



RODRIGO DA SILVA CARPIO

**REPRESENTAÇÃO DE MISTURA DE
PETRÓLEOS COM ABORDAGEM
COMPOSICIONAL**

CAMPINAS
2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

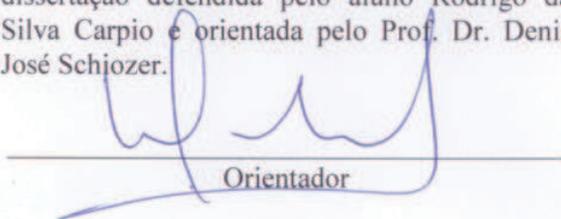
RODRIGO DA SILVA CARPIO

**REPRESENTAÇÃO DE MISTURA DE PETRÓLEOS COM
ABORDAGEM COMPOSICIONAL**

Orientador: Prof. Dr. Denis José Schiozer

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo na área de Reservatórios e Gestão.

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Rodrigo da Silva Carpio e orientada pelo Prof. Dr. Denis José Schiozer.

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal line. The signature is cursive and appears to be "Denis José Schiozer". Below the signature, the word "Orientador" is printed in a black, sans-serif font.

Orientador

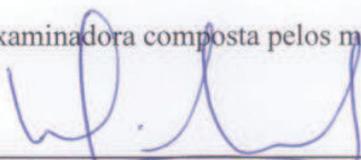
CAMPINAS
2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

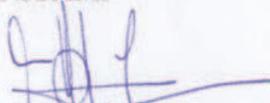
Representação de mistura de petróleos com abordagem composicional

Autor: **Rodrigo da Silva Carpio**
Orientador: **Prof. Dr. Denis José Schiozer**

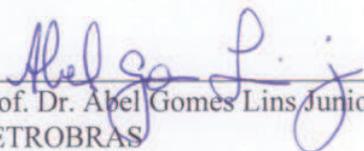
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Denis José Schiozer, Presidente
DEP/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Osvaldo Vidal Trevisan
DEP/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Abel Gomes Lins Junior
PETROBRAS

Campinas, 02 de agosto de 2012

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Eloisa e à minha avó Heloisa, que sempre dedicaram suas vidas à felicidade dos seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me dado saúde, força e paz de espírito para alcançar meus objetivos e trilhar meu caminho.

Aos meus pais Ruperto e Eloisa pelo amor e dedicação dado e à minha irmã Carolina pela eterna amizade.

À minha companheira Aline pelo carinho, otimismo e inabalável bom humor. Ao meu filho Diego, pelo simples fato de existir.

Aos meus avôs, tios e primos, em especial à minha tia Ione, que iniciou a minha jornada no mundo da química.

Ao meu finado padrinho Nilton o qual sempre considerei como meu avô.

Ao meu orientador Prof. Denis Schiozer pela atenção, estímulo e orientação na elaboração deste trabalho.

Às Gerências de Simulação e Avaliação de Reservatórios e Caracterização e Modelagem de Reservatórios, em especial a Diego Barbosa, Flavia Pacheco, Guilherme Teixeira, Gustavo Becerra, Luis Carlos, Manuel Fragoso, Mauro Becker, Pedro Wilson e Regis Krueel que foram grandes incentivadores da realização desta dissertação.

À Gerência de Tecnologia da Recuperação, pelas análises realizadas, em especial ao Químico Alexandre Vieira pela transmissão de conhecimento e pelas discussões enriquecedoras

Ao colega Engenheiro João Carlos por compartilhar seus programas e pelo auxílio na compreensão da linguagem empregada.

Aos professores e funcionários da UNICAMP pela ajuda, conhecimento e suporte fornecido.

Aos pesquisadores do UNISIM, em especial à Eliana Ligerio e Helena Scanavini, pelo conhecimento compartilhado.

Aos amigos Hernani Petroni, Samuel Mello e Simone Rodrigues pelas contribuições significativas neste trabalho.

Aos novos amigos do curso de Ciências e Engenharia de Petróleo do DEP: Alexandre Lima, Bruno Marco, Bruno Rangel, Camila Passarella, Celso Argolo, Danilo Vinicius, Ellen Sousa, Felipe Volponi, Henrique Cotrim, Jorge Biazussi, Marco Rachid, Rafael Salla, Tiago Amorin, Vinicius Botechia e tantos outros.

“Um livro é a prova de que os homens são capazes de fazer magia”.

Carl Sagan

RESUMO

CARPIO, Rodrigo da Silva, *Representação de Mistura de Petróleos com Abordagem Composicional*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2012. 198p. Dissertação de Mestrado.

Nos últimos anos com o aumento da complexidade dos projetos de produção exige-se que os simuladores de escoamento numéricos sejam capazes de simular novas situações e cenários de produção. No caso de pontos de convergência onde dois ou mais fluidos de diferentes caracterizações são misturados e representados através de uma abordagem composicional, a representação numérica torna-se de difícil descrição se comparada a uma abordagem *Black-oil*, pois diferentemente do tratamento *Black-oil*, não se tem apenas uma diferença de pressões de entrada a ser solucionada, mas também existem questões relacionadas à definição da composição resultante. A representação da mistura resultante (definição dos componentes e suas respectivas propriedades) impacta diretamente na predição do comportamento de fases em uma simulação.

Uma maneira criteriosa de representar a mistura resultante é através de dados experimentais PVT (análise pressão-volume-temperatura), de um óleo ou gás, ajustados a uma equação de estado cúbica. Porém, na dificuldade de obtenção e comum ausência destes, procura-se trabalhar com os dados de cada fluido, de acordo com alguns métodos de ajuste para mistura disponíveis na literatura. Entretanto, devido à variação das correntes de entrada ao longo do tempo, no ponto de convergência, torna-se necessário um novo ajuste a cada passo de tempo, o que em termos práticos inviabilizaria uma simulação ao longo do tempo.

Assim, faz-se necessário o uso de um método que automatize o ajuste da equação de estado dentro da rotina do simulador. Uma solução empregada em alguns programas comerciais é usar como dado de entrada as equações de estado previamente ajustadas de cada fluido a montante, e recalculas as propriedades termodinâmicas da equação de estado da mistura resultante, através do uso de regras de combinação.

Este trabalho tem por objetivo descrever o ajuste de uma equação de estado com o uso de regras de combinação, para representar uma mistura de dois petróleos, a fim de avaliar o uso das

regras de combinação como alternativa para mistura de fluidos em uma simulação numérica de escoamento com abordagem composicional. Compara-se a solução empregada com duas outras técnicas de ajuste de misturas: *weaved* e *splitting*.

Palavras-Chave

PVT, Equação de Estado, Regras de Combinação, Mistura de Petróleos, *Weaved*, *Splitting*.

ABSTRACT

CARPIO, Rodrigo da Silva, *Representation of Petroleum Mixture with Compositional Approach*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2012. 198p. Dissertação de Mestrado.

In recent years, with the increasing complexity of production projects requires that the numerical flow simulators are able to simulate new situations and production scenarios. In the case of convergence points where two or more fluids with different characterizations are mixed and represented by a compositional approach, the numerical representation it becomes difficult to describe an approach when compared to *Black-oil*, because unlike the *Black-oil* treatment, there is not only a difference of inlet pressures to be addressed, but there are also issues related to the definition of the resulting composition. The representation of the resulting mixture (setting of the components and their properties) directly affects the prediction of the phase behavior in a simulation.

A careful way to represent the resulting mixture is through experimental PVT (pressure-volume-temperature analysis) data, from an oil or gas, adjusted to a cubic equation of state. But with the difficulty of obtaining these data and their common absence, it is advisable to work with the data of each fluid, according to some methods for adjusting the mixture, available in the literature. However, due to the variation of the input current over time, at the convergence point, it is necessary a new adjust every time step, which in practice would make the simulation impracticable over time.

Thus, it is necessary to use a method that automates the adjustment of the equation of state within the simulator routine. The solution employed in several commercial software is to use as input data the equations of state previously adjusted to each fluid upstream and recalculate the thermodynamic properties of the resulting mixture equation of state by using mixing rules.

This paper aims to describe the adjust of an equation of state with the use of mixing rules, to represent a mixture of two oils in order to evaluate the use of alternative combination rules for mixing fluids in a numerical simulation flow with compositional approach. The solution was compared with two other mixtures adjustment techniques such as: *weaved* and *splitting*.

Key Words

PVT, Equation of State, Mixing Rules, Petroleum Mixture, *Weaved*, *Splitting*.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xvi
LISTA DE TABELAS.....	xxviii
NOMENCLATURA	xxxi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Descrição da dissertação	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1 Representação do comportamento de fases de uma mistura de hidrocarbonetos com equação de estado e análises PVT.	5
2.2 Equações de estado	6
2.2.1 Equações de estado cúbicas	7
2.2.2 Translação de volume	10
2.2.3 Regras de mistura	11
2.3 Análises PVT	12
2.3.1 Teste do Separador	12
2.3.2 Liberação diferencial	12
2.3.3 Expansão a composição constante.....	13
2.3.4 Depleção a volume constante	14

2.4	Caracterização da fração pesada	15
2.5	Ajuste de uma equação de estado cúbica através de uma regressão não-linear	16
2.5.1	Regressão não-linear e função-objetivo.....	17
2.5.2	Parâmetros de ajuste	18
2.5.3	Agrupamento	19
2.5.4	Regras de combinação	19
2.6	Métodos para caracterização de uma mistura de fluidos	20
2.6.1	Regras de combinação em misturas.....	20
2.6.2	<i>Weaved</i>	22
2.6.3	<i>Splitting</i> através de uma distribuição molar gama.....	23
2.7	Cálculo do equilíbrio de fases.....	25
3.	METODOLOGIA.....	27
3.1	Seleção de fluidos para simulação de uma mistura	27
3.2	Cálculos das propriedades termodinâmicas	28
3.3	Agrupamento de componentes.....	28
3.4	Metodologia dos ajustes propostos	29
3.4.1	Método de ajuste com regras de combinação	30
3.4.2	Método de ajuste simultâneo	31
3.4.3	Método de ajuste simultâneo com <i>splitting</i>	31
3.4.4	Método de ajuste simultâneo com <i>weaved</i>	35
3.5	Cálculo do equilíbrio de fases.....	35
3.6	Regras básicas para escolha dos parâmetros de regressão	35
3.7	Análises auxiliares	35

3.7.1	Cálculo da pressão de saturação após EOS ajustada	36
3.7.2	Simulações flash para várias condições de pressão e temperatura	36
3.8	Resumo do fluxo de trabalho	38
4.	APLICAÇÃO	40
4.1	Primeira mistura.....	40
4.2	Segunda mistura.....	41
4.3	Terceira mistura	54
5.	RESULTADOS	56
5.1	Resultados da primeira mistura.....	56
5.1.1	Resultados para 24 componentes.....	57
5.1.2	Resultados para os agrupamentos propostos	60
5.1.3	Envelopes de fases da primeira mistura.....	75
5.1.4	Avaliação dos resultados da primeira mistura.	78
5.2	Resultados da segunda mistura.....	79
5.2.1	Resultados para 24 componentes.....	80
5.2.2	Resultados para os agrupamentos propostos	83
5.2.3	Envelopes de fases da segunda mistura	98
5.2.4	Avaliação dos resultados da segunda mistura.....	103
5.3	Resultados da terceira mistura	104
5.3.1	Composição expandida.....	104
5.3.2	Resultados para os agrupamentos propostos	106
5.3.3	Envelopes de fases da terceira mistura	116
5.3.4	Avaliação dos resultados da terceira mistura.....	120

5.4	Análises auxiliares	121
5.4.1	Cálculo da pressão de saturação após EOS ajustada	121
5.4.2	Simulações flash para várias condições de pressão e temperatura	122
6.	CONCLUSÕES.....	124
6.1	Conclusões	124
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	126
	REFERÊNCIAS.....	128
	APÊNDICE A	133
	ANEXO 1 - Curvas de ajuste dos dados PVT	136
I.	Primeira Mistura.....	136
II.	Segunda Mistura.....	149
II.	Terceira Mistura.....	163

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estágios de uma liberação diferencial. Fonte: Rosa et al., 2006.....	13
Figura 2.2 - Esquema de uma depleção a volume constante. Fonte: Pedersen et al., 2007.....	15
Figura 2.3 - Representação de uma mistura de dois óleos e suas respectivas composições.....	23
Figura 3.1 - Agrupamentos propostos para as representações com óleo.....	29
Figura 3.2 - Agrupamentos propostos para as representações com gás.....	30
Figura 3.3 - Procedimento para ajuste de uma mistura com o uso de regras de combinação.....	32
Figura 3.4 - Procedimento para ajuste simultâneo de dois fluidos para uma mistura.	33
Figura 3.5 - Procedimento para ajuste simultâneo e <i>splitting</i> de dois fluidos para uma mistura. .	34
Figura 3.6 - Procedimento para ajuste simultâneo de dois fluidos para uma mistura.	37
Figura 3.7 - Algoritmo do cálculo de equilíbrio de fases.	38
Figura 3.8 - Resumo do fluxo de trabalho com base na metodologia descrita.....	39
Figura 4.1 - Fator volume de formação do óleo na análise PVT do Óleo A.	43
Figura 4.2 - Razão de solubilidade na análise PVT do Óleo A.	43
Figura 4.3 - Massa específica do óleo na análise PVT do Óleo A.	44
Figura 4.4 - Viscosidade do óleo na análise PVT do Óleo A.....	44
Figura 4.5 - Fator volume de formação do gás na análise PVT do Óleo A.....	45
Figura 4.6 - Densidade do gás na análise PVT do Óleo A.	45
Figura 4.7 - Fator de compressibilidade do gás na análise PVT do Óleo A.....	46
Figura 4.8 - Fator volume de formação do óleo na análise PVT do Óleo B.....	46
Figura 4.9 - Razão de solubilidade na análise PVT do Óleo B.	47
Figura 4.10 - Massa específica do óleo na análise PVT do Óleo B.....	47
Figura 4.11 - Viscosidade do óleo na análise PVT do Óleo B.	48
Figura 4.12 - Fator volume de formação do gás na análise PVT do Óleo B.	48
Figura 4.13 - Densidade do gás na análise PVT do Óleo B.....	49
Figura 4.14 - Fator de compressibilidade do gás na análise PVT do Óleo B.	49
Figura 4.15 - Fator volume de formação do óleo na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).51	
Figura 4.16 - Razão de solubilidade na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).....	51
Figura 4.17 - Massa específica do óleo na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).....	52

Figura 4.18 - Viscosidade do óleo na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).....	52
Figura 4.19 - Fator volume de formação do gás na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).	53
Figura 4.20 - Densidade do gás na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).....	53
Figura 4.21 - Fator de compressibilidade do gás na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).	54
Figura 5.1 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 24 componentes.....	58
Figura 5.2 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 24 componentes.	58
Figura 5.3 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 24 componentes...	59
Figura 5.4 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 24 componentes.	59
Figura 5.5 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 10 componentes.....	60
Figura 5.6 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 10 componentes.	61
Figura 5.7 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 10 componentes...	61
Figura 5.8 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 10 componentes.	62
Figura 5.9 - Composição do agrupamento de 10 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos.	64
Figura 5.10 - Composição do agrupamento de 10 componentes (fase gasosa), para os 4 métodos de ajuste propostos.....	64
Figura 5.11 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 8 componentes.....	66
Figura 5.12 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 8 componentes.	66
Figura 5.13 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 8 componentes...	67
Figura 5.14 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 8 componentes.	67
Figura 5.15 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos.	69
Figura 5.16 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase gasosa), para os 4 métodos de ajuste propostos.	69
Figura 5.17 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 6 componentes.....	71
Figura 5.18 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 6 componentes.	71
Figura 5.19 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 6 componentes...	72
Figura 5.20 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 6 componentes.	72
Figura 5.21 - Composição do agrupamento de 6 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos.	73

Figura 5.22 - Composição do agrupamento de 6 componentes (fase gasosa), para os 4 métodos de ajuste propostos.	74
Figura 5.23 – Envelopes de fases para o método de ajuste com regras de combinação nos diversos agrupamentos propostos.	75
Figura 5.24 - Envelopes de fases para o método de ajuste simultâneo nos diversos agrupamentos propostos.....	76
Figura 5.25 - Envelopes de fases para o método de ajuste <i>splitting</i> nos diversos agrupamentos propostos.....	77
Figura 5.26 - Envelopes de fases para o método de ajuste <i>weaved</i> nos diversos agrupamentos propostos.....	78
Figura 5.27 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste e o ajuste com dados experimentais da mistura, para 24 componentes.	81
Figura 5.28 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste e o ajuste com dados experimentais da mistura, para 24 componentes.	82
Figura 5.29 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste e o ajuste com dados experimentais da mistura, para 24 componentes.	82
Figura 5.30 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste e o ajuste com dados experimentais da mistura, para 24 componentes.	83
Figura 5.31 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 10 componentes...	84
Figura 5.32 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 10 componentes.	85
Figura 5.33 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 10 componentes.	85
Figura 5.34 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 10 componentes.	86
Figura 5.35 - Composição do agrupamento de 10 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos mais o ajuste com os dados experimentais da mistura.....	87
Figura 5.36 - Composição do agrupamento de 10 componentes (fase gasosa), para os 4 métodos de ajuste propostos mais o ajuste com os dados experimentais da mistura.....	88
Figura 5.37 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 8 componentes.....	89
Figura 5.38 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 8 componentes.	90
Figura 5.39 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 8 componentes...	90

Figura 5.40 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 8 componentes.	91
Figura 5.41 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos mais o ajuste com os dados experimentais da mistura.	92
Figura 5.42 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos mais o ajuste com os dados experimentais da mistura.	92
Figura 5.43 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 6 componentes.....	94
Figura 5.44 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 6 componentes.	94
Figura 5.45 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 6 componentes...	95
Figura 5.46 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 6 componentes.	95
Figura 5.47 - Composição do agrupamento com 6 componentes na fase líquida, para os 4 métodos de ajuste propostos.....	96
Figura 5.48 - Composição do agrupamento com 6 componentes na fase gasosa, para os 4 métodos de ajuste propostos.....	97
Figura 5.49 - Envelopes de fases para o método de ajuste com dados experimentais da mistura nos diversos agrupamentos propostos.	98
Figura 5.50 - Envelopes de fases para o método de ajuste com regras de combinação nos diversos agrupamentos propostos.	99
Figura 5.51 - Envelopes de fases para o método de ajuste simultâneo nos diversos agrupamentos propostos.....	100
Figura 5.52 - Envelopes de fases para o método de ajuste <i>splitting</i> nos diversos agrupamentos propostos.....	100
Figura 5.53 - Envelopes de fases para o método de ajuste <i>weaved</i> nos diversos agrupamentos propostos.....	101
Figura 5.54 - Envelopes de fases para 24 componentes dos dados experimentais e dos diversos métodos de ajuste propostos.	102
Figura 5.55 - Envelopes de fases com linhas de qualidade, para 24 componentes, dos dados experimentais e com o método de ajuste com regras de combinação.	102
Figura 5.56 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 8 componentes...	107
Figura 5.57 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 8 componentes.	107
Figura 5.58 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 8 componentes.	108

Figura 5.59 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 8 componentes.	108
Figura 5.60 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 6 componentes...	109
Figura 5.61 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 6 componentes.	109
Figura 5.62 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 6 componentes.	110
Figura 5.63 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 6 componentes.	110
Figura 5.64 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase líquida), para os 2 métodos de ajustes propostos com as frações pesadas resumidas na fração C7+.....	111
Figura 5.65 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase gasosa), para os 2 métodos de ajustes propostos com as frações pesadas resumidas na fração C7+.....	112
Figura 5.66 - Composição do agrupamento de 6 componentes (fase líquida), para os 2 métodos de ajustes propostos com as frações pesadas resumidas na fração C7+.....	112
Figura 5.67 - Composição do agrupamento de 6 componentes (fase gasosa), para os 2 métodos de ajustes propostos com as frações pesadas resumidas na fração C7+.....	113
Figura 5.68 - Percentual do volume de líquido formado em função da pressão, para os dois métodos de ajuste propostos (8 componentes).	115
Figura 5.69 - Percentual do volume de líquido formado em função da pressão, para os dois métodos de ajuste propostos (6 componentes).	115
Figura 5.70 - Envelopes de fases para do gás condensado SPE 3 antes da regressão.	116
Figura 5.71 - Envelopes de fases para o método de ajuste com regras de combinação para agrupamentos com oito e seis componentes.	118
Figura 5.72 - Envelopes de fases do gás condensado SPE 3, com a composição expandida e para agrupamentos com oito e seis componentes.	119
Figura 5.73 - Envelopes de fases do gás condensado Campo Nigéria, com a composição expandida e para agrupamentos com oito e seis componentes.	119
Figura 5.74 - Envelopes de fases para o método de ajuste <i>splitting</i> , com a composição expandida e para agrupamentos com oito e seis componentes.	120
Figura I.1 - Ajuste da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Well 4.	136
Figura I.2 - Ajuste da densidade para 24 componentes, DLE Well 4.....	136

Figura I.3 - Ajuste do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Well 4.	136
Figura I.4 - Ajuste da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Mixture 2.	136
Figura I.5 - Ajuste da densidade para 24 componentes, DLE Mixture 2.	137
Figura I.6 - Ajuste do fator Z para 24 componentes, DLE Mixture 2.	137
Figura I.7 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Well 4.	137
Figura I.8 - Ajuste simultâneo da densidade para 24 componentes, DLE Well 4.	137
Figura I.9 - Ajuste simultâneo do fator Z para 24 componentes, DLE Well 4.	137
Figura I.10 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Mixture 2.	137
Figura I.11 - Ajuste simultâneo da densidade para 24 componentes, DLE Mixture 2.	138
Figura I.12 - Ajuste simultâneo do fator Z para 24 componentes, DLE Mixture 2.	138
Figura I.13 - Ajuste <i>splitting</i> da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Well 4.	138
Figura I.14 - Ajuste <i>splitting</i> da densidade para 24 componentes, DLE Well 4.	138
Figura I.15 - Ajuste <i>splitting</i> do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Well 4.	138
Figura I.16 - Ajuste <i>splitting</i> da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Mixture 2.	138
Figura I.17 - Ajuste <i>splitting</i> da densidade para 24 componentes, DLE Mixture 2.	139
Figura I.18 - Ajuste <i>splitting</i> do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Mixture 2.	139
Figura I.19 - Ajuste da RGO e VOR para 10 componentes, DLE Well 4.	139
Figura I.20 - Ajuste da densidade para 10 componentes, DLE Well 4.	139
Figura I.21 - Ajuste do fator Z e Bg para 10 componentes, DLE Well 4.	139
Figura I.22 - Ajuste da RGO e VOR para 10 componentes, DLE Mixture 2.	139
Figura I.23 - Ajuste da densidade para 10 componentes, DLE Mixture 2.	140
Figura I.24 - Ajuste do fator Z e Bg para 10 componentes, DLE Mixture 2.	140
Figura I.25 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Well 4.	140
Figura I.26 - Ajuste simultâneo da densidade para 10 componentes, DLE Well 4.	140
Figura I.27 - Ajuste simultâneo do fator Z para 10 componentes, DLE Well 4.	140
Figura I.28 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Mixture 2.	140
Figura I.29 - Ajuste simultâneo da densidade para 10 componentes, DLE Mixture 2.	141
Figura I.30 - Ajuste simultâneo do fator Z e do Bg para 10 componentes, DLE Mixture 2.	141
Figura I.31 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Well 4.	141
Figura I.32 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 10 componentes, DLE Well 4.	141

Figura I.33 - Ajuste <i>weaved</i> fator Z para 10 componentes, DLE Well 4.....	141
Figura I.34 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Mixture 2.....	141
Figura I.35 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 10 componentes, DLE Mixture 2.....	142
Figura I.36 - Ajuste <i>weaved</i> fator Z para 10 componentes, DLE Mixture 2.	142
Figura I.37 - Ajuste da RGO e VOR para 8 componentes, DLE Well 4.	142
Figura I.38 - Ajuste da densidade para 8 componentes, DLE Well 4.....	142
Figura I.39 - Ajuste do Fator Z e do Bg para 8 componentes, DLE Well 4.	142
Figura I.40 - Ajuste da RGO e VOR para 8 componentes, DLE Mixture 2.....	142
Figura I.41 - Ajuste da densidade para 8 componentes, DLE Mixture 2.....	143
Figura I.42 - Ajuste do Fator Z para 8 componentes, DLE Mixture 2.	143
Figura I.43 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Well 4.	143
Figura I.44 - Ajuste simultâneo da densidade para 8 componentes, DLE Well 4.	143
Figura I.45 - Ajuste simultâneo do fator Z e Bg para 8 componentes, DLE Well 4.....	143
Figura I.46 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Mixture 2.	143
Figura I.47 - Ajuste simultâneo da densidade para 8 componentes, DLE Mixture 2.	144
Figura I.48 - Ajuste simultâneo do fator Z e Bg para 8 componentes, DLE Mixture 2.	144
Figura I.49 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Well 4.	144
Figura I.50 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 8 componentes, DLE Well 4.....	144
Figura I.51 - Ajuste <i>weaved</i> do fator Z e do Bg para 8 componentes, DLE Well 4.	144
Figura I.52 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Mixture 2.....	144
Figura I.53 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 8 componentes, DLE Mixture 2.....	145
Figura I.54 - Ajuste <i>weaved</i> do fator Z para 8 componentes, DLE Mixture 2.	145
Figura I.55 - Ajuste da RGO e VOR para 6 componentes, DLE Well 4.....	145
Figura I.56 - Ajuste da densidade para 6 componentes, DLE Well 4.....	145
Figura I.57 - Ajuste do fator Z e do Bg para 6 componentes, DLE Well 4.	145
Figura I.58 - Ajuste da RGO e VOR para 6 componentes, DLE Mixture 2.....	145
Figura I.59 - Ajuste da densidade para 6 componentes, DLE Mixture 2.....	146
Figura I.60 - Ajuste do Fator Z e do Bg para 6 componentes, DLE Mixture 2.	146
Figura I.61 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Well 4.	146
Figura I.62 - Ajuste simultâneo da Densidade para 6 componentes, DLE Well 4.	146

