

**MODELAGEM DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO  
ATRAVÉS DE CHOKES**

**FRED JÚLIO CALIXTO**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF**  
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO – LENEP

MACAÉ - RJ  
DEZEMBRO - 2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

# **MODELAGEM DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO ATRAVÉS DE CHOKES**

FRED JÚLIO CALIXTO

Dissertação submetida ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Reservatório e de Exploração.

Orientador: Prof. Georgy Mitrofanov, Ph.D. - LENEP/CCT/UENF

**MACAÉ – RJ  
DEZEMBRO – 2009**

# MODELAGEM DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO ATRAVÉS DE CHOKES

FRED JÚLIO CALIXTO

Dissertação submetida ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Reservatório e de Exploração.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Georgy Mitrofanov, Ph.D. - LENEP/CCT/UENF (Orientador)

---

Prof. Viatcheslav Ivanovick Priimenko, Ph.D - LENEP/CCT/UENF

---

Prof. Carlos Enrique Pico Ortiz, Dr. - LENEP/CCT/UENF

---

Prof. Wellington Campos, Ph.D – Petrobrás (UN-RIO)

## AGRADECIMENTO

Primeiro a Deus, que me deu saúde, força, persistência e inteligência para que eu pudesse concluir este trabalho.

Ao meu orientador, PhD. Georgy Mitrofanov, pela orientação e pelo acolhimento durante esta jornada, tornando possível a execução deste trabalho.

Ao MSc. Divonsir Lopes (Petrobrás – UN-RIO) e PhD. Wellington Campos (Petrobrás – UN-RIO), pelas dicas importantes, pela paciência e disponibilidade para a realização deste trabalho, principalmente durante o estudo dos dados experimentais.

Ao MSc. Ivan Slobodcicov (Petrobrás – Cenpes) e a Petrobrás, pela orientação na utilização dos dados experimentais, tendo um papel importante para o estudo comparativo realizado neste trabalho.

Ao Dr. Carlos Enrique Pico Ortiz (LENEP/CCT/UENF) pela orientação e auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, principalmente aos meus pais e à minha irmã, que me deram todo o suporte para que eu alcançasse mais este objetivo na minha vida profissional e pessoal.

À Camila Condé, minha namorada, que me encorajou, incentivou e ajudou durante os últimos oito meses, e fez possível finalizar este trabalho. Também, por todo o seu carinho e preocupação neste mútuo objetivo.

À todos os professores, funcionários e alunos do Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo (LENEP/CCT/UENF), que, de alguma forma, participaram deste trabalho.

E por último, aos amigos, Júlio Valença, Lorena Caliman e Antônio Zacchi, pelas dicas e companhia durante vários dias de estudo.

## SUMÁRIO

Capítulo 1 – <b>INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
Capítulo 2 - <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>04</b>
2.1 <i>CHOKES</i> : TIPOS E APLICAÇÕES	<b>04</b>
2.2 REGIME DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO	<b>07</b>
2.3 MODELOS DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO	<b>15</b>
2.4 MODELO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO ATRAVÉS DE <i>CHOKES</i>	<b>35</b>
Capítulo 3 – <b>MATERIAIS UTILIZADOS PARA A MODELAGEM DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO ATRAVÉS DO CHOKE</b>	<b>44</b>
3.1 MEDIÇÃO DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO UTILIZANDO MEDIDORES DE PRESSÃO DIFERENCIAL	<b>44</b>
3.2 CIRCUITO DE TESTES EXPERIMENTAIS	<b>45</b>
3.3 PARÂMETROS DE ENTRADA E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS NO CIRCUITO DE TESTES	<b>47</b>
3.3.1 PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O CIRCUITO DE TESTES	<b>47</b>
3.3.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS A MONTANTE DO <i>CHOKE</i> NO CIRCUITO DE TESTES	<b>50</b>
3.3.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS A JUSANTE DO <i>CHOKE</i> NO CIRCUITO DE TESTES	<b>55</b>
Capítulo 4 – <b>MÉTODOS UTILIZADOS PARA A MODELAGEM DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO ATRAVÉS DO CHOKE</b>	<b>62</b>
4.1 OBTENÇÃO DOS VALORES DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA PARA O MODELO DE SACHDEVA <i>ET AL.</i> (1986) A PARTIR DOS DADOS EXPERIMENTAIS	<b>62</b>
4.2 EQUAÇÕES DO MODELO DE SACHDEVA <i>ET AL.</i> (1986) PARA A MODELAGEM DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO A PARTIR DOS DADOS EXPERIMENTAIS	<b>71</b>
4.3 SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO NÃO LINEAR PARA A ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO CRÍTICO, SUBCRÍTICO E O LIMITE ENTRE ELES	<b>72</b>
4.3.1 CARACTERÍSTICAS DA EQUAÇÃO PRINCIPAL	<b>72</b>

4.3.2 SELEÇÃO DO MÉTODO PARA A SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO NÃO LINEAR	74
4.4 PROGRAMA DE ANÁLISE DE DADOS E MODELAGEM PARA CARACTERÍSTICAS DE ESCOAMENTO CRÍTICO, SUBCRÍTICO E O LIMITE ENTRE ELES	78
4.4.1 O PROGRAMA	78
4.4.2 ESQUEMA DE BLOCOS PARA O PROGRAMA	79
Capítulo 5 - <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	84
5.1 DETERMINAÇÃO DO TIPO DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO	84
5.2 RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA DA MISTURA A JUSANTE DO <i>CHOKE</i>	87
5.3 RESULTADOS DE FLUXO MÁSSICO A JUSANTE DO <i>CHOKE</i>	89
5.4 RESULTADOS DE VAZÃO MÁSSICA A JUSANTE DO <i>CHOKE</i> PARA AS FASES LÍQUIDA E GASOSA	92
Capítulo 6 – <b>CONCLUSÕES</b>	100
<b>APÊNDICE A</b>	102
TABELA A.1: VALORES DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA CADA PONTO EXPERIMENTAL	102
<b>APÊNDICE B</b>	103
TABELA B.1: PROGRAMA DE CÓDIGO PARA “PAP-css” NA LINGUAGEM <i>FORTRAN</i>	106
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	130

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Componentes de um poço de petróleo.	04
Figura 2.2: Esquema do <i>choke</i> .	05
Figura 2.3: Porta orifícios tipo positivo.	06
Figura 2.4: <i>Choke</i> ajustável.	06
Figura 2.5: Padrões de escoamento vertical multifásico.	07
Figura 2.6: Padrões de escoamento horizontal multifásico.	09
Figura 2.7: Esquema simplificado do sistema de medição.	12
Figura 2.8: Pontos experimentais representados no mapa de padrões de Hewitt e Roberts (1969) – Escoamento vertical.	12
Figura 2.9: Pontos experimentais representados no mapa de padrões de Baker (1954) - Escoamento horizontal.	13
Figura 2.10: Fator de escorregamento experimental.	14
Figura 2.11: Processo simplificado e diagrama de instrumento <i>MPFL</i> .	18
Figura 2.12: Arranjo das válvulas para detecção do escoamento crítico e subcrítico.	19
Figura 2.13: Indicativo do sinal de pressão do escoamento subcrítico, de acordo com a queda de pressão de aproximadamente 4 bar, no intervalo de tempo entre 25 a 45 segundos.	19
Figura 2.14: Indicativo do sinal de pressão do escoamento crítico, de acordo com o valor constante da pressão em função do tempo.	20
Figura 2.15: Vazão mássica prevista versus medida pelo modelo Schuller.	20
Figura 2.16: Valores calculados versus medidos para vazão mássica em condições de escoamento crítico e subcrítico.	28
Figura 2.17: Comparação do limite de escoamento crítico previsto com os dados experimentais.	33
Figura 2.18: Vazão mássica prevista versus medida em laboratório para o modelo slip.	33
Figura 2.19: Vazão mássica prevista versus medida em campo para o modelo slip.	34
Figura 2.20: Seção do <i>choke</i> .	35
Figura 2.21: Relação de pressão crítica versus gás livre.	42
Figura 3.1: Esquema do circuito de testes experimentais.	45
Figura 3.2: Trecho de mistura gás-líquido.	47
Figura 3.3: Vazão de líquido por experimento.	48
Figura 3.4: Percentual de <i>BSW</i> e <i>GVF</i> por experimento.	48
Figura 3.5: Pressão a montante e a jusante do <i>choke</i> por experimento.	49
Figura 3.6: Temperatura a montante e a jusante do <i>choke</i> por experimento.	49

Figura 3.7: Razão de solubilidade a montante do <i>choke</i> por experimento.	51
Figura 3.8: Fator de compressibilidade a montante do <i>choke</i> por experimento.	51
Figura 3.9: Fator volume formação de óleo, água e gás a montante do <i>choke</i> por experimento.	52
Figura 3.10: Vazão de óleo e gás dissolvido a montante do <i>choke</i> por experimento.	54
Figura 3.11: Vazão de água a montante do <i>choke</i> por experimento.	54
Figura 3.12: Vazão de gás livre a montante do <i>choke</i> por experimento.	55
Figura 3.13: Razão de solubilidade a jusante do <i>choke</i> por experimento.	56
Figura 3.14: Fator de compressibilidade a jusante do <i>choke</i> por experimento.	57
Figura 3.15: Fator volume formação de óleo, água, gás a jusante do <i>choke</i> por experimento.	57
Figura 3.16: Vazão de óleo e gás dissolvido a jusante do <i>choke</i> por experimento.	60
Figura 3.17: Vazão de água a jusante do <i>choke</i> por experimento.	60
Figura 3.18: Vazão de gás livre a jusante do <i>choke</i> por experimento.	61
Figura 4.1: Valores da razão de calor específico por experimento.	63
Figura 4.2: Valores da fração de gás a montante do <i>choke</i> por experimento.	65
Figura 4.3: Valores de volume específico do líquido a montante do <i>choke</i> por experimento.	66
Figura 4.4: Valores de volume específico do gás a montante e a jusante do <i>choke</i> por experimento.	67
Figura 4.5: Valores do expoente politrópico para o gás por experimento.	68
Figura 4.6: Valores de massa específica da mistura a jusante do <i>choke</i> por experimento.	69
Figura 4.7: Valores da vazão mássica do gás a jusante do <i>choke</i> por experimento.	70
Figura 4.8: Valores da vazão mássica do líquido a jusante do <i>choke</i> por experimento.	71
Figura 4.9: Valores calculados pela função normalizada $f$ para o ponto experimental 21.	74
Figura 4.10: Exemplo de interação no método da bisseção para determinar zero para função normalizada $f$ correspondente ao ponto experimental 21.	76
Figura 4.11: Exemplo das três primeiras repetições da aplicação do método da secante para determinar zero da função normalizada $f$ correspondente ao ponto experimental 21.	77
Figura 4.12: Os menus principais e as funções do programa "PAP-css".	79
Figura 4.13: Os elementos principais e o diagrama de blocos do programa "PAP-css".	79

Figura 4.14: Exemplo da apresentação do resultado em uma janela especial que foi preparada dentro do programa correspondente ao ponto experimental 21.	81
Figura 4.15: Apresentação dos resultados experimentais (cor vermelha) e os calculados (cor azul) e a diferença entre seus valores, janelas 2 e 3 respectivamente.	82
Figura 4.16: Análise da relação entre os resultados experimentais e os valores calculados para o parâmetro de massa específica da mistura a jusante do <i>choke</i> .	83
Figura 5.1: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com o valor calculado da razão da pressão a jusante pela a montante do <i>choke</i> no escoamento crítico para o ponto experimental 10.	85
Figura 5.2: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com o valor calculado da razão da pressão a jusante pela a montante do <i>choke</i> no escoamento subcrítico para o ponto experimental vinte e um (21).	85
Figura 5.3: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com o valor calculado da razão da pressão a jusante pela a montante do <i>choke</i> no limite do escoamento crítico-subcrítico para o ponto experimental 54.	86
Figura 5.4: Valores calculados utilizando o programa computacional “PAP-css” da razão da pressão a jusante pela a montante do <i>choke</i> para todos os pontos experimentais.	87
Figura 5.5: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com os valores calculados neste trabalho (linha azul) e os resultados experimentais (linha vermelha) de massa específica da mistura a jusante do <i>choke</i> por experimento.	88
Figura 5.6: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com a relação entre os valores calculados nesse trabalho e os resultados experimentais de massa específica da mistura a jusante do <i>choke</i> .	88
Figura 5.7: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” apresentando a diferença entre os valores calculados e os resultados experimentais de massa específica da mistura a jusante do <i>choke</i> .	89
Figura 5.8: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com os valores calculados neste trabalho (linha azul) e os resultados experimentais (linha vermelha) de fluxo mássico a jusante do <i>choke</i> por experimento.	90
Figura 5.9: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” apresentando a diferença entre os valores calculados e os resultados experimentais de fluxo mássico a jusante do <i>choke</i> por experimento.	91
Figura 5.10: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com a relação entre os valores calculados neste trabalho e os resultados experimentais de fluxo mássico a jusante do <i>choke</i> .	91
Figura 5.11: Gráfico com os valores de velocidade a jusante do <i>choke</i> por experimento.	93

Figura 5.12: Gráfico com os valores de massa específica a jusante do <i>choke</i> para a fase gasosa por experimento.	94
Figura 5.13: Gráfico com os valores de massa específica a jusante do <i>choke</i> para a fase líquida por experimento.	94
Figura 5.14: Gráfico com os valores das áreas do escoamento a jusante do <i>choke</i> para fase líquida e gasosa por experimento.	96
Figura 5.15: Gráfico com os valores de vazão mássica a jusante do <i>choke</i> para a fase líquida por experimento.	97
Figura 5.16: Gráfico com os valores de vazão mássica a jusante do <i>choke</i> para fase gasosa por experimento.	97
Figura 5.17: Gráfico com a relação entre os valores calculados neste trabalho e os resultados experimentais de vazão mássica líquida a jusante do <i>choke</i> por experimento.	98
Figura 5.18: Gráfico com a relação entre os valores calculados neste trabalho e os resultados experimentais de vazão mássica gasosa a jusante do <i>choke</i> por experimento.	98

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1: Fator de escorregamento calculado pela equação (2.2.2) para o escoamento vertical e horizontal	14
Tabela 2.2: Valores das constantes de correlação (Surbey <i>et al.</i> , 1989)	17
Tabela 4.1: Capacidade Calorífica de gases no estado de gás ideal	63
Tabela A.1: Valores das variáveis de entrada do programa computacional para cada ponto experimental	102
Tabela B.1: Programa de código para “PAP-css” na linguagem <i>FORTTRAN</i>	106

## NOMENCLATURA

$A$	Área, ft <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]
$A_c$	Área de seção do <i>choke</i> , in <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]
$A_G$	Área do gás, ft <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]
$A_L$	Área do líquido, ft <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]
$A_1$	Área a montante do <i>choke</i> , ft <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]
$A_2$	Área a jusante do <i>choke</i> , ft <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]
$A'$	Área da garganta do venturi ou placa de orifício, in <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]
$a$	Constante Tabela 2.2
$B$	Constante Tabela 2.2
$B$	Coeficiente equação 2.3.3
$B_o$	Fator volume formação do óleo, ft <sup>3</sup> /ft <sup>3</sup> std [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> std]
$B_G$	Fator volume formação do gás, ft <sup>3</sup> /ft <sup>3</sup> std [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> std]
$B_w$	Fator volume formação da água, ft <sup>3</sup> /ft <sup>3</sup> std [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> std]
$BSW$	Percentual de água e sedimentos presentes no fluido, adimensional
$C$	Constante Tabela 2.2
$C'$	Coeficiente equação 2.3.50
$C_D$	Coeficiente de descarga
$C_L$	Calor específico do líquido, ft lbf/lbm °F [KJ/kg/K]
$C_p$	Calor específico do gás em pressão constante, ft lbf/lbm °F [KJ/kg/K]
$C_v$	Calor específico do gás em volume constante, ft lbf/lbm °F [KJ/kg/K]
$C_{vo}$	Calor específico do óleo em volume constante, ft lbf/lbm °F [KJ/kg/K]
$C_{vG}$	Calor específico do gás em volume constante, ft lbf/lbm °F [KJ/kg/K]
$C_{vw}$	Calor específico da água em volume constante, ft lbf/lbm °F [KJ/kg/K]
$c$	Coeficiente equação 2.3.3
$D$	Constante Tabela 2.2
$d$	Diâmetro, ft [m]
$d_c$	Diâmetro do <i>choke</i> , ft [m]
$d_p$	Diâmetro da tubulação a jusante do <i>choke</i> , ft [m]
$d_e$	Diâmetro de abertura equivalente, in [m]
$d_1$	Diâmetro a montante do <i>choke</i> , ft [m]
$d_2$	Diâmetro a jusante do <i>choke</i> , ft [m]
$d_{64}$	Diâmetro do <i>choke</i> , /64 de polegada, in [m]
$d_w$	Densidade da água, adimensional
$E_1$	Energia interna a montante do <i>choke</i> , ft lbf/lbm [J]

$E_2$	Energia interna a jusante do <i>choke</i> , ft lbf/lbm [J]
$F_a$	Coefficiente de dilatação térmica do orifício, adimensional
$f_o$	Fração mássica de óleo, adimensional
$f_w$	Fração mássica de água, adimensional
$f_G$	Fração mássica de gás, adimensional
$G_2$	Fluxo mássico a jusante do <i>choke</i> , lbm/ft <sup>2</sup> /seg [kg/m <sup>2</sup> /seg]
$GVF$	Fator volume de gás, adimensional
$g$	Aceleração gravitacional, ft/seg <sup>2</sup> [m/seg <sup>2</sup> ]
$g_c$	Constante gravitacional
$j_g$	Velocidade superficial do gás, m/s
$j_l$	Velocidade superficial do líquido, m/s
$K$	Coefficiente de descarga equação 2.3.37, adimensional
$k$	Razão do calor específico, $C_p / C_v$
$L_c$	Comprimento do <i>choke</i> , ft [m]
$m$	Vazão mássica, lbm/seg [kg/seg]
$m_{bi}$	Vazão mássica bifásica, lbm/seg [kg/seg]
$M$	Vazão mássica de escoamento, lbm/seg [kg/seg]
$M'$	Peso molecular, lbm [kg]
$M_G$	Vazão mássica do gás, lbm/seg [kg/seg]
$M_L$	Vazão mássica do líquido, lbm/seg [kg/seg]
$M_{G2}$	Vazão mássica do gás a jusante do <i>choke</i> , lbm/seg [kg/seg]
$M_{L2}$	Vazão mássica do líquido a jusante do <i>choke</i> , lbm/seg [kg/seg]
$MM$	Massa molecular média do gás de Atalaia, lb/lbmol [kg/kgmol]
$MM_p$	Massa molecular do gás produzido, lb/lbmol [kg/kgmol]
$n$	Expoente politrópico para gás, adimensional
$P$	Pressão, psia [kgf/cm <sup>2</sup> ]
$Pr$	Pressão reduzida, psia [kgf/cm <sup>2</sup> ]
$P_t$	Pressão na garganta do <i>choke</i> , psia [kgf/cm <sup>2</sup> ]
$P_1$	Pressão a montante do <i>choke</i> , psia [kgf/cm <sup>2</sup> ]
$P_2$	Pressão a jusante do <i>choke</i> , psia [kgf/cm <sup>2</sup> ]
$p_2$	Pressão na garganta do <i>choke</i> , psia [kgf/cm <sup>2</sup> ]
$p_3$	Pressão a jusante da garganta do <i>choke</i> para o escoamento subcrítico, psia [kgf/cm <sup>2</sup> ]
$p_4$	Pressão a jusante do <i>choke</i> para expansão politrópica, psia [kgf/cm <sup>2</sup> ]
$Q$	Transferência de calor para coluna, ft lbf/lbm [J]
$Q_{Gd}$	Vazão de gás dissolvido, ft <sup>3</sup> /d [m <sup>3</sup> /d]
$Q_{Gexp}$	Vazão de gás expandido, ft <sup>3</sup> /d [m <sup>3</sup> /d]
$Q_{Gl}$	Vazão de gás livre, ft <sup>3</sup> /d [m <sup>3</sup> /d]
$Q_{Glib}$	Vazão de gás liberado, ft <sup>3</sup> /d [m <sup>3</sup> /d]
$Q_L$	Vazão de líquido, ft <sup>3</sup> /d [m <sup>3</sup> /d]

$Q_o$	Vazão de óleo, ft <sup>3</sup> /d [m <sup>3</sup> /d]
$Q_w$	Vazão de água, ft <sup>3</sup> /d [m <sup>3</sup> /d]
$q_L$	Vazão volumétrica de escoamento do líquido nas condições padrões, STB/D [m <sup>3</sup> /d]
$r_c$	Razão de pressão crítica, $P_2 / P_1$
$R$	Constante universal dos gases, ft lbf/lbm mol °R [m <sup>3</sup> Pa/K mol]
$R'$	Razão slip, adimensional
$R_h$	Razão dos calores específico a pressão constante e a volume constante, $C_P / C_V$
$R_p$	Razão de gás-líquido
$R_s$	Razão de solubilidade, adimensional
$S$	Fator de escorregamento, adimensional
$T$	Temperatura, °F [°C]
$Tr$	Temperatura reduzida, °F [°C]
$T_1$	Temperatura a montante do <i>choke</i> , °F [°C]
$T_2$	Temperatura a jusante do <i>choke</i> , °F [°C]
$V_{G1}$	Volume específico do gás a montante do <i>choke</i> , ft <sup>3</sup> /lbm [m <sup>3</sup> /kg]
$V_{G2}$	Volume específico do gás a jusante do <i>choke</i> , ft <sup>3</sup> /lbm [m <sup>3</sup> /kg]
$V_L$	Volume específico do líquido, ft <sup>3</sup> /lbm [m <sup>3</sup> /kg]
$V_{L1}$	Volume específico do líquido a montante do <i>choke</i> , ft <sup>3</sup> /lbm [m <sup>3</sup> /kg]
$V_{L2}$	Volume específico do líquido a jusante do <i>choke</i> , ft <sup>3</sup> /lbm [m <sup>3</sup> /kg]
$V_{m2}$	Volume específico da mistura a jusante do <i>choke</i> , ft <sup>3</sup> /lbm [m <sup>3</sup> /kg]
$V'_G$	Volume ocupado pelo gás, ft <sup>3</sup> [m <sup>3</sup> ]
$V'_L$	Volume ocupado pelo líquido, ft <sup>3</sup> [m <sup>3</sup> ]
$v$	Velocidade, ft/seg [m/seg]
$v_G$	Velocidade do gás, ft/seg [m/seg]
$v_{G2}$	Velocidade do gás a jusante do <i>choke</i> , ft/seg [m/seg]
$v_L$	Velocidade do líquido, ft/seg [m/seg]
$v_{L2}$	Velocidade do líquido a jusante do <i>choke</i> , ft/seg [m/seg]
$v_1$	Velocidade a montante do <i>choke</i> , ft/seg [m/seg]
$v_2$	Velocidade a jusante do <i>choke</i> , ft/seg [m/seg]
$x$	Gás livre, adimensional
$x_1$	Gás livre a montante do <i>choke</i> , adimensional
$x_2$	Gás livre a jusante do <i>choke</i> , adimensional
$y$	Razão de pressão a jusante / pressão a montante do <i>choke</i> , adimensional
$y_C$	Limite crítico-subcrítico, adimensional
$Y_{bi}$	Fator de compressibilidade, adimensional
$Z'_1$	Elevação a montante do <i>choke</i> , ft [m]
$Z'_2$	Elevação a jusante do <i>choke</i> , ft [m]
$z$	Fator de compressibilidade, adimensional

$z_p$	Fator de compressibilidade do gás produzido na liberação diferencial, adimensional
$W$	Trabalho, ft lbf/lbm [J]
$w_i$	Taxa de fluxo mássico isotrópico, lbm/seg [kg/seg]
$w_a$	Taxa de fluxo mássico atual, lbm/seg [kg/seg]
$\rho_G$	Massa específica do gás, lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{Gp}$	Massa específica do gás produzido na liberação diferencial, lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{G1}$	Massa específica do gás a montante do <i>choke</i> , lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{G2}$	Massa específica do gás a jusante do <i>choke</i> , lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_L$	Massa específica do líquido, lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{L1}$	Massa específica do líquido a montante do <i>choke</i> , lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{L2}$	Massa específica do líquido a jusante do <i>choke</i> , lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_o$	Massa específica do óleo, lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	Massa específica da água, lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_m$	Massa específica da mistura, lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{m1}$	Massa específica da mistura a montante do <i>choke</i> , lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{m2}$	Massa específica da mistura a jusante do <i>choke</i> , lbm/ft <sup>3</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu_o$	Viscosidade do óleo, Cp
$\alpha$	Fração nula, adimensional
$\alpha_2$	Fração nula a jusante do <i>choke</i> , adimensional
$\beta$	Razão do diâmetro do orifício da placa ou da garganta do Venturi e o diâmetro da seção do tubo, adimensional
$\gamma_G$	Densidade do gás, adimensional
$\gamma_{Gp}$	Densidade do gás produzido na liberação diferencial, adimensional
$\tau_w$	Esforço cisalhante sobre a parede, adimensional
$\Delta p_{bi}$	Queda de pressão bifásica, psia [kgf/cm <sup>2</sup> ]

## RESUMO

Os *chokes* são utilizados na indústria do petróleo para controlar e otimizar a vazão de produção, proteger os equipamentos de superfície, controlar e prevenir o fluxo indesejável de fluidos e proporcionar uma contrapressão controlada na formação produtora durante o escoamento. Além disso, os *chokes* tornam possível obter informações para o cálculo do índice de produtividade em qualquer etapa da vida produtiva de um poço. Durante a produção de um poço, onde as fases presentes são a líquida e a gasosa, é importante a caracterização e a quantificação do escoamento durante a passagem destas fases através do *choke*. Assim, baseado em trabalhos realizados por vários autores e em seus modelos desenvolvidos, é possível prever o escoamento multifásico crítico, subcrítico e o limite entre eles. Logo após a identificação do tipo de escoamento, é importante calcular e caracterizar os parâmetros do escoamento multifásico através de *chokes* para uma compreensão efetiva deste estudo, como, por exemplo, o fluxo mássico. A partir de dados experimentais, onde se utilizou óleo e gás originados de campo de produção, equações desenvolvidas para escoamento multifásico e o programa computacional criado neste trabalho, foi possível prever o escoamento multifásico presente, determinar a vazão mássica para cada fase e outros parâmetros a jusante do *choke*, como a massa específica, para cada tipo de escoamento. Assim, são feitas análises comparativas entre os valores calculados neste trabalho com os resultados experimentais para estes parâmetros do escoamento multifásico através do *choke*.

**Palavras-chave:** *Chokes*, parâmetros para o escoamento multifásico, valores calculados, resultados experimentais, análises comparativa.

## ABSTRACT

The *chokes* are used in the petroleum industry to control and to optimize the production flow rates, to protect the surface equipments, to control and prevent undesirable flow of fluids and to provide a back pressure on the producing formation. Besides it is possible to obtain, through the *chokes*, information to calculate the productivity index at any stage of the productive life of the well. During the production of a well, where the phases present are the liquid and the gassy, it is important to characterize and to quantify the flow of these phases through the *choke*. Thus, based on works published by different authors and on their developed models, it is possible to determine the critical, subcritical and boundary multiphase flow through the *chokes*. Soon after the identification of the kind of flow, it is important to calculate and to characterize the parameters of the multiphase flow through *chokes* for an effective understanding of this study, as, for example, the mass flow rate. Based on experimental data, where it was used oil and gas from of production field, equations developed for multiphase flow and the computer program created in this work, it was possible to determine the multiphase flow, to calculate the mass flow rate for each phase and to determine other parameters downstream of the *choke* as, for example, the mixture density, for each kind of flow. Thus a comparative analysis is done between the calculated values obtained in this work and the experimental results for these parameters of the multiphase flow through the *chokes*.

**Key-words:** *Chokes*, multiphase flow parameters, calculated values, experimental results, comparative analysis.

## Capítulo 1

### INTRODUÇÃO

O escoamento multifásico de fluidos como gases e líquidos ocorre frequentemente na indústria do petróleo e estas misturas são transportadas no meio poroso do reservatório e nos trechos horizontal e vertical do poço de petróleo. Então, passam pela cabeça do poço, escoam pela linha de produção até os separadores de gás-líquido na planta de tratamento primário e, finalmente, chegam até o tanque de estocagem (Omana *et al.*, 1969).

Durante o escoamento dos fluidos na produção do poço, são utilizadas restrições ou válvulas de orifícios (*chokes*) para controlar e otimizar a produção. O *choke* é um dispositivo que impõe uma restrição à linha de escoamento e geralmente está localizado entre a tubulação de produção e a linha de descarga. Para uma maior otimização da produção dos poços de petróleo, é muito importante conhecer o comportamento do *choke* em função dos parâmetros do escoamento e da natureza dos fluidos produzidos (Guiteras, 2003).

Um aspecto importante é o estudo do tipo de escoamento que ocorrerá durante a passagem da mistura dos fluidos (gás-líquido) através do *choke*. Neste caso, o escoamento poderá ser crítico ou subcrítico, sendo importante determinar o limite para transição entre estes dois tipos de escoamento. O escoamento crítico é alcançado quando a velocidade do fluido através das restrições é igual à velocidade do som no fluido. Neste caso, qualquer alteração de pressão a jusante da restrição não terá efeito algum sobre a pressão a montante ou a vazão de escoamento. Em contrapartida, no escoamento subcrítico, qualquer alteração da pressão a jusante da restrição terá efeito sobre a pressão a montante, e isso ocorre quando a velocidade do fluido através das restrições é menor do que a velocidade do som no fluido. Estes tipos de escoamento têm uma grande importância para uma maior compreensão das alterações nas vazões de produção, pressão a jusante e a montante das restrições (Sachdeva *et al.*, 1986).

Em função destas características mencionadas nos parágrafos anteriores e de acordo com o objetivo principal deste trabalho, o escoamento multifásico através de *chokes*, no capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos

publicados relacionados a este assunto, com uma apresentação geral sobre a funcionalidade, características e tipo de *chokes* utilizados atualmente durante a produção de petróleo. Além disso, é feita uma análise sobre o regime do escoamento multifásico na coluna e na linha de produção, linha vertical e horizontal, para o estudo da mudança de fase, fração de gás e de líquido e gradiente de pressão. Este último sendo influenciado principalmente pela diferença das velocidades e da geometria das fases líquida e gasosa, tornando necessário o conhecimento dos padrões ou arranjos de fases do escoamento multifásico (Griffith, 1956). Além disso, neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre modelos de escoamento multifásico através de *chokes*, com diferentes abordagens, destacando o modelo apresentado por Sachdeva *et al.* (1986) em função da aplicabilidade de suas equações para a determinação do limite entre o escoamento multifásico crítico e subcrítico e caracterização dos parâmetros para este tipo de escoamento, como por exemplo, vazão e massa específica a jusante do *choke*.

No seguinte capítulo é feito um estudo do escoamento multifásico experimental através de uma análise dos parâmetros de entrada e dos resultados obtidos por Slobodcicov *et al.* (2009) a montante e a jusante do *choke* para o escoamento bifásico. O experimento foi realizado utilizando medidores de diferencial de pressão e *choke* numa bancada experimental, onde foi usada uma mistura de óleo morto dos campos de produção em terra (Sergipe), água industrial e gás proveniente do campo de produção de Atalaia (Sergipe), tendo como objetivo principal observar e identificar a variação da pressão a jusante e a montante das placas de orifício, posicionadas no ponto de mistura dos fluidos no circuito de testes experimentais.

Logo a seguir, no capítulo 4, é mostrado o método utilizado neste trabalho para a identificação do tipo do escoamento (crítico, subcrítico e o limite entre eles), assim como a determinação de parâmetros do escoamento multifásico, como a massa específica da mistura e a vazão mássica a jusante do *choke* das fases líquida e gasosa. Estes parâmetros foram obtidos a partir dos dados experimentais observados por Slobodcicov *et al.* (2009) na bancada de teste e das equações do modelo desenvolvido por Sachdeva *et al.* (1986) para a caracterização do escoamento multifásico através de *chokes*. Para auxiliar na identificação do tipo de escoamento e a determinação dos parâmetros mencionados acima, foi desenvolvido

um programa computacional utilizando a linguagem *FORTRAN*. Neste programa foram criadas janelas especiais para o estudo comparativo entre os valores calculados neste trabalho e os resultados experimentais de massa específica e vazão mássica para os diferentes tipos de escoamento e pontos experimentais. Além disso, foi possível calcular o coeficiente de correlação desta análise comparativa e determinar o melhor coeficiente de descarga durante o cálculo da vazão mássica. Este último coeficiente é utilizado geralmente para absorver erros referentes ao número de Reynolds, diferencial de pressão, fator de expansão de gás e outras propriedades relacionadas aos fluidos presentes no escoamento (Sachdeva *et al.*, 1986).

A seguir são mostrados os valores calculados neste trabalho utilizando o programa computacional desenvolvido a partir dos dados experimentais e das equações do modelo de Sachdeva *et al.* (1986). Assim, é feita a identificação do tipo de escoamento e uma comparação entre estes valores e os resultados experimentais para massa específica, fluxo mássico da mistura e vazão mássica das fases líquida e gasosa a jusante do *choke*. Através desta avaliação foi possível formular algumas conclusões para o estudo desenvolvido e sugerir futuras recomendações para novos trabalhos sobre escoamento multifásico através de *chokes*.

No Apêndice A são apresentados os valores das variáveis de entrada do programa computacional para cada ponto experimental. Estes valores foram calculados a partir dos dados experimentais obtidos numa bancada de testes. No Apêndice B são mostradas informações referentes ao programa computacional desenvolvido neste trabalho, como os procedimentos para a sua utilização e o código completo na linguagem *FORTRAN*.

Capítulo 2  
**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

2.1 - *CHOKES*: TIPOS E APLICAÇÕES

A vazão de quase todos os poços fluentes, ou seja, onde o reservatório possui uma pressão suficiente para elevar o petróleo até as linhas de produção na superfície, é controlada por um *choke* na cabeça do poço e outros componentes de acordo com a Figura 2.1.

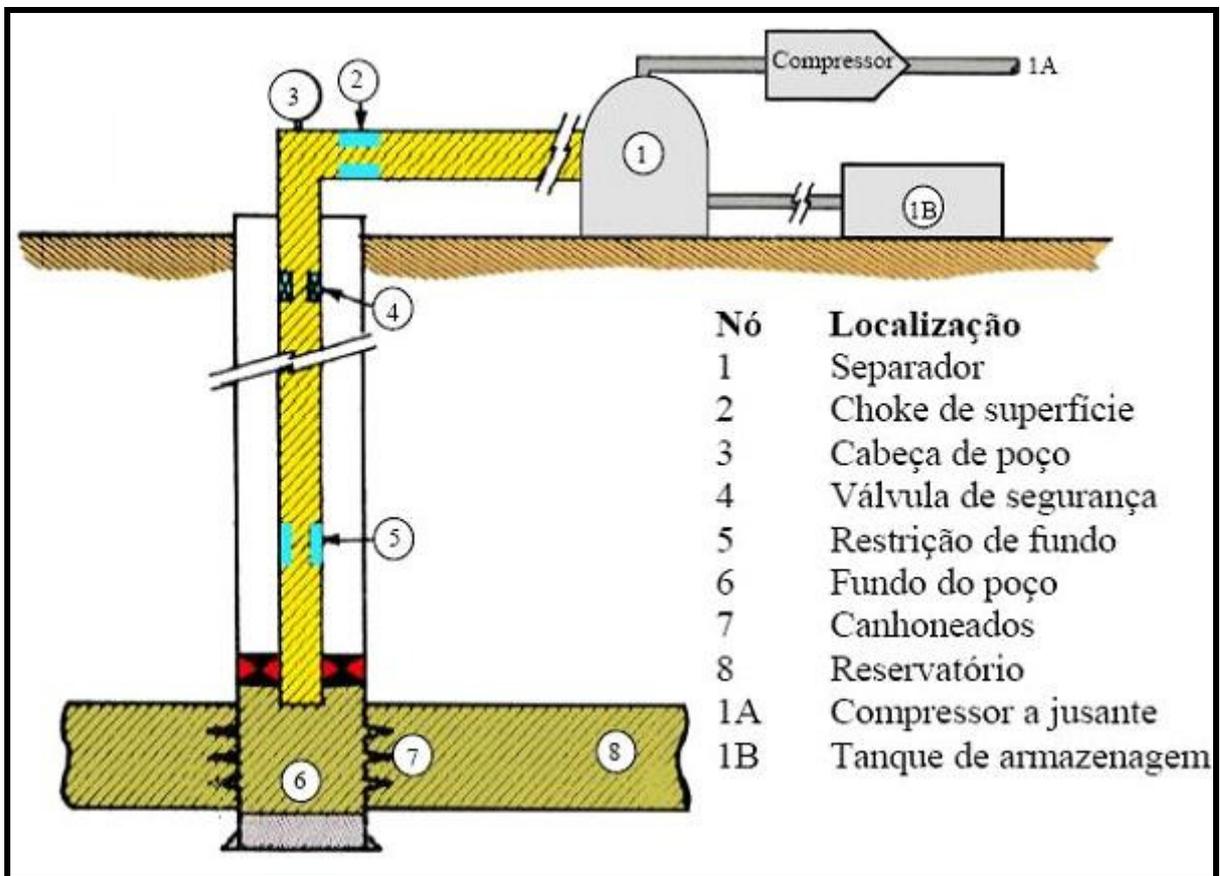


Figura 2.1: Componentes de um poço de petróleo (Guiteras, 2003, p.136).

Guiteras (2003) definiu os *chokes* como dispositivos constituídos por placas de metal com um pequeno orifício para permitir o escoamento (Figura 2.2). Os *chokes* são os dispositivos de restrição mais comuns, usados para causar uma queda de pressão e reduzir a vazão de escoamento.

Os *chokes* têm, portanto, várias aplicações como dispositivos de controle na indústria de petróleo, tais como manter uma vazão de escoamento permissível na

cabeça do poço, controlar a vazão de produção, proteger os equipamentos de superfície, controlar e prevenir o fluxo indesejável de fluidos ao proporcionar uma contrapressão suficiente na formação produtora e permitir a obtenção de informações para calcular o índice de produtividade em qualquer etapa da vida produtiva de um poço.

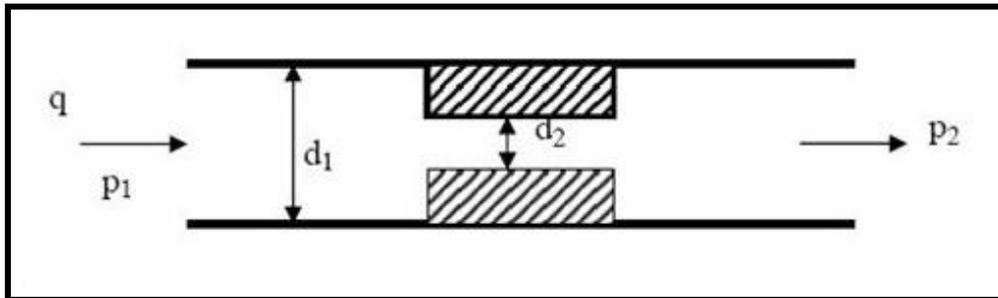


Figura 2.2: Esquema do *choke* (Guiteras, 2003, p.120).

Guiteras (2003) exemplificou alguns tipos de *chokes* e suas funções, como por exemplo, os *chokes* superficiais. Estes se encontram localizados na cabeça do poço e nas linhas de escoamento, com a principal função de estrangular o escoamento para proporcionar estabilidade nas instalações superficiais. Assim, este tipo de *choke* pode ser classificado em dois modelos diferentes, em função do seu desenho. O primeiro modelo foi classificado por Guiteras (2003) como *choke* do tipo positivo (Figura 2.3), caracterizado pelo simples manuseio e baixo custo. No seu interior é possível a instalação ou a troca manual dos orifícios, conseqüentemente a regulação para diferentes aberturas durante o escoamento de fluidos.

O segundo modelo classificado por Guiteras (2003) foi o tipo ajustável (Figura 2.4). Para ajustar o diâmetro de abertura do orifício durante o escoamento, utiliza-se um volante instalado na parte superior. Abaixo do volante encontra-se o indicador, com graduações visíveis que indicam o diâmetro efetivo do orifício.

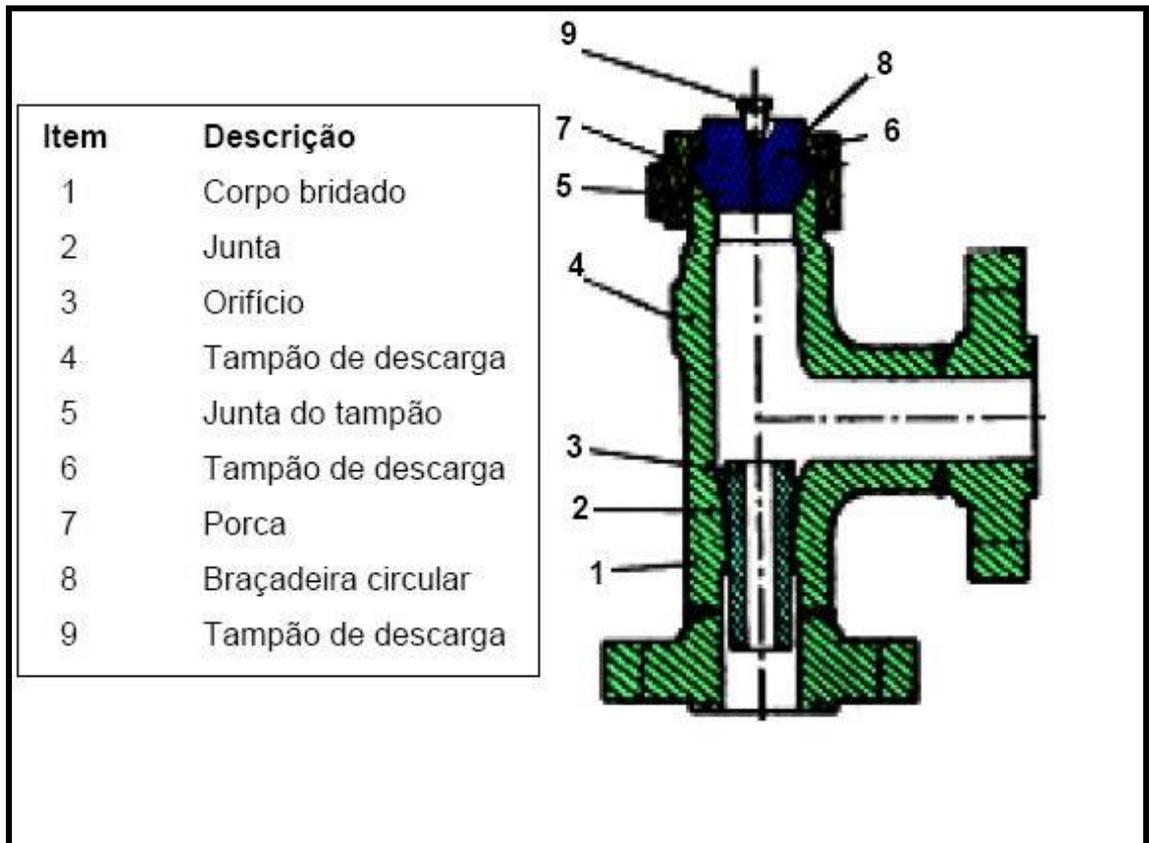


Figura 2.3: Porta orifícios tipo positivo (Guiteras, 2003, p.123).

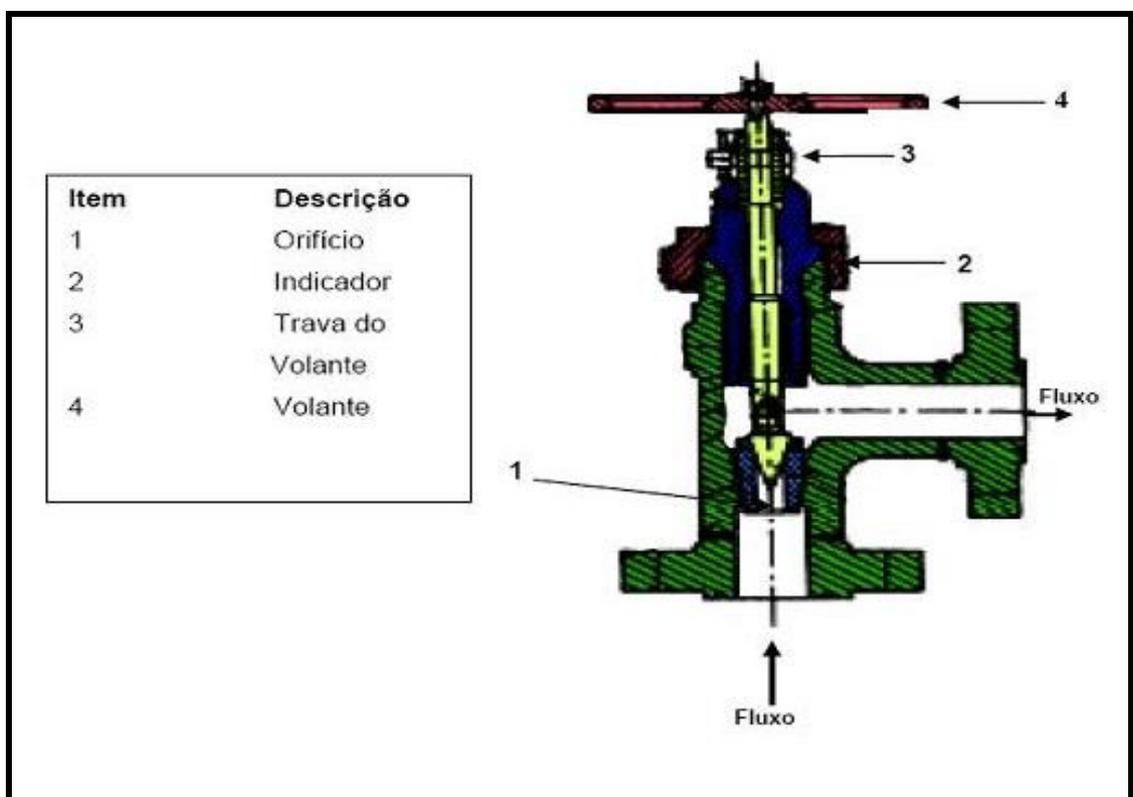


Figura 2.4: Choke ajustável (Guiteras, 2003, p. 124).

## 2.2 - REGIME DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

Para o regime do escoamento multifásico, faremos uma síntese dos modelos de padrões de fluxo na coluna e linha de produção, tendo como objetivo principal a identificação da geometria das fases. Além disso, compreender a influência da velocidade das fases para a determinação da fração gasosa durante o escoamento multifásico.

Thomas *et al.* (2004) estudaram o escoamento multifásico vertical (coluna de produção) e o escoamento multifásico horizontal (linha de produção). Segundo eles, dois fatores são importantes e têm influência sobre o gradiente de pressão: as velocidades e a geometria das fases líquida e gasosa. Os padrões de escoamento vertical multifásico são classificados por Thomas *et al.* (2004) em: bolha, golfada, transição e nevoeiro (Figura 2.5).

