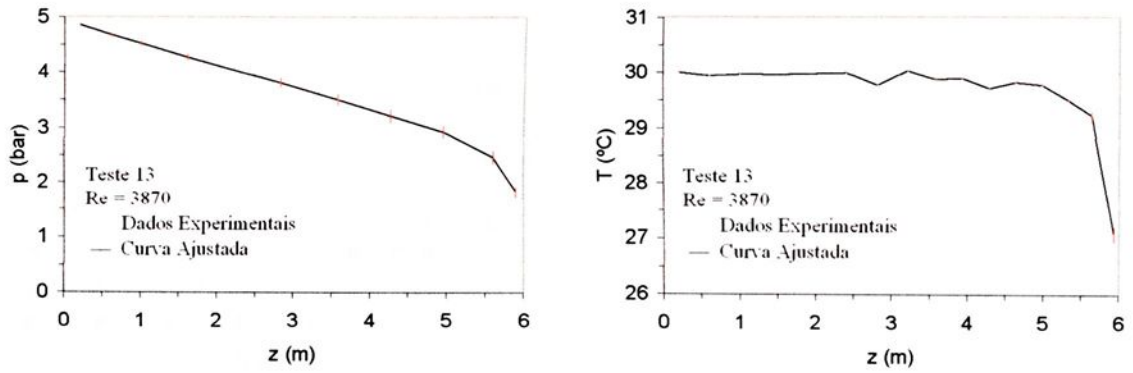


Figura F.37 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 13.

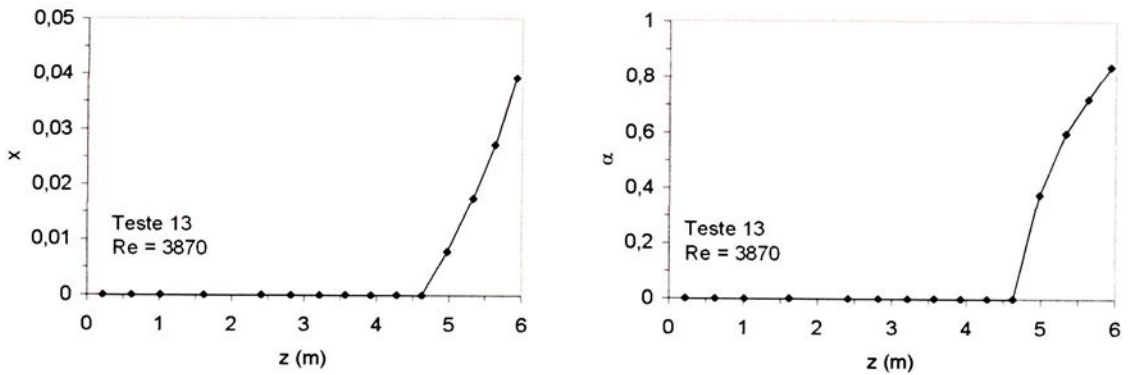


Figura F.38 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 13.

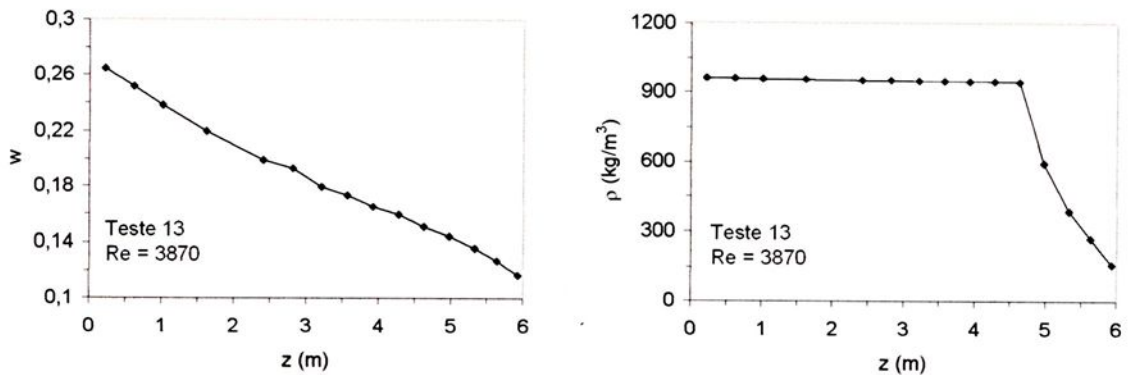


Figura F.39 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 13.

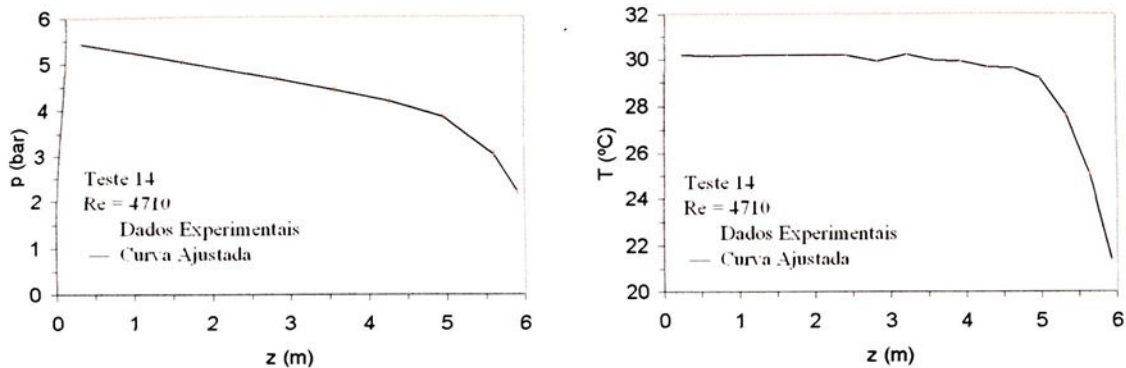


Figura F.40 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 14.

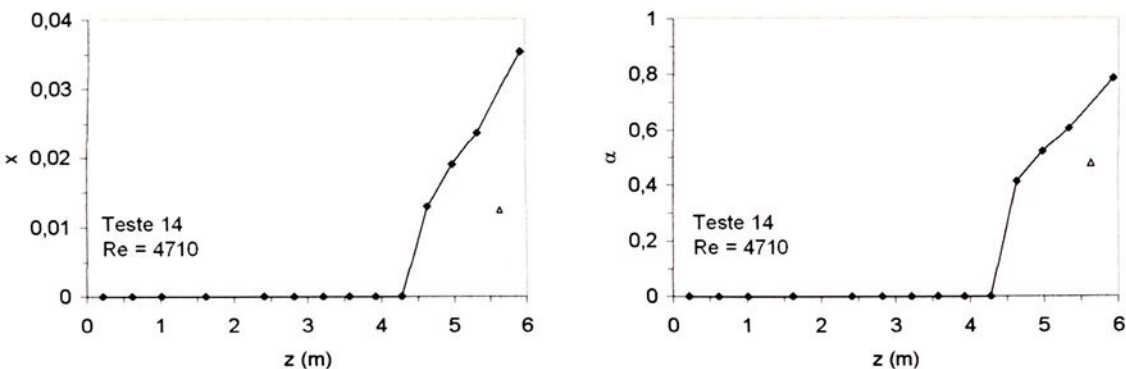


Figura F.41 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 14.

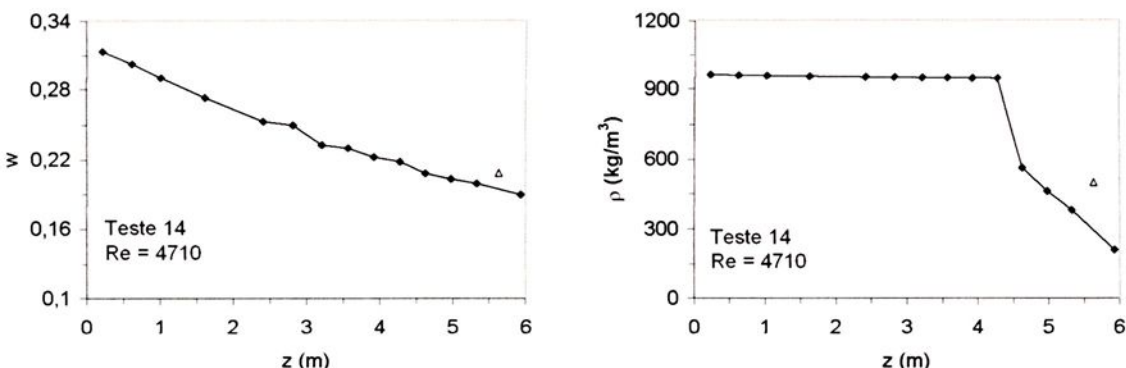


Figura F.42 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 14.

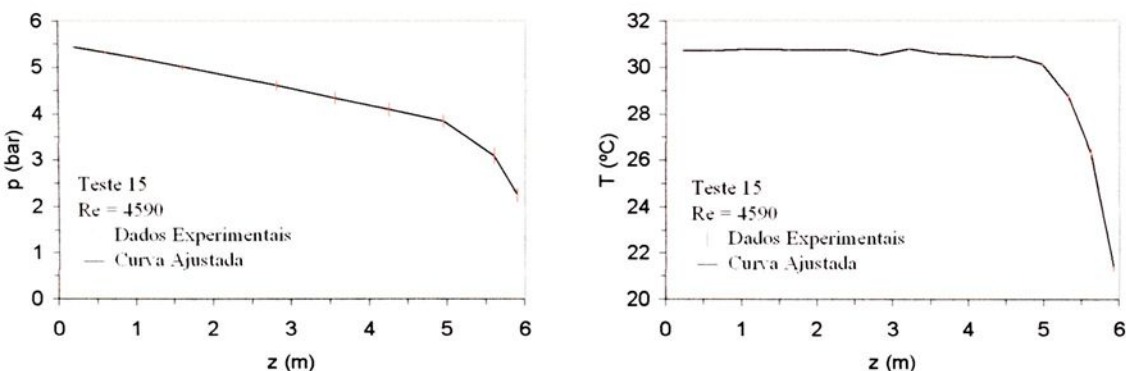


Figura F.43 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 15.

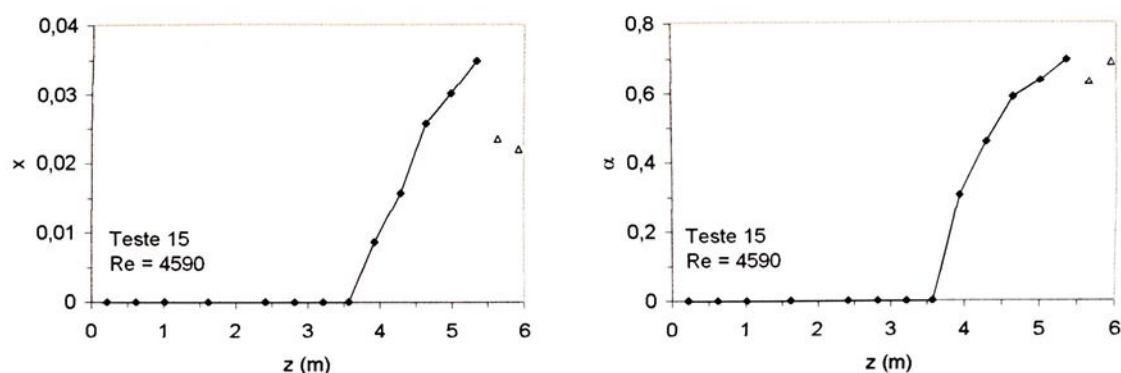


Figura F.44 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 15.

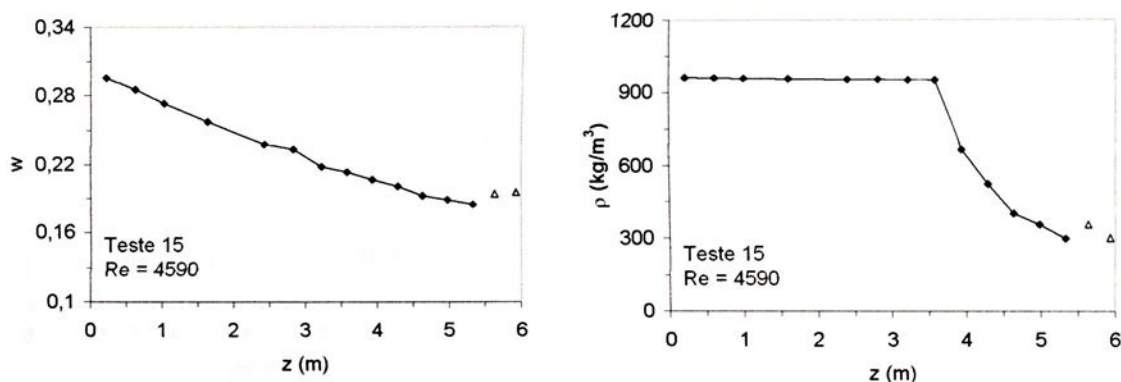


Figura F.45 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 15.

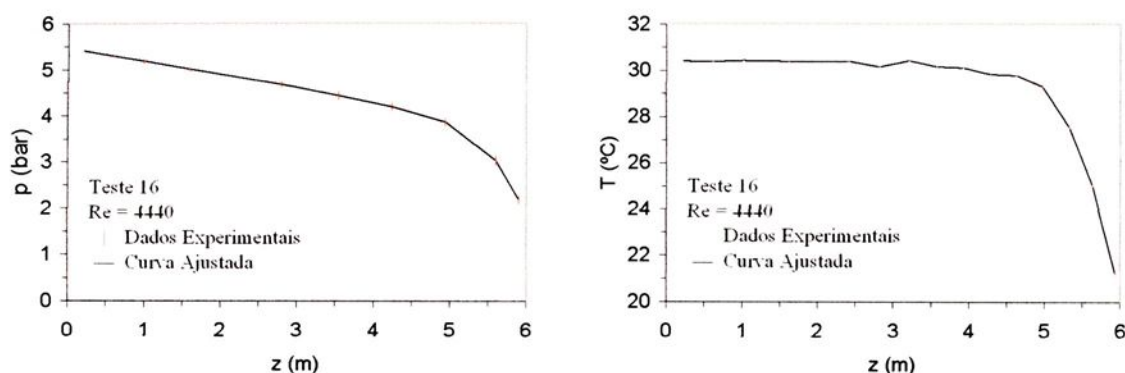


Figura F.46 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 16.

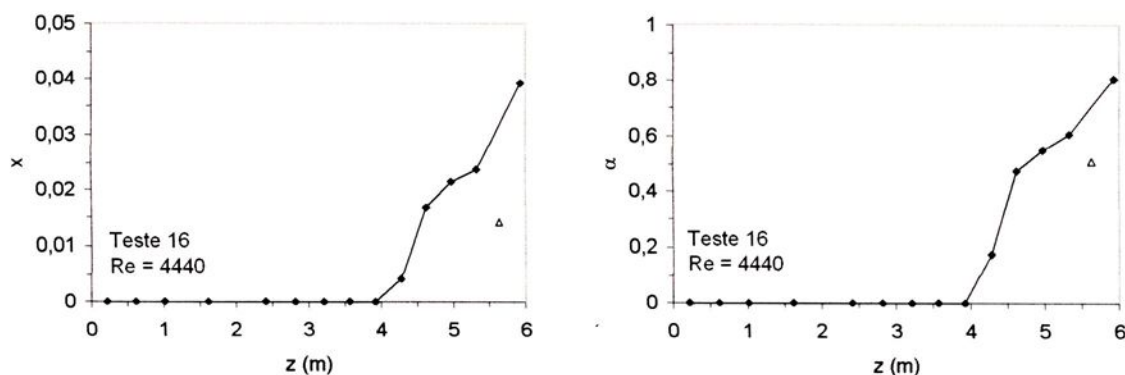


Figura F.47 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 16.

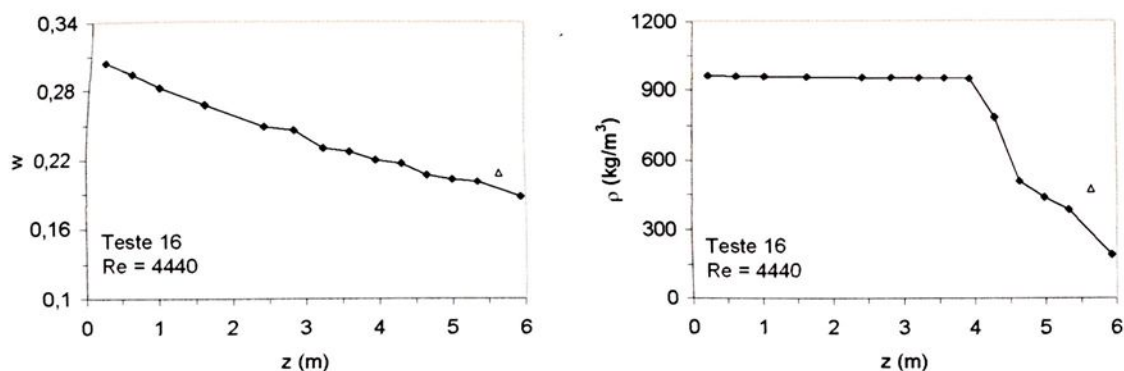


Figura F.48 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 16.

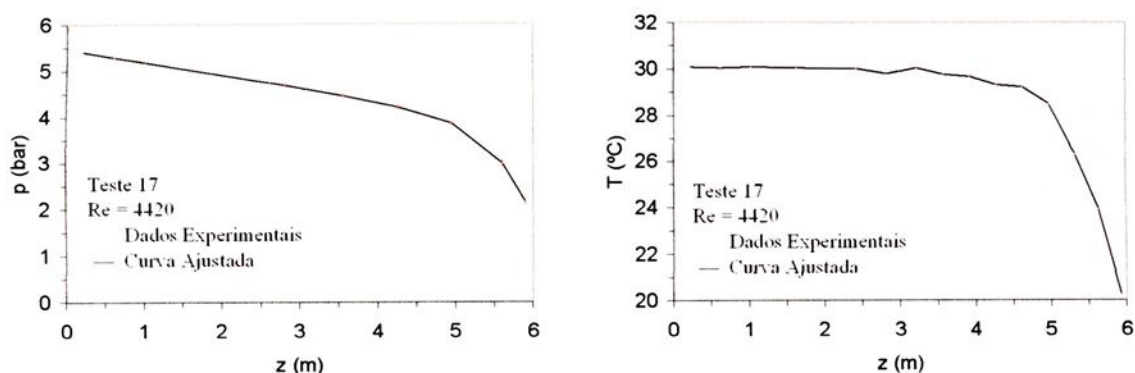


Figura F.49 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 17.

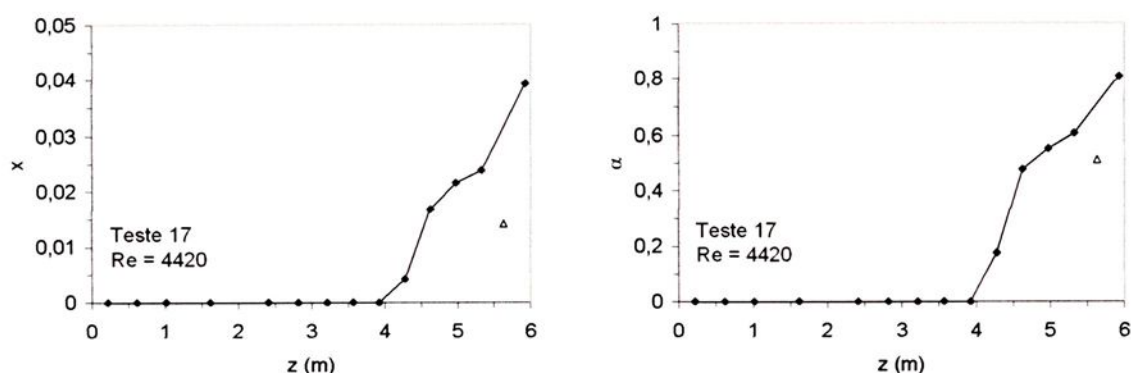


Figura F.50 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 17.