Figura I.63 - Ajuste simultâneo do Fator Z para 6 componentes, DLE Well 4.	146
Figura I.64 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Mixture 2.	146
Figura I.65 - Ajuste simultâneo da densidade para 6 componentes, DLE Mixture 2.	147
Figura I.66 - Ajuste simultâneo do fator Z para 6 componentes, DLE Mixture 2.	147
Figura I.67 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Well 4.	147
Figura I.68 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 6 componentes, DLE Well 4.	147
Figura I.69 - Ajuste <i>weaved</i> do fator Z e Bg para 6 componentes, DLE Well 4.	147
Figura I.70 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Mixture 2.	147
Figura I.71 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 6 componentes, DLE Mixture 2.	148
Figura I.72 - Ajuste <i>weaved</i> do fator Z para 6 componentes, DLE Mixture 2.	148
Figura II.1 - Ajuste da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo A.	149
Figura II.2 - Ajuste da densidade para 24 componentes, DLE Óleo A.	149
Figura II.3 - Ajuste do Fator Z e Bg para 24 componentes, DLE Óleo A.	149
Figura II.4 - Ajuste da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo B.	149
Figura II.5 - Ajuste da densidade para 24 componentes, DLE Óleo B.	149
Figura II.6 - Ajuste do Fator Z e Bg para 24 componentes, DLE Óleo B.	149
Figura II.7 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo A.	150
Figura II.8 - Ajuste simultâneo da densidade para 24 componentes, DLE Óleo A.	150
Figura II.9 - Ajuste simultâneo do fator Z para 24 componentes, DLE Óleo A.	150
Figura II.10 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo B.	150
Figura II.11 - Ajuste simultâneo da densidade para 24 componentes, DLE Óleo B.	150
Figura II.12 - Ajuste simultâneo do fator Z e Bg para 24 componentes, DLE Óleo B.	150
Figura II.13 - Ajuste <i>splitting</i> da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo A.	151
Figura II.14 - Ajuste <i>splitting</i> da densidade para 24 componentes, DLE Óleo A.	151
Figura II.15 - Ajuste <i>splitting</i> do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Óleo A.	151
Figura II.16 - Ajuste <i>splitting</i> da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo B.	151
Figura II.17 - Ajuste <i>splitting</i> da densidade para 24 componentes, DLE Óleo B.	151
Figura II.18 - Ajuste <i>splitting</i> do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Óleo B.	151
Figura II.19 - Ajuste experimental da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Mistura.	152
Figura II.20 - Ajuste experimental da densidade para 24 componentes, DLE Mistura.	152

Figura II.21 - Ajuste experimental do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Mistura.	152
Figura II.22 - Ajuste da RGO e VOR para 10 componentes, DLE Óleo A.....	152
Figura II.23 - Ajuste da densidade para 10 componentes, DLE Óleo A.....	152
Figura II.24 - Ajuste do fator Z e Bg para 10 componentes, DLE Óleo A.....	152
Figura II.25 - Ajuste da RGO e VOR para 10 componentes, DLE Óleo B.....	153
Figura II.26 - Ajuste da densidade para 10 componentes, DLE Óleo B.....	153
Figura II.27 - Ajuste do fator Z e Bg para 10 componentes, DLE Óleo B.....	153
Figura II.28 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Óleo A.....	153
Figura II.29 - Ajuste simultâneo da densidade para 10 componentes, DLE Óleo A.....	153
Figura II.30 - Ajuste simultâneo do fator Z para 10 componentes, DLE Óleo A.....	153
Figura II.31 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Óleo B.....	154
Figura II.32 - Ajuste simultâneo da densidade para 10 componentes, DLE Óleo B.....	154
Figura II.33 - Ajuste simultâneo do fator Z e do Bg para 10 componentes, DLE Óleo B.....	154
Figura II.34 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Óleo A.....	154
Figura II.35 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 10 componentes, DLE Óleo A.....	154
Figura II.36 - Ajuste <i>weaved</i> fator Z para 10 componentes, DLE Óleo A.....	154
Figura II.37 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Óleo B.....	155
Figura II.38 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 10 componentes, DLE Óleo B.....	155
Figura II.39 - Ajuste <i>weaved</i> fator Z para 10 componentes, DLE Óleo B.....	155
Figura II.40 - Ajuste experimental da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Mistura.	155
Figura II.41 - Ajuste experimental da densidade para 10 componentes, DLE Mistura.....	155
Figura II.42 - Ajuste experimental do fator Z e do Bg para 10 componentes, DLE Mistura.	155
Figura II.43 - Ajuste da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo A.....	156
Figura II.44 - Ajuste da densidade para 8 componentes, DLE Óleo A.....	156
Figura II.45 - Ajuste do Fator Z e Bg para 8 componentes, DLE Óleo A.....	156
Figura II.46 - Ajuste da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo B.....	156
Figura II.47 - Ajuste da densidade para 8 componentes, DLE Óleo B.....	156
Figura II.48 - Ajuste do Fator Z e Bg para 8 componentes, DLE Óleo B.....	156
Figura II.49 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo A.....	157
Figura II.50 - Ajuste simultâneo da densidade para 8 componentes, DLE Óleo A.....	157

Figura II.51 - Ajuste simultâneo do fator Z para 8 componentes, DLE Óleo A.....	157
Figura II.52 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo B.....	157
Figura II.53 - Ajuste simultâneo da densidade para 8 componentes, DLE Óleo B.	157
Figura II.54 - Ajuste simultâneo do fator Z e do Bg para 8 componentes, DLE Óleo B.....	157
Figura II.55 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo A.....	158
Figura II.56 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 8 componentes, DLE Óleo A.....	158
Figura II.57 - Ajuste <i>weaved</i> fator Z para 8 componentes, DLE Óleo A.	158
Figura II.58 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo B.	158
Figura II.59 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 8 componentes, DLE Óleo B.....	158
Figura II.60 - Ajuste <i>weaved</i> fator Z para 8 componentes, DLE Óleo B.....	158
Figura II.61 - Ajuste experimental da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Mistura.	159
Figura II.62 - Ajuste experimental da densidade para 8 componentes, DLE Mistura.	159
Figura II.63 - Ajuste experimental do fator Z e do Bg para 8 componentes, DLE Mistura.	159
Figura II.64 - Ajuste da RGO e VOR para 6 componentes, DLE Óleo A.....	159
Figura II.65 - Ajuste da densidade para 6 componentes, DLE Óleo A.....	159
Figura II.66 - Ajuste do fator Z e Bg para 6 componentes, DLE Óleo A.	159
Figura II.67 - Ajuste da RGO e VOR para 6 componentes, DLE Óleo B.	160
Figura II.68 - Ajuste da densidade para 6 componentes, DLE Óleo B.....	160
Figura II.69 - Ajuste do fator Z e Bg para 6 componentes, DLE Óleo B.	160
Figura II.70 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Óleo A.	160
Figura II.71 - Ajuste simultâneo da densidade para 6 componentes, DLE Óleo A.	160
Figura II.72 - Ajuste simultâneo do fator Z para 6 componentes, DLE Óleo A.....	160
Figura II.73 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Óleo B.....	161
Figura II.74 - Ajuste simultâneo da densidade para 6 componentes, DLE Óleo B.	161
Figura II.75 - Ajuste simultâneo do fator Z e do Bg para 6 componentes, DLE Óleo B.....	161
Figura II.76 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Óleo A.....	161
Figura II.77 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 6 componentes, DLE Óleo A.....	161
Figura II.78 - Ajuste <i>weaved</i> fator Z para 6 componentes, DLE Óleo A.	161
Figura II.79 - Ajuste <i>weaved</i> da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Óleo B.	162
Figura II.80 - Ajuste <i>weaved</i> da densidade para 6 componentes, DLE Óleo B.....	162

Figura II.81 - Ajuste <i>weaved</i> fator Z para 6 componentes, DLE Óleo B.....	162
Figura II.82 - Ajuste experimental da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Mistura.	162
Figura II.83 - Ajuste experimental da densidade para 6 componentes, DLE Mistura.	162
Figura II.84 - Ajuste experimental do fator Z e do Bg para 6 componentes, DLE Mistura.	162
Figura III.1 - Ajuste da VR para 8 componentes, CCE Campo Nigéria.....	163
Figura III.2 - Ajuste do fator Z para 8 componentes, CCE Campo Nigéria.	163
Figura III.3 - Ajuste do fator Z para 8 componentes, CVD Campo Nigéria.....	163
Figura III.4 - Ajuste do volume de líquido condensado para 8 componentes, CVD Campo Nigéria.	163
Figura III.5 - Ajuste do VR para 8 componentes, CCE SPE 3.	163
Figura III.6 - Ajuste do fator Z para 8 componentes, CCE SPE 3.....	164
Figura III.7 - Ajuste do volume de líquido condensado para 8 componentes, CVD SPE 3.	164
Figura III.8 - Ajuste <i>splitting</i> do VR para 8 componentes, CCE Campo Nigéria.	164
Figura III.9 - Ajuste <i>splitting</i> do fator Z para 8 componentes, CCE Campo Nigéria.	164
Figura III.10 - Ajuste <i>splitting</i> do fator Z para 8 componentes, CVD Campo Nigéria.	164
Figura III.11 - Ajuste <i>splitting</i> do volume de líquido condensado para 8 componentes, CVD Campo Nigéria.....	164
Figura III.12 - Ajuste <i>splitting</i> do VR para 8 componentes, CCE SPE 3.	165
Figura III.13 - Ajuste <i>splitting</i> do fator Z para 8 componentes, CCE SPE 3.....	165
Figura III.14 - Ajuste <i>splitting</i> do volume de líquido condensado para 8 componentes, CVD SPE 3.	165
Figura III.15 - Ajuste da VR para 6 componentes, CCE Campo Nigéria.....	165
Figura III.16 - Ajuste do fator Z para 6 componentes, CCE Campo Nigéria.	165
Figura III.17 - Ajuste do fator Z para 6 componentes, CVD Campo Nigéria.....	165
Figura III.18 - Ajuste do volume de líquido condensado para 6 componentes, CVD Campo Nigéria.	166
Figura III.19 - Ajuste do VR para 6 componentes, CCE SPE 3.	166
Figura III.20 - Ajuste do fator Z para 6 componentes, CCE SPE 3.....	166
Figura III.21 - Ajuste do volume de líquido condensado para 6 componentes, CVD SPE 3.	166
Figura III.22 - Ajuste <i>splitting</i> do VR para 6 componentes, CCE Campo Nigéria.	166

Figura III.23 - Ajuste <i>splitting</i> do fator Z para 6 componentes, CCE Campo Nigéria.	166
Figura III.24 - Ajuste <i>splitting</i> do fator Z para 6 componentes, CVD Campo Nigéria.	167
Figura III.25 - Ajuste <i>splitting</i> do volume de líquido condensado para 6 componentes, CVD Campo Nigéria.....	167
Figura III.26 - Ajuste <i>splitting</i> do VR para 6 componentes, CCE SPE 3.	167
Figura III.27 - Ajuste <i>splitting</i> do fator Z para 6 componentes, CCE SPE 3.....	167
Figura III.28 - Ajuste <i>splitting</i> do volume de líquido condensado para 6 componentes, CVD SPE 3.	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Exemplo de um conjunto de algumas propriedades termodinâmicas de dois diferentes óleos (A e B).	22
Tabela 3.1- Indicadores para identificação de um tipo de petróleo. Fonte: Vieira, A. J. M. Transparências do Curso de Simulação Aplicada da Petrobras, 2011. Adaptado de: McCain e Bridges, 1994.	28
Tabela 4.1 - Propriedades dos óleos que resultam na primeira mistura. Well 04 e Mixture 02.	41
Tabela 4.2 - Propriedades dos óleos que resultam na segunda mistura. Óleo A e Óleo B.	41
Tabela 4.3 - Composições do Óleo A e Óleo B para 10 pseudocomponentes.	42
Tabela 4.4 - Propriedades dos óleos que resultam na segunda mistura. Óleo A e Óleo B.	50
Tabela 4.5 - Composição molar da mistura dos Óleos A + B.	50
Tabela 4.6 - Propriedades dos óleos que resultam na primeira mistura. Campo Nigéria e SPE 3.	55
Tabela 5.1 - Agrupamentos propostos para a primeira mistura.	57
Tabela 5.2 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação <i>flash</i> , entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos.	60
Tabela 5.3 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação <i>flash</i> , entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos (10 componentes).	62
Tabela 5.4 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os diversos métodos de ajuste propostos e método de ajuste com regras de combinação (10 componentes). ..	65
Tabela 5.5 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação <i>flash</i> , entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos (8 componentes).	68
Tabela 5.6 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os diversos métodos de ajuste propostos e método de ajuste com regras de combinação (8 pseudocomponentes).	70

Tabela 5.7 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação <i>flash</i> , entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos (6 componentes).	73
Tabela 5.8 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os diversos métodos de ajuste propostos e método de ajuste com regras de combinação (6 pseudocomponentes).	74
Tabela 5.9 - Agrupamentos propostos para a segunda mistura.	80
Tabela 5.10 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação <i>flash</i> , entre o ajuste com os dados experimentais, o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos.....	83
Tabela 5.11 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação <i>flash</i> , entre o ajuste com os dados experimentais, o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos.....	86
Tabela 5.12 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os dados experimentais da mistura e os diversos métodos de ajuste propostos (10 componentes).	88
Tabela 5.13 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação <i>flash</i> , entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos (8 componentes).	91
Tabela 5.14 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os dados experimentais da mistura e os diversos métodos de ajuste propostos (8 componentes).	93
Tabela 5.15 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação <i>flash</i> , entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos (6 componentes).	96
Tabela 5.16 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os dados experimentais da mistura e os diversos métodos de ajuste propostos (6 componentes).	97
Tabela 5.17 - Composição inicial, <i>splitting</i> e agrupamentos propostos para a terceira mistura..	105
Tabela 5.18 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação <i>flash</i> , entre o método de ajuste com regras de combinação e o <i>splitting</i> (8 componentes).	111
Tabela 5.19 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação <i>flash</i> , entre o método de ajuste com regras de combinação e o <i>splitting</i> (6 componentes).	111
Tabela 5.20 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida e gasosa, entre o método com regras de combinação e o <i>splitting</i> (8 componentes).	114

Tabela 5.21 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida e gasosa, entre o método com regras de combinação e o <i>splitting</i> (6 componentes).....	114
Tabela 5.22 - Diferenças percentuais do cálculo da pressão de saturação com as EOS já ajustadas.	122
Tabela 5.23 - Diferenças percentuais dos métodos de ajuste em relação aos dados experimentais da fração molar de óleo, em diversas condições de pressão e temperatura.	123
Tabela 5.24 - Diferenças percentuais dos métodos de ajuste em relação aos dados experimentais da fração molar de gás, em diversas condições de pressão e temperatura.....	123

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A_n	Constantes da equação de estado cúbica	
a	Constante das forças de dispersão a curta distância	
b	Constante do valor limite de volume molar	
B_g	Fator volume-formação do gás	$[m^3/m^3]$
B_o	Fator volume-formação do óleo	$[m^3/m^3]$
f_L	Fugacidade do líquido	
f_v	Fugacidade do vapor	
n	Número de moles	$[mol]$
p	Pressão	$[kgf/cm^2]$
P_c	Pressão crítica	$[kgf/cm^2]$
R	Constante universal dos gases	$[(kgf/cm^2).m^3 / kgmol.K]$
SG	Densidade (<i>specific gravity</i>)	
T	Temperatura	$[°C]$
V	Volume molar	
V_{sat}	Volume da saturação	$[m^3]$
V_c	Volume crítico	$[m^3]$
x	Fração molar na fase líquida	
y	Fração molar na fase gasosa	
z	Fração molar	
Z	Fator de compressibilidade	

Letras Gregas

μ	Potencial químico da água	$[kg / m^3 °C]$
Φ	Coefficiente de fugacidade	

Ω_a	Constante do termo de atração da equação de estado
Ω_b	Constante do termo de repulsão da equação de estado

Siglas e abreviações

Aj	Ajuste
BIC	Coefficiente de interação binária (<i>binary interaction coefficient</i>)
CCE	Expansão a composição constante (<i>constant composition expansion</i>)
Comp	Componente
CO₂	Gás carbônico ou dióxido de carbono
CH₄	Metano
C₂H₆	Etano
CVD	Depleção a volume constante (<i>constant volume depletion</i>)
DLE	Liberação diferencial (<i>differential liberation expansion</i>)
Exp	Experimental
EOS	Equação de estado (<i>Equation of state</i>)
Inic	Inicial
N₂	Nitrogênio
PM	Peso molecular
PR	Peng-robinson (equação de estado cúbica)
PSC	Pseudocomponente
Psat	Ponto de saturação
Pt	Ponto
PVT	Análises de pressão-volume-temperatura
Rcomb	Regras de combinação
RGO	Razão gás-óleo
SRK	Soave-Redlich-Kwong (equação de estado cúbica)
STO	Condições padrão do separador (<i>stock tank oil</i>)
VR	Volume relativo
VRO	Volume relativo de óleo

1. INTRODUÇÃO

Na indústria do petróleo, em áreas como exploração e produção, é cada vez mais comum o uso da simulação numérica computacional. Essa ferramenta é um instrumento valioso que auxilia em diversos tipos de previsões, otimizações e no acompanhamento da produção, facilitando o processo de tomada de decisão e gerenciamento de um campo ou ativo.

Com o aumento da complexidade dos projetos de produção exige-se que a simulação numérica evolua de tal forma a se adaptar às novas necessidades e demandas requeridas. Um exemplo claro disso são os simuladores capazes de acoplar programas de diferentes áreas, integrando todo o processo de produção e propiciando, desta maneira, uma visão global de todos os efeitos e perturbações que possam ocorrer no sistema ao longo do tempo.

Dentro dessa ótica de integração e dos diversos desafios que englobam o desenvolvimento de programas que geram soluções práticas e eficazes, há a questão da representação do fluido. Sendo o objeto comum de todas as áreas, o fluido a ser explotado pode ter uma representação complexa ou simplificada dependendo da parte do sistema que se deseja representar ou aferir.

Uma situação recorrente em projetos com maior grau de complexidade é o ponto de convergência onde dois ou mais fluidos de diferentes caracterizações são misturados e uma representação numérica a partir desses pontos é necessária. Esse tipo de situação pode ocorrer em: *manifolds*, poços completados em diferentes reservatórios ou camadas, reinjeção de fluido produzido etc.

No caso de misturas de diferentes petróleos em um ponto de convergência e mais especificamente para uma abordagem composicional, a representação numérica torna-se mais complexa, pois diferentemente do tratamento *Black-oil*, não se tem apenas uma diferença de pressões de entrada a ser solucionada, mas também a definição de uma nova composição e um novo equilíbrio termodinâmico para a mistura resultante.

Uma maneira criteriosa de representar esse tipo de mistura é através de dados experimentais PVT (análise pressão-volume-temperatura) que caracterizam o comportamento termodinâmico de um óleo ou gás, quando ajustados a uma equação de estado (*equation of state* – EOS). Porém, na dificuldade de obtenção de dados PVT da mistura e comum ausência destes, procura-se trabalhar com uma ponderação dos dados PVT de cada fluido gerador da mistura, com o auxílio de alguns artifícios disponíveis na literatura.

Devido à variação das correntes de entrada ao longo do tempo (e por consequência, a variação composicional do fluido misturado), este ajuste necessitaria ser refeito a cada passo de tempo, com os novos valores de vazão de entrada, o que inviabilizaria, em termos práticos, a predição numérica.

Uma solução aproximada empregada é ajustar previamente cada fluido a montante separadamente, e recalcular as propriedades termodinâmicas da mistura resultante para uma EOS (Petroleum Experts, 2008), respeitando a proporção estequiométrica de cada componente (vazões de entrada no ponto de convergência) e utilizando regras de combinação (ou regras de mistura). Tal método tenta resolver o problema do reajuste da EOS a cada passo de tempo, tornando o ajuste da EOS “automático”.

Ajustar a EOS com esta técnica pode apresentar diferenças em função do tipo de petróleo que é misturado (óleo pesado, óleo leve, gás etc.) ou para o agrupamento proposto na EOS ajustada.

Neste trabalho, é realizada a simulação de misturas de petróleo, comparando o ajuste que pode ser implantado em uma simulação numérica, permitindo um fluxo contínuo de dados, com outras técnicas para ajuste de misturas. A comparação das EOS ajustadas é feita através de uma simulação *flash* que, em uma simulação composicional, é o elemento numérico que gera os dados de saída da composição das fases presentes e de suas respectivas propriedades. Tanto o equilíbrio, como as propriedades da mistura resultante e seus efeitos são avaliados.

1.1 Motivação

Situações em que um ponto de convergência com diferentes óleos é contemplado em um projeto de desenvolvimento estão se tornando recorrentes. Para simulações composicionais é

necessária, então, uma representação numérica da mistura resultante, dentro dos diversos tipos de simuladores que representam o sistema de produção.

Sendo recente este tema de estudo, há uma escassez de trabalhos técnicos na área, devido à questão da mistura do fluido ser crítica para modelos composicionais, que não são modelos tão utilizados como modelos que usam a abordagem *Black-oil*. Por consequência, gerando uma menor demanda de trabalhos técnicos.

O aparecimento de soluções comerciais que são capazes de fazer um ajuste “automático” para uma EOS, a cada passo de tempo, desperta o interesse em avaliar a eficácia, para diferentes situações e tipos de petróleo.

A motivação principal deste trabalho é comparar o método de ajuste com regras de combinação, com outras técnicas empregadas para simular uma mistura de fluidos. Avaliando se o método de ajuste é capaz de alcançar resultados similares a outras técnicas ou dados experimentais.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o uso das regras de combinação na simulação de misturas a partir dos dados PVT dos fluidos constituintes, avaliando se as propriedades termodinâmicas geradas, com este artifício, são capazes de alcançar resultados similares a outros métodos de ajuste para simular misturas. A avaliação é feita simulando três misturas, com diferentes agrupamentos, a partir dos dados PVT dos fluidos misturados. Esses ajustes são avaliados em função de uma simulação termodinâmica, gerando propriedades que servem como dado de entrada em uma série de simulações numéricas de escoamento. As principais etapas do trabalho são:

- Elaborar metodologias de ajuste a partir de técnicas para simular uma mistura de dois petróleos e compará-las com o método de ajuste com regras de mistura e com o dado experimental da mistura (quando disponível);
- Avaliar através da simulação *flash* o comportamento termodinâmico das misturas, e possíveis diferenças nos resultados do equilíbrio de fases em cada método;

- Avaliar o efeito da variação das propriedades críticas e dos coeficientes de interação binária ajustados nas variáveis de saída da simulação *flash*, que alimentam as simulações de escoamento composicionais.

1.3 Descrição da dissertação

Este trabalho está dividido em seis capítulos. No Capítulo 1 apresenta-se de forma breve o tema proposto citando sua importância dentro da simulação numérica e da engenharia de petróleo. Além da motivação e objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, é colocada a fundamentação teórica necessária para entendimento do estudo descrito ao longo da dissertação, fundamentos como: EOS, análises PVT, equilíbrio termodinâmico etc. Pela escassez de trabalhos sobre o tema, as poucas referências encontradas foram acrescentadas neste capítulo.

No Capítulo 3, são apresentados os métodos de ajuste propostos, descrevendo suas particularidades e diferenças.

No Capítulo 4, são apresentados os conjuntos de dados PVT de cada constituinte das três misturas propostas, mostrando suas principais propriedades e condições empregadas na simulação das misturas.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados e as discussões das misturas propostas nos diferentes métodos de ajuste. Além da análise de algumas propriedades termodinâmicas que podem afetar nos ajustes.

Por fim, no Capítulo 6, são relatadas as principais conclusões do autor com base nos resultados obtidos, além de sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados fundamentos e conceitos importantes para a realização deste trabalho, como a representação termodinâmica de uma mistura de hidrocarbonetos, a caracterização de frações pesadas do petróleo e métodos para simular misturas de diferentes óleos e gases.