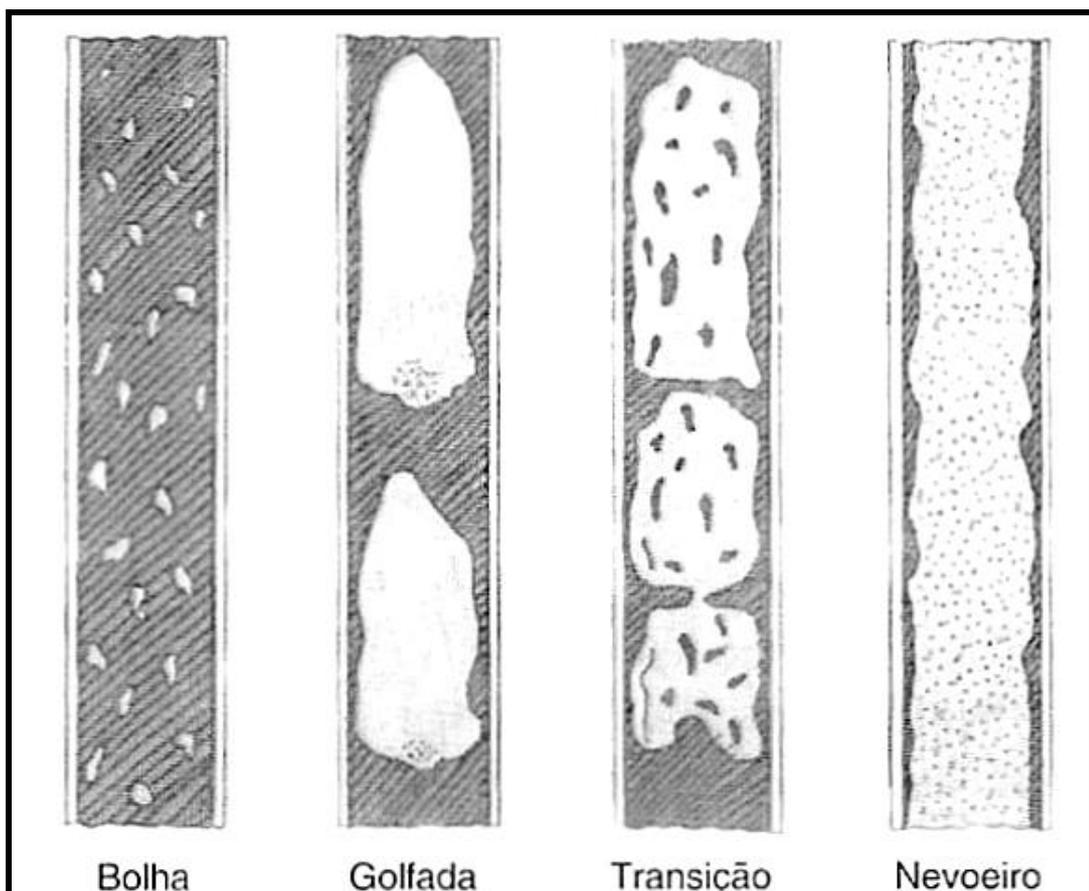


Figura 2.5: Padrões de escoamento vertical multifásico (Thomas *et al.*, 2004, p.215).

O escoamento em bolha ocorre normalmente próximo ao fundo do poço, quando a coluna está completamente cheia com líquido e a fase gasosa está presente através de pequenas bolhas dispersas no meio líquido. A fase contínua é o líquido, que se move com uma velocidade praticamente constante, e as bolhas de gás se movem a diferentes velocidades, dependendo do seu diâmetro (Thomas *et al.*, 2004).

No escoamento em golfada a fase líquida é a fase contínua, porém as bolhas de gás coalescem e formam bolsões estáveis, com diâmetros próximos ao da tubulação. À medida que a mistura se eleva na coluna de produção há uma queda na pressão, resultando numa liberação maior do gás que estava associado. Os bolsões de gás são separados por golfadas de líquido que se deslocam para a superfície com velocidades variáveis. Próximo à parede da tubulação existe um filme de líquido que se move com velocidade ascendente menor do que a das golfadas de líquido. As variações da velocidade no líquido fazem com que a densidade da mistura varie ponto a ponto. Considerando os valores normalmente encontrados de vazões e pressões, este é o padrão de escoamento mais comum em poços de petróleo (Thomas *et al.*, 2004).

Na transição entre o escoamento em golfada e nevoeiro, a fase gasosa é mais pronunciada. A mistura vai subindo, menores pressões são atingidas e com isso a velocidade do líquido vai aumentando e ele começa a se dispersar. O volume do gás livre aumenta rapidamente pela sua expansão e pela saída contínua de gás da solução. A golfada de líquido entre os bolsões de gás tende a desaparecer e uma quantidade significativa do líquido se dispersa na fase gasosa. O gás com líquido em suspensão tende a se movimentar mais rapidamente pelo centro da tubulação, enquanto o líquido tende a aderir-se na parede da coluna de produção, formando um anel (Thomas *et al.*, 2004).

Por último, o padrão de escoamento nevoeiro ocorre quando quase todo o líquido é carregado pelo gás sob a forma de gotículas. A quantidade e a velocidade do gás liberado são expressivas, tais que a fase contínua passa definitivamente a ser o gás. Apenas um filme de líquido molha a parede da tubulação, praticamente não influenciando o gradiente de pressão do poço. Este regime de escoamento raramente ocorre em poços de petróleo (Thomas *et al.*, 2004).

Thomas *et al.* (2004), também exemplificam os padrões de escoamento horizontal multifásico (Figura 2.6). Neste tipo de configuração o gradiente dinâmico de pressão na tubulação também é a soma dos mesmos gradientes que atuam na coluna de produção. Outro detalhe é que as propriedades dos fluidos são calculadas ponto a ponto, pois a pressão também varia continuamente. Os padrões de escoamento horizontal multifásicos mais aceitos são classificados por Thomas *et al.* (2004) como: segregado, intermitente e distribuído. Cada um deles sendo divididos em outros regimes de escoamento de acordo com a Figura 2.6.

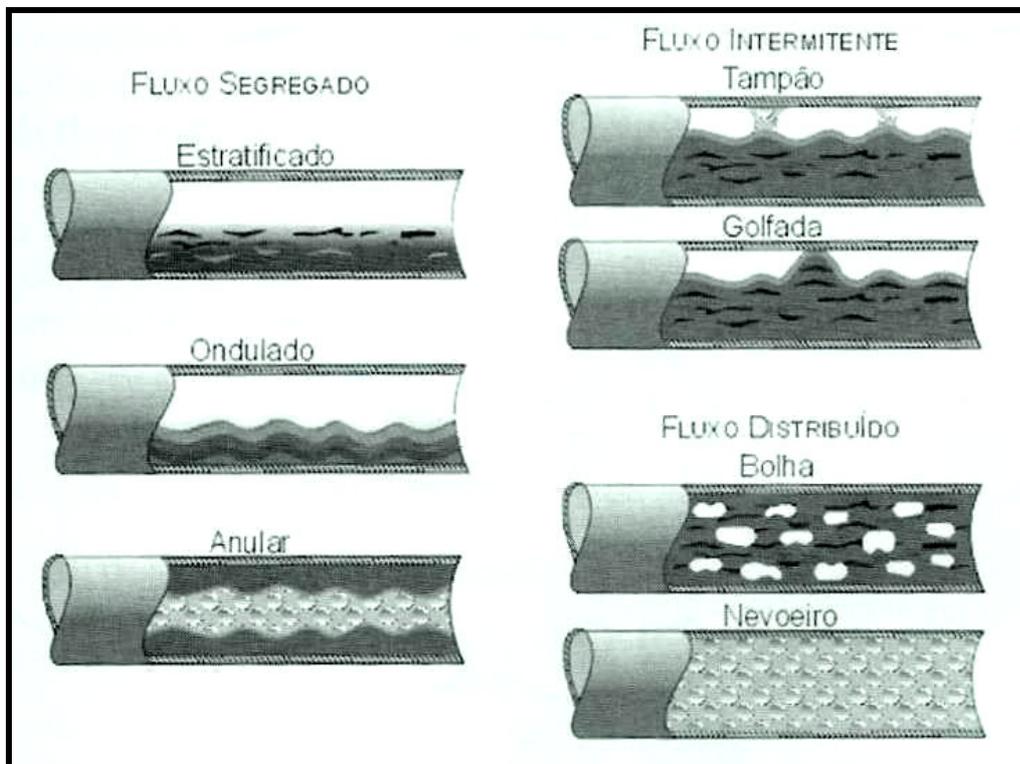


Figura 2.6: Padrões de escoamento horizontal multifásico (Thomas *et al.*, 2004, p.219).

Outra característica importante deste estudo é que na linha de produção podem ocorrer vários regimes de escoamento para um único poço. Qualquer variação no ângulo formado pela linha de produção com a linha horizontal influenciará decisivamente no regime de escoamento e, conseqüentemente, no gradiente de pressão. Como a linha de produção de um poço nunca é perfeitamente horizontal, a determinação do gradiente de pressão torna-se bastante imprecisa. Outro aspecto importante para a identificação do padrão de escoamento é a determinação das velocidades das fases na coluna e na linha de produção.

Griffith (1956) realizou um estudo para maior compreensão das velocidades das fases presentes no escoamento multifásico. A fração de gás ou seu complemento, fração de líquido, são parâmetros de extrema importância para este estudo. Griffith (1956) definiu três tipos de modelos para calcular a fração de gás, porém todos os modelos possuíam vantagens e falhas, em função das velocidades das fases presentes.

O primeiro modelo usado por Griffith (1956) foi o modelo homogêneo, no qual assume-se que as fases líquida e gasosa se movimentam com a mesma velocidade ( $v_L = v_G$ ), entretanto, isso raramente ocorre. A fração de gás é geralmente superestimada quando temos escoamento horizontal e subestimada quando temos escoamento vertical. Se a queda de pressão, no lugar da fração de gás, é mais importante e a contribuição da gravidade para a queda pressão é baixa, este modelo é sempre satisfatório.

O segundo é o modelo de escorregamento, caracterizado por uma complexidade maior para a determinação da fração gasosa, assumindo que o líquido se move com velocidade menor do que a do gás ( $v_L < v_G$ ). Em velocidade baixa, este modelo pode ter uma resposta ruim para a determinação da fração gasosa por causa da contribuição da gravidade para a velocidade do vapor, que é praticamente ignorada para esta correlação.

Por último temos o modelo conhecido como *drift-flux*, que é considerado o método mais preciso e confiável para calcular a fração de gás. Corretamente utilizado, este modelo geralmente obtém resultados melhores por causa do seu reconhecimento explícito de dois fatores importantes: a combinação da distribuição da velocidade-densidade no canal e a direção do vetor gravidade. Griffith (1956) destacou que este modelo é único por causa de sua predição correta da fase líquida para níveis de velocidade baixa.

Griffith (1956) concluiu que o modelo homogêneo pode ser usado somente quando a contribuição da gravidade para a perda de carga de pressão não é importante. Já o modelo de escorregamento é mais conveniente para cálculos de engenharia, mas tem uma resposta ruim quando o sistema operado não é o regime de escoamento nevoeiro, disperso ou bolha. Em qualquer regime onde gravidade é

a força dominante, o modelo de escorregamento deverá falhar para representar uma parte importante da física, então o modelo *drift-flux* deverá ser usado.

Oliveira (2007) desenvolveu testes em uma bancada experimental para identificação dos padrões de escoamento multifásico, fração de vazio e fator de escorregamento. Além disso, foram estudados por Oliveira (2007) outros parâmetros, como: título, perda de carga e as vazões mássicas das fases a partir de correlações semi-empíricas encontradas na literatura. O sistema de medição foi composto por um venturi ou placa de orifício associados a um medidor de fração de vazios nas direções de escoamento vertical e horizontal.

Oliveira (2007) utilizou a equação (2.2.1) para definir a fração de vazio. Este parâmetro tem grande utilidade para prever a queda de pressão e o coeficiente de transferência de calor em escoamento líquido-gás,

$$\alpha = \frac{V'_G}{V'_G + V'_L} \quad , \quad (2.2.1)$$

onde  $V'_G$  e  $V'_L$  são os volumes ocupados pelo gás e o líquido, respectivamente.

Outro parâmetro citado por Oliveira (2007) foi o fator de escorregamento ( $S$ ), definido como a razão entre as velocidades média gasosa e líquida,

$$S = \frac{v_G}{v_L} = \frac{\rho_L}{\rho_G} \frac{x}{(1-x)} \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \quad , \quad (2.2.2)$$

onde  $\rho_L$ ,  $\rho_G$  e  $x$  são a massa específica do líquido, do gás e o título mássico, respectivamente.

Na bancada experimental, Oliveira (2007) utilizou um circuito bifásico com o ar proveniente de uma linha pressurizada e água armazenada em um tanque, os quais foram misturados de forma a compor um escoamento bifásico líquido e gás em padrões de escoamento diferentes de acordo com as vazões dos fluidos injetados.

Oliveira (2007) realizou o procedimento experimental de acordo com o esquema simplificado da Figura 2.7. Os termopares eram responsáveis pela

medição de temperatura, o transdutor de pressão absoluta foi usado para a determinação das massas específicas dos fluidos, o sensor de fração de vazios para a obtenção da fração de vazios, e por último, o transdutor de pressão diferencial, responsável por obter as informações extras para prever as vazões mássicas.

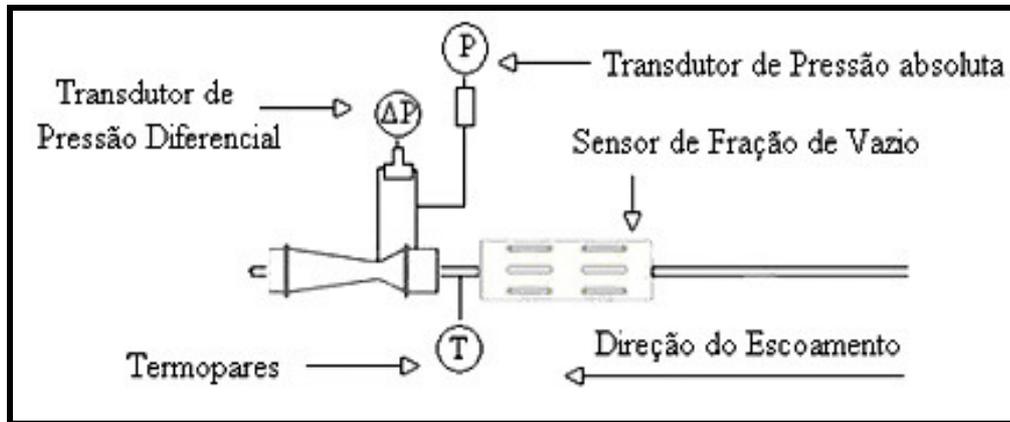


Figura 2.7: Esquema simplificado do sistema de medição (Oliveira, 2007, p.11).

Oliveira (2007) obteve um total de 260 pontos experimentais. Os dados para padrões de escoamento vertical ascendente foram apresentados na Figura 2.8 num mapa de Hewitt e Roberts (1969), onde  $j_g$  e  $j_l$  são respectivamente a velocidade superficial do gás e do líquido.

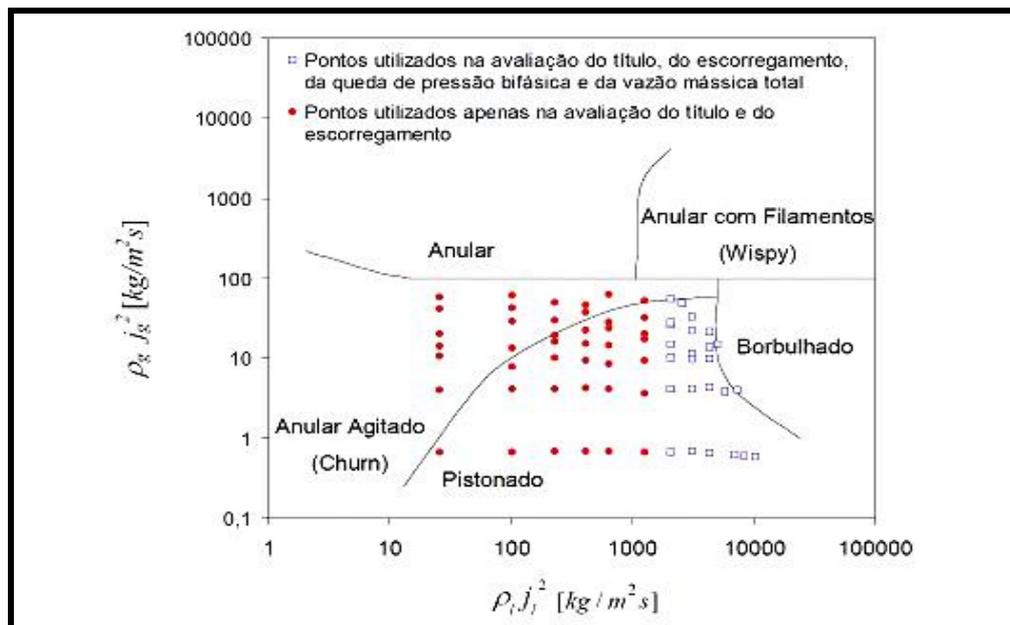


Figura 2.8: Pontos experimentais representados no mapa de padrões de Hewitt e Roberts (1969) – Escoamento vertical (Oliveira, 2007, p.12).

Os dados para padrões de escoamento horizontal foram apresentados por Oliveira (2007) na Figura 2.9 em um mapa de Baker (1954), de acordo com Carey (1992), onde  $G_g$  e  $G_l$  é respectivamente o fluxo mássico específico de gás e de líquido. Além disso, os parâmetros  $\lambda$  e  $\psi$  são relativos às propriedades da água nas condições atmosféricas, definidos como um parâmetro adimensional.

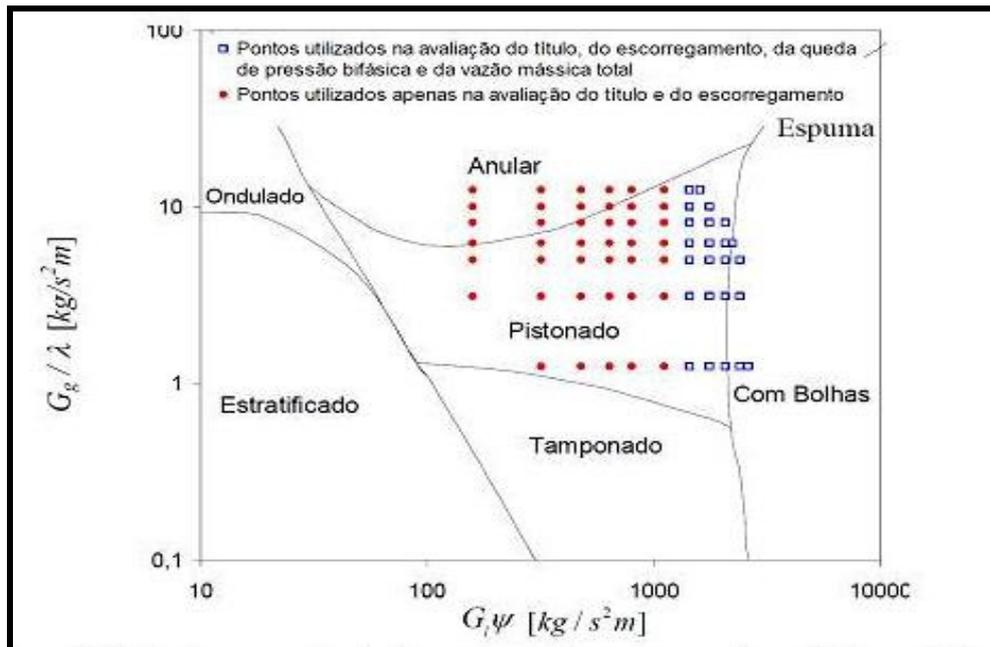


Figura 2.9: Pontos experimentais representados no mapa de padrões de Baker (1954) - Escoamento horizontal (Oliveira, 2007, p.12).

Esses dois tipos de mapas foram utilizados por Oliveira (2007) para caracterizar de uma forma eficaz o escoamento multifásico contendo ar e água em pressões reduzidas.

Através de observações visuais, Oliveira (2007) confirmou a validade desses mapas para a identificação dos padrões de escoamento vertical e horizontal. Além disso, os mesmos foram utilizados para avaliar a queda de pressão, vazão mássica multifásica, título e o fator de escorregamento.

Oliveira (2007) apresentou o fator de escorregamento experimental como uma função da fração de vazio média, incluindo pontos experimentais do escoamento vertical e horizontal, e a identificação dos regimes de escoamento de acordo com os mapas de Baker (1954) e de Hewitt e Roberts (1969).

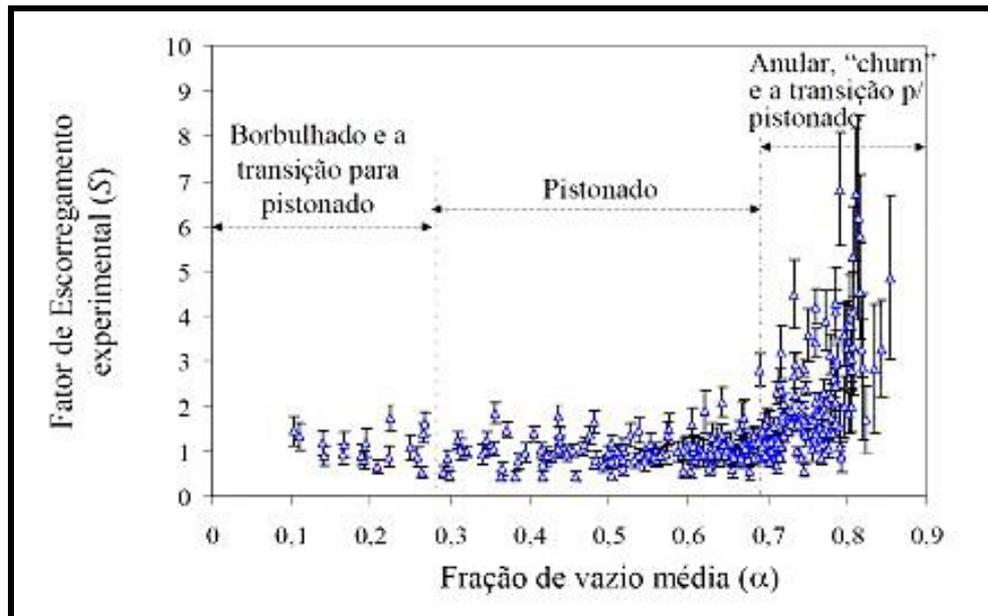


Figura 2.10: Fator de escorregamento experimental (Oliveira, 2007, p.15).

A Tabela 2.1 apresenta os valores médios do fator de escorregamento encontrados por Oliveira (2007) para três regiões distintas especificadas na Figura 2.10, incluindo os desvios em relação à condição de não-deslizamento ( $S = 1$ ).

Tabela 2.1: Fator de escorregamento calculado pela equação (2.2.2) para o escoamento vertical e horizontal (Oliveira, 2007).

Fração de vazio ( $\alpha$ )	$\alpha \leq 0,3$	$0,3 < \alpha < 0,7$	$\alpha \geq 0,7$
Fator de Escorregamento ( $S$ )	1,02	1,08	2,36
Percentual (%) dos desvios de $S$ , conforme equação 2.2.2, em relação a ( $S = 1$ )	35,1	35,4	187,6

Oliveira (2007) concluiu que para padrões borbulhado e pistonado ( $\alpha < 0,7$ ), com testes realizados experimentalmente utilizando água e ar nas condições empregadas neste trabalho, o fator de escorregamento médio obtido foi de 1,06, o que permitiu justificar a utilização da hipótese de não-deslizamento ( $S = 1$ ), explicando o uso do modelo homogêneo.

### 2.3 - MODELOS DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

Neste tópico será apresentada a revisão bibliográfica de trabalhos publicados na literatura relacionados ao escoamento multifásico, com definições de escoamento crítico, subcrítico, o limite entre eles e o estudo de diferentes modelos capazes de prever estes tipos de escoamento.

Sachdeva *et al.* (1986) consideraram que dois tipos de escoamento podem existir em um *choke* localizado na cabeça de um poço: escoamento crítico e subcrítico. O escoamento é chamado crítico quando a velocidade do fluido através das restrições é igual à velocidade do som no fluido. Assim, uma vez que a velocidade do som seja alcançada, um aumento ainda maior no diferencial de pressão não aumentará a pressão na garganta do *choke*. Portanto, a vazão não pode exceder a vazão do escoamento crítico conseguido quando a razão de pressão a jusante (*downstream*) e a montante (*upstream*) chega a um valor crítico, ainda que esta pressão a jusante seja decrescida. Ao contrário do escoamento subcrítico, a vazão de escoamento crítico depende somente da pressão a montante, porque as perturbações de pressão que trafegam na velocidade do som implicam que uma perturbação de pressão na extremidade a jusante não terá efeito algum sobre a pressão a montante ou sobre a vazão, até o limite de escoamento crítico-subcrítico ser obtido.

Se a pressão a jusante é aumentada ligeiramente além das condições limites, a vazão e a pressão a montante são afetadas. A vazão depende do diferencial de pressão e da mudança na pressão a jusante afetando a pressão a montante, e esse comportamento é característico do escoamento subcrítico. Então, o escoamento é chamado subcrítico quando a velocidade do fluido através das restrições é menor do que a velocidade do som no fluido, e a vazão depende tanto da pressão a montante como da pressão a jusante.

Para escoamento crítico, Gilbert (1954) usou a seguinte correlação:

$$P_1 = \frac{10q_L R_p^{0,546}}{(d_{64})^{1,84}} , \quad (2.3.1)$$

onde a vazão do escoamento crítico é independente da pressão a jusante e as propriedades do fluido não são levadas em conta.

Omana *et al.* (1969) arbitrariamente julgaram o escoamento ser crítico quando a razão entre a pressão a jusante e a montante ( $y = P_2 / P_1$ ) for menor que 0,546 e quando a velocidade superficial do gás exceder a velocidade superficial do líquido. Para a determinação do escoamento crítico, Omana *et al.* (1969) utilizaram quarenta e sete (47) testes para duas fases e chegaram a uma correlação válida para um diâmetro de *choke* pequeno (4/64 para 14/64 in) e uma vazão baixa ( $< 800B/D$ ).

Surbey *et al.* (1989), partindo da equação (2.3.1) de Gilbert (1954), desenvolveram um estudo para a determinação do escoamento crítico multifásico, feito com um tipo de configuração que permite que a abertura do *choke* seja mudada enquanto o mesmo está sob pressão sem interromper a produção, além de controlar levemente a queda de pressão, denominado *choke MOV* (*multiple-orifice-valve*).

Surbey *et al.* (1989) usaram um diâmetro equivalente para *choke MOV*, pois foi observado por ele que esta configuração possuía uma passagem de escoamento não circular ( $A_c$ ), dado por:

$$d_e = \sqrt{4A_c / \pi} \quad (2.3.2)$$

Utilizando uma análise de regressão, Surbey *et al.* (1989) desenvolveram uma nova relação onde obtiveram resultados experimentais melhores quando comparados com dados de Gilbert (1954), de acordo com a seguinte equação:

$$P_1 = a(R_p)^B q_L^D / A_c^C, \quad (2.3.3)$$

onde  $P_1$  é a pressão a montante do *choke*,  $R_p$  é a razão de gás-líquido,  $q_L$  é a vazão volumétrica de escoamento do líquido nas condições padrões,  $A_c$  é a área da seção do *choke* e  $a$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são as constantes da equação e os seus valores são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Valores das constantes de correlação (Surbey *et al.*, 1989).

Constante de correlação	Valores
<i>a</i>	0,2797
<i>b</i>	0,3955
<i>c</i>	0,4664
<i>d</i>	0,5917

Surbey *et al.* (1989) definiram que quando for alcançada a velocidade do som do gás na garganta do *choke* para uma fase gasosa simples, o escoamento será considerado crítico. Para um escoamento isotrópico isso deverá ocorrer quando a razão entre a pressão na garganta do *choke* pela pressão a montante for dada por:

$$P_t / P_1 = [2 / (R_h + 1)]^{R_h / (R_h - 1)}, \quad (2.3.4)$$

onde  $P_t$  é a pressão na garganta do *choke* e  $R_h$  é a razão dos calores específico a pressão constante e a volume constante,  $R_h = C_p / C_v$ . Para o ar, a razão  $P_t / P_1$  deverá ser igual a 0,528.

Com o objetivo de identificar o escoamento crítico e subcrítico, Schüller *et al.* (2006) realizaram testes experimentais onde foi possível obter a vazão mássica para o óleo, gás e água para estes dois tipos de escoamento. Este trabalho foi uma extensão dos estudos do desempenho de Schüller *et al.* (2003), de 367 pontos de testes para escoamento multifásico onde o escoamento subcrítico era o tipo predominante. Neste último, duas geometrias diferentes de escoamento em *chokes* e três aberturas diferentes foram testadas.

Schüller *et al.* (2006) estenderam dados para a segunda parte do estudo de desempenho do *choke* dentro da região de escoamento crítico.

Na Figura 2.11, Schüller *et al.* (2006) esquematizaram o *Multiphase Flow Loop (MPFL)*, que é um teste constituído por três fases circulando através de linhas para óleo, gás e água, no qual os fluidos são recombinados para formar um sistema

de escoamento apropriado de hidrocarboneto e outras substâncias químicas. Para garantir um ambiente livre de oxigênio, o fluido passa através de reatores.

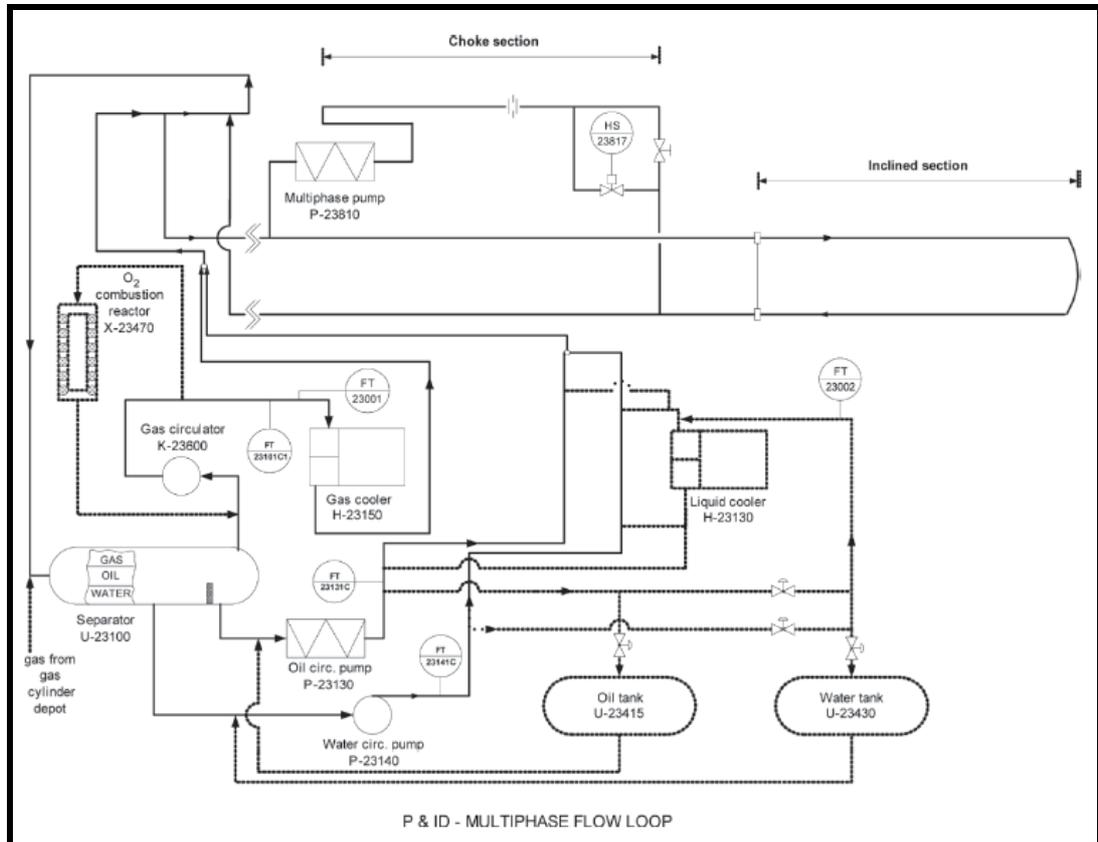


Figura 2.11: Processo simplificado e diagrama de instrumento *MPFL* (Schüller *et al.*, 2006, p.373).

Um separador trifásico foi colocado em um lugar fechado e as fases passam através de bombas individuais que foram colocadas a jusante do separador. Trocadores de calor foram instalados no sistema para um controle maior da temperatura, e a vazão necessária de cada uma das fases foi alcançada com o auxílio de bombas de líquido e um circulador de gás a jusante do separador.

Para Schüller *et al.* (2006), o escoamento crítico representa um papel importante na condução do experimento. Neste trabalho, o escoamento crítico e subcrítico foi detectado através do uso de *choke* a montante de uma válvula manual e de outra válvula de abertura rápida (Figura 2.12).

Schüller *et al.* (2006) definiram o escoamento subcrítico (Figura 2.13) quando a redução do sinal de pressão a montante e a jusante do *choke* forem detectadas, de acordo com o intervalo de tempo de 25 a 45 segundos, pois nenhum pulso de

informação pode passar através do *choke* na direção a montante sob condições críticas. Caso contrário, Schüller *et al.* (2006) obtiveram uma situação em que ocorreu o escoamento crítico (Figura 2.14).

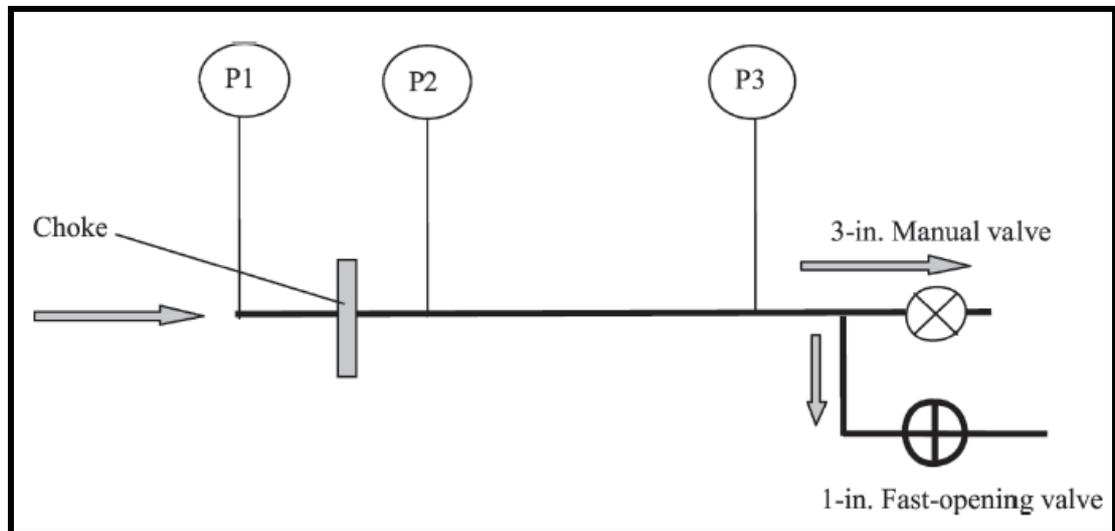


Figura 2.12: Arranjo das válvulas para detecção do escoamento crítico e subcrítico (Schüller *et al.*, 2006, p.375).

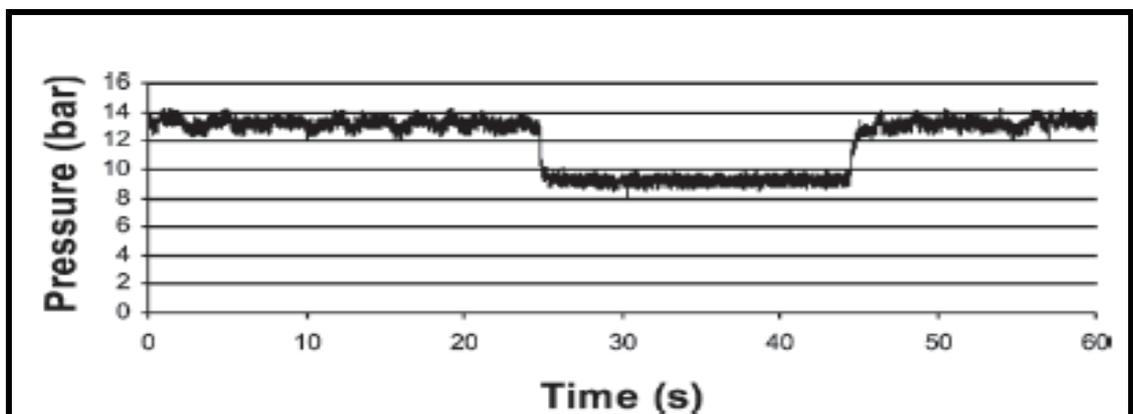


Figura 2.13: Indicativo do sinal de pressão do escoamento subcrítico, de acordo com a queda de pressão de aproximadamente 4 bar, no intervalo de tempo entre 25 a 45 segundos (Schüller *et al.*, 2006, p.376).

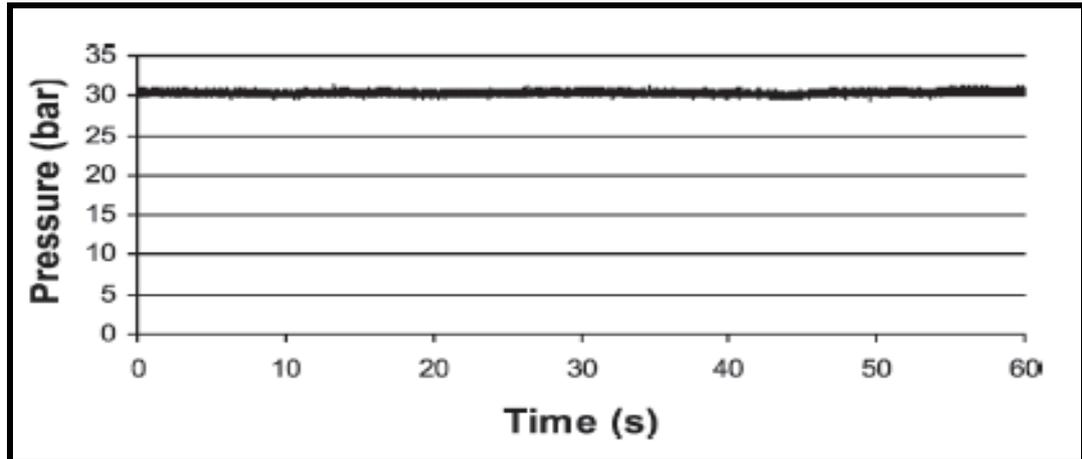


Figura 2.14: Indicativo do sinal de pressão do escoamento crítico, de acordo com o valor constante da pressão em função do tempo (Schüller *et al.*, 2006, p.376).

Schüller *et al.* (2006) compararam e verificaram seus resultados em relação aos outros modelos, como por exemplo, o modelo de Perkins, para prever a vazão mássica para condições de escoamento crítico e subcrítico, com uma média de erro de 6,2% (valor absoluto) e desvio padrão de 8,9%. O gráfico da Figura 2.15 mostra o resultado da vazão mássica experimental versus prevista utilizando o modelo de Schüller *et al.* (2006).

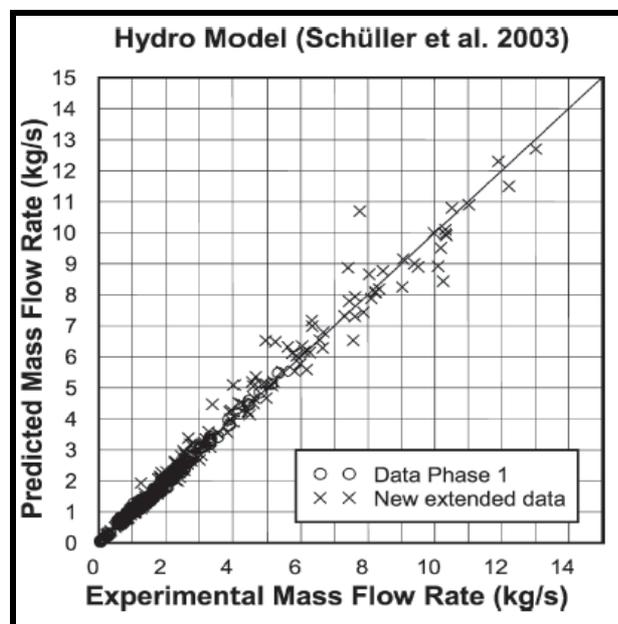


Figura 2.15: Vazão mássica prevista versus medida pelo modelo de Schüller (Schüller *et al.*, 2006, p.378).

Perkins (1993) estudou o escoamento crítico, subcrítico e o limite entre eles para misturas multifásicas através de *choke*. Este método foi testado comparando a vazão calculada e medida de dados na literatura para ar/água, ar/querosene, gás

natural, gás natural/óleo, água/gás natural e água. Foram desconsiderados neste trabalho sistemas que envolvem condensação da fase gasosa, como água/vapor, e as condições de fluxo que conduziram a pressão na garganta do *choke* igual ou menor do que a pressão de vapor da fase gasosa.

Perkins (1993) assumiu que as relações entre as variáveis em qualquer ponto do sistema de escoamento podem ser determinadas baseadas em seis (6) suposições: primeiro, a temperatura varia com a posição, mas em algum ponto, todas as fases estão na mesma temperatura; segundo, a velocidade varia com a posição, mas em algum ponto, todas as fases estavam com a mesma velocidade; terceiro, o fator de compressibilidade do gás é constante; quarto, o líquido tem uma compressibilidade desprezível, quando comparado com a do gás; quinto, as mudanças de elevação são desprezíveis; sexto, o processo de escoamento é adiabático e sem atrito.

A partir da equação geral da energia, Perkins (1993) utilizou a seguinte forma:

$$144p_1V_1 + E_1 + \frac{v_1^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c}Z'_1 + Q - W = 144p_2V_2 + E_2 + \frac{v_2^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c}Z'_2, \quad (2.3.5)$$

onde  $p_1$ ,  $V_1$ ,  $E_1$ ,  $v_1$  e  $Z'_1$  são, respectivamente, a pressão, volume específico, energia interna, velocidade e elevação a montante do *choke*. Já  $p_2$ ,  $V_2$ ,  $E_2$ ,  $v_2$  e  $Z'_2$  são, respectivamente, a pressão, volume específico, energia interna, velocidade e elevação a jusante do *choke*. Além disso, Perkins (1993) definiram  $g$ ,  $g_c$ ,  $Q$  e  $W$  como a aceleração gravitacional, constante gravitacional, transferência de calor e trabalho externo, respectivamente.