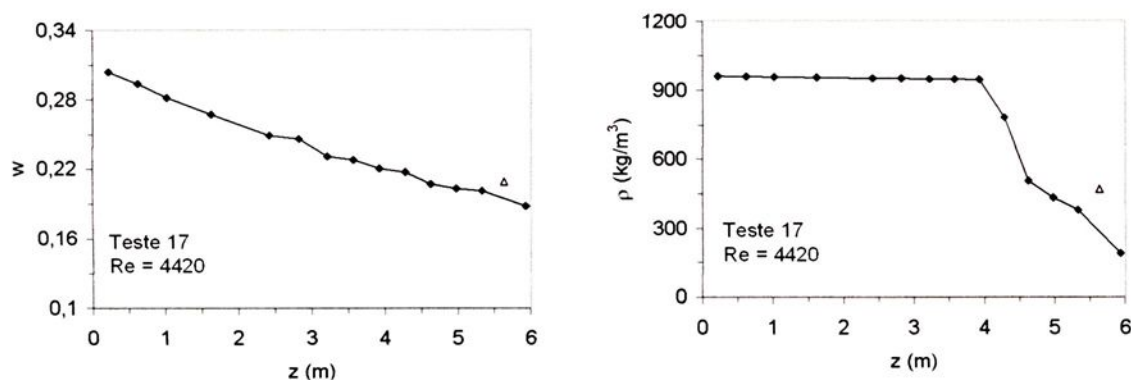


Figura F.51 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 17.

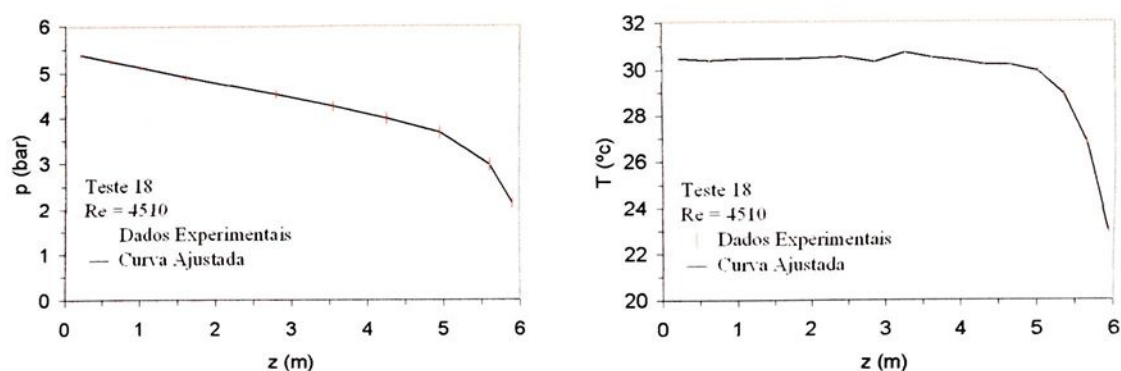


Figura F.52 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 18.

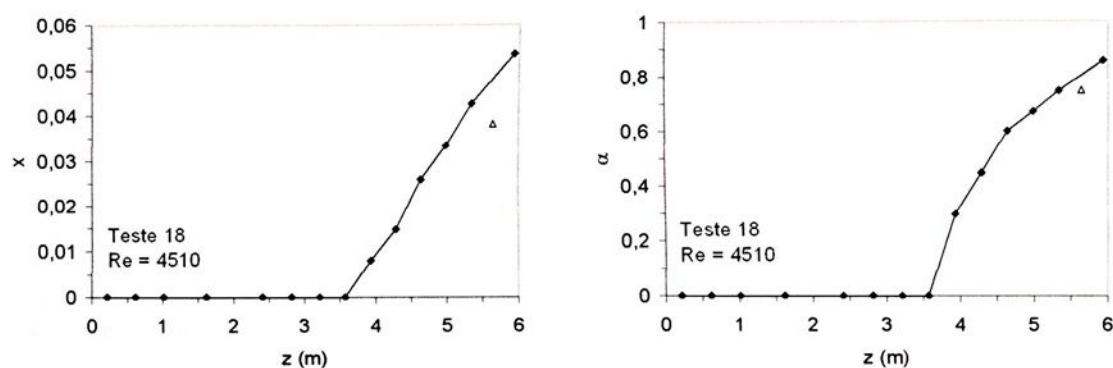


Figura F.53 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 18.

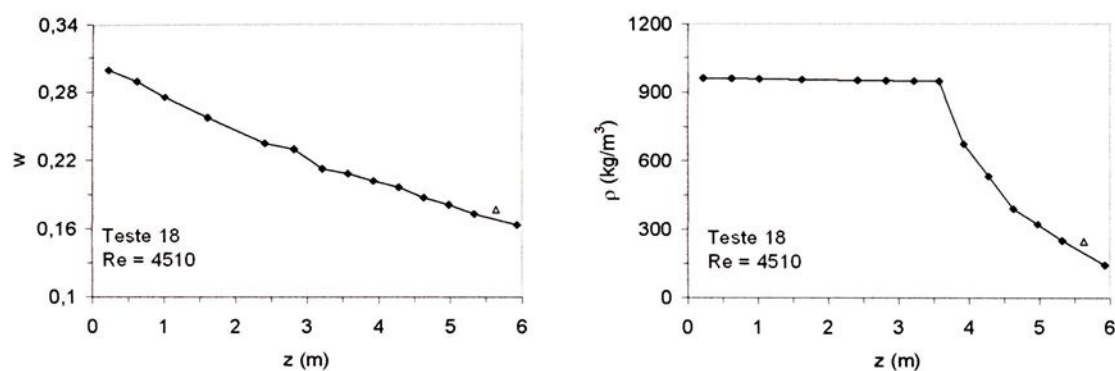


Figura F.54 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 18.

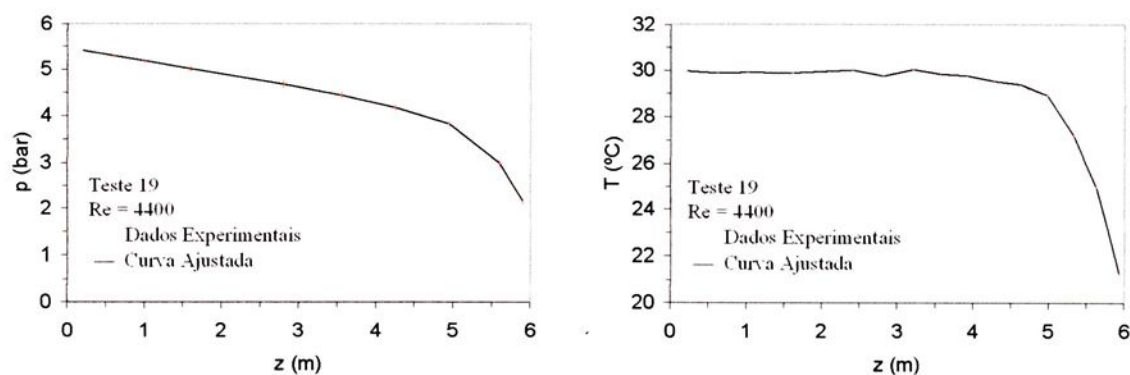


Figura F.55 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 19.

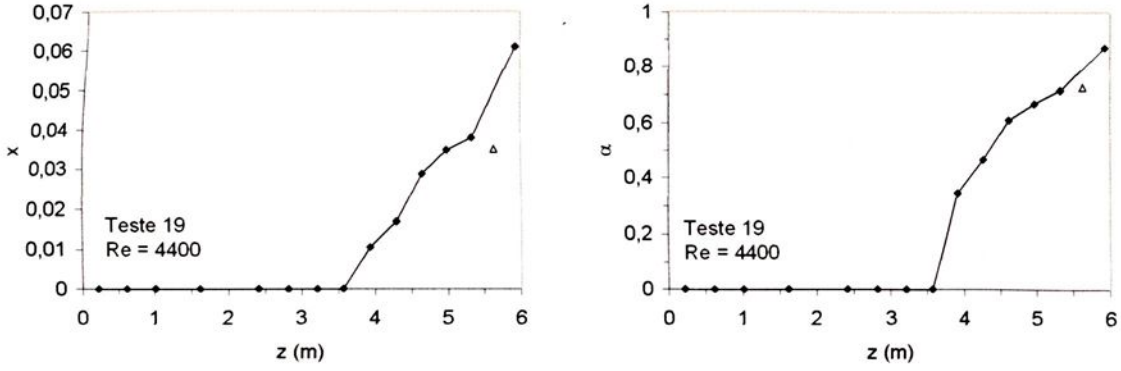


Figura F.56 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 19.

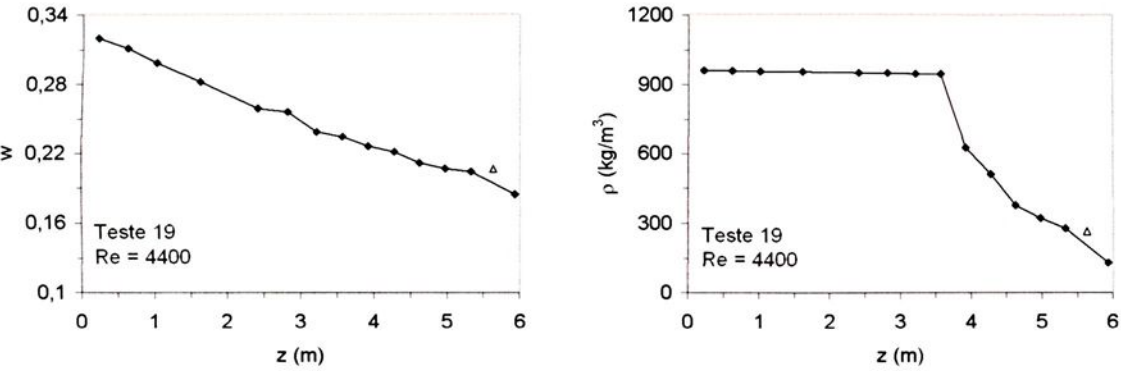


Figura F.57 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 19.

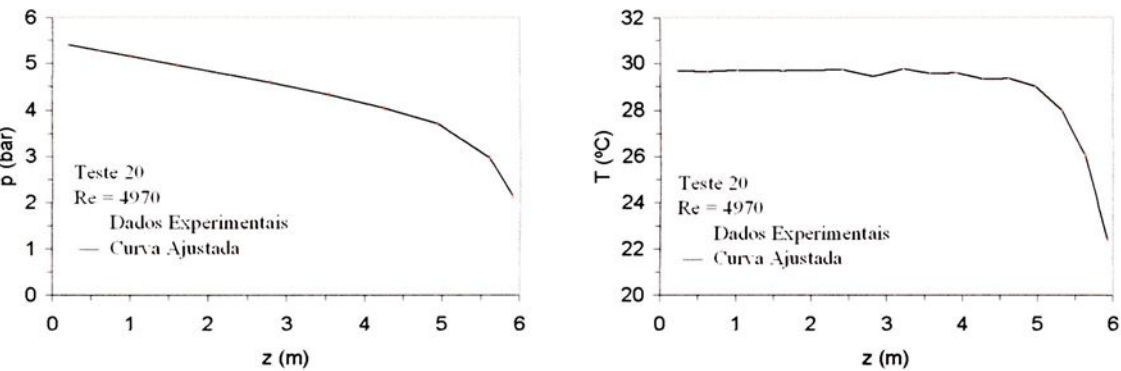


Figura F.58 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 20.

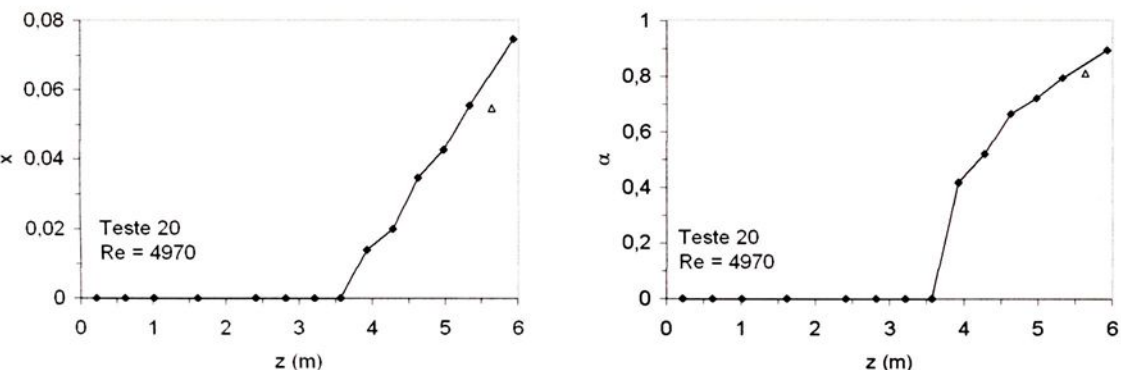


Figura F.59 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 20.

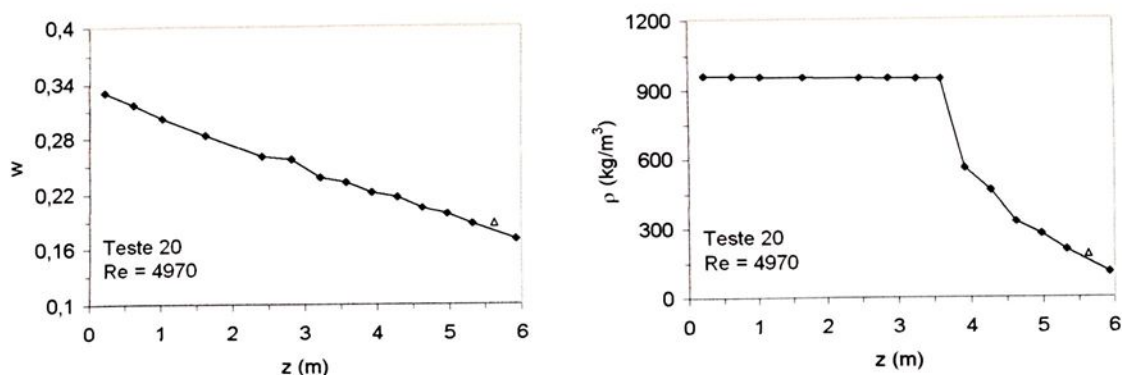


Figura F.60 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 20.

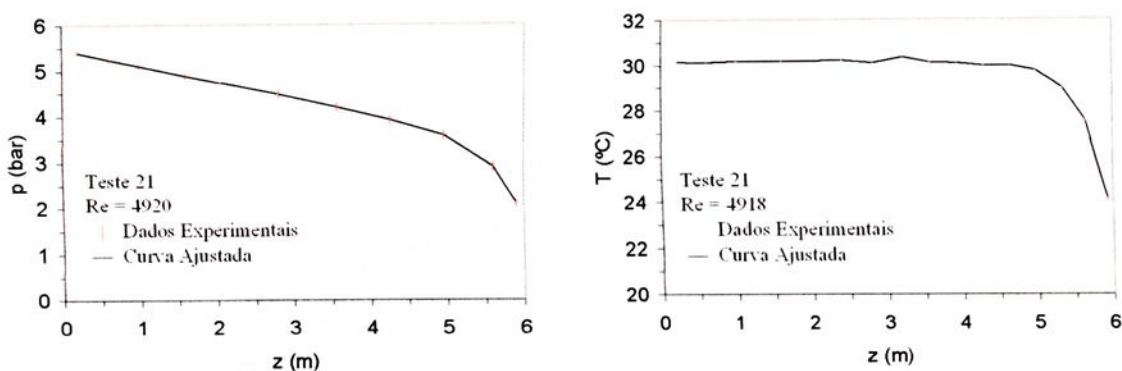


Figura F.61 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 21.

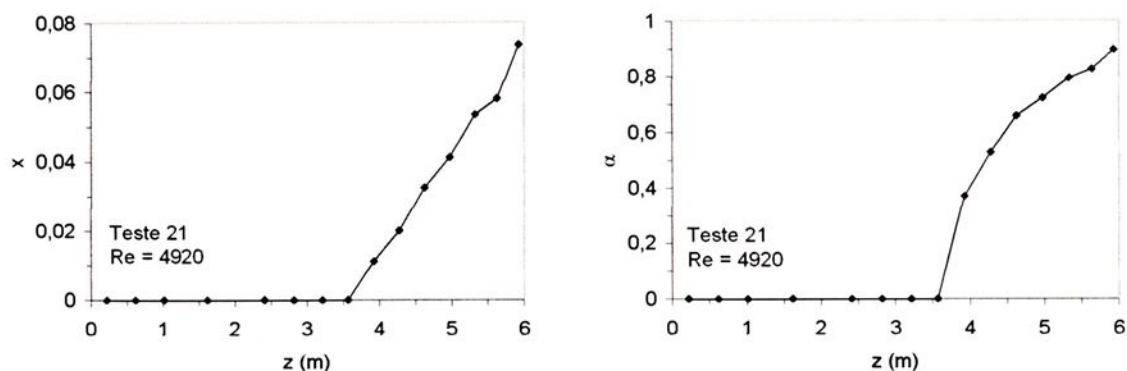


Figura F.62 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 21.

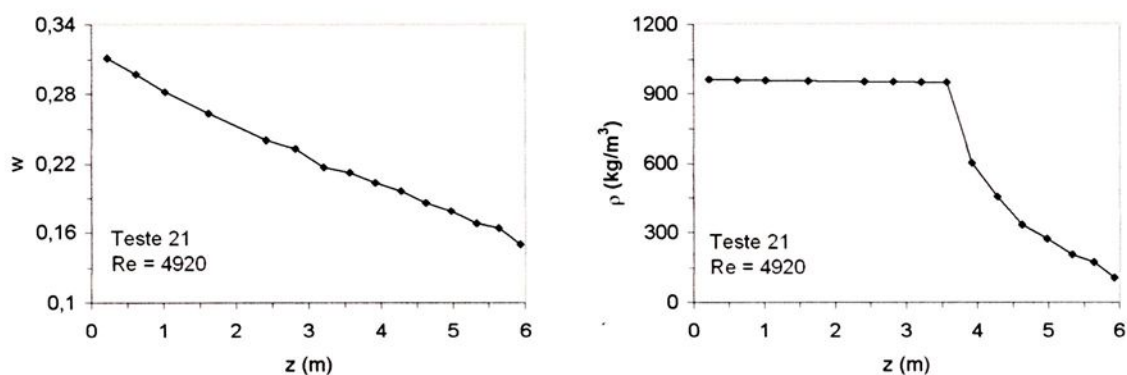


Figura F.63 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 21.

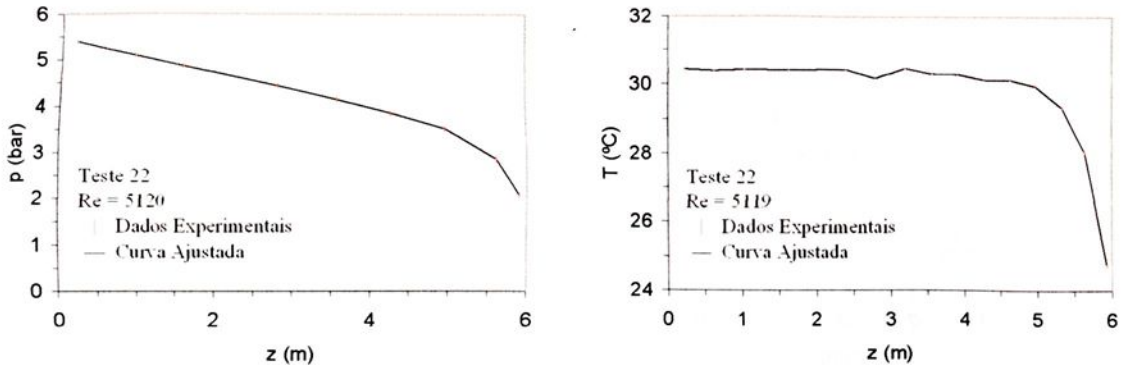


Figura F.64 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 22.