2.1 Representação do comportamento de fases de uma mistura de hidrocarbonetos com equação de estado e análises PVT.

As propriedades dos fluidos são tão importantes quanto às propriedades geológicas para o desenvolvimento de um campo de petróleo. A partir do comportamento termodinâmico dos fluidos e de suas propriedades físico-químicas é possível avaliar e simular condições de exploração e auxiliar na prevenção de problemas operacionais como: corrosão, parafinas, hidratos, precipitação de líquido em zonas completadas para produção de gás etc.

O petróleo percorre um caminho com variações de pressão e temperatura até chegar à superfície. Essas variações de pressão, e mais raramente temperatura, ocorrem também dentro do próprio reservatório à medida que os fluidos vão sendo produzidos ou por um reservatório que apresente gradientes de temperatura. Todas essas variações podem gerar um sistema multifásico, à medida que o fluido alcance as condições de ponto de bolha ou ponto de orvalho. Essas variações do sistema podem ser representadas numericamente através de leis e princípios da termodinâmica.

Portanto, para prever o comportamento termodinâmico de fases em diferentes pressões e temperaturas, pode-se fazer uso de uma EOS. Em misturas complexas de hidrocarbonetos, como o petróleo, geralmente emprega-se uma equação de estado cúbica; no entanto as EOS apresentam limitações na predição de mistura complexas quando não se conhece exatamente a composição e as frações dos componentes na mistura. É o caso do petróleo que apresenta um imenso número de

componentes, tornando difícil e imprecisa a representação com dados tabelados de literatura, devido à grande quantidade de isômeros e sua difícil quantificação.

Com isso é necessário um ajuste da EOS com análises PVT, que são um conjunto de ensaios de laboratório que fornecem dados sobre: a composição, pressão de saturação nas condições do reservatório e algumas propriedades volumétricas e reológicas. As análises PVT permitem assim a calibração da EOS com os dados experimentais, através das propriedades físicas e críticas de cada componente e de uma fração pesada que represente todas as frações não determinadas pelas técnicas de laboratório.

2.2 Equações de estado

As equações de estado são funções que relacionam pressão, volume e temperatura. Elas descrevem o volume e o comportamento de fases de componentes puros e misturas, requerendo apenas as propriedades críticas e o fator acêntrico ω , de cada componente presente no sistema. A mesma equação pode ser usada para calcular as propriedades de todas as fases, garantindo a consistência nos processos do reservatório que se aproximem das condições críticas (isto é, injeção de gás miscível, depleção de reservatórios de óleo volátil e gás condensado). Problemas envolvendo comportamento multifásico, tal como injeção de gás carbônico – CO₂ a baixa temperatura, podem ser representados com uma equação de estado e até mesmo o comportamento de fases entre água e hidrocarbonetos pode ser previsto com exatidão através do uso de uma EOS cúbica (adaptado de Whitson e Brulé, 2000).

O comportamento volumétrico é calculado por meio da resolução de uma EOS cúbica, definida na Equação 2.1 e usualmente expressa em termos do fator de compressibilidade Z,

$$Z^3 + A_2 Z^2 + A_1 Z + A_0 = 0 \quad (2.1)$$

onde as constantes A_0 , A_1 e A_2 são funções de pressão, temperatura e composição na fase.

O fator de compressibilidade, Z, pode ser definido pela Equação 2.2:

$$Z = \frac{pV}{RT} \quad (2.2)$$

onde p é pressão, V é o volume molar, R é a constante universal dos gases e T a temperatura.

O equilíbrio de fases é calculado com uma EOS satisfazendo a condição de equilíbrio químico. Para um sistema bifásico, o potencial químico de cada componente na fase líquida $\mu_i(x)$ deve ser igual ao potencial químico de cada componente na fase gasosa $\mu_i(y)$, $\mu_i(x) = \mu_i(y)$. O potencial químico é geralmente expresso em termos de fugacidade, f_i , onde $\mu_i = RT \ln f_i + \lambda_i(T)$ e $\lambda_i(T)$ são termos constantes que são retirados na maior parte dos problemas. É possível demonstrar que a condição $\mu_i(x) = \mu_i(y)$ é satisfeita pela restrição de igualdade das fugacidades $f_{Li} = f_{Vi}$, onde a fugacidade é dada por (adaptado de Whitson e Brulé, 2000):

$$\ln \phi_i = \ln \frac{f_i}{y_{ip}} = \frac{1}{RT} \int_v^{\infty} \left(\frac{\partial p}{\partial n_i} - \frac{RT}{V} \right) dV - \ln Z \quad (2.3)$$

onde n_i é o número de moles de cada componente.

Integrado a todo o processo de resolução é necessário um balanço de massa que defina o equilíbrio das fases através das frações molares de cada componente.

Todos os cálculos são resolvidos através de um procedimento de tentativa e erro. Porém, sem a aplicação de nenhum critério de convergência a resolução pode incorrer em um trabalho penoso e demorado. Desta maneira, o uso de um método iterativo que convirja e direcione os valores iniciais para resolução otimiza o processo, facilitando a obtenção de respostas mais rápidas e com maior exatidão.

2.2.1 Equações de estado cúbicas

As equações de estado cúbicas são as mais utilizadas na indústria do petróleo e são derivadas de uma equação desenvolvida por van der Waals (1873).

van der Waals baseou seus estudos em modelos anteriores, que foram concebidos com base no comportamento dos gases ideais, como a equação de Clapeyron :

$$p = \frac{RT}{V} \quad (2.4)$$

Para condições em que os gases reais apresentam comportamento semelhante aos gases ideais (baixa pressão e altas temperaturas), a equação consegue reproduzir dados experimentais.

Entretanto, variando as condições de pressão e temperatura, os modelos tornam-se incapazes de descrever fenômenos como a condensação dos gases e a baixa compressibilidade de líquidos e sólidos.

Devido a essas limitações van der Waals propôs uma nova equação, com base na equação de Clapeyron (Equação 2.4), que contempla a transição entre fases líquidas e gasosas (Equação 2.5):

$$p = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2} \quad (2.5)$$

O primeiro termo da equação é conhecido como termo de repulsão das moléculas $RT/V - b$, onde a constante b é o valor limite de volume molar (também conhecido como covolume), cuja funcionalidade é a correção do volume ocupado pelas moléculas. Já o segundo termo a/V^2 , é o termo de atração que corrige a pressão, onde a constante a expressa as forças de dispersão a curta distância (adaptado de Bezerra, 2006).

Após o surgimento da equação de van der Waals muitas modificações foram propostas, com o intuito de melhorá-la. Geralmente estas modificações estão concentradas no termo de atração e no valor da constante b .

Em 1949, Redlich e Kwong propuseram um novo rearranjo para equação de van der Waals:

$$p = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{\sqrt{T}V(V + b)} \quad (2.6)$$

Esse novo rearranjo e a adição de \sqrt{T} têm por objetivo melhorar as previsões de volume molar da fase líquida e da pressão de vapor. Essas modificações foram bem sucedidas, e a equação foi considerada por alguns autores como a primeira equação de estado moderna.

Em 1972, Soave sugeriu a substituição do termo a/\sqrt{T} por outro termo dependente da temperatura, denominado a_T , com a finalidade de conseguir uma melhor previsão da pressão de vapor em compostos com fortes interações moleculares. Este termo foi idealizado após a observação de dados de pressão de vapor de várias substâncias, que levaram à obtenção de uma relação linear entre os termos, $(a/a_c)^{0.5}$ e $(T/T_c)^{0.5}$, chegando à Equação 2.7:

$$a_T = a_c \alpha \quad (2.7)$$

onde a_c é o valor de a_T na temperatura crítica, e α é um termo adimensional dependente da temperatura, no qual o valor é igual a 1 na temperatura crítica.

A equação com a introdução do termo a_T ficou conhecida como a equação de Soave-Redlich-Kwong – SRK.

A equação de SRK ainda apresentava limitações, em particular para previsões de massa específica. Em 1976, Peng e Robinson – PR sugerem modificar o termo de atração proposto por SRK, a fim de melhorar as predições (Equação 2.8):

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a_T}{V(V+b) + b(V-b)} \quad (2.8)$$

Dois anos mais tarde, em 1978, Peng e Robinson sugeriram nova modificação, desta vez na expressão m e no valor do fator acêntrico, $\omega > 0,49$; recomendados para compostos pesados. As constantes relacionadas à equação de PR são representadas por:

$$a = 0,45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \alpha \quad (2.9)$$

$$b = 0,07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (2.10)$$

$$\alpha = [1 + m(1 - T_r^{0,5})]^2 \quad (2.11)$$

m para PR 1976:

$$m = 0,37464 + 1,54226\omega - 0,26992\omega^2 \quad (2.12)$$

m para PR 1978:

$$m = 0,3796 + 1,485\omega - 0,1644\omega^2 + 0,01667\omega^3 \quad (2.13)$$

Esta modificação diminui um pouco o fator de compressibilidade para substâncias puras de 0,333 (calculado com a equação de SRK), para 0,307. Apesar da diminuição, os valores

continuaram altos se comparados a valores experimentais de compressibilidade crítica de hidrocarbonetos, que não chegam à ordem de 0,290. Portanto, para previsões de massa específica da fase líquida tanto SRK como PR apresentam erros consideráveis, se comparados a valores experimentais. Esses erros, posteriormente, são mitigados através do estudo de Peneloux, abordado no Item 2.2.2.

Apesar de novos avanços na descrição do equilíbrio termodinâmico em um sistema multifásico, as equações cúbicas de PR e SRK continuam a ser largamente empregadas, principalmente em programas comerciais de simulação numérica. Estas duas equações diferem em alguns aspectos e resultados finais, mas no geral fornecem precisão similar para equilíbrio líquido-vapor e previsões volumétricas razoáveis para as fases líquido e vapor; quando usada a translação de volume.

2.2.2 Translação de volume

Em 1982, Peneloux apresenta o conceito de translação de volume (também conhecido como *volume shift*), com o propósito de melhorar a previsão de massa específica da fase líquida nas equações de estado cúbicas.

A translação de volume é representado pela letra c , sendo usado para corrigir o volume molar e a constante b das EOS cúbicas (Equações 2.14 e 2.15):

$$V = V^{EOS} - c \quad (2.14)$$

$$b = b^{EOS} - c \quad (2.15)$$

A translação de volume não tem influência no equilíbrio líquido-vapor, influenciando somente o volume molar e a densidade das fases. Uma implicação interessante é o fato da translação de volume poder apresentar um determinado valor que assegure concordância com os valores experimentais, o que possibilitaria ser um parâmetro de ajuste em processo de calibração da EOS. A expressão para a determinação de c é recomendada tanto para hidrocarbonetos como para não-hidrocarbonetos mais leves que C_7 .

Translação de volume para EOS–SRK:

$$c = \frac{0,40768RT_C(0,29441 - Z_{RA})}{P_C} \quad (2.16)$$

Translação de volume para EOS–PR

$$c = \frac{0,50033RT_C(0,25969 - Z_{RA})}{P_C} \quad (2.17)$$

onde Z_{RA} é o fator de compressibilidade de Rackett, expressado por:

$$Z_{RA} = 0,29056 - 0,08775\omega \quad (2.18)$$

2.2.3 Regras de mistura

Por se tratar de um sistema multicomponente as constantes a e b , da EOS cúbica, devem ser representadas por um único valor que englobe todas as constantes a e b , referentes a cada componente do sistema. As regras de mistura são usadas, como um artifício matemático, que representa cada valor de constante de cada componente, em apenas uma:

$$b = \sum_{i=1}^N y_i b_i \quad (2.19)$$

$$a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_i y_j a_{ij} \quad (2.20)$$

$$e \quad a_{ij} = \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij}) \quad (2.21)$$

onde K_{ij} é o coeficiente de interação binária (ou *binary interaction coefficient* – BIC), apresentando, geralmente, valores diferentes de zero para pares hidrocarboneto-hidrocarboneto; e a_{ij} é a constante a para um par qualquer de componentes no sistema.

Os valores dos coeficientes de interação binária são obtidos ajustando a EOS cúbica com dados de equilíbrio líquido-vapor de sistemas binários.

2.3 Análises PVT

As análises PVT englobam uma série de técnicas e ensaios para caracterizar os fluidos provenientes do reservatório. Conforme citado no Item 2.1, essa caracterização é de suma importância para calibrar ou validar uma equação de estado.

Dependendo do fluido a ser analisado, pode-se seguir diferentes procedimentos ou rotinas de análises, isto é, acrescenta-se ou retira-se um ensaio conforme o tipo de fluido a ser analisado (óleo pesado, gás retrógrado, gás seco etc).

Nos itens seguintes há uma descrição sobre os principais ensaios que geraram dados PVT para este estudo.

2.3.1 Teste do Separador

A finalidade do teste do separador é a de obter uma ideia inicial sobre as quantidades volumétricas relativas de gás e óleo produzidos de um reservatório (adaptado de Pedersen e Christensen, 2007).

O teste é conduzido em uma célula fechada (separador), em condições de pressão e temperatura geralmente inferiores as condições do reservatório. A amostra é separada em duas fases: líquida e vapor (primeiro estágio). O líquido é conduzido a uma segunda célula em condições inferiores de pressão e temperatura, em relação ao primeiro estágio, gerando novamente duas fases. Esta sequência prossegue até as condições determinadas como condições padrão do separador. O mesmo procedimento é aplicado para o gás do primeiro separador. Normalmente não são necessários mais que três estágios de separação, para alcançar as condições padrão do separador.

2.3.2 Liberação diferencial

A liberação diferencial (ou *differential liberation* – DL) foi concebida para simular um processo de depleção dentro do reservatório.

No ensaio, a amostra é submetida a diversos estágios decrescentes de pressão dentro de uma célula, começando por um valor de pressão um pouco acima da pressão de saturação do

reservatório. Com a depleção da amostra, o ponto de saturação é alcançado no momento da formação de uma segunda fase (fase gasosa), a partir desse ponto começam os estágios de liberação, onde o gás é retirado e medido, e então um novo estágio é iniciado.

Um esquema de como é executado o ensaio pode ser observado na Figura 2.1, onde no primeiro estágio há um decaimento da pressão de bolha p_b , até a pressão p_1 . Após o sistema alcançar o equilíbrio, o gás é retirado, à pressão constante p_1 . Afere-se o volume de gás retirado e realiza-se um novo estágio (decaimento da pressão de p_1 para p_2).

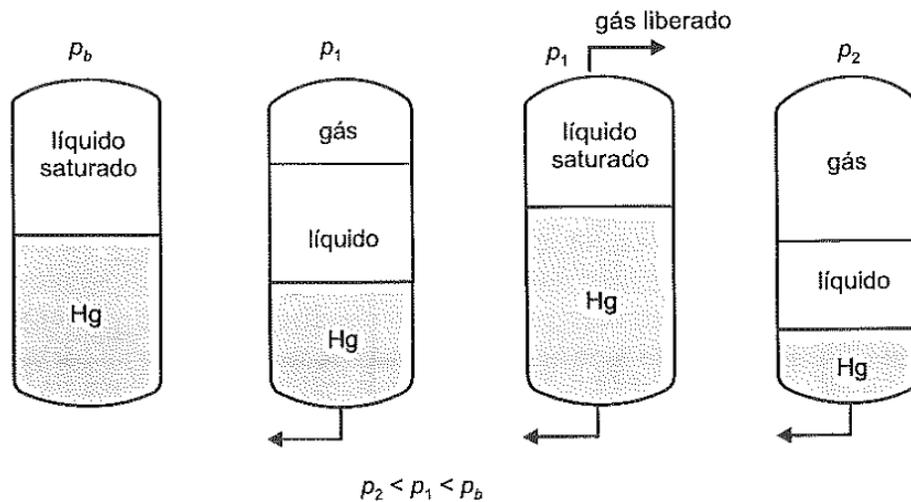


Figura 2.1 - Estágios de uma liberação diferencial. Fonte: Rosa et al., 2006.

Em uma DL são obtidos o volume de líquido no interior da célula, o volume de gás liberado em cada estágio de pressão e o volume total do interior da célula. Com isso, podem ser determinados o encolhimento do líquido, a quantidade de gás dissolvido em função da pressão e as propriedades do gás liberado em cada estágio. Além disso, pode-se determinar a razão de solubilidade R_s , o fator volume de formação B_o , e o fator volume de formação do gás B_g (adaptado de Rosa, 2006).

2.3.3 Expansão a composição constante

A expansão à composição constante (ou *constant composition expansion* – CCE) é um ensaio que fornece a pressão de saturação nas condições do reservatório e o volume relativo

$RV = V / V_{sat}$, onde V é o volume na célula em uma pressão qualquer e V_{sat} é o volume na pressão de saturação. Para gás condensado, o ensaio fornece o volume de líquido formado abaixo do ponto de orvalho (também conhecido como *liquid dropout*).

O experimento consiste em expandir o volume de uma célula fechada com o fluido do reservatório em estudo (óleo ou gás condensado). Onde se começa a uma pressão acima da pressão estática e à medida que o volume da célula vai aumentando a pressão vai caindo. Essa queda de pressão é realizada em variações graduais, no qual cada volume relativo é registrado, sendo também observado em que valor de pressão ocorre o aparecimento de uma segunda fase.

2.3.4 Depleção a volume constante

A depleção a volume constante (ou *constant volume depletion* – CVD) é um ensaio projetado para reservatórios com gás condensado ou óleos voláteis que produzem por depleção, com o objetivo de adquirir conhecimento sobre as mudanças, ao longo do tempo, das propriedades PVT dos fluidos produzidos.

O ensaio fornece através da variação de pressão conhecimento sobre as alterações das propriedades PVT, de campos com gás condensado ou óleo volátil, em função do tempo.

No ensaio é usada uma célula similar ao ensaio CCE, mas com uma válvula no topo que permite uma depleção através da retirada de gás durante o experimento. Um esquema sobre o ensaio pode ser observado na Figura 2.2. O experimento é iniciado no ponto de saturação (ou no ponto de orvalho), em um volume V_I , que é igual ao volume de saturação V_{sat} . O volume dentro da célula é expandido, diminuindo a pressão e formando duas fases distintas. O volume do sistema bifásico gerado é posteriormente reduzido para o mesmo volume de saturação V_{sat} , através da liberação do excesso de gás pela válvula de topo. Esse ciclo equivale a um estágio. Outros estágios são executados na sequência e em cada estágio são registrados todos os volumes de gás esgotado, sendo possível, através de uma EOS, calcular o fator de compressibilidade na célula.

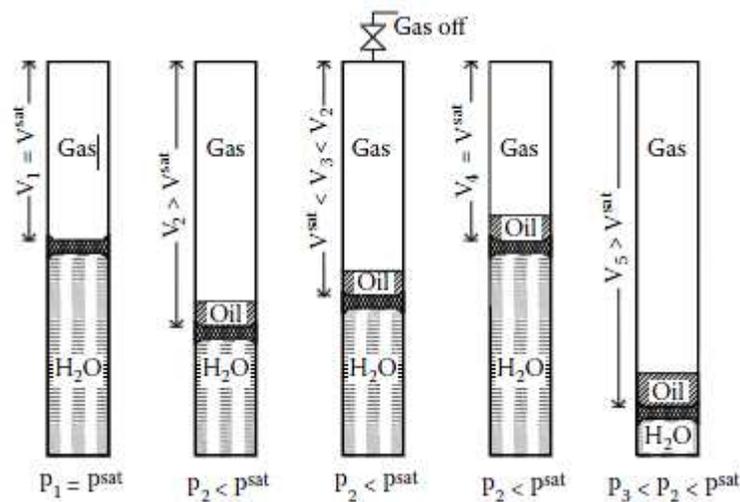


Figura 2.2 - Esquema de uma depleção a volume constante. Fonte: Pedersen et al., 2007.

2.4 Caracterização da fração pesada

Para os cálculos de equilíbrio de fases através de uma EOS são necessários alguns parâmetros referentes a cada componente, tais como: propriedades críticas, fator acêntrico, peso molecular e os coeficientes de interação binária. Com as técnicas de identificação e separação disponíveis, não é possível identificar todos compostos presentes, que podem chegar à ordem de centenas ou milhares. Mesmo que a identificação fosse possível, as propriedades críticas e outros parâmetros de compostos mais pesados que C_{20} não seriam conhecidos com precisão. Esse problema pode ser resolvido com uma caracterização aproximada da fração pesada, através de métodos experimentais e matemáticos (adaptado de Whitson e Brulé, 2000).

A caracterização é geralmente feita para compostos com sete ou mais carbonos (C_{7+}), onde o agrupamento das frações pesadas pode ser feito da seguinte maneira:

1. Dividindo a fração C_{7+} em um número de frações com composições molares conhecidas.
2. Definindo o peso molecular, densidade e ponto de bolha de cada fração C_{7+} .
3. Estimando a propriedades críticas e o fator acêntrico de cada fração C_{7+} , além dos coeficientes de interação binária, para uma EOS a ser usada.

As análises experimentais são a melhor maneira de se obter dados confiáveis da fração pesada, usando para isso técnicas de destilação a alta temperatura e técnicas cromatográficas.

Um método de destilação comumente utilizado é o ponto de bolha verdadeiro (ou *true boiling point* – TBP). Este método consiste em separar, por pontos de bolha médios, frações ou cortes com características similares (mesmo número de carbonos). Segundo Mello (2011), por existir um intervalo limitado de massa molecular dentro de uma fração com mesmo número de carbonos, sua massa pode ser medida com maior precisão do que a massa molecular da amostra de óleo original como um todo. O método TBP fornece dados de quantidades molares, quantidades mássicas, densidade, peso molecular e ponto de ebulição de cada corte.

A cromatografia gasosa – CG é um método usado para simular a destilação. Ela está fundamentada na migração diferencial dos componentes de uma mistura, que ocorre devido a diferentes interações entre duas fases imiscíveis: a fase móvel e a fase estacionária (Degani et al, 1998). A vantagem da CG em relação ao TBP é a pequena quantidade de amostra requerida, entretanto o método só fornece a massa das frações em função do número de carbonos. Os resultados ainda podem ser calibrados com dados de TBP fornecendo indiretamente valores de algumas propriedades físicas das frações individuais.

Após definir, dentro da fração pesada, as frações molares e propriedades como: peso molecular, densidade e ponto de bolha; deve-se também estimar as propriedades críticas e o fator acêntrico de cada fração, pois tais propriedades são também requeridas no ajuste da EOS. Existe uma série de correlações que estimam as seguintes propriedades: temperatura crítica, pressão crítica, volume crítico e fator acêntrico. Correlações como a de Kesler-Lee (1975 e 1976), Riazi-Raubert (1980) e Twu (1984) estão presentes na maioria dos programas comerciais de simulação termodinâmica e estão descritas no Apêndice A.

2.5 Ajuste de uma equação de estado cúbica através de uma regressão não-linear

No Item 2.2, foi descrito como uma EOS cúbica pode prever o equilíbrio das fases, necessitando, para isso, de uma série de propriedades críticas e físicas de cada componente, além da própria composição da mistura e dos coeficientes de interação binária. Tais propriedades são obtidas através de métodos experimentais e matemáticos, descritos no Item 2.4.

A capacidade de predição de uma EOS está diretamente relacionada com a qualidade dos dados experimentais obtidos. Dentro deste contexto, a fração pesada tem sua caracterização limitada, sendo as propriedades críticas fornecidas não mais que valores estimados através de correlações propostas por diversos autores (Apêndice A).

Essa incerteza intrínseca na fração pesada de um petróleo afeta a qualidade da predição, gerando diferenças entre os dados calculados e os dados obtidos dos ensaios PVT, descritos no Item 2.3. Torna-se então necessário um ajuste a fim de reduzir essa diferença, este ajuste incidirá em parâmetros da EOS como as propriedades críticas, fatores de correção e constantes.

O ajuste pode ser feito através de um processo manual de tentativa e erro, mas por ser um problema que apresenta inúmeras variáveis a resolução torna-se lenta e dispendiosa. Outra maneira mais eficaz de promover o ajuste é através de uma regressão não-linear, método que pode ser integrado a uma rotina computacional e que já é encontrado como parte de pacotes comerciais de ajuste de EOS, para uso em simuladores numéricos.

2.5.1 Regressão não-linear e função-objetivo

Devido à grande quantidade de parâmetros a serem ajustados em uma EOS, foram propostos métodos que automatizassem em parte, este processo. A regressão não-linear é um método de ajuste que se encaixa para o problema proposto, pois alguns parâmetros a serem ajustados dependem de uma ou mais variáveis que são comumente independentes.

A função-objetivo $f(x)$ é o objeto da otimização, que para este caso é a diferença entre os dados obtidos experimentalmente e os calculados pela EOS e é representada pela Equação 2.22:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{r_j}{w_j} \right)^2 \quad (2.22)$$

onde n é o número de observações experimentais usadas na regressão, w_j é o peso atribuído para observação j e r_j é o resíduo para observação j (definido pela Equação 2.23),

$$r_j = \frac{y_j - C_j}{y_j} \quad (2.23)$$

onde y_j é o valor observado j (experimental) e C_j o valor calculado j .