Perkins (1993) desprezou a diferença de elevação ( $Z'_1 = Z'_2$ ), o trabalho externo ( $W = 0$ ) e a transferência de calor ( $Q = 0$ ). Foi feita uma mudança na energia interna de acordo com a seguinte equação:

$$E_1 - E_2 = C_v(T_2 - T_1), \quad (2.3.6)$$

onde  $C_v$  é o calor específico do gás à volume constante,  $T_1$  é a temperatura a montante do *choke* e  $T_2$  é a temperatura a jusante do *choke*. A equação (2.3.6) foi reduzida para:

$$144p_1V_1 + \frac{v_1^2}{2g_c} + C_v(T_1 - T_2) = 144p_2V_2 + \frac{v_2^2}{2g_c} \quad (2.3.7)$$

Perkins (1993) considerou que a contribuição da energia para cada fase é somada, obtendo:

$$144f_G(p_1V_1 - p_2V_2) + 144\left(\frac{f_o}{\rho_o} + \frac{f_w}{\rho_w}\right)(p_1 - p_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g_c} + (f_G C_{vG} + f_o C_{vo} + f_w C_{vw})(T_1 - T_2) = 0 \quad (2.3.8)$$

onde  $C_{vG}$ ,  $C_{vo}$  e  $C_{vw}$  são, respectivamente, o calor específico do gás, óleo e água à volume constante e  $f_G$ ,  $f_o$  e  $f_w$  são, respectivamente, a fração mássica de fluxo de gás, óleo e água, satisfazendo a seguinte condição:

$$f_G + f_o + f_w = 1 \quad (2.3.9)$$

Para componentes gasosos, Perkins (1993) utilizou:

$$144PV = \frac{zR(T + 460)}{M'} \quad (2.3.10)$$

onde  $P$  é a pressão,  $V$  é o volume,  $z$  é o fator de compressibilidade,  $R$  é a constante universal dos gases,  $T$  é a temperatura e  $M'$  o peso molecular. Assim, Perkins (1993) reescreveu a equação (2.3.10) como:

$$144\lambda(p_1V_1 - p_2V_2) + 144\left(\frac{f_o}{\rho_o} + \frac{f_w}{\rho_w}\right)(p_1 - p_2) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2g_c}\right) = 0 \quad (2.3.11)$$

onde  $\rho_o$  é a massa específica do óleo,  $\rho_w$  é a massa específica da água e  $\lambda$  foi definida da seguinte forma:

$$\lambda = f_G + \frac{(f_G C_{vG} + f_o C_{vo} + f_w C_{vw}) M'}{zR} \quad (2.3.12)$$

Recordando que, se todas as fases estão na mesma temperatura e se o processo de escoamento foi sem atrito e adiabático, obteve-se:

$$dQ = f_G (C_{vG} dT + 144 P dV) + (f_o C_{vo} + f_w C_{vw}) dT = 0 \quad (2.3.13)$$

Diferenciou-se a equação (2.3.10).

$$144(PdV + VdP) = \frac{zR}{M'} dT \quad (2.3.14)$$

Substitui a equação (2.3.14) na (2.3.13), assim:

$$\left[ f_G \left( C_{vG} + \frac{zR}{M'} \right) + f_o C_{vo} + f_w C_{vw} \right] PdV + (f_G C_{vG} + f_o C_{vo} + f_w C_{vw}) VdP = 0 \quad (2.3.15)$$

Considerando somente os componentes de fase gasosa, aquecendo o gás até volume e pressão constantes, obteve-se respectivamente:

$$Q = E_2 - E_1 = C_v (T_2 - T_1), \quad (2.3.16)$$

$$Q = C_p (T_2 - T_1) = C_v (T_2 - T_1) + 144P(V_2 - V_1) = C_v (T_2 - T_1) + \frac{zR}{M'} (T_2 - T_1), \quad (2.3.17)$$

onde  $C_p$  é a capacidade calorífica à pressão constante. Deste modo,

$$C_p = C_v + \left( \frac{zR}{M'} \right) \quad (2.3.18)$$

Perkins (1993) definiu  $F$  como a razão de calores específicos:

$$F = C_p / C_v \quad (2.3.19)$$

Assim,

$$C_v = \frac{zR}{[M'(F-1)]} \quad (2.3.20)$$

e

$$C_p = \frac{zRk}{[M'(F-1)]} \quad (2.3.21)$$

Substituiu as equações (2.3.18) e (2.3.19) na equação (2.3.15) e definiu-se que:

$$n = \left( \frac{f_G F C_{v_G} + f_o C_{v_o} + f_w C_{v_w}}{f_G C_{v_G} + f_o C_{v_o} + f_w C_{v_w}} \right) \quad (2.3.22)$$

Obteve:

$$nPdV = -VdP \quad (2.3.23)$$

Integrou a equação (2.3.23) e resultou:

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n \quad (2.3.24)$$

Perkins (1993) definiu que:

$$p_r = p_2 / p_1 \quad (2.3.25)$$

Perkins (1993) substituiu a equação (2.3.24) na (2.3.11) resultando em:

$$144\lambda p_1 V_1 [1 - p_r^{(n-1)/n}] + 144 \left( \frac{f_o}{\rho_o} + \frac{f_w}{\rho_w} \right) p_1 (1 - p_r) + \frac{v_2^2}{2g_c} \left[ \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^2 - 1 \right] = 0 \quad (2.3.26)$$

O balanço material resultou em:

$$\frac{A_1 v_1}{f_G V_1 + (f_o / \rho_o) + (f_w / \rho_w)} = \frac{A_2 v_2}{f_G V_2 + (f_o / \rho_o) + (f_w / \rho_w)}, \quad (2.3.27)$$

onde  $A_1$  e  $A_2$  são, respectivamente, a área a montante e a jusante do *choke* respectivamente. Assim, a equação foi escrita da seguinte forma:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2 (f_G + \alpha_1)}{A_1 (f_G p_r^{-1/n} + \alpha_1)}, \quad (2.3.28)$$

onde:

$$\alpha_1 = \frac{1}{V_1} \left( \frac{f_o}{\rho_o} + \frac{f_w}{\rho_w} \right) \quad (2.3.29)$$

Perkins (1993) substituiu a equação (2.3.28) em (2.3.26) dando:

$$v_2 = \sqrt{\frac{288_{gc} \{ \lambda p_1 V_1 [1 - p_r^{(n-1)/n}] + [(f_o / \rho_o) + (f_w / \rho_w)] p_1 (1 - p_r) \}}{1 - (A_2 / A_1)^2 [(f_G + \alpha_1) / (f_G p_r^{-1/n} + \alpha_1)]^2}} \quad (2.3.30)$$

A vazão mássica foi dada por:

$$w_i = A_2 p_2 v_2 = \frac{A_2 v_2}{[f_G V_2 + (f_o / \rho_o) + (f_w / \rho_w)]} \quad (2.3.31)$$

$$w_i = A_2 \sqrt{(288_{gc} p_1 / V_1)} \sqrt{\frac{\lambda [1 - p_r^{(n-1)/n}] + \alpha_1 (1 - p_r)}{\left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \left( \frac{f_G + \alpha_1}{f_G p_r^{-1/n} + \alpha_1} \right)^2 \right] (f_G p_r^{-1/n} + \alpha_1)^2}} \quad (2.3.32)$$

A vazão máxima foi determinada encontrando o valor de  $P_r$  que resultou  $dw_i / dp_r = 0$ . Esta vazão deverá ter o mesmo valor de  $P_r$  que resultará em:

$$\frac{d}{dp_r} \left( \frac{w_i}{A_2 \sqrt{288 g_c p_1 / V_1}} \right)^2 = 0 \quad (2.3.33)$$

Perkins (1993) rearranjou a equação (2.3.32) na forma da equação (2.3.33) e diferenciou a mesma resultando em:

$$\begin{aligned} & \{2\lambda[1 - p_r^{-(n-1)/n}] + 2\alpha_1(1 - p_r)\} \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \left( \frac{f_G + \alpha_1}{f_G p_r^{-1/n} + \alpha_1} \right)^2 \right] \left[ \frac{f_G}{n} p_r^{-(1+n)/n} \right] + \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \frac{f_G (f_G + \alpha_1)^2 p_r^{-(1+n)/n}}{(f_G p_r^{-1/n} + \alpha_1)^2} \right\} \\ & = \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \left( \frac{f_G + \alpha_1}{f_G p_r^{-1/n} + \alpha_1} \right)^2 \right] (f_G p_r^{-1/n} + \alpha_1) \left[ \lambda \left( \frac{n-1}{n} \right) p_r^{-1/n} + \alpha_1 \right] \end{aligned} \quad (2.3.34)$$

Primeiro Perkins (1993) resolveu a equação (2.3.34) para a determinação de  $P_r$ . Com este valor, utilizou a equação (2.3.25), obtendo valor da pressão na garganta do *choke* ( $P_2$ ). Na próxima etapa, utilizou a equação (2.3.24) para encontrar o valor do volume específico ( $V_2$ ). Em seguida, a equação (2.3.30) foi usada para a obtenção da velocidade na garganta do *choke* ( $v_2$ ). E por último, Perkins (1993) determinou o valor da vazão mássica isotrópica ( $w_i$ ) através da equação (2.3.31).

Perkins (1993) utilizou a equação (2.3.35) para a determinação da pressão a jusante em condições de escoamento subcrítico:

$$p_3 = p_1 - \frac{(p_1 - p_4)}{[1 - (d_c / d_p)^{1.85}]} \quad , \quad (2.3.35)$$

onde  $p_3$  é a pressão a jusante da garganta do *choke* para o escoamento subcrítico,  $p_4$  é a pressão a jusante do *choke* para expansão politrópica,  $d_c$  é o diâmetro do *choke* e  $d_p$  o diâmetro da tubulação a jusante do *choke*.

Para determinar o escoamento crítico, subcrítico e o limite entre eles, Perkins (1993) utilizou o seguinte método: inicialmente determinou a pressão na garganta do

*choke* ( $p_2$ ) utilizando a equação (2.3.34) e (2.3.25), logo após, determinou o valor da pressão a jusante do *choke* ( $p_3$ ) utilizando a equação (2.3.35).

Assim, para a determinação dos padrões de escoamento, as seguintes considerações foram levadas em conta:

1) Se o valor de  $p_2 > p_3$ , o escoamento foi considerado crítico e  $p_r = p_2 / p_1$  deverá ser usado nas equações (2.3.30) e (2.3.32) para o cálculo da velocidade isotrópica e vazão mássica;

2) Se o valor de  $p_2 = p_3$ , o escoamento foi considerado no limite entre crítico-subcrítico e  $p_r = p_2 / p_1 = p_3 / p_1$  deverá ser usado nas equações (2.3.30) e (2.3.32) para o cálculo da velocidade isotrópica e vazão mássica;

3) Se o valor de  $p_2 < p_3$ , o escoamento foi considerado subcrítico e  $p_r = p_3 / p_1$  deverá ser usado nas equações (2.3.30) e (2.3.32) para o cálculo da velocidade isotrópica e vazão mássica.

Perkins (1993) utilizou em todos os casos o coeficiente de descarga ( $K$ ), multiplicando-o pela vazão mássica isotrópica ( $w_i$ ) para a determinação da vazão mássica atual ( $w_a$ ).

$$K = w_a / w_i \quad (2.3.36)$$

Perkins (1993) comparou os resultados medidos e calculados, obtendo o melhor valor para este coeficiente de descarga ( $K$ ) na faixa de 0,777 até 0,899. Quando foram comparados todos os dados simultaneamente, o melhor valor deste coeficiente encontrado por Perkins (1993) foi de 0,826. A Figura 2.16 demonstra a comparação para a vazão mássica calculada e medida com coeficiente de descarga ( $K$ ) igual a 0,826.

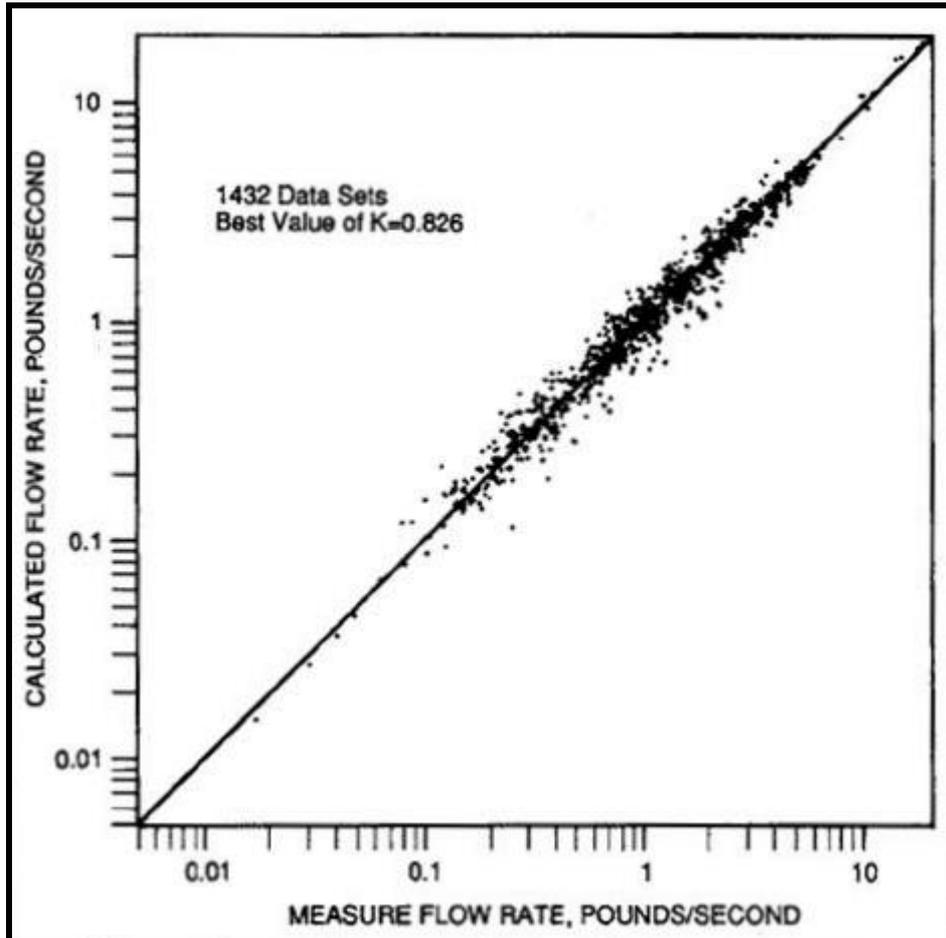


Figura 2.16: Valores calculados versus medidos para vazão mássica em condições de escoamento crítico e subcrítico (Perkins, 1993, p.272).

Assim, Perkins (1993) concluiu que a magnitude da pressão no lado a jusante da garganta do *choke* pode ser medida utilizando este modelo, gerando bons resultados. Além disso, em todos os casos, a vazão mássica deduzida da equação geral da energia foi válida. Finalizando, Perkins (1993) mostrou que o melhor valor médio para coeficiente de descarga ( $K$ ) foi 0,826.

Dando continuidade ao estudo do escoamento crítico, subcrítico e o limite entre eles, Al-safran *et al.* (2007) utilizaram uma base teórica de um modelo dimensional partindo da equação de massa, quantidade de movimento e energia, assumindo que não há troca de calor entre os fluidos presentes no escoamento e que a fase líquida é incompressível (densidade e viscosidade são iguais a uma constante). Neste estudo foi utilizado o modelo *slip*, ou seja, existe diferença entre a velocidade das fases (a velocidade do gás é maior do que a velocidade do líquido) geradas pelo aumento da aceleração na garganta do *choke*. Assim, o modelo foi

capaz de prever o limite do escoamento crítico-subcrítico e a vazão mássica para um escoamento crítico e subcrítico.

Este modelo foi baseado nas equações utilizadas por Sachdeva *et al.* (1986), porém algumas considerações foram adicionadas em função da diferença de velocidade entre as fases presentes no escoamento, de acordo com a equação (2.3.37), definida por Al-safran *et al.* (2007) como razão *slip*:

$$R' = \frac{v_G}{v_L} \quad , \quad (2.3.37)$$

onde  $v_G$  e  $v_L$  são, respectivamente, a velocidade do gás e do líquido *in-situ*. Normalmente, o valor de  $R'$  deverá ser maior do que um (1) em função da velocidade do gás ser maior do que a do líquido.

Levando em consideração a presença da razão *slip* ( $R'$ ), Al-safran *et al.* (2007) escreveram a massa específica da mistura ( $\rho_{m_2}$ ) da seguinte forma:

$$\frac{1}{\rho_{m_2}} = \left[ \frac{x}{\rho_{G_2}} + \frac{R'(1-x)}{\rho_{L_2}} \right] \left[ x + \frac{1}{R'}(1-x) \right] \quad , \quad (2.3.38)$$

onde  $x$  representa a fração mássica do gás,  $\rho_{L_2}$  é a massa específica do líquido a jusante do *choke* e  $\rho_{G_2}$  a massa específica do gás a jusante do *choke*.

Al-safran *et al.* (2007) assumiram uma expansão isotrópica ( $n$ ) através da restrição para uma mistura de acordo com a seguinte expressão:

$$n = \frac{xkC_v + (1-x)C_L}{xC_v + (1-x)C_L} \quad , \quad (2.3.39)$$

onde  $k$  é a taxa de calor específico,  $C_v$  e  $C_L$  são respectivamente os valores de calor específico para o gás e líquido em condições de volume constante.

A equação de balanço da energia para o escoamento multifásico foi definida como:

$$\frac{dp}{\rho_m} = \frac{m^2}{2} \left[ \frac{1}{\rho_{m_2}^2 A_2^2} - \frac{1}{\rho_{m_1}^2 A_1^2} \right], \quad (2.3.40)$$

onde  $\rho_{m_1}$  é a massa específica da mistura a montante do *choke*,  $\rho_{m_2}$  é a massa específica da mistura a jusante do *choke*,  $A_1$  é a área a montante do *choke*,  $A_2$  é a área a jusante do *choke* e  $m$  a vazão mássica.

Na equação (2.3.40) desprezou-se a energia interna para o gás devido ao valor de  $n$  ser próximo de um (1), viabilizando essa consideração. Al-safran *et al.* (2007) substituíram a massa específica da mistura da equação (2.3.38) na equação (2.3.40) e assumiram a expansão isotrópica, reescrevendo-a da seguinte forma:

$$\left\{ R'(1-x)V_L(P_1 - P_2) + \frac{xn}{n-1} [P_1 V_{G_1} - P_2 V_{G_2}] \right\} \left[ x + \frac{1}{R'}(1-x) \right] = \frac{m^2}{2\rho_{m_2}^2 A_2^2} \left[ 1 - \frac{\rho_{m_2}^2 A_2^2}{\rho_{m_1}^2 A_1^2} \right], \quad (2.3.41)$$

onde  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $V_L$  e  $V_G$  são, respectivamente, pressão a montante do *choke*, pressão a jusante do *choke*, volume específico do líquido e do gás. Substituíram a massa específica e definiram a equação em termos de  $r$ , definida pela razão da pressão  $P_2 / P_1$ , e obtiveram:

$$\left\{ R'(1-x)V_L P_1 (1-r) + \frac{xn}{n-1} P_1 V_{G_1} \left[ 1 - r^{\frac{n-1}{n}} \right] \right\} = \frac{m^2}{2A_2^2} \left[ xV_{G_2} + R'(1-x)V_L \right]^2 \left[ x + \frac{1}{R'}(1-x) \right] \left[ 1 - \left( \frac{xV_{G_2} + R'(1-x)V_L}{xV_{G_1} + R'(1-x)V_L} \right)^2 \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (2.3.42)$$

Substituíram  $V_{G_2} = V_{G_1} r^{-1/n}$  e definiram a seguinte equação:

$$\alpha = \frac{R'(1-x)V_L}{xV_{G_1}}, \quad (2.3.43)$$

e simplificaram a equação (2.3.44) como:

$$\frac{m^2}{2A_2^2} = \frac{\alpha P_1(1-r) + \frac{n}{n-1} P_1 \left[ 1 - r^{\frac{n-1}{n}} \right]}{(xV_{G_1}) \left[ r^{\frac{-1}{n}} + \alpha \right]^2 \left[ 1 - \left( \frac{1+\alpha}{r^{\frac{-1}{n}} + \alpha} \right) \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \left[ x + \frac{1}{R'}(1-x) \right]} \quad (2.3.44)$$

Para um ponto crítico, Al-safran *et al.* (2007) definiram:

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{m^2 x V_{G_1}}{2A_2^2 P_1} \right] = 0 \quad (2.3.45)$$

Derivaram e rearranjaram a equação (2.3.44), obtendo:

$$(r_c)^{\frac{1}{1-n}} = \frac{\alpha(1-r_c) + \frac{n}{n-1}}{\frac{n}{n-1} + \frac{n}{2} \left\{ 1 + \alpha r_c^{\frac{-1}{n}} \right\}^2 \left[ 1 - \left( \frac{1+\alpha}{r_c^{\frac{-1}{n}} + \alpha} \right) \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]} \quad (2.3.46)$$

Esta equação foi resolvida por tentativa e erro, pois encontraram a razão de pressão crítica ( $r_c$ ) antes e depois da igualdade. Assumiram também que:

$$\frac{A_2}{A_1} \ll 1 \quad (2.3.47)$$

Então, Al-safran *et al.* (2007) simplificaram a equação (2.3.46) como:

$$(r_c)^{\frac{1}{1-n}} = \frac{\alpha(1-r_c) + \frac{n}{n-1}}{\frac{n}{n-1} + \frac{n}{2} \left\{ 1 + \alpha r_c^{\frac{1}{n}} \right\}^2} \quad (2.3.48)$$

Al-safran *et al.* (2007) reescreveram a equação (2.3.44) em função da vazão mássica para a determinação do escoamento crítico e subcrítico:

$$m^2 = \frac{C' A_2^2 P_1 \left[ \alpha(1-r) + \frac{n}{n-1} \left( 1 - r^{\frac{n-1}{n}} \right) \right]}{x V_{G_1} \left[ r^{\frac{-1}{n}} + \alpha \right]^2 \left[ 1 - \left( \frac{1+\alpha}{r^{\frac{-1}{n}} + \alpha} \right)^2 \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \left[ x + \frac{1}{R'} (1-x) \right]} \quad (2.3.49)$$

Assumiram que  $A_2 / A_1 \ll 1$  e simplificaram a equação (2.3.49) para:

$$m^2 = \frac{C' A_2^2 P_1 \left[ \alpha(1-r) + \frac{n}{n-1} \left( 1 - r^{\frac{n-1}{n}} \right) \right]}{x V_{G_1} \left[ r^{\frac{-1}{n}} + \alpha \right]^2 \left[ x + \frac{1}{R'} (1-x) \right]}, \quad (2.3.50)$$

onde  $A_2$  é a área seccional através do *choke*,  $P_1$  é a pressão a montante do *choke* e  $C'$  é uma constante que mudará dependendo das unidades utilizadas ( $C' = 2000 C_D$  para sistema internacional e  $C' = 2 C_D^2 g_c 144$  para sistema americano). Neste estudo o valor de  $C_D = 0,75$  foi achado apropriado para calibrar o modelo de perdas por imperfeições e irreversibilidade.

Para um caso de escoamento crítico ( $r < r_c$ ), o  $r_c$  encontrado no método iterativo da equação (2.3.48) deverá ser utilizado na equação (2.3.50) para determinação da vazão mássica crítica. Por outro lado, quando o escoamento foi previsto ser subcrítico ( $r > r_c$ ), o  $r$  encontrado através da razão das pressões  $P_2 / P_1$  deverá ser utilizado na equação (2.3.50) para determinação da vazão mássica subcrítica.

Para avaliação deste modelo, Al-safran *et al.* (2007) compararam cento e dez (110) pontos experimentais de escoamento no limite crítico-subcrítico utilizados por Sachdeva *et al.* (1986), de acordo com a Figura 2.17, onde foi possível fazer uma análise comparativa do modelo apresentado por Al-safran *et al.* (2007) com outros modelos, como por exemplo, modelo de Sachdeva *et al.* (1986), mostrando um bom resultado em função da razão das pressões versus razão gás-líquido (GLR).

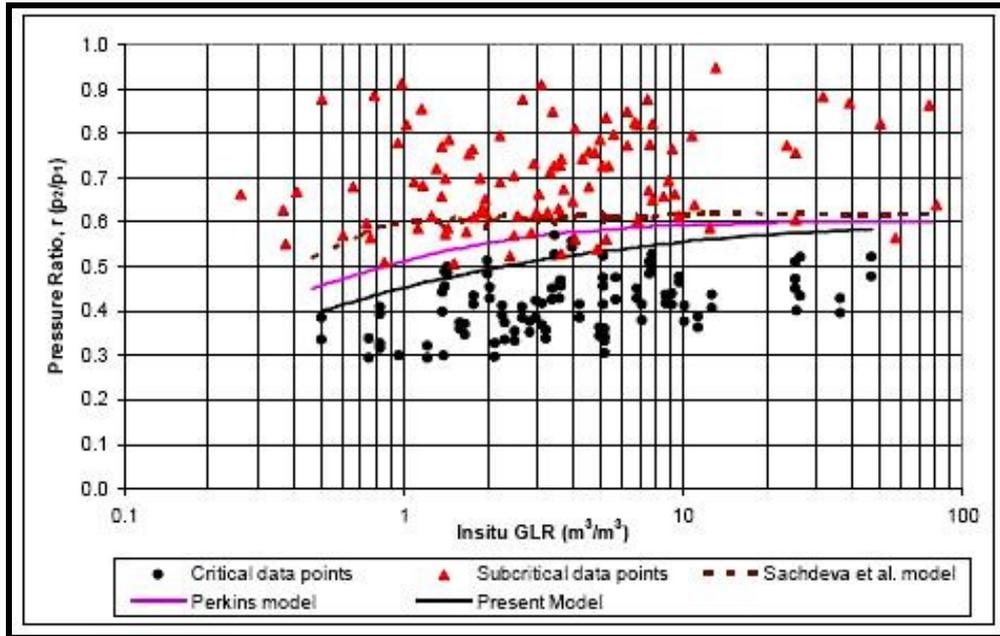


Figura 2.17: Comparação do limite de escoamento crítico previsto com os dados experimentais (Al-safran *et al.*, 2007, p.03).

Outro método de avaliação foi gerado por dados de laboratório para vazão mássica subcrítica prevista versus medida por Al-safran *et al.* (2007), gerando um bom coeficiente de correlação, de acordo com a Figura 2.18.

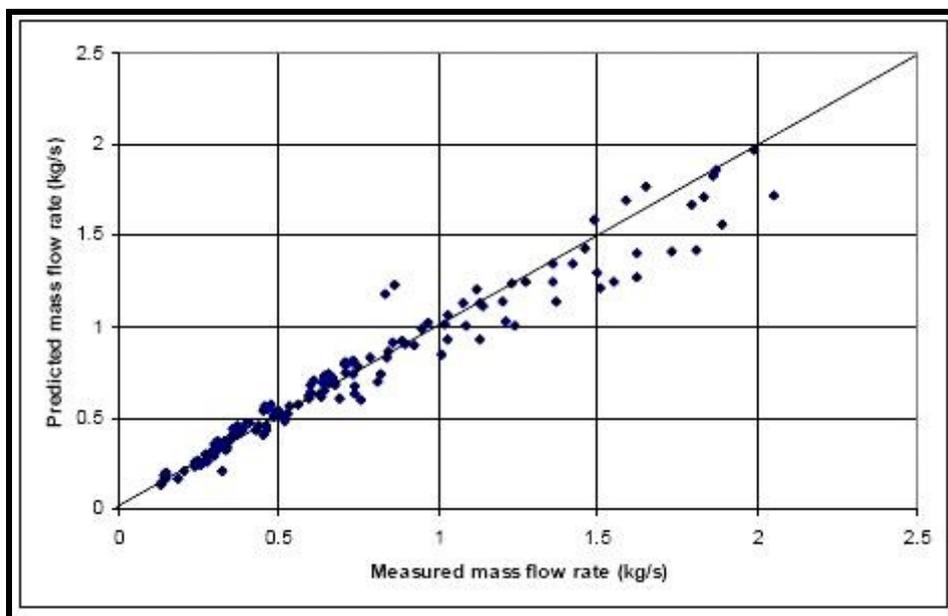


Figura 2.18.: Vazão mássica prevista versus medida em laboratório para o modelo *slip* (Al-safran *et al.*, 2007, p.04).

Finalizando, Al-safran *et al.* (2007) utilizaram dados de vazão mássica calculada a partir deste modelo versus dados de campo originados no Oriente Médio

(Figura 2.19), gerando resultados melhores quando comparados com outros trabalhos relacionados.

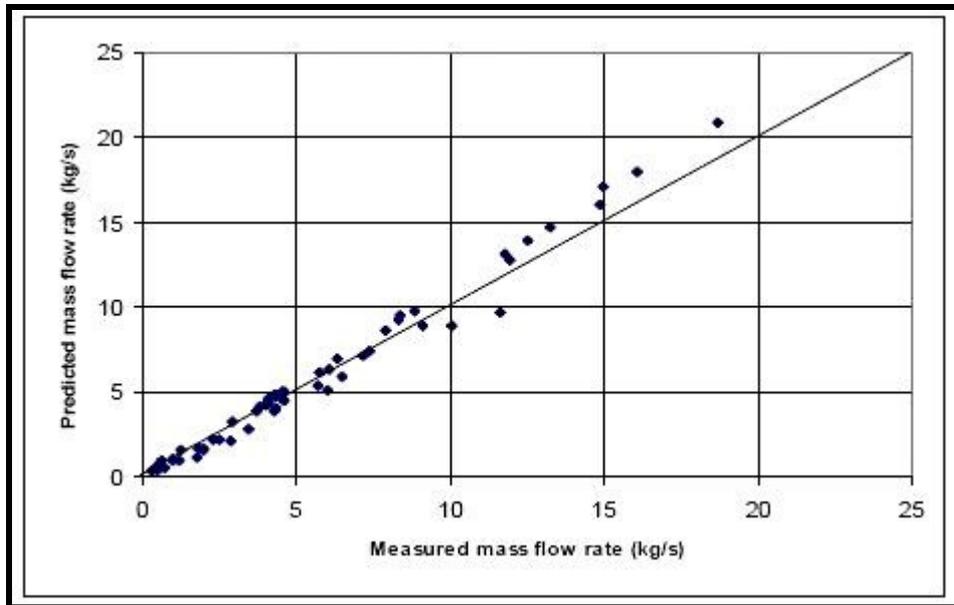


Figura 2.19: Vazão mássica prevista versus medida em campo para o modelo *slip* (Al-safran, 2007, p.05).

Al-safran *et al.* (2007) concluíram que o fenômeno *slip* entre as fases líquida e gasosa, através da entrada e garganta do *choke*, é um parâmetro que deve ser levado em consideração para este tipo de modelagem. Assim, a seleção do modelo *slip* depende do tipo de escoamento, fração de gás e viscosidade do fluido. Al-safran *et al.* (2007) concluíram também que este modelo foi capaz de prever o limite crítico-subcrítico durante o escoamento.

## 2.4 - MODELO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO ATRAVÉS DE *CHOKES*

Nesse item do capítulo 2, será realizado um estudo do modelo de escoamento bifásico através de *chokes* desenvolvido por Sachdeva *et al.* (1986). Este modelo terá grande importância, pois utilizaremos as equações que foram desenvolvidas por Sachdeva *et al.* (1986) no programa computacional criado para este trabalho. O objetivo é a determinação do tipo de escoamento (crítico, subcrítico ou limite entre eles) e o cálculo de outros parâmetros como: massa específica da mistura, fluxo mássico e vazão mássica das fases presentes a jusante do *choke*.

Sachdeva *et al.* (1986) partindo de equações que descrevem a conservação de energia, massa e quantidade de movimento, conseguiram determinar as relações para escoamento crítico, escoamento subcrítico e o limite crítico-subcrítico. Dados foram gerados para escoamento de água/ar e querosene/ar através de diâmetros de *chokes* de 6,35 e 12,7mm, instalados horizontalmente (Figura 2.20).

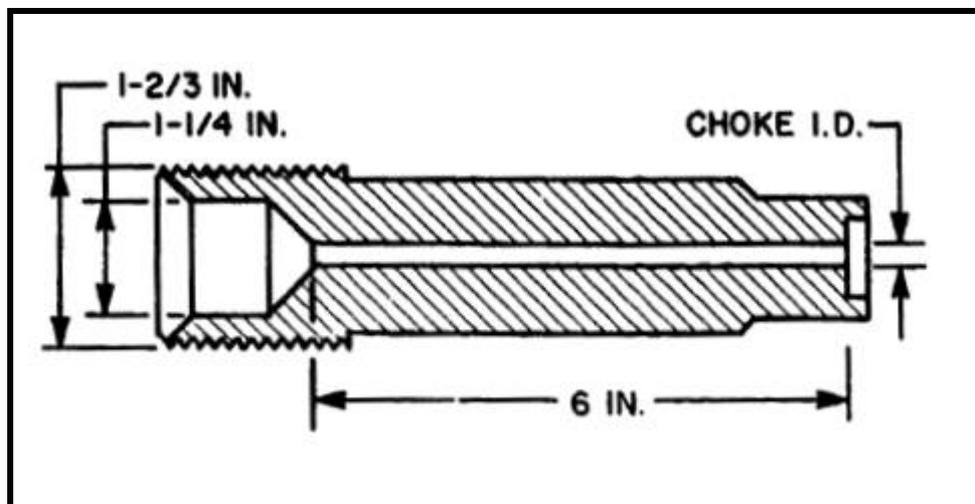


Figura 2.20: Seção do *choke* (Sachdeva *et al.*, 1986, p.11).

Para um escoamento horizontal, a equação da quantidade de movimento na garganta do *choke*, usada por Sachdeva *et al.* (1986), foi escrita da seguinte forma.

$$-144A_c dP_2 = d(M_{G2}v_{G2} + M_{L2}v_{L2}) \frac{1}{g_c} + d(\tau_w \cdot \pi d_c L_c) \quad , \quad (2.4.1)$$

onde  $P_2$ ,  $M_{G2}$ ,  $v_{G2}$ ,  $M_{L2}$  e  $v_{L2}$  são, respectivamente, pressão, vazão mássica gasosa, velocidade gasosa, vazão mássica líquida e velocidade líquida a jusante do *choke*. Já  $A_c$  é a área de seção do *choke*,  $g_c$  é a constante gravitacional,  $\tau_w$  é o esforço cisalhante sobre a parede da tubulação,  $d_c$  é o diâmetro do *choke* e  $L_c$  o comprimento *choke*.

O termo de aceleração gravitacional e o esforço cisalhante sobre a parede foram desconsiderados. Sachdeva *et al.* (1986) mostraram que existe praticamente um modelo homogêneo na garganta do *choke*, assumindo que a velocidade das fases na garganta será a mesma ( $v_{L2} = v_{G2} = v_2$ ). Assim, a equação (2.4.1) foi reduzida para:

$$\begin{aligned} -144 g_c A_2 dP_2 &= d(M_{G2}v_2 + M_{L2}v_2) & (2.4.2) \\ &= d \left[ G_2 \left\{ v_2 \frac{M_{L2}}{G_2} + v_2 \frac{M_{G2}}{G_2} \right\} \right], \\ &= d \left[ G_2 A_2 \{ (1-x_2)v_2 + x_2v_2 \} \right], \\ &= d \left[ A_2 G_2 v_2 \right] , \end{aligned}$$

onde  $A_2$ ,  $x_2$  e  $G_2$  são, respectivamente, área, fração mássica gasosa e o fluxo mássico a jusante do *choke*.

As equações de continuidade das fases foram:

$$M_L = A_L v_L \rho_L , \quad (2.4.3)$$

$$M_G = A_G v_G \rho_G \quad (2.4.4)$$

e

$$M = M_G + M_L \quad (2.4.5)$$

também

$$M_{G2} = \frac{M_{L2}}{M} \frac{M}{A_2} \frac{1}{A_L} \frac{1}{\rho_{L2}} = \frac{(1-x_2)}{(1-\alpha_2)} \frac{G_2}{\rho_{L2}} , \quad (2.4.6)$$

onde  $\alpha_2$  é a fração nula a jusante do *choke*,  $\rho_L$  é a massa específica líquida e  $\rho_G$  é a massa específica gasosa. Como  $G_2 = (M_{G2} + M_{L2})/A_2$ , e semelhantemente,

$$v_{G2} = \frac{x_2 G_2}{\alpha_2 \rho_{G2}} \quad (2.4.7)$$

Sachdeva *et al.* (1986) eliminaram  $\alpha_2$  entre as equações (2.4.6) e (2.4.7) e assumiram  $v_{L2} = v_{G2} = v_2$ , onde obtiveram:

$$v_2 = \frac{G_2}{\rho_{m2}}, \quad (2.4.8)$$

onde  $G_2$  é o fluxo mássico a jusante do *choke* e  $\rho_{m2}$  é a massa específica da mistura a jusante do *choke*:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{(1-x)}{\rho_L} \quad (2.4.9)$$

Expandiu-se a equação (2.4.2) e obtiveram:

$$-144g_c = G_2 \frac{dv_2}{dP_2} + v_2 \frac{dG_2}{dP_2} \quad (2.4.10)$$

Durante o escoamento crítico, um máximo fluxo mássico a jusante do *choke* foi obtido com relação à pressão a jusante. Como  $G_2 = (M_{G2} + M_{L2})/A_2$ , o limite foi definido como:

$$\frac{dG_2}{dP_2} = 0 \quad (2.4.11)$$

No escoamento crítico, influenciado pelas condições descritas na equação (2.4.11), a equação (2.4.10) foi reduzida para:

$$-144g_c = G_2^2 \frac{dV_{m2}}{dP_2} \quad (2.4.12)$$

Diferenciando a equação (2.4.9) obtiveram:

$$\frac{dV_{m2}}{dP_2} = (1-x_2) \frac{dV_{L2}}{dP_2} + x_2 \frac{dV_{G2}}{dP_2} \quad , \quad (2.4.13)$$

onde  $V_{m2}$ ,  $V_{L2}$  e  $V_{G2}$  são, respectivamente, volume específico da mistura, do líquido e do gás a jusante do *choke*.

O líquido foi assumido incompressível:

$$\frac{dV_L}{dP} = 0 \quad (2.4.14)$$

As velocidades do escoamento de misturas através dos *chokes* são altas. Assim, teoricamente, não há tempo para transferência de massa na garganta do *choke*. Sachdeva *et al.* (1986) usaram:

$$x_1 = x_2 \quad , \quad (2.4.15)$$

onde  $x_1$  e  $x_2$  são respectivamente a fração mássica gasosa a montante e a jusante do *choke*, respectivamente.

Combinando equações (2.4.13), (2.4.14) e (2.4.15) obtiveram:

$$-144g_c G_2^{-2} = x_1 \frac{d}{dP_2} (V_{G2}) \quad (2.4.16)$$

Durante a expansão de gás na garganta do *choke*, existe entre as fases um gradiente de temperatura, resultando em uma transferência de calor rápida. Este processo está entre o extremo do processo adiabático e isotérmico (para o qual o valor de  $n$  seria respectivamente unitário e  $c_p / c_v$ ). Assim, o fluxo de calor na mistura de gás-líquido foi aproximado para um processo politrópico como:

$$P_2 V_{G2}^n = c \quad , \quad (c = \text{constante}), \quad (2.4.17)$$

onde o expoente politrópico ( $n$ ) foi :

$$n = 1 + \frac{x_1(C_p - C_v)}{x_1C_v + (1 - x_1)C_L} \quad (2.3.18)$$

Das equações (2.4.16) e (2.4.17) obtiveram:

$$G_2^2 = \frac{nP_2}{x_1V_{G2}} (144g_c) \quad (2.4.19)$$

Sachdeva *et al.* (1986) desconsideraram a perda por fricção e assumindo as velocidades das fases iguais, a equação da energia foi reduzida para:

$$-144g_c \frac{dP}{\rho_m} = d \left( \frac{v^2}{2} \right) \quad (2.4.20)$$

ou

$$-144g_c \left[ \frac{(1-x_1)}{\rho_L} + \frac{x_1}{\rho_G} \right] dP = d \left( \frac{v^2}{2} \right) \quad (2.4.21)$$

Integraram a equação (2.4.21) entre  $P_1$  e  $P_2$ , levando em conta que a massa específica do líquido e a fração do gás permaneceram constantes e que a expansão do gás é adiabática. Usualmente,  $v_2^2 \gg v_1^2$  (como  $d_c = d_2 \ll d_{pipe}$ ) para um *choke*.

Notaram que  $v_2 = G_2 / \rho_{m2}$ , então, a equação (2.4.21) foi substituída por:

$$-144g_c \left[ (1-x)V_L(P_1 - P_2) + x_1 \frac{k}{k-1} (P_1V_{G1} - P_2V_{G2}) \right] = \frac{G_2^2}{2\rho_{m2}^2}, \quad (2.4.22)$$

onde  $k$  é a razão do calor específico,  $C_p / C_v$ .

Para a obtenção do fluxo mássico a jusante do *choke* para um escoamento crítico e subcrítico, foi adicionado o coeficiente de descarga ( $C_D$ ) e rearranjando a equação (2.4.22) obtiveram:

$$G_2 = C_D \left\{ 2g_c 144 P_1 \rho_{m2}^2 \left[ \frac{(1-x_1)(1-y)}{\rho_L} + \frac{x_1 k}{k-1} (V_{G1} - y V_{G2}) \right] \right\}^{0.5}, \quad (2.4.23)$$

onde

$$V_{G2} = V_{G1} y^{-\frac{1}{k}} \quad (2.4.24)$$

e

$$\frac{1}{\rho_{m2}} = x_1 V_{G1} y^{-\frac{1}{k}} + (1-x_1) V_L \quad (2.4.25)$$

Sachdeva *et al.* (1986) utilizaram o coeficiente de descarga ( $C_D$ ) para absorver erros ocorridos no modelo. Quando se trata de um regime onde o escoamento é feito através de restrições, é comum a utilização um fator de modificação final, cujo valor varia de zero (0) a um (1), este último para quando o regime for considerado ideal. Frequentemente, o valor de  $C_D$  é relacionado com fatores como o número de Reynolds, o diferencial de pressão, o fator de expansão de gás e etc. Seu valor depende do posicionamento do *choke* na linha de produção, sendo ele próximo ou não da cabeça do poço, podendo sofrer alterações nos padrões de escoamento multifásico em função desta localização.

Outro aspecto importante é determinar o limite crítico-subcrítico ( $y_c$ ) antes do cálculo do fluxo mássico a jusante do *choke* (equação 2.4.23). No trabalho realizado por Sachdeva *et al.* (1986), a razão de pressão crítica, também denominada de limite crítico-subcrítico, foi obtida a partir da equação (2.4.22). Eliminaram  $G_2^2$  entre as equações (2.4.19) e (2.4.22) e obtiveram:

$$(1-x_1)V_L(P_1 - P_2) + \frac{x_1 k}{k-1} (P_1 V_{G1} - P_2 V_{G2}) = \frac{1}{2\rho_{m2}^2} \left( \frac{n P_2}{x_1 V_{G2}} \right) \quad (2.4.26)$$

Denotando que:

$$y = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.4.27)$$

e rearranjando a equação (2.4.26) obtiveram o limite crítico-subcrítico que é determinado por interação  $y$ :

$$y_c = \left\{ \frac{\frac{k}{k-1} + \frac{(1-x_1)V_L(1-y_c)}{x_1V_{G1}}}{\frac{k}{k-1} + \frac{n}{2} + \frac{n(1-x_1)V_L}{x_1V_{G2}} + \frac{n}{2} \left[ \frac{(1-x_1)V_L}{x_1V_{G2}} \right]^2} \right\}^{\frac{K}{K-1}} \quad (2.4.28)$$

Sachdeva *et al.* (1986) determinaram que se o limite crítico-subcrítico encontrado for maior à razão das pressões de acordo com a equação (2.4.27) ( $y_c > y$ ), o escoamento é considerado crítico e o valor iterativo encontrado de  $y_c$  será utilizado para a determinação do fluxo mássico, volume específico gasoso e massa específica da mistura a jusante do *choke*, de acordo com as equações (2.4.23), (2.4.24) e (2.4.25) respectivamente. Porém, se o limite crítico-subcrítico encontrado for menor ou igual à razão das pressões ( $y_c \leq y$ ), o escoamento é considerado subcrítico e o valor encontrado de  $y$  será utilizado para a determinação do fluxo mássico, volume específico gasoso e massa específica da mistura a jusante do *choke*.

Na Figura 2.21, Sachdeva *et al.* (1986) utilizaram um caso hipotético mostrando as condições de variação abaixo do limite crítico-subcrítico. A curva A foi usada como referência para o valor de  $k = 1.4$ ;  $P_1 = 80 \text{psi}$  e  $T_1 = 100^\circ\text{F}$ .

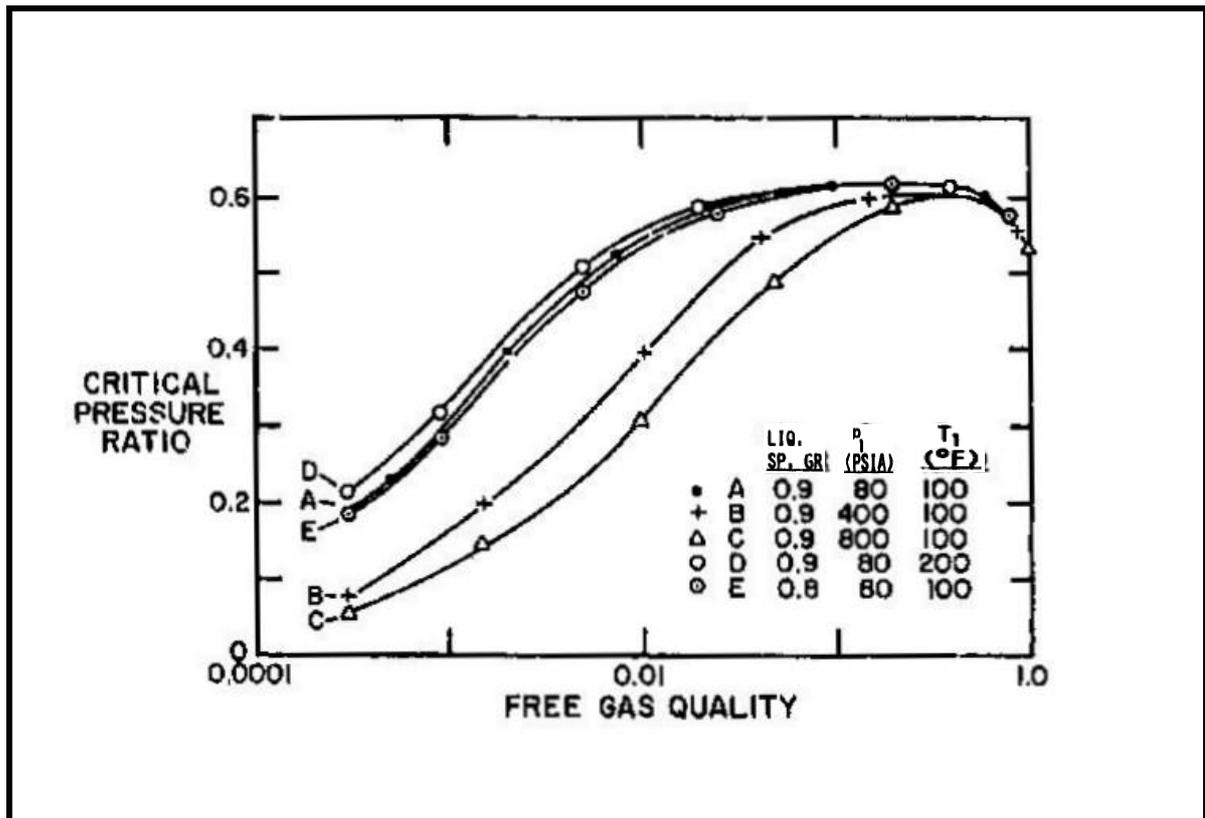


Figura 2.21: Relação de pressão crítica versus gás livre (Sachdeva *et al.*, 1986, p.12).

O efeito do crescimento da pressão a montante do *choke* ( $P_1$ ) nas curvas *B* (400 psia) e *C* (800 psia) em relação à curva *A* (80 psia) é mostrado neste gráfico. Com o aumento de  $P_1$  o gás começa a ficar mais denso e a velocidade sônica da mistura diminui. Assim, é necessária uma vazão alta através do *choke* para atingir o escoamento crítico e este aumento de  $P_1$  (curvas *B* e *C*) refletirá em uma razão de pressão crítica baixa, que é definida como  $P_2/P_1$ . Então, mantendo todos os outros parâmetros iguais, a razão de pressão crítica para uma  $P_1$  alta é menor do que para uma  $P_1$  baixa, sendo notado nas curvas *A*, *B* e *C*.

Se a temperatura for aumentada e os outros parâmetros permanecerem constantes, a massa específica do gás deverá diminuir, resultando em um aumento no valor da razão de pressão crítica, de acordo com a curva *D* e comparando a mesma com a curva *A*. Alterando a gravidade específica da fase líquida e mantendo as propriedades dos outros parâmetros constantes, Sachdeva *et al.*

(1986) mostraram que dificilmente teremos um efeito no limite crítico-subcrítico, de acordo com a curva  $E$  quando comparada com a curva  $A$ .

Sachdeva *et al.* (1986) usaram este modelo, que melhorou o método existente para prever o comportamento do *choke* em escoamento de duas fases. Utilizando dados experimentais, Sachdeva *et al.* (1986) concluíram que para *chokes* instalados na cabeça do poço, onde os efeitos do joelho (*choke housing*) estão presentes em função do seu posicionamento, o  $C_D = 0,75$  deverá ser recomendado (configurações que são comuns na prática em campo). Para os *chokes* onde os efeitos de perturbação são menores do que a configuração anterior, devido sua localização na linha de produção distante da cabeça do poço,  $C_D = 0,85$  foi recomendado.

## Capítulo 3

### **MATERIAIS UTILIZADOS PARA A MODELAGEM DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO ATRAVÉS DO *CHOKE***

Para a modelagem do escoamento multifásico através do *choke*, serão utilizados dados experimentais obtidos por Slobodcicov *et al.* (2009) numa bancada de testes, na qual foram utilizados dois medidores de vazão por obstrução (placa de orifício) e um *choke* para a determinação e caracterização do escoamento multifásico.

Este teste foi baseado na mistura de óleo morto, água e gás proveniente de campos de produção. Os valores dos parâmetros de entrada e os resultados experimentais obtidos no circuito de testes serão mostrados nos próximos itens através de gráficos.

#### **3.1 - MEDIÇÃO DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO UTILIZANDO MEDIDORES DE PRESSÃO DIFERENCIAL**

Recentemente as indústrias de petróleo vêm dando ênfase à medição de escoamentos multifásicos na exploração e produção de óleo e gás natural, principalmente na determinação da perda de carga e predição de vazões para estes fluidos.

Os medidores monofásicos convencionais necessitam que as fases presentes estejam separadas completamente a montante do ponto de medição do escoamento. Esta condição acontece somente na saída dos separadores ou plantas de processo.

Os medidores de escoamento multifásico *in-line* (placa de orifício) são dispositivos baseados na medição da variação de pressão através das áreas do escoamento. Além disso, são utilizados posteriormente para determinação de outros parâmetros como a pressão a jusante e razão entre as pressões a montante e a jusante do medidor. Outra vantagem é o custo baixo deste medidor e o simples projeto para a confecção do mesmo.