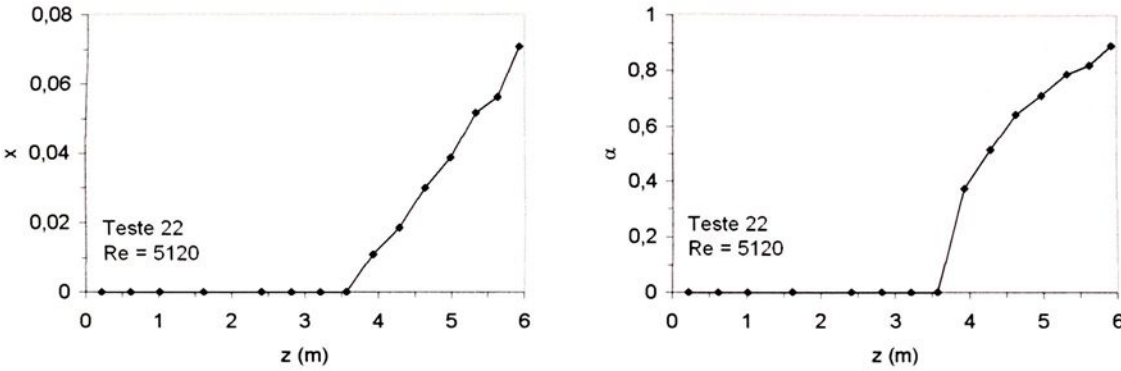


Figura F.65 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 22.

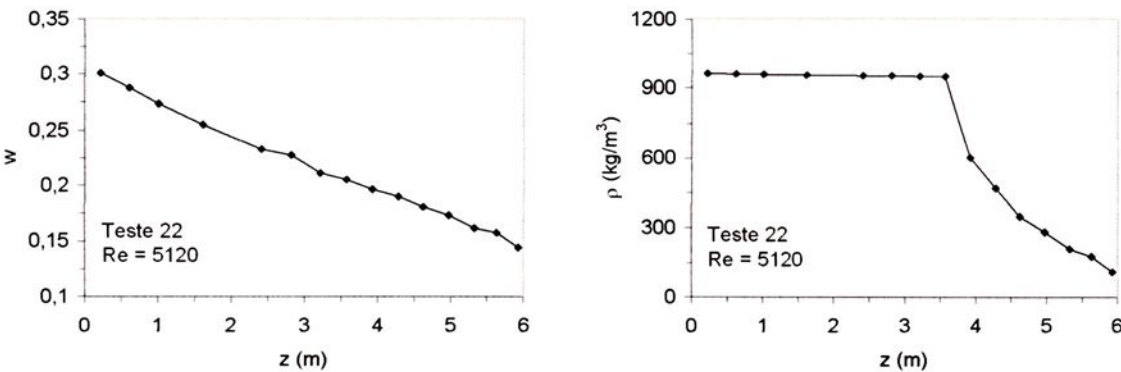


Figura F.66 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 22.

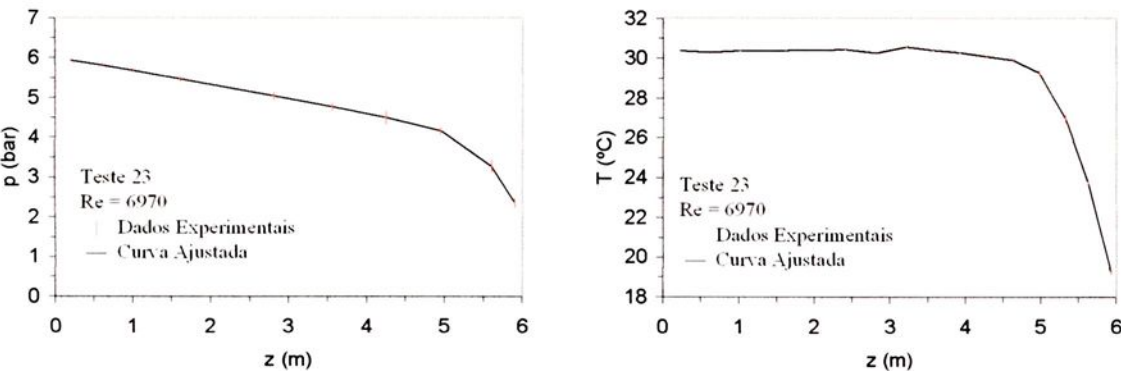


Figura F.67 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 23.

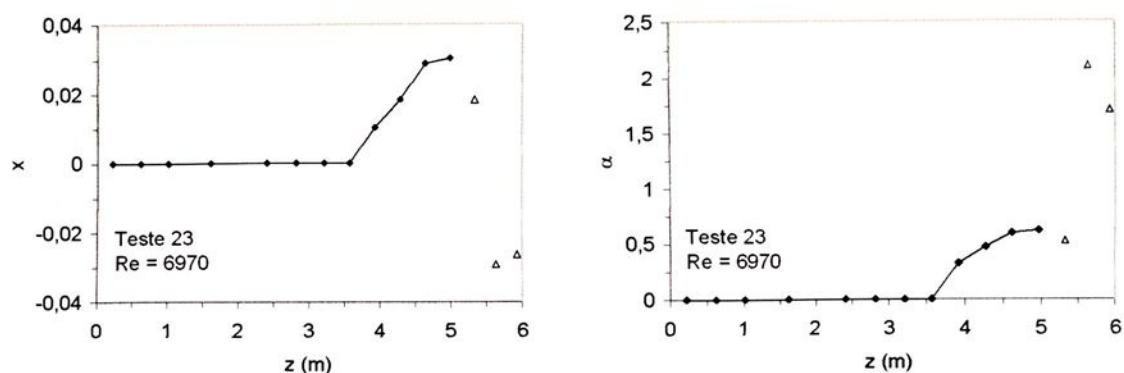


Figura F.68 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 23.

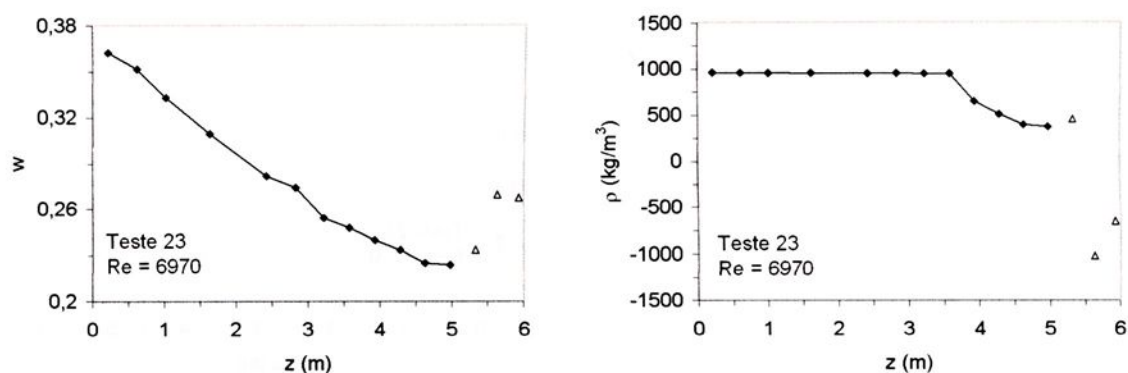


Figura F.69 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 23.

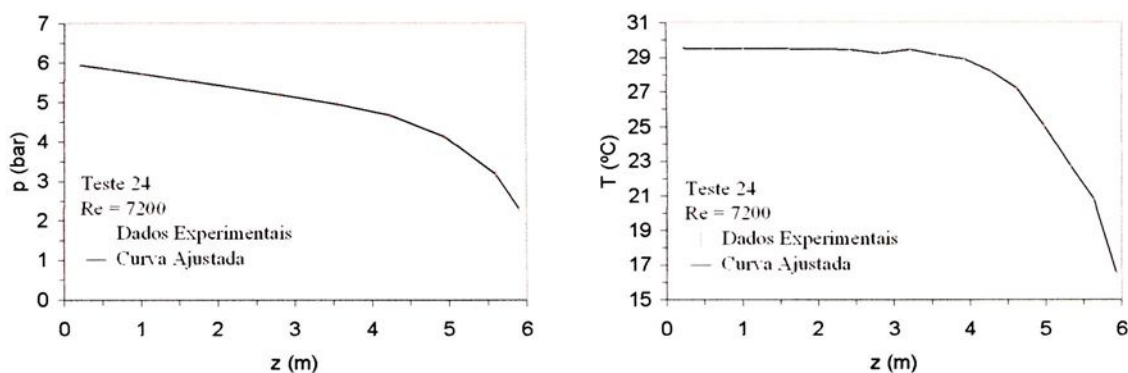


Figura F.70 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 24.

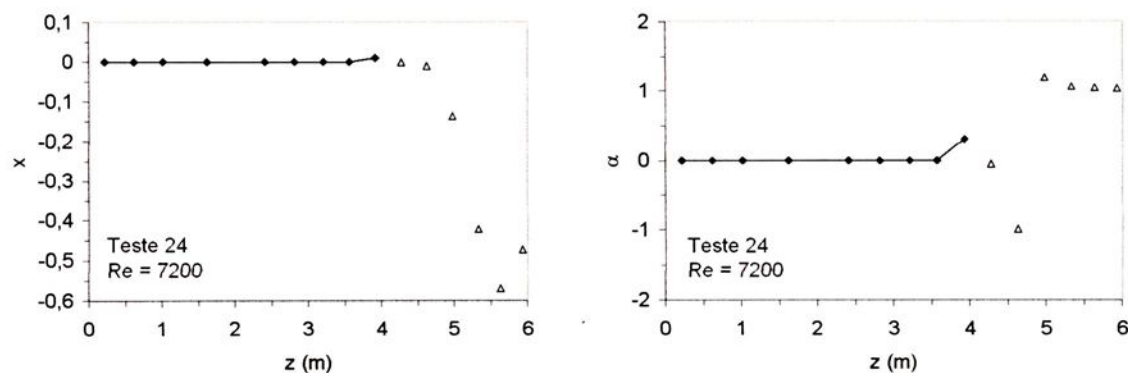


Figura F.71 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 24.

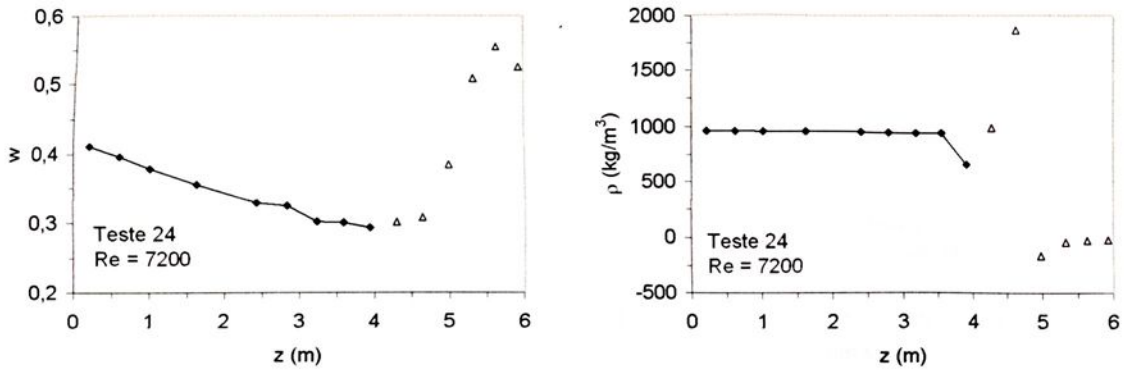


Figura F.72 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 24.

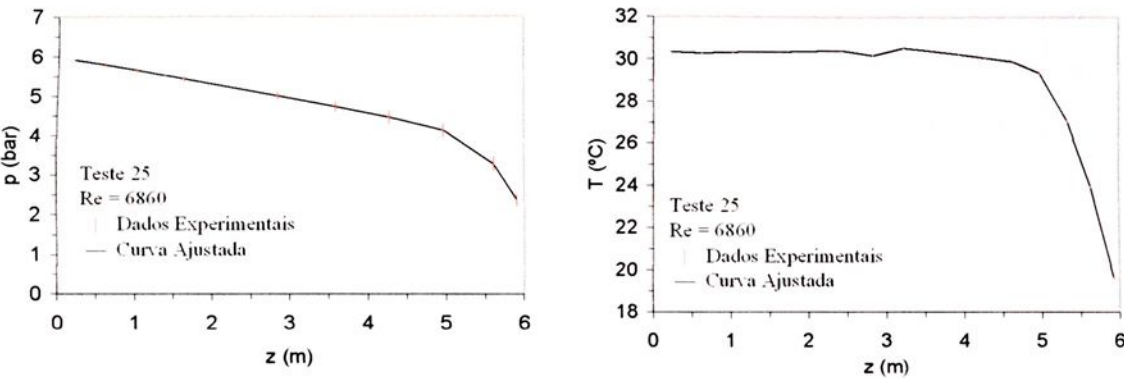


Figura F.73 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 25.

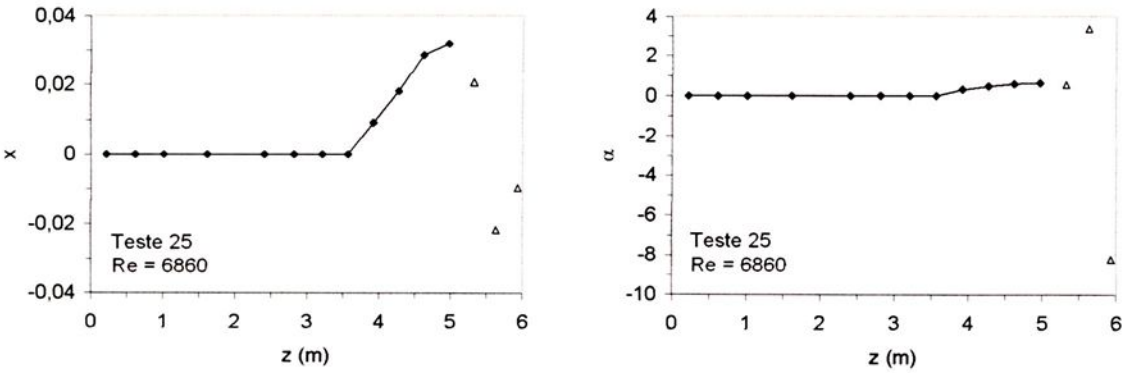


Figura F.74 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 25.

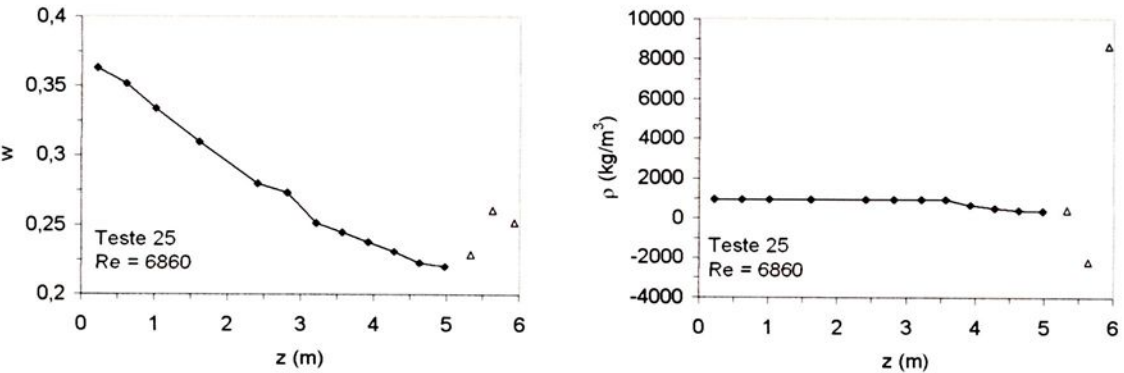


Figura F.75 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 25.

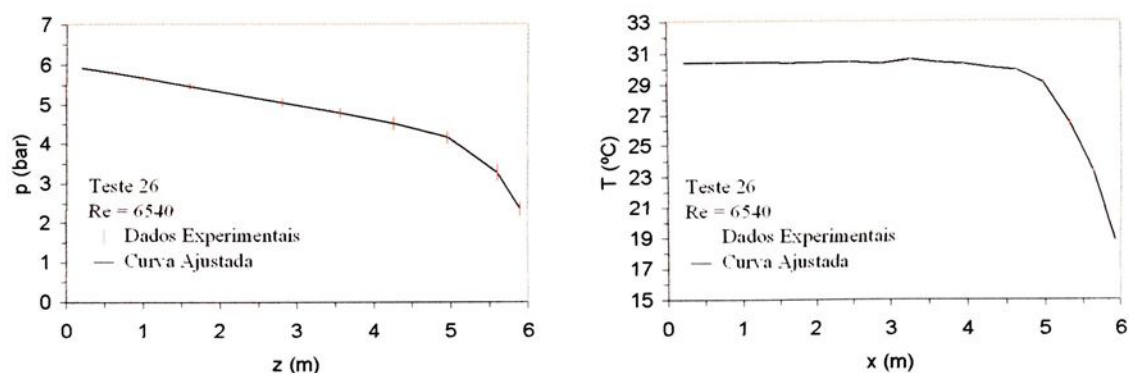


Figura F.76 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 26.

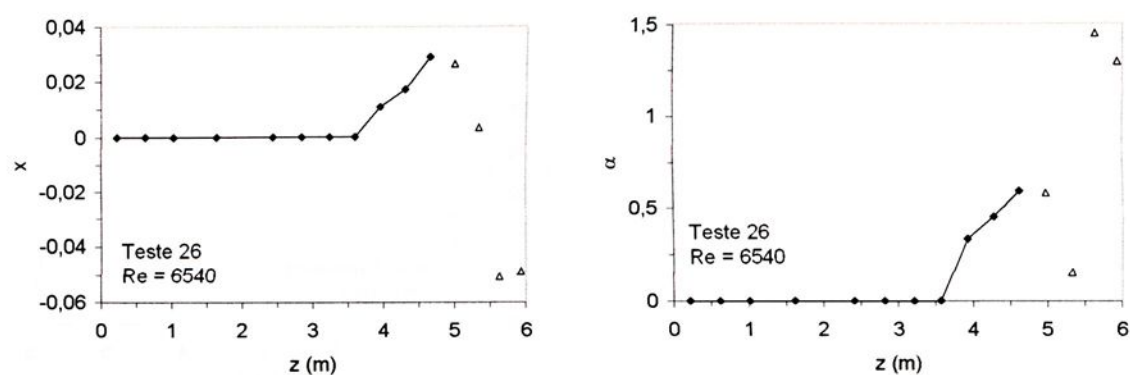


Figura F.77 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 26.

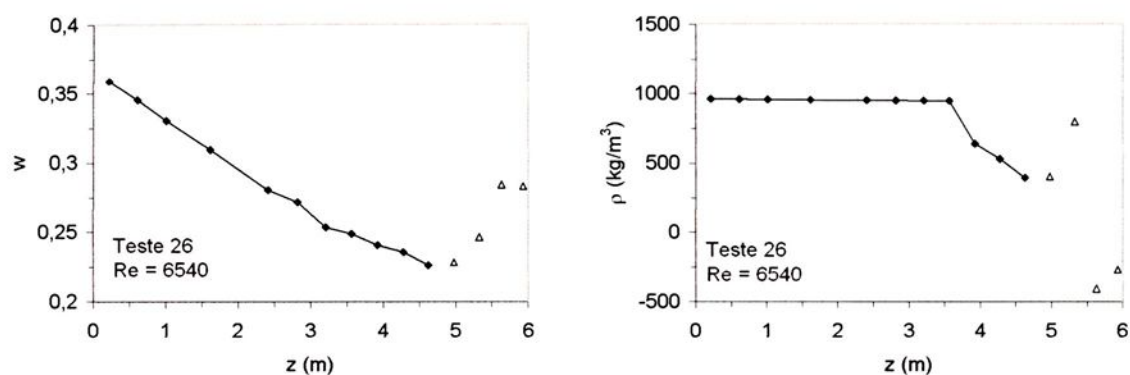


Figura F.78 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 26.