Com a implementação de rotinas de ajuste em programas comerciais de simulação termodinâmica, vários métodos de regressão não-linear foram propostos com base no método dos mínimos quadrados, destacando-se os trabalhos de Coats e Smart (1986), Dennis (1981) e Watson e Lee (1981).

2.5.2 Parâmetros de ajuste

Os parâmetros de ajuste de cada componente são as propriedades críticas, fator acêntrico, peso molecular e coeficientes de interação binária; acrescentam-se a esses, a translação de volume e as constantes Ω_a e Ω_b . Como a fração pesada é o componente que apresenta maior incerteza, por consequência seus parâmetros acabam tornando-se os principais alvos de ajuste. Além dos parâmetros da fração pesada, os coeficientes de interação binária no geral são instrumentos de ajuste para regressão, principalmente entre pares de frações leves com frações pesadas e de compostos inorgânicos, em quantidades relevantes, com alguns hidrocarbonetos presentes.

Existem diversos métodos de ajuste como Coats e Smart (1986), Pedersen et al(1989) e tantos outros; que na verdade são um conjunto de recomendações que diferem em alguns pontos e são específicos para uma EOS cúbica.

No geral, recomenda-se estimar as propriedades críticas da fração pesada por Twu (1984) ou Kesler-Lee (1976) e aplicar o volume da translação na EOS. Esses parâmetros são justamente os principais parâmetros de regressão. No processo de ajuste é preferível tentar ajustar a EOS, primeiramente, através das propriedades críticas e se necessário usar translação de volume, peso molecular e os coeficientes de interação binária.

Outra recomendação importante é ajustar as propriedades reológicas após o ajuste das propriedades críticas e do peso molecular, pois as correlações de viscosidade dependem desses parâmetros.

2.5.3 Agrupamento

O cálculo do equilíbrio de fases através de uma EOS cúbica é um procedimento que faz parte da simulação numérica composicional, sendo utilizado em áreas como reservatórios e malhas de produção. A resolução de um sistema composicional é feita dentro de um processo iterativo, em que cada componente do fluido é um dado de entrada. Isso ocasiona em um aumento considerável do esforço computacional, em relação a um modelo *Black-oil*, podendo tornar o modelo inviável para uma análise rotineira.

Uma maneira de contornar o alto tempo computacional é através do agrupamento (ou *lumping*) dos componentes. Segundo Whitson e Brulé (2000), um compromisso entre precisão e o número de componentes deve ser feito de acordo com o processo simulado. O agrupamento pode ser feito por diversos critérios sendo os mais comuns por componentes ou pesos moleculares.

No que diz respeito ao agrupamento por componentes, existem algumas recomendações aplicáveis na maioria dos casos, como: agrupar nitrogênio – N₂ com metano – CH₄, agrupar CO₂ com etano – C₂H₆ e isômeros com mesmo número de carbonos. Segundo Whitson e Brulé (2000), um agrupamento de cinco a oito componentes deve ser o suficiente para representar praticamente qualquer processo dentro do reservatório.

2.5.4 Regras de combinação

Quando se agrupa os componentes em pseudocomponentes suas propriedades devem ser calculadas em função dos componentes geradores. Existem séries de regras de combinação (alguns autores também denominam como regras de mistura) que calculam essas propriedades.

No agrupamento de algumas propriedades, uma simples média ponderada como a regra de Kay (1936) é suficiente. Entretanto, para propriedades como pressão crítica, volume crítico e temperatura crítica, Lee-Kesler (1975) propôs um conjunto de regras de combinação que fornecem resultados mais precisos.

$$p_c = \frac{Z_c RT_c}{V_c} \quad (2.24)$$

$$V_c = \left[\frac{1}{8} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_i z_j (V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3})^3 \right] / \left(\sum_{i \in I} z_i \right)^2 \quad (2.25)$$

$$T_c = \left[\frac{1}{8V_{cl}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} z_i z_j (T_{ci} + T_{cj})^{1/2} (V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3})^3 \right] \quad (2.26)$$

Tanto o termo “regra de combinação” como “regra de mistura” não são termos consagrados na literatura, sendo por vezes designados como o mesmo tipo de cálculo. No presente trabalho as regras de mistura são usadas para calcular os parâmetros da EOS, sendo específicas para uma EOS de composição variável. Já as regras de combinação calculam as propriedades críticas de um único componente a partir de um grupo de componentes de proporção fixa.

2.6 Métodos para caracterização de uma mistura de fluidos

No Item 2.5 foi descrito como ajustar ensaios PVT de um fluido, em uma EOS, para a sua representação numérica. Com a EOS ajustada é possível fazer previsões do comportamento de fases desde o reservatório até as malhas de produção.

No entanto, há situações na cadeia de produção, em que diferentes fluidos são misturados, como em *manifolds* e separadores, injeção de fluidos no reservatório e completações de um poço em diferentes camadas ou reservatórios. A mistura resultante é de difícil representação, pois quase sempre não se tem a análise de laboratório da mistura resultante, sendo necessário fazer o ajuste com os dados disponíveis, ou seja, os dados PVT de cada fluido constituinte da mistura.

Existem algumas técnicas para representar uma mistura de fluidos em uma simulação, sendo as principais descritas abaixo:

2.6.1 Regras de combinação em misturas

Como visto anteriormente, quando os componentes de uma mistura de hidrocarbonetos são agrupados, a principal finalidade é simplificar a descrição e os cálculos que envolvem o fluido a ser ajustado. Uma maneira de se agrupar é através do uso das regras de combinação tendo como base o número de carbonos de cada componente, estimando assim as propriedades críticas e

outros parâmetros dos pseudocomponentes gerados. Este artifício pode ser estendido para a mistura de dois ou mais fluidos, mais especificamente no agrupamento de pseudocomponentes.

Os pseudocomponentes de cada fluido podem ser agrupados por dois métodos de ajuste: o primeiro fazendo um ajuste simultâneo e atribuindo um percentual de fração molar a cada fluido constituinte da mistura (alguns simuladores comerciais permitem somente o ajuste de dois fluidos simultaneamente); o segundo método é ajustar em separado cada fluido e por fim usar as regras de combinação para gerar um único fluido, através do agrupamento, em pares, dos pseudocomponentes ajustados. As duas maneiras diferem em quando são aplicadas as regras de combinação, sendo tema deste estudo.

Ainda sobre os métodos de ajuste de uma mistura, através de regras de combinação, há de se enfatizar que o primeiro método, citado anteriormente, não permite que o ajuste seja usado em uma simulação numérica composicional, integrada ou não, que tenha mistura de fluidos, pois devido às variações de vazão no ponto de convergência, seria necessário um ajuste da mistura a cada passo de tempo, o que tornaria a simulação inviável. Para isso seria necessário aplicar o segundo método de ajuste citado, que por promover o ajuste em separado dos fluidos, permite automatizar o cálculo dentro de uma simulação, necessitando apenas alterações nas correntes de entrada, referentes a cada passo de tempo da simulação.

Para o perfeito agrupamento dos pares, os fluidos a serem misturados devem estar representados pelos mesmos pseudocomponentes, ou seja, as opções de agrupamentos devem ser as mesmas, seguindo as recomendações descritas no Item 2.5.3.

O uso das regras de combinação se faz necessário não somente para fração pesada, que é a fração de maior incerteza, mas também deve ser estendido para todas as outras frações. À medida que a EOS é ajustada com dados PVT, as propriedades termodinâmicas e reológicas vão adquirindo novos valores para cada componente. Como o ajuste de cada fluido é feito à parte, no final existem dois conjuntos de propriedades, com valores distintos; um exemplo pode ser observado na Tabela 2.1.

Esta metodologia, com as regras de combinação, é utilizada na simulação integrada composicional agrupando os componentes ou pseudocomponentes de cada petróleo em pares, e

tenta suprir a falta de dados PVT do fluido misturado, bem como incorporar a variação das correntes de entrada no ponto de convergência (Petroleum Experts, 2008).

Tabela 2.1 - Exemplo de um conjunto de algumas propriedades termodinâmicas de dois diferentes óleos (A e B).

Componente	Pressão Crítica (ÓLEO A)	Temperatura Crítica (ÓLEO A)	Fator Acêntrico (ÓLEO A)	Pressão Crítica (ÓLEO B)	Temperatura Crítica (ÓLEO B)	Fator Acêntrico (ÓLEO B)
C1-N2	45,351	190,305	0,00814	45,342	189,776	0,00834
CO2-C2	49,701	305,315	0,109	55,809	304,991	0,148
C3	41,900	369,800	0,152	41,900	369,800	0,152
iC4- nC4	37,090	420,528	0,189	37,045	420,014	0,188
iC5- nC5	33,355	464,932	0,239	33,347	465,383	0,240
C6	32,460	507,500	0,275	32,460	507,500	0,275
C7-C10	27,397	582,817	0,330	28,262	580,253	0,366
C11-C15	19,941	687,287	0,508	20,456	683,181	0,563
C16-C19	14,935	772,523	0,703	16,067	753,420	0,738
C20+	9,418	740,421	1,308	11,687	752,577	1,590

2.6.2 Weaved

Uma adaptação ou alternativa as regras de mistura é optar por não somar algumas frações, principalmente as frações pesadas, deixando-as para a simulação numérica composicional como componentes (ou pseudocomponentes) distintos. Este método de ajuste é conhecido como *weaved*, quando há a necessidade de se garantir que cada corrente mantenha propriedades importantes que são mascaradas caso ocorra o agrupamento dos componentes em questão (Pedersen et al, 2007).

Na Figura 2.3, há um exemplo de uma mistura de duas composições. Na Composição 1 existem os pseudocomponentes PSCa e PSCb, e na composição 2, PSC1 e PSC2. Quando misturados esses pseudocomponentes continuam existindo separadamente na representação final da mistura.

O *weaved* pode se tornar impraticável à medida que um novo petróleo entra na mistura, tornando a representação da mistura demasiadamente extensa.

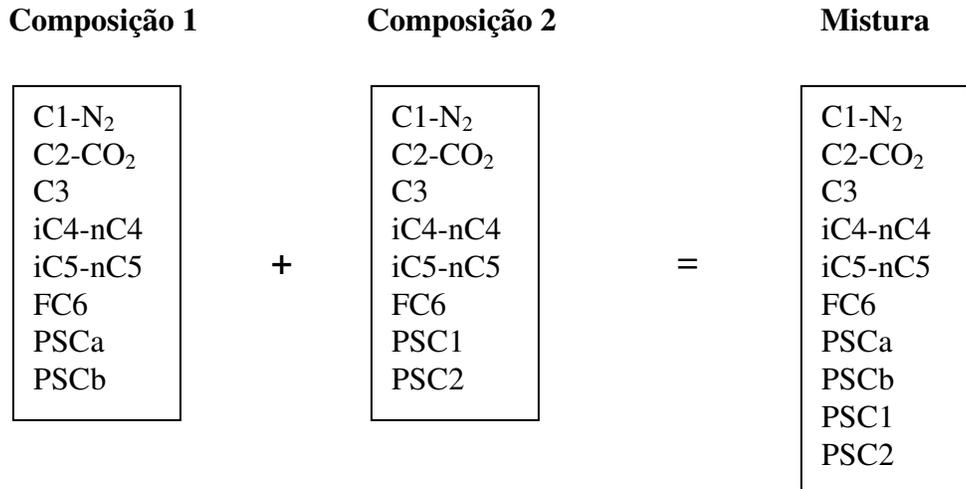


Figura 2.3 - Representação de uma mistura de dois óleos e suas respectivas composições.

2.6.3 *Splitting* através de uma distribuição molar gama

Baseado em um extenso banco de dados de composição de fluidos de reservatórios de diversas partes do mundo, Pedersen et al. (1983, 1984) propuseram que componentes com números de carbono acima C₆ apresentam uma relação linear entre o número aproximado de carbono (C_N) e do logaritmo da fração molar correspondente, z_N, representada na seguinte equação da reta (adaptado de Pedersen e Christensen, 2007):

$$C_N = A + B \ln z_N \quad (2.27)$$

onde A e B são constantes calculadas através de dados experimentais que adaptam a reta para um melhor ajuste.

A partir dessas observações foram criadas diversas metodologias para prever os componentes da fração pesada em função de uma distribuição molar, destacando-se os modelos de distribuição exponencial e distribuição gama.

A geração de componentes através de uma distribuição molar é conhecida como *splitting* que se faz necessário dentro de um processo de ajuste de uma EOS em alguns casos, com a finalidade de assegurar um número razoável de componentes no ajuste.

Apesar do modelo de distribuição gama ter flexibilidade para tratar fluidos de reservatórios que vão desde gases condensados até óleos pesados, a maioria dos reservatórios também podem ser caracterizados com uma distribuição molar exponencial sem afetar a qualidade das previsões da EOS. Nesse contexto, Whitson et al. (1989) propuseram talvez a melhor aplicação para modelos gama. Com a regra da quadratura gaussiana é possível tratar simultaneamente várias amostras de fluidos de reservatórios em uma única caracterização de fluido. Cada amostra de fluido apresenta diferentes propriedades no que se refere à fração pesada e quando o *splitting* é executado com as frações pesadas de cada fluido, o resultado dessa caracterização é um único conjunto de valores de pesos moleculares das frações derivadas das frações pesadas, com cada amostra preservando seu valor de fração molar na mistura (adaptado de Whitson e Brulé, 2000).

Segundo Whitson (1989), a distribuição molar pode ser definida por uma distribuição molar gama de três parâmetros, representada pela Equação 2.28:

$$p(M) = \frac{(M - \eta)^{\alpha-1} \exp\{-(M - \eta) / \beta\}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (2.28)$$

onde $p(M)$ é a função densidade de probabilidade, α e η são parâmetros de distribuição, Γ função gama e β é definido por

$$\beta = \frac{M_{c+} - \eta}{\alpha} \quad (2.29)$$

onde M_{c+} é a massa molecular da fração pesada.

A regra da quadratura gaussiana é usada para fornecer a representação discreta de uma distribuição gama continua usando N pontos de quadratura:

$$\int_0^{\infty} e^{-X} f(X) dX = \sum_{i=1}^N W_i f(X_i) \quad (2.30)$$

onde X_i são os pontos de quadratura, W_i são pesos determinados de uma classe polinômios de Laguerre (são tabelados para vários valores de N).

Aplicando no método de distribuição molar (Equação 2.28), encontra-se:

$$f(X) = \frac{(X)^{\alpha-1} (1 + \ln \delta)^\alpha}{\Gamma(\alpha) \delta^X} \quad (2.31)$$

Sendo o parâmetro δ representado por:

$$\delta = \exp\left(\frac{\alpha\beta^*}{M_{C+} - \eta} - 1\right) \quad (2.32)$$

Os valores de M_N , η , e β devem ser os mesmos para todas as amostras de fluido. Entretanto, valores de M_{C+} e α podem ser diferentes.

2.7 Cálculo do equilíbrio de fases

Como apresentado anteriormente as equações de estado cúbicas que derivam da equação de Van der Waals são largamente usadas para representar misturas de hidrocarbonetos na engenharia de petróleo, sendo as mais empregadas: Peng-Robinson e Soave-Redlich-Kwong. Apesar de algumas limitações, como nas predições de massa específica, elas fornecem bons resultados nas predições de volumes.

Após o uso dos métodos de caracterização de misturas, descritos nos itens anteriores, as EOS ajustadas servem como dado de entrada para a simulação *flash*, que calcula o equilíbrio de fases no modelo integrado. Um dos procedimentos mais usados é o de Rachford-Rice (Whitson, 2000), que consiste em uma equação que é resolvida por um processo iterativo para o cálculo do número de moles em cada fase

$$f(n_v) = \sum_{i=1}^N \frac{z_i (K_i - 1)}{1 + n_v (K_i - 1)} = 0 \quad (2.33)$$

onde as composições de cada fase são calculadas por:

$$x_i = \frac{z_i}{1 + (K_i - 1)n_v}, \quad i = 1 \dots n_c \quad (2.34)$$

$$y_i = \frac{K_i z_i}{1 + (K_i - 1)n_v}, i = 1 \dots n_c \quad (2.35)$$

Para obtenção do número de moles na fase vapor, n_v , atribui-se valores para as constantes de equilíbrio, K_i ou *K-values*. A estimativa de valor inicial é feita pela equação de Wilson.

$$K_i = \frac{\exp[5.37(1 + \omega_i)(1 - T_i^{-1})]}{P_{ri}} \quad (2.36)$$

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, é descrita a metodologia que propicia o ajuste de uma EOS dentro de uma simulação numérica composicional e o compara com outros três métodos de ajuste de uma mistura a partir dos dados PVT de seus constituintes. Além disso, há uma descrição de alguns testes que avaliam o impacto de algumas propriedades críticas e variáveis importantes nos ajustes. Por fim, é apresentado um fluxograma sobre todo o processo realizado para este trabalho.

3.1 Seleção de fluidos para simulação de uma mistura

Nesta primeira etapa iniciou-se uma seleção de dados PVT de fluidos que fossem considerados como óleo leve ou gás condensado seguindo alguns critérios sugeridos por McCain e Bridges (1994) e resumidos na Tabela 3.1.

Ao final da seleção foram escolhidos seis conjuntos de dados PVT, denominados:

- Well 4 (óleo);
- Mixture 2 (óleo);
- Óleo A (óleo);
- Óleo B (óleo);
- Campo Nigéria (gás condensado);
- SPE 3 (gás condensado).

Além dos conjuntos de dados PVT dos fluidos selecionados, conseguiu-se junto aos Laboratórios de Análise PVT do Centro de Pesquisa da Petrobras a realização da mistura do Óleo A com o Óleo B, nas condições desejadas para a comparação, tendo por fim uma análise PVT de uma mistura proposta (descrita no Capítulo 4).

3.2 Cálculos das propriedades termodinâmicas

Para a estimativa das propriedades termodinâmicas de cada componente presente nos fluidos, foi usado o banco de dados do simulador termodinâmico WINPROP da CMG (Computer Modeling Group). Nesse banco de dados os componentes leves até C5 têm suas propriedades provenientes do estudo de Katz e Firoozabadi (1978). Os demais componentes (até C45) têm propriedades como densidade, peso molecular e pontos de bolha retirados de Whitson et al (1983); as propriedades críticas e o fator acêntrico foram estimados pelas correlações de Kesler-Lee (1976 e 1977), disponíveis no Apêndice A.

As propriedades críticas e o fator acêntrico da fração pesada foram determinados através de valores de densidade e peso molecular provenientes das análises PVT, utilizando novamente as correlações de Kesler-Lee (1976 e 1977) para a obtenção dos valores.

Tabela 3.1- Indicadores para identificação de um tipo de petróleo. Fonte: Vieira, A. J. M. Transparências do Curso de Simulação Aplicada da Petrobras, 2011. Adaptado de: McCain e Bridges, 1994.

Identificação de fluidos						
Propriedade	<i>Black Oil</i>	Óleo volátil	Gás condensado	Gás úmido	Gás seco	Critério recomendado ?
RGO inicial (scf / STB)	1700 ± 200	1700 ± 200 até 3200	3200 até 15000	15000 até 120000	> 120000	Sim
RGO inicial (m ³ std / m ³ std)	300 ± 40	300 ± 40 até 570	570 até 3000	3000 até 21000	> 21000	Sim
API	< 45	> 45	> 45	até 70	até 70	Não
Cor	Escuro	Variada	Levemente colorido	Claro	Claro	Não
Mudança de fase	Bolha	Bolha	Orvalho	-	-	Sim
C ₇₊ (mol %)	> 20.0 ± 2.5	20 ± 2.5 até 12.8	12.8 até 4.0	4.0 até 0.7	< 0.7	Sim
B _o @ Psat (m ³ res / m ³ std)	< 2.0	> 2.0	-	-	-	Sim

3.3 Agrupamento de componentes

O agrupamento dos componentes é feito em duas situações: para a diminuição do número de componentes de um fluido, dentro de um processo de ajuste, diminuindo o tempo computacional quando em uma simulação numérica composicional; e para simular a mistura de

dois ou mais fluidos. Em ambas as situações foram usadas regras de combinação. Para o cálculo das propriedades dos componentes agrupados foram usadas as regras propostas por Kay (1936), com exceção do cálculo das propriedades críticas que foram obtidas através das regras de Kesler-Lee (1975) descritas no Item 2.5.4. Os agrupamentos foram montados observando critérios sugeridos por Whitson e Brulé (2000).

A caracterização dos óleos é comumente fornecida até C₂₀₊. A partir da composição original foram gerados três tipos diferentes de agrupamentos, apresentados na Figura 3.1.

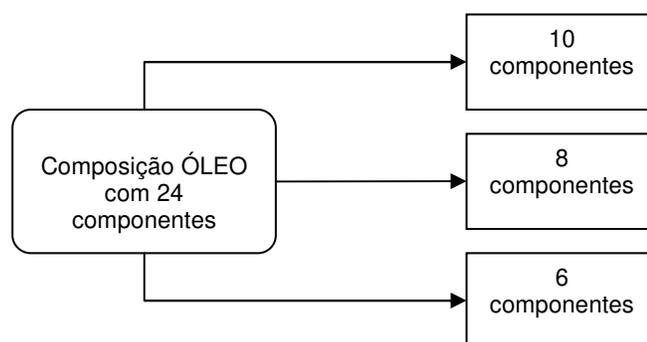


Figura 3.1 - Agrupamentos propostos para as representações com óleo.

A caracterização dos gases fornece a composição até C₇₊. A partir da composição original foram gerados dois tipos diferentes de agrupamentos, iniciados através de uma distribuição molar e apresentados na Figura 3.2.

3.4 Metodologia dos ajustes propostos

Para uma comparação com o método que usa regras de combinação, foram propostos outros três tipos de ajustes a partir de técnicas utilizadas para representar misturas de diferentes petróleos. Estas técnicas foram incorporadas às metodologias de ajuste gerando, ao final, quatro métodos de ajuste que serão descritos nos itens seguintes.

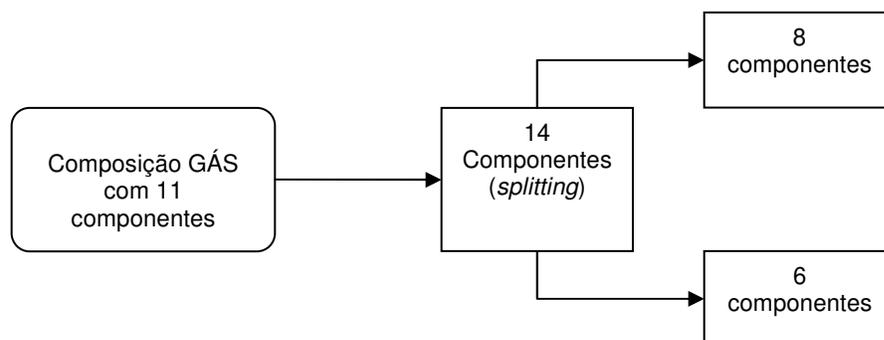


Figura 3.2 - Agrupamentos propostos para as representações com gás.

Como citado no Item 2.5, o processo de ajuste é feito através de uma regressão não-linear, a incorporação de diferentes artifícios ao ajuste gera por fim quatro métodos (foco deste estudo). Independentemente da técnica empregada se faz necessário uma tolerância entre os dados experimentais e o cálculo após a EOS ajustada, este trabalho usa como limites para um bom ajuste os erros sugeridos por Vieira (2011): 1% para pressão de saturação, 3% para razão de solubilidade e 2% para as demais propriedades.

3.4.1 Método de ajuste com regras de combinação

O ajuste é executado a partir de duas EOS pré-ajustadas por uma regressão não-linear. Cada fluido é ajustado inicialmente para a composição integral, sendo executadas duas rodadas de ajuste: uma para as propriedades termodinâmicas e outro para as propriedades reológicas. Com as duas EOS ajustadas é feito o agrupamento, de cada composição descrita, com as configurações sugeridas no Item 3.3.

Conforme citado no Item 2.6.1 o agrupamento deve ser o mesmo para os dois fluidos da mistura como observado na Tabela 2.1.

As propriedades de cada par agrupado são calculadas através das correlações citadas no Item 3.2, dentro de uma planilha de cálculo. Por fim é gerada uma única representação equivalente à mistura dos fluidos.

Os dados então são alimentados no simulador termodinâmico, onde é executada uma simulação *flash* na pressão e temperatura de interesse, gerando as composições em cada fase e

dados de saída como fração volume, fração molar, massa específica, peso molecular, viscosidade, fator de compressibilidade etc. Para fins de comparação, o *flash* também é executado antes do agrupamento. O resumo do método de ajuste pode ser observado na Figura 3.3.

3.4.2 Método de ajuste simultâneo

A regressão não-linear é feita simultaneamente com os dois fluidos, em um processo similar ao descrito no Item 3.4.1. Entretanto, por ser um ajuste simultâneo os parâmetros de ajuste que incidem sobre o primeiro fluido incidem também sobre o segundo fluido, ficando independentes apenas os pesos atribuídos aos dados PVT de cada fluido.