Por outro lado, esses medidores apresentam duas limitações: a primeira é a incerteza na medição em função de uma grande complexidade quando temos um escoamento multifásico e a segunda é a dificuldade na extração de amostras representativas, pois atualmente não existe um método padrão para amostragem de fluido multifásico.

### 3.2 - CIRCUITO DE TESTES EXPERIMENTAIS

O circuito de testes (Figura 3.1) foi dividido em três etapas para a execução dos experimentos. A primeira etapa foi o circuito de vazão de líquidos, a segunda sendo circuito de vazão de gás e por último o circuito multifásico devido à mistura da fase líquida com a fase gasosa, onde foram instalados e operados os medidores de pressão, temperatura e vazão.

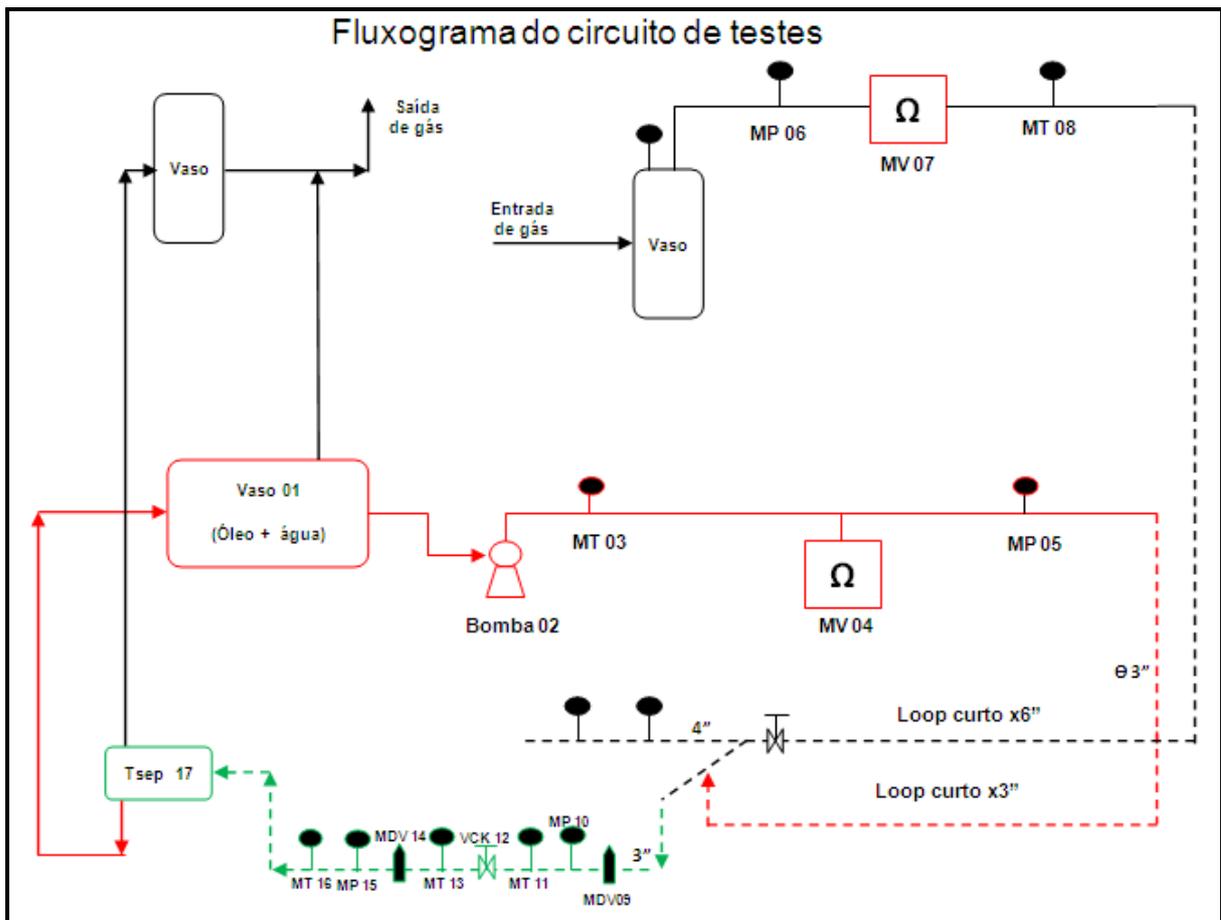


Figura 3.1: Esquema do circuito de testes experimentais.

Neste circuito, o teste foi iniciado com uma mistura de óleo morto com água (circuito vermelho – vazão de líquidos) que está localizada no *Vaso 01*. O óleo utilizado foi um *blend*, que geralmente é uma mistura de um ou mais tipos diferentes de óleo (Santos *et al.*, 2004), de produtos extraídos da região, Sergipe terra, enquanto a água foi do tipo industrial adicionada ao circuito de acordo com a fração desejada (*VFW*) durante o teste realizado. Essa mistura de água e óleo foi bombeada utilizando o equipamento *Bomba 02*, sendo feita a medição da vazão do líquido em *MV04* e a medição da pressão e da temperatura em *MP05* e *MT03* respectivamente. Depois de ter feito essas medições, o líquido passou por permutadores e iniciou uma volta curta num tubo de três (3) polegadas de diâmetro até o ponto de mistura com a linha gasosa.

Na segunda etapa, o gás originado dos campos de produção de Atalaia foi injetado no circuito de testes, passando por um medidor de vazão do gás em *MV07* e em um medidor de pressão e da temperatura em *MP06* e *MT08* respectivamente, chegando até o ponto de mistura com o escoamento do líquido através de uma tubulação de seis (6) polegadas.

O ponto inicial na bancada de experimentos do circuito de escoamento multifásico aconteceu quando foi obtido o encontro das fases e este estava posicionado a cinco (5) metros do primeiro medidor diferencial de vazão *MDV09*. Para o trecho de mistura gás-líquido (Figura 3.2) foram usadas tubulações de três (3) polegadas de diâmetro e uma válvula de *choke* superficial do tipo ajustável *VCK12*. Além dos medidores de vazão (*MDV09* e *MDV14*), foram utilizados nesse trecho de circuito, medidores de pressão absoluta, diferencial e medidores de temperatura.

Depois da medição em *MT16*, a mistura de gás-líquido foi para o tanque de separação em *Tsep17*. Assim, o líquido foi recolhido e enviado para *Vaso 01* e o gás saiu do circuito de teste.

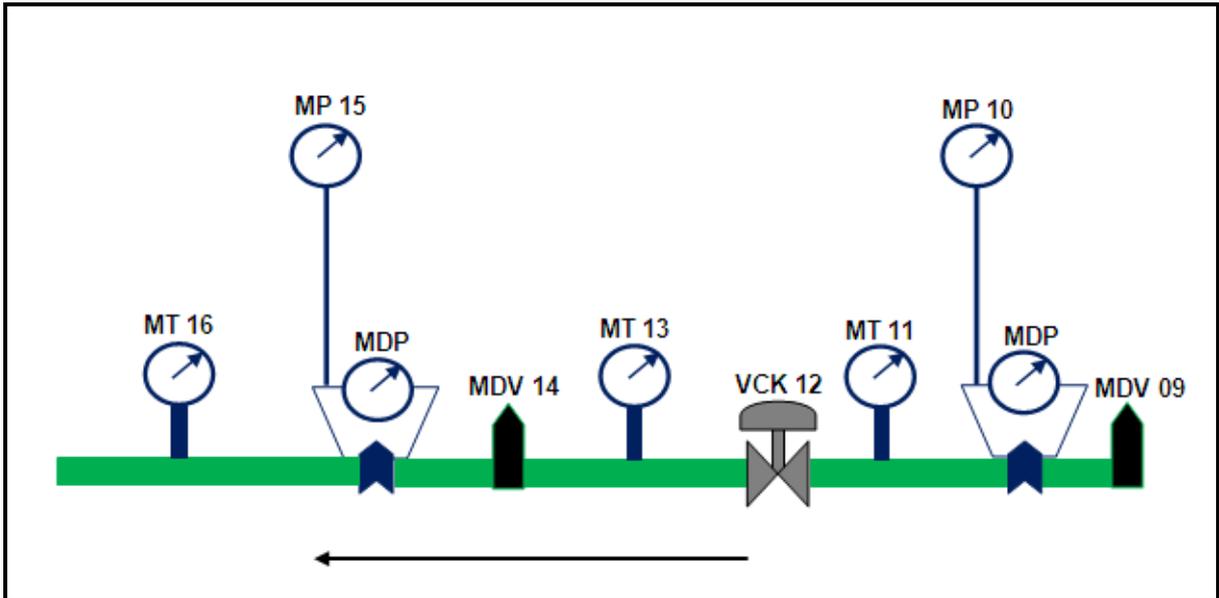


Figura 3.2: Trecho de mistura gás-líquido.

### 3.3 - PARÂMETROS DE ENTRADA E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS NO CIRCUITO DE TESTES

Nos próximos itens serão mostrados através de gráficos os valores dos parâmetros de entrada e os resultados experimentais para setenta e cinco (75) pontos no circuito de testes.

#### 3.3.1 – Parâmetros de entrada para o circuito de testes

Os valores para a vazão de líquido foram determinados utilizando medidores de vazão e são apresentados no gráfico da Figura 3.3. O percentual de água e sedimentos presentes no fluido (*BSW*) e fator volume de gás (*GVF*) foi encontrado através da fração de cada um destes componentes no circuito de testes, sendo apresentados na Figura 3.4. A densidade do óleo e da água utilizados na linha de líquido era de 0,8984 e 1,0729 respectivamente. Já na linha gasosa, foi utilizado o valor de 0,7055 para a densidade do gás.

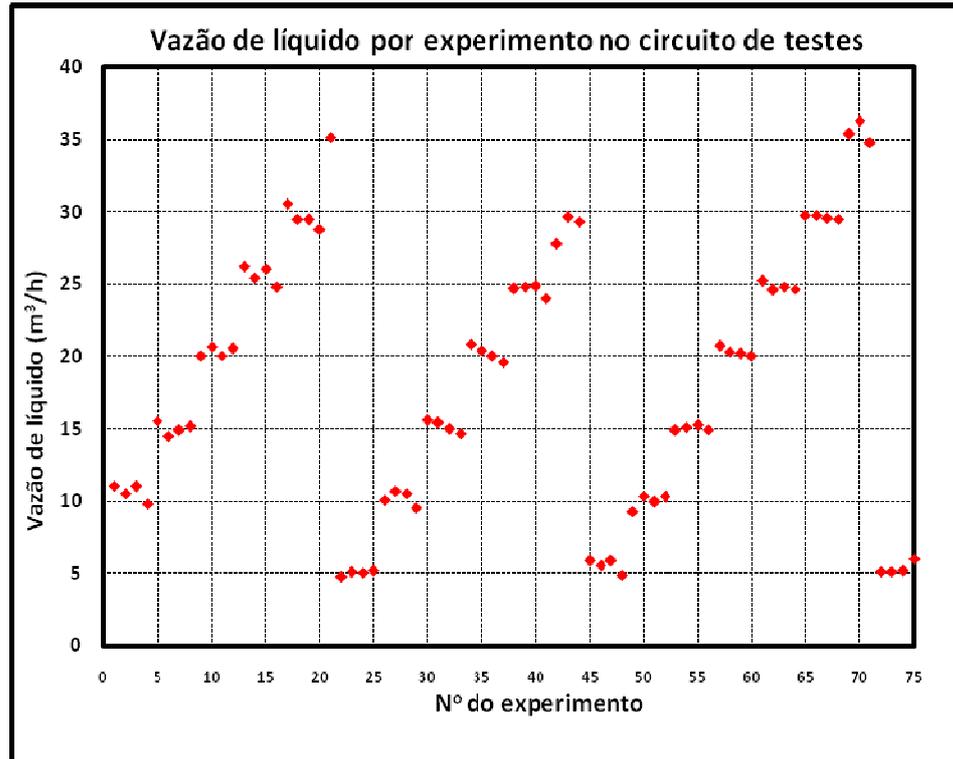


Figura 3.3: Vazão de líquido por experimento.

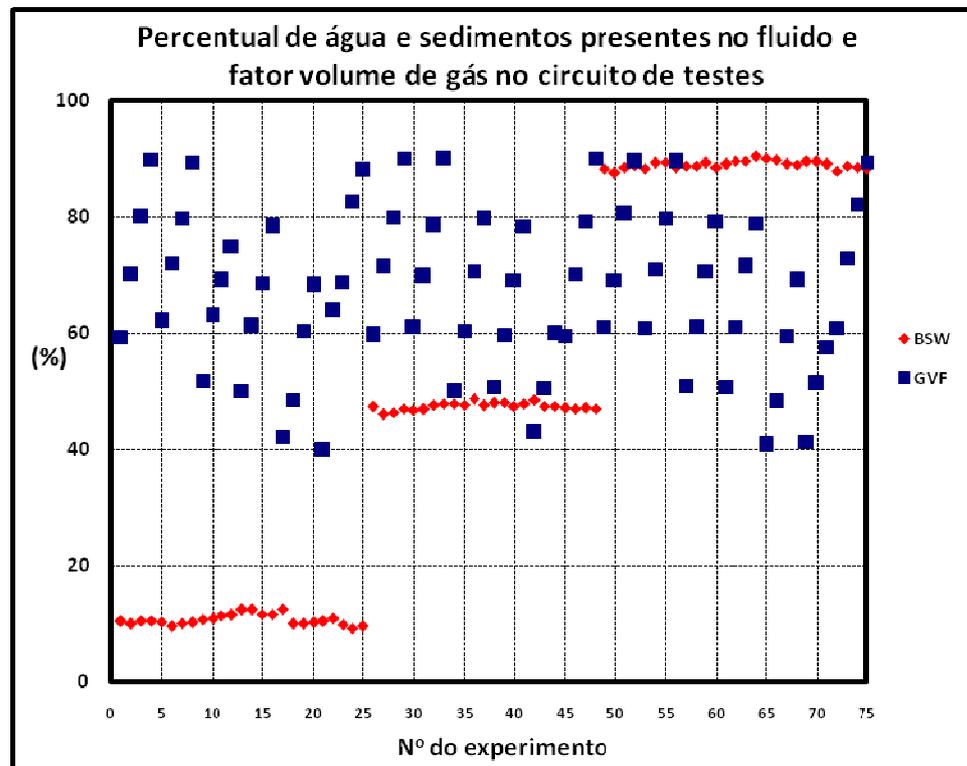


Figura 3.4: Percentual de *BSW* e *GVF* por experimento.

Nas Figuras 3.5 e 3.6 apresentaremos os valores experimentais encontrados para pressão e temperatura a jusante e a montante do *choke* respectivamente.

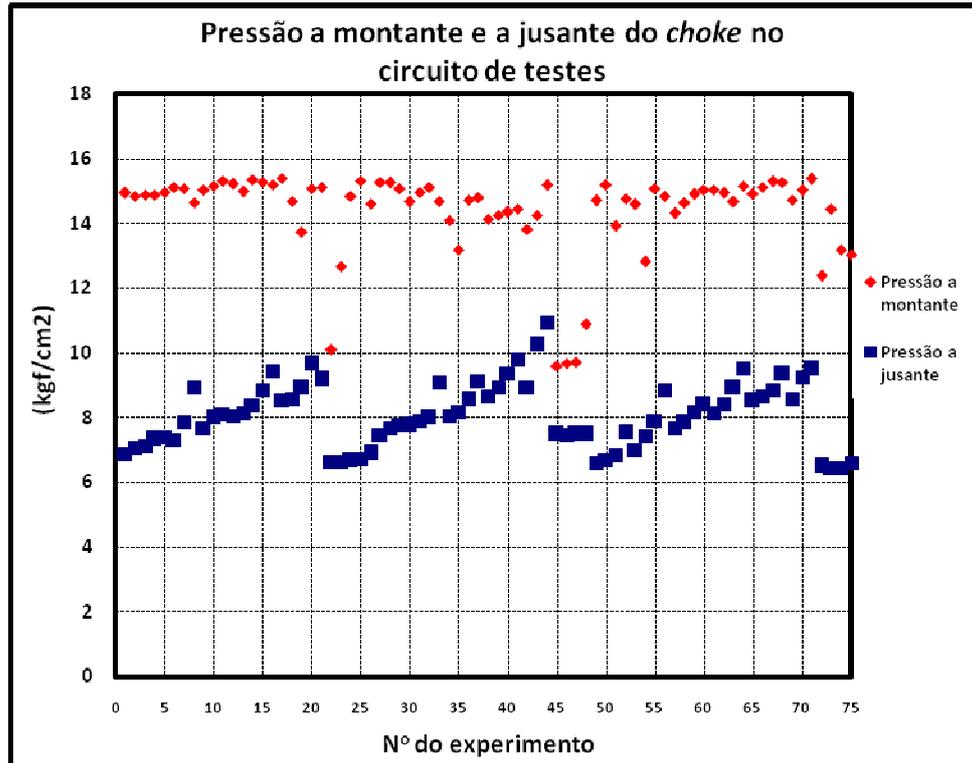


Figura 3.5: Pressão a montante e a jusante do *choke* por experimento.

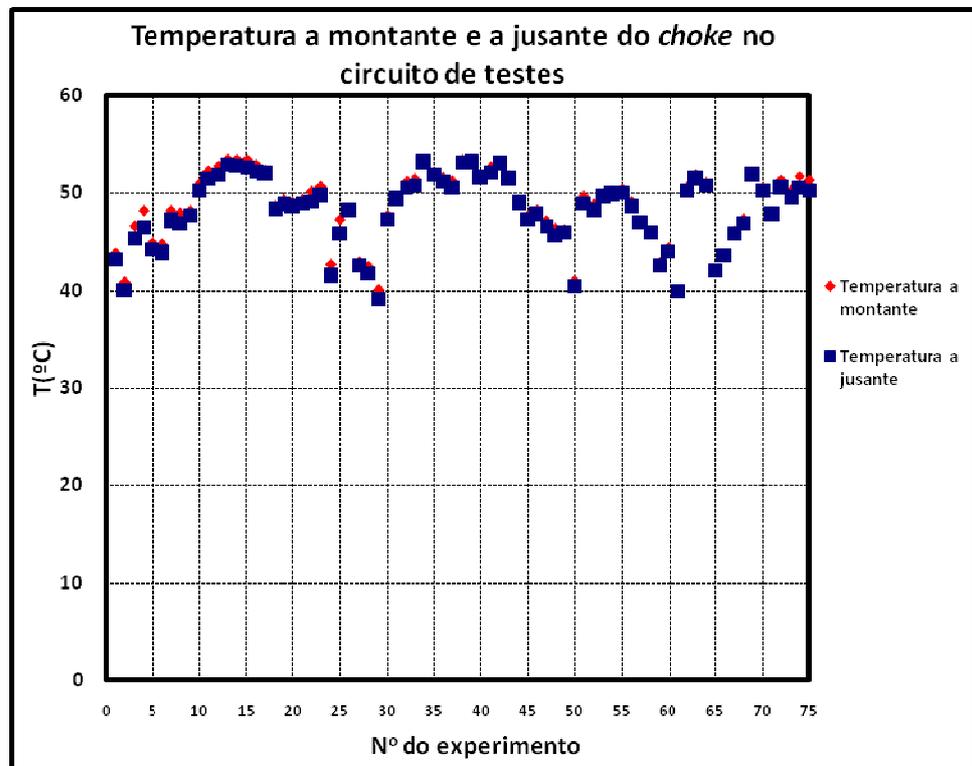


Figura 3.6: Temperatura a montante e a jusante do *choke* por experimento

### 3.3.2 - Resultados experimentais a montante do *choke* no circuito de testes.

Serão visualizados através de gráficos os resultados obtidos no circuito de testes experimentais a montante do *choke* para diferentes parâmetros.

- Razão de solubilidade ( $R_s$ ) foi determinada utilizando uma correlação empírica, em função das temperaturas e pressões a montante do *choke* encontradas para cada ponto experimental, e os valores obtidos são mostrados na Figura 3.7.
- Fator de compressibilidade ( $z$ ) foi determinado utilizando uma correlação empírica, em função das temperaturas e pressões a montante do *choke* encontradas para cada ponto experimental, e os valores obtidos são mostrados na Figura 3.8.
- Fator volume de formação do óleo ( $B_o$ ) e da água ( $B_w$ ) foram determinados utilizando uma correlação empírica, em função das temperaturas e pressões a montante do *choke* encontradas para cada ponto experimental, e os valores obtidos são mostrados na Figura 3.9.
- Fator volume de formação do gás ( $B_G$ ) foi determinado utilizando uma correlação empírica, em função das temperaturas, pressões e fator de compressibilidade a montante do *choke* encontrados para cada ponto experimental, e os valores obtidos são mostrados na Figura 3.9.

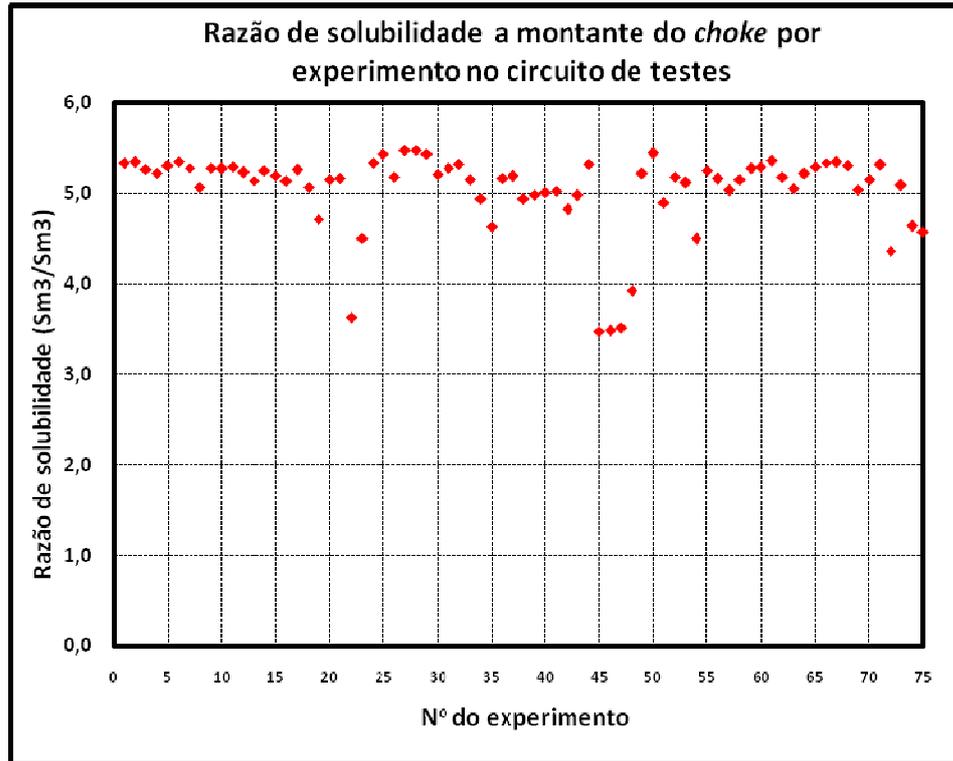


Figura 3.7: Razão de solubilidade a montante do *choke* por experimento.

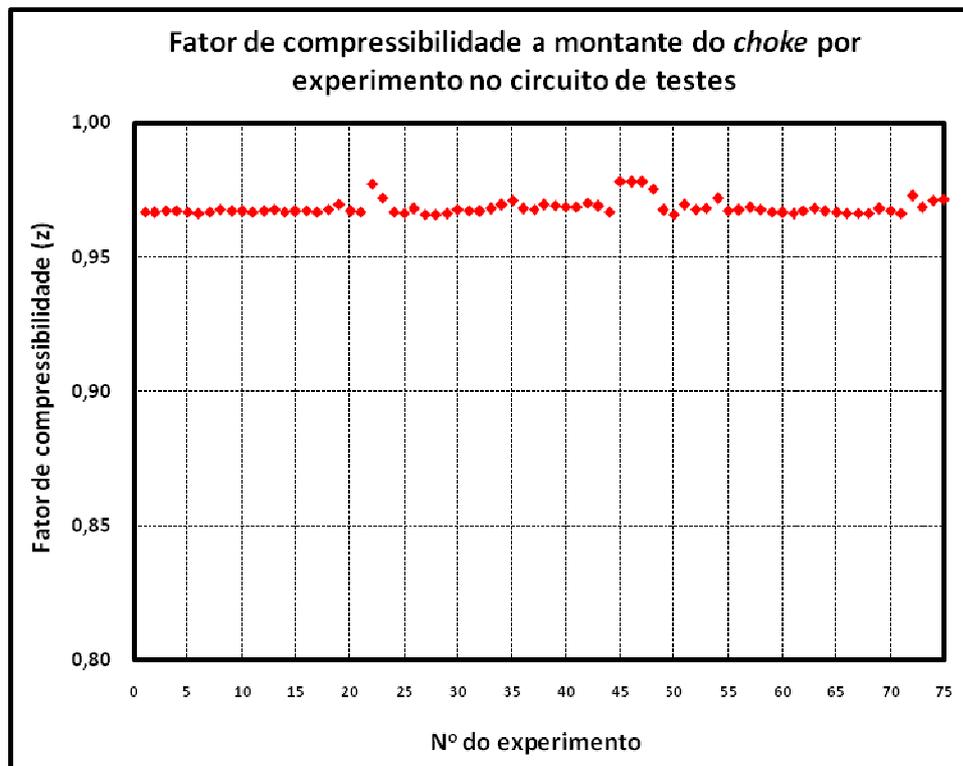


Figura 3.8: Fator de compressibilidade a montante do *choke* por experimento.

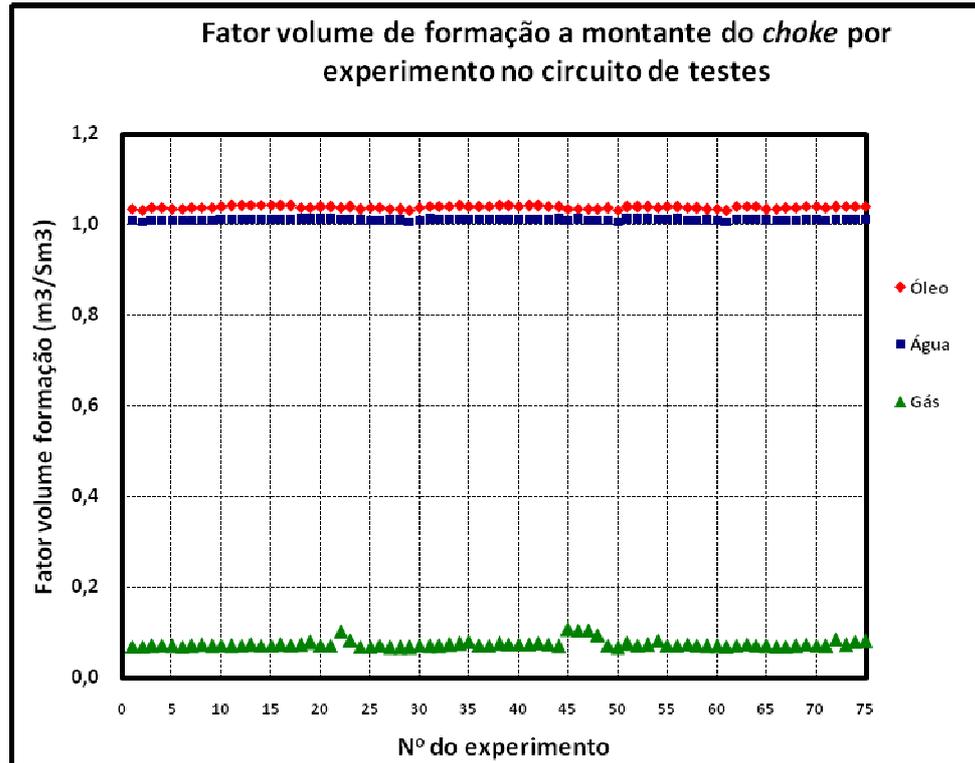


Figura 3.9: Fator volume formação do óleo ( $B_o$ ), água ( $B_w$ ) e gás ( $B_G$ ) a montante do *choke* por experimento.

- Vazão de óleo ( $Q_o$ ) foi calculada de acordo com a equação (3.3.2.1) e os valores são mostrados na Figura 3.10.

$$Q_{o_i} = Q_L \left[ 1 - \left( \frac{BSW}{100} \right) \right] \quad , \quad (3.3.2.1)$$

onde  $Q_L$  e  $BSW$  são a vazão de líquido medida e o percentual de água e sedimentos presentes no fluido na entrada do circuito de testes experimentais, respectivamente.

- Vazão de água ( $Q_w$ ) foi calculada de acordo com a equação (3.3.2.2) e os valores são mostrados na Figura 3.11.

$$Q_{w_i} = Q_L \left( \frac{BSW}{100} \right) \quad (3.3.2.2)$$

- Vazão de gás dissolvido ( $Q_{Gd}$ ) foi calculada de acordo com a equação (3.3.2.3) e os valores são mostrados na Figura 3.10.

$$Q_{Gd_1} = R_{s_1} \left( \frac{Q_{o_1}}{B_{o_1}} \right) B_{g_1} \quad , \quad (3.3.2.3)$$

onde  $R_{s_1}$  é a razão de solubilidade,  $Q_{o_1}$  é a vazão de óleo,  $B_{o_1}$  é o fator de volume formação do óleo e  $B_{g_1}$  é o fator de volume formação do gás, todos eles encontrados a montante do *choke*, respectivamente.

- Vazão de gás livre ( $Q_{Gl}$ ) foi calculada de acordo com a equação (3.3.2.4) e os valores são mostrados na Figura 3.12.

$$Q_{Gl_1} = \frac{Q_L \left( \frac{GVF}{100} \right)}{1 - \left( \frac{GVF}{100} \right)} \quad (3.3.2.4)$$

onde  $Q_L$  e  $GVF$  são a vazão de líquido e o percentual de gás na entrada do circuito de testes experimentais, respectivamente.

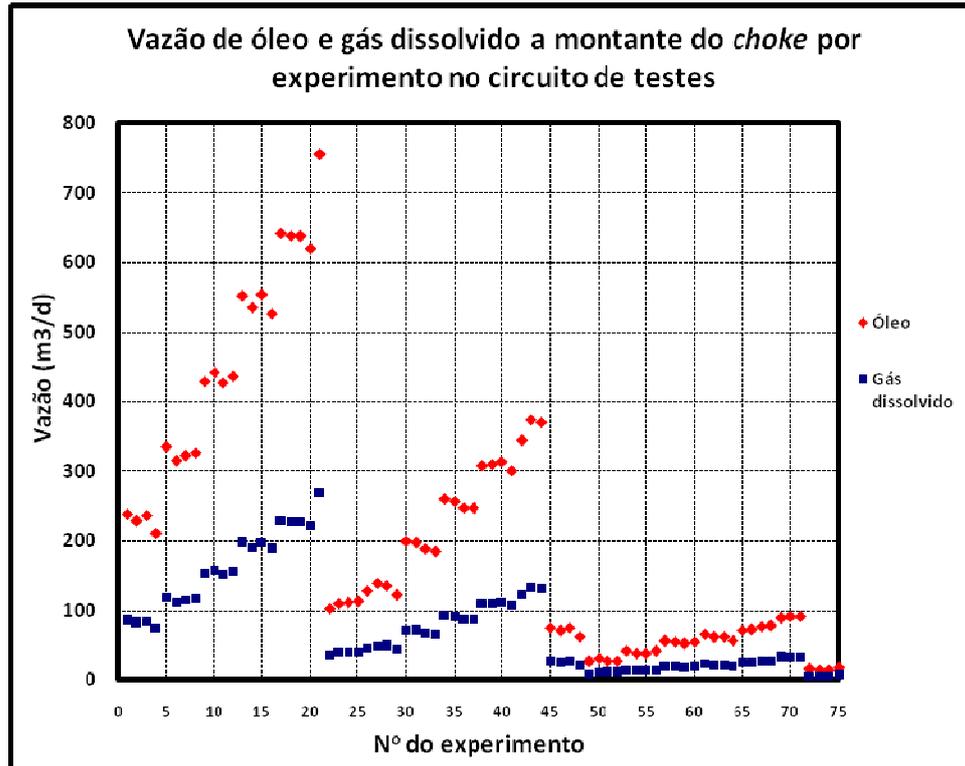


Figura 3.10: Vazão de óleo e gás dissolvido a montante do *choke* por experimento.

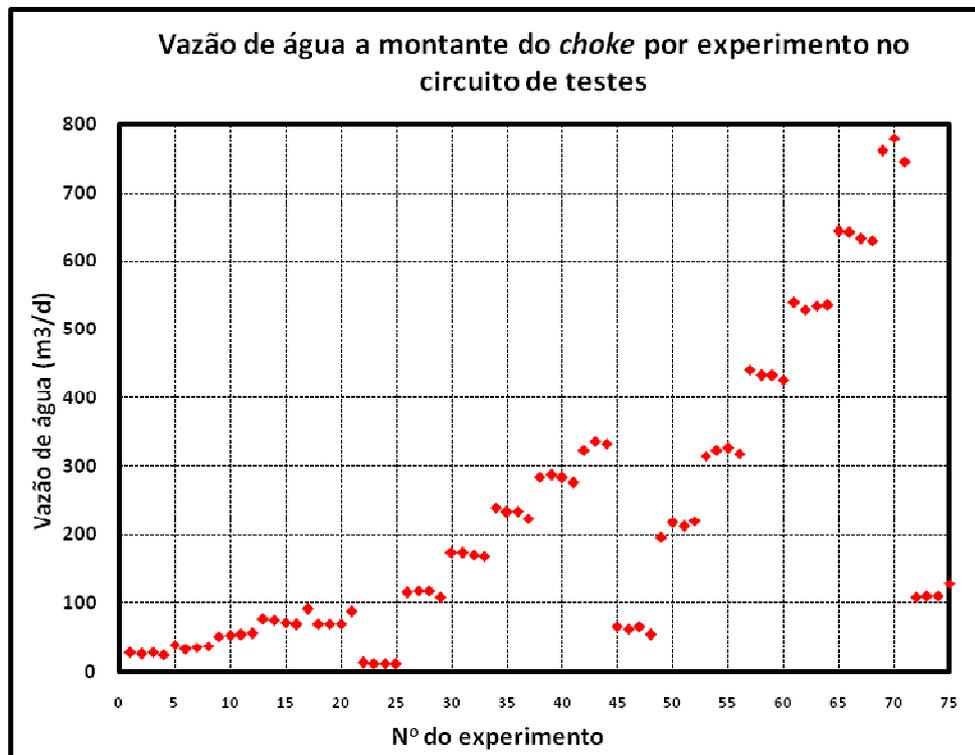


Figura 3.11: Vazão de água a montante do *choke* por experimento.

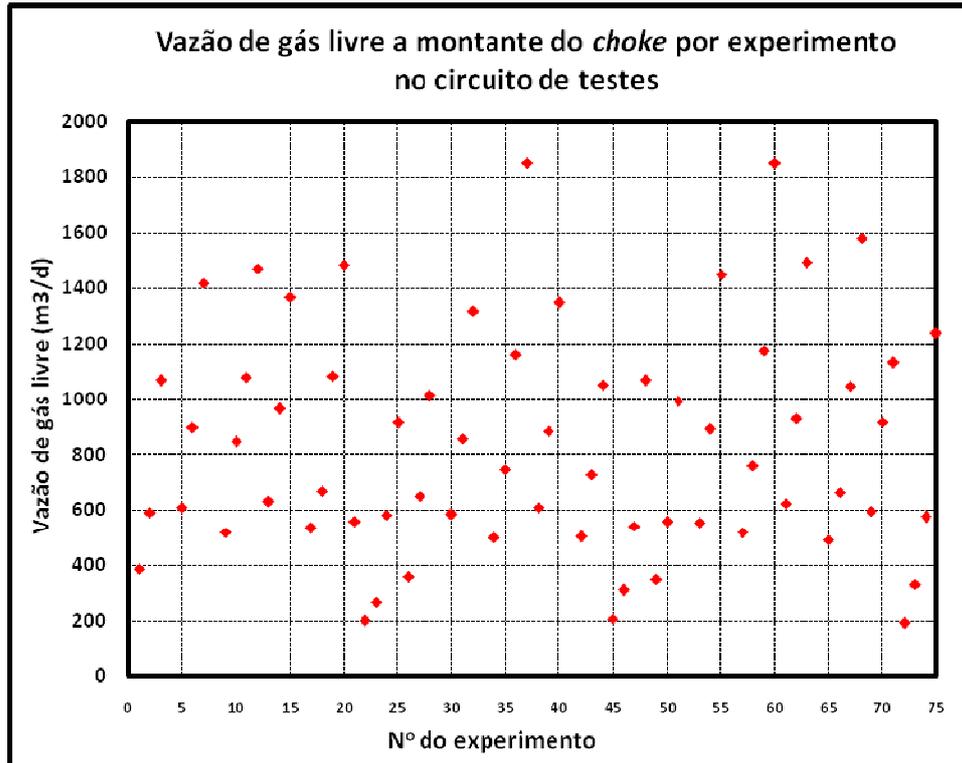


Figura 3.12: Vazão de gás livre a montante do *choke* por experimento.

### 3.3.3 - Resultados experimentais a jusante do *choke* no circuito de testes.

Serão visualizados através de gráficos os resultados obtidos no circuito de testes experimentais a jusante do *choke* para diferentes parâmetros.

- Razão de solubilidade ( $R_s$ ) foi determinada utilizando uma correlação empírica, em função das temperaturas e pressões a jusante do *choke* encontrados para cada ponto experimental, e os valores obtidos são mostrados na Figura 3.13.
- Fator de compressibilidade ( $z$ ) foi determinado utilizando uma correlação empírica, em função das temperaturas e pressões a jusante do *choke* encontrados para cada ponto experimental, e os valores obtidos são mostrados na Figura 3.14.
- Fator volume de formação do óleo ( $B_o$ ) e o da água ( $B_w$ ) foram determinados utilizando uma correlação empírica, em função das temperaturas e pressões a jusante do *choke* encontradas para cada ponto experimental, e os valores obtidos são mostrados na Figura 3.15.

- Fator volume de formação do gás ( $B_G$ ) foi determinado utilizando uma correlação empírica, em função das temperaturas, pressões e fator de compressibilidade a jusante do *choke* encontrada para cada ponto experimental, e os valores obtidos são mostrados na Figura 3.15.

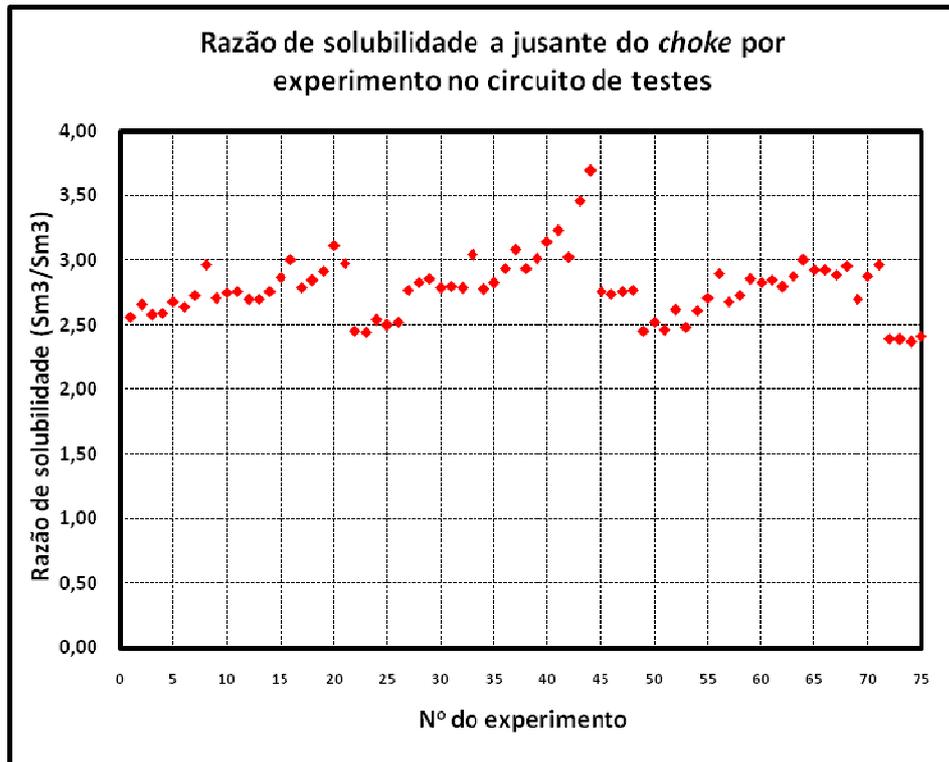


Figura 3.13: Razão de solubilidade a jusante do *choke* por experimento.

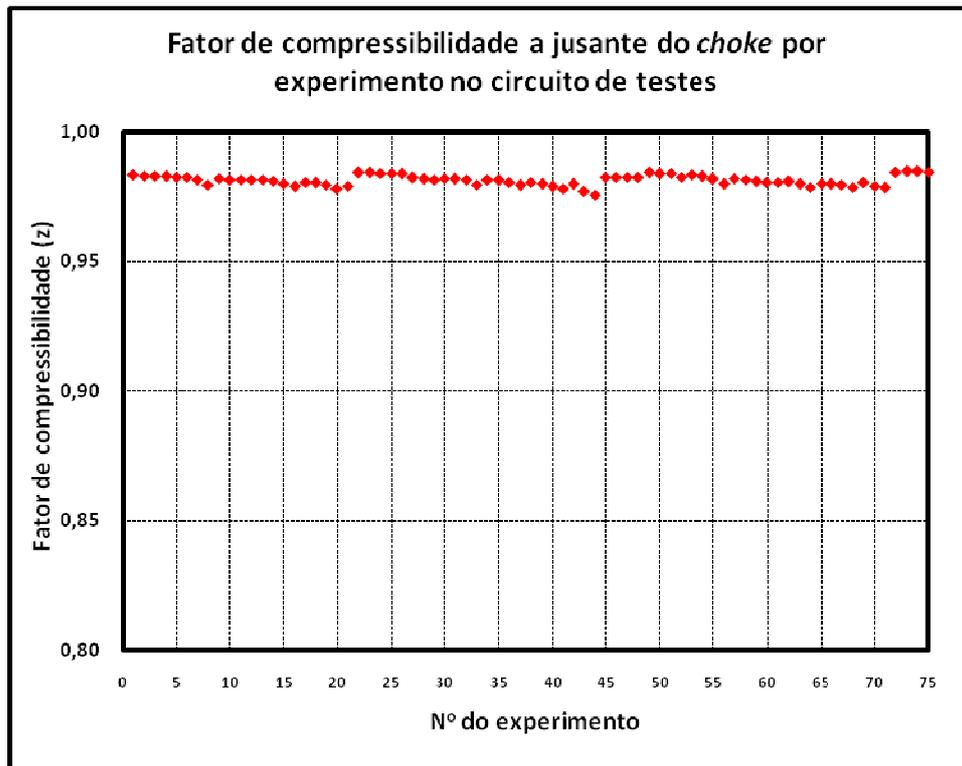


Figura 3.14: Fator de compressibilidade a jusante do *choke* por experimento.

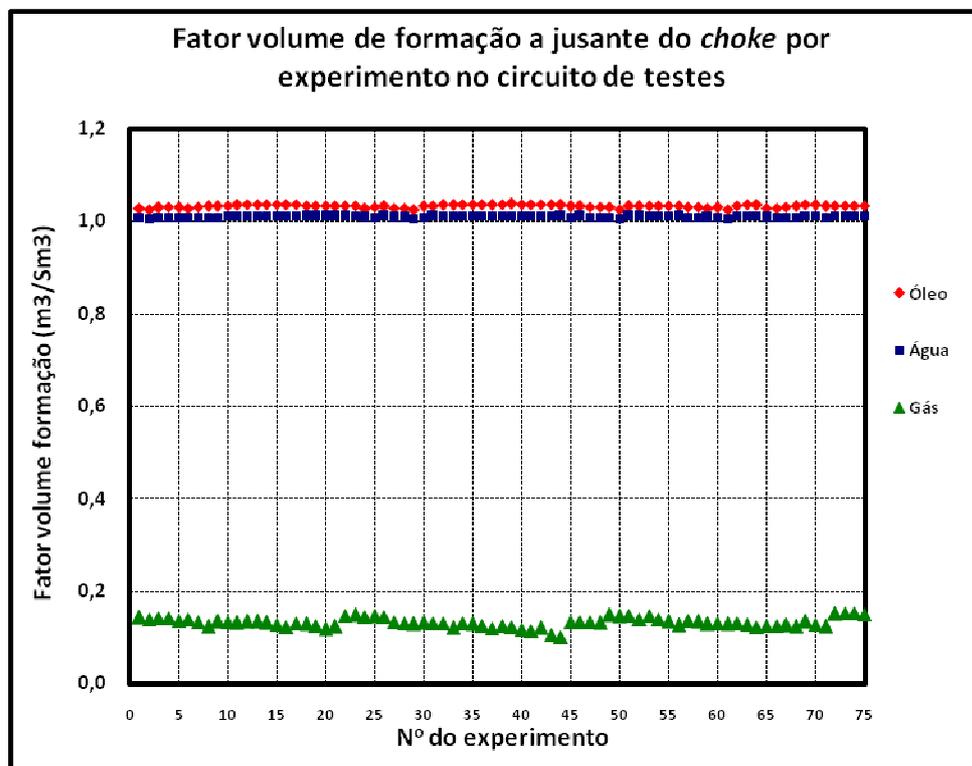


Figura 3.15: Fator volume formação do óleo, água e gás a jusante do *choke* por experimento.

- Vazão de óleo ( $Q_o$ ) foi calculada de acordo com a equação (3.3.3.1) e os valores são mostrados na Figura 3.16.

$$Q_{o_2} = \left( \frac{Q_{o_1}}{B_{o_1}} \right) B_{o_2} \quad , \quad (3.3.3.1)$$

onde  $Q_{o_1}$  e  $B_{o_1}$  é a vazão de óleo e o fator volume de formação do óleo a montante do *choke*, respectivamente e  $B_{o_2}$  é o fator de volume formação do óleo a jusante do *choke*.

- Vazão de água ( $Q_w$ ) foi calculada de acordo com a equação (3.3.3.2) e os valores são mostrados na Figura 3.17.

$$Q_{w_2} = \left( \frac{Q_{w_1}}{B_{w_1}} \right) B_{w_2} \quad , \quad (3.3.3.2)$$

onde  $Q_{w_1}$  e  $B_{w_1}$  é a vazão e o fator volume de formação da água a montante do *choke*, respectivamente e  $B_{w_2}$  é o fator de volume formação da água a jusante do *choke*.

- Vazão de gás dissolvido ( $Q_{Gd}$ ) foi calculada de acordo com a equação (3.3.3.3) e os valores são mostrados na Figura 3.16.

$$Q_{Gd} = R_{S_2} \left( \frac{Q_{o_2}}{B_{o_2}} \right) B_{G_2} \quad , \quad (3.3.3.3)$$

onde  $R_{S_2}$  é a razão de solubilidade,  $Q_{o_2}$  é a vazão de óleo,  $B_{o_2}$  é o fator de volume formação do óleo e  $B_{G_2}$  é o fator de volume formação do gás, todos eles obtidos a jusante do *choke*.