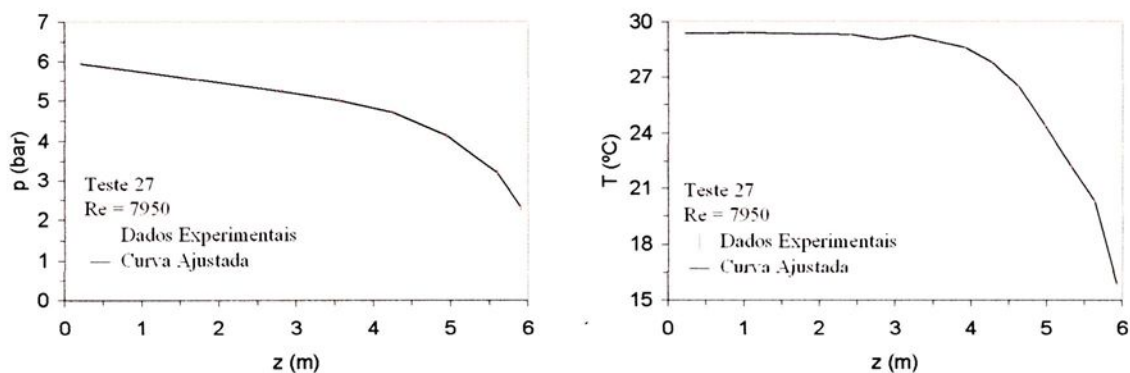


Figura F.79 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 27.

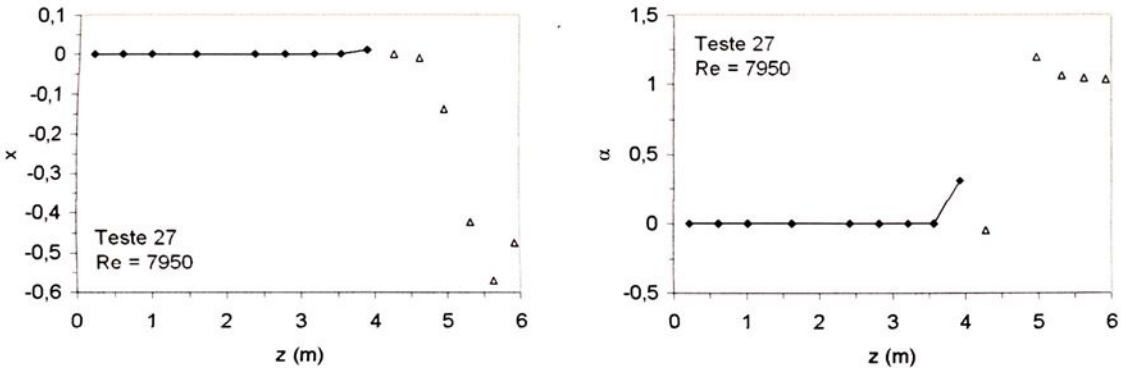


Figura F.80 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 27.

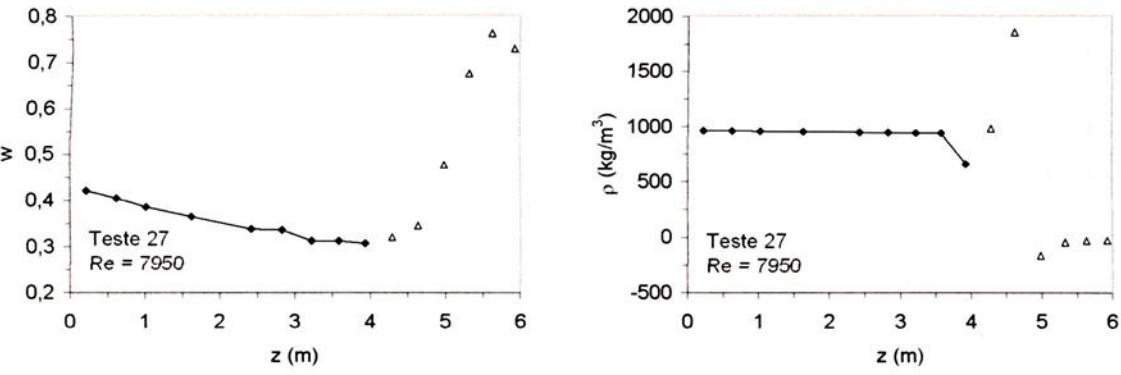


Figura F.81 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 27.

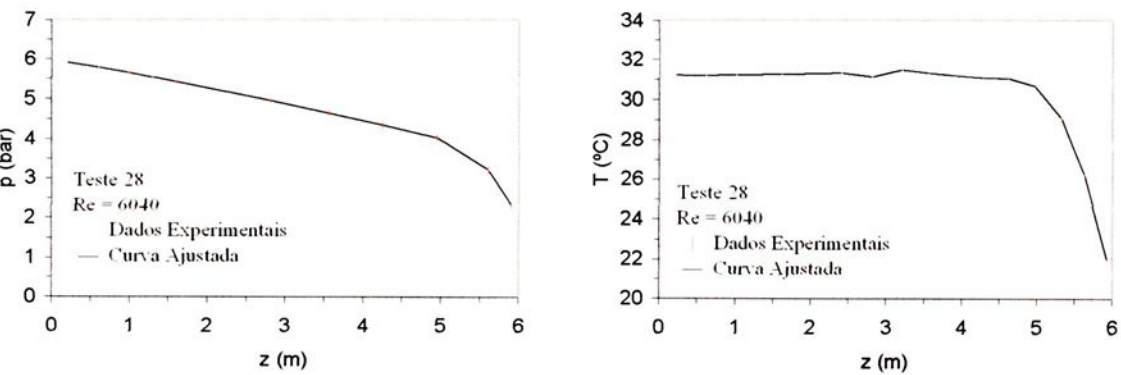


Figura F.82 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 28.

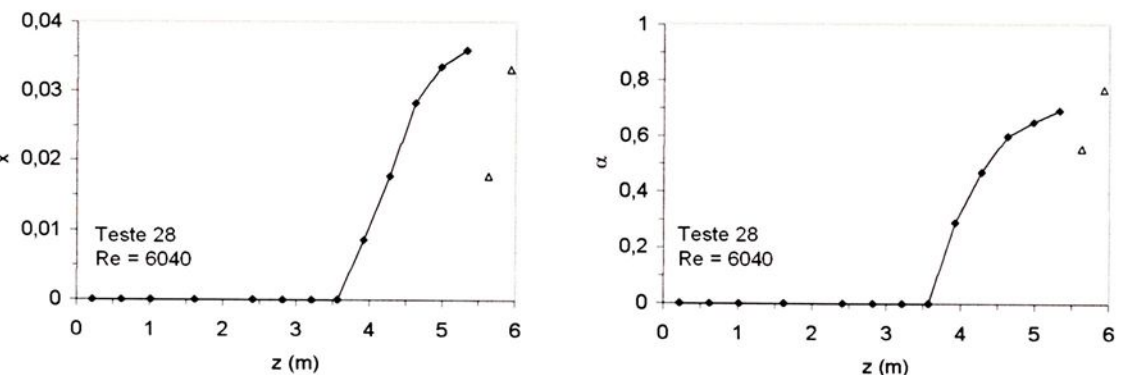


Figura F.83 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 28.

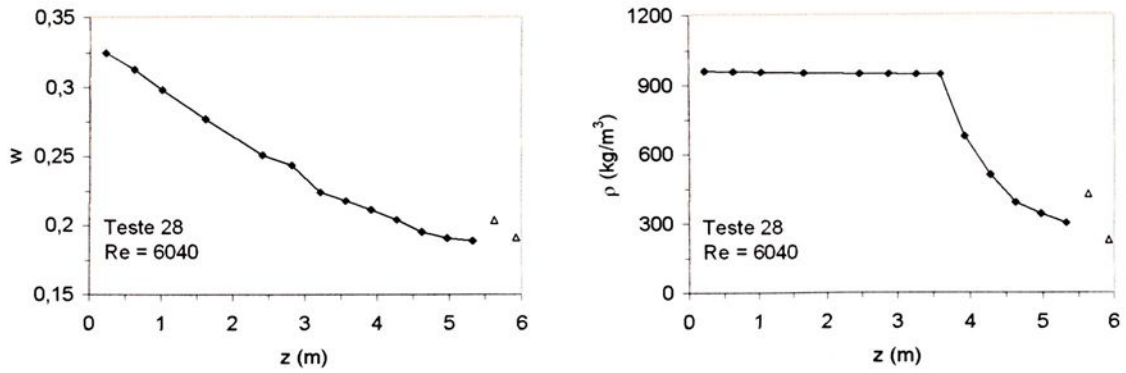


Figura F.84 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 28.

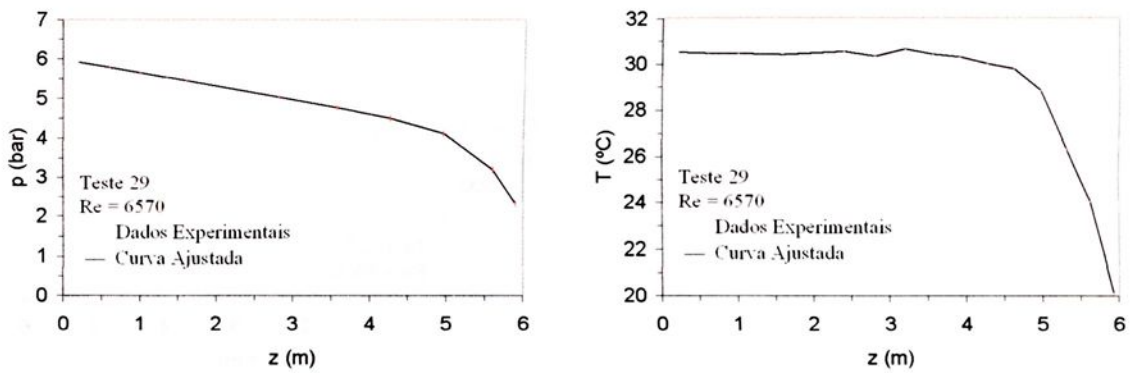


Figura F.85 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 29.

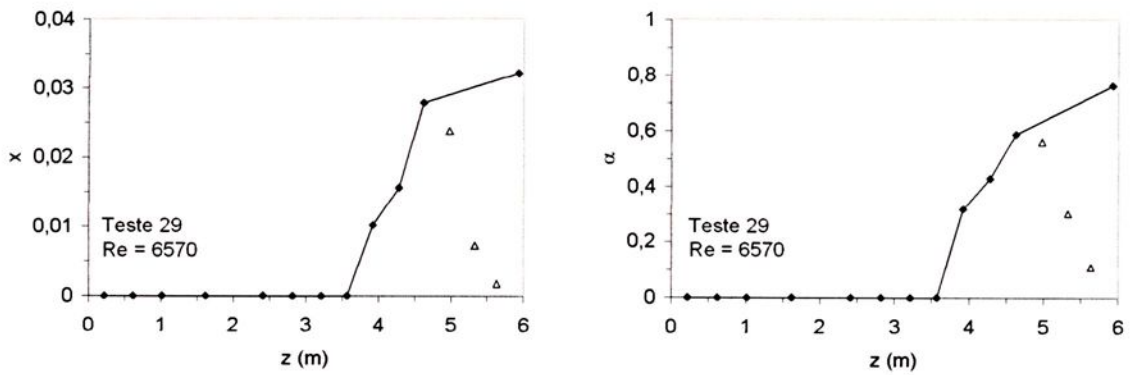


Figura F.86 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 29.

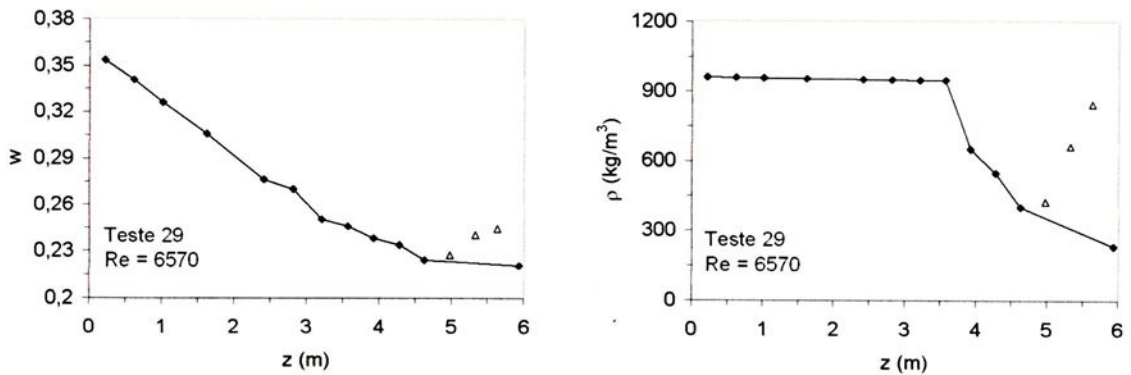


Figura F.87 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 29.

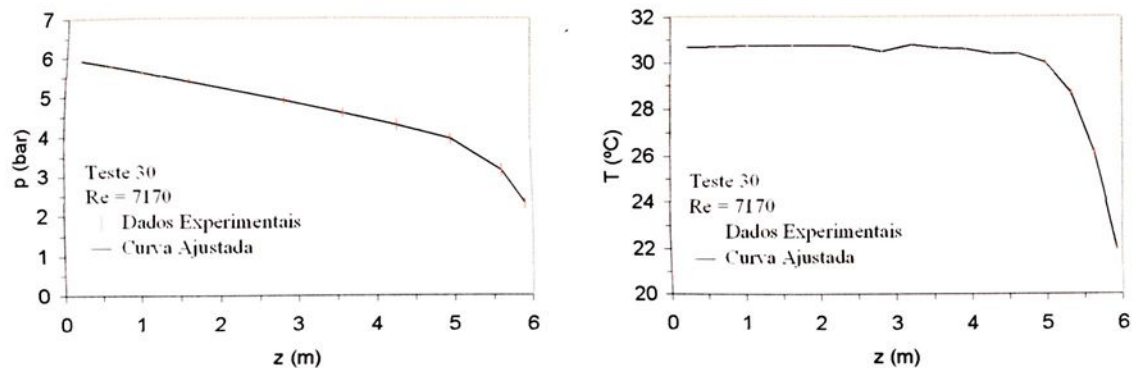


Figura F.88 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 30.

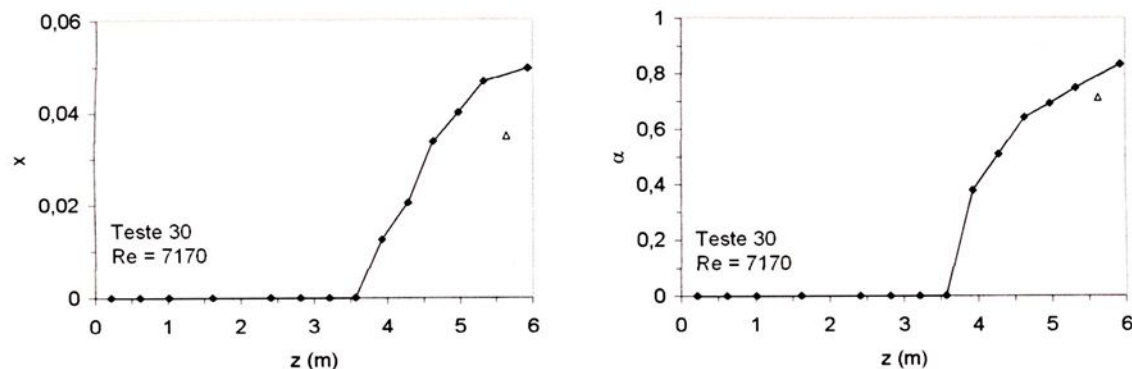


Figura F.89 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 30.

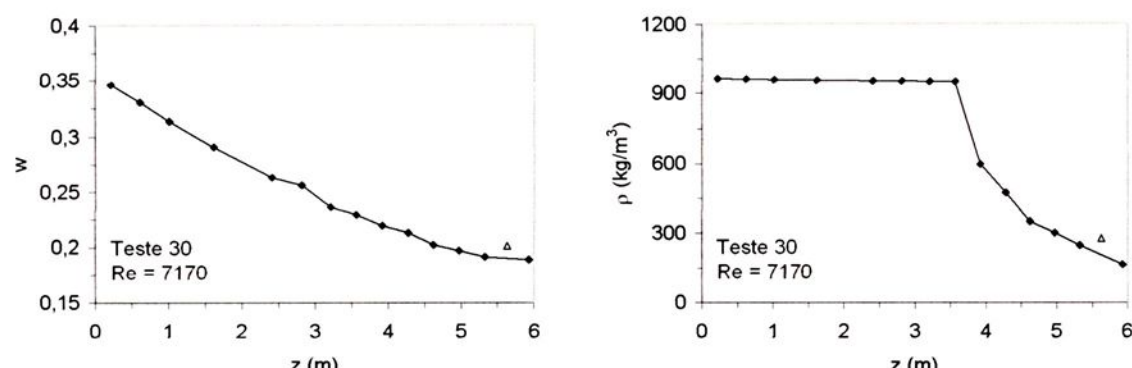


Figura F.90 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 30.

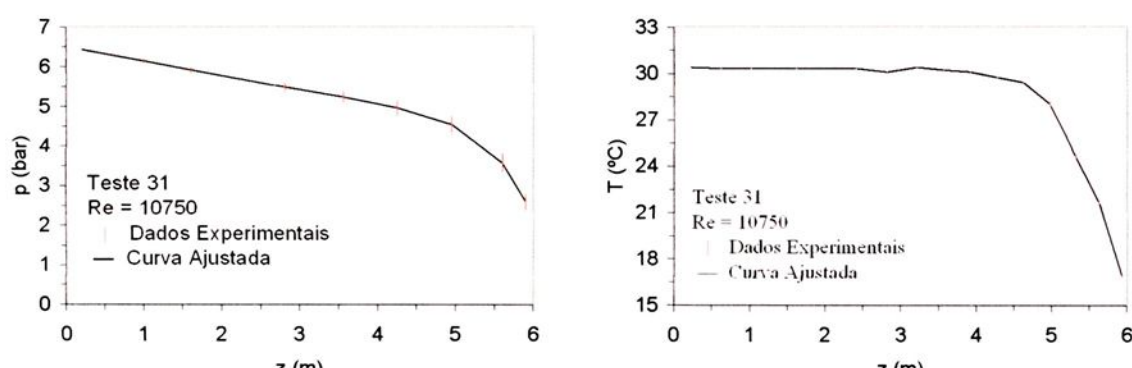


Figura F.91 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 31.

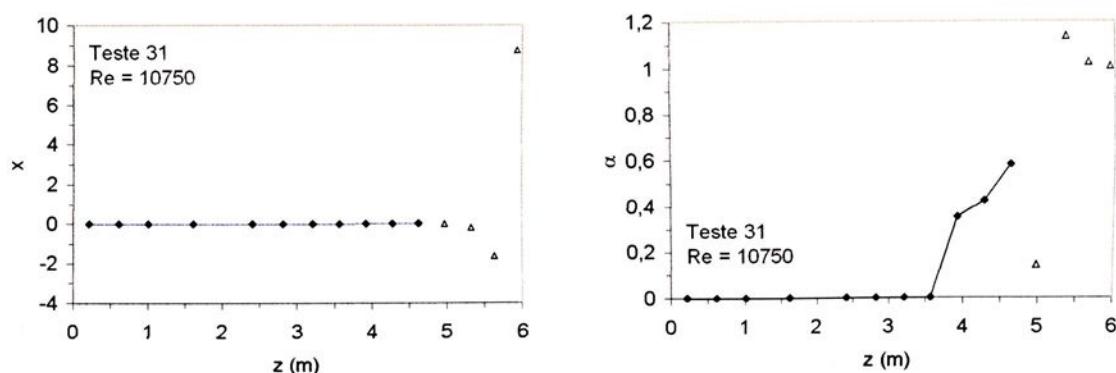


Figura F.92 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 31.