Na etapa do cálculo do equilíbrio de fases, é possível determinar as proporções de entrada dos fluidos na mistura em função das correntes e da composição de cada fluido, ou seja, no ponto de convergência é possível simular, por exemplo, uma mistura de 80% do óleo A com 20% do óleo B.

A diferença do método de ajuste com as regras de mistura (Item 3.4.1), em relação ao ajuste simultâneo, está no fato que é possível usar qualquer parâmetro de ajuste em apenas um fluido se for necessário. O resumo do método de ajuste pode ser observado na Figura 3.4.

3.4.3 Método de ajuste simultâneo com *splitting*

Seguindo o mesmo procedimento do método de ajuste simultâneo acrescenta-se uma etapa anterior de *splitting* usando a regra da quadratura Gaussiana a partir de uma distribuição gama. Com a aplicação da metodologia descrita no Item 2.6.3 é possível gerar um único conjunto de componentes (antes do ajuste), a partir das frações pesadas de cada fluido a ser misturado. Requer-se para isso, valores de peso molecular, densidade e fração molar de cada fração pesada.

Após o *splitting* é necessária uma etapa de reponderação das frações em cada fluido para que o ajuste da EOS possa ser realizado. O método está representado na Figura 3.5.

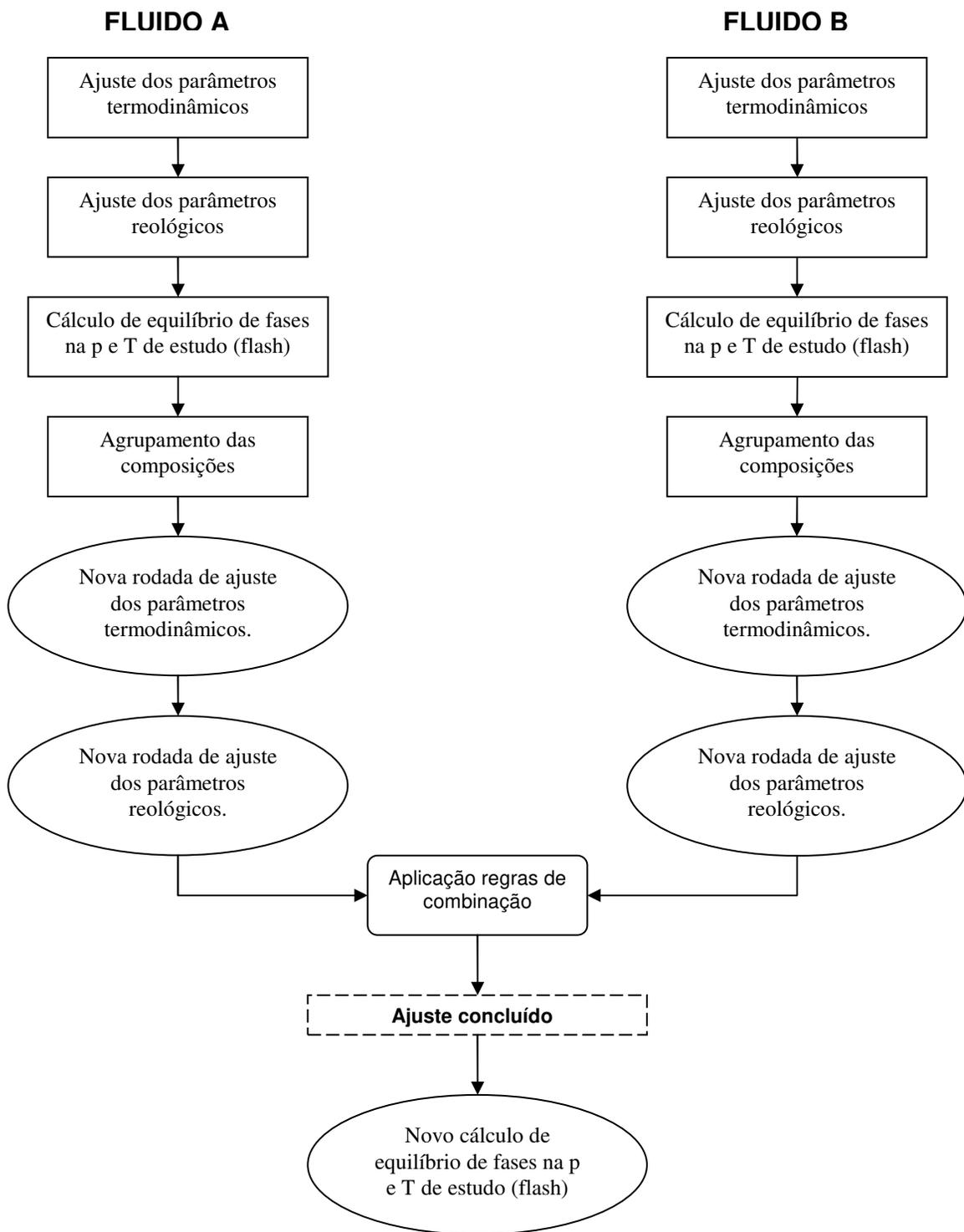


Figura 3.3 - Procedimento para ajuste de uma mistura com o uso de regras de combinação.

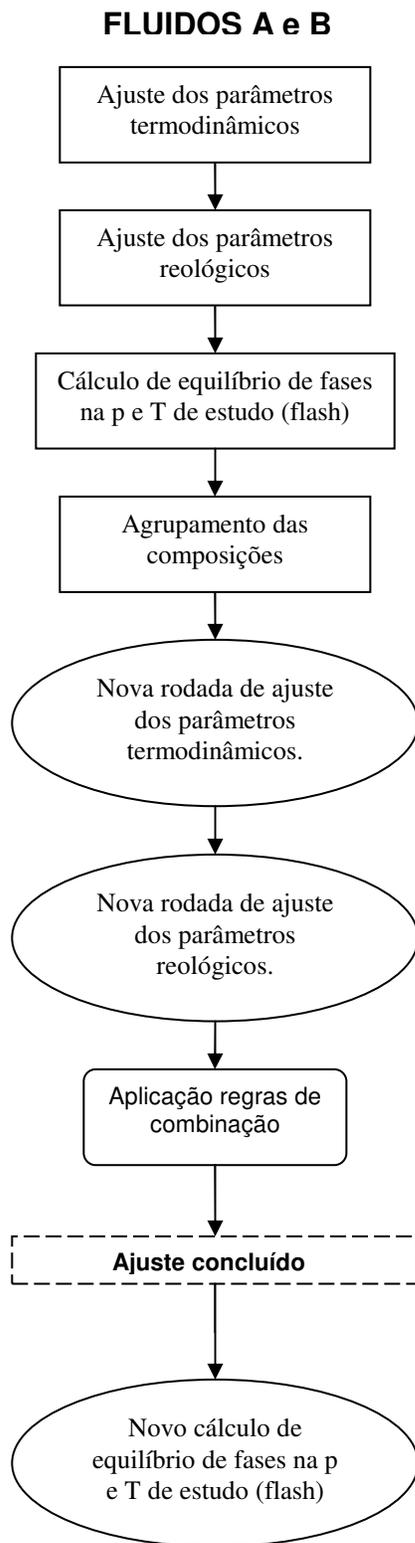


Figura 3.4 - Procedimento para ajuste simultâneo de dois fluidos para uma mistura.

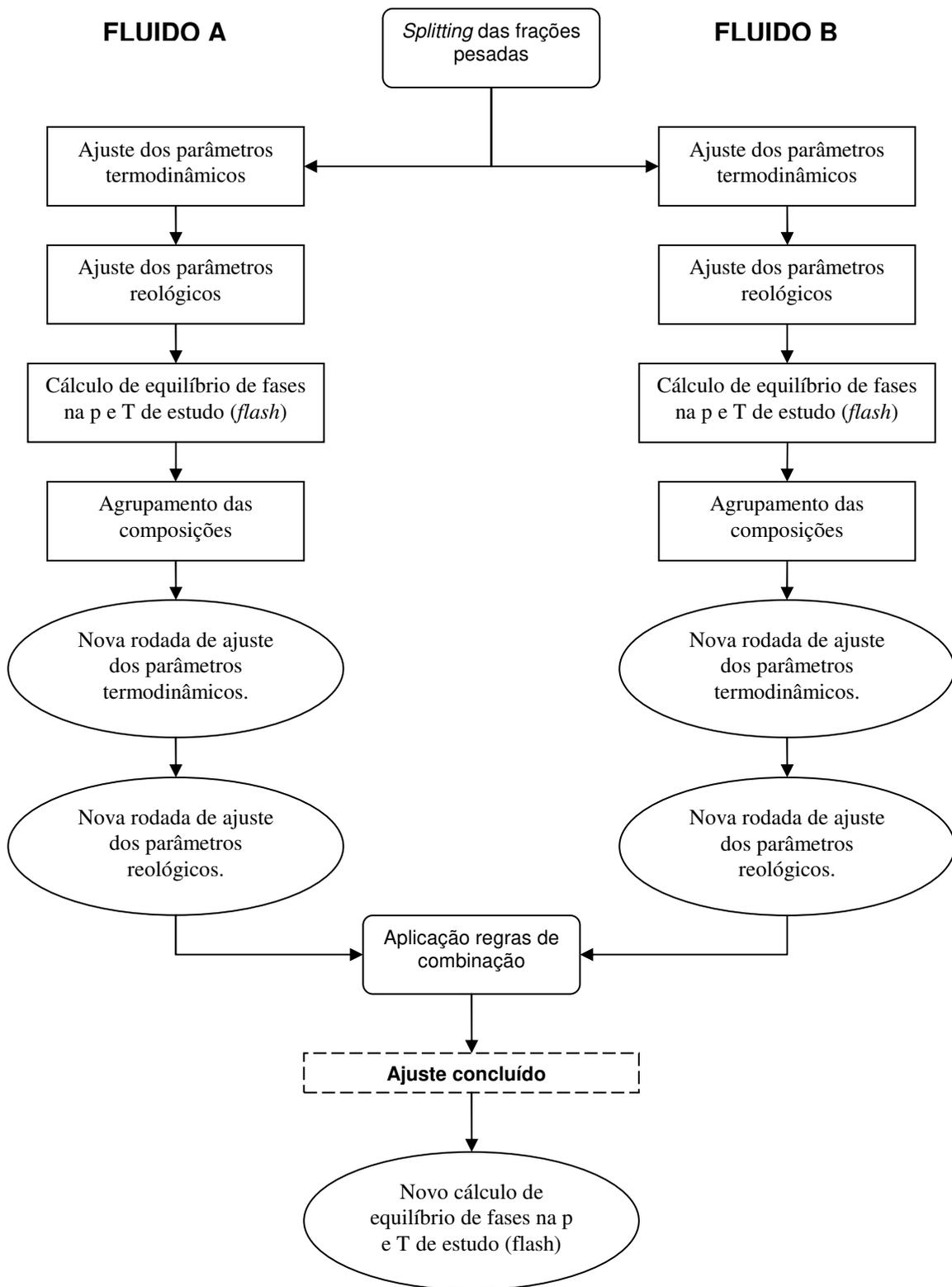


Figura 3.5 - Procedimento para ajuste simultâneo e *splitting* de dois fluidos para uma mistura.

3.4.4 Método de ajuste simultâneo com *weaved*

Este procedimento caracteriza-se por não somar a fração pesada C20+ de cada fluido participante da mistura, logo, inicialmente trabalha-se com 24 componentes. No restante este método segue um ajuste similar ao ajuste simultâneo, o método está representado na Figura 3.6.

3.5 Cálculo do equilíbrio de fases

Conforme apresentado no Item 2.7, o cálculo do equilíbrio de fases (simulação *flash*) é feito através de um processo iterativo. Os métodos de iteração geralmente usados são o *quasi-Newton de substituição sucessiva* – QNSS (Ngheim, 1983) e de Newton-Raphson. Toda a rotina do cálculo de equilíbrio de fases está implementada no WINPROP, que foi utilizado para simular o equilíbrio termodinâmico entre as fases. O algoritmo que descreve a rotina está na Figura 3.7.

3.6 Regras básicas para escolha dos parâmetros de regressão

Para ajustar as EOS, com os dados experimentais, foram usados alguns critérios retirados de Vieira (2011), que na maioria dos casos obedecem à seguinte ordem:

1. Considerar a fração pesada como não hidrocarboneto;
2. Alterar das propriedades críticas;
3. Alterar a translação de volume e peso molecular;
4. Alterar os coeficientes de interação binária, começando com os coeficientes da fração pesada *versus* compostos inorgânicos;

3.7 Análises auxiliares

Além da proposta de simulação de três misturas de petróleos, outras simulações com base na mistura dos mesmos fluidos foram realizadas com o intuito de analisar as variações em diferentes condições de pressão, temperatura e de proporção dos fluidos misturados. A variação de algumas propriedades críticas também foi analisada nas simulações. Nos itens seguintes,

encontram-se as análises que geraram respostas interessantes e colaborativas às discussões dos principais resultados.

3.7.1 Cálculo da pressão de saturação após EOS ajustada

Com as EOS ajustadas para os vários métodos de ajuste propostos, pode-se avaliar sua capacidade preditiva através do cálculo da pressão de saturação. Na ausência de dados experimentais para algumas misturas, comparam-se os métodos propostos a fim de avaliar suas diferenças.

3.7.2 Simulações flash para várias condições de pressão e temperatura

Os ajustes com os dados PVT priorizam as faixas de trabalho previamente determinadas. Variando as condições do equilíbrio de fases (pressão e temperatura) é possível avaliar se as EOS ajustadas são capazes de prever em outras faixas de temperatura e pressão e se diferenças entre os métodos de ajustes aumentam ou diminuem.

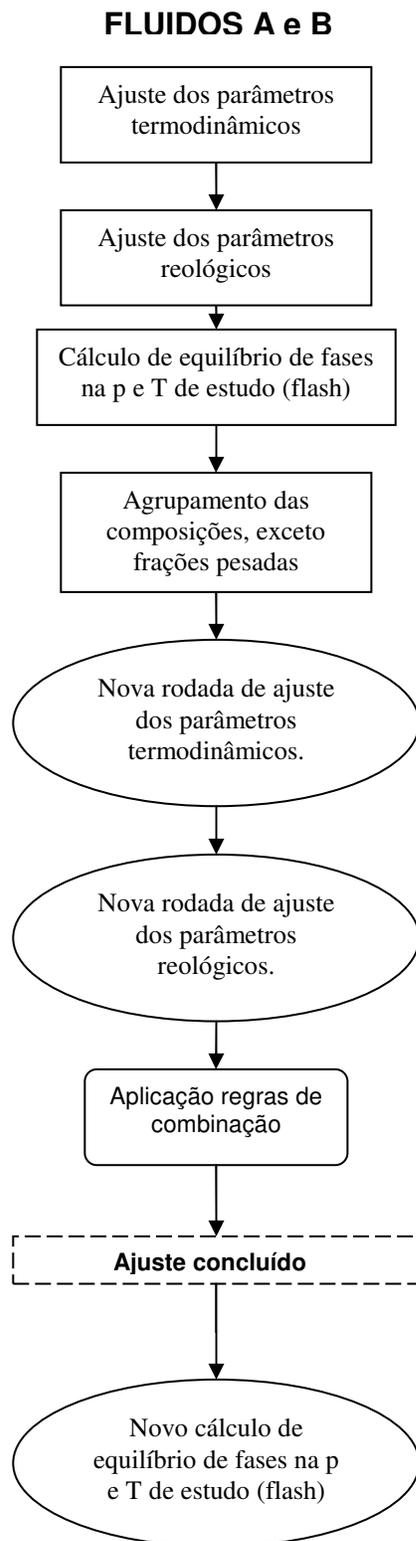


Figura 3.6 - Procedimento para ajuste simultâneo de dois fluidos para uma mistura.

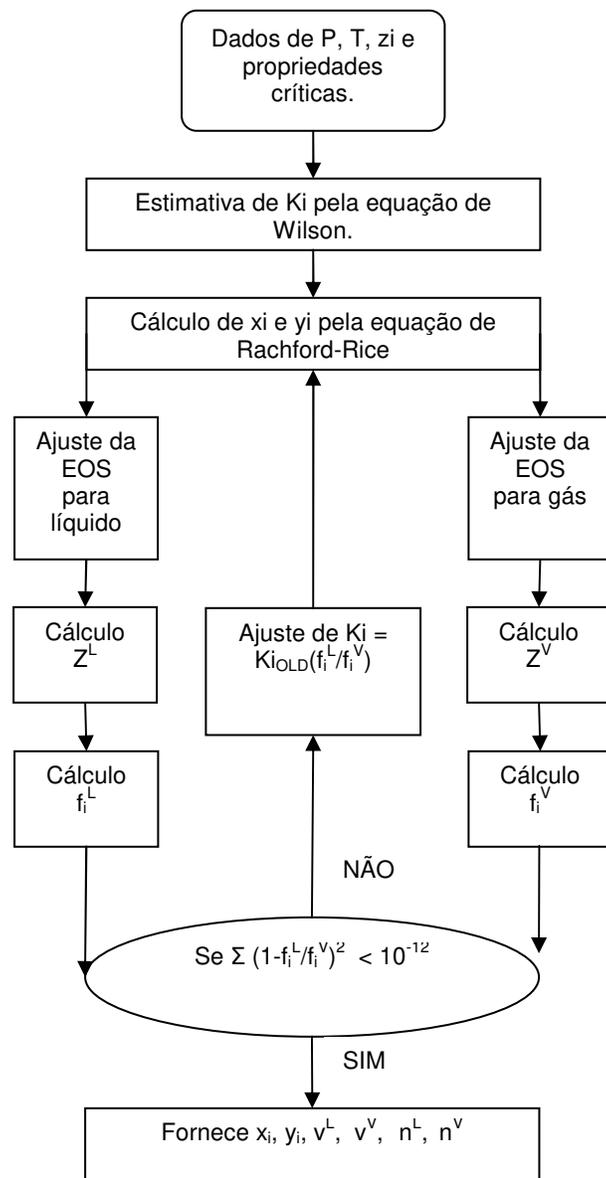


Figura 3.7 - Algoritmo do cálculo de equilíbrio de fases.

3.8 Resumo do fluxo de trabalho

Toda a metodologia descrita anteriormente pode ser visualizada na Figura 3.8 que é um fluxograma de todo o trabalho proposto.

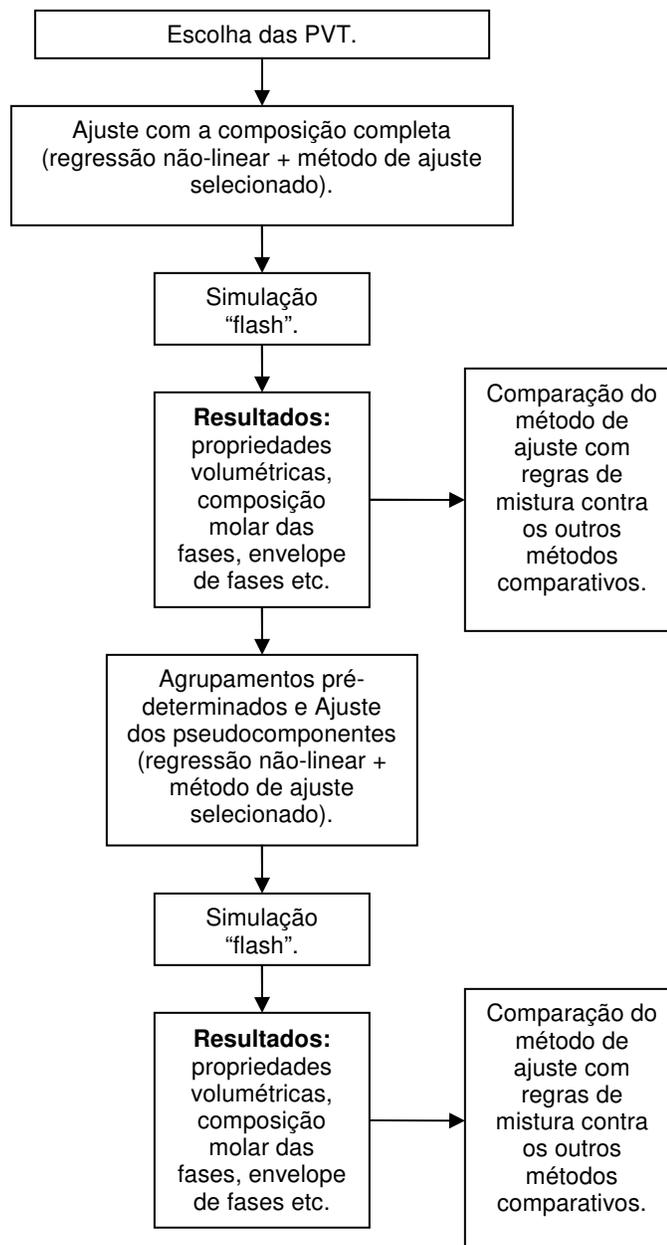


Figura 3.8 - Resumo do fluxo de trabalho com base na metodologia descrita.

4. APLICAÇÃO

Para aplicação e comparação dos métodos de ajustes descritos no Capítulo 3 são ajustadas e simuladas três misturas: a primeira mistura é simulada a partir de dois óleos cujos dados PVT se encontram na literatura especializada. A segunda mistura é composta de dois óleos provenientes de laboratórios de pesquisa, nos quais também se encontram disponíveis os dados PVT da mistura proposta e a terceira mistura é de dois gases condensados em que os dados PVT também se encontram disponíveis na literatura especializada.

4.1 Primeira mistura

A primeira mistura simulada é resultante de dois óleos retirados da literatura. O primeiro óleo é chamado, neste trabalho, de Well 4 sendo os dados retirados de Whitson (2000), e o segundo óleo é chamado de Mixture 2 sendo os dados retirados de Pedersen (1983). Algumas propriedades de cada óleo são apresentadas na Tabela 4.1.

Para a primeira mistura foram propostos os seguintes ajustes:

- Método Regras de combinação: Ajuste com regras de combinação (Item 3.4.1);
- Método Ajuste simultâneo: Ajuste simultâneo e agrupamento (Item 3.4.2);
- Método *Splitting*: Ajuste simultâneo com um prévio *splitting* da fração pesada e agrupamento (Item 3.4.3);
- Método *Weaved*: Ajuste simultâneo com o não agrupamento somente das frações pesadas (Item 3.4.4).

Tabela 4.1 - Propriedades dos óleos que resultam na primeira mistura. Well 04 e Mixture 02.

Propriedade	Well 04	Mixture 02
Grau API	40,5	42,0
Temperatura reservatório (°C)	104,4	92,8
Pressão de saturação (Kgf/cm²)	185,24	273,18
Fração C20+	0,1255	0,1332
Peso molecular C20+	325	421
Densidade C20+	0,914	0,875

A condição usada para promover a mistura foi de cinquenta por cento de cada fluido em termos de fração molar. A simulação flash foi realizada na pressão de 100 Kgf/cm², tentando simular uma condição de pressão de *manifold* submarino e a temperatura escolhida é de 98,6 °C que é a média das temperaturas de reservatório de cada fluido.

4.2 Segunda mistura

Os dados PVT da segunda mistura são provenientes de dois óleos pertencentes aos Laboratórios de Tecnologias de Recuperação do Centro de Pesquisas da Petrobras. Algumas propriedades são listadas na Tabela 4.2. Na Tabela 4.3 é possível observar a composição agrupada para 10 pseudocomponentes.

Tabela 4.2 - Propriedades dos óleos que resultam na segunda mistura. Óleo A e Óleo B.

Propriedade	Óleo A	Óleo B
Grau API	28,9	29,8
Temperatura reservatório (°C)	58,3	61,2
Pressão de saturação (Kgf/cm²)	406,0	493,2
Fração C20+	0,1018	0,0666
Peso molecular C20+	414	452
Densidade C20+	0,9327	0,9372

Tabela 4.3 - Composições do Óleo A e Óleo B para 10 pseudocomponentes.

Composição	Óleo A	Óleo B
C1-N2	50,55	62,41
CO2-C2	17,77	8,29
C3	4,76	5,16
iC4- nC4	2,6	2,94
iC5- nC5	1,3	1,48
C6	0,95	1,14
C7-C10	5,39	5,48
C11-C15	4,57	4,37
C16-C19	1,96	2,07
C20+	10,18	6,66

Para a segunda mistura foram propostas as mesmas metodologias de ajustes usadas na primeira mistura acrescido do ajuste com os dados experimentais da mistura dos Óleos A e B (Item 4.1).

Os dados PVT foram obtidos através de ensaios de liberação diferencial, além de ensaios de densidade e viscosidade. As propriedades foram medidas para vários valores de pressão acima e abaixo do ponto de saturação, sendo as principais propriedades medidas: fator volume-formação do óleo (B_o), razão de solubilidade, massa específica do óleo, viscosidade do óleo, fator volume-formação do gás (B_g), densidade do gás e fator de compressibilidade do gás. Essas propriedades podem ser observadas nas Figuras 4.1 até 4.7 para o Óleo A, e nas Figuras 4.8 até 4.14 para o Óleo B.