- Vazão de gás livre ( $Q_{G_l}$ ) foi calculada de acordo com a equação (3.3.3.4) e os valores são mostrados na Figura 3.18.

$$Q_{G_l} = Q_{Glib_2} + Q_{Gexp_2} \quad , \quad (3.3.3.4)$$

onde  $Q_{Glib}$  é a vazão de gás liberado e foi definida da seguinte forma:

$$Q_{Glib_2} = (R_{s_1} - R_{s_2}) \left( \frac{Q_{o_2}}{B_{o_2}} \right) B_{G_2} \quad , \quad (3.3.3.5)$$

onde  $R_{s_1}$  é a razão de solubilidade a montante do *choke*.  $R_{s_2}$ ,  $Q_{o_2}$ ,  $B_{o_2}$  e  $B_{G_2}$  é a razão de solubilidade, a vazão de óleo, o fator de volume formação do óleo e o fator de volume formação do gás, obtidos a jusante do *choke*, respectivamente.

$Q_{Gexp}$  é a vazão de gás expandido e foi definida da seguinte forma:

$$Q_{Gexp_2} = [(P_1 + 1,033)z_2(T_2 + 273,15)] \left( \frac{Q_{Gl_1}}{[(P_2 + 1,033)z_1(T_1 + 273,15)]} \right) \quad (3.3.3.6)$$

onde  $P_1$ ,  $z_1$ ,  $T_1$  e  $Q_{Gl_1}$  é a pressão, o fator de compressibilidade, a temperatura e a vazão de gás livre obtida a montante do *choke*, respectivamente.  $P_2$ ,  $z_2$  e  $T_2$  é a pressão, o fator de compressibilidade e a temperatura obtida a jusante do *choke*, respectivamente.

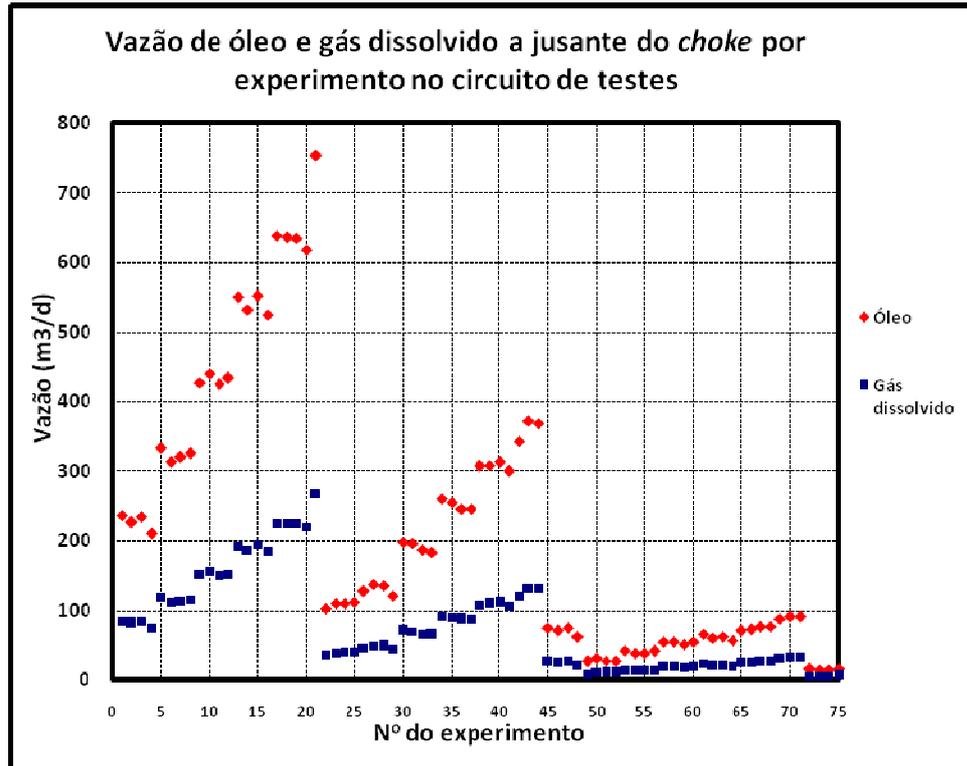


Figura 3.16: Vazão de óleo e gás dissolvido a jusante do *choke* por experimento.

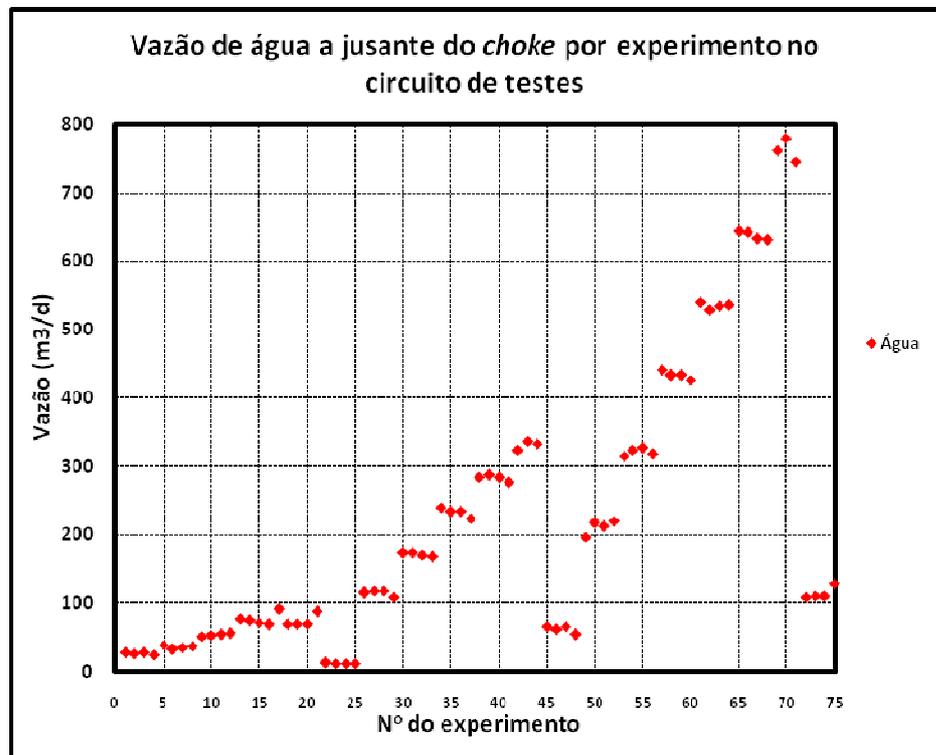


Figura 3.17: Vazão de água a jusante do *choke* por experimento.

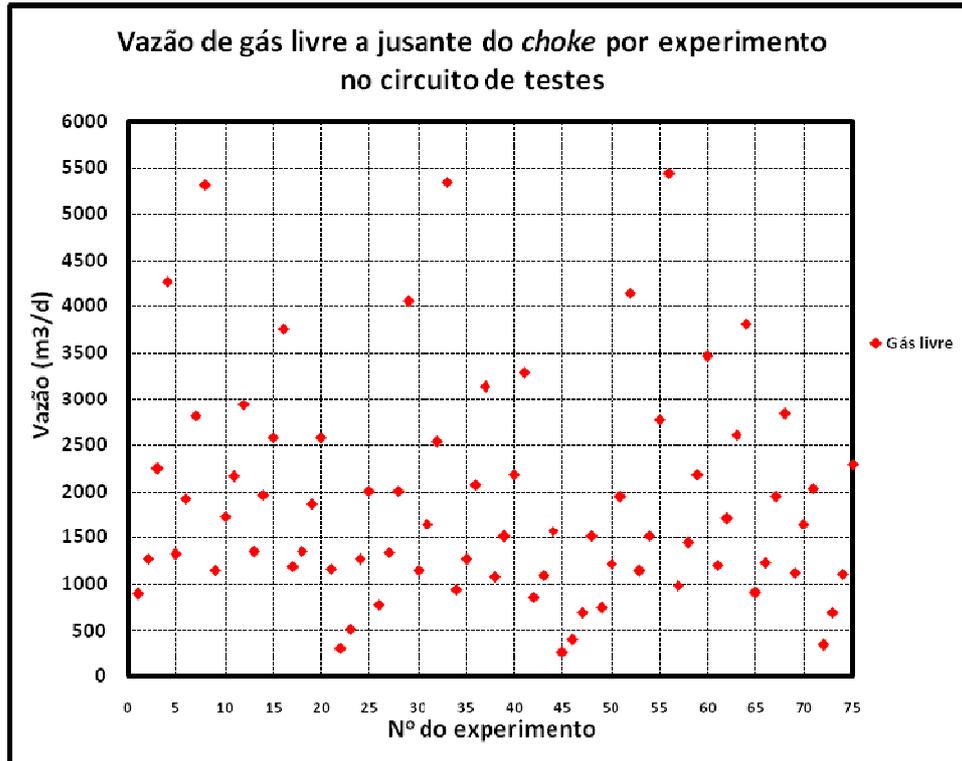


Figura 3.18: Vazão de gás livre a jusante do *choke* por experimento.

## Capítulo 4

### MÉTODOS UTILIZADOS PARA A MODELAGEM DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO ATRAVÉS DO *CHOKE*

Neste capítulo será descrito o método utilizado para a modelagem do escoamento multifásico através de *chokes*. Também determinaremos os tipos de escoamento presentes no circuito de testes experimentais, utilizando os resultados experimentais obtidos por Slobodcicov *et al.* (2009) na equação interativa desenvolvida por Sachdeva *et al.* (1986). Para este propósito foi desenvolvido um programa computacional, que será utilizado neste trabalho para calcular os parâmetros para escoamento multifásico a partir dos dados experimentais, utilizando as equações desenvolvidas por Sachdeva *et al.* (1986) para fluxo mássico, vazão mássica das fases líquida e gasosa e os valores referentes à massa específica da mistura a jusante do *choke*.

#### 4.1 - OBTENÇÃO DOS VALORES DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA PARA O MODELO DE SACHDEVA *ET AL.* (1986) A PARTIR DOS DADOS EXPERIMENTAIS.

Nesta etapa do trabalho mostraremos através de equações e gráficos os valores encontrados das variáveis de entrada a jusante e a montante do *choke* para as equações do modelo de Sachdeva *et al.* (1986) com o objetivo de caracterizar o escoamento multifásico. Estes valores foram calculados utilizando os dados experimentais.

Os valores de  $(k)$  foram determinados através da razão de calor específico do gás a pressão constante  $(C_p)$  pelo calor específico do gás a volume constante  $(C_v)$  para cada ponto experimental, de acordo com a Figura 4.1.

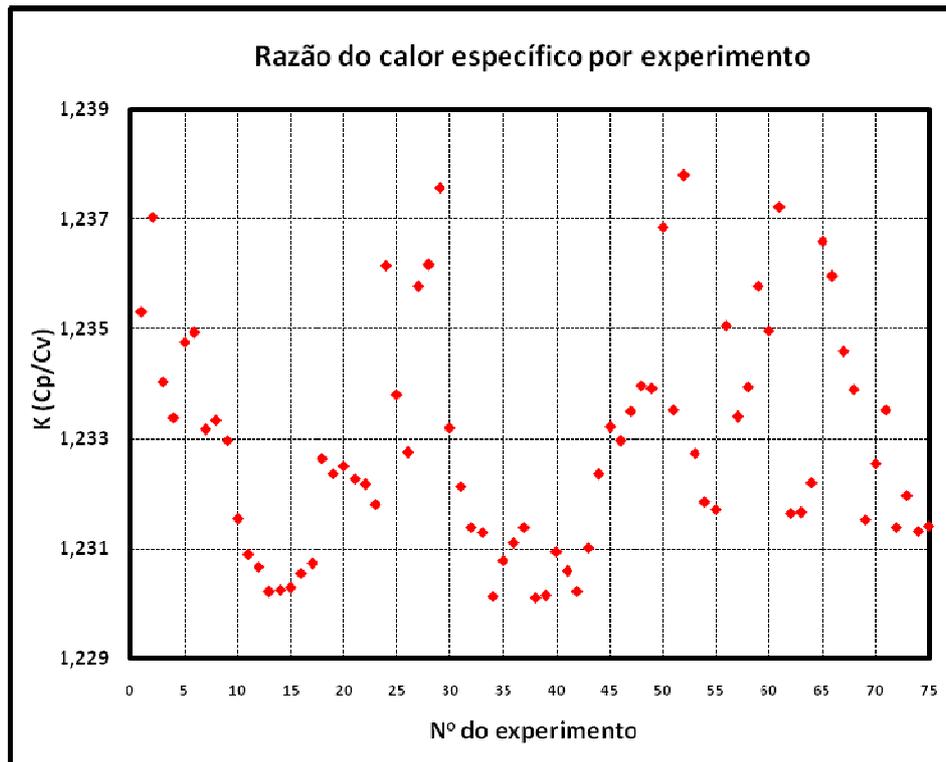


Figura 4.1: Valores da razão de calor específico por experimento.

Para a obtenção dos valores de calor específico do gás à pressão e volume constantes utilizamos a correlação da Tabela 4.1 em função da temperatura dos gases durante o experimento, onde as constantes A, B, C e D mudam de acordo com a composição do mesmo.

Tabela 4.1: Capacidade calorífica de gases no estado de gás ideal (Smith *et al.*, 1996, p.577).

$C_p/R = A + BT + CT^2 + DT^{-2}$					
COMPOSTO	T max	A	$10^3B$	$10^6C$	$10^{-5}D$
METANO	1500	1,702	9,081	-2,16	-
ETANO	1500	1,131	19,225	-5,56	-
PROPANO	1500	1,213	28,785	-8,82	-
BUTANO	1500	1,935	36,915	-11,4	-
OCTANO	1500	8,163	70,567	-22,2	-
CO <sub>2</sub>	2000	5,457	1,045	-	-1,157
N <sub>2</sub>	2000	3,28	0,593	-	0,04

Temperatura em Kelvin de 298 até T max  
e  $R = 8314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{kg} \cdot \text{K})$   
 $C_v = C_p - R$

A fração mássica de gás a montante do *choke* ( $x_1$ ) (Figura 4.2) foi determinada utilizando a seguinte fórmula:

$$x_1 = \frac{\rho_{G1} Q_{G1}}{(\rho_{G1} Q_{G1}) + (\rho_{o1} Q_{o1}) + (\rho_{w1} Q_{w1})} \quad (4.1.1)$$

No qual, de acordo com Beges (2000):

$$\rho_{w1} = \frac{(\rho_{ws} d_w)}{B_{w1}} \quad , \quad (4.1.2)$$

onde  $\rho_{G1}$  é a massa específica do gás a montante do *choke*,  $Q_{G1}$  é a vazão volumétrica de gás livre a montante do *choke*, determinada utilizando a equação (3.4.2.4),  $\rho_{o1}$  é a massa específica do óleo a montante do *choke*,  $Q_{o1}$  é a vazão volumétrica do óleo a montante do *choke*, determinada utilizando a equação (3.3.2.1),  $\rho_{w1}$  é a massa específica da água a montante do *choke*,  $\rho_{ws}$  é a massa específica da água nas condições padrão,  $d_w$  é a densidade da água,  $B_{w1}$  é o fator volume de formação da água e  $Q_{w1}$  a vazão volumétrica da água a montante do *choke*, determinada utilizando a equação (3.3.2.2).

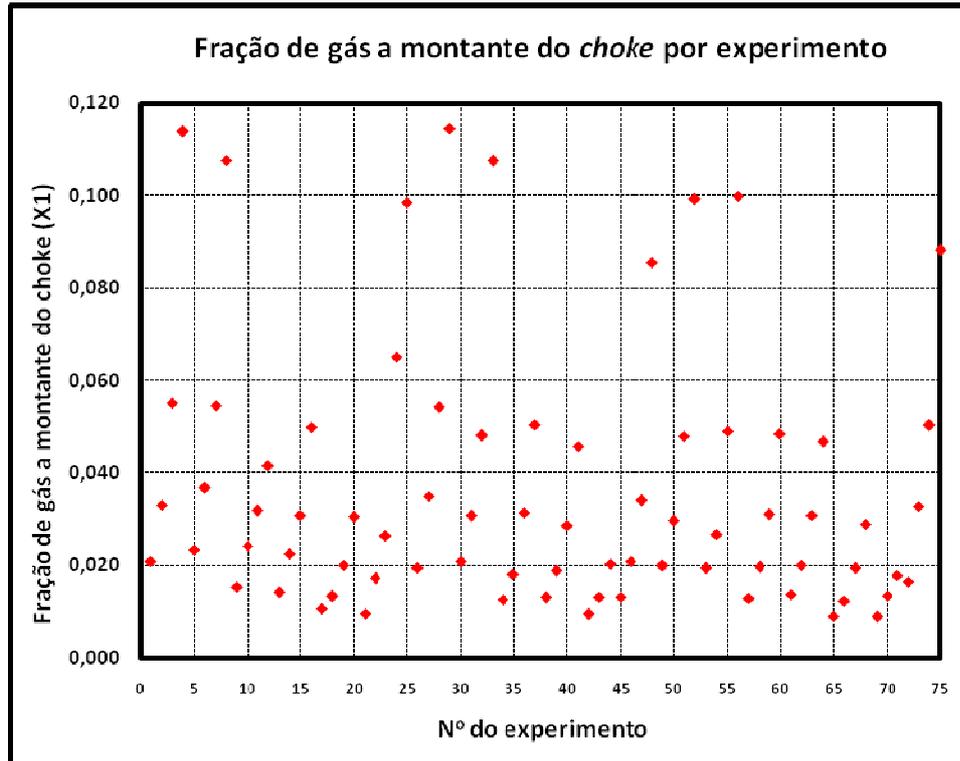


Figura 4.2: Valores da fração de gás a montante do *choke* por experimento.

O volume específico do líquido a montante do *choke* ( $V_{L1}$ ) (Figura 4.3) foi determinado utilizando a seguinte fórmula:

$$V_{L1} = \frac{1}{\rho_{L1}} \quad (4.1.3)$$

e

$$\rho_{L1} = BSW \rho_{w1} + (1 - BSW) \rho_{o1} \quad , \quad (4.1.4)$$

onde  $\rho_{L1}$  é a massa específica do líquido a montante do *choke*,  $\rho_{w1}$  é a massa específica da água a montante do *choke*,  $\rho_{o1}$  é a massa específica do óleo a montante do *choke* e  $BSW$  o percentual de água e sedimentos presentes no fluido.

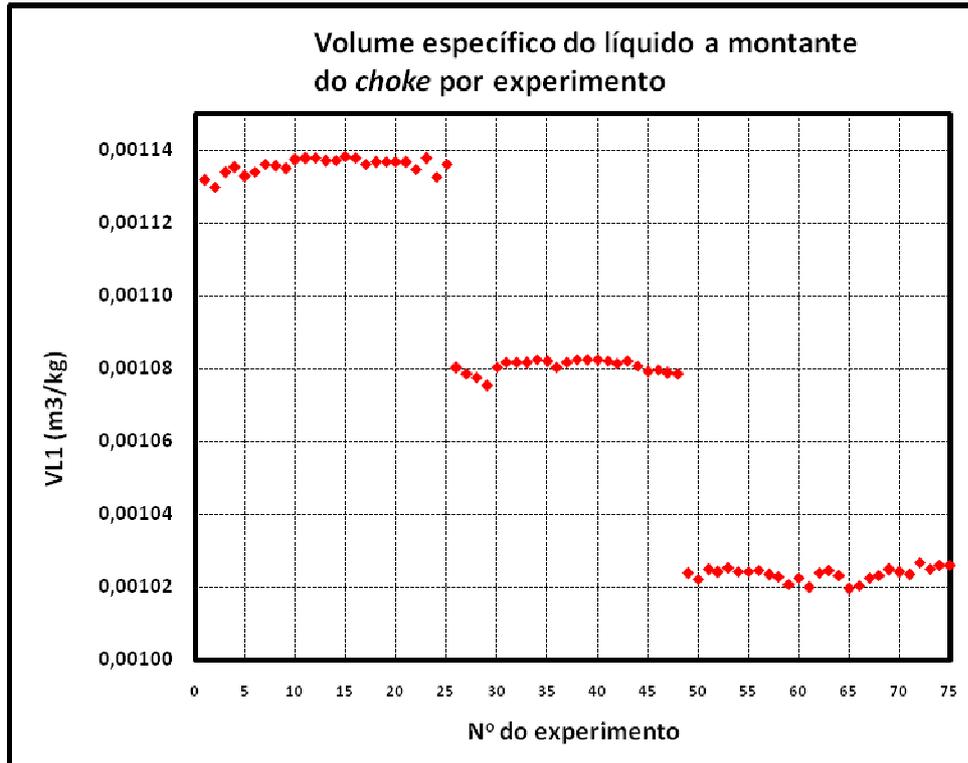


Figura 4.3: Valores de volume específico do líquido a montante do *choke* por experimento.

O volume específico do gás a montante do *choke* ( $V_{G1}$ ) (Figura 4.4) foi determinado utilizando a seguinte fórmula:

$$V_{G1} = \frac{1}{\rho_{G1}} \quad , \quad (4.1.5)$$

onde  $\rho_{G1}$  é a massa específica do gás a montante do *choke*.

O volume específico do gás a jusante do *choke* ( $V_{G2}$ ) (Figura 4.4) foi determinado utilizando a seguinte fórmula:

$$V_{G2} = \frac{1}{\rho_{G2}} \quad , \quad (4.1.6)$$

onde  $\rho_{G2}$  é a massa específica do gás a jusante do *choke*.

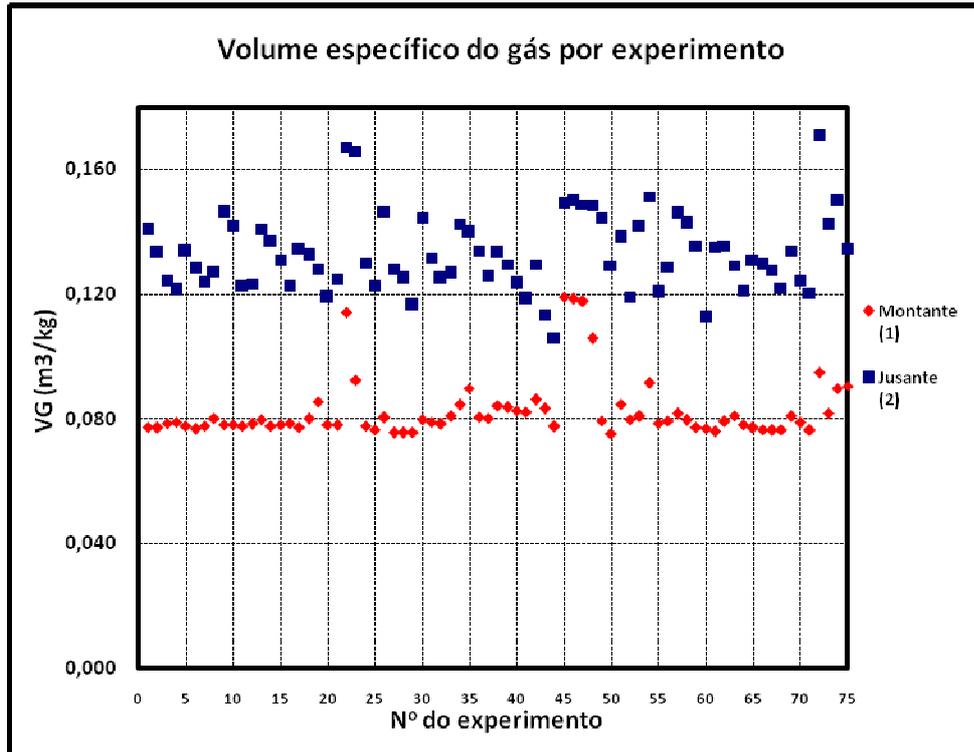


Figura 4.4: Valores de volume específico do gás a montante e a jusante do *choke* por experimento.

O expoente politrópico para o gás ( $n$ ) (Figura 4.5), definido por Ros (1960), foi determinado utilizando a seguinte fórmula:

$$n = 1 + \frac{x_1(c_p - c_v)}{x_1c_v + (1 - x_1)C_L}, \quad (4.1.7)$$

onde  $x_1$  é a fração mássica de gás a montante do *choke* de acordo com a equação (4.1.1),  $c_v$  e  $c_p$  é o calor específico do gás a volume constante e a pressão constante, respectivamente, de acordo com a Tabela 4.1.

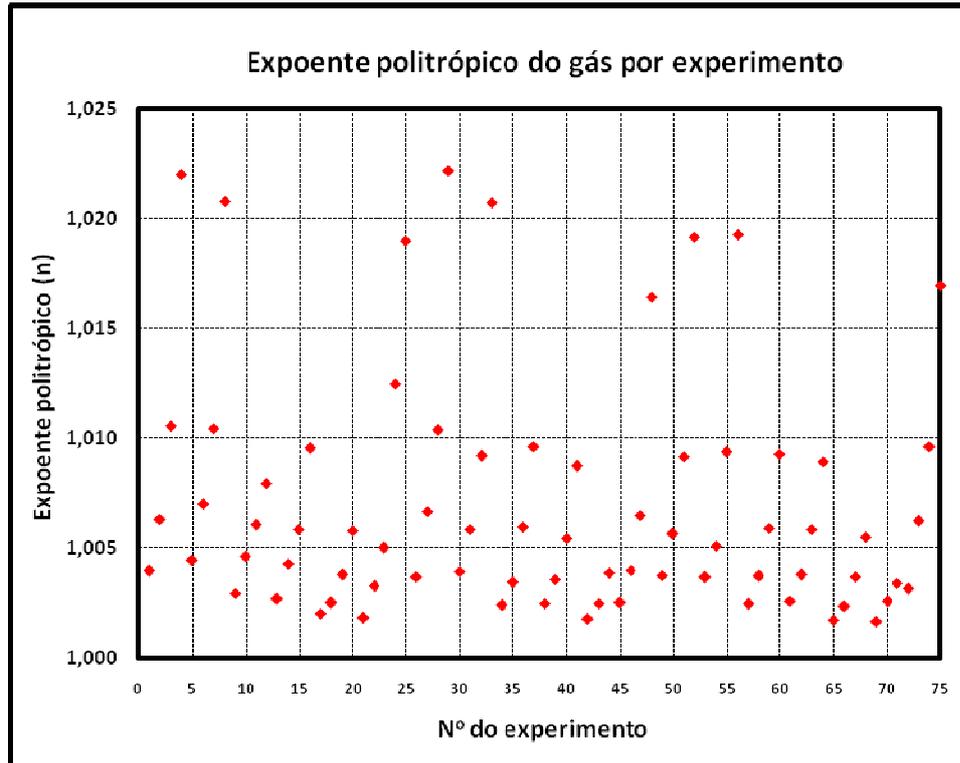


Figura 4.5: Valores do expoente politrópico para o gás por experimento

O coeficiente de descarga ( $C_D$ ) é um fator de modificação final para absorver erros referentes ao número de Reynolds, diferencial de pressão, fator de expansão de gás e outras propriedades relacionadas ao fluido presente no sistema (Sachdeva *et al.*, 1986), no qual o valor varia de 0,75 até 0,95. Para um modelo perfeito teríamos um valor de  $C_D$  igual a um (1).

A pressão a montante do *choke* ( $P_1$ ) foi observada experimentalmente utilizando medidores de diferencial de pressão e os valores encontrados são apresentados na Figura 3.5.

A massa específica da mistura a jusante do *choke* ( $\rho_{m2}$ ) (Figura 4.6) foi encontrada utilizando a equação (4.1.8) (Sachdeva *et al.*, 1986).

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x}{\rho_G} + \frac{(1-x)}{\rho_L} \quad , \quad (4.1.8)$$

onde  $x_2$  é a fração mássica de gás a jusante do *choke*, determinada de acordo com a equação (4.1.1),  $\rho_{L2}$  é a massa específica do líquido a jusante do *choke* e  $\rho_{G2}$  a massa específica do gás a jusante do *choke*.

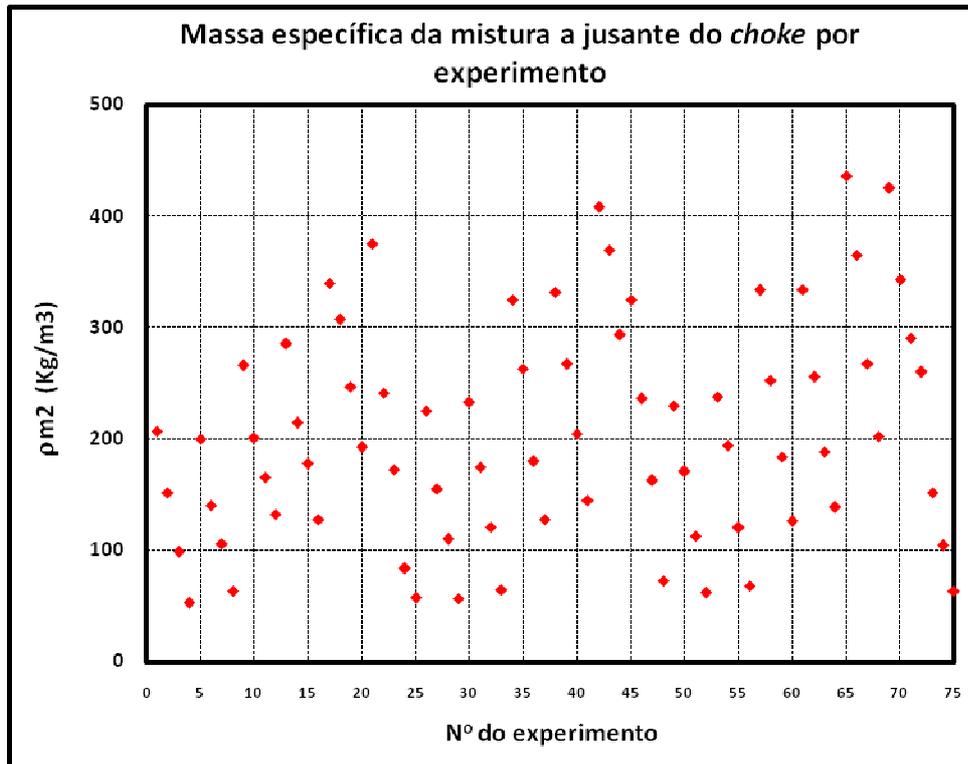


Figura 4.6: Valores de massa específica da mistura a jusante do *choke* por experimento.

A vazão mássica para o gás a jusante do *choke* ( $M_{G2}$ ) (Figura 4.7) foi encontrada utilizando a equação (4.1.9):

$$M_{G2} = Q_{G12} \rho_{G2} \quad , \quad (4.1.9)$$

onde  $Q_{G12}$  é a vazão de gás livre a jusante do *choke*, determinada de acordo com a equação (3.3.3.4) e  $\rho_{G2}$  a massa específica do gás a jusante do *choke*.

A vazão mássica para o líquido a jusante do *choke* ( $M_{L2}$ ) (Figura 4.8) foi encontrada utilizando a equação (4.1.10):

$$M_{L2} = (Q_{o2}\rho_{o2}) + (Q_{w2}\rho_{w2}) \quad , \quad (4.1.10)$$

onde  $Q_{o2}$  é a vazão de óleo a jusante do *choke*, determinada de acordo com a equação (3.3.3.1),  $\rho_{o2}$  é a massa específica do óleo a jusante do *choke*,  $Q_{w2}$  é a vazão de água a jusante do *choke*, determinada de acordo com a equação (3.3.3.2) e  $\rho_{w2}$  é a massa específica da água a jusante do *choke*.

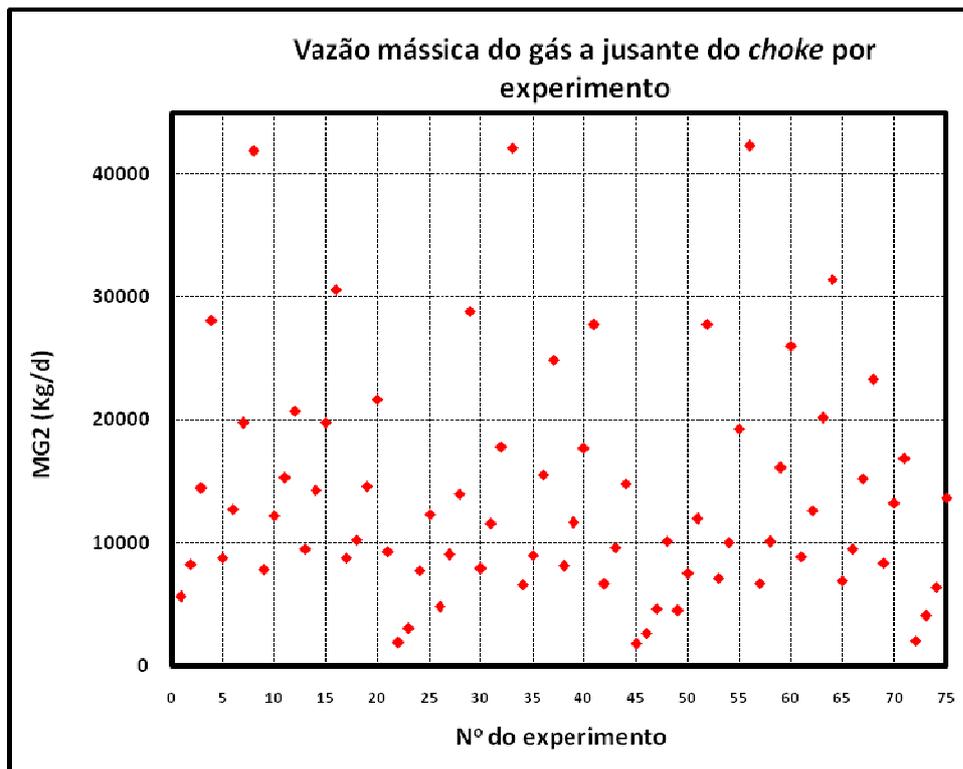


Figura 4.7: Valores da vazão mássica do gás a jusante do *choke* por experimento.

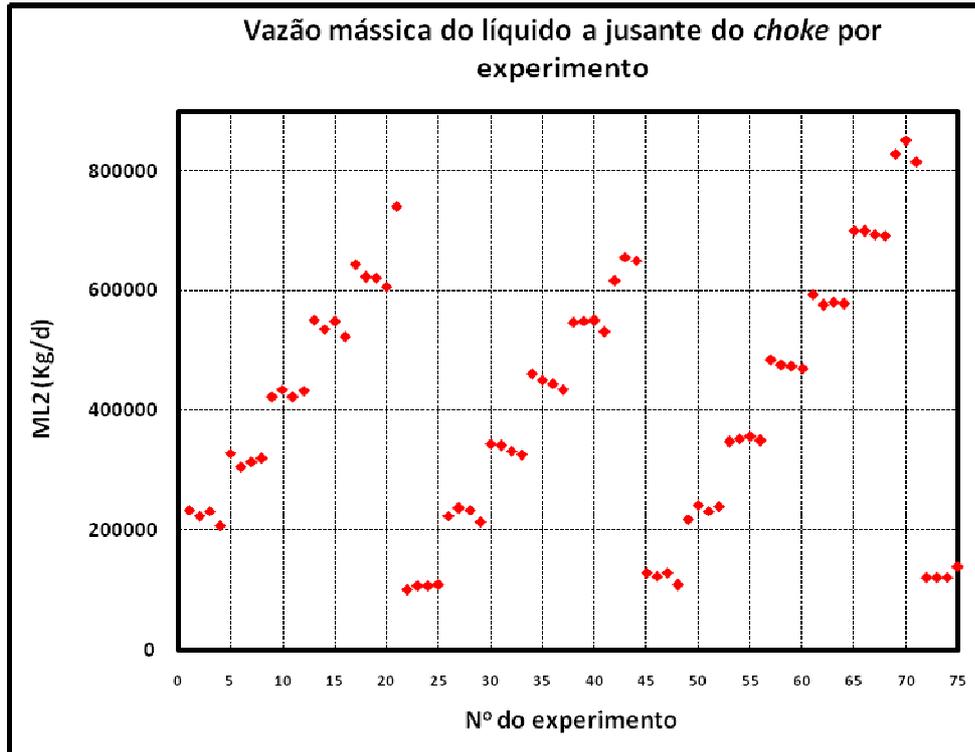


Figura 4.8: Valores da vazão mássica do líquido a jusante do *choke* por experimento

#### 4.2 - EQUAÇÕES DO MODELO DE SACHDEVA *ET AL.* (1986) PARA A MODELAGEM DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO A PARTIR DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção apresentaremos as equações que serão utilizadas no trabalho para o cálculo dos valores para os parâmetros de escoamento multifásico desejados a partir dos dados experimentais observados. No Apêndice A - Tabela A.1 são mostrados os valores das variáveis de entrada do programa computacional para cada ponto experimental (item 4.1) que serão utilizados nas equações do modelo de Sachdeva *et al.* (1986).

Para a obtenção dos valores dos parâmetros de escoamento multifásico desejados, utilizamos o modelo apresentado por Sachdeva *et al.* (1986) com o auxílio de um programa computacional. O objetivo principal foi à determinação do tipo de escoamento (crítico, subcrítico e o limite entre eles) presente neste experimento, assim como a determinação do fluxo mássico, massa específica da mistura e a vazão mássica das fases líquida e gasosa a jusante do *choke*.

Inicialmente utilizamos a equação (2.4.28) para a determinação do valor do limite crítico-subcrítico e para caracterizarmos o tipo de escoamento, seguindo o mesmo procedimento adotado por Sachdeva *et al.* (1986) para a obtenção destes parâmetros. Após identificarmos o tipo de escoamento e os valores para este limite, determinaremos os valores de fluxo mássico a jusante do *choke* utilizando a equação (2.4.23). Em seguida, utilizaremos a equação (2.4.25) para a obtenção dos valores da massa específica da mistura a partir dos dados experimentais. Finalmente, determinaremos a vazão mássica das fases líquida e gasosa.

### 4.3 - SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO NÃO LINEAR PARA A ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO CRÍTICO, SUBCRÍTICO E O LIMITE ENTRE ELES

#### 4.3.1 - Características da equação principal

Em função da determinação do escoamento crítico, subcrítico e o limite entre eles baseado no modelo de Sachdeva *et al.* (1986), é necessário obter uma solução para a equação (2.4.28), sendo ela essencialmente não linear. Serão revistos então alguns aspectos da solução de equações não lineares, e identificaremos um método satisfatório para a determinação do valor do parâmetro  $y$ .

De uma forma geral, a equação (2.4.28) pode ser representada pela seguinte igualdade:

$$f(y) = 0, \quad (4.3.1.1)$$

onde  $y$  é a variável principal e a sua solução é chamada de raiz da equação, ou zero da função  $f$ . Podem ser aplicados métodos diferentes para determinar os zeros de funções não lineares, como por exemplo o método da secante e o da bisseção (Ortega *et al.*, 1970).

O número de soluções ou existência em uma mesma função  $f$  para um sistema de equações lineares devem ter nenhum, um ou infinito zeros, enquanto que para equações não lineares podem vários zeros. Assim, é mais complexo determinar a existência para equações não lineares do que para equações lineares.

Embora seja mais difícil, é de grande importância garantir existência de uma função  $f$ , para que seja possível a solução de equações não lineares e caracterização da função  $f$ .

A determinação da existência para problemas unidimensionais, nosso caso neste trabalho, é simples: o teorema de valor intermediário provê uma condição suficiente para uma solução. Ou seja, se  $f$  é contínuo em um intervalo fechado  $[a,b]$  e  $c$  está entre  $f(a)$  e  $f(b)$ , existe então um valor  $y^* \in [a,b]$  tal que  $f(y^*) = c$ . Assim, se  $f(a)$  e  $f(b)$  tem sinais diferentes, podemos concluir que deve haver uma raiz no intervalo  $[a,b]$ .

Considerando o sentido físico do parâmetro  $y$  deste trabalho como a razão da pressão a jusante pela pressão a montante do *choke*, podemos estimar um intervalo  $[a,b]$  para tal variável, o qual geralmente é  $[0,1]$ . Assim, tendo como base a equação (2.4.28) é possível construir a função  $f$ .

$$\tilde{f}(y) = y - \left\{ \frac{\frac{k}{k-1} + \dots}{\frac{k}{k-1} + \dots} \right\}^{\frac{k}{k-1}} \quad (4.3.1.2)$$

As variáveis de entrada para o modelo de Sachdeva *et al.* (1986) são mostrados através de gráficos no item 4.1. Os valores de  $y$ , calculados pela a função  $f$ , no intervalo de  $[0,1]$ , utilizando o programa computacional desenvolvido neste trabalho, serão mostrados no próximo capítulo. Como o objetivo é determinar o valor de  $y$  correspondente a zero para a função, utilizaremos uma função normalizada  $f$ , realizando um trabalho mais simples para a apresentação deste resultado, de acordo com a seguinte equação:

$$f(y) = \frac{\tilde{f}(y)}{\max|\tilde{f}(y)|} \quad (4.3.1.3)$$

Na Figura 4.9 são apresentados os valores correspondentes de tal função para um dos pontos experimentais.

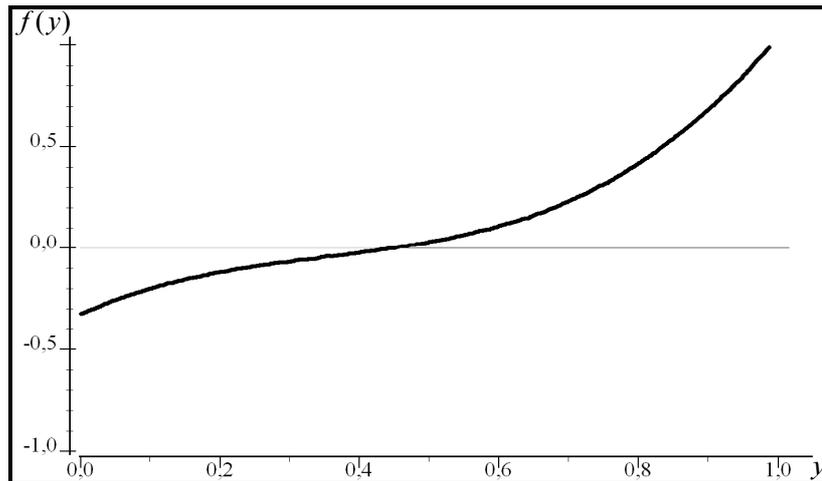


Figura 4.9: Valores calculados pela função normalizada  $f$  para o ponto experimental 21.

#### 4.3.2 - Seleção do método para a solução da equação não linear

Os métodos iterativos são utilizados para resolver equações não lineares (Ortega *et al.*, 1970). O gasto total para resolver estas equações depende do tempo por interação e o número de interações requeridas. Frequentemente há um intercâmbio entre estes dois fatores e para comparar a efetividade dos métodos iterativos precisamos caracterizar a sua taxa de convergência. Um teorema de convergência poderá mostrar que um método iterativo deverá convergir para um dado problema e como isso deverá acontecer, mas não especificamente em relação a quando podemos parar a interação e registrar uma solução resultante aproximada satisfatória. O critério ideal de parada é complexo em função do número de argumentos utilizados.

Podemos classificar os métodos iterativos em dois tipos principais: com derivadas da função  $f$  e sem derivadas da função  $f$ . Em casos quando uma

função  $f$  tem estrutura complexa, nosso caso neste trabalho, utilizando o método sem derivada da função  $f$  obtém-se resultados melhores baseado em uma maior estabilidade da função e a simplicidade para obter a solução quando comparada com derivadas da função  $f$ .

Para métodos que mantêm intervalos conhecidos para encontrar a solução, como por exemplo, o método de bisseção, utilizou-se o erro para ser o comprimento do intervalo que contém solução da equação no lugar de um valor aproximado. Em precisão aritmética finita não pode haver nenhum número de  $y^*$  tal que  $f(y^*)$  seja exatamente igual a zero. Uma alternativa é buscar um intervalo  $[a,b]$  muito curto no qual  $f$  tem mudança de sinal.

O método de bisseção faz uso do teorema de valor intermediário e é muito simples a sua utilização em um algoritmo. O teorema começa com um intervalo inicial e reduz sua amplitude sucessivamente até que a solução esteja isolada de acordo com a precisão desejada ou com o critério de parada. A cada interação, a função é avaliada no ponto central do atual intervalo e a metade do intervalo pode ser descartada dependendo do sinal da função no ponto central.

Talvez, a fórmula mais óbvia para computar o ponto central  $m$  do intervalo  $[a,b]$  é  $m=(a+b)/2$ , porém com esta fórmula, o resultado em precisão aritmética finita não é garantido estar dentro do intervalo  $[a,b]$  quando utilizamos duas casas decimais. Neste caso, por exemplo, utilizando esta fórmula obteremos o valor do "ponto central" equivalente à  $0,7$  para o intervalo  $[0,67, 0,69]$ . A melhor alternativa é usar a fórmula  $m = a+(b-a)/2$ , que é garantido estar dentro do intervalo  $[a,b]$ . Além disso, podemos verificar se as duas funções  $f(y_1)$  e  $f(y_2)$  aceitam um sinal matematicamente equivalente testando se o produto  $f(y_1) \times f(y_2)$  é positivo ou negativo.

O método da bisseção não faz uso dos valores da função, somente os seus sinais, e como resultado é certo convergir, embora lentamente. A cada interação sucessiva, o comprimento do intervalo que contém a solução é reduzido pela metade, comprovando então que o método de bisseção é linearmente convergente.

No programa desenvolvido neste trabalho foi utilizado o método da bisseção, em que o resultado convergiu, não sendo necessário então computar a derivada durante a utilização do mesmo. Um exemplo do método para determinar zero para função normalizada  $f$  é apresentado na Figura 4.10, na qual os valores dos pontos centrais  $m_i$  para interações diferentes (cor vermelha) com intervalos mudados para cada interação  $[a,b]$  (cor azul) são mostrados.

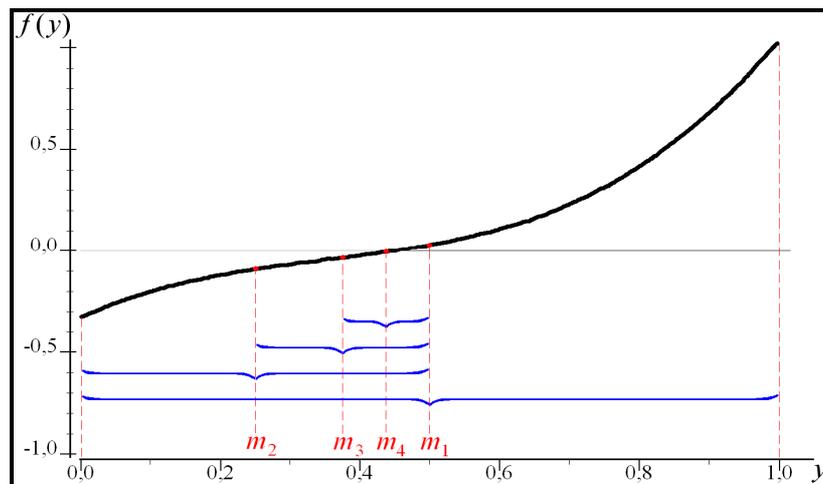


Figura 4.10: Exemplo de interação do método da bisseção para determinar zero para função normalizada  $f$  correspondente ao ponto experimental 21.