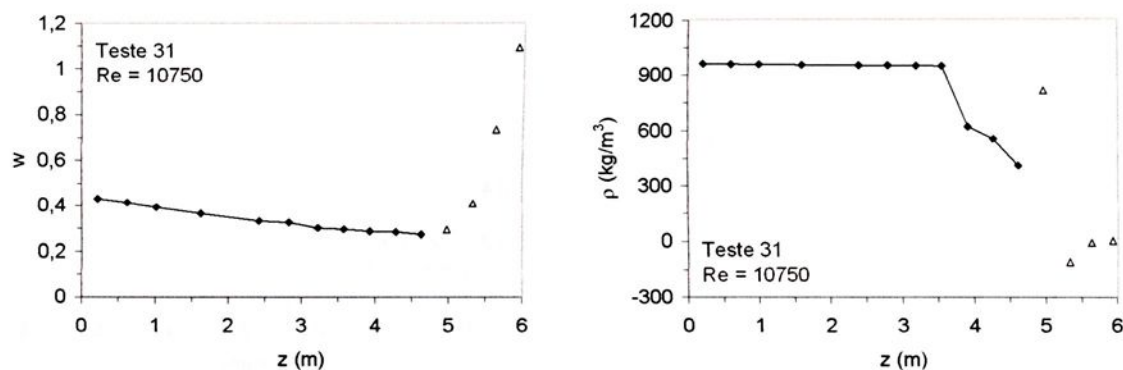


Figura F.93 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 31.

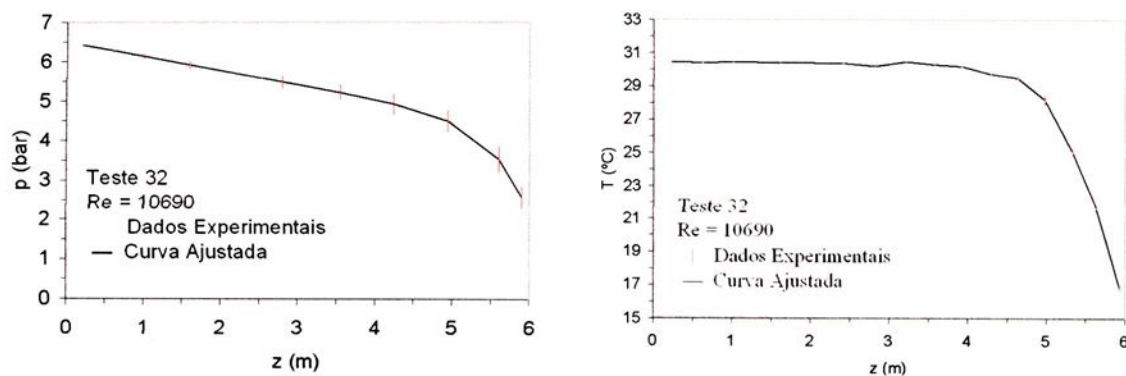


Figura F.94 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 32.

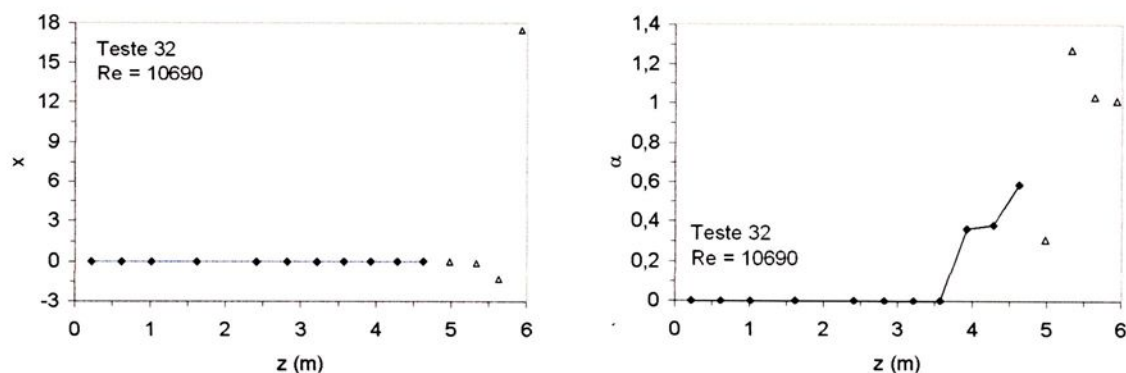


Figura F.95 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 32.

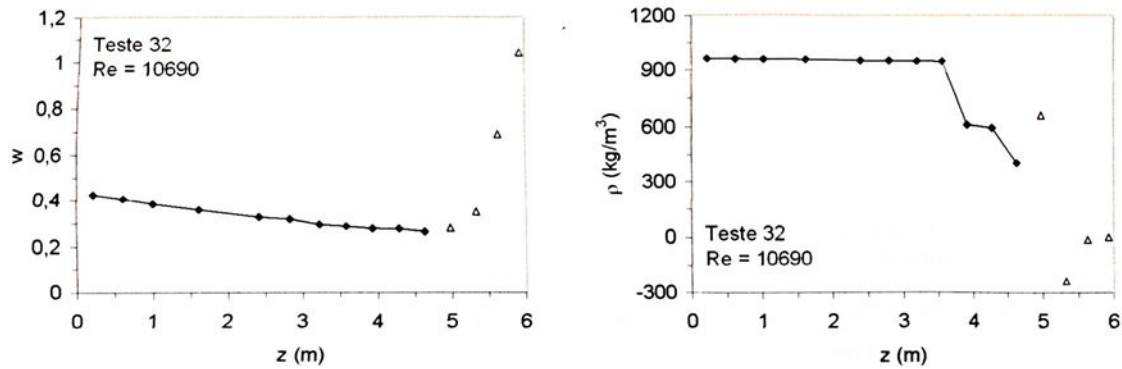


Figura F.96 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 32.

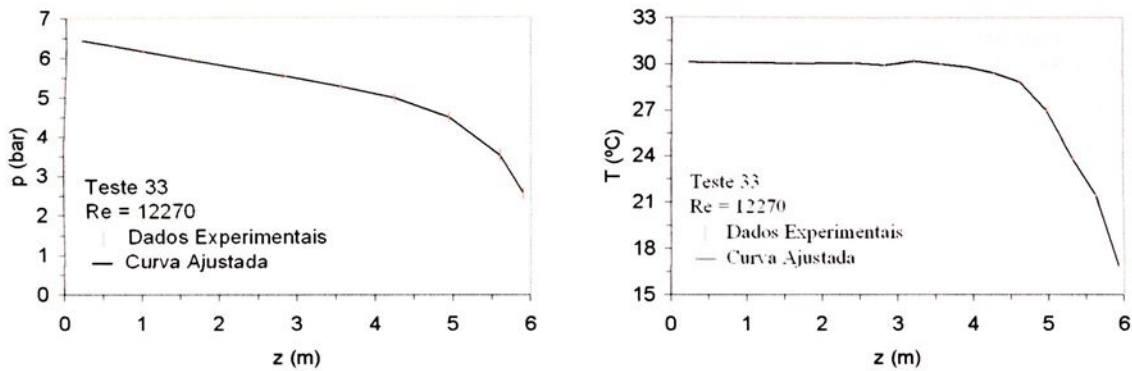


Figura F.97 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 33.

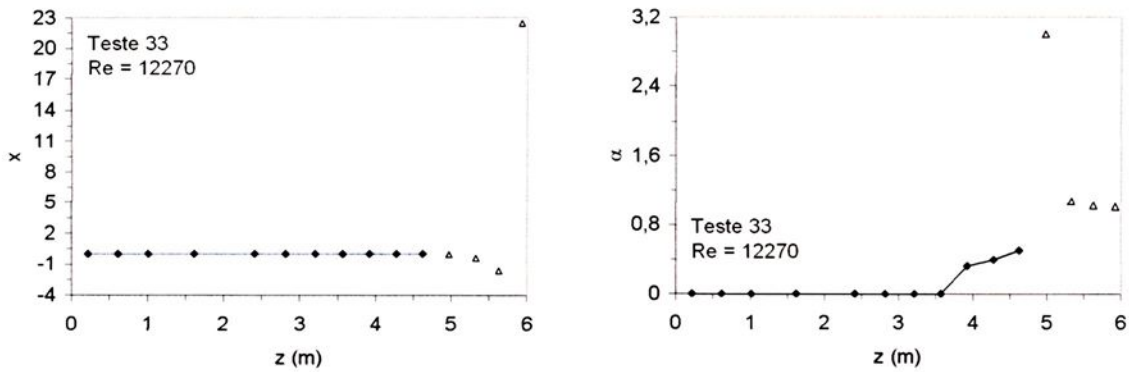


Figura F.98 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 33.

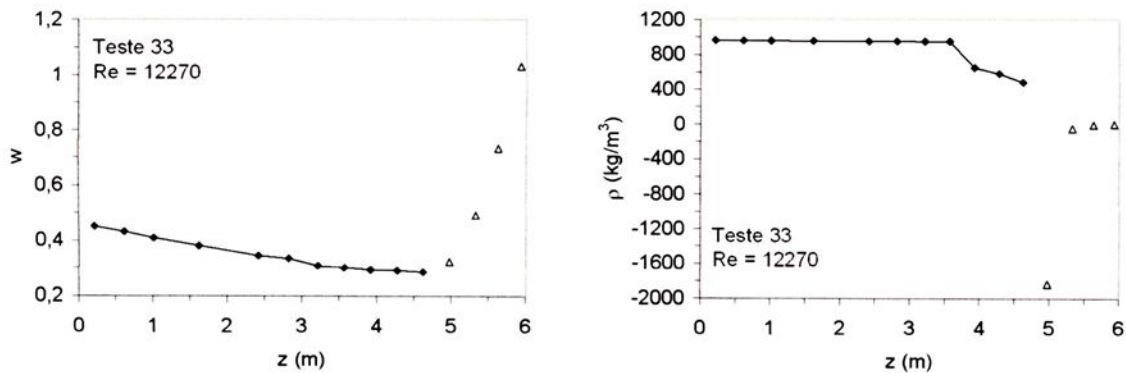


Figura F.99 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 33.

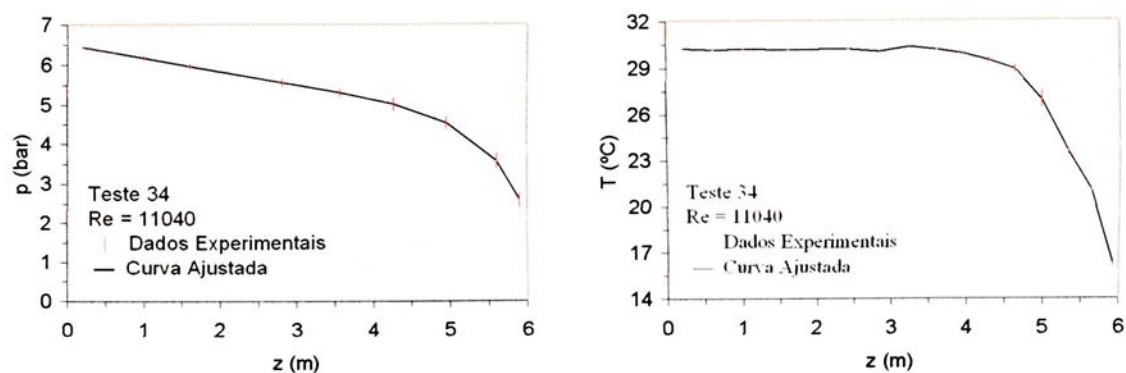


Figura F.100 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 34.

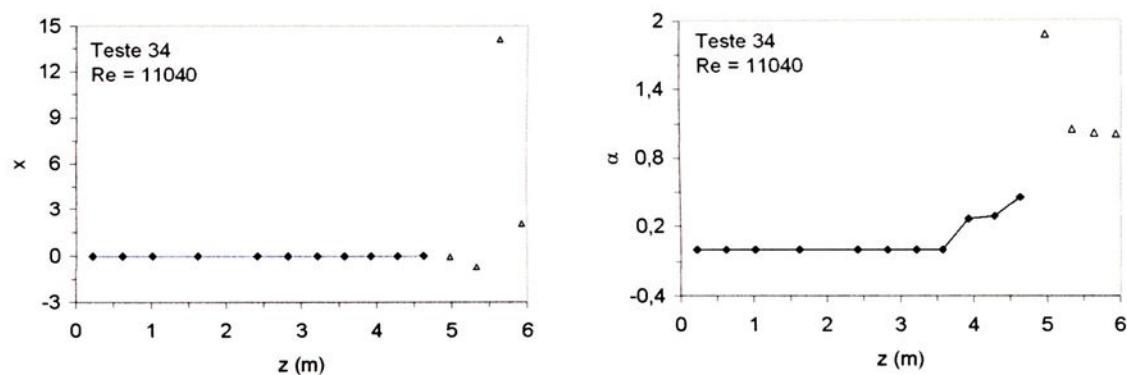


Figura F.101 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 34.

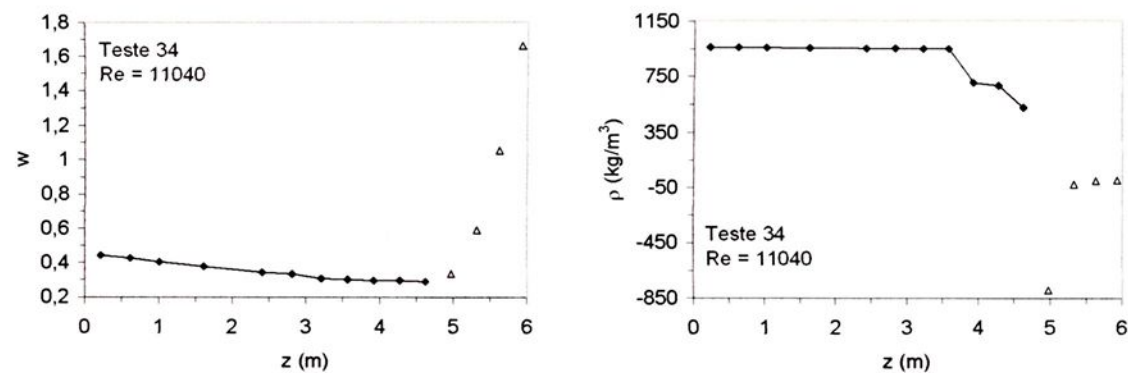


Figura F.102 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 34.

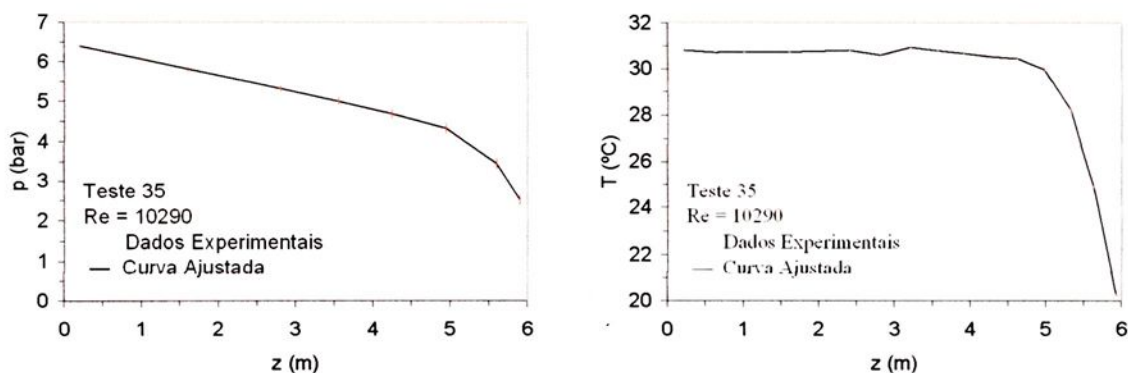


Figura F.103 – Distribuição de pressão e temperatura ao longo do tubo para o teste 35.

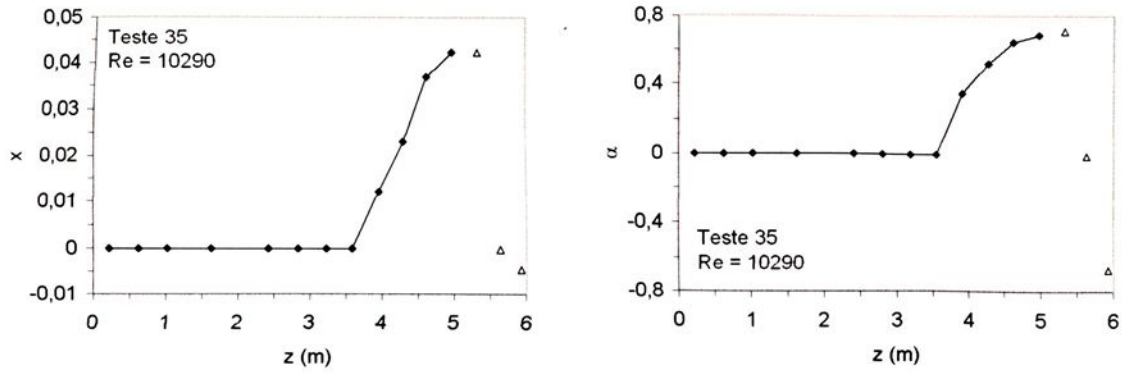


Figura F.104 – Distribuição do título e fração de vazio ao longo do tubo para o teste 35.

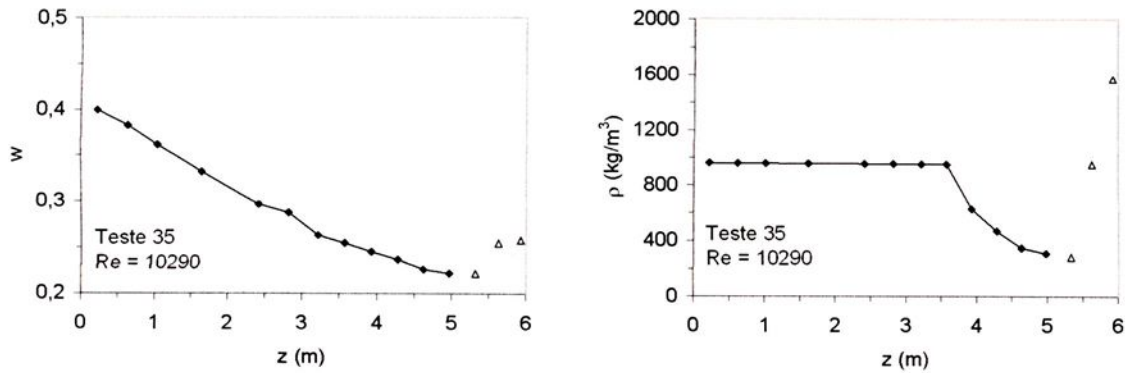


Figura F.105 – Distribuição da concentração e densidade ao longo do tubo para o teste 35.



MULTIPLICADORES BIFÁSICOS

Para melhor visualizar os resultados obtidos no escoamento da mistura óleo-refrigerante apresentados no Capítulo 6, foram plotados gráficos individuais de cada teste. Os pontos removidos dos dados em razão de produzirem um comportamento fisicamente inconsistente, foram excluídos destes gráficos. Os resultados são mostrados abaixo.