A condição usada para promover a segunda mistura foi de cinquenta por cento de cada fluido em termos de fração molar. A simulação flash foi realizada na pressão de 100 Kgf/cm^2 , e temperatura de 40°C, tentando simular uma condição de pressão de *manifold* submarino.

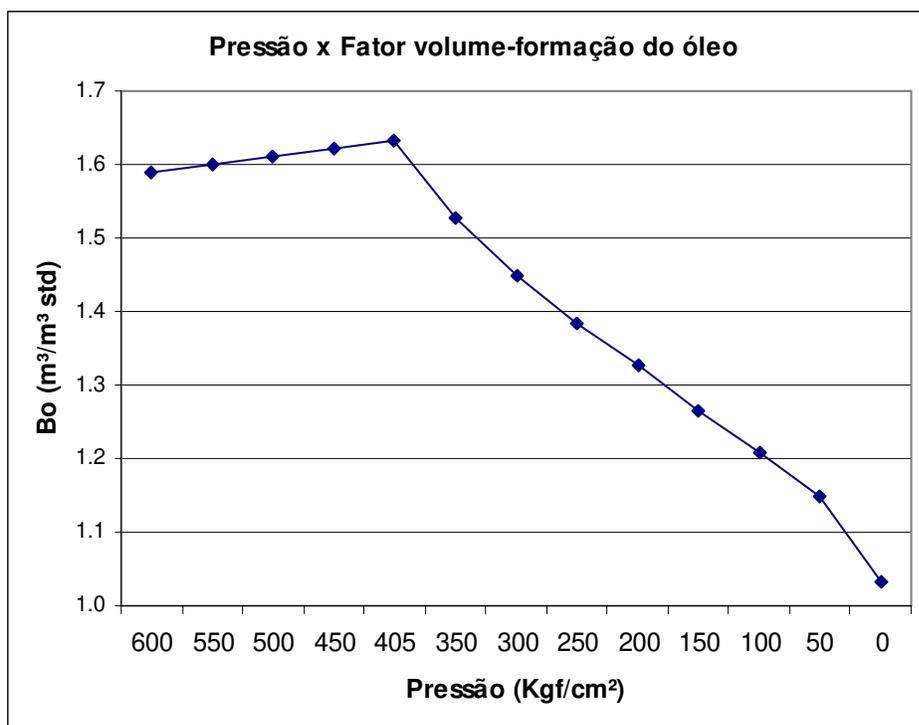


Figura 4.1 - Fator volume de formação do óleo na análise PVT do Óleo A.

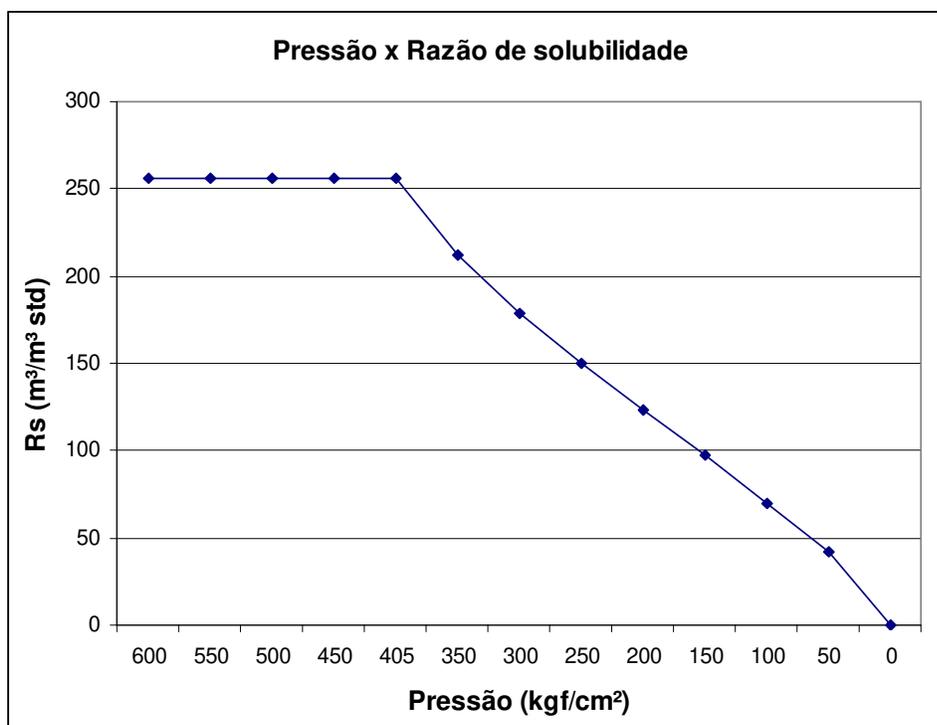


Figura 4.2 - Razão de solubilidade na análise PVT do Óleo A.

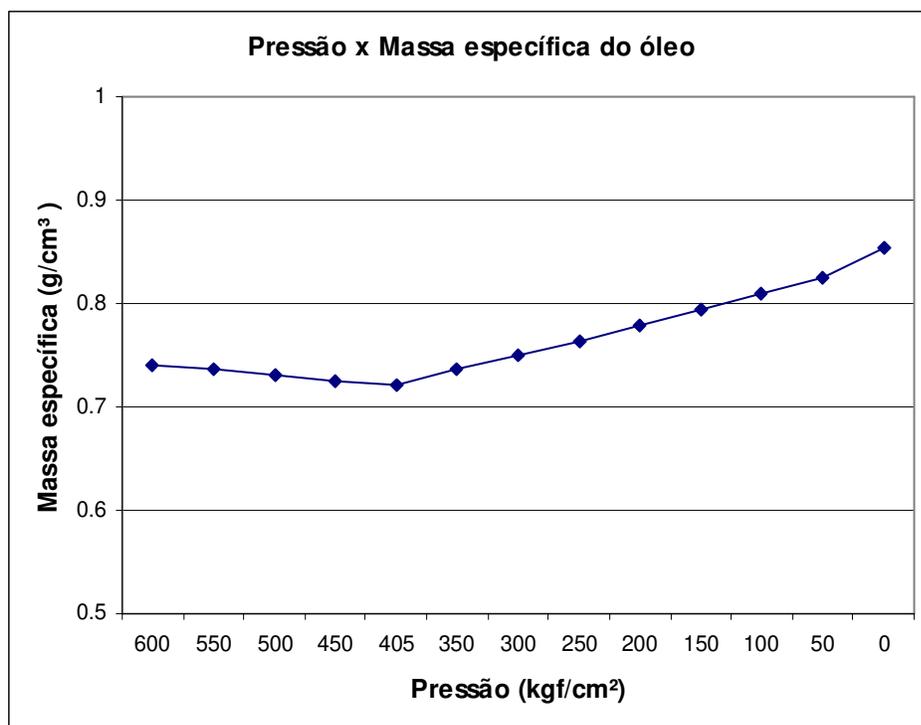


Figura 4.3 - Massa específica do óleo na análise PVT do Óleo A.

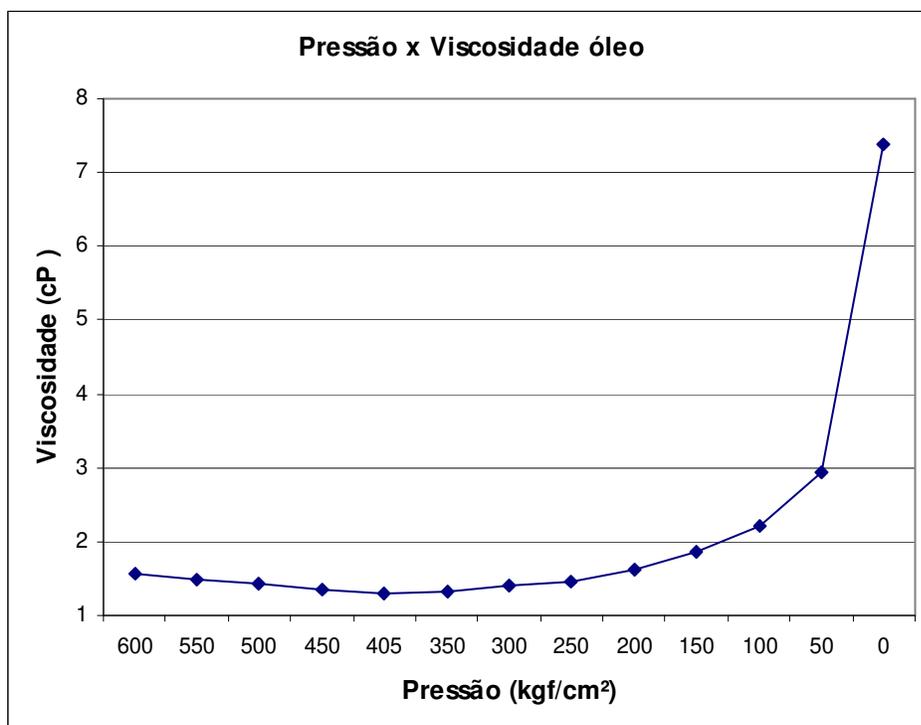


Figura 4.4 - Viscosidade do óleo na análise PVT do Óleo A

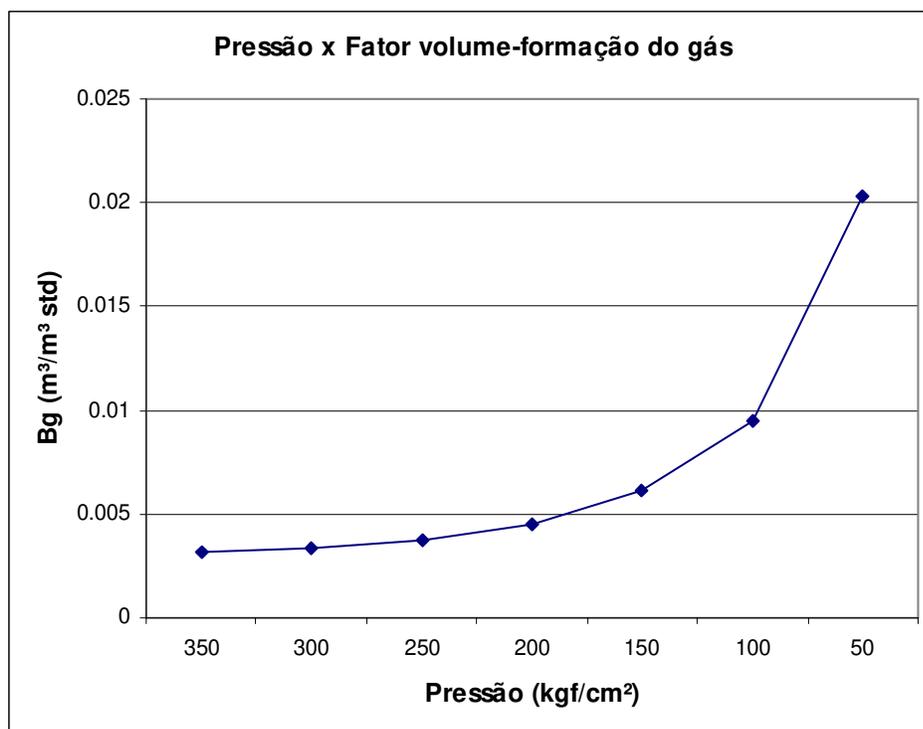


Figura 4.5 - Fator volume de formação do gás na análise PVT do Óleo A.

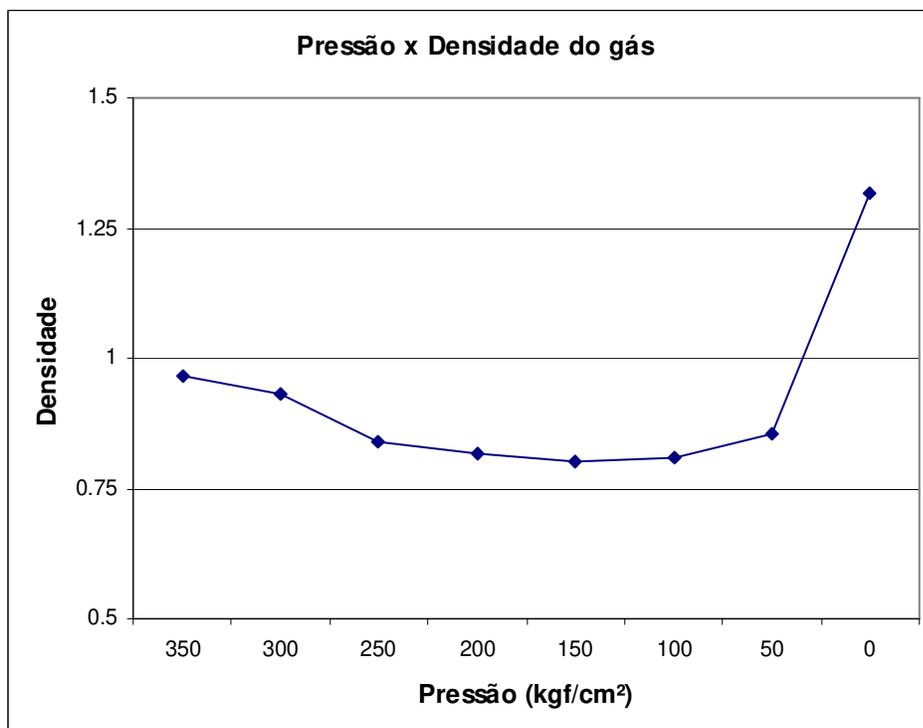


Figura 4.6 - Densidade do gás na análise PVT do Óleo A.

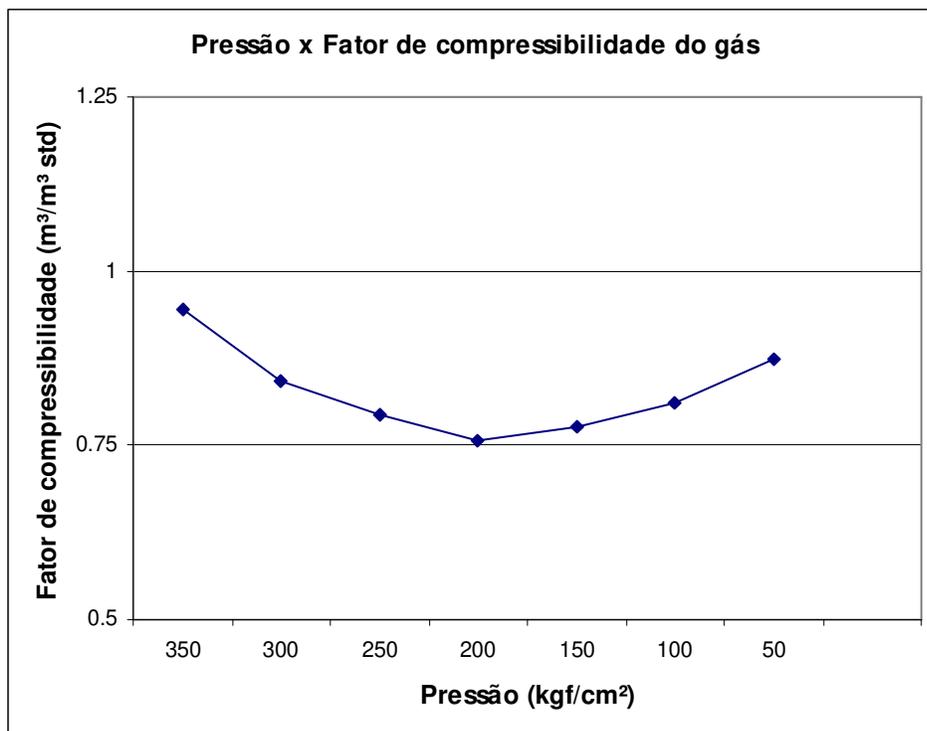


Figura 4.7 - Fator de compressibilidade do gás na análise PVT do Óleo A.

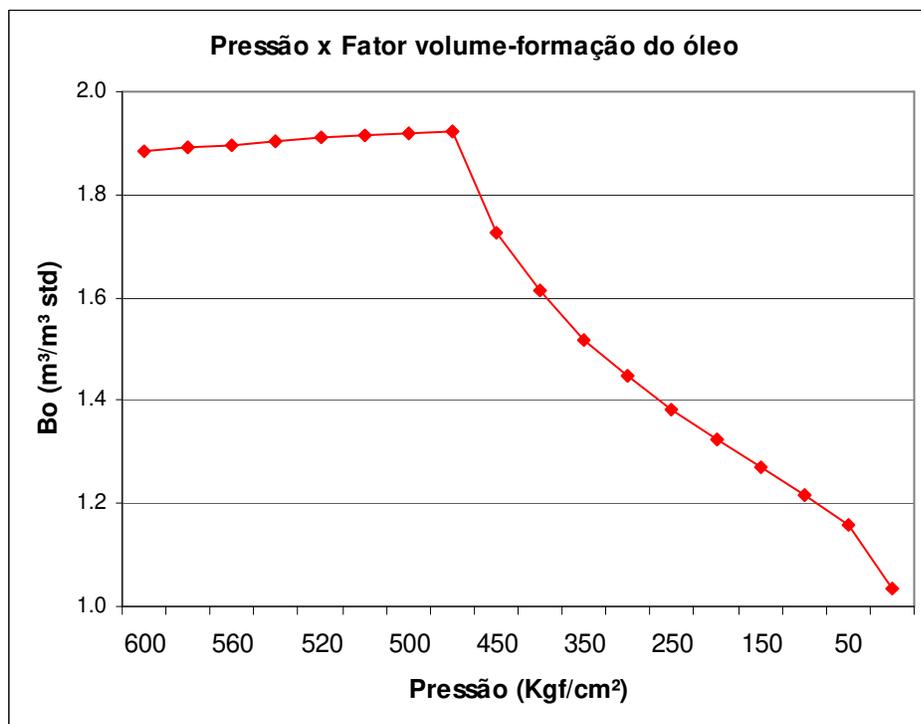


Figura 4.8 - Fator volume de formação do óleo na análise PVT do Óleo B.

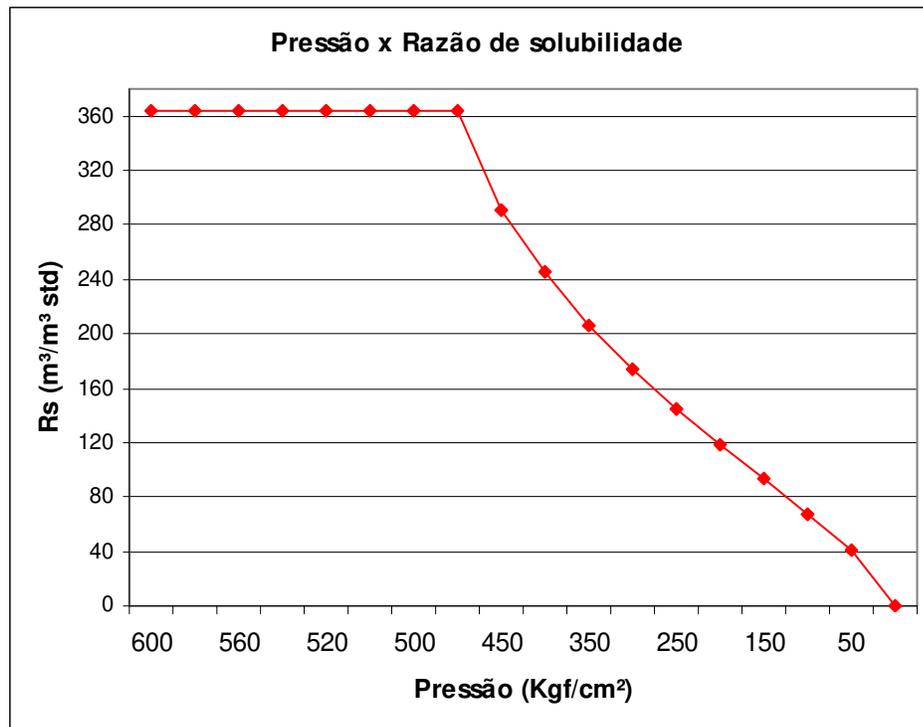


Figura 4.9 - Razão de solubilidade na análise PVT do Óleo B.

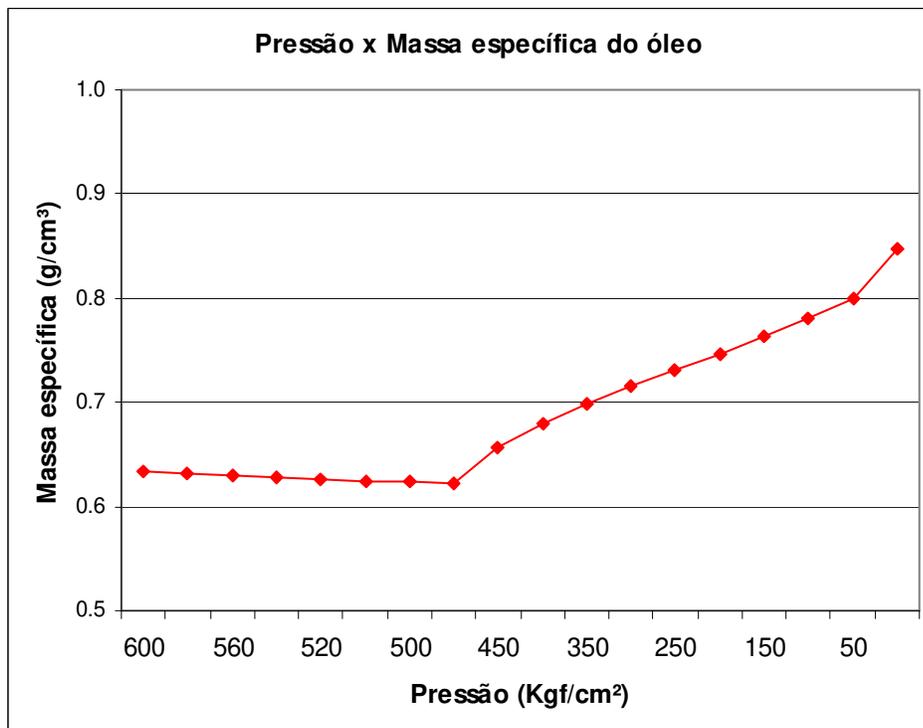


Figura 4.10 - Massa específica do óleo na análise PVT do Óleo B.

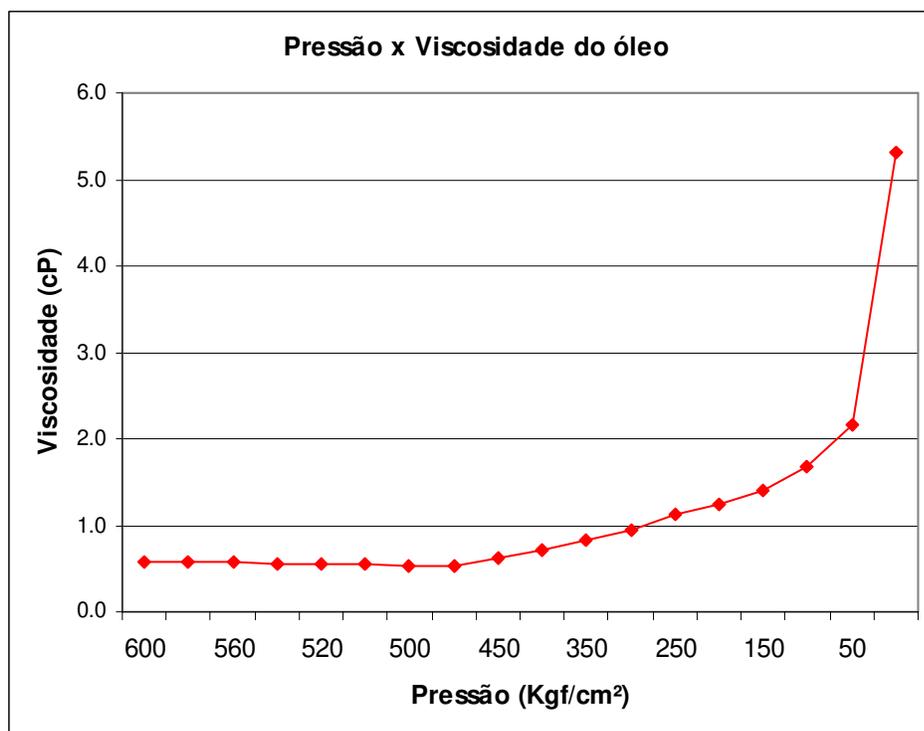


Figura 4.11 - Viscosidade do óleo na análise PVT do Óleo B.