Como uma alternativa para o método de bisseção pode-se destacar o método da secante. A idéia deste método foi obtida através do método de Newton utilizando a aproximação de diferença finita para a primeira derivada. Assim, a interação de Newton é:

$$y_{i+1} = y_i - \frac{f(y_i)}{f'(y_i)} \quad (4.3.2.1)$$

Aplicando uma aproximação por diferença finita para  $f'(y_i)$ , a equação (4.3.2.1) foi reescrita da seguinte forma:

$$y_{i+1} = y_i - \frac{y_i - y_{i-1}}{f(y_i) - f(y_{i-1})} f(y_i) \quad (4.3.2.2)$$

Esta é a interação do método do secante, em que a fórmula pode ser geometricamente entendida. Desenhamos uma linha de secante que interliga dois pontos  $(y_{i-1}, f(y_{i-1}))$  e  $(y_i, f(y_i))$  no gráfico da função  $f$ , de acordo com a Figura 4.11. O ponto tracejado para a linha da secante e o eixo  $y$  é exatamente o  $y_{i+1}$  definido pela fórmula de interação da secante.

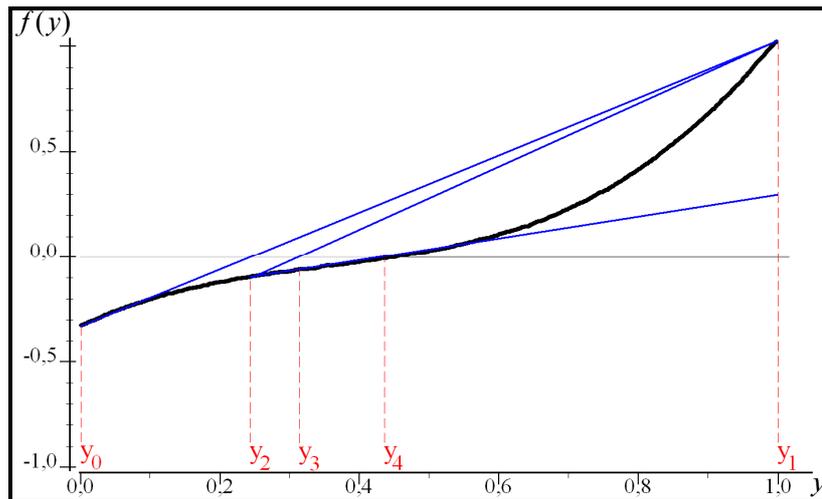


Figura 4.11: Exemplo das três primeiras repetições da aplicação do método da secante para determinar zero da função normalizada  $f$  correspondente ao ponto experimental 21. Os pontos vermelhos mostram os valores de interações e as linhas azuis são as secantes.

Comparando o método da secante com outros tipos de métodos de determinação da raiz, precisamos levar em consideração alguns aspectos. Este método tem uma convergência linear alta, sendo assim mais rápido do que o método da bisseção. Mas ele pode não convergir pela a mesma razão que o método de Newton pode não convergir. Por exemplo, o método não está definido se  $f(y_i) = f(y_{i-1})$ , sendo necessária alguma modificação desta condição para que o método possa convergir (Gragg *et al.*, 1976). Quando compararmos o método de Newton com o método da secante, observamos que o primeiro converge mais rapidamente. Porém, o método de Newton requer a avaliação de  $f$  e sua derivada em todos os passos, enquanto o método de secante só requer a avaliação de  $f$ . Então, o método de secante pode ser bem mais rápido na prática. Por exemplo, se assumirmos o tempo gasto para avaliarmos  $f$  e sua derivada e negligenciarmos todos os outros gastos, pode-se fazer dois passos do método da secante com o

mesmo tempo gasto com um passo do método de Newton, assim o método da secante é mais rápido.

Portanto, em nossa opinião a melhor estratégia para a solução de equação de não linear é usar o método da secante no primeiro caso e aplicar o método de bisseção quando o primeiro não obtiver nenhuma solução. Tal estratégia foi implementada no programa criado.

#### 4.4 - PROGRAMA DE ANÁLISE DE DADOS E MODELAGEM PARA CARACTERÍSTICAS DE ESCOAMENTO CRÍTICO, SUBCRÍTICO E O LIMITE ENTRE ELES

##### 4.4.1 - O programa

Com o propósito de analisar o escoamento multifásico e calcular alguns parâmetros de fluxo através de *chokes* o programa foi criado e está baseado em um determinado modelo teórico para prever o fluxo mássico e caracterizar o tipo de escoamento presente em um determinado sistema, sendo ele crítico, subcrítico ou o limite entre eles (Sachdeva *et al.*, 1986). O programa foi criado tendo como base a linguagem *FORTRAN*, que nos dá a possibilidade de desenvolver e incluir outros modelos e características para escoamento multifásico. O texto completo do programa construído é mostrado no Apêndice B – Tabela B.1.

Os valores das variáveis de entrada do programa computacional para cada ponto experimental estão no Apêndice A – Tabela A.1 ou mostrados através de uma caixa de diálogo especial, podendo ser utilizado em um computador pessoal sem qualquer equipamento especial.

O programa foi nomeado "*PAP-css*" (programa de análise de parâmetros e previsão em situações de escoamento crítico-subcrítico) e possui a extensão ordinária ".exe". O programa tem um menu principal, o qual alimenta todas as funções internas. A estrutura geral dos menus, como por exemplo, a área de exibição, é mostrada na Figura 4.12 e nela é possível identificar todos os pontos funcionais do menu principal, sendo possível a abertura e o fechamento durante o

funcionamento do programa conforme situações diferentes. Informações sobre possibilidades funcionais de cada janela e caixas especiais de diálogo para entrada de dados no programa serão mostrados no Apêndice B – Procedimentos para a utilização do programa “PAP-css”.

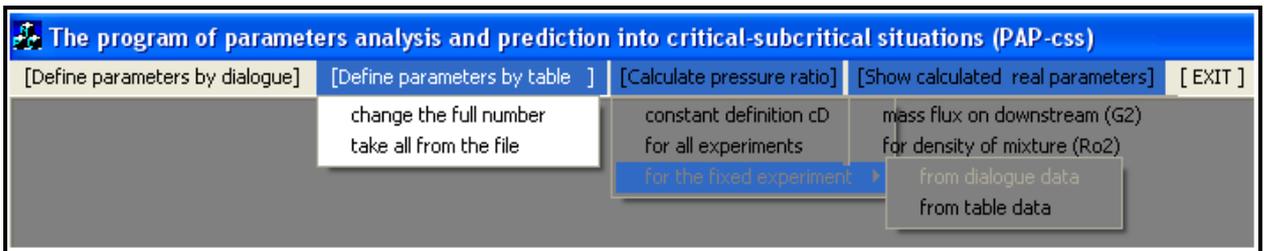


Figura 4.12: Menus principais e as funções do programa “PAP-css”.

#### 4.4.2 - Esquema de blocos para o programa

O esquema de blocos para o programa é apresentado na Figura 4.13 e quatro (4) elementos principais deste esquema foram separados. São eles: utilizar dados experimentais iniciais, calcular a razão de pressão a montante pela a jusante do *choke* para a identificação do tipo de escoamento (crítico, subcrítico ou limite entre eles), determinar algumas características dos fluidos presentes neste escoamento e apresentar resultados na tela através gráficos.

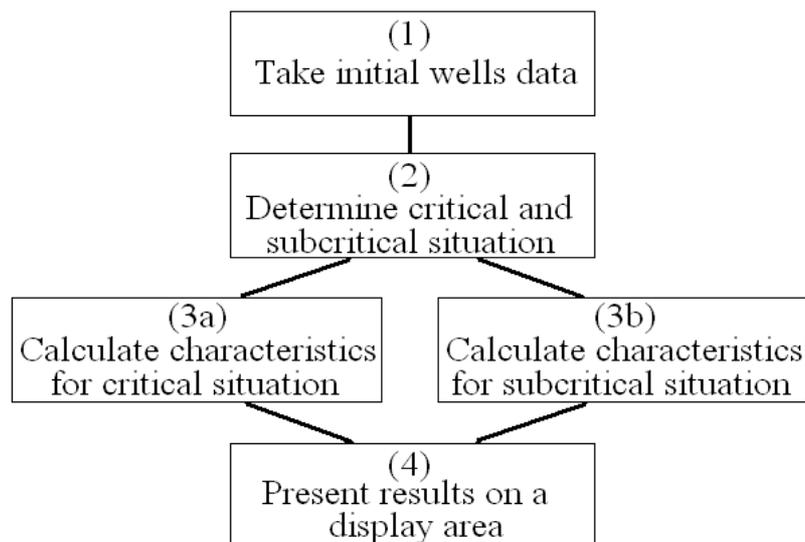


Figura 4.13: Os elementos principais e o diagrama de blocos do programa “PAP-css”.

Assim, analisaremos cada um destes elementos:

1) "*Take initial wells data*" - O elemento inclui duas possibilidades de entrada de dados no programa. Primeiro, utilizando uma caixa de diálogo para este propósito e neste caso, será necessário designar um valor de cada parâmetro para algum experimento realizado em campo ou em laboratório, com o número fixo da corrida desejada. O tipo de caixa de diálogo correspondente será mostrado no Apêndice B – Procedimentos para a utilização do programa "*PAP-css*". Segundo, utilizando um conjunto completo de dados de um arquivo especial que precisa ser enviado para a pasta onde o programa "*PAP-css.exe*" está situado, tendo um nome específico para o arquivo: "*prim-dat.txt*". A primeira e a segunda possibilidade são selecionadas e executadas através de dois botões respectivamente: [*Define parameters by dialogue*] e [*Define parameters by table*] (Figura 4.12). Por causas destas possibilidades, vários procedimentos foram criados para este programa.

2) "*Determine critical and subcritical situation*" - Para este elemento foi preparado um programa especial FORTRAN "*CalculFRED*" e este programa é baseado na solução da equação não linear (4.3.1), que nos possibilita prever o limite crítico-subcrítico de fluxo baseado no modelo de escoamento multifásico de Sachdeva *et al.* (1986). As variáveis de entrada para este elemento (Apêndice A – Tabela A.1) foram obtidas baseadas nos dados experimentais, de acordo com o arquivo especial "*prim-dat.txt*". Neste caso, temos a possibilidade de determinar o tipo do escoamento por meio do botão [*Calculate pressure ratio*] (Figura 4.12) para todos os pontos experimentais [*for all experiments*] ou para algum ponto experimental específico [*for the fixed experiment*]. O resultado da solução para a equação não linear será apresentado no computador através de uma janela especial, "*The calculated function. Frame N 1*", que também foi criada neste programa. Assim, após finalizar a solução da equação não linear na área de exibição, visualizaremos o resultado através de um gráfico, de acordo com a Figura 4.14, mostrando o resultado para a correspondente solução (cor vermelha) e o valor prévio da razão da pressão a jusante pela a montante (cor azul).

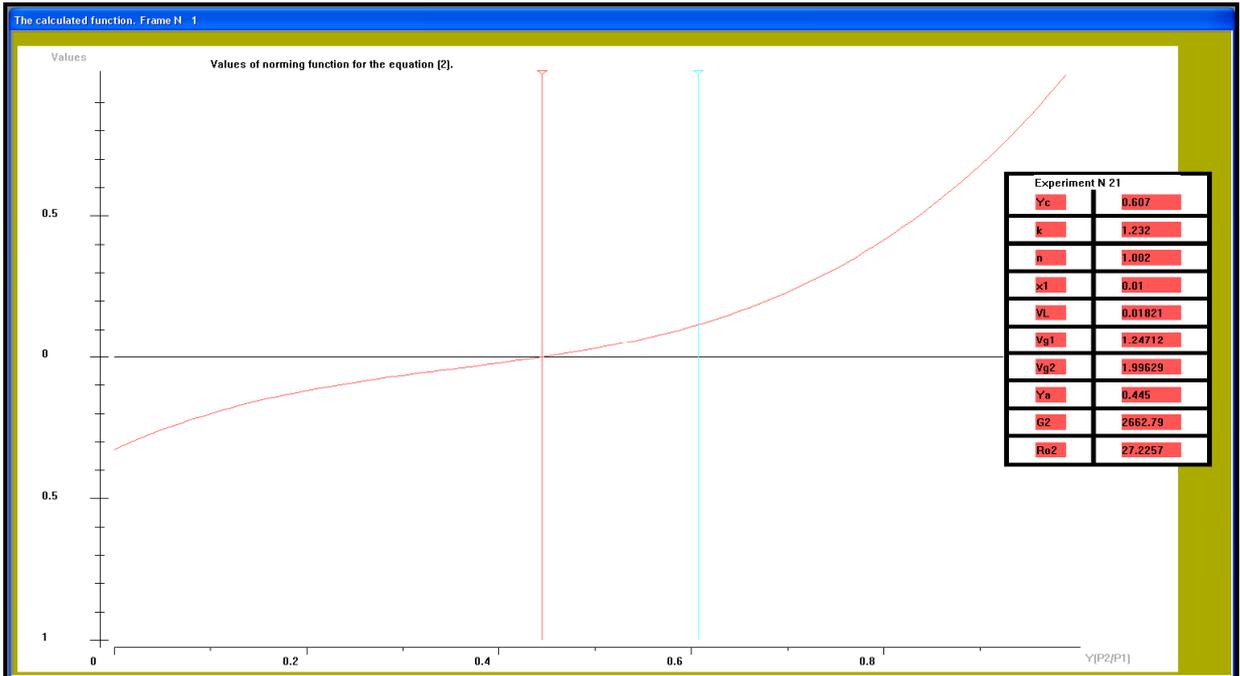


Figura 4.14: Exemplo da apresentação do resultado em uma janela especial que foi preparada dentro do programa correspondente ao ponto experimental 21.

3) "*Calculate characteristics for critical (3a) or subcritical (3b) situation*" - Este elemento é utilizado no programa para determinar parâmetros para escoamento crítico, subcrítico ou limite entre eles através de *chokes*, utilizando equações baseadas no modelo de Sachdeva *et al.* (1986), como por exemplo, o fluxo mássico ( $G_2$ ) e a massa específica da mistura a jusante do *choke* ( $\rho_{m2}$ ). Estes valores foram calculados utilizando as equações (2.4.23) e (2.4.25) respectivamente, tendo como base os dados experimentais. Os valores calculados para estes parâmetros também serão mostrados em uma apresentação final com um conjunto de dados experimentais completo.

4) "*Present results on a display area*" - Este elemento gera a possibilidade de uma apresentação dos resultados finais e de suas análises. Para estes propósitos, um programa especial *FORTTRAN "ShoFREDpar"* foi construído. O programa prepara três janelas especiais com números de dois (2) a quatro (4) na tela do computador e que apresenta os valores dos resultados experimentais observados e calculados para um parâmetro fixo. Na primeira janela são apresentados os valores calculados neste trabalho e os resultados experimentais para cada ponto simultaneamente, e tal apresentação de resultados nos dá a possibilidade de visualizar melhor a eficiência do modelo para cada experimento. Um exemplo para

tal apresentação é dada na Figura 4.15. Outro tipo de apresentação de resultados é utilizado na janela de número quatro (4) e neste caso, os resultados experimentais do parâmetro analisado são apresentados pelo eixo horizontal e os valores calculados correspondentes estão relacionados ao eixo vertical. Esta apresentação mostra uma relação entre os valores experimentais e calculados e por essa razão, no programa, um algoritmo de análise de regressão foi construído. O valor do coeficiente de correlação também foi incluído nesta janela. A Figura 4.16 exemplifica tal apresentação para a determinação desses resultados.

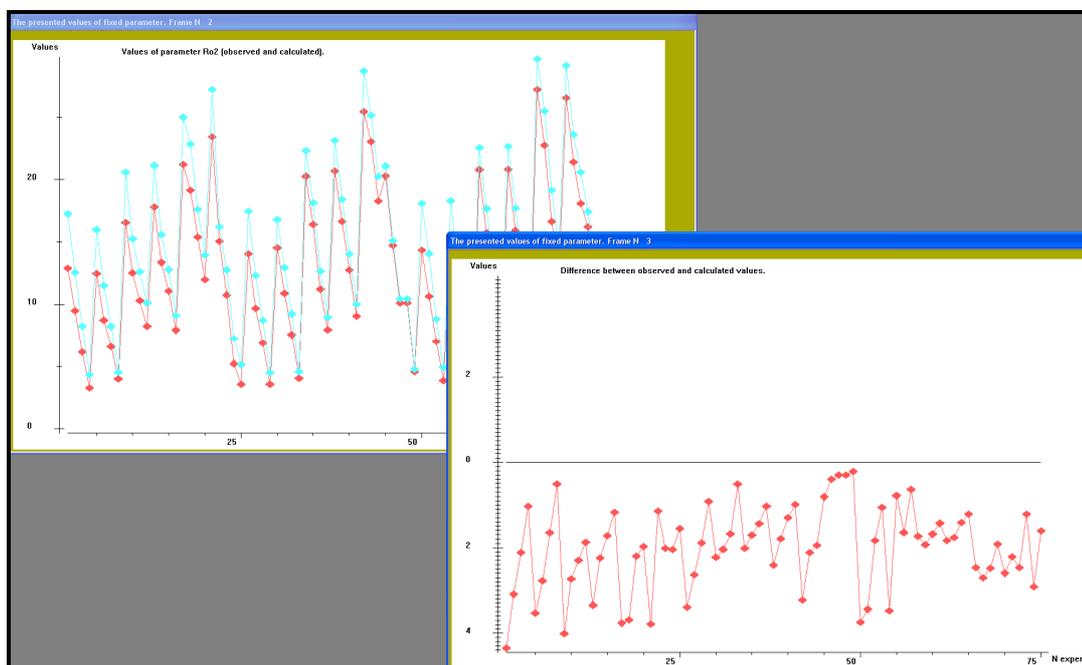


Figura 4.15: Apresentação dos resultados experimentais (cor vermelha) e os calculados (cor azul) e a diferença entre seus valores, janelas dois (2) e três (3) respectivamente.

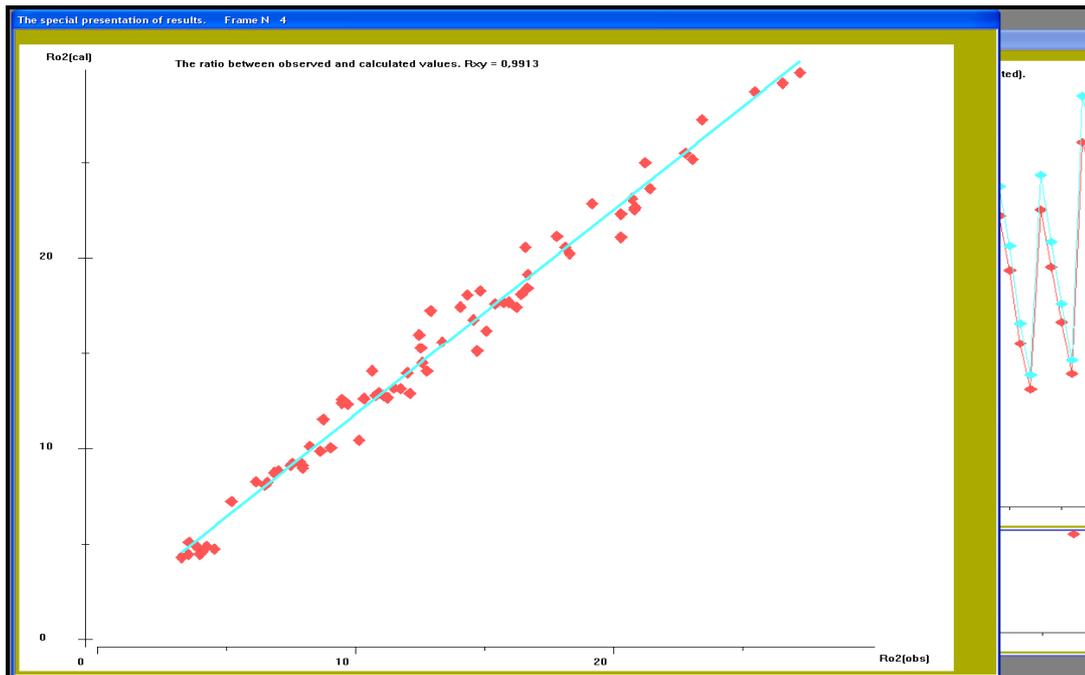


Figura 4.16: Análise da relação entre os resultados experimentais e os valores calculados para o parâmetro de massa específica da mistura a jusante do *choke*. A linha azul mostra um exemplo para essa relação e na parte superior desta janela, encontra-se o valor do coeficiente de correlação.

O valor do coeficiente de correlação foi calculado da seguinte forma:

$$R_{xy} = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N y_i}{\left( N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right)^{1/2} \cdot \left( N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right)^{1/2}}, \quad (4.4.2.1)$$

onde  $x_i$  e  $y_i$  são os resultados experimentais e os valores calculados respectivamente para cada parâmetro, sendo eles fluxo mássico ( $G_2$ ), vazão mássica das fases líquida e gasosa ( $M_{L2}$ ,  $M_{G2}$ ) ou massa específica da mistura a jusante do *choke* ( $\rho_{m2}$ ) e  $N$  o número total de experimentos.

No Apêndice B serão descrito as regras gerais para o uso do programa “PAP-css” e suas funções principais para a caracterização do escoamento multifásico através de *chokes*.

## Capítulo 5

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentaremos os valores calculados neste trabalho dos parâmetros para escoamento multifásico utilizando o modelo de Sachdeva *et al.* (1986) com o auxílio do programa computacional, a partir dos dados experimentais. O mesmo será dividido em quatro partes para compreendermos e discutirmos melhor os resultados.

Na primeira parte serão mostrados os resultados referentes à determinação do tipo de escoamento multifásico, seja ele crítico, subcrítico ou limite entre eles. Serão apresentados nas outras três partes, os resultados obtidos para os parâmetros de massa específica da mistura, fluxo e vazão mássica para as duas fases presentes no escoamento (líquida e gasosa) a jusante do *choke*, respectivamente.

Também serão feitas análises comparativas entre os valores dos parâmetros calculados neste trabalho e os resultados experimentais para os últimos três parâmetros, utilizando o programa computacional desenvolvido.

#### 5.1 - DETERMINAÇÃO DO TIPO DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

A partir dos dados experimentais observados e utilizando a equação (2.4.28) definida por Sachdeva *et al.* (1986), foi possível determinar o tipo de escoamento multifásico presente nos setenta e cinco (75) pontos experimentais.

Para o escoamento crítico através de *chokes* foram encontrados trinta e cinco (35) pontos experimentais, como por exemplo, o ponto dez (10) (Figura 5.1), onde o valor encontrado da razão da pressão a jusante pela a montante do *choke* ( $y$ ) é igual a 0,565.

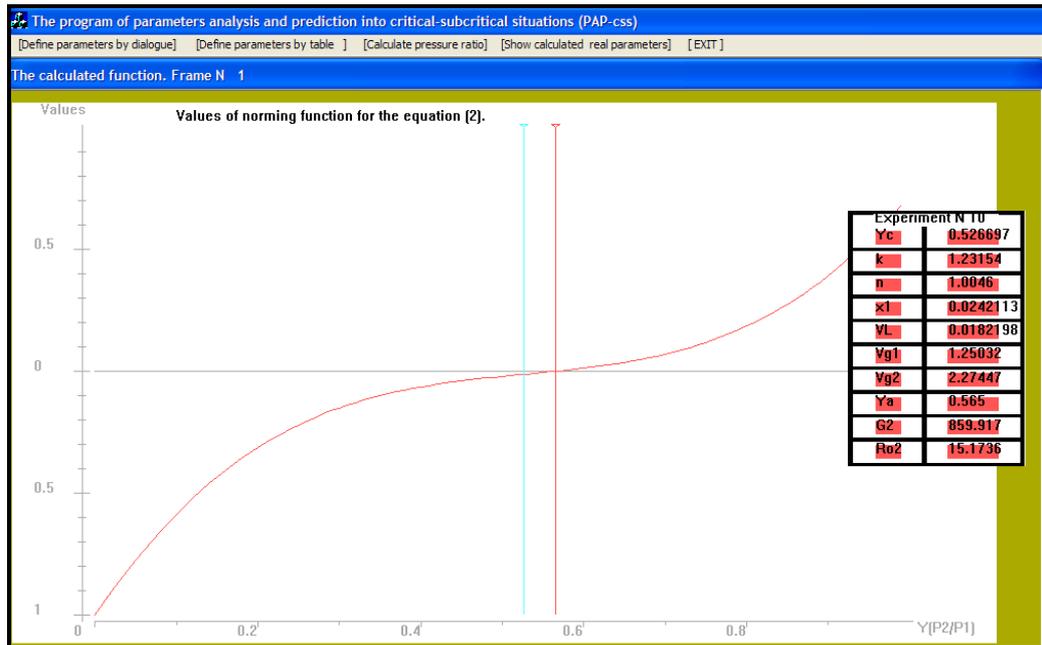


Figura 5.1: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com o valor calculado da razão da pressão a jusante pela a montante do *choke* no escoamento crítico para o ponto experimental dez (10).

Foram determinados através deste modelo trinta e oito (38) pontos experimentais para o escoamento subcrítico através de *chokes*, como por exemplo, o ponto vinte e um (21) (Figura 5.2), onde o valor encontrado da razão da pressão a jusante pela a montante do *choke* ( $\gamma$ ) é igual a 0,607.

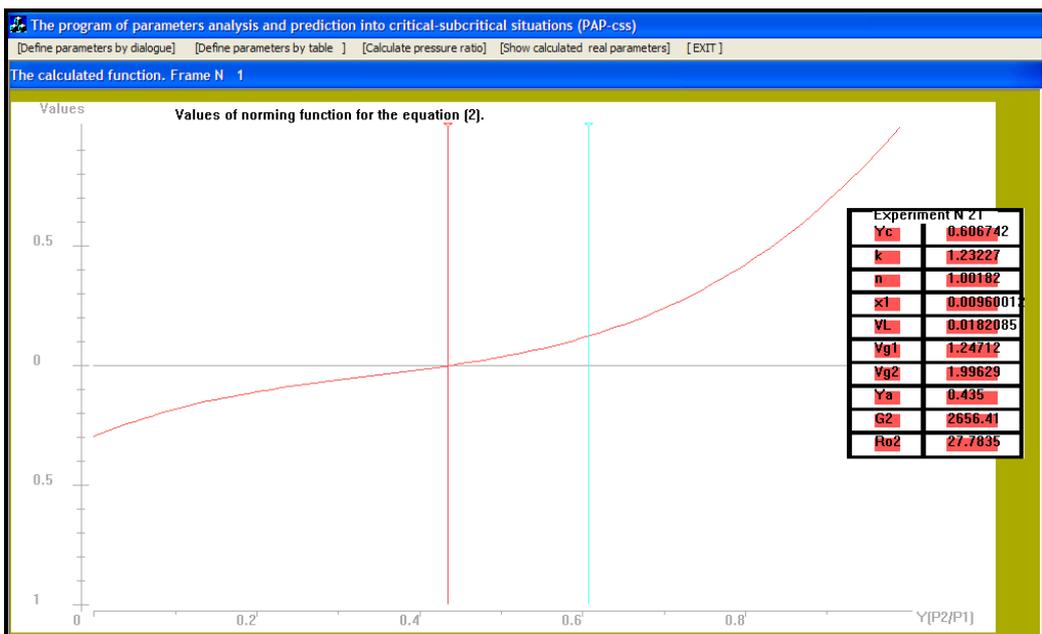


Figura 5.2: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com o valor calculado da razão da pressão a jusante pela a montante do *choke* no escoamento subcrítico para o ponto experimental vinte e um (21).

Finalmente, foram encontrados através deste modelo dois (2) pontos experimentais no limite do escoamento crítico-subcrítico através de *chokes*, como por exemplo, o ponto cinquenta e quatro (54) (Figura 5.3), onde o valor encontrado da razão da pressão a jusante pela a montante do *choke* ( $\gamma$ ) é igual a 0,580.

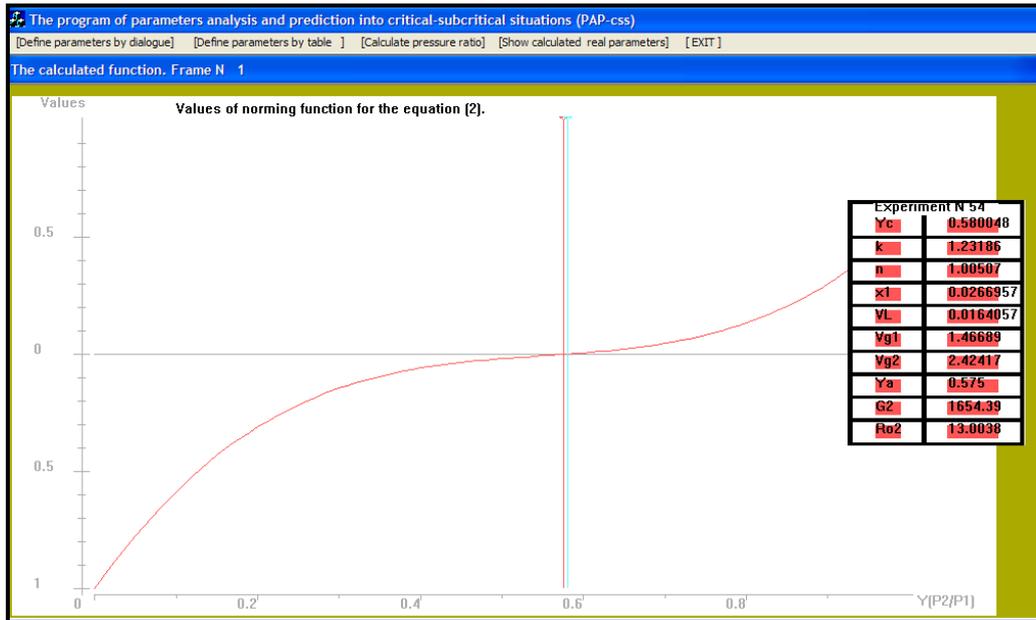


Figura 5.3: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com o valor calculado da razão da pressão a jusante pela a montante do *choke* no limite do escoamento crítico-subcrítico para o ponto experimental cinquenta e quatro (54).

Na Figura 5.4 apresentamos todos os resultados obtidos reunidos para os valores calculados da razão da pressão a jusante pela a montante do *choke* ( $\gamma$ ) para os diferentes tipos de escoamento encontrados dos setenta e cinco (75) pontos experimentais.

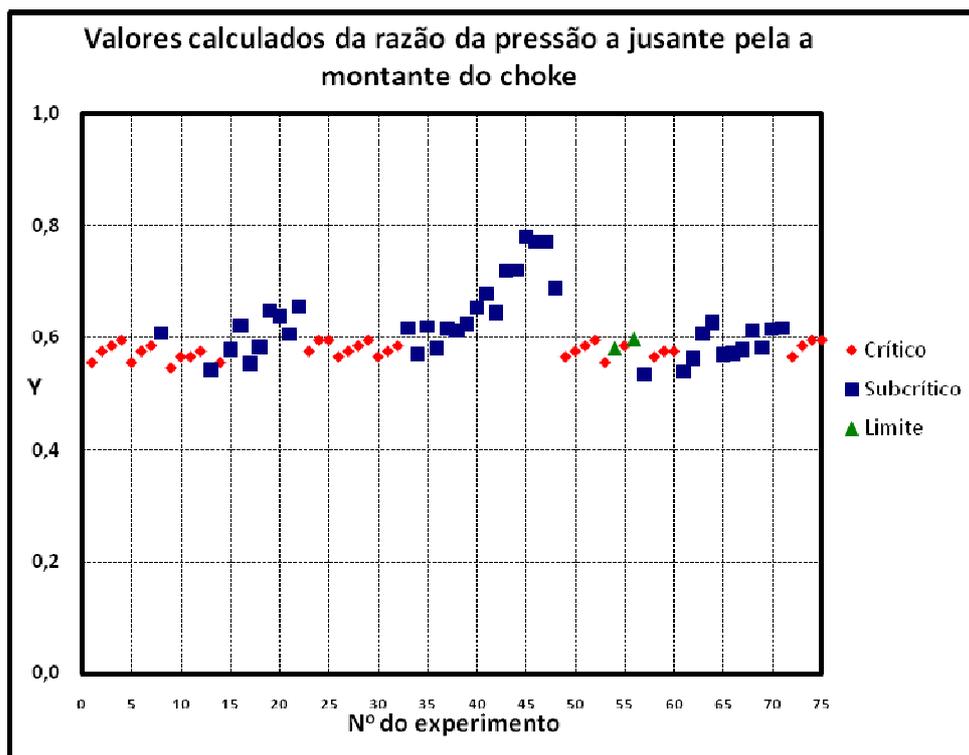


Figura 5.4: Valores calculados utilizando o programa computacional “PAP-css” da razão da pressão a jusante pela a montante do *choke* para todos os pontos experimentais.

Portanto, a partir dos dados experimentais e fazendo a utilização das equações do modelo de Sachdeva *et al.* (1986) no programa computacional desenvolvido, foi possível determinar os tipos de escoamento, sendo ele crítico ou subcrítico, além da determinação do limite entre eles.

## 5.2 - RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA DA MISTURA A JUSANTE DO CHOKE.

A seguir, os valores calculados de massa específica da mistura a jusante do *choke* ( $\rho_{m2}$ ) para os setenta e cinco (75) pontos experimentais serão mostrados. Esse parâmetro foi obtido a partir de dados experimentais e através da equação (2.4.25) definida por Sachdeva *et al.* (1986), utilizando o programa computacional desenvolvido neste trabalho.

Através das Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 pode ser visualizado o estudo comparativo entre os valores calculados deste modelo (linha azul) e os resultados experimentais (linha vermelha) de massa específica da mistura a jusante do *choke*. Com o auxílio do programa computacional foi possível obter uma visualização melhor destes

resultados, além de calcular o coeficiente de correlação para esta análise comparativa de acordo com a Figura 5.5 baseado na equação (4.4.2.1).

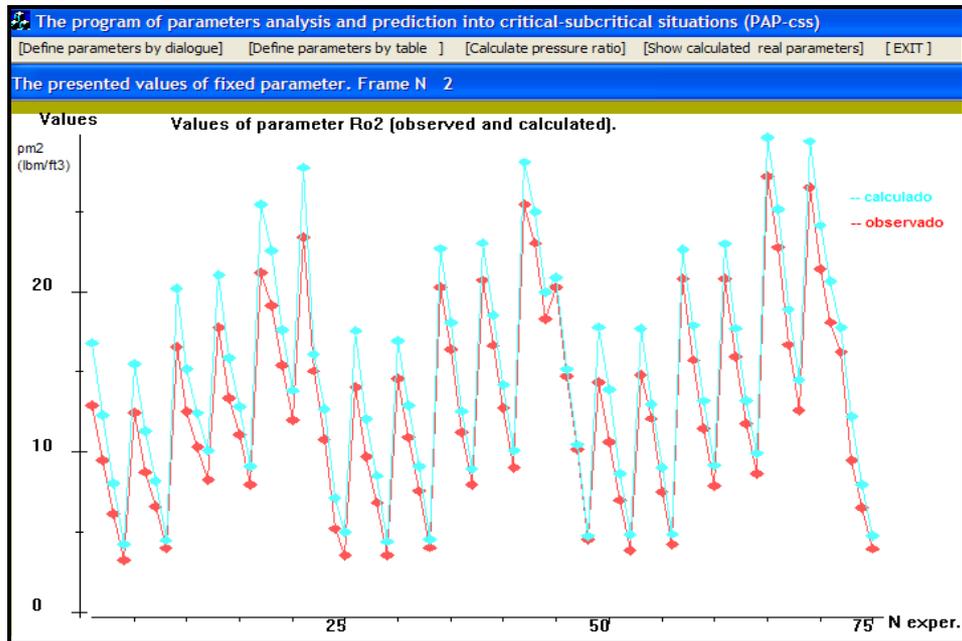


Figura 5.5: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com os valores calculados neste trabalho (linha azul) e os resultados experimentais (linha vermelha) de massa específica da mistura a jusante do *choke* por experimento.

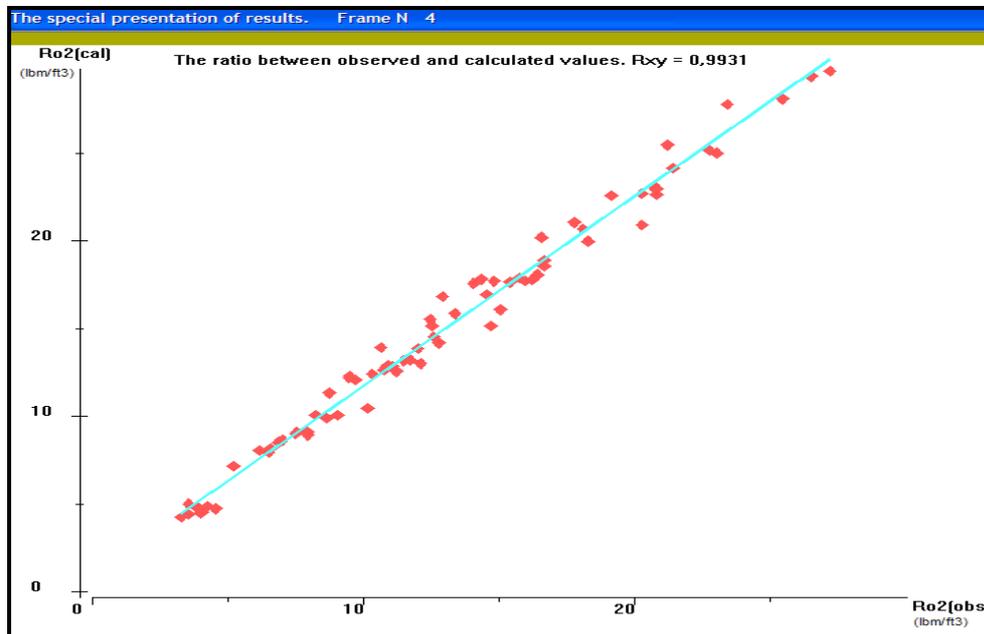


Figura 5.6: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com a relação entre os valores calculados neste trabalho e os resultados experimentais de massa específica da mistura a jusante do *choke*.

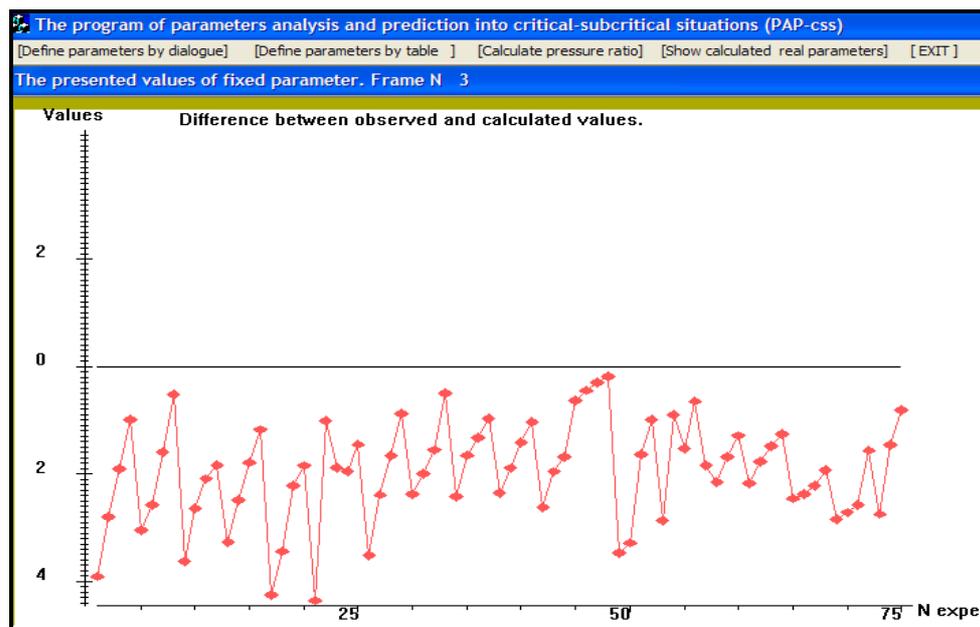


Figura 5.7: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” apresentando a diferença entre os valores calculados e os resultados experimentais de massa específica da mistura a jusante do *choke* por experimento.

Após a análise comparativa desse estudo obtida através dos valores calculados neste trabalho utilizando a equação do modelo de Sachdeva *et al.* (1986) para a determinação da massa específica da mistura a jusante do *choke* e o programa computacional com os resultados experimentais, obteve-se bons resultados para massa específica da mistura a jusante do *choke*, comprovada por um satisfatório coeficiente de correlação calculado ( $cc=0,9931$ ) para este parâmetro, de acordo com a equação (4.4.2.1).

Outra importância deste estudo, é que os valores calculados de massa específica da mistura a jusante do *choke* por este modelo serão utilizados mais adiante como uma variável para a determinação da vazão mássica das fases presentes (líquida e gasosa) a partir dados experimentais.

### 5.3 - RESULTADOS DE FLUXO MÁSSICO A JUSANTE DO *CHOKE*

Utilizando o modelo de Sachdeva *et al.* (1986), dados experimentais e também o programa computacional desenvolvido neste trabalho foi possível determinar o fluxo mássico a jusante do *choke* ( $G_2$ ) baseado na equação (2.4.23) para os setenta e cinco (75) pontos experimentais mostrados na Figura 5.8 (linha

azul). Para uma maior compreensão, foi feita uma análise comparativa destes valores com os resultados experimentais (linha vermelha).

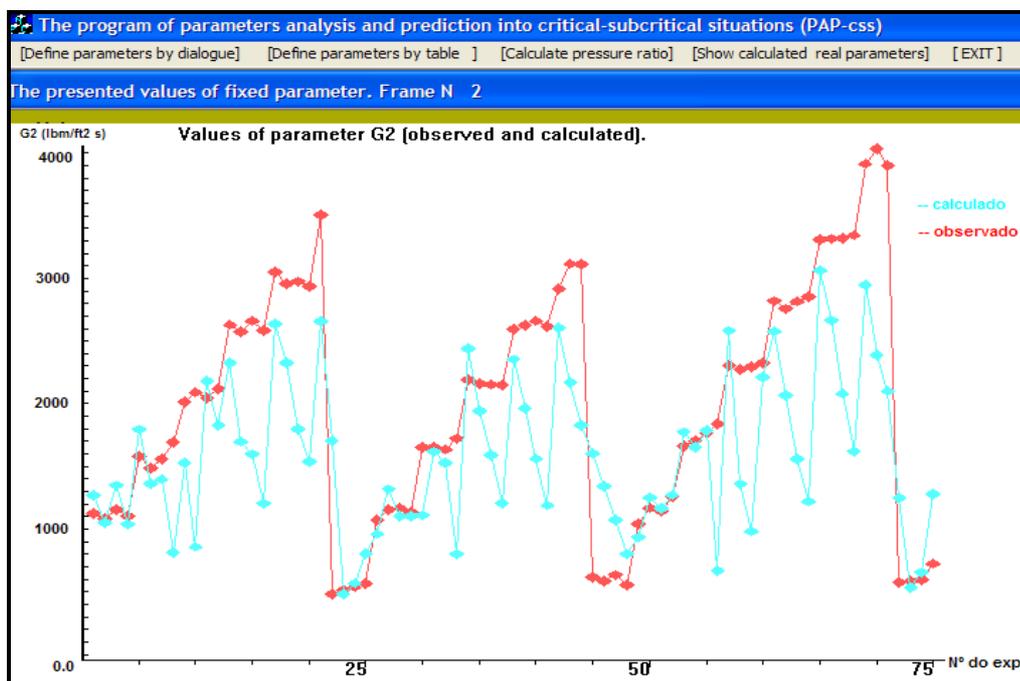


Figura 5.8: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com os valores calculados neste trabalho (linha azul) e os resultados experimentais (linha vermelha) de fluxo mássico a jusante do *choke* por experimento.

Além disso, apresentaremos através do gráfico (Figura 5.9), um estudo comparativo com a diferença entre os valores calculados e os resultados experimentais para fluxo mássico a jusante do *choke*. Através dessa análise e com a utilização do programa computacional, foi possível fazer simulações com diferentes valores para o coeficiente de descarga ( $C_D$ ). Foi identificado que para  $C_D = 0,80$ , obteve-se melhores resultados para os valores calculados neste trabalho.

Finalmente, será apresentado na Figura 5.10, uma análise comparativa entre os valores calculados neste trabalho e os resultados experimentais para fluxo mássico a jusante do *choke*, onde foi obtido um coeficiente de correlação ( $cc=0,7246$ ), de acordo com a equação (4.4.2.1).

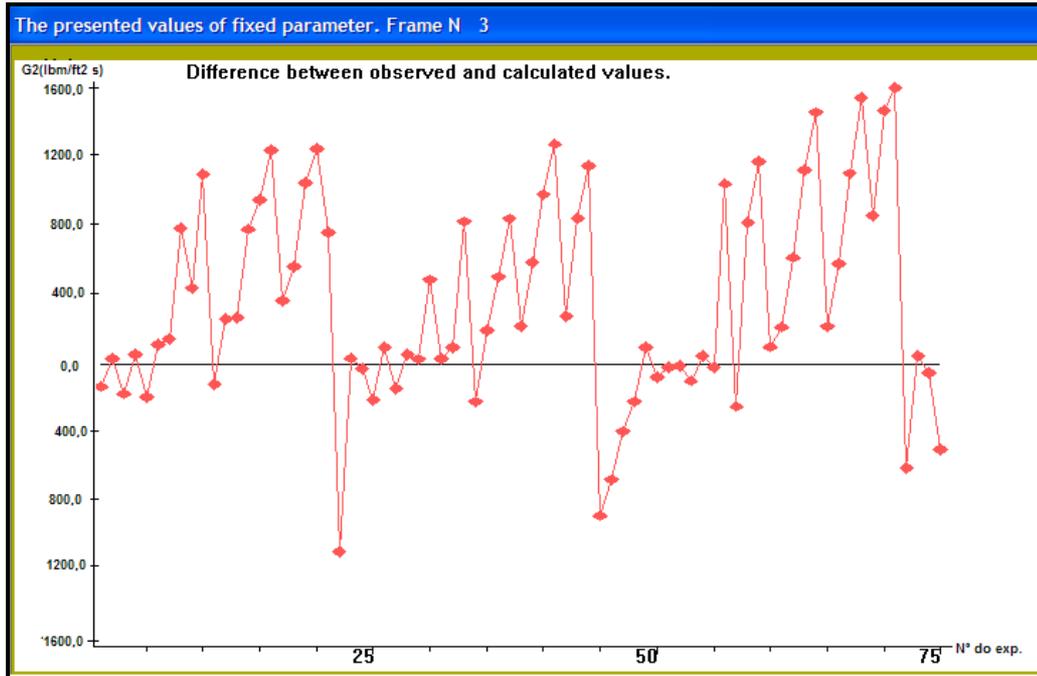


Figura 5.9: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” apresentando a diferença entre os valores calculados e os resultados experimentais de fluxo mássico a jusante do *choke* por experimento.