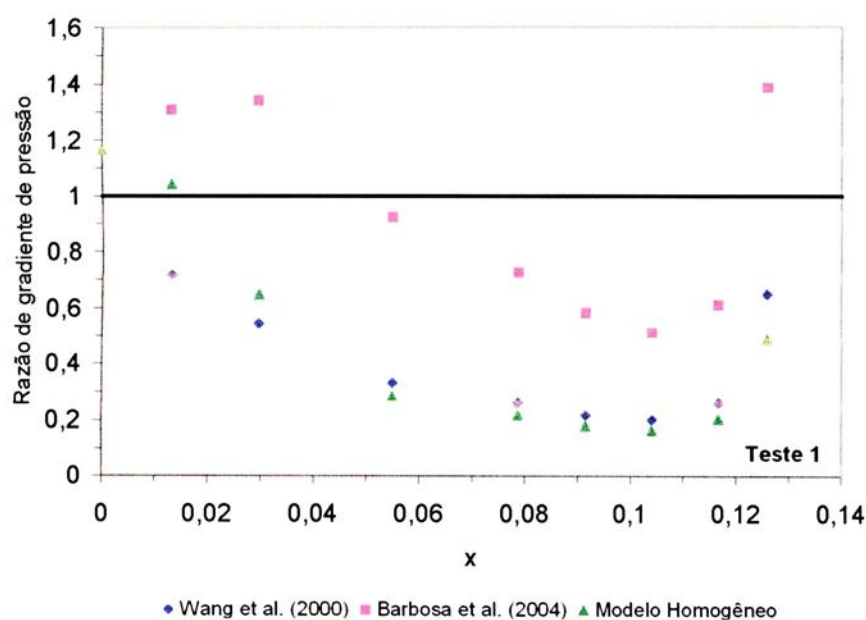


Figura G.1 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 01, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$.

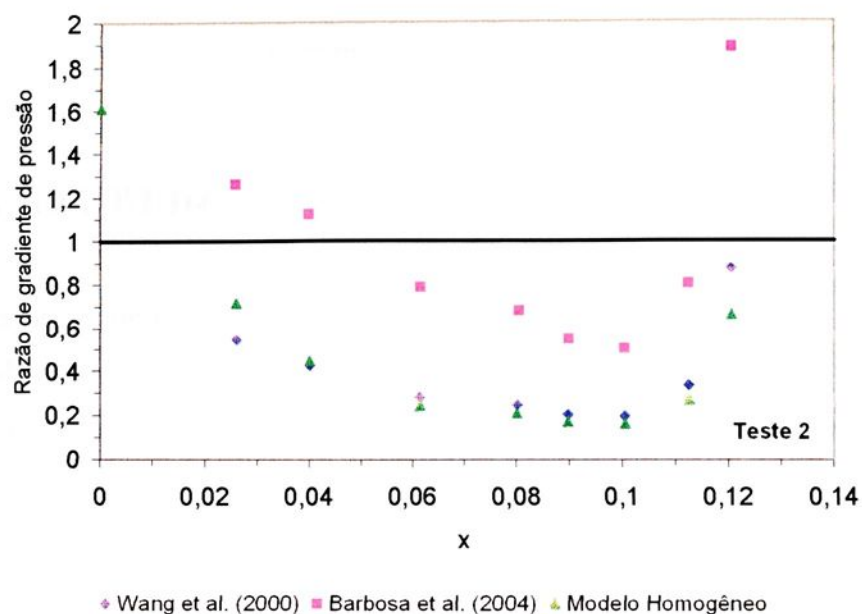


Figura G.2 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e Teórico para os testes 02, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$.

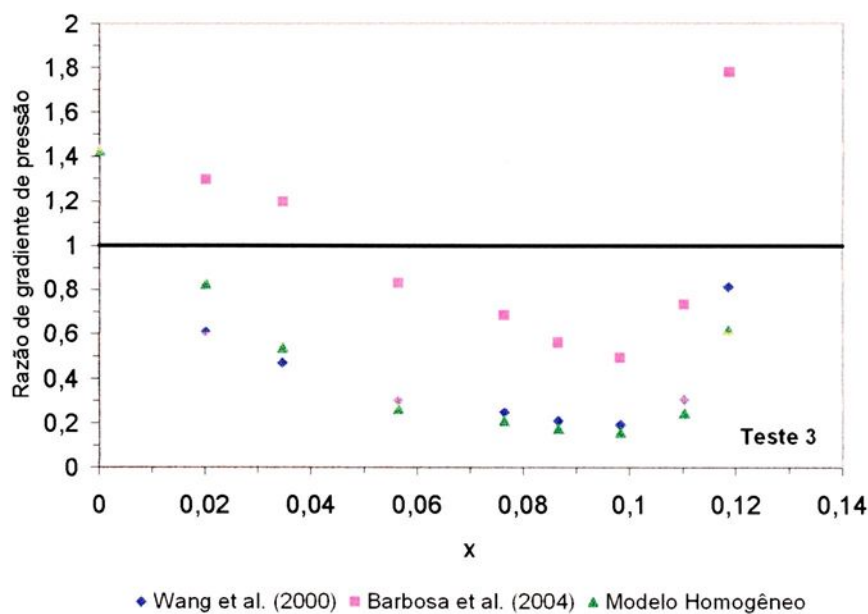


Figura G.3 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 03, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$.

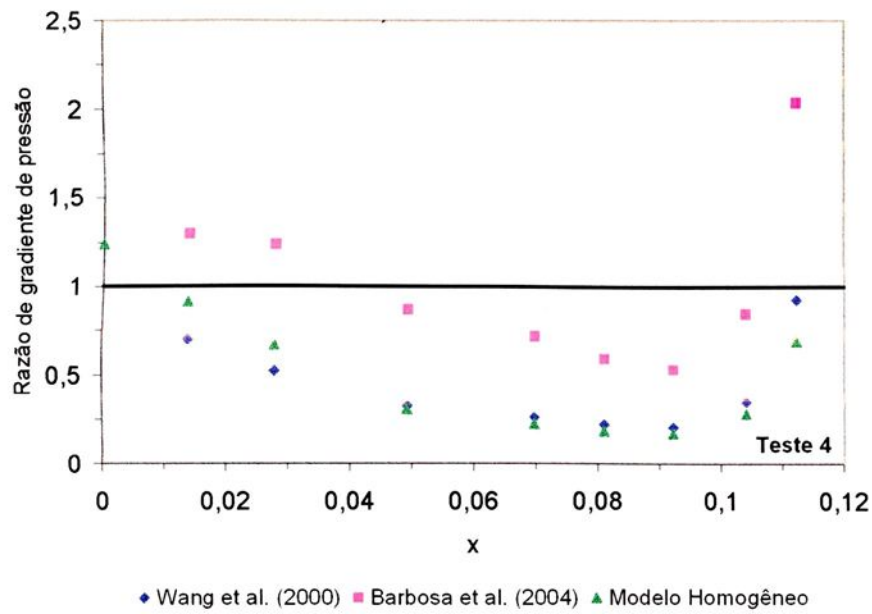


Figura G.4 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 04, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$.

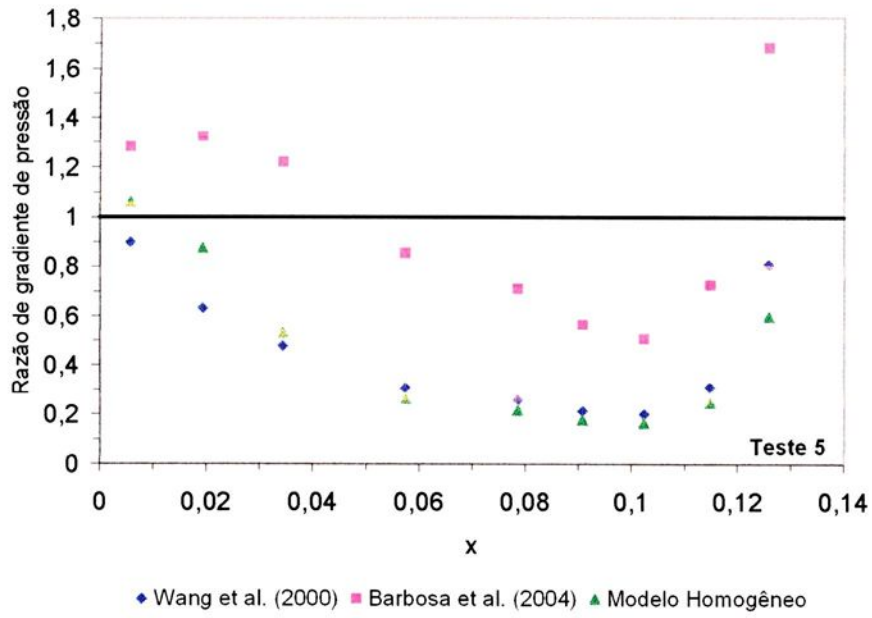


Figura G.5 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 05, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$.

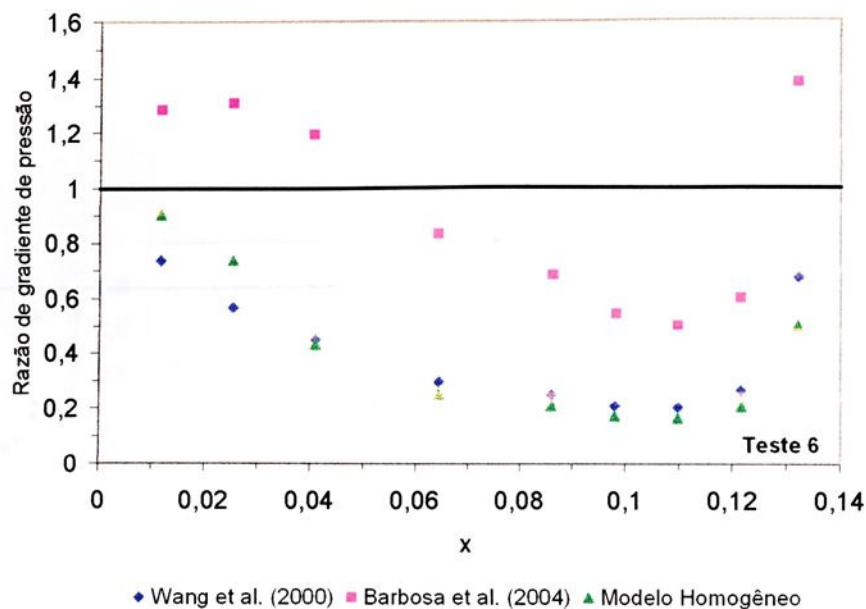


Figura G.6 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 06, $p_{TAP} = 4,5\text{bar}$.

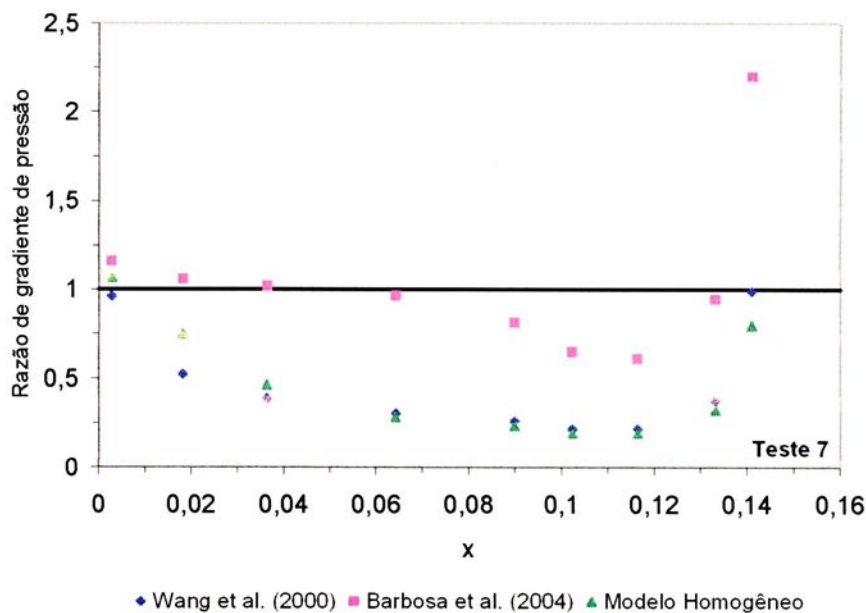


Figura G.7 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 07, $p_{TAP} = 5,0\text{ bar}$.

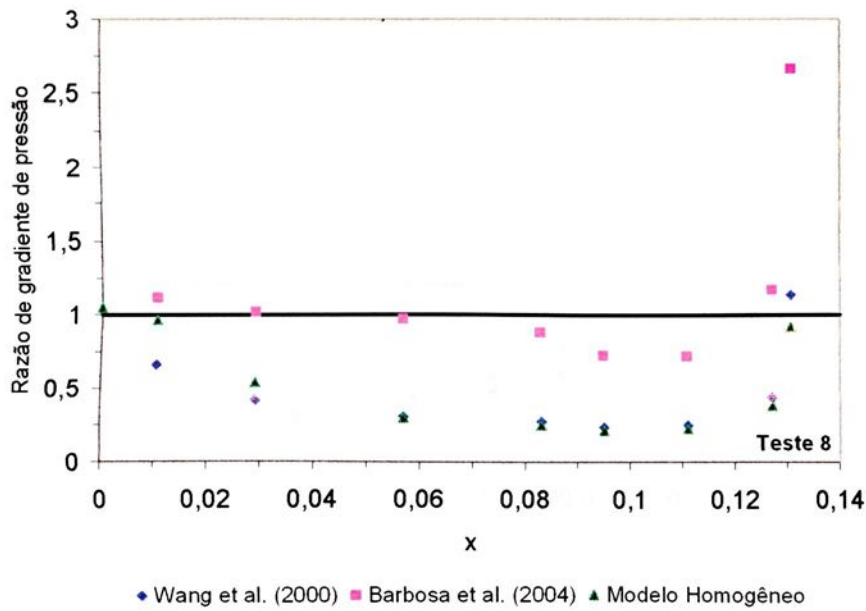


Figura G.8 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 08, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

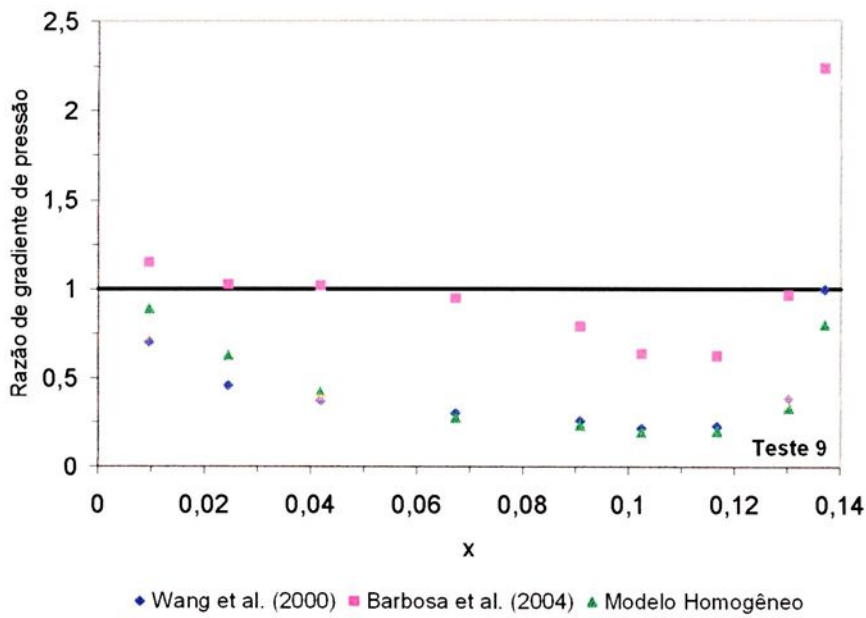


Figura G.9 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 09, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

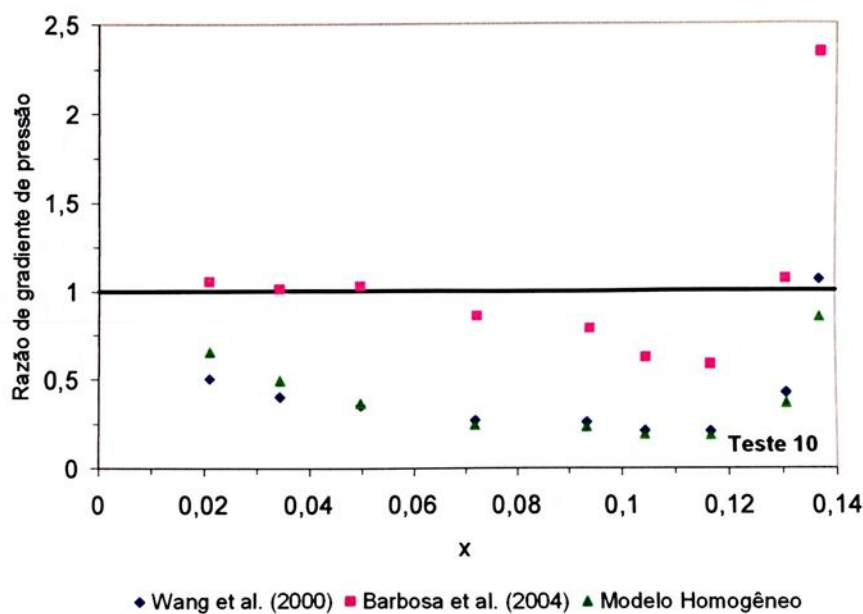


Figura G.10 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 10, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

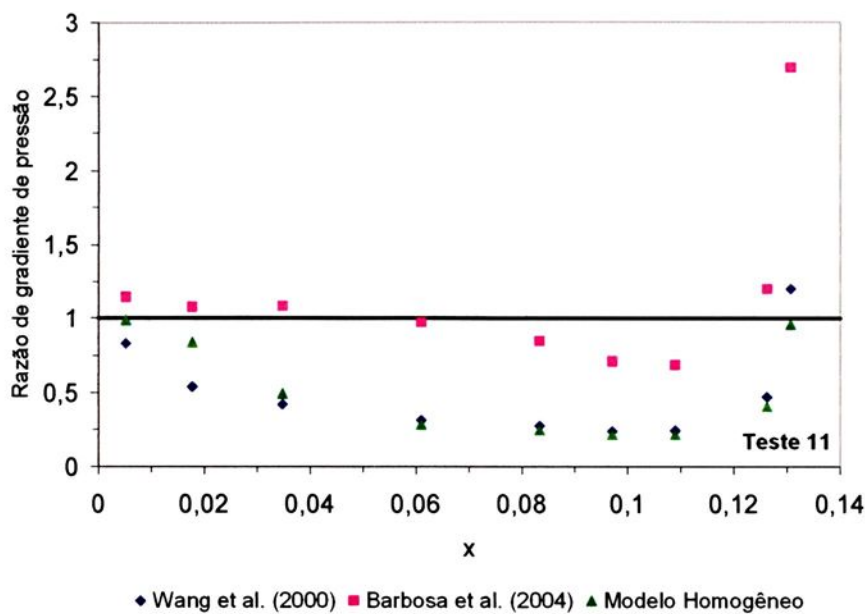


Figura G.11 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 11, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

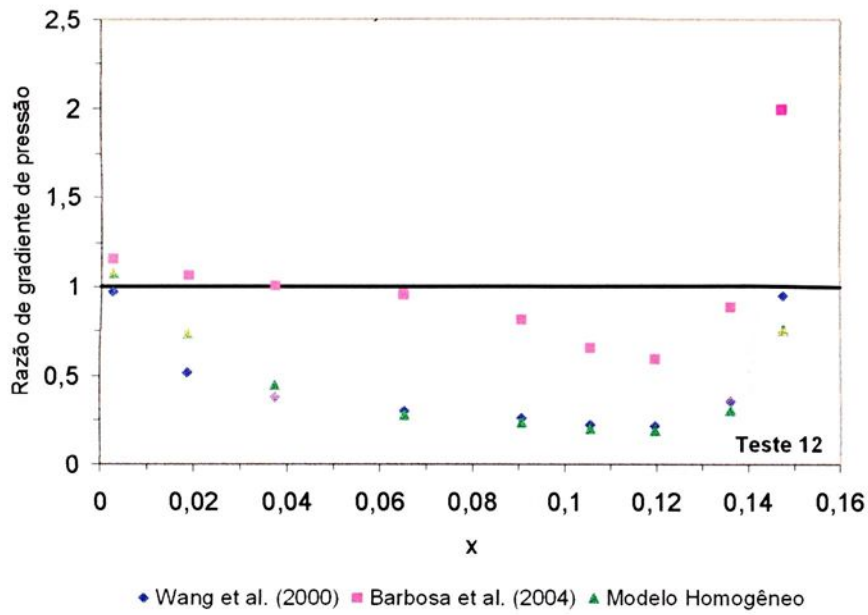


Figura G.12 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 12, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

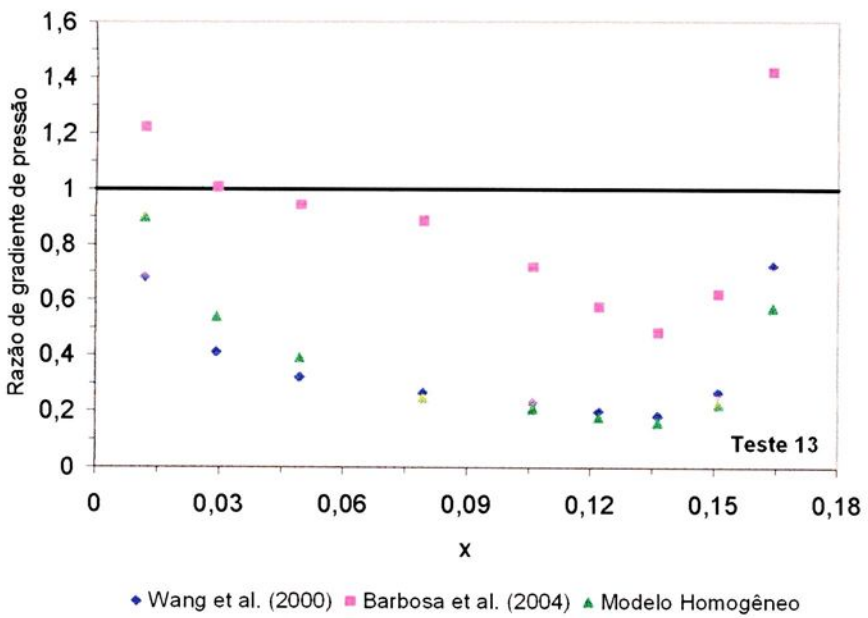


Figura G.13 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 13, $p_{TAP} = 5,0$ bar.