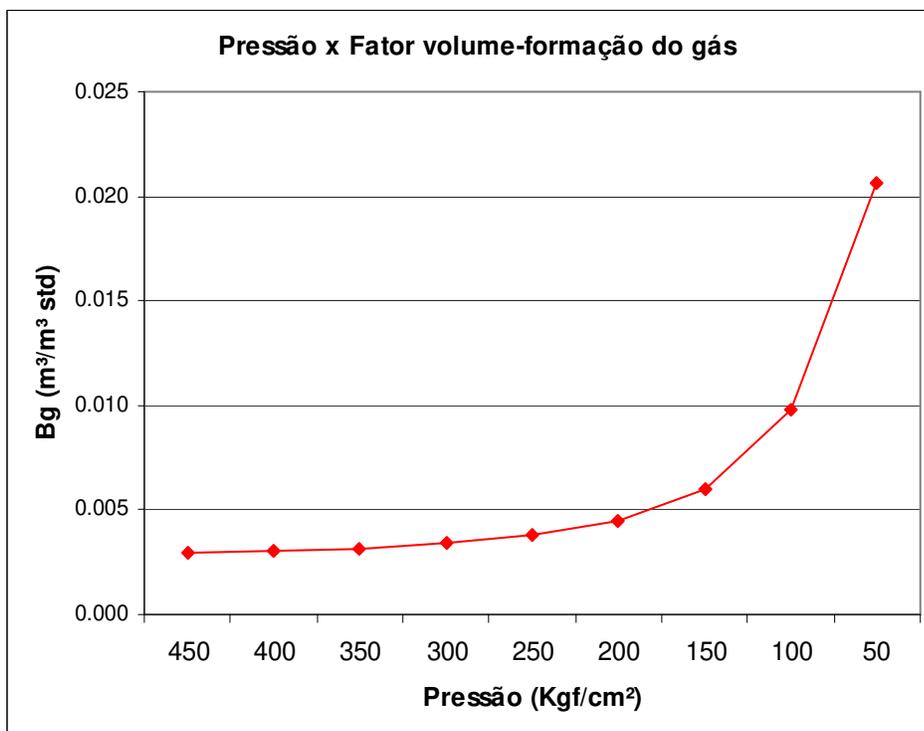


Figura 4.12 - Fator volume de formação do gás na análise PVT do Óleo B.

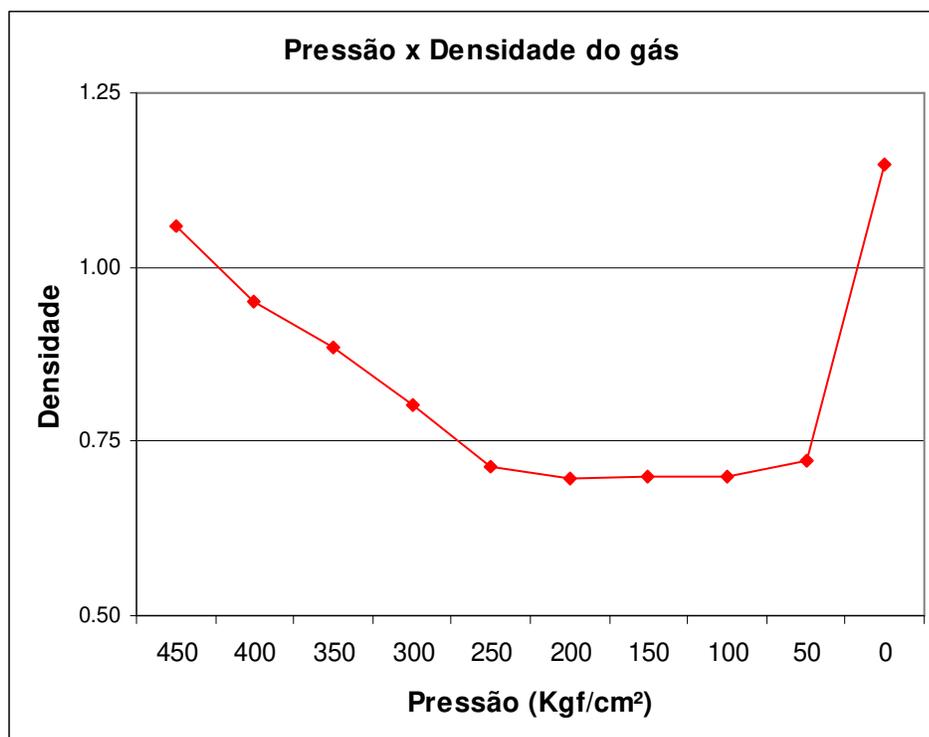


Figura 4.13 - Densidade do gás na análise PVT do Óleo B.

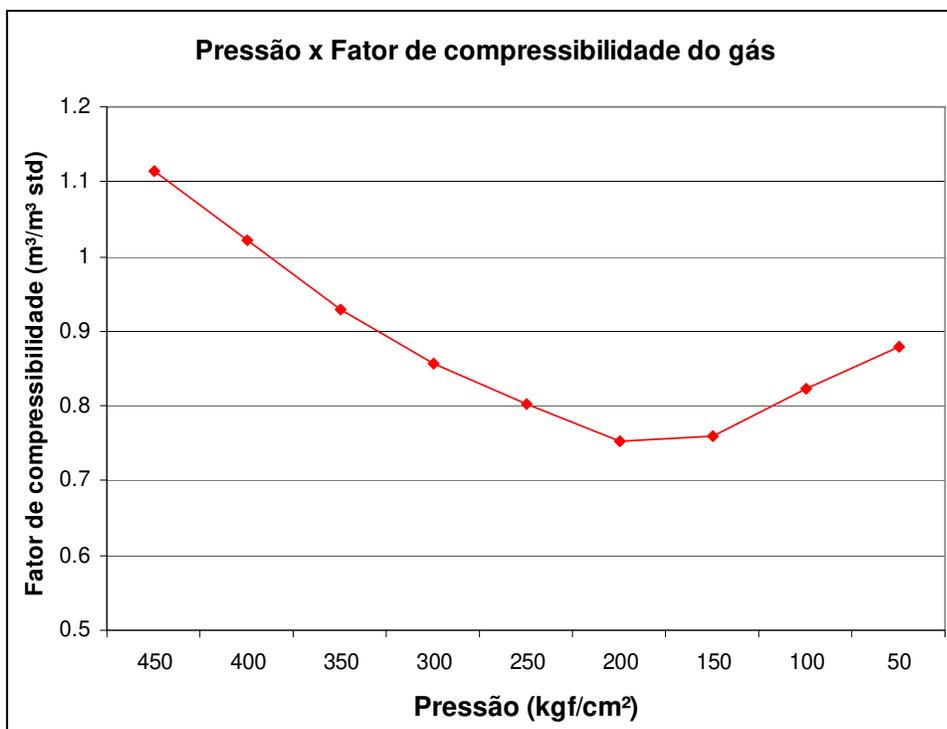


Figura 4.14 - Fator de compressibilidade do gás na análise PVT do Óleo B.

Como citado anteriormente, para essa simulação de mistura existem dados experimentais da mistura de cinquenta por cento em fração molar de cada fluido. Nas Tabelas 4.4 e 4.5 observam-se respectivamente algumas propriedades da mistura e a composição da mistura resultante. Nas Figuras 4.15 até 4.21 podem ser observados os mesmos dados experimentais apresentados para os Óleos A e B:

Tabela 4.4 - Propriedades dos óleos que resultam na segunda mistura. Óleo A e Óleo B.

Propriedade	Óleo A + Óleo B
Grau API	29,4
Temperatura da mistura (°C)	40
Pressão de saturação (Kgf/cm²)	449,3
Fração C20+	0,1018
Peso molecular C20+	433
Densidade C20+	0,9345

Tabela 4.5 - Composição molar da mistura dos Óleos A + B.

Componente	Óleo A + Óleo B
CO2	5,58
N2	0,53
C1	55,6
C2	7,79
C3	4,87
IC4	0,90
NC4	1,86
IC5	0,61
NC5	0,90
C6	1,25
C7	1,51
C8	2,03
C9	1,69
C10	1,39
C11	1,18
C12	1,05
C13	1,06
C14	0,88
C15	0,85
C16	0,65
C17	0,57
C18	0,61
C19	0,54
C20+	6,10

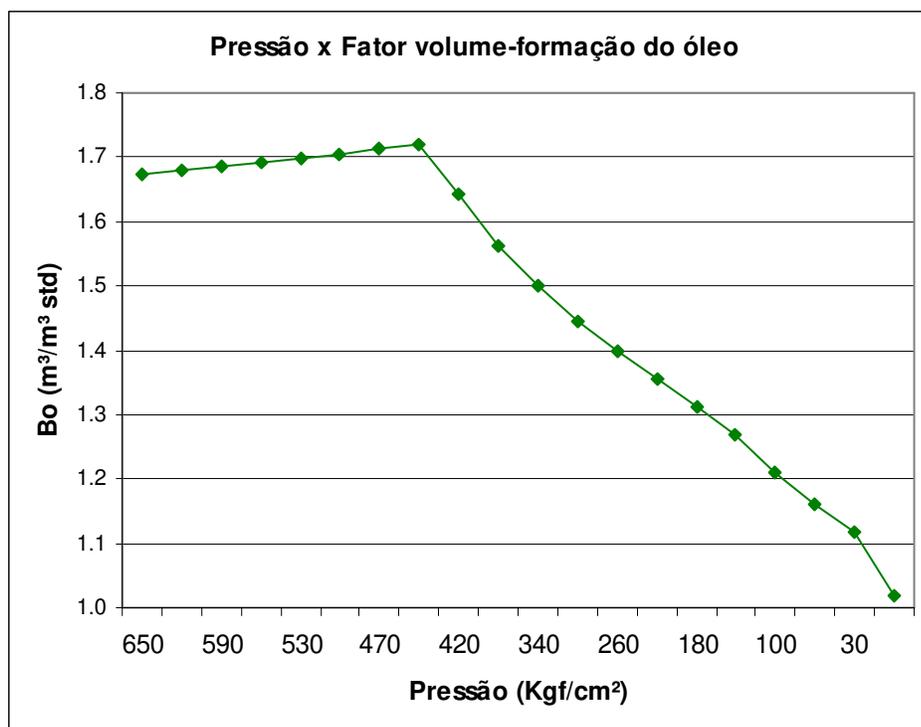


Figura 4.15 - Fator volume de formação do óleo na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).

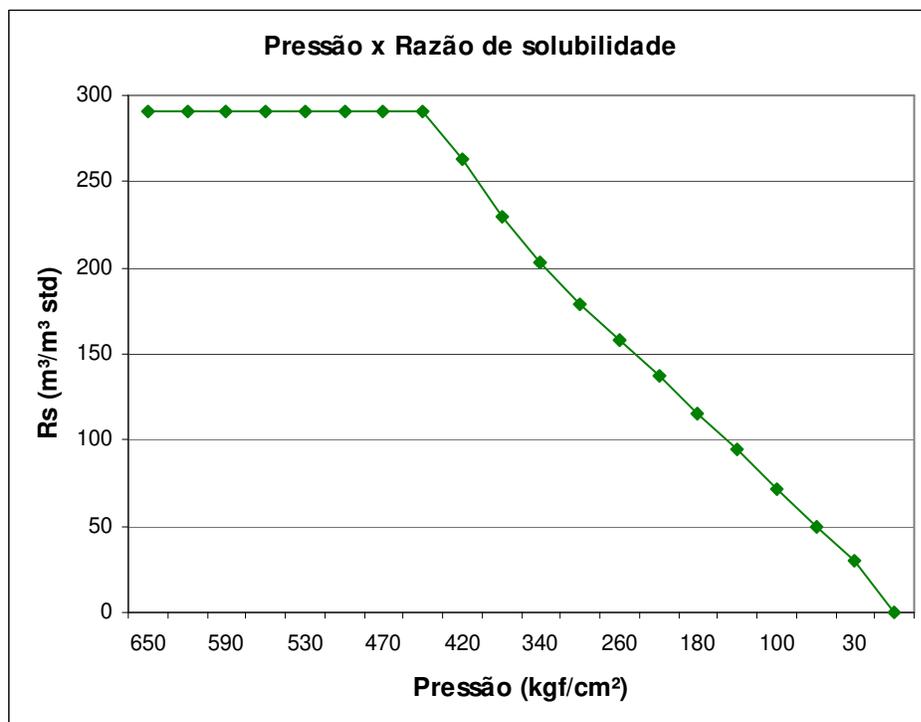


Figura 4.16 - Razão de solubilidade na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).

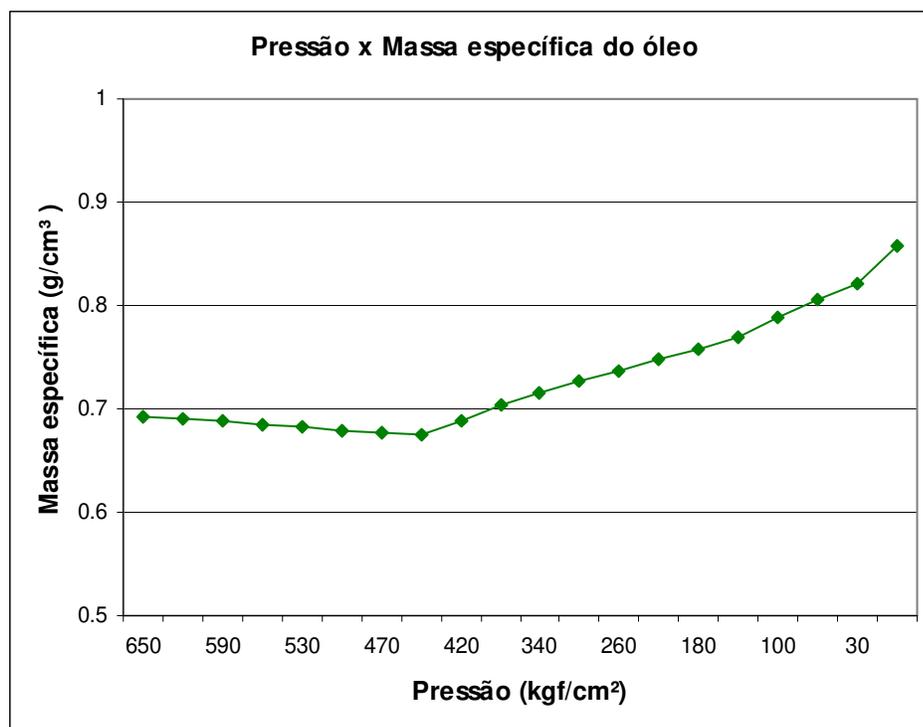


Figura 4.17 - Massa específica do óleo na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).

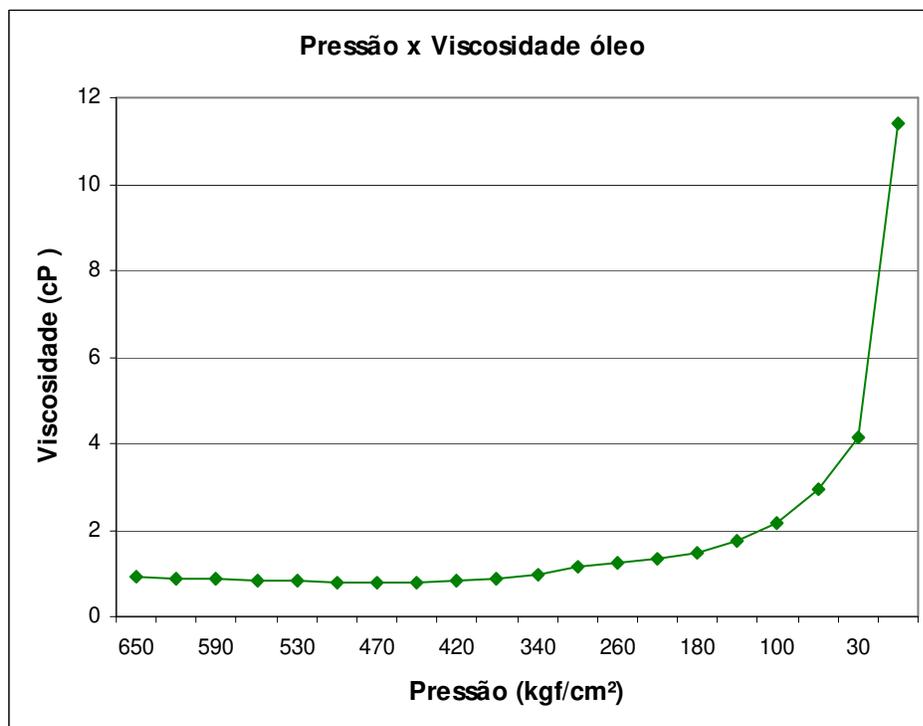


Figura 4.18 - Viscosidade do óleo na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).

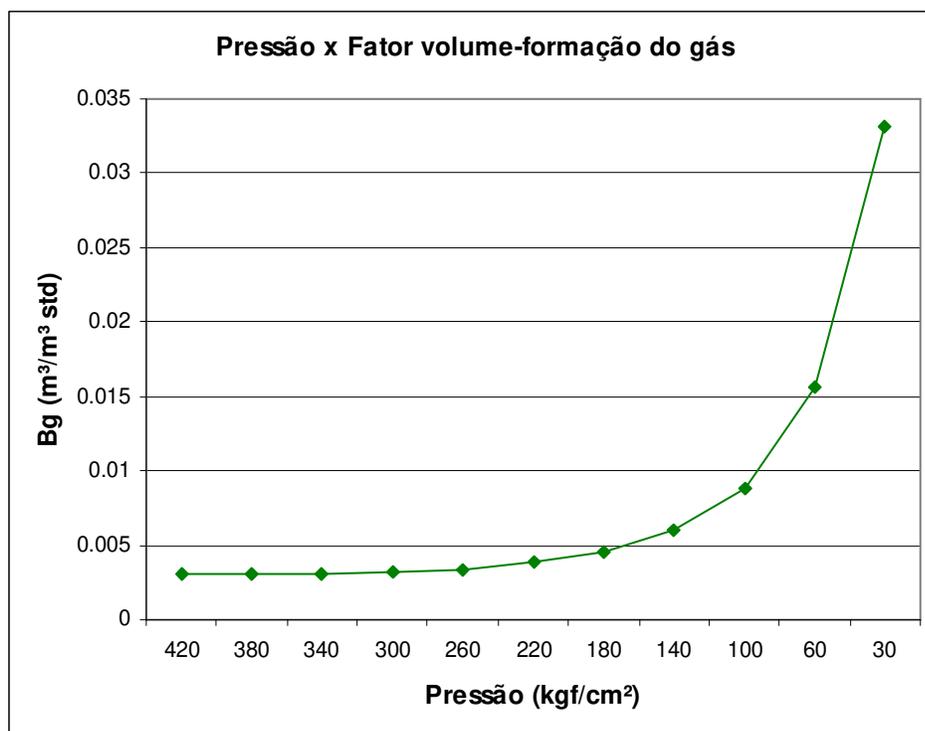


Figura 4.19 - Fator volume de formação do gás na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).

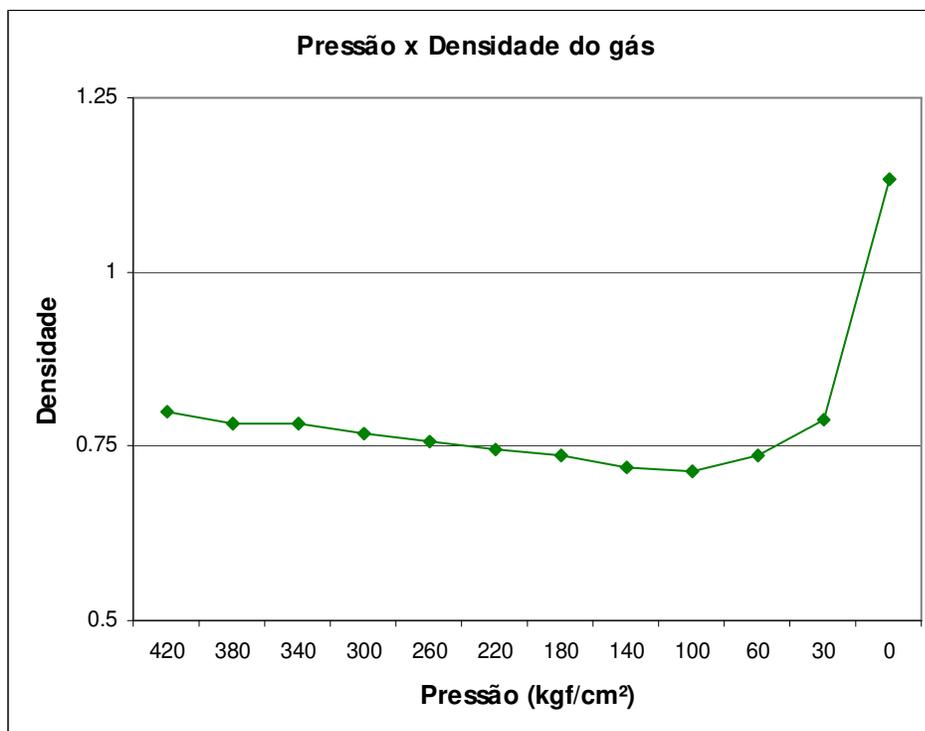


Figura 4.20 - Densidade do gás na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).

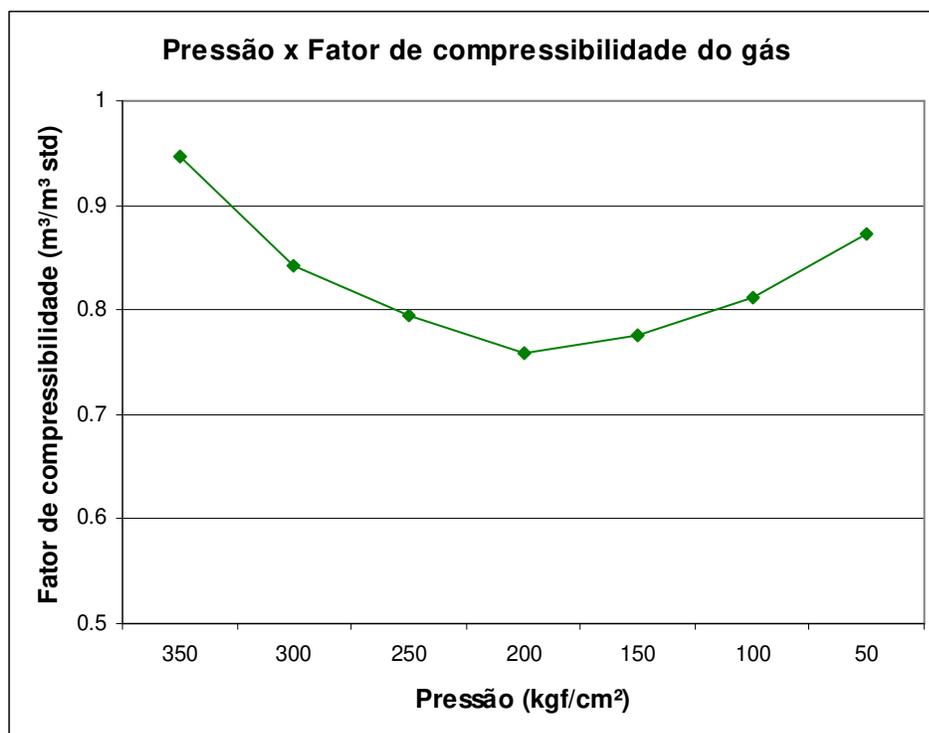


Figura 4.21 - Fator de compressibilidade do gás na análise PVT da Mistura (Óleo A + Óleo B).

4.3 Terceira mistura

Os dados PVT da terceira mistura foram retirados da literatura. O primeiro é um gás condensado chamado, neste trabalho, de Campo Nigéria sendo os dados retirados de Imo-Jack (2010). O segundo gás condensado é chamado de SPE 3, sendo retirado do casos comparativos do SPE de autoria de Kenyon (1987). Propriedades de cada gás condensado são apresentadas na Tabela 4.6.

Devido às características dos fluidos (gás condensado) os ajustes tiveram que ser iniciados a partir do *splitting*, resultando em apenas duas metodologias comparativas:

Tabela 4.6 - Propriedades dos óleos que resultam na primeira mistura. Campo Nigéria e SPE 3.

Propriedade	Campo Nigéria	SPE 3
RGO	2476	857
Pressão de saturação (Kgf/cm²)	289,0	242,1
Fração C7+	0,0415	0,0659
Peso molecular C7+	130	140
Densidade C7+	0,7749	0,7740

- Método Regras de combinação: Ajuste com regras de combinação e prévio *splitting* da fração pesada (Item 3.4.1);
- Método Ajuste simultâneo: Ajuste simultâneo com prévio *splitting* da fração pesada e agrupamento (Item 3.4.3);

A condição usada para promover a mistura foi de cinquenta por cento de cada fluido em termos de fração molar. A simulação *flash* foi realizada na pressão de 150 Kgf/cm², tentando simular uma condição de pressão de *manifold* submarino e temperatura escolhida é de 60,0 °C que é a média das temperaturas de reservatório de cada fluido.

5. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações das 3 misturas propostas no Capítulo 4. Para cada mistura é aplicado o método de ajuste com regras de combinação sendo seus resultados então comparados com os resultados de outros métodos de ajustes propostos no Capítulo 3. Há também algumas análises auxiliares que reforçam as conclusões obtidas com os resultados das simulações.