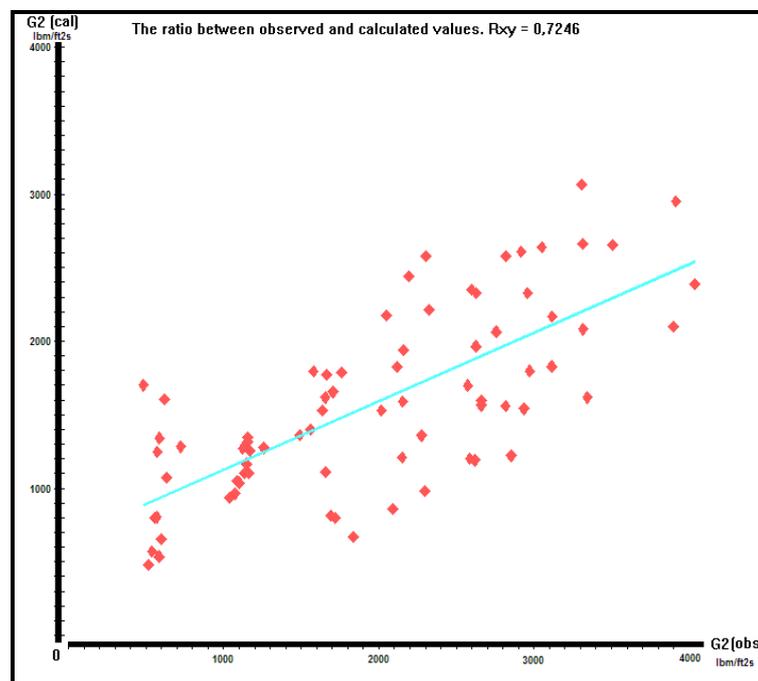


Figura 5.10: Gráfico utilizando o programa computacional “PAP-css” com a relação entre os valores calculados neste trabalho e os resultados experimentais de fluxo mássico a jusante do *choke*.

Uma das justificativas do resultado insatisfatório para fluxo mássico a jusante do *choke* calculado neste trabalho, baseado no baixo valor do coeficiente de correlação, foi que estes dados experimentais observados foram obtidos de um

estudo em laboratório cujo objetivo principal foi à determinação da perda de carga usando medidores de pressão diferencial a jusante e a montante do *choke*, como por exemplo, a placa de orifício. Assim, o autor do trabalho experimental utilizado não tinha como principal finalidade a modelagem do escoamento multifásico através de *chokes* e em função da dificuldade para a obtenção de dados experimentais específicos para este assunto, este trabalho experimental foi aproveitado

Outra justificativa considerável é que durante o teste experimental, foram feitas alterações na abertura (diâmetro) do *choke* e estas mudanças não foram reportadas no trabalho experimental, pois como mencionado anteriormente, não era interessante para o autor obter as variações da abertura do *choke* durante cada ponto experimental, e sim a quantificação do aumento ou redução da pressão a montante ou a jusante das placas de orifícios e *choke*. Logo, foi necessário atribuir um valor médio de abertura do *choke* durante o trabalho experimental (1 polegada) para a obtenção dos resultados experimentais, influenciando diretamente durante a análise comparativa com os valores calculados neste trabalho para os parâmetros de fluxo e vazão mássica das fases líquida e gasosa a jusante do *choke*.

Finalizando, as equações desenvolvidas no modelo de Sachdeva *et al.* (1986) obtiveram bons resultados nos experimentos tendo ar e água/querozene como fluidos para modelagem do escoamento. Estas mesmas equações foram utilizadas neste trabalho, onde os fluidos presentes foram gás natural e óleo morto, podendo ter alguma influência no resultado final para a determinação dos parâmetros citados acima. Então, não foi possível identificar uma boa resposta para fluxo mássico a jusante do *choke*.

#### 5.4 - RESULTADOS DE VAZÃO MÁSSICA A JUSANTE DO *CHOKE* PARA AS FASES LÍQUIDA E GASOSA

Além de encontrarmos o fluxo mássico a jusante do *choke* ( $G_2$ ) a partir dos dados experimentais e das equações definidas pelo modelo de Sachdeva *et al.* (1986), é de grande importância para este estudo a determinação da vazão mássica a jusante do *choke* para a fase líquida ( $M_{L2}$ ) e gasosa ( $M_{G2}$ ) separadamente. A obtenção desses parâmetros foi feita da seguinte forma:

O primeiro passo foi à determinação da velocidade a jusante do choke ( $v_2$ ) (Figura 5.11) utilizando a equação (2.4.8), a partir dos valores calculados neste trabalho para fluxo mássico ( $G_2$ ) e massa específica da mistura ( $\rho_{m2}$ ) a jusante do *choke*.

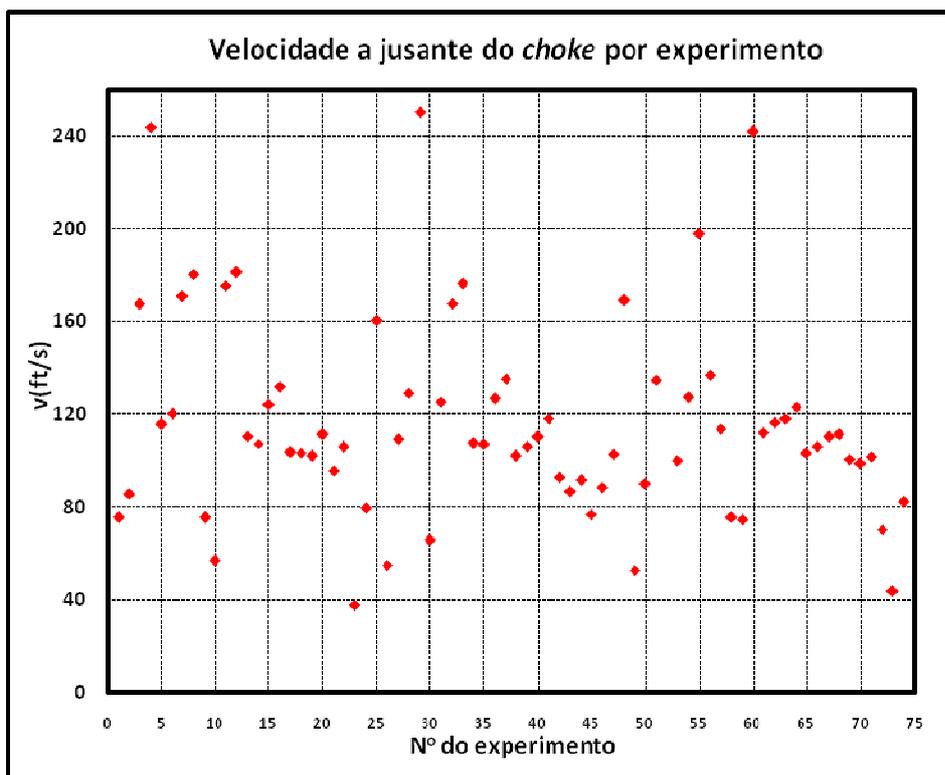


Figura 5.11: Gráfico com os valores de velocidade a jusante do *choke* por experimento.

O segundo passo foi à determinação da massa específica a jusante do *choke* separadamente, ou seja, para a fase líquida e gasosa. Utilizando a equação (2.4.24) encontramos o valor do volume específico do gás a jusante do *choke* ( $V_{G2}$ ) para cada ponto observado e depois, utilizou-se a equação (4.1.6) para determinação da massa específica da fase gasosa a jusante do choke ( $\rho_{G2}$ ) (Figura 5.12). Para a massa específica da fase líquida a jusante do choke ( $\rho_{L2}$ ) utilizou-se a equação (2.4.9) para cada ponto experimental (Figura 5.13).

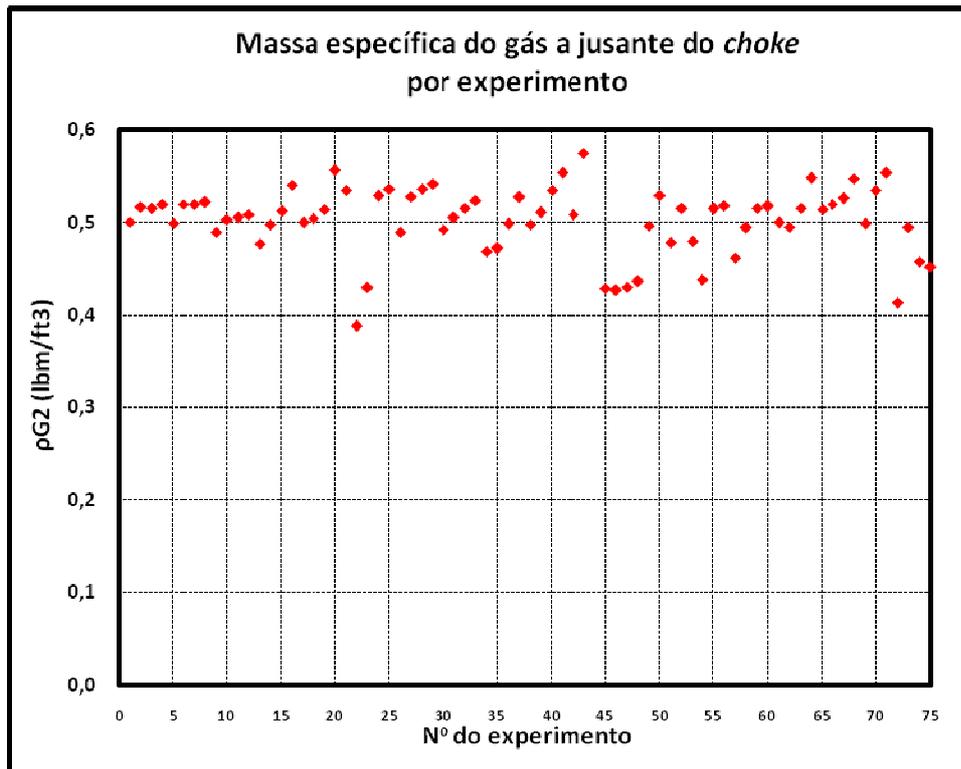


Figura 5.12: Gráfico com os valores de massa específica a jusante do *choke* para a fase gasosa por experimento.

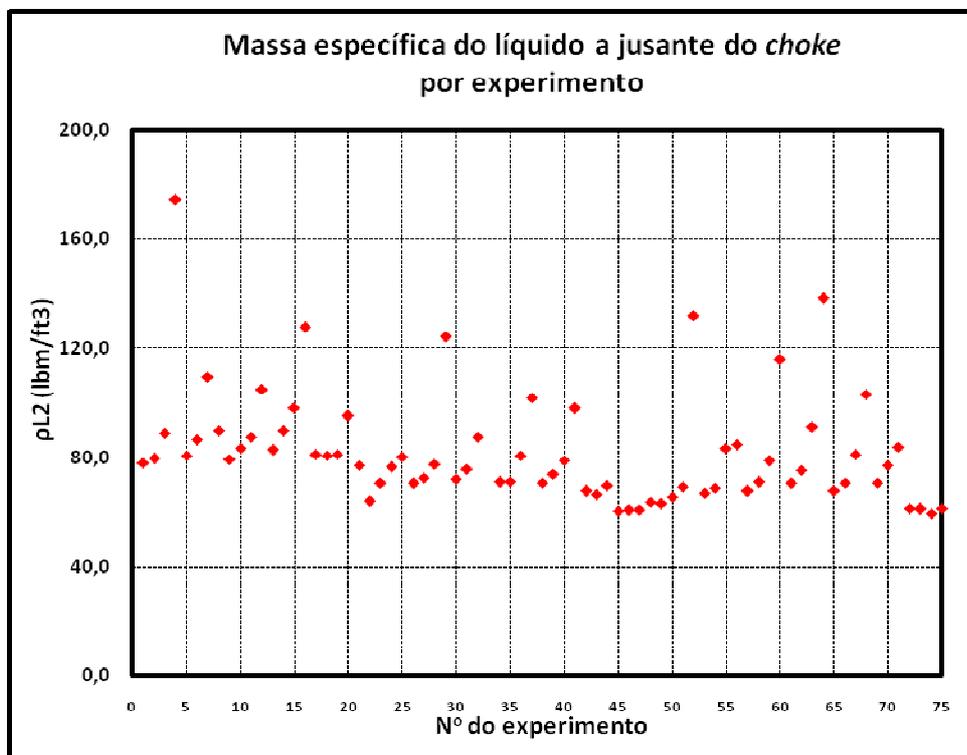


Figura 5.13: Gráfico com os valores de massa específica a jusante do *choke* para a fase líquida por experimento.

No terceiro passo, determinou-se a área do escoamento a jusante do *choke* para a fase líquida ( $A_{L2}$ ) e gasosa ( $A_{G2}$ ) presentes nestes dados experimentais.

Substituindo a vazão mássica a jusante do *choke* para a fase líquida ( $M_{L2}$ ) (equação 2.4.3) e gasosa ( $M_{G2}$ ) (equação 2.4.4) na equação (2.4.6), obteremos:

$$G_2 = \frac{(A_{G2}v_{G2}\rho_{G2}) + (A_{L2}v_{L2}\rho_{L2})}{A_2}, \quad (5.4.1)$$

onde:  $A_2 = A_{L2} + A_{G2}$

Substituindo  $A_{G2}$  na equação (5.4.1) teremos:

$$G_2 = \frac{[(A_2 - A_{L2})v_{G2}\rho_{G2}] + [A_{L2}v_{L2}\rho_{L2}]}{A_2} \quad (5.4.2)$$

Reescrevendo:

$$A_{L2} = \frac{(G_2 A_2) - (A_2 v_{G2} \rho_{G2})}{(v_{L2} \rho_{L2}) - (v_{G2} \rho_{G2})} \quad (5.4.3)$$

Assim, com os valores obtidos anteriormente de  $G_2$ ,  $\rho_{L2}$  e  $\rho_{G2}$ , considerando um modelo homogêneo, onde assumimos que a velocidade das fases é igual na garganta do *choke* ( $v_{L2} = v_{G2} = v_2$ ) e com a área de abertura do *choke* ( $A_2$ ), foi possível determinar a área de escoamento para a fase líquida ( $A_{L2}$ ) e conseqüentemente para fase gasosa ( $A_{G2}$ ) a jusante do *choke*, tendo como base os valores calculados de massa específica da mistura e fluxo mássico a jusante do *choke*, de acordo com a Figura 5.14.

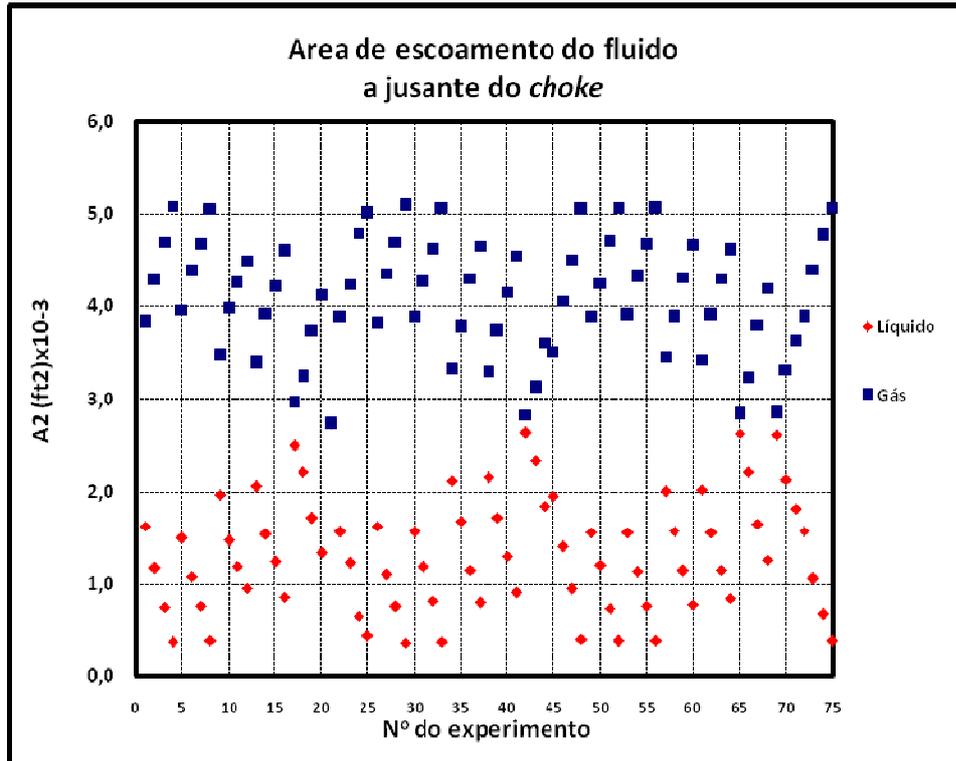


Figura 5.14: Gráfico com os valores das áreas do escoamento a jusante do *choke* para a fase líquida e gasosa por experimento.

Enfim, com esses valores encontrados de área, massa específica e velocidade a jusante do *choke* para a fase líquida e gasosa presente nos dados experimentais e substituindo-os nas equações (2.4.3) e (2.4.4), foi possível determinar a vazão mássica a jusante do *choke* para a fase líquida ( $M_{L2}$ ) e gasosa ( $M_{G2}$ ) respectivamente. Os resultados são mostrados na Figura 5.15 para a fase líquida e na Figura 5.16 para a fase gasosa.

Com esses resultados calculados de vazão mássica a jusante do *choke* para as fases líquida ( $M_{L2}$ ) e gasosa ( $M_{G2}$ ) e com os resultados experimentais para estes mesmos parâmetros, foi possível fazer uma análise comparativa e calcular o coeficiente de correlação, de acordo com a Figura 5.17 e 5.18 respectivamente.

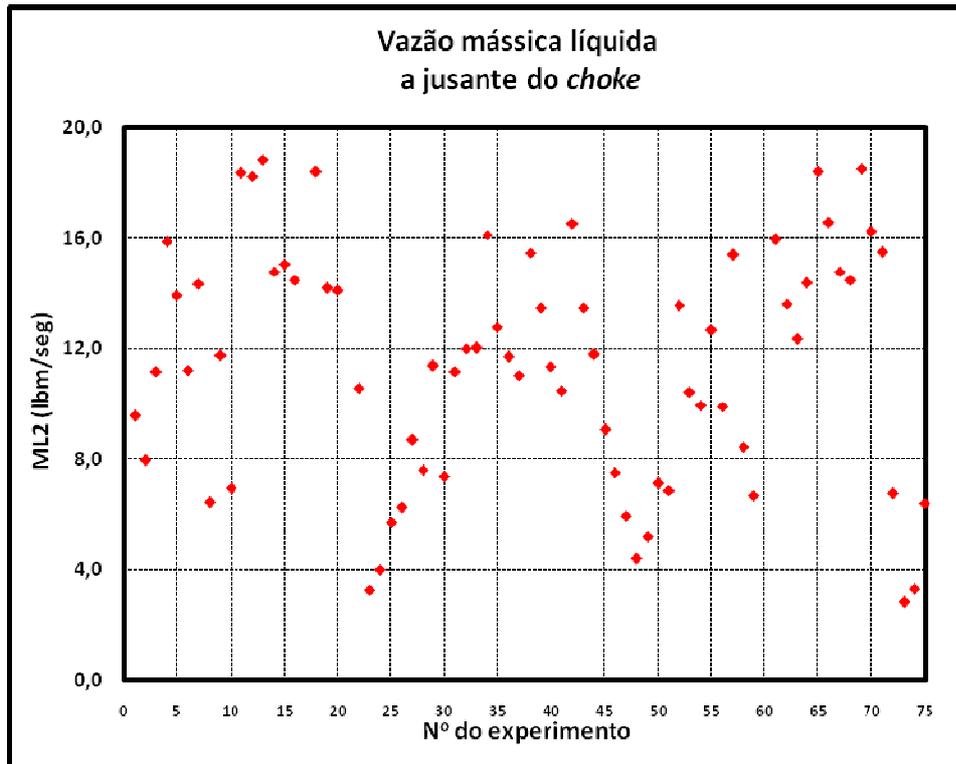


Figura 5.15: Gráfico com os valores de vazão mássica a jusante do *choke* para a fase líquida por experimento.

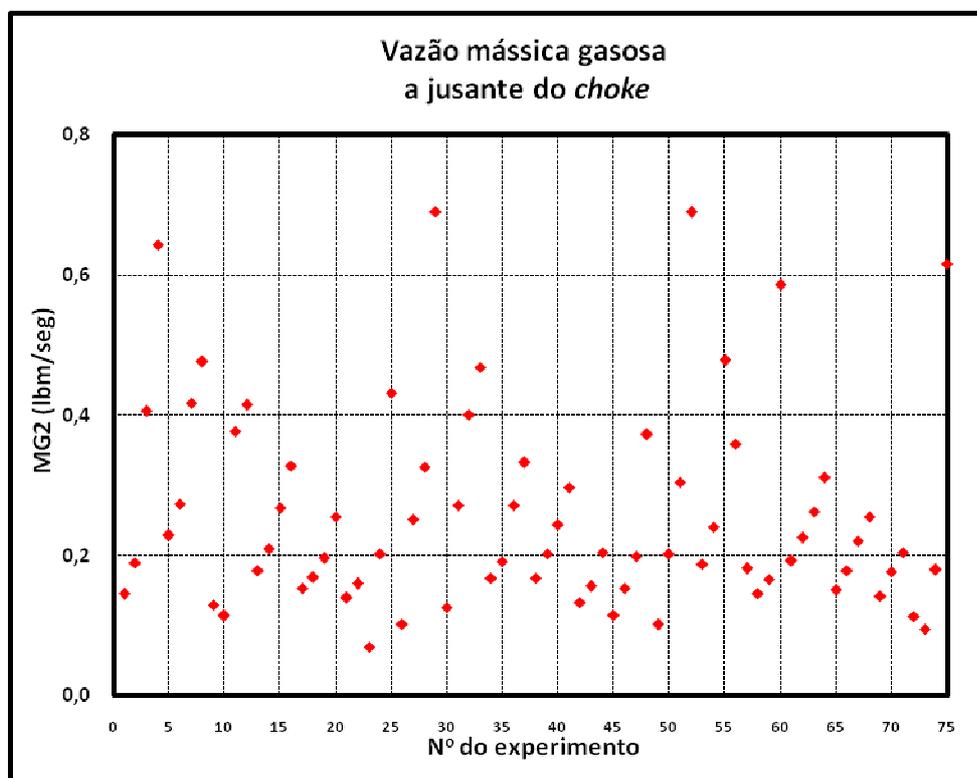


Figura 5.16: Gráfico com os valores de vazão mássica a jusante do *choke* para a fase gasosa por experimento.

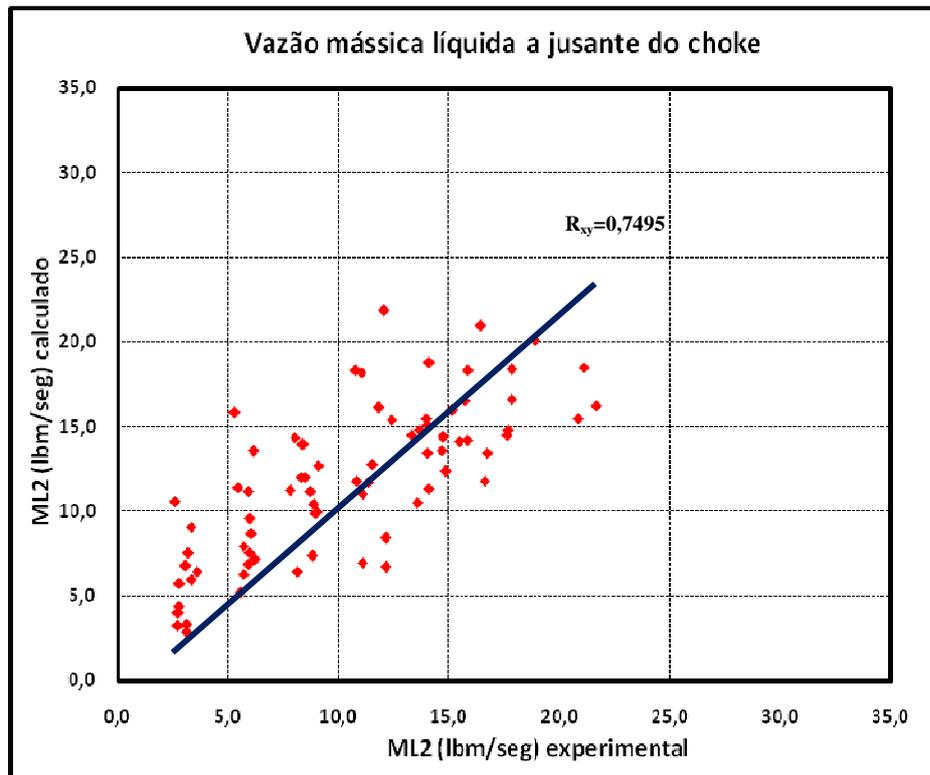


Figura 5.17: Gráfico com a relação entre os valores calculados neste trabalho e os resultados experimentais de vazão mássica líquida a jusante do *choke* por experimento.

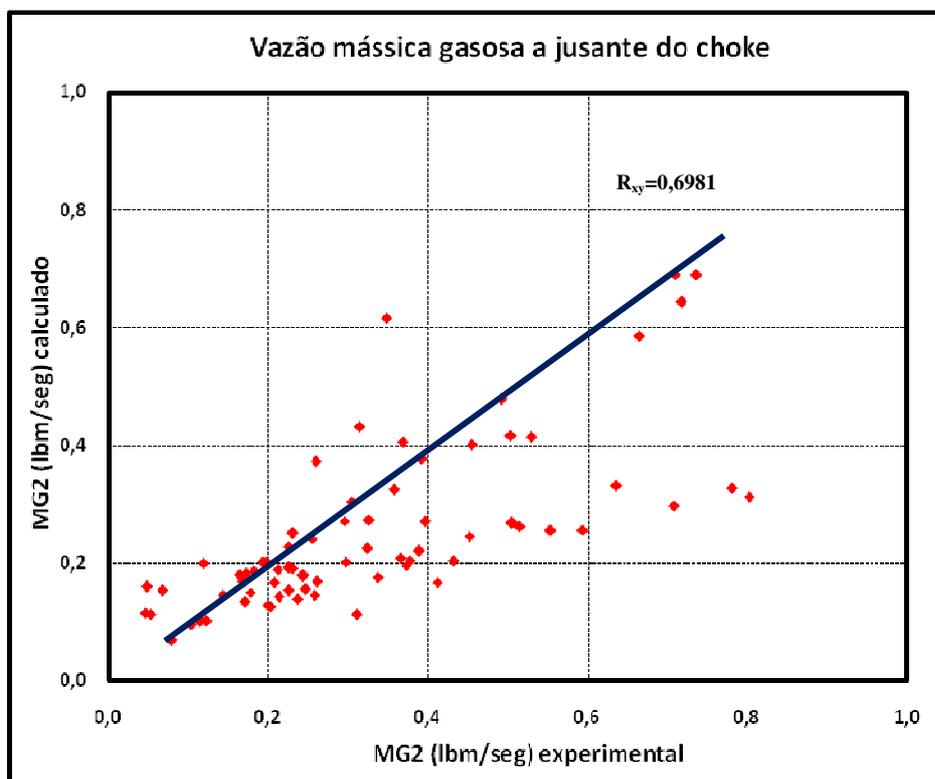


Figura 5.18: Gráfico com a relação entre os valores calculados neste trabalho e os resultados experimentais de vazão mássica gasosa a jusante do *choke* por experimento.

O coeficiente de correlação encontrado para vazão mássica a jusante do *choke* da fase líquida ( $M_{L2}$ ) foi de 0,7495 e para a fase gasosa ( $M_{G2}$ ) foi de 0,6981, de acordo com a equação (4.4.2.1). Logo, estes resultados foram os esperados, pois para a determinação destes parâmetros foram utilizados como variáveis os valores calculados neste trabalho e os resultados experimentais de fluxo mássico a jusante do *choke* ( $G_2$ ), no qual obteve-se um coeficiente de correlação próximo aos encontrados neste tópico, atribuindo as mesmas justificativas descritas no item 5.3 para a análise comparativa deste parâmetro. Assim, os valores baixos encontrados do coeficiente de correlação para a vazão mássica a jusante do *choke* da fase líquida e gasosa devem ser justificados principalmente pela imprecisão dos dados experimentais em relação à abertura do *choke*, pois durante o experimento foram feitas alterações no seu diâmetro e estas mudanças não foram reportadas no trabalho experimental.

## Capítulo 6

### CONCLUSÕES

Utilizando as equações do modelo desenvolvido por Sachdeva *et al.* (1986) e o programa computacional desenvolvido neste trabalho para o cálculo dos parâmetros do escoamento multifásico, foi possível prever satisfatoriamente o escoamento crítico, subcrítico e o limite entre eles a partir dos dados observados numa bancada experimental, alcançando o objetivo principal que foi identificar o tipo de escoamento em um determinado conjunto de dados de campo ou experimental.

Foi possível, também, através deste modelo e com o auxílio do programa computacional, calcular os valores dos parâmetros para o escoamento multifásico, como, por exemplo, massa específica da mistura, fluxo e vazão mássica das fases líquida e gasosa a jusante do *choke*, para os setenta cinco (75) pontos experimentais observados. Como mencionado anteriormente, esta caracterização é de grande importância para que tenhamos informações dos fluidos presentes na linha de produção.

Utilizando o valor de 0,85 para o coeficiente de descarga obteve-se uma resposta melhor para o conjunto de dados experimentais durante o cálculo do fluxo mássico a jusante do *choke*, baseada na equação do modelo de Sachdeva *et al.* (1986) para os pontos experimentais. Este coeficiente foi utilizado para absorver erros referentes a propriedades relacionadas ao fluido presente no sistema.

Com o mesmo programa computacional, foi possível fazer um estudo comparativo entre os valores calculados e os resultados experimentais para os parâmetros do escoamento multifásico mencionados anteriormente. Calculamos o coeficiente de correlação para esta análise comparativa, onde obtivemos um bom coeficiente de correlação ( $R_{xy}=0,99$ ) para massa específica da mistura jusante do *choke*. Em contra partida, encontramos um razoável coeficiente de correlação ( $R_{xy}\approx 0,73$ ) para os valores calculados versus resultados experimentais de fluxo e vazão mássica para as fases líquida e gasosa a jusante do *choke*. Estes baixos valores dos coeficientes de correlação podem ser atribuídos ao fato dos dados experimentais serem ambíguos ou incompletos, visto que o objetivo principal do trabalho experimental foi a determinação da perda de carga usando medidores de

pressão diferencial a jusante e a montante do *choke* e não a determinação dos parâmetros de caracterização do escoamento multifásico. Outra justificativa para esta análise comparativa é que durante o teste, foram feitas alterações na abertura (diâmetro) do *choke* e estas mudanças não foram reportadas no trabalho experimental. Logo, foi necessário atribuir um valor médio de abertura do *choke* para a obtenção dos resultados experimentais de fluxo e vazão mássica a jusante do *choke*.

Assim, com o embasamento diante dos resultados obtidos neste trabalho, podemos concluir que foi possível prever os tipos de escoamento multifásico (crítico, subcrítico e o limite entre eles) a partir dos dados experimentais, utilizando o modelo de Sachdeva *et al.* (1986). Porém, para a determinação de outros parâmetros do escoamento multifásico através de *chokes*, como por exemplo a vazão mássica, não foi possível obter um bom resultado em função do baixo coeficiente de correlação devido à imprecisão dos dados experimentais.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomendam-se a utilização de modelos não homogêneos, ou seja, modelos que levam em consideração a diferença entre as velocidades de cada fase presente durante o escoamento multifásico na linha ou coluna de produção, pois as equações utilizadas neste trabalho do modelo de Sachdeva *et al.* (1986) consideram que as fases presentes possuem a mesma velocidade. Além disso, pode ser feita uma análise comparativa dos resultados experimentais, utilizando o mesmo programa computacional, com as equações de outros modelos na literatura para prever o escoamento multifásico através de *chokes*, onde seja possível determinar o limite do escoamento crítico-subcrítico. Finalmente, é recomendável estabelecer uma análise comparativa dos valores calculados neste trabalho, onde foram utilizadas as equações do modelo de Sachdeva *et al.* (1986) e o programa computacional desenvolvido, com outros dados experimentais específicos para o escoamento multifásico através de *chokes*, em que seja possível obter as informações reais em relação às variações da abertura deste equipamento.

## APÊNDICE A

Tabela A.1: Valores das variáveis de entrada do programa computacional para cada ponto experimental.

Ponto	Pmon choke	Y	K	n	X <sub>g1</sub>	ρ <sub>L1</sub>	V <sub>L1</sub>	V <sub>g1</sub>	V <sub>g2</sub>	ρ <sub>m2</sub>	gc	G <sub>2</sub>
	(P1)(psia)	P <sub>2</sub> / P <sub>1</sub>	(Cp/Cv)	Pasta eq.	Fraq. Más.	(lbm/ft <sup>3</sup> )	(ft <sup>3</sup> /lbm)	(ft <sup>3</sup> /lbm)	(ft <sup>3</sup> /lbm)	(lbm/ft <sup>3</sup> )	lb.ft/(s.lbf)	(lbm/ft <sup>2</sup> s)
1	212,496743	0,459839357	1,23531273	1,00396652	0,0208918416	55,1586248	0,0181295475	1,23999827	2,25223682	12,9099881	32,1740000	1122,94717
2	211,074409	0,476415094	1,23703322	1,00629914	0,0330915379	55,2545337	0,0180980789	1,23565796	2,13644382	9,4780552	32,1740000	1083,84395
3	211,501109	0,477471419	1,23403546	1,01054299	0,0551683398	55,0543653	0,0181638805	1,25686664	1,99073890	6,1444919	32,1740000	1155,29417
4	211,501109	0,492938803	1,23338133	1,02199279	0,1138017182	54,9889143	0,0181855002	1,26329012	1,94241669	3,2653282	32,1740000	1100,54087
5	212,781210	0,493983957	1,23475153	1,00443424	0,0233450642	55,1079650	0,0181462137	1,24284073	2,14181046	12,4644822	32,1740000	1579,00004
6	215,056945	0,482804233	1,23493585	1,00700774	0,0367960098	55,0471991	0,0181662451	1,22950330	2,05357848	8,7461219	32,1740000	1488,91241
7	214,630244	0,521537442	1,23316954	1,01044503	0,0546700834	54,9422829	0,0182009348	1,24562579	1,98543395	6,5762264	32,1740000	1561,39885
8	208,229740	0,609289617	1,23333502	1,02079242	0,1077192828	54,9736285	0,0181905568	1,28163477	2,03552290	3,9737481	32,1740000	1691,85507
9	213,919077	0,509308511	1,23297593	1,00293012	0,0154515783	55,0029325	0,0181808654	1,24947364	2,34249694	16,5787368	32,1740000	2016,64975
10	215,768112	0,526697429	1,23154157	1,00459830	0,0242113024	54,8854162	0,0182197928	1,25031629	2,27447284	12,5361493	32,1740000	2091,10609
11	217,759380	0,528412802	1,23089795	1,00604202	0,0317708809	54,8675943	0,0182257109	1,24441951	1,96403178	10,3264354	32,1740000	2047,20619
12	216,479279	0,529566360	1,23067391	1,00792678	0,0416082441	54,8577840	0,0182289702	1,25361723	1,97298273	8,2388257	32,1740000	2118,34162
13	213,065677	0,543391188	1,23021693	1,00267316	0,0141020674	54,9035648	0,0182137702	1,27539260	2,25490595	17,7990869	32,1740000	2629,46658
14	218,328313	0,545276873	1,23024803	1,00427602	0,0225237051	54,8993678	0,0182151626	1,24581454	2,19795895	13,3666411	32,1740000	2574,47492
15	217,190446	0,578912901	1,23029295	1,00585545	0,0307973415	54,8396170	0,0182350090	1,25198034	2,09052386	11,0701966	32,1740000	2660,71530
16	216,052679	0,620803160	1,23054907	1,00952774	0,0499371997	54,8695649	0,0182262521	1,25637368	1,96753118	9,5762900	32,1740000	2587,71562
17	218,897247	0,553606238	1,23072770	1,00201181	0,0106195884	54,9494381	0,0181985648	1,23838424	2,15703150	21,2248420	32,1740000	3051,18084
18	208,949097	0,582709326	1,23265347	1,00251159	0,0132502272	54,9194371	0,0182085073	1,28058861	2,12300093	19,1566454	32,1740000	2958,81134
19	195,428731	0,648471616	1,23236201	1,00379008	0,0199702092	54,9108226	0,0182113613	1,36828205	2,05002782	15,4208572	32,1740000	2973,93050
20	214,630244	0,639496355	1,23250146	1,00577769	0,0303833844	54,9170262	0,0182093055	1,24915465	1,90369309	12,0038035	32,1740000	2937,74853
21	215,199178	0,606741573	1,23227386	1,00181844	0,0096001213	54,9193696	0,0182082548	1,24711682	1,99629209	23,434574	32,1740000	3508,50784
22	143,940230	0,656126482	1,23216993	1,00326210	0,0171973674	55,0150499	0,0181768609	1,83077652	2,67205618	15,0697713	32,1740000	483,25677
23	180,351988	0,522870662	1,23180964	1,00500636	0,0263488030	54,8679928	0,0182255785	1,48372395	2,65368453	10,7675672	32,1740000	516,90624
24	211,216642	0,448484848	1,231615478	1,01246558	0,0650721904	55,1209514	0,0181419385	1,24254650	2,08032089	5,1921346	32,1740000	538,79142
25	217,901613	0,437989556	1,23380622	1,01898355	0,0985073103	54,9413973	0,0182012282	1,22382407	1,96498218	3,5499864	32,1740000	568,10332
26	207,660806	0,471917808	1,23275081	1,00370468	0,0195213651	57,7932817	0,0173030650	1,26888509	2,34636079	14,0665156	32,1740000	1072,05998
27	217,332679	0,488874346	1,23576572	1,00664759	0,0349143540	57,8809603	0,0172768542	1,20992718	2,05094045	9,6934463	32,1740000	1154,77210
28	217,048213	0,501965924	1,23161027	1,01035122	0,0541539711	57,9307329	0,0172620103	1,20900487	2,00026474	6,8555337	32,1740000	1163,33752
29	214,488011	0,515915119	1,23256793	1,02219314	0,1146279406	58,0586136	0,0172399888	1,21348188	1,86576817	3,5366788	32,1740000	1134,05191
30	208,656440	0,528970688	1,23319621	1,00393572	0,0207333761	57,7772822	0,0173078565	1,27753959	2,31295014	14,5610629	32,1740000	1655,15928
31	212,638976	0,528428094	1,23212768	1,00584292	0,0307256698	57,7131534	0,0173270884	1,26273848	2,10720024	10,9006566	32,1740000	1653,83742
32	215,199178	0,528750826	1,23138596	1,00917893	0,0481179948	57,7075853	0,0173287602	1,25459707	2,00072716	9,5508385	32,1740000	1636,35468
33	208,949097	0,618107556	1,23129690	1,02072938	0,1074817659	57,7190847	0,0173253078	1,29193758	2,02776320	4,0376566	32,1740000	1721,65532
34	200,549135	0,570921986	1,23014615	1,00239444	0,0126350257	57,6660208	0,0173412505	1,35188482	2,27902007	20,2840997	32,1740000	2193,28698
35	187,463659	0,619878604	1,23078153	1,00342855	0,0180735425	57,7001713	0,0173309868	1,43675363	2,24011413	16,4281317	32,1740000	2158,49724
36	209,225374	0,581237254	1,23111901	1,00596359	0,0313600019	57,7822136	0,0173063794	1,29048810	2,14508816	11,2289744	32,1740000	2154,09836
37	210,505475	0,616891892	1,23139470	1,00962810	0,0504508148	57,7119588	0,0173274470	1,28119319	2,01617924	7,9535453	32,1740000	2148,81969
38	201,118069	0,611739745	1,23011509	1,00247347	0,0130511201	57,6689033	0,0173304837	1,34854864	2,13564616	20,7090525	32,1740000	2596,28988
39	202,824870	0,626227209	1,23014960	1,00357616	0,0188497913	57,6782035	0,0173375877	1,33741881	2,07398085	16,6635384	32,1740000	2627,82577
40	204,104971	0,652961672	1,23094839	1,00545598	0,0287051265	57,6811184	0,0173367115	1,32295485	1,97483707	12,7705364	32,1740000	2660,50753
41	205,527305	0,672806092	1,23059413	1,00873153	0,0457981385	57,6832250	0,0173360477	1,31722285	1,89834297	9,0450039	32,1740000	2618,43273
42	196,566599	0,646164978	1,23022902	1,00177731	0,0093839571	57,7226173	0,0173242475	1,37739493	2,07307268	25,4687863	32,1740000	2917,85432
43	202,682636	0,718596491	1,23210296	1,00248996	0,0131373389	57,6896180	0,0173341572	1,33108843	1,81828892	23,0552783	32,1740000	3117,05124
44	215,910345	0,423947368	1,23235849	1,00387389	0,0204101726	57,7895556	0,0173101714	1,24206135	1,69739723	18,3017659	32,1740000	3114,05495
45	136,544092	0,780208333	1,23321400	1,00249807	0,0131787322	57,8488553	0,0172864425	1,90719171	2,38733389	20,2860083	32,1740000	619,94873
46	137,539726	0,771458118	1,23295641	1,00397336	0,0209312685	57,8210114	0,0172947668	1,89752015	2,39941628	17,1699512	32,1740000	587,37652
47	137,966426	0,772164948	1,23350968	1,00647249	0,0340098445	57,8654844	0,0172871661	1,88613598	2,38263272	10,1433502	32,1740000	633,51969
48	154,607737	0,688132475	1,23396556	1,01642795	0,0854588936	57,8734257	0,0172791034	1,69237527	2,37849706	4,5344456	32,1740000	553,21195
49	209,083141	0,448979592	1,23391898	1,00377290	0,0198778689	60,9792145	0,0163990454	1,26951500	2,31378775	14,3390740	32,1740000	1039,57549
50	216,194812	0,439473684	1,23685068	1,00563528	0,0296254812	61,0272408	0,0163739215	1,20781754	2,06853833	10,6366774	32,1740000	1169,66422
51	197,988933	0,490660920	1,23353109	1,00913955	0,0478961148	60,9149975	0,0164163334	1,35233227	2,21431180	7,0073003	32,1740000	1146,90577
52	209,936541	0,510162602	1,23779076	1,01914961	0,0992190761	60,9610536	0,0164039309	1,27484486	1,90610085	3,8236242	32,1740000	1259,14561
53	207,518573	0,479095271	1,23274196	1,00367575	0,0193694973	60,8861247	0,0164241182	1,29348848	2,27575799	14,8277939	32,1740000	1663,53662
54	182,183243	0,580047858	1,23185581	1,00507262	0,0266956590	60,9545941	0,0164056693	1,46688636	2,42416529	12,1016828	32,1740000	1703,42916
55	214,274661	0,523606040	1,23171900	1,00937022	0,0491089193	60,9522208	0,0164063080	1,25660344	1,93097409	7,4924357	32,1740000	1761,66271
56	211,154415	0,596429857	1,23506355	1,01925618	0,0998518267	60,9286637	0,0164126513	1,26879454	2,06012476	4,2282291	32,1740000	1836,41774
57	203,527147	0,535653649	1,23340054	1,00244478	0,0128981849	61,0020858	0,0163928970	1,30666774	2,33667734	20,8096307	32,1740000	2304,06538
58	208,211961	0,535137973	1,23394960	1,00373275	0,0196670997	61,0270334	0,0163861957	1,27419089	2,28341085	15,7513471	32,1740000	2276,39469
59	211,972257	0,549213672	1,23577597	1,00589589	0,0309904815	61,1566106	0,0163541770	1,23867290	2,17101548	11,4838073	32,1740000	2297,00256
60	214,007959	0,557530983	1,23497056	1,00926197	0,0485200482	61,0601515	0,0163773080	1,23350302	1,81305183	7,8609265	32,1740000	2324,83790
61	214,034642	0,540058911	1,23722429	1,00259279	0,0136745419	61,2109595						

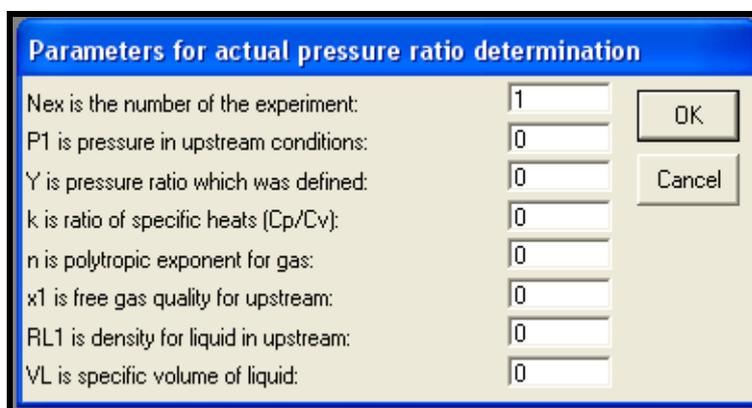
## APÊNDICE B

- Procedimentos para a utilização do programa “PAP-css”.

Quando este programa estiver sendo iniciado, uma parte dos botões do menu principal estará aberto e ativo. Teremos as opções: *[Define parameters by dialogue]*, *[Define parameters by table]*, *[change the full number]*, *[take all from the file]*, *[constant definition cD]* e *[EXIT]* de acordo com a Figura 4.12. Através destes botões podemos selecionar dados de entrada, mudar alguma constante do programa ou sair e finalizar o trabalho. Outros botões serão bloqueados e seu desbloqueio será interligado com o procedimento do programa de trabalho.

Mostraremos as funções de cada botão do menu principal baseado em elementos estruturais do programa que foi apresentado no item 4.4.2.

1) *[Define parameters by dialogue]* - Quando este botão for clicado, a seguinte caixa de diálogo para informar os dados experimentais ou de campo necessários será iniciada:

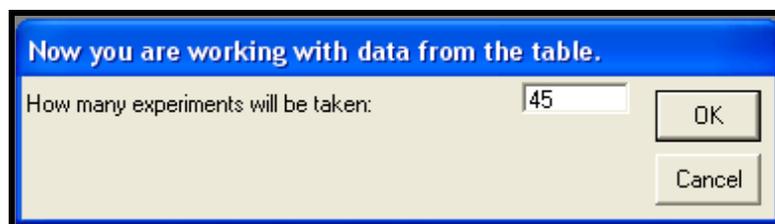


Parameters for actual pressure ratio determination	
Nex is the number of the experiment:	<input type="text" value="1"/>
P1 is pressure in upstream conditions:	<input type="text" value="0"/>
Y is pressure ratio which was defined:	<input type="text" value="0"/>
k is ratio of specific heats (Cp/Cv):	<input type="text" value="0"/>
n is polytropic exponent for gas:	<input type="text" value="0"/>
x1 is free gas quality for upstream:	<input type="text" value="0"/>
RL1 is density for liquid in upstream:	<input type="text" value="0"/>
VL is specific volume of liquid:	<input type="text" value="0"/>

Se nesta caixa de diálogo não estiverem todos os dados definidos ou se for clicado em “Cancel”, o programa não usará este modo de entrada de dados e ele não abrirá as próximas funções.