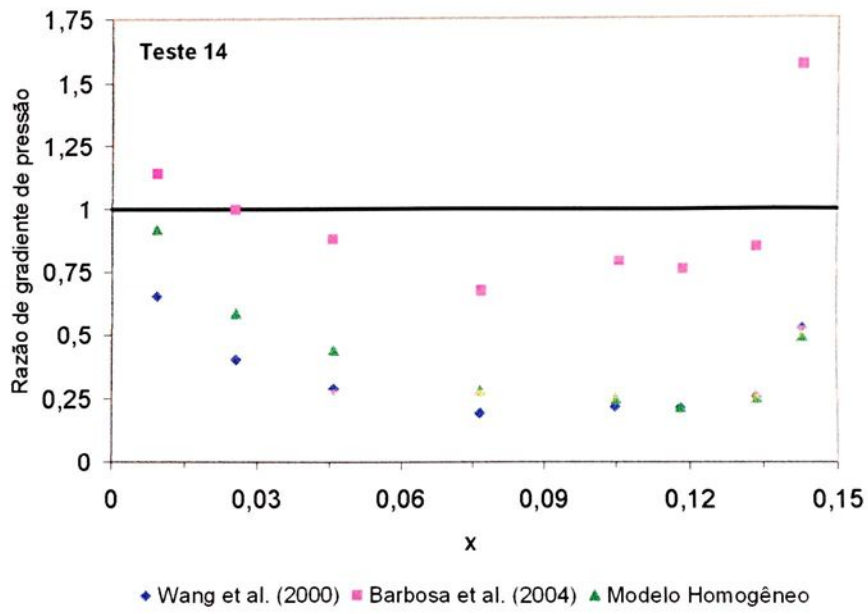


Figura G.14 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 14, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

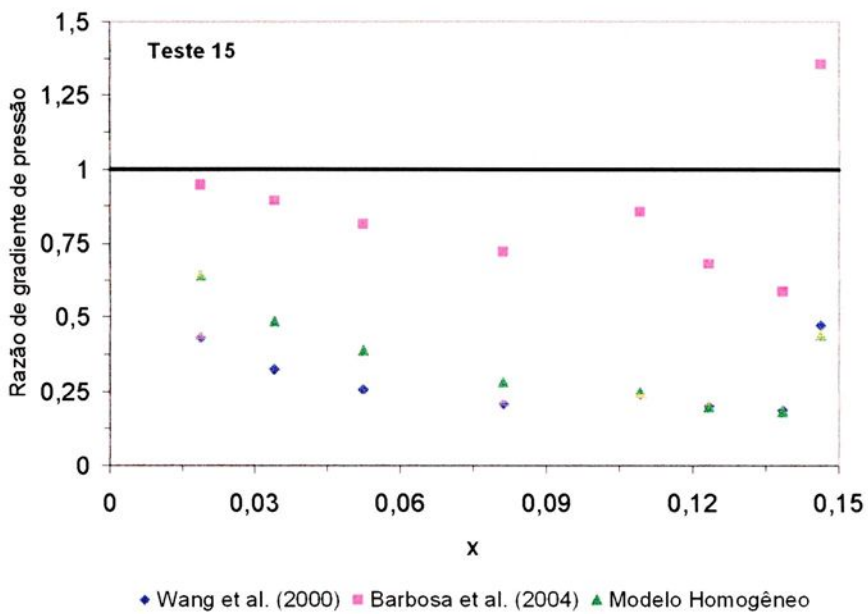


Figura G.15 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 15, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

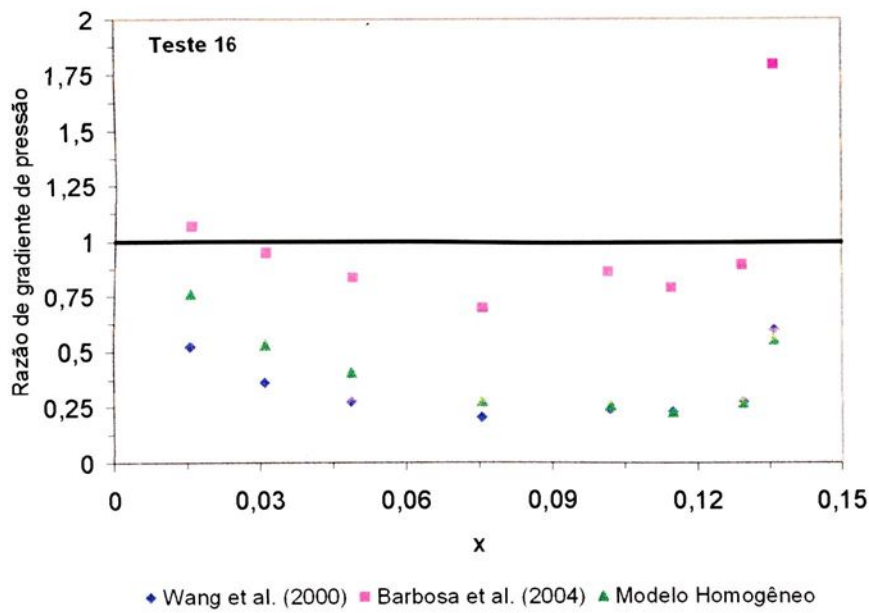


Figura G.16 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 16, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

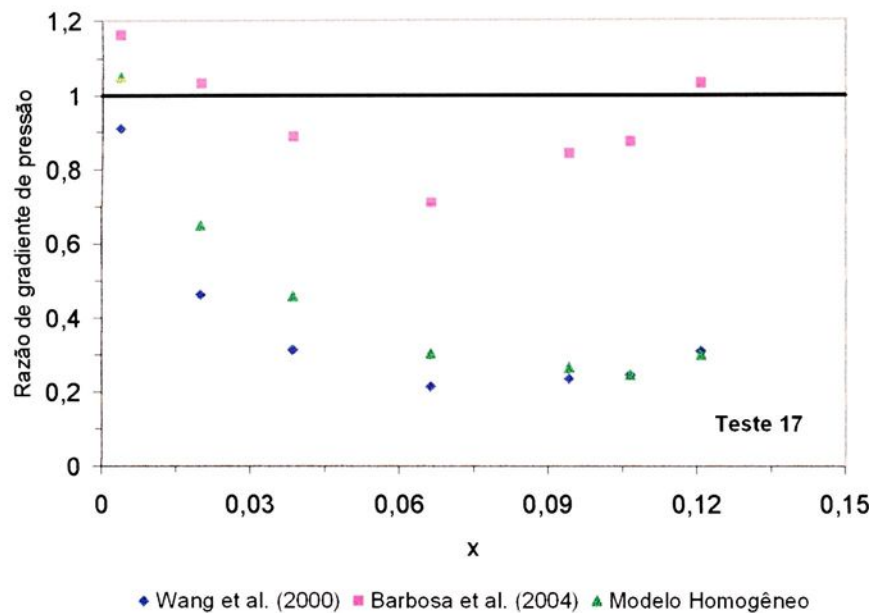


Figura G.17 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 17, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

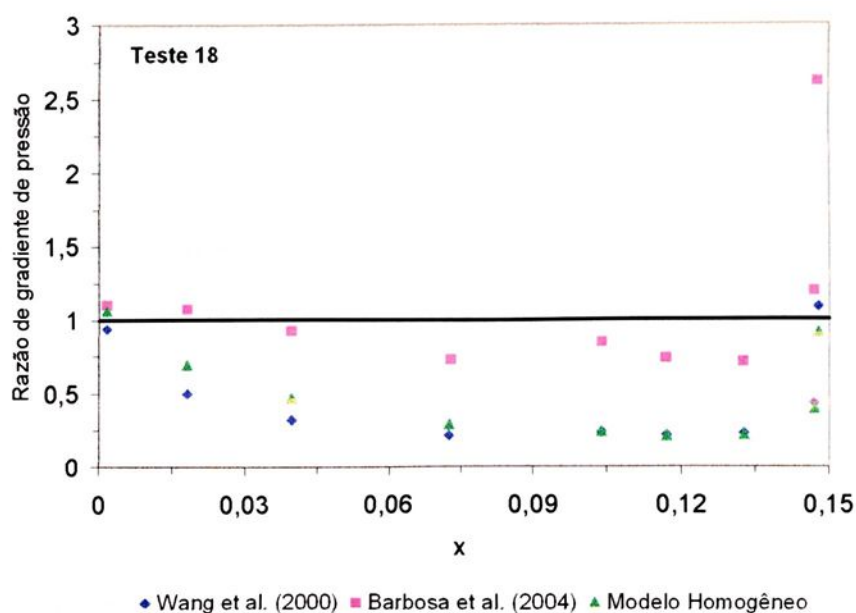


Figura G.18 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 18, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

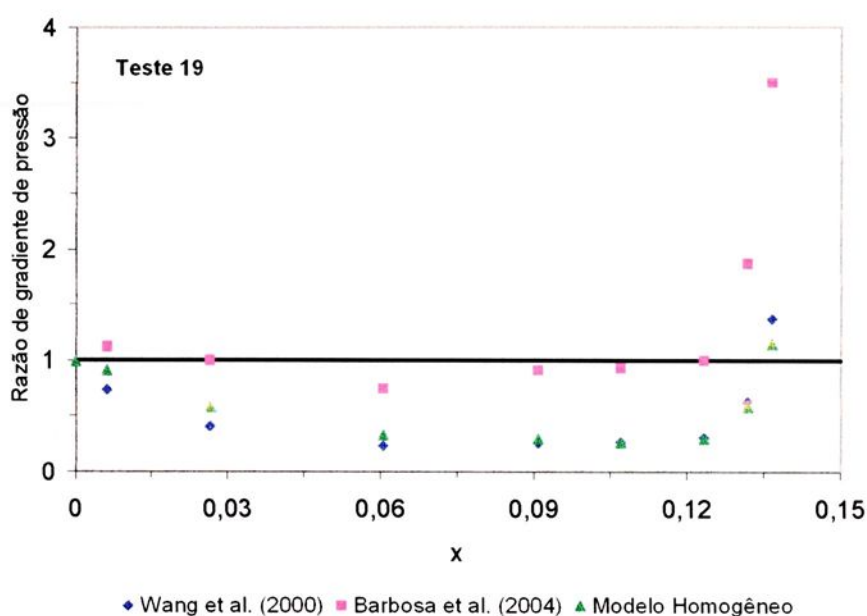


Figura G.19 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 19, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

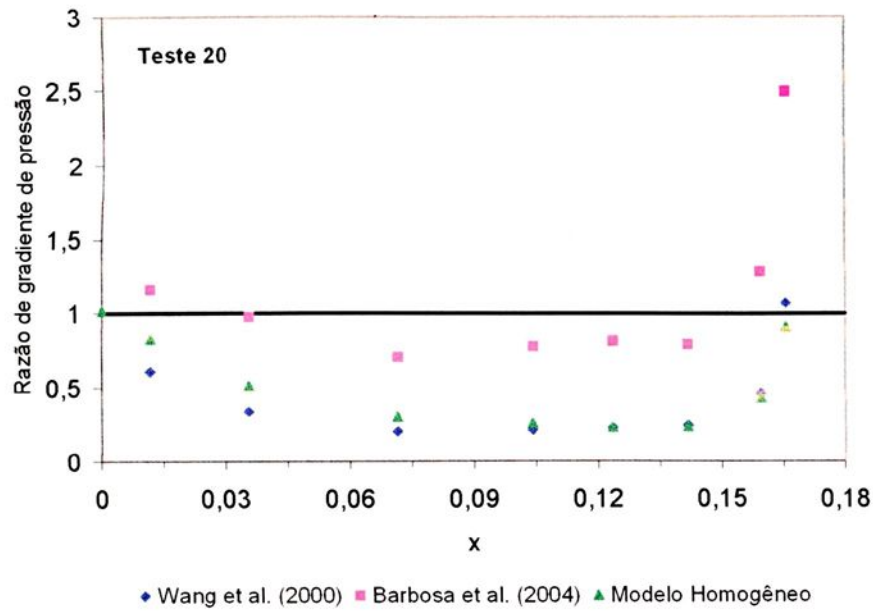


Figura G.20 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 20, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

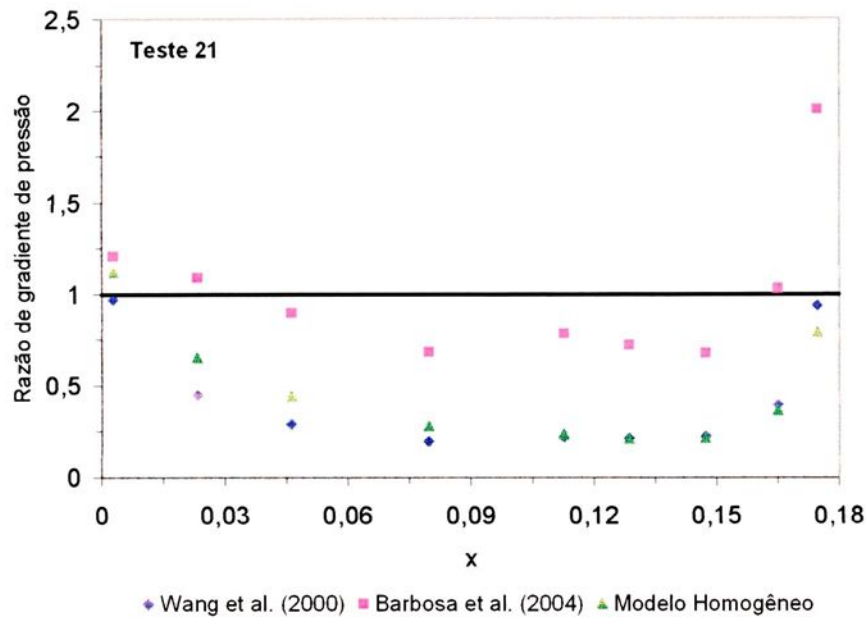


Figura G.21 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 21, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

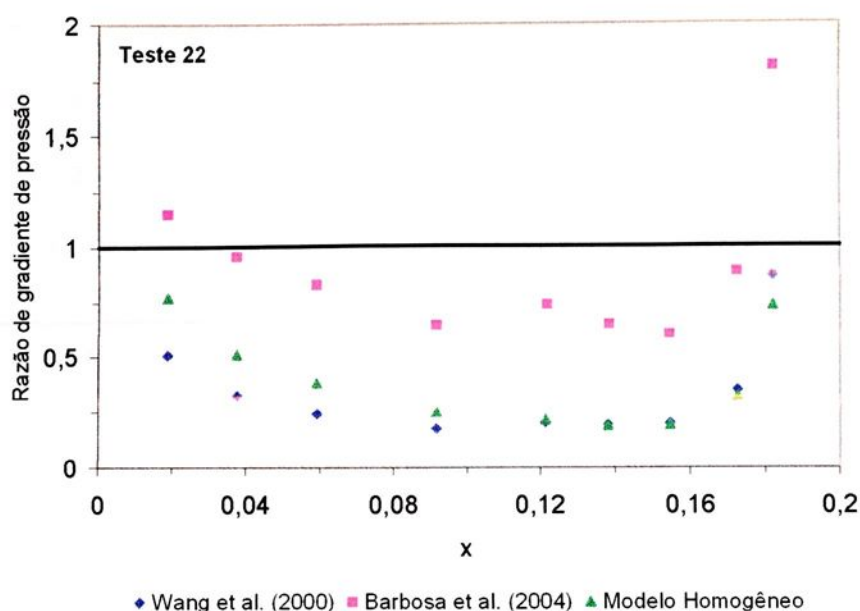


Figura G.22 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 22, $p_{TAP} = 5,5$ bar.