5.1 Resultados da primeira mistura

A primeira mistura simulada tem como constituintes dois conjuntos de dados PVT denominados Well 4 e Mixture 2. Tanto os óleos quanto a mistura resultante foram ajustados inicialmente para vinte quatro componentes através de uma regressão não-linear. Esses primeiros ajustes serviram de base para os 4 métodos de ajustes propostos no Item 3.4. Cada método de ajuste foi agrupado em três diferentes números de componentes e pseudocomponentes, sendo posteriormente ajustados. Os diferentes tipos de agrupamentos propostos podem ser observados na Tabela 5.1.

Os ajustes são validados seguindo os limites aceitáveis de cada dado experimental (descritos no Item 3.4), os dados experimentais ajustados, para todos os agrupamentos, podem ser observadas no Anexo 1 (Item I).

Com as EOS já ajustadas (tanto para a composição inicial quanto para os agrupamentos), foram executadas as simulações *flash* nas condições de pressão e temperatura pré-estabelecidas: pressão de 100 Kgf/cm² e temperatura de 98,6 °C. Após a simulação, o método com regras de mistura foi comparado com os outros três métodos, através das propriedades que são usualmente utilizadas dentro de uma simulação composicional: fração volume, fração molar, peso molecular e massa específica.

Tabela 5.1 - Agrupamentos propostos para a primeira mistura.

10 componentes	8 componentes	6 componentes
C1 - N2	C1 - N2	C1 - N2
C2 - CO2	C2 - CO2	C2 - CO2
C3	C3	C3 - C4
IC4 - NC4	IC4 - NC4	C5 - C6
IC5 - NC5	C5 - C6	C7 - C19
C6	C7 - C10	C20+
C7 - C10	C11 - C19	-
C11 - C15	C20+	-
C16 - C19	-	-
C20+	-	-

5.1.1 Resultados para 24 componentes.

Os dados PVT para os óleos em questão têm sua composição definida em número de carbonos, na qual a descrição da composição vai até a fração pesada denominada C₂₀₊. Além disso, existe a presença de compostos inorgânicos como N₂ e CO₂, totalizando 24 componentes. Os resultados da simulação *flash* foram dispostos nos gráficos das Figuras 5.1 a 5.4 representando respectivamente fração volume, fração molar, peso molecular e massa específica. Vale ressaltar que apesar de 4 métodos propostos, neste caso inicial só há 3 conjuntos de resultados descritos nos gráficos, pois o método de ajuste *weaved* provem diretamente do método de ajuste simultâneo (Aj. simultâneo).

Tomando como base o método de ajuste baseado nas regras de combinação foi feita uma comparação das quatro principais propriedades. As diferenças em termos percentuais podem ser observadas na Tabela 5.2.

Considerando o método avaliado (com as regras de combinação) perante aos outros, pode-se afirmar, a princípio, que para 24 componentes não há nenhuma grande variação percentual que não possa ser atribuída a erros experimentais, tolerâncias do processo de regressão etc.

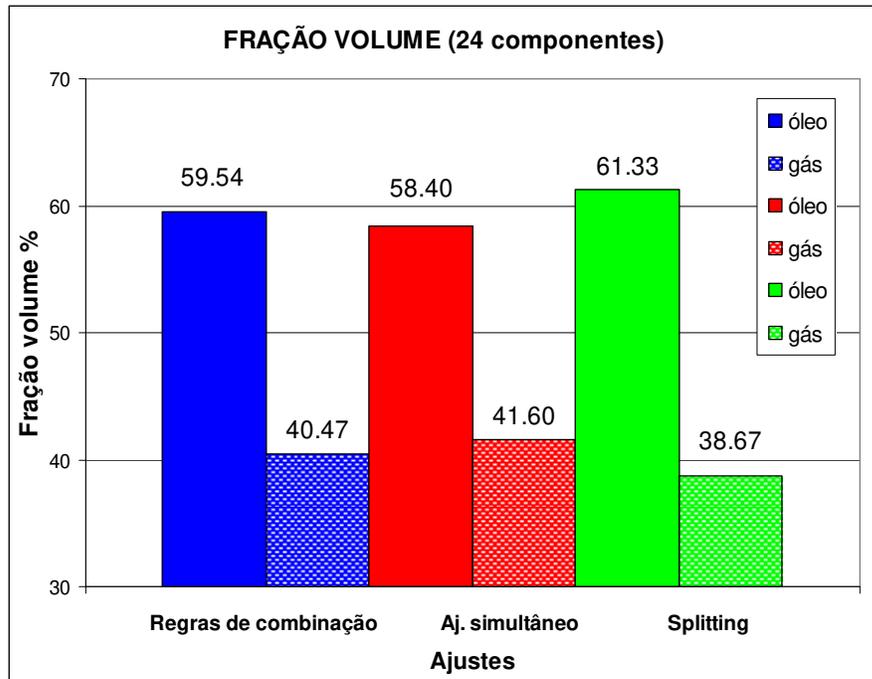


Figura 5.1 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 24 componentes.

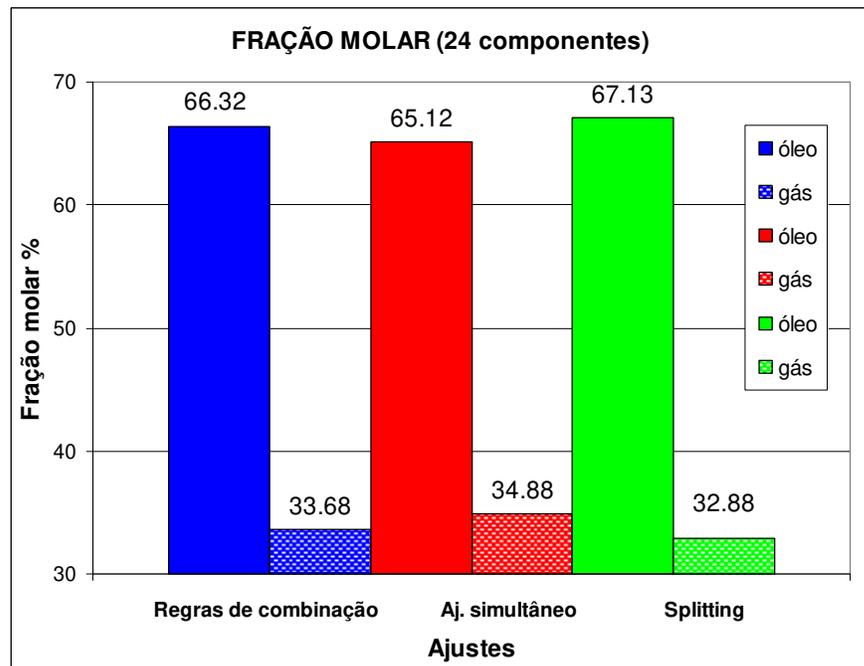


Figura 5.2 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 24 componentes.

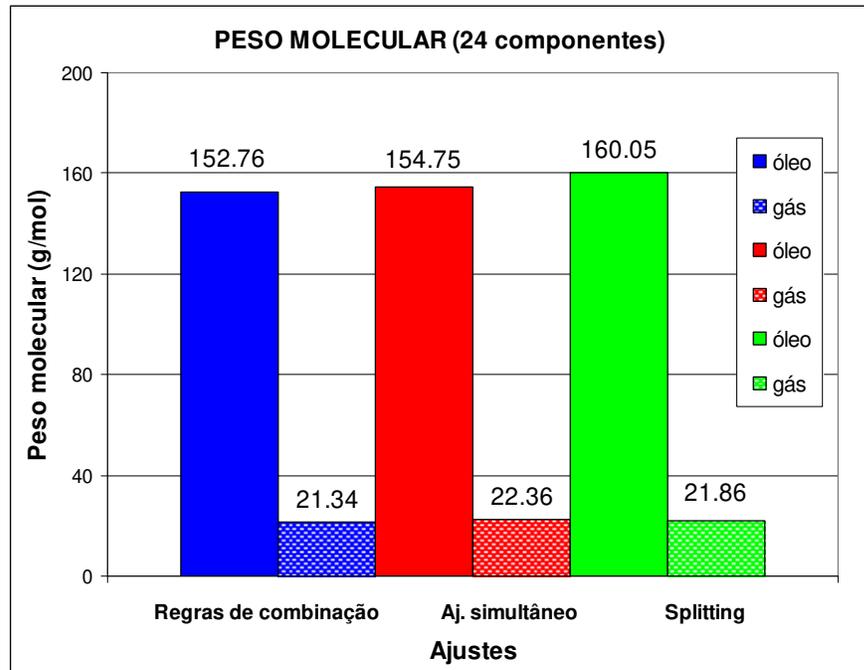


Figura 5.3 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 24 componentes.

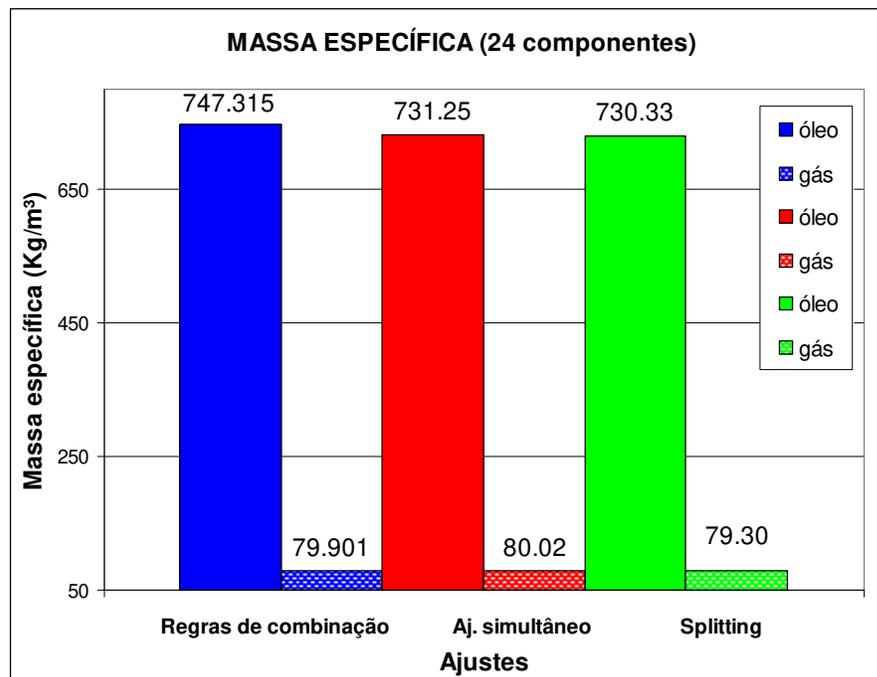


Figura 5.4 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 24 componentes.

Tabela 5.2 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação *flash*, entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos.

FRAÇÃO VOLUME	Óleo	Gás	FRAÇÃO MOLAR	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	-1,9	2,8	Aj. simultâneo	-1,8	3,6
<i>Splitting</i>	3,0	-4,4	<i>Splitting</i>	0,1	-0,2
PESO MOLECULAR	Óleo	Gás	MASSA ESPECÍFICA	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	1,3	4,8	Aj. simultâneo	1,2	5,3
<i>Splitting</i>	4,8	2,4	<i>Splitting</i>	-0,1	1,5

5.1.2 Resultados para os agrupamentos propostos

Para o agrupamento é necessário que a composição esteja previamente ajustada, sendo essa etapa anterior correspondente aos dois primeiros diagramas das Figuras 3.3 a 3.6, presentes no Item 3.4.

O agrupamento com 10 componentes está descrito na Tabela 5.1. Assim como para a composição inicial de 24 componentes os resultados após a simulação *flash* observados são fração volume (Figura 5.5), fração molar (Figura 5.6), peso molecular (Figura 5.7) e massa específica (Figura 5.8).

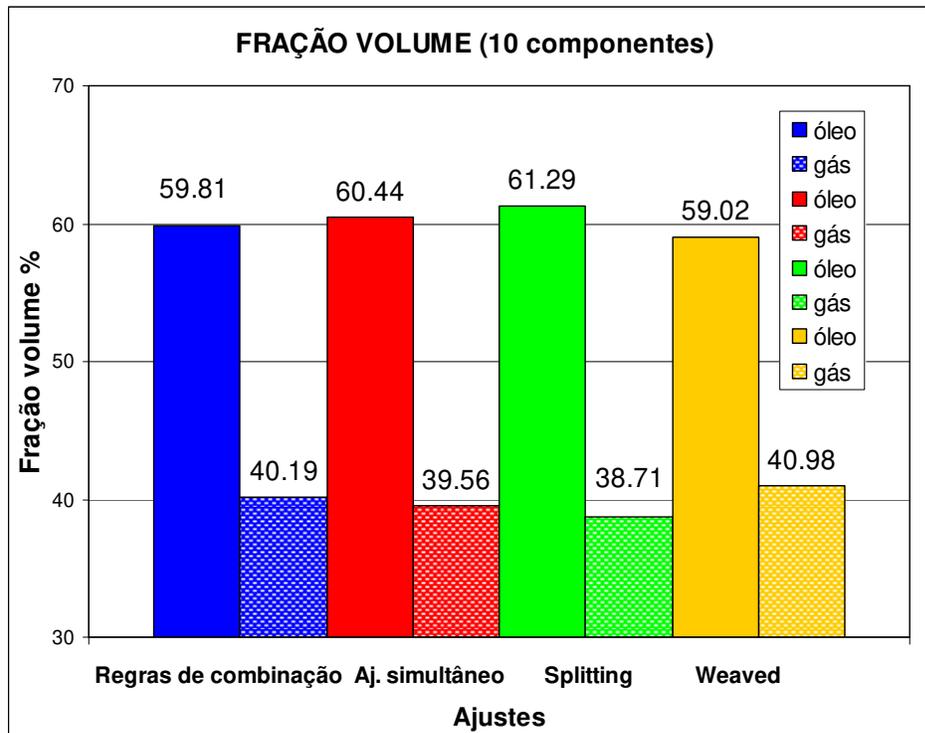


Figura 5.5 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 10 componentes.

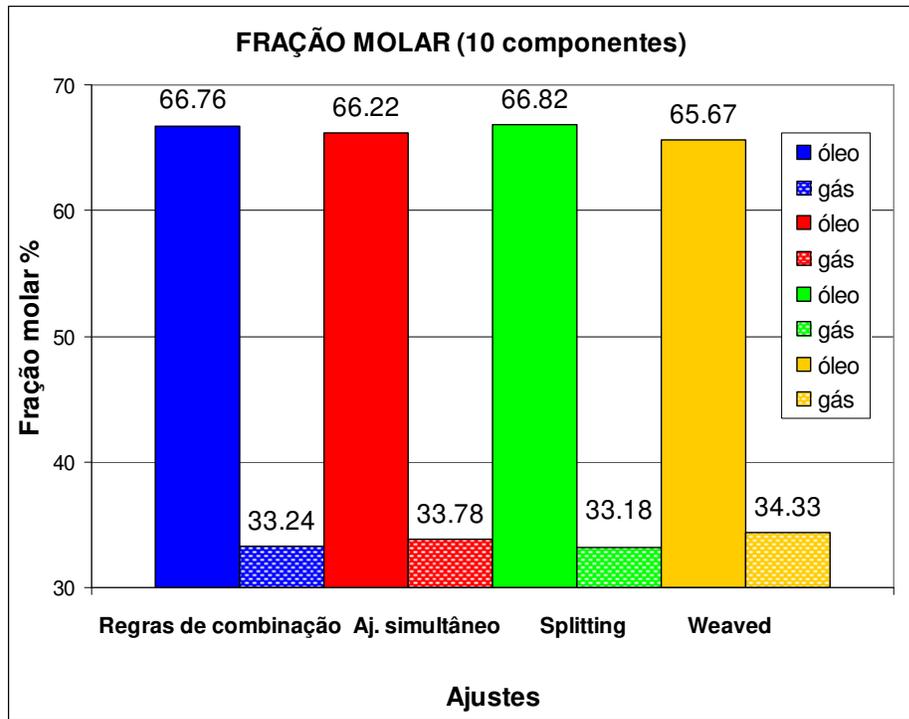


Figura 5.6 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 10 componentes.

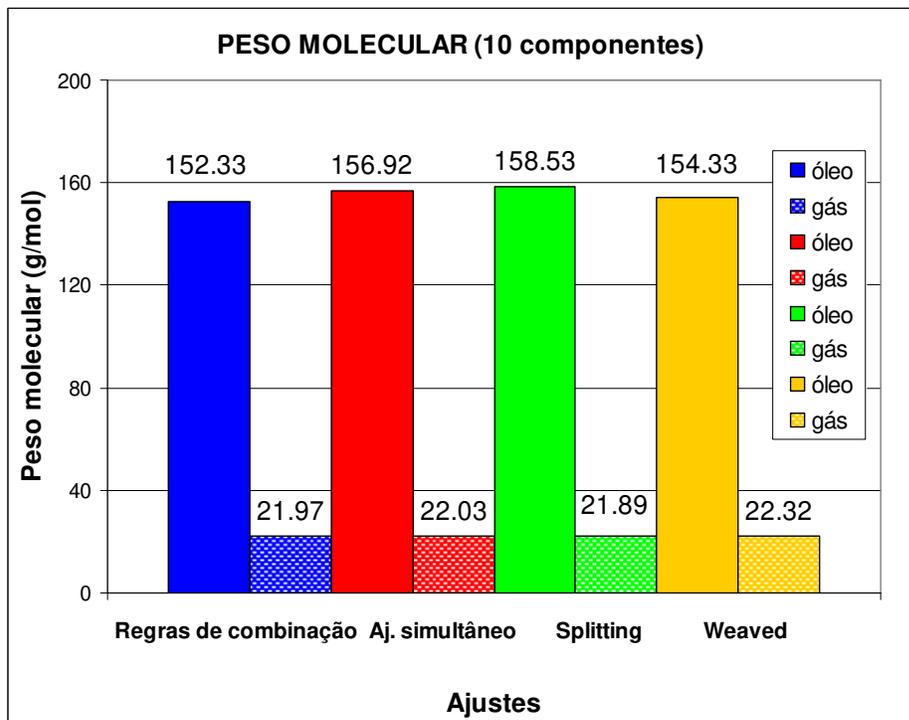


Figura 5.7 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 10 componentes.

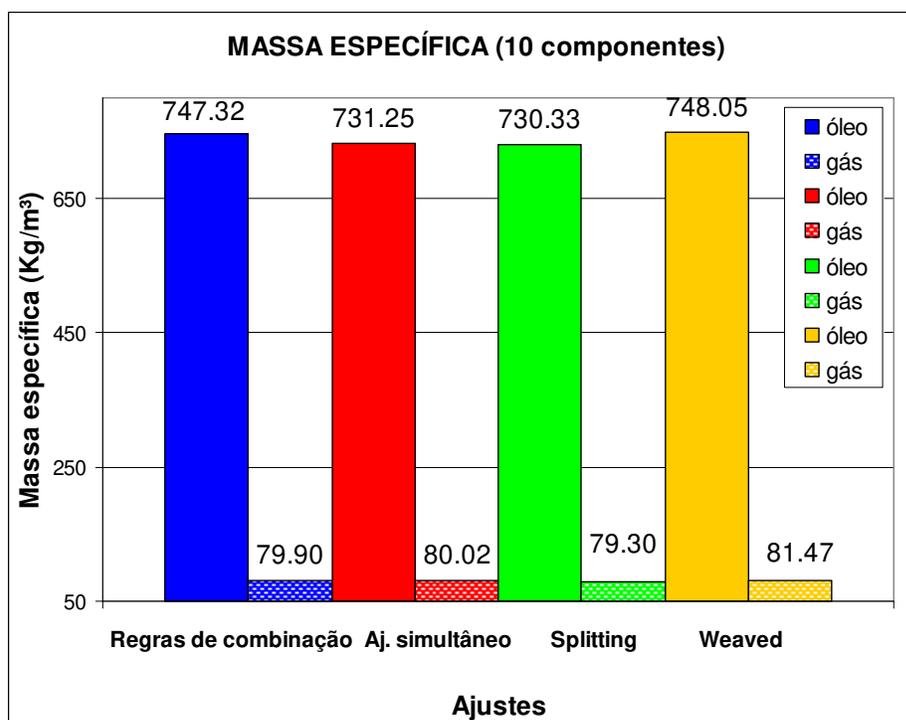


Figura 5.8 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 10 componentes.

Pode-se observar nas colunas ordenadas por ajuste que as propriedades avaliadas não apresentaram variações significativas entre os diversos métodos de ajuste. Essas propriedades são também analisadas em termos percentuais através da Tabela 5.3, onde as diferenças percentuais de cada propriedade dos métodos comparativos são comparadas em relação ao método de ajuste com regras de combinação, para óleo e para gás.

Tabela 5.3 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação *flash*, entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos (10 componentes).

FRAÇÃO VOLUME	Óleo	Gás	FRAÇÃO MOLAR	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	1,1	-1,6	Aj. simultâneo	-0,8	1,6
<i>Splitting</i>	2,5	-3,7	<i>Splitting</i>	0,1	-0,2
<i>Weaved</i>	-1,3	2,0	<i>Weaved</i>	-1,6	3,3
PESO MOLECULAR	Óleo	Gás	MASSA ESPECÍFICA	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	3,0	0,3	Aj. simultâneo	-2,1	0,2
<i>Splitting</i>	4,1	-0,4	<i>Splitting</i>	-2,3	-0,8
<i>Weaved</i>	1,3	1,6	<i>Weaved</i>	0,1	2,0

Portanto, na Tabela 5.3 a maior diferença encontrada foi na fração volume do gás (-3,7%), onde o método *splitting* obteve um resultado um pouco abaixo do encontrado no ajuste com regras de combinação.

Avaliando a mesma propriedade da fase gás pode-se afirmar que a maior diferença entre métodos de ajuste encontra-se entre os métodos *splitting* e *weaved* alcançando cerca de 5,7% (de 2,0 para -3,7). Esse valor dá uma ideia da pequena diferença gerada entre os métodos, como não há o dado experimental para este caso, não há como afirmar qual método representa melhor a mistura, mas somente que o método aplicado as simulações de escoamento apresenta, para estas propriedades, resposta semelhante aos métodos comparativos.

Na simulação *flash* também é possível analisar a composição por componente em cada fase, para isso, foram gerados gráficos da fase líquida (Figura 5.9) e da fase gasosa (Figura 5.10) em relação ao método de ajuste com regras de combinação (R. combinação) e aos outros métodos de ajuste comparativos.

É possível observar nas Figuras 5.9 e Figura 5.10, algumas diferenças de composição entre as fases, principalmente no pseudocomponente CO₂-C₂. Nessa fração a diferença ocorreu devido aos diferentes valores atribuídos aos coeficientes de interação binária com a fração pesada (C₂₀₊) durante o processo de ajuste. Observa-se também que para as condições de p e T atribuídas no ensaio *flash* as variações da fração pesada são desprezíveis.

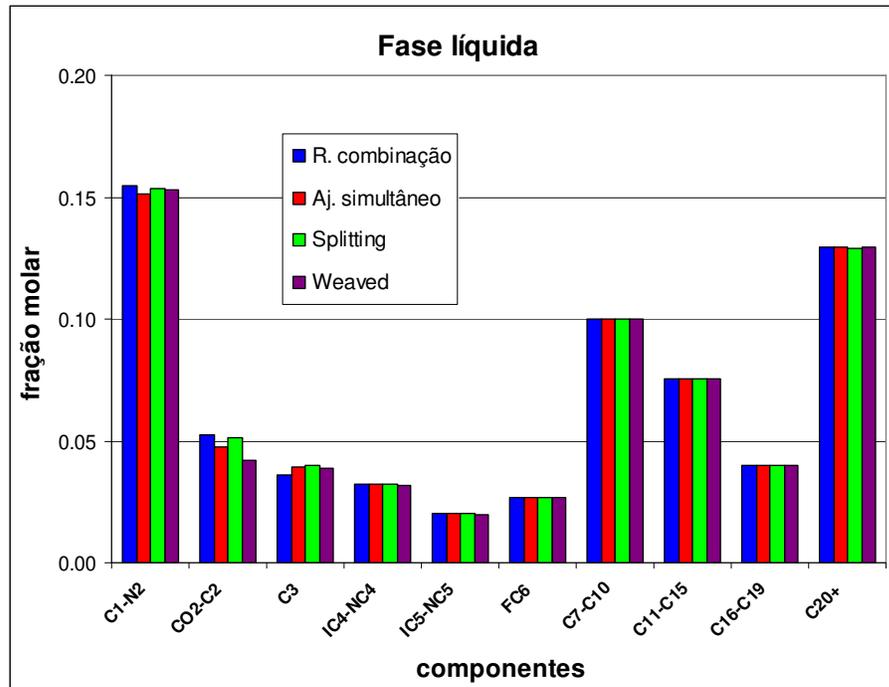


Figura 5.9 - Composição do agrupamento de 10 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos.