2) *[Define parameters by table]* - Abaixo deste menu, estão situados os dois seguintes botões:

>[ *change the full number* ] é um botão auxiliar para mudança do número total de experimentos de acordo o arquivo "*prim-dat.txt*" por meio de uma caixa de diálogo simples.

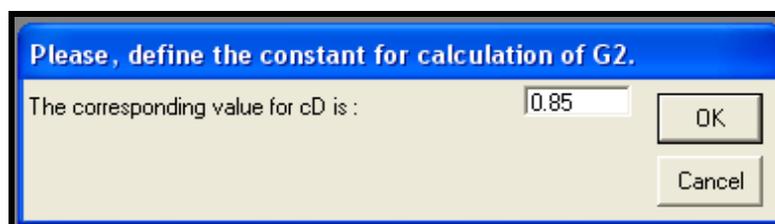


Para esta ação é necessário que o número informado na caixa de diálogo seja menor ou igual ao número total de experimentos do arquivo preparado.

>[*take all from the file*] é um botão utilizado para confirmar que os dados serão totalmente originados do arquivo preparado de acordo com o número de experimentos.

3) [*Calculate pressure ratio*] – Este botão deverá se clicado quando os dados experimentais ou de campo deverão ser avaliados para a determinação dos parâmetros. Abaixo deste menu, estão situados os três seguintes botões:

>[*constant definition cD*] é um botão auxiliar para mudança do valor de coeficiente de descarga ( $C_D$ ) de acordo com a equação 2.4.23 por meio de uma caixa de diálogo simples.



O valor para esta constante será dependente do modelo assumido ou através da análise de erro. Assim, para alguns casos tais mudanças serão úteis.

> [*for all experiments*] é um dos pontos principais. Ao clicar este botão determinamos a solução da equação não linear para cada experimento originado do seu conjunto

de dados completo. Então, este botão será desbloqueado após a leitura dos dados experimentais ou de campo do arquivo "*prim-dat.txt*".

> [*for the fixed experiment*] é um botão de trabalho para identificar um ponto experimental fixo que pode ser dado através da caixa de diálogo (Figura 4.12) ou de um conjunto completo de dados experimentais ou de campo. Cada uma destas possibilidades é determinada através de um dos dois seguintes botões: [*from dialogue data*], sendo os dados originados de algum experimento ou [*from table data*], sendo os dados originados do arquivo "*prim-dat.txt*". Na primeira opção, o botão deverá desbloquear se o tipo correspondente de dados estiver disponível.

4) [*Show calculated & real parameters*] – Este botão é utilizado para a apresentação de resultados. Abaixo deste menu, quando clicado, dois seguintes botões estão situados: [*mass flux on downstream (G2)*], utilizado para a determinação do fluxo mássico a jusante do *choke* e [*for density of mixture (Ro2)*] utilizado para a determinação da massa específica da mistura a jusante do *choke*. Ambos botões dão a possibilidade de visualizar e analisar os resultados que foram gerados para estes parâmetros de um conjunto completo de dados experimentais ou de campo. Assim, estes botões serão desbloqueados quando a função do botão [*for all experiments*] for selecionada anteriormente.



```
DATA Nfr1/1/, Nfr2/2/, Nfr3/3/, Nfr4/4/,
+ XLefH/100./, YLefH/120./
```

```
DATA fname/'prim-dat.txt'/
```

```
ALLOCATE ( FrIn ( 4), stat=ierr ) ! FrIn like a (NNfram) !
```

```
call FrInFRED (FrIn, NNfram) ! To prepare FrIn (see end)
```

```
DATA Xk/1.232/, X1/0.017/, Xn/1.003/, ! test values of parameters for
+ Vg1/1.83078/, VL/0.01818/, Vg2/2.67206/, ! experim. with N=22
+ Yc/0.656/, Nex/22/, cD/.85/,
+ Npar/12/, NNex/45/, maxEx/500/
```

```
ALLOCATE ( Vt ( Npar, maxEx ), stat=ierr )
```

```
ALLOCATE ( RR1( maxEx ), stat=ierr )
```

```
ALLOCATE ( RR2( maxEx ), stat=ierr )
```

```
ALLOCATE ( RRw( maxEx ), stat=ierr )
```

```
iPar = 0
```

```
kSho = 0
```

```
*-----
*'--- main part -----
*-----
```

```
call InkInFREDMenu (1, iPar, kSho, iRetMn)
```

```
1000 continue
```

```
!-Begin a work with the MENU
```

```
call InkInFREDMenu (0, iPar, kSho, iRetMn)
```

```
! for selecting next cases:
```

```
* SELECT CASE (iRetMn)
* =====
```

```
* CASE (100) ! <-- [ Put parameters by dialog.]
* -----
```

```
if (iRetMn.eq.100) then
```

```
call DiaParFRED( 1, XLefH, YLefH, maxEx, NNex, Nex, P1,
```

```
+ Yc, Xk, Xn, X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2,
```

```
+ cD, ierr)
```

```
if (ierr.eq.0) iPar = 1
```

```
endif
```

```

* CASE (201,202)                                ! <-- [ Take from table ]
* -----
if (iRetMn.gt.200.and.iRetMn.lt.209) then
  if (iRetMn.eq.201)                            ! define experiments full numb.
+   call DiaParFRED( 3, XLeFH, YLeFH, maxEx, NNex, Nex, P1,
+   Yc, Xk, Xn, X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2,
+   cD, ierr)

  if (iRetMn.eq.202) then                      ! take parametrs values
    call RTabFDis( fname, Npar, NNex, maxEx, Vt, INDw)

    iPar = 2
  endif
endif

* CASE (301,302,303)                            ! <-- [Calculate pressure ratio]
* -----
if (iRetMn.gt.300.and.iRetMn.lt.309) then
  if (iRetMn.eq.301)                            ! define constant cD for G2
+   call DiaParFRED( 4, XLeFH, YLeFH, maxEx, NNex, Nex, P1,
+   Yc, Xk, Xn, X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2,
+   cD, ierr)

  if (iRetMn.eq.302) then                      ! only calculation of character
    kSho = 0
    do i=1,NNex                                ! for all experiments
      call ParFREDtab( Npar, i, NNex, Vt, P1, Yc, Xk, Xn,
+      X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2, ierr)
      if (ierr.eq.1) EXIT
      call CalculFRED( NNfram, 0, FrIn, Nex, cD, P1, Yc,
+      Xk, Xn, X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2,
+      Ya, INDw)
      ! calcul.needed characteristics
      call CalculFRED2( cD, P1, Yc, Xk, Xn, X1, RL1, VL,
+      Vg1, Vg2, Rm2, Ya, RR1(i), RR2(i))
      kSho = kSho+1
    enddo
  endif

  if (iRetMn.eq.303.or.iRetMn.eq.304) then    ! for the one experiment only
    if (iRetMn.eq.304) then                  ! define the experiment numb.
      call DiaParFRED(2, XLeFH, YLeFH, maxEx, NNex, Nex, P1,
+      Yc, Xk, Xn, X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2,
+      cD, ierr)
      call ParFREDtab( Npar, Nex, NNex, Vt, P1, Yc, Xk, Xn,
+      X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2, ierr)
    endif
  endif
endif

```

```

        call CalculFRED( NNfram, Nfr1, FrIn, Nex, cD, P1, Yc,
+           Xk, Xn, X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2,
+           Ya, INDw)
    endif

endif

*   CASE (401,402)                                     ! <-- [Show calcul.& real param]
*   -----
if (iRetMn.gt.400.and.iRetMn.lt.409) then
    if (iRetMn.eq.401) NpW = 12          !-define N real paramet. for G2
    if (iRetMn.eq.402) NpW = 10

    call FixFREDpar( NpW, Npar, NNex, Vt, RRw, ierr)
    if (ierr.gt.0) goto 1000          ! we had mistake for the param.

c    call RAnalWelD( Npar, NNex, maxEx, Vt)
    if (iRetMn.eq.401) call ShoFREDpar( NNfram, Nfr2, Nfr3, Nfr4,
+           FrIn, 1, NNex, RRw, RR1, INDw)
    if (iRetMn.eq.402) call ShoFREDpar( NNfram, Nfr2, Nfr3, Nfr4,
+           FrIn, 2, NNex, RRw, RR2, INDw)

endif

*   END SELECT
*   =====

if (iRetMn.ne.999) goto 1000                                     !<- came back to UseMenu

call InkInFREDMenu (-1, iPar, kSho, iRetMn)

DEALLOCATE ( RRw )
DEALLOCATE ( RR2 )
DEALLOCATE ( RR1 )
DEALLOCATE ( Vt )

DEALLOCATE ( FrIn )

return
end
C
    subroutine InkInFREDMenu (iWork, iPar, kSho, iRetMn)
*
*   *****
*   Procedure for creation and rule of the program main menu by follow.
*   parameters:
*

```

```

* iWork- kind of work: 1-creation of head menu, 0-work with this menu
* and rule of its functions (close/open), -1 - close all menu
* iPar - definition a kind of parameters: 0- parameters is absent;
* 1- parameters from dialogue; 1- parameters from the file
* kSho - 1- open the function of presentation for results
* iRetMn-number of head menu point for a work
*****
*
      INCLUDE 'nts.fd'

      integer iWork, iPar, kSho, iRetMn

!---- Internal parameters -----

      integer  MainMenu, MnParTab, MnCalPre, MnFixEx, MnShoPar

*===== To make initial head menu:

      if (iWork.eq.1) then

*
      ----- The first level menu for table parameters (MnParTab)

      MnParTab = MenuPopupCreate()
      idummy = MenuAddItem( MnParTab, 'change the full number ',
+      MIITEM+MIENABLE,          201,
+      ' )
      idummy = MenuAddItem( MnParTab, 'take all from the file ',
+      MIITEM+MIENABLE,          202,
+      ' )

*
      ----- The Second level menu for the fixed experiment (MnFixEx).

      MnFixEx = MenuPopupCreate()
      idummy = MenuAddItem( MnFixEx, 'from dialogue data',
+      MIITEM+MIDISABLE,          303,
+      ' )
      idummy = MenuAddItem( MnFixEx, 'from table data ',
+      MIITEM+MIDISABLE,          304,
+      ' )

*
      ----- The first level menu for pressure ratio calculation (MnCalPre)

      MnCalPre = MenuPopupCreate()
      idummy = MenuAddItem( MnCalPre, 'constant definition cD ',
+      MIITEM+MIENABLE,          301,
+      ' )

```

```

    idummy = MenuAddItem( MnCalPre, 'for all experiments  ',
+       MIITEM+MIDISABLE,          302,
+       ' )
    idummy = MenuAddItem( MnCalPre, 'for the fixed experiment',
+       MIPOPUP,                    MnFixEx,
+       ' )

*   ----- The first level menu for present. all character. (MnShoPar)

    MnShoPar = MenuPopupCreate()                                !<<-The first lev.
    idummy = MenuAddItem( MnShoPar,'mass flux on downstream (G2)',
+       MIITEM+MIDISABLE,          401,
+       ' )
    idummy = MenuAddItem( MnShoPar,'for density of mixture (Ro2)',
+       MIITEM+MIDISABLE,          402,
+       ' )

*   ----- Zero-level MAIN menu:
    MainMenu = MenuCreate()
    idummy = MenuAddItem( MainMenu,
+       ' [Define parameters by dialogue] ',
+       MIITEM+MIENABLE,          100,
+       'Give values of parameters by dialogue.')
    idummy = MenuAddItem( MainMenu,
+       ' [Define parameters by table  ] ',
+       MIPOPUP,                    MnParTab,
+       'Take values of parameters from table.')
    idummy = MenuAddItem( MainMenu, '[Calculate pressure ratio]',
+       MIPOPUP,                    MnCalPre,
+       'Calculate the corresponding value or values by parameters.')
    idummy = MenuAddItem( MainMenu, '[Show calculated & real parameters]',
+       MIPOPUP,                    MnShoPar,
+       'Show calculated characteristics.')
    idummy = MenuAddItem( MainMenu, ' [ EXIT ] ',
+       MIITEM,                      999,
+       'You will leave the program.')

                                !<- show menu on display
    idummy = ShowMenu(MainMenu,
+       'The program of parameters analysis and prediction '//
+       'into critical-subcritical situations (PAP-css)')
*"   ~~~~~~

endif

*===== To WORK with HEAD MENU points (MENU RULED):

```

```

if (iWork.eq.0) then
    idummy = MenuGetItemStatus(MainMenu, 302)          !<- Part of menu "for all exper
    point:Calculation                                  !-
    if (idummy.eq.MIENABLE.and.iPar.eq.0)             ! open > close
    +   idummy = MenuItemEnable(MainMenu, 302, MIDISABLE)
    if (idummy.eq.MIDISABLE.and.iPar.eq.2)           ! close > open
    +   idummy = MenuItemEnable(MainMenu, 302, MIENABLE)
    idummy = MenuGetItemStatus(MainMenu, 303)          !<- Part of menu "from dialogue
    point:Calculation                                  !-
    if (idummy.eq.MIENABLE.and.iPar.eq.0)             ! open > close
    +   idummy = MenuItemEnable(MainMenu, 303, MIDISABLE)
    if (idummy.eq.MIDISABLE.and.iPar.eq.1)           ! close > open
    +   idummy = MenuItemEnable(MainMenu, 303, MIENABLE)
    idummy = MenuGetItemStatus(MainMenu, 304)          !<- Part of menu "from table
    point:Calculation                                  !-
    if (idummy.eq.MIENABLE.and.iPar.eq.0)             ! open > close
    +   idummy = MenuItemEnable(MainMenu, 304, MIDISABLE)
    if (idummy.eq.MIDISABLE.and.iPar.eq.2)           ! close > open
    +   idummy = MenuItemEnable(MainMenu, 304, MIENABLE)
    idummy = MenuGetItemStatus(MainMenu, 401)          !<- Part of menu "Show G2.
    point:Calculation                                  !-
    if (idummy.eq.MIENABLE.and.kSho.eq.0)             ! open > close
    +   idummy = MenuItemEnable(MainMenu, 401, MIDISABLE)
    if (idummy.eq.MIDISABLE.and.kSho.gt.1)           ! close > open
    +   idummy = MenuItemEnable(MainMenu, 401, MIENABLE)
    idummy = MenuGetItemStatus(MainMenu, 402)          !<- Part of menu "Show Ro2.
    point:Calculation                                  !-
    if (idummy.eq.MIENABLE.and.kSho.eq.0)             ! open > close
    +   idummy = MenuItemEnable(MainMenu, 402, MIDISABLE)
    if (idummy.eq.MIDISABLE.and.kSho.gt.1)           ! close > open
    +   idummy = MenuItemEnable(MainMenu, 402, MIENABLE)

```

```

iRetMn = UseMenu(MainMenu)          !<- define a main menu point
*" ~~~~~~

```

```
endif
```

```
*===== To delete head menu and open frames:
```

```

if (iWork.eq.-1) then
    idummy = MenuDelete(MainMenu)          !<- delete menu on display

```

```

*" ~~~~~~
endif

end

C
  subroutine FrInFRED (FrIn, NNfram)
*
*****
* Auxiliary procedure for frame information preparing. This information
* will be created into the subroutine through a DATA with old dimens.
* IFRall, IC, Areall.
* (!) Very important to have a size NNfram for these dimension
* FrIn - structure with full information about frames (see parmo2d.fd)
* NNfram-general number frames for this program and (!) the size FrIn
*****
*
    include 'parmo2d.fd'

    RECORD /FramInf/ FrIn (4)

    integer NNfram, i,
+      IC(8,4), IFRall(4,4)           ! colours and position,
    real    Areall(8,4)              ! 8 area parameters.

    NNfram = 4                       ! full number of frames
    DATA IC/ 16,8,16,1,4,1,10,4,
+      16,1,16,1,4,1,10,4,
+      16,1,16,1,4,1,10,4,
+      16,1,16,1,4,1,10,4/,
+      IFRall/ 5, 200, 10, 140,
+      95, 150, 60, 120,
+      100, 150, 30, 120,
+      10, 150, 25, 160/,
+      Areall/0.,0.,0., 0.,0.,0.,0.,0.,
+      0.,0.,0., 0.,0.,0.,0.,0.,
+      0.,0.,0., 0.,0.,0.,0.,0.,
+      0.,0.,0., 0.,0.,0.,0.,0./

    do i=1,NNfram
      FrIn(i).IF1 = IFRall(1,i) ! beginning by x
      FrIn(i).IF2 = IFRall(2,i) ! length by x
      FrIn(i).IF3 = IFRall(3,i) ! beginning by y
      FrIn(i).IF4 = IFRall(4,i) ! length by y
      FrIn(i).IC1 = IC(1,i)    ! line around or background for frame
      FrIn(i).IC2 = IC(2,i)    ! axes
      FrIn(i).IC3 = IC(3,i)    ! area
      FrIn(i).IC4 = IC(4,i)    ! sign of the area
      FrIn(i).IC5 = IC(5,i)    ! triangle or main figure (point/line)
      FrIn(i).IC6 = IC(6,i)    ! line of based model
    enddo
  endsubroutine

```

```

    FrIn(i).IC7 = IC(7,i)    ! line of work boundary
    FrIn(i).IC8 = IC(8,i)    ! for interpolation points
    FrIn(i).AR1 = Areall(1,i) ! beginning value by x (XH)
    FrIn(i).AR2 = Areall(2,i) ! final value by x (XK)
    FrIn(i).AR3 = Areall(3,i) ! beginning value by z (ZH)
    FrIn(i).AR4 = Areall(4,i) ! final value by z (ZK)
    FrIn(i).PA1 = Areall(5,i) ! coordinat.beginning by x (CX0)
    FrIn(i).PA2 = Areall(6,i) ! coordinat.beginning by z (CZ0)
    FrIn(i).PA3 = Areall(7,i) ! scale by x (DXS)
    FrIn(i).PA4 = Areall(8,i) ! scale by z (DZS)
enddo

end

C
  subroutine CalculFRED( NNfr, NfrP, FrIn, Nex, cD, P1, Yc,
+                      Xk, Xn, X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2,
+                      Ya, INDw)
*
*****
* The special program for determination of nonlinear equation solution
* It provides a value  $y=P2/P1$  by wells parameters which were got in
* real drilling experiments. The corresponding value  $y$  will be used
* for definition of critical-subcritical boundary in the main model.
* The program parameters are:
* NNfr- general numbers of windows (size for struc.FrIn)
* NfrP- number of window for result presentation (if 0, then not show)
* FrIn- full information about frames (see parmo2d.fd)
* Nex - is number of the experiment for presented data
* cD - is the constant for calculation of G2 (it is defined in SU)
* P1 - is the pressure in upstream conditions
* Yc - is the result of determination of pressure ratio by well data
* Xk - parameter k is ratio of specific heats ( $C_p/C_v$ )
* Xn - parameter n is polytropic exponent for gas
* X1 - parameter  $\delta_1$  is free gas quality for upstream conditions
* RL1 - is the density for liquid in upstream
* VL - is specific volume of liquid
* Vg1 - is specific volume of upstream gas
* Vg2 - is specific volume of downstream gas
* Rm2 - is the density for mixture in downstream
* Ya - is the result of nonlinear equation solution:actual pres.ratio
* INDw- index of finish for the program (equal 1, if all are OK, and
* equal 0, if the program had problems with the solution)
*****
*
  INCLUDE 'nts.fd'
  include 'parmo2d.fd'

  RECORD /FramInf/ FrIn (NNfr)

  integer NNfr, NfrP, Nex, INDw

```

```

      real  cD, P1, Yc, Xk, Xn, X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2,
+        Ya

!---- Internal parameters -----

      integer i, j, j1, NNp, ierr,
+       IFRAM0(3,2)

      real   Yw, Yw0, sYw, xK1, Fm1, Fm2, Fm3, G2, Ro2,
+       ss, ss0, ss1, ReaDat(1),
+       GRAF [ALLOCATABLE] (:,:)

      integer ICare(5), IFRare(3,2),
+       INDa(8),
+       ICsign
      real   AreIn(4), ParIn(4),
+       xMaxWi, yMaxWi, dxMar, dyMar

      integer iExstWin, iDelWin, iCrtWin,
+       iGetWin, nOK, NumPW

      character*2 namBox, namRea(4), MnHel0(4)
      character*48  TEXf
      character*8   NAMEAX(2)
      character*2  pLayer(4), pNam
      character*36  TexWin
      character*3   NAMEST(10)
      character*15  TexEx
      character*5   BUFF

      logical ExWin

      DATA NNp/100/,
+       Yw0/.0/, sYw/.01/

      DATA IFRare/ 1, 240, 0,
+       1, 180, 0/,
+       IFRAM0/205, 43,0,
+       60, 85,0/,
+       INDa/ 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0/,
+       ICsign/10/, ICprim/15/,
+       xMaxWi/250./, yMaxWi/182./,
+       TEXf/'Values of norming function for the equation (2).'/,
+       NAMEST/'Yc ',k ',n ',x1 ',VL ',Vg1',Vg2',
+       'Ya ',G2 ',Ro2'/,
+       TexEx/'Experiment N '/,
+       NAMEAX/'Y(P2/P1)',Values '/

functional
! - windows for a work
! For area definition
! and number presentation
! (look on display)
! for a good picture
!- number of colour levers
! axis name for 1D-

```

```

INDw = 0

ALLOCATE ( GRAF( 2, NNp), stat=ierr )           ! for function calculation

call nonLeqS( NNp, Yw0, sYw, Xk, Xn, X1,       !-nonlinear equation
solution
+      VL, Vg1, Vg2, GRAF, xK1, Fm1, Fm2, Ya)

if (NfrP.eq.0) then
  DEALLOCATE ( GRAF )
  RETURN
endif

do i=1,NNp
  Yw = Yw0+(i-1)*sYw-Ya
  GRAF(2,i) = Fm2*Yw+Fm1*Yw**2+xK1*Yw**3
  if (i.eq.1) Fm3 = ABS(GRAF(2,1))
  if (i.gt.1.and.Fm3.lt.ABS(GRAF(2,i))) Fm3 = ABS(GRAF(2,i))
enddo
do i=1,NNp
  GRAF(2,i) = GRAF(2,i)/Fm3
enddo

!---- To show result -----

nOK = iExstWin (NfrP, ExWin)
if (ExWin) nOK = iDelWin (NfrP)

prese.
call PreFrInf ( 2, NNfr, NfrP, FrIn, 5,       ! colours
+      IFRare, ICare, AreIn, ParIn, i)
write (BUFF,'(i3)') NfrP
TexWin = 'The calculated function. Frame N '
TexWin(1:36) = TexWin(1:33)//BUFF(1:3)
nOK = iCrtWin (NfrP, NumPW,
+      1.*FrIn(NfrP).IF1, 1.*FrIn(NfrP).IF3,
+      1.*FrIn(NfrP).IF2, 1.*FrIn(NfrP).IF4,
+      4, TexWin)

AreIn(1) = GRAF(1,1)
AreIn(2) = GRAF(1,NNp)
AreIn(3) = -1.
AreIn(4) = 1.

call DefAre2D( INDa, 1, ICare, TEXf, 40,

```

```

+      0.0, IFRare, xMaxWi, yMaxWi,
+      10., 100., namBox, namRea, MnHel0, 3,
+      NAMEAX, dxMar, dyMar, AreIn, ParIn, ierr)

call PreFrInf ( -234, NNfr, NfrP, FrIn, 5,
+      IFRare, ICare, AreIn, ParIn, i)
! <-keep for next work
! colours,area,param

call PreGraf(ICsign, 0, NNp, NNp, GRAF,
+      ParIn(1),ParIn(2),ParIn(3),ParIn(4),i)
!- Show function

call ArLinX( Ya, ICsign, 1, AreIn, ParIn)
call ArLinX( Yc, ICprim, 1, AreIn, ParIn)

call CalculFRED2( cD, P1, Yc, Xk, Xn, X1, RL1, VL,
+      Vg1, Vg2, Rm2, Ya, G2, Ro2)
! calcul.needed param

write (BUFF,'(i3)') Nex
TexEx(1:15) = TexEx(1:12)//BUFF(1:3)
Nsym = 3
Nnum = 16
NeleX= 1
NeleY= 10
IWfra= 7
xLet = 2.
yLet = 4.

call RISTabl( IFRAM0,16,1, IWfra, 8, TexEx,
+      15, Nsym, Nnum, NeleX, NeleY, xLet, yLet,
+      dx, dy, ierr)
do i=1,NeleY
  if (i.eq.1) ReaDat(1) = Yc
  if (i.eq.2) ReaDat(1) = Xk
  if (i.eq.3) ReaDat(1) = Xn
  if (i.eq.4) ReaDat(1) = X1
  if (i.eq.5) ReaDat(1) = VL
  if (i.eq.6) ReaDat(1) = Vg1
  if (i.eq.7) ReaDat(1) = Vg2
  if (i.eq.8) ReaDat(1) = Ya
  if (i.eq.9) ReaDat(1) = G2
  if (i.eq.10) ReaDat(1) = Ro2
  call ShoTabl( i, 10, 1, IWfra, Nsym, Nnum,
+      NeleX, NeleY, NAMEST(i), IntDat, ReaDat, NAMEST,
+      1.*IFRAM0(1,1), 1.*IFRAM0(1,2), xLet, yLet, dx, dy)
enddo

DEALLOCATE ( GRAF )

```



```

*
*****
* Procedure for values parameters selection by number Nex from general
* set of values (primary table), which were taken from file on disk.
* The procedure's parameters:
* Npar- number of taken parameters into dim.Vt (is equal colums number
* Nex - number of selected experiment (the table row with param.values
* NNex- full number of experiments which were taken from file on disk.
* Vt - dim.(Npar, maxEx) is readed data in form of matrix
* P1 - is the pressure in upstream conditions
* Yc - is the result of determination of pressure ratio by well data
* Xk - parameter k is ratio of specific heats (Cp/Cv)
* Xn - parameter n is polytropic exponent for gas
* X1 - parameter  $\delta_1$  is free gas quality for upstream conditions
* RL1 - is the density for liquid in upstream
* VL - is specific volume of liquid
* Vg1 - is specific volume of upstream gas
* Vg2 - is specific volume of downstream gas
* Rm2 - is the density for mixture in downstream
* ierr- information about data selection: 1- had a mistake, 0- without
* any mistake
*****
*

```

integer Npar, Nex, NNex, ierr

real P1, Yc, Xk, Xn, X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2,  
+ Vt(Npar,NNex)

ierr = 0

```

if (Nex.gt.NNex) then
  ierr = 1
  RETURN
endif

```

!- mistake

!<= Without WORK

```

P1 = Vt(1,Nex)
Yc = Vt(2,Nex)
Xk = Vt(3,Nex)
Xn = Vt(4,Nex)
X1 = Vt(5,Nex)
RL1 = Vt(6,Nex)
VL = Vt(7,Nex)
Vg1 = Vt(8,Nex)
Vg2 = Vt(9,Nex)
Rm2 = Vt(10,Nex)

```

end

C

```

subroutine FixFREDpar( NpW, Npar, NNex, Vt, Pw, ierr)
*
*
*****
* Auxiliary procedure for selection of all values of fixed parameter
* with the number NpW from general set of values (primary table).
* The procedure's parameters:
* NpW - the number of fixed parameter for values selection
* Npar- number of taken parameters into dim.Vt (is equal columns number
* NNex- full number of experiments which were taken from file on disk.
* Vt - dim.(Npar, maxEx) is readed data in form of matrix
* Pw - the full set of values of fixed parameter for all experiments
* ierr- information about data selection: 1- had a mistake, 0- without
* any mistake
*****
*

integer NpW, Npar, NNex, ierr,
+ i

real Pw(NNex), Vt(Npar,NNex)

ierr = 0

if (NpW.gt.Npar) then
ierr = 1
call MsgBox('In sub.FixFREDpar the number of parameter '//
+ 'is begger than possible. Therefore this '//
+ ' procedure does not work!', 35, 60.,100.)
RETURN !<= Without WORK
endif

do i=1,NNex
Pw(i) = Vt(NpW,i)
enddo

end
C
subroutine DiaParFRED( It, XLeFH, YLeFH, maxEx, NNex, Nex, P1,
+ Yc, Xk, Xn, X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2,
+ cD, ierr)
*
*
*****
* Procedure for all dialogues creation which can be used into the main
* program of parameters analysis and prediction into critical-subcrit.
* situations. The procedure will be ruled by the special parameter It.
* The procedure's parameters:
* It - define a dialogue type: 1- main dialogue for values definition
* 2- the number of selected experiment (line from primary table)
* 3- full number of readed experiments; 4- the value of cD
*****

```

```

* XLefH,YLefH-coordinates for the left up corner for dialogue location      *
*   on display area.                                                         *
* Nex - is number of the experiment for presented data                       *
* NNex- is the full number of the experiment from the fixed data table      *
* P1 - is the pressure in upstream conditions                                *
* Yc - is the result of determination of pressure ratio by well data        *
* Xk - parameter k is ratio of specific heats (Cp/Cv)                       *
* Xn - parameter n is polytropic exponent for gas                           *
* X1 - parameter  $\bar{\alpha}_1$  is free gas quality for upstream conditions    *
* RL1 - is the density for liquid in upstream                               *
* VL - is specific volume of liquid                                         *
* Vg1 - is specific volume of upstream gas                                   *
* Vg2 - is specific volume of downstream gas                                 *
* Rm2 - is the density for mixture in downstream                            *
* cD - is the constant for calculation of G2 (it is defined in SU)          *
* ierr- information about data selection: 1- had a mistake, 0- without      *
*   any mistake                                                               *
*****
*

```

```
integer It, maxEx, Nex, ierr
```

```
real XLefH, YLefH, P1, Yc, Xk, Xn, X1, RL1, VL, Vg1, Vg2, Rm2,
+ cD
```

```
!---- Internal parameters -----
```

```
real ss, DEPS
```

```

!-----
character*50 namBo1, namBo2, namBo3          ! Names of dialogue boxes
character*41 namIn1(1), namRe1(10), namRe4,  ! and names of parameters
+ namInW(1), namIn2, namIn3                 ! for transform. & filtering
character*2 ChaDat(1), namCha(1),           ! <- Nonentity
+ ReaCom(10)                                ! and for comments too.
integer IntDat(1), iEXIT, iCONS            ! Values of parameters into
real ReaDat(10)                             !-----

```

```
* --- Data for the procedure work
```

```

DATA namBo1/'Parameters for actual pressure ratio determination'/,
+ namBo2/'Now you are working with data from the table.  '/,
+ namBo3/'Please, define the constant for calculation of G2.'/,
+ namIn1/'Nex is the number of the experiment:  '/,
+ namIn2/'Please, define the number of experiment: '/,
+ namIn3/'How many experiments will be taken:  '/,
+ namRe4/'The corresponding value for cD is :  '/,
+ namRe1/'P1 is pressure in upstream conditions:  ',
+ 'Y is pressure ratio which was defined:  ',
+ 'k is ratio of specific heats (Cp/Cv):  ',

```





```

30  ReaDat(1) = cD
    namInW(1) = namRe4

31  call ShoDiaBox(XLefH, YLefH, 50,41,9, namBo3,      ! <- Box creating
+      0, namCha, ChaDat, ReaCom,
+      0, namIn1, IntDat, ReaCom,
+      1, namInW, ReaDat, ReaCom, 0, iEXIT, iCONS)

    if (iCONS.eq.1) RETURN                          !<- Press "Consel"- without work

    cD   = ReaDat(1)

99  INDw = 1

    end
C
  subroutine ShoFREDpar( NNfr, NfrS, NfrD, NfrR, FrIn, Ip, NNex,
+      Pw, Pc, INDw)
*
* *****
* The special program for presentation calculated and observed values
* of the fixed parameter for two cases (at present time): G2 and Ro2
* The program parameters are:
* NNfr- general numbers of windows (size for struc.FrIn)
* NfrS- number of window for presentation of parameters values
* NfrD- number of window for presentation of difference between values
* NfrR- number of window for present. (G2obs,G2cal) or (Ro2obs,Ro2cal)
* FrIn- full information about frames (see parmo2d.fd)
* Ip - index of presented parameters: 1-G2, 2-Ro2, ...
* NNex- is the full number of the experiment from the fixed data table
* Pw - the full set of values of fixed parameter for all experiments
* Pc - the full set of calculated values for this parameter for all
* experiments
* INDw- index of finish for the program (equal 1, if all are OK, and
* equal 0, if the program had problems with the solution)
* *****
*
  INCLUDE 'nts.fd'
  include 'parmo2d.fd'

  RECORD /FramInf/ FrIn (NNfr)

  integer NNfr, NfrS, NfrD, NfrR, Ip, NNex, INDw

  real Pw(NNex), Pc(NNex)

!---- Internal parameters -----

  integer i, ierr, ICg1, ICg2, ICg3

```

```

    real    Fm, Fmi1, Fmi2, Fma1, Fma2, C0, C1, C2, Rxy, Rxy2,
+    GRAF1 [ALLOCATABLE] (:,:),
+    GRAF2 [ALLOCATABLE] (:,:),
+    GRAF [ALLOCATABLE] (:,:)

    integer ICare(5), IFRare(3,2),                ! - frame and colour area
+    INDa(8)
    real    AreIn(4), ParIn(4),                  ! - windows for a work
+    xMaxWi, yMaxWi, dxMar, dyMar

    integer iExstWin, iDelWin, iCrtWin,
+    iGetWin, nOK, NumPW

    character*2 namBox, namRea(4), MnHel0(4)      ! For area definition
    character*50 TEXfw, TEXf1, TEXf2, TEXf3,      ! and sign areas
+    TEXf4
    character*62 TEXfr
    character*8 Txy, NAMEAX(2), NAMspe(2), NAMs1(2), NAMs2(2)
    character*52 TexWin
    character*5  BUFF                            ! and number presentation

    logical ExWin

    DATA NNp/100/,
+    Yw0/.0/, sYw/.01/

    DATA IFRare/ 1, 240, 0,
+    1, 180, 0/,
+    INDa/ 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0/,
+    ICg1/10/, ICg2/15/, ICg3/10/,
+    xMaxWi/250./, yMaxWi/182./,
+    TEXf1/'Values of parameter G2 (observed and calculated). '/,
+    TEXf2/'Values of parameter Ro2 (observed and calculated).'/,
+    TEXf3/'Difference between observed and calculated values.'/,
+    TEXf4/'The ratio between observed and calculated values. '/,
+    NAMs1/'G2 (obs)', 'G2 (cal)'/,                ! axis name for special G2
+    NAMs2/'Ro2(obs)', 'Ro2(cal)'/,                ! axis name for special
Ro2
+    NAMEAX/'N exper.', 'Values '/,                ! axis name for 1D-functional
+    Txy/'Rxy = 0,/'

    if (Ip.eq.1) NAMspe = NAMs1
    if (Ip.eq.2) NAMspe = NAMs2

    INDw = 0

```

!---- To create three windows for presentation -----

```

nOK = iExstWin (NfrD, ExWin)
! îêî ñ ïîãðî "NfrS"
if (ExWin) nOK = iDelWin (NfrD)
! <-define for display

prese.
call PreFrInf ( 2, NNfr, NfrD, FrIn, 5,
+         IFRare, ICare, AreIn, ParIn, i)
! colours
write (BUFF,'(i3)') NfrD
TexWin = 'The presented values of fixed parameter. Frame N '
TexWin(1:52) = TexWin(1:49)//BUFF(1:3)
nOK = iCrtWin (NfrD, NumPW,
+         1.*FrIn(NfrD).IF1, 1.*FrIn(NfrD).IF3,
+         1.*FrIn(NfrD).IF2, 1.*FrIn(NfrD).IF4,
+         4, TexWin)

nOK = iExstWin (NfrS, ExWin)
if (ExWin) nOK = iDelWin (NfrS)
! <-define for display

prese.
write (BUFF,'(i3)') NfrS
TexWin = 'The presented values of fixed parameter. Frame N '
TexWin(1:52) = TexWin(1:49)//BUFF(1:3)
nOK = iCrtWin (NfrS, NumPW,
+         1.*FrIn(NfrS).IF1, 1.*FrIn(NfrS).IF3,
+         1.*FrIn(NfrS).IF2, 1.*FrIn(NfrS).IF4,
+         4, TexWin)

nOK = iExstWin (NfrR, ExWin)
if (ExWin) nOK = iDelWin (NfrR)
! <-define for display

prese.
write (BUFF,'(i3)') NfrR
TexWin = 'The special presentation of results. Frame N '
TexWin(1:52) = TexWin(1:49)//BUFF(1:3)
nOK = iCrtWin (NfrR, NumPW,
+         1.*FrIn(NfrR).IF1, 1.*FrIn(NfrR).IF3,
+         1.*FrIn(NfrR).IF2, 1.*FrIn(NfrR).IF4,
+         4, TexWin)

ALLOCATE ( GRAF1( 2, NNex), stat=ierr )
! for real values
presentation
ALLOCATE ( GRAF2( 2, NNex), stat=ierr )
! for calculated values
present
ALLOCATE ( GRAF ( 2, NNex), stat=ierr )

!---- To show values and its differences -----

do i=1,NNex
  GRAF1(1,i) = 1.*i

```

```

    GRAF2(1,i) = 1.*i
    GRAF1(2,i) = Pw(i)
    GRAF2(2,i) = Pc(i)
    if (i.eq.1) Fm = ABS(GRAF1(2,1))
    if (i.eq.1.and.Fm.lt.ABS(GRAF2(2,1))) Fm = ABS(GRAF2(2,1))
    if (i.gt.1.and.(Fm.lt.ABS(GRAF1(2,i)).or.
+   Fm.lt.ABS(GRAF2(2,i)))) then
        Fm = ABS(GRAF1(2,i))
        if (Fm.lt.ABS(GRAF2(2,i))) Fm = ABS(GRAF2(2,i))
    endif
enddo

nOK = iGetWin (NfrS, NumPW)           ! take the frame for
inform.                               ! with number "NfrS"

AreIn(1) = GRAF1(1,1)
AreIn(2) = GRAF1(1,NNex)
AreIn(3) = 0.
AreIn(4) = Fm
if (Ip.eq.1) TEXfw = TEXf1
if (Ip.eq.2) TEXfw = TEXf2

call DefAre2D( INDa, 1, ICare, TEXfw, 40,
+   0.0, IFRare, xMaxWi, yMaxWi,
+   10., 100., namBox, namRea, MnHel0, 3,
+   NAMEAX, dxMar, dyMar, AreIn, ParIn, ierr)

GRAF = GRAF1
call PreGraf(ICg1, 15, NNex, NNex, GRAF,           !- Show values with line
+   ParIn(1),ParIn(2),ParIn(3),ParIn(4),i)
call PreGraf(ICg1, 0, NNex, NNex, GRAF1,
+   ParIn(1),ParIn(2),ParIn(3),ParIn(4),i)

GRAF = GRAF2
call PreGraf(ICg2, 15, NNex, NNex, GRAF,           !- Show values with line
+   ParIn(1),ParIn(2),ParIn(3),ParIn(4),i)
call PreGraf(ICg2, 0, NNex, NNex, GRAF2,
+   ParIn(1),ParIn(2),ParIn(3),ParIn(4),i)

nOK = iGetWin (NfrD, NumPW)           ! take the frame for
inform.                               ! with number "NfrD"

do i=1,NNex
    GRAF1(1,i) = 1.*i
    GRAF1(2,i) = Pw(i)-Pc(i)
    if (i.eq.1) Fm = ABS(GRAF1(2,1))
    if (i.gt.1.and.Fm.lt.ABS(GRAF1(2,i))) Fm = ABS(GRAF1(2,i))
enddo

```

```
AreIn(3) = -Fm
AreIn(4) = Fm
```

```
call DefAre2D( INDa, 1, ICare, TEXf3, 40,
+           0.0, IFRare, xMaxWi, yMaxWi,
+           10., 100., namBox, namRea, MnHel0, 3,
+           NAMEAX, dxMar, dyMar, AreIn, ParIn, ierr)
```

```
GRAF = GRAF1
```

```
call PreGraf(ICg3, 15, NNex, NNex, GRAF,
+           ParIn(1),ParIn(2),ParIn(3),ParIn(4),i)
call PreGraf(ICg3, 0, NNex, NNex, GRAF1,
+           ParIn(1),ParIn(2),ParIn(3),ParIn(4),i)
```

```
!- Show values with line
```

```
!---- To show special window with (G2obs,G2cal) or (Ro2obs,Ro2cal) -----
```

```
Fmi1 = ABS(Pw(1))
Fmi2 = ABS(Pc(1))
Fma1 = Fmi1
Fma2 = Fmi2
do i=1,NNex
  GRAF(1,i) = Pw(i)
  GRAF(2,i) = Pc(i)
  if (i.gt.1) then
    if (Fmi1.gt.ABS(GRAF(1,i))) Fmi1 = ABS(GRAF(1,i))
    if (Fma1.lt.ABS(GRAF(1,i))) Fma1 = ABS(GRAF(1,i))
    if (Fmi2.gt.ABS(GRAF(2,i))) Fmi2 = ABS(GRAF(2,i))
    if (Fma2.lt.ABS(GRAF(2,i))) Fma2 = ABS(GRAF(2,i))
  endif
enddo
Fm = Fma1
if (Fm.lt.Fma2) Fm = Fma2
```

```
nOK = iGetWin (NfrR, NumPW)
inform.
```

```
! take the frame for
```

```
call EstCorCf(1, NNex, Pw, Pc, C0, C1, Rxy, ierr)
```

```
! with number "NfrR"
!- sample correl.Rxy
```

```
i = NINT(Rxy*10000)
write (BUFF,'(i4)') i
TEXfr(1:58) = TEXf4(1:50)//Txy(1:8)
TEXfr(1:62) = TEXfr(1:58)//BUFF(1:4)
```

```
! text with Rxy
```

```
AreIn(1) = 0.
AreIn(2) = Fm
AreIn(3) = 0.
AreIn(4) = Fm
```

```
call DefAre2D( INDa, 1, ICare, TEXf4, 40,
```

```

+      0.0, IFRare, xMaxWi, yMaxWi,
+      10., 100., namBox, namRea, MnHel0, 3,
+      NAMspe, dxMar, dyMar, AreIn, ParIn, ierr)

call PreGraf(ICg3, 15, NNex, NNex, GRAF,
+      ParIn(1),ParIn(2),ParIn(3),ParIn(4),i)           !- Show values with line

call EstPol2( 1, NNex, Pw, Pc, C0, C1, C2, ierr)       !- line estimation

if (ierr.gt.0) goto 999                                ! line was not estim.

do i=1,2
  GRAF(1,i) = Fmi1
  if (i.eq.2) GRAF(1,i) = Fma1
  GRAF(2,i) = C0+C1*GRAF(1,i)
enddo

call PreGraf(ICg2, -5, 2, 2, GRAF,
+      ParIn(1),ParIn(2),ParIn(3),ParIn(4),i)           !- Show line

call EstCorCf(1, NNex, Pw, Pc, C0, C1, Rxy2, ierr)     !- coef.of deter.R2xy

999 continue
DEALLOCATE ( GRAF )
DEALLOCATE ( GRAF2 )
DEALLOCATE ( GRAF1 )

INDw = 1

end

```

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Safran, E.M.,SPE, Kuwait University; Kelkar M., SPE, University of Tulsa, 2007, *Predictions of two-phase critical flow boundary and mass flow rate across choke*, SPE 109243.

Baker, O., 1954, *Simultaneous Flow of Oil and Gas*, Oil and Gas Journal.

Beges, H. D., 2000, *Production Optimization Using Nodal Analysis*, Oil and Gas Consultants International, University of Tulsa.

Carey, V. P., 1992, *An introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfer Equipment*, University of California at Berkeley.

Chisholm, D., 1967, *Pressure gradients during the flow of incompressible two-phase mixtures through pipes, venturis and orifice plates*, British Chemical Engineering.

Gilbert, W.E., 1954, *Flowing and Gas-Lift Well Performance*, American Petroleum Institute.

Gragg, W., Stewart G., 1976, *A stable variant of the secant method for solving nonlinear equations*, SIAM : Journal of Numerical Analysis.

Griffith, P., 1984, *Multiphase Flow in Pipes*, Journal of petroleum technology.

Guiteras, O.H.J., 2003, *Metodologia de Análise Global para o Desenvolvimento de um Campo de Gás Natural*, PUC : Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro.

Hewitt, G. F. e Roberts, D. N., 1969, *Studies of Two-Phase Flow Patterns*, Investigation of Interfacial Phenomena in Annular Two-Phase-Flow by Means of the Axial View Technique.

Hildebrand, F.,1965, *Methods of applied mathematics*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Oliveira, L.G.O., 2007, *Medição da vazão de escoamento ar-água utilizando venturi ou placa de orifício associados a um sensor de fração de vazão com campo elétrico girante*, Prêmio Petrobrás de Tecnologia – 4ª edição.

Omana, R.; Houssirere, C. Jr.; Brown, K. E.; Brill, J. P.; Thompson, R. E.,1969, *Multiphase Flow Through Chokes*, SPE 2682, Dallas, Texas.

Ortega, J. M.; Rheinboldt, W. C., 1970, *Iterative solution of nonlinear equations in several variables*, New York: Academic Press.

Perkins, T.K., 1993, *Critical and subcritical flow of multiphase mixtures through chokes*, Arco E & P Technology, SPE 20633.

Ros, N.C.J., 1960, *An analysis of critical simultaneous gas-liquid flow through a restriction and its application to flow metering*, Appl. Sci. Res.

Sachdeva, R.; Schmidt, Z.; Brill, J. P.; Blais, R. M., 1986, *Two-Phase Flow Through Choke*, University of Tulsa, SPE 15657.

Santos, O.M.; Silva, P.D.A.; Furtado, K.G.; Cogan, S., 2004, *A Teoria das Restrições no Processo de Refino de Petróleo*, Petrobras e Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ.

Schuller, R.B.; Munaweera, S.; Selmer-Olsen, S.; Solbakken, T., 2003, *Evaluation of Multiphase Flow Rate Models for Chokes Under Subcritical Oil/Gás/Water Flow Conditions*, SPE 84961-PA.

Schuller, R.B.; Munaweera, S.; Selmer-Olsen, S.; Solbakken, T., 2006, *Critical and Subcritical Oil/Gas/Water Mass Flow Rate Experiments and Predictions for Chokes*, SPE 88813-PA.

Slobodcicov, I.; Oliveira, A.L.; Conrado, A.M.; Reis A.S.; 2009, *Modelagem e cálculo de vazão multifásica em medidores de pressão diferencial*, Relatório técnico 003/2009 CENPES – Petrobras.

Surbey, D.W.; Kelkar, B.G.; Brill J.P., 1989, *Study of Multiphase Critical Flow Through Wellhead Chokes*, SPE 15140-PA.

Thomas, J.C.; Correia, C.A.; Triggia A.A.; Filho, C.V., 2004, *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, Petrobras, Rio de Janeiro.

Zhang, H. J.; LU, S. J.; YU, G. Z., 1992, *An investigation of two-phase flow measurement with orifices for low-quality mixtures*, International Journal of Multiphase Flow.

Zhang, H. J.; Yue, W. T; Huang, Z. Y., 2005, *Investigation of oil-air two-phase mass flow rate measurement using venturi and void fraction sensor*, Journal of Zhejiang University Science.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)