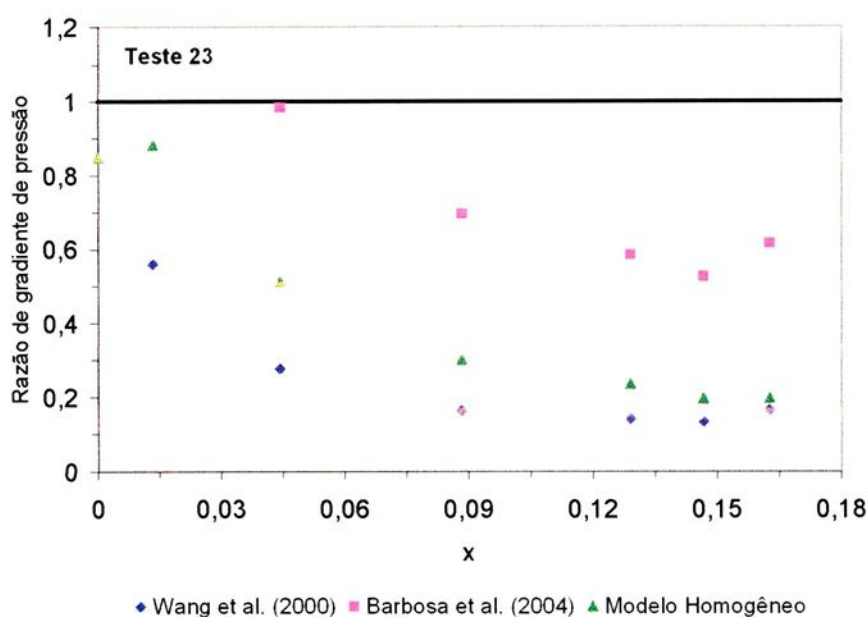


Figura G.23 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 23, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

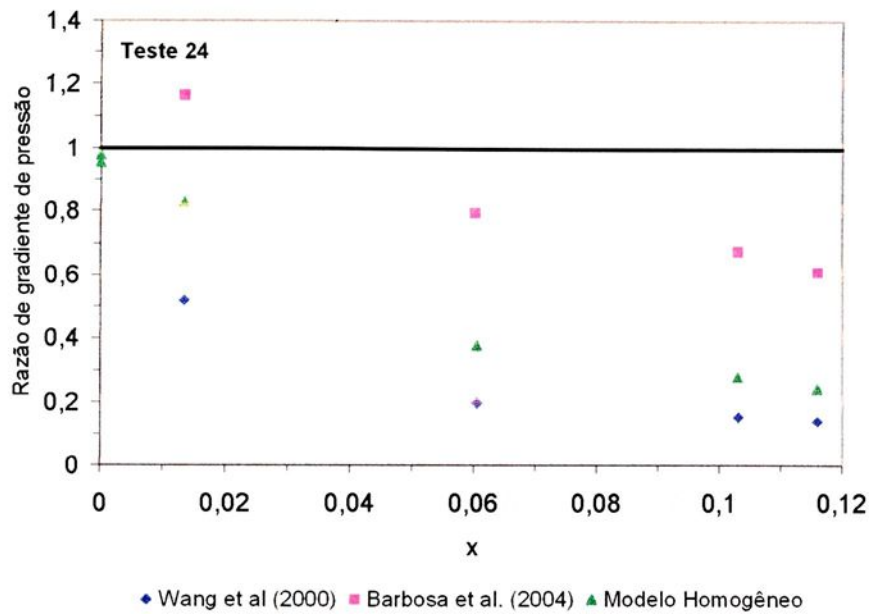


Figura G.24 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 24, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

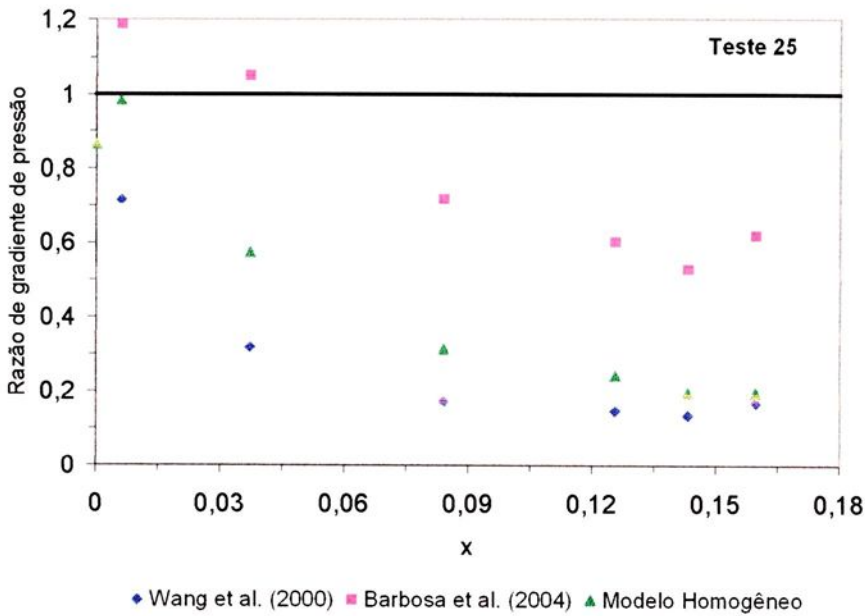


Figura G.25 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 25, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

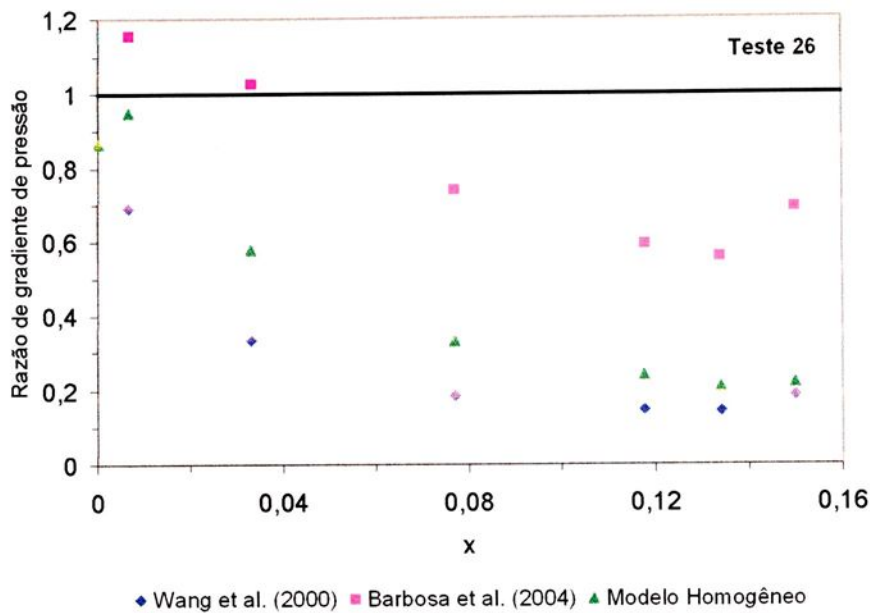


Figura G.26 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 26, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

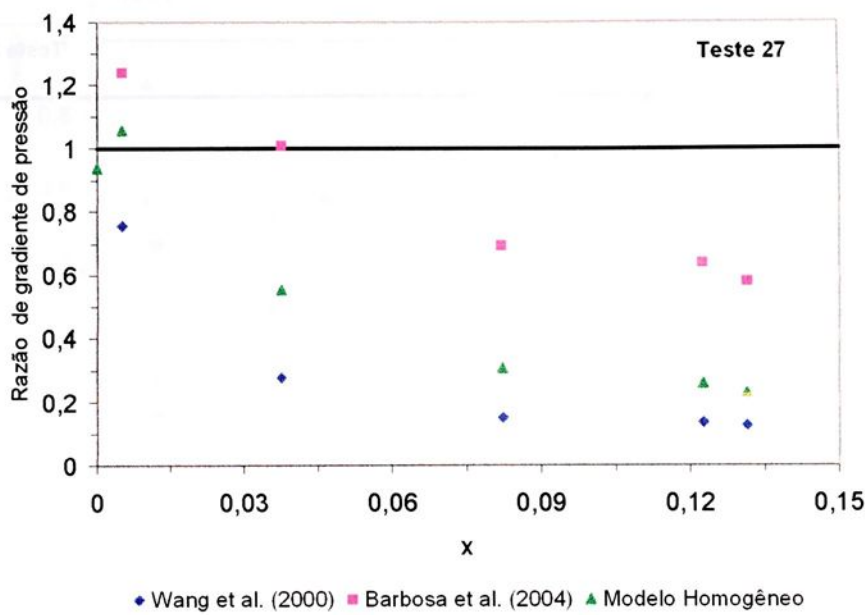


Figura G.27 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 27, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

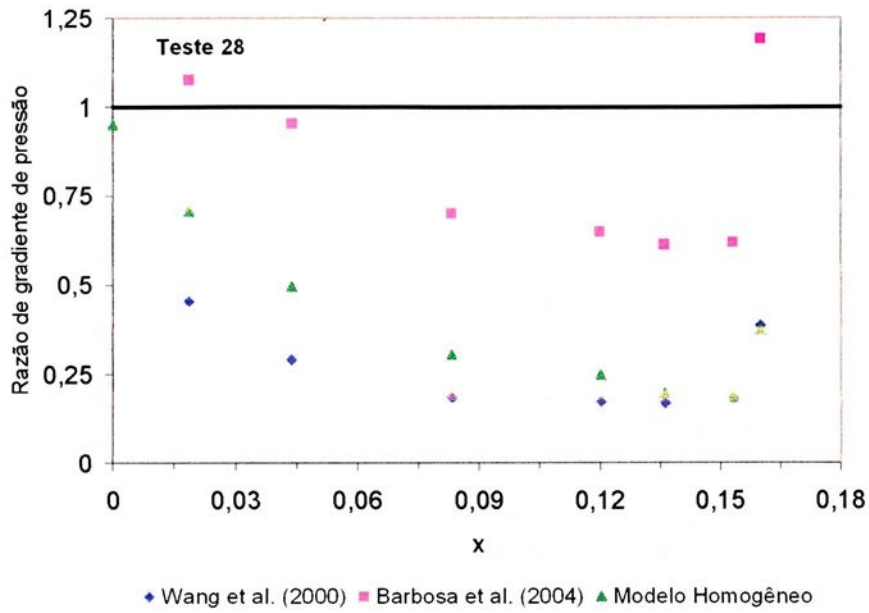


Figura G.28 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 28, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

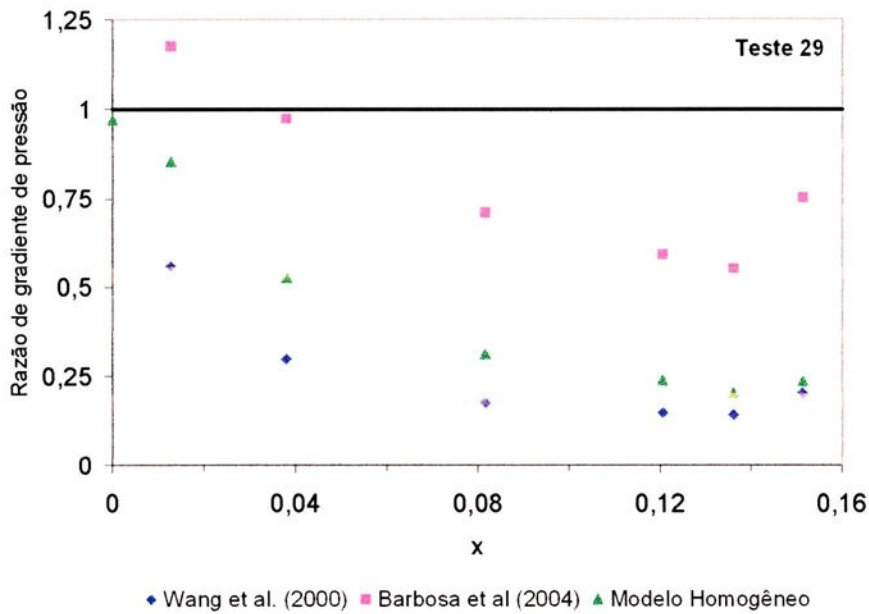


Figura G.29 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 29, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

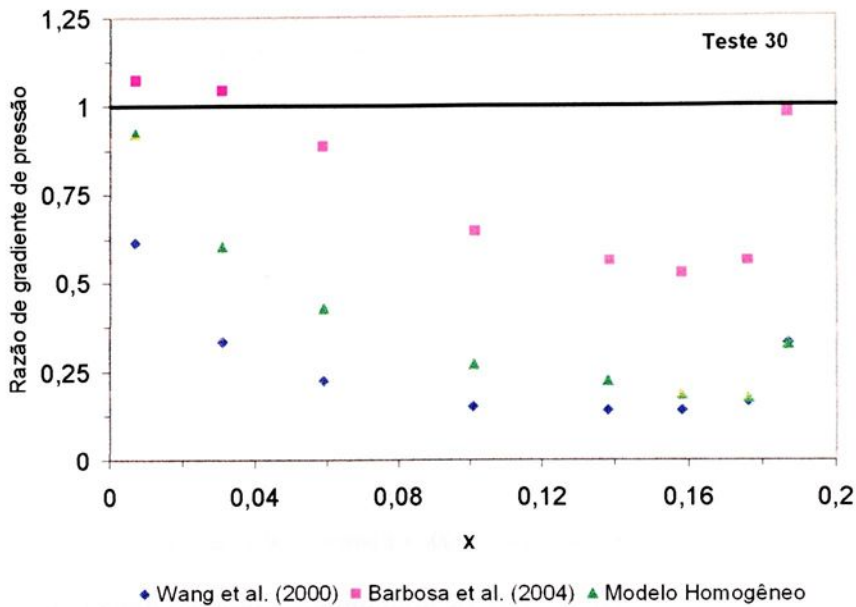


Figura G.30 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 30, $p_{TAP} = 6,0$ bar.

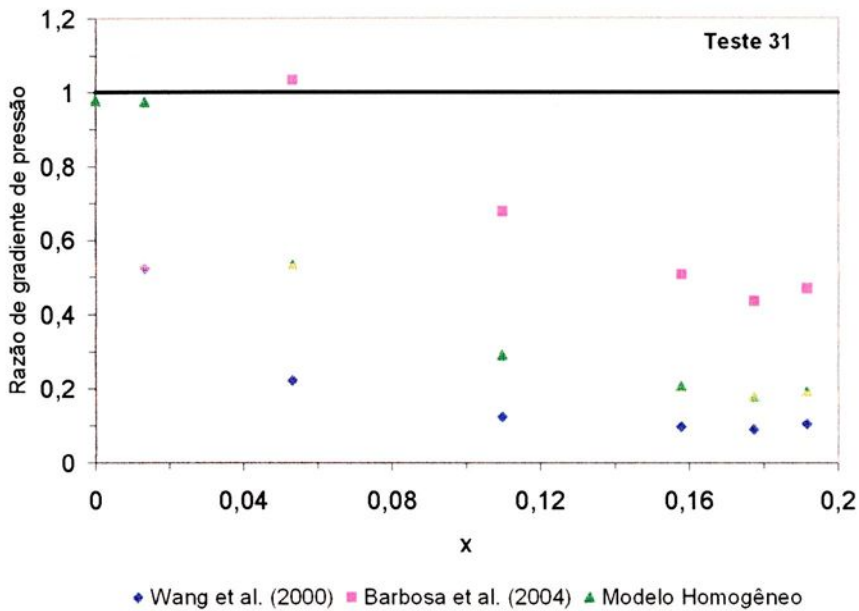


Figura G.31 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 31, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

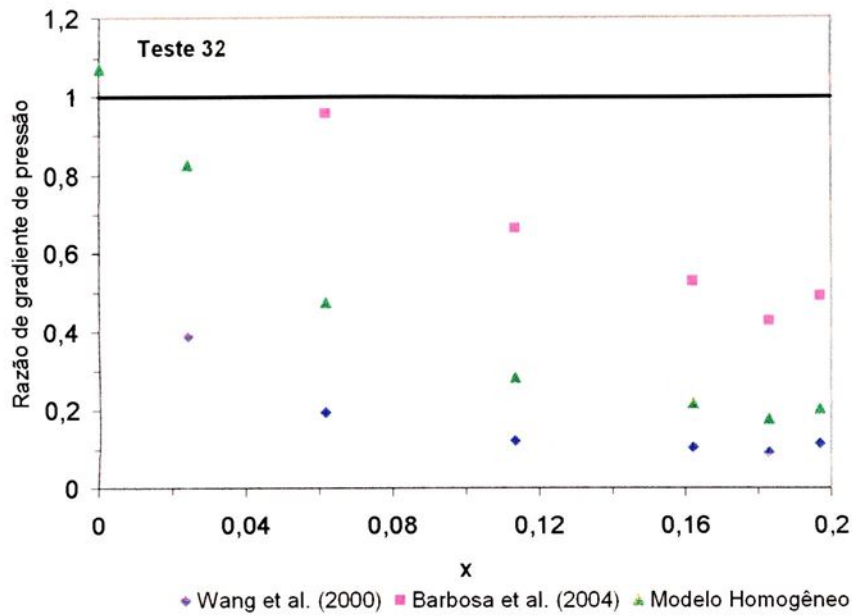


Figura G.32 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 32, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

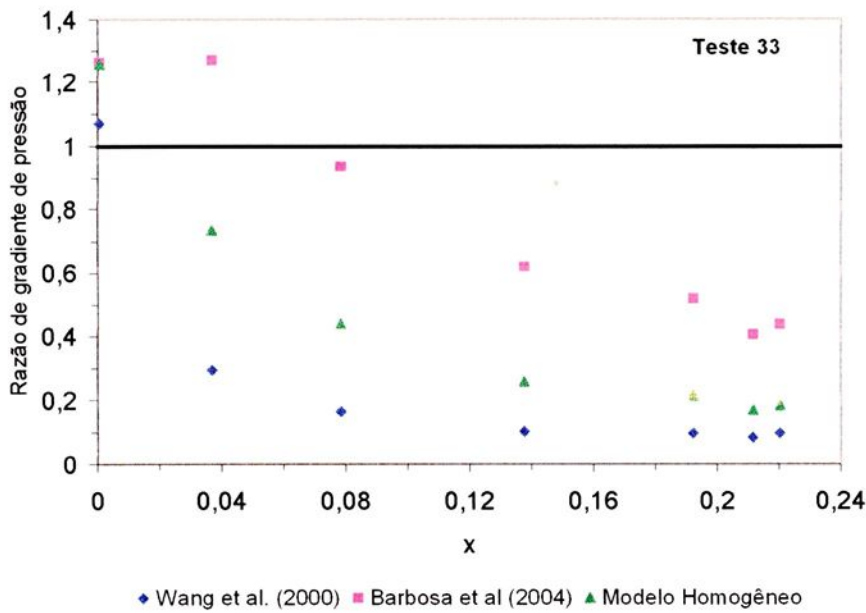


Figura G.33 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 33, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

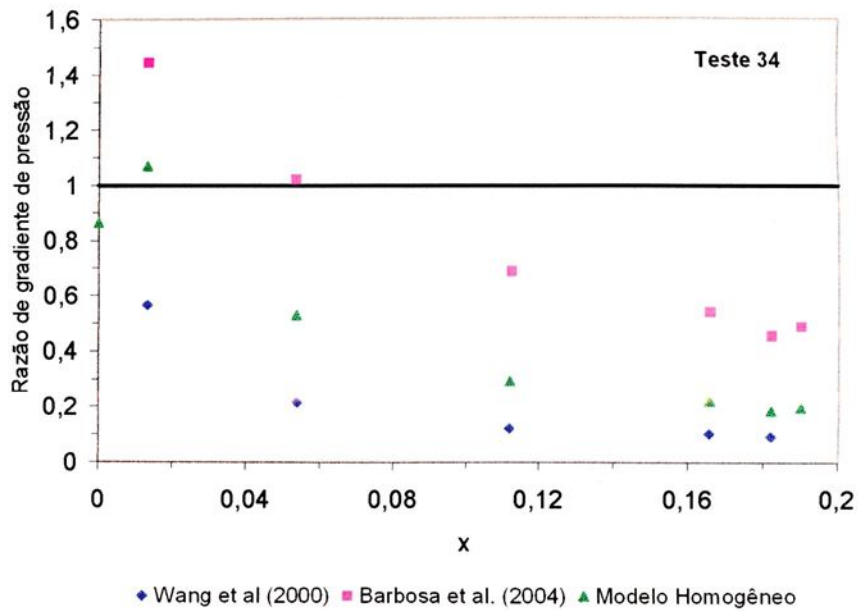


Figura G.34 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 34, $p_{TAP} = 6,5$ bar.

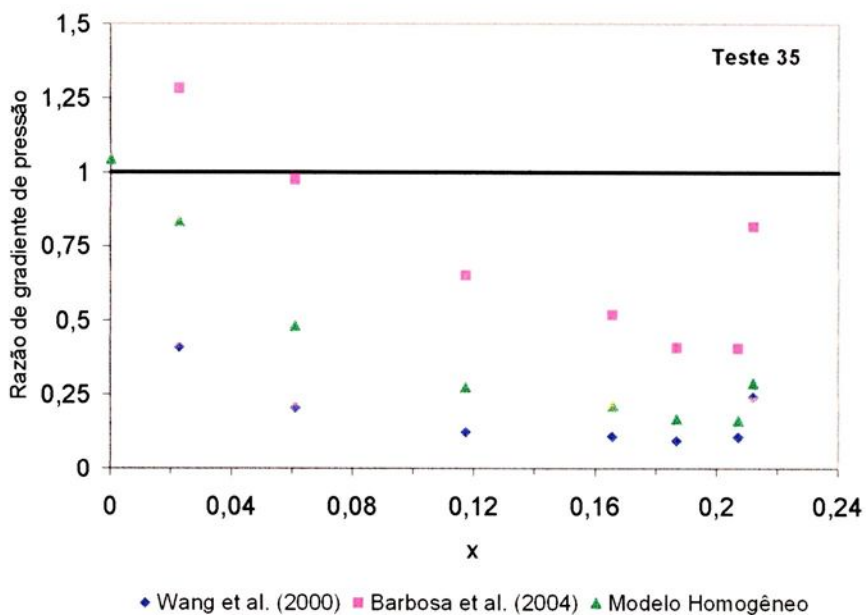


Figura G.35 – Comparação entre os gradientes de pressão devido ao atrito experimental e teórico para os testes 35, $p_{TAP} = 6,5$ bar.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Campus de Ilha Solteira
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica
Av. Brasil Centro, 56
CEP 15385-000 - Ilha Solteira - SP
www.dem.feis.unesp.br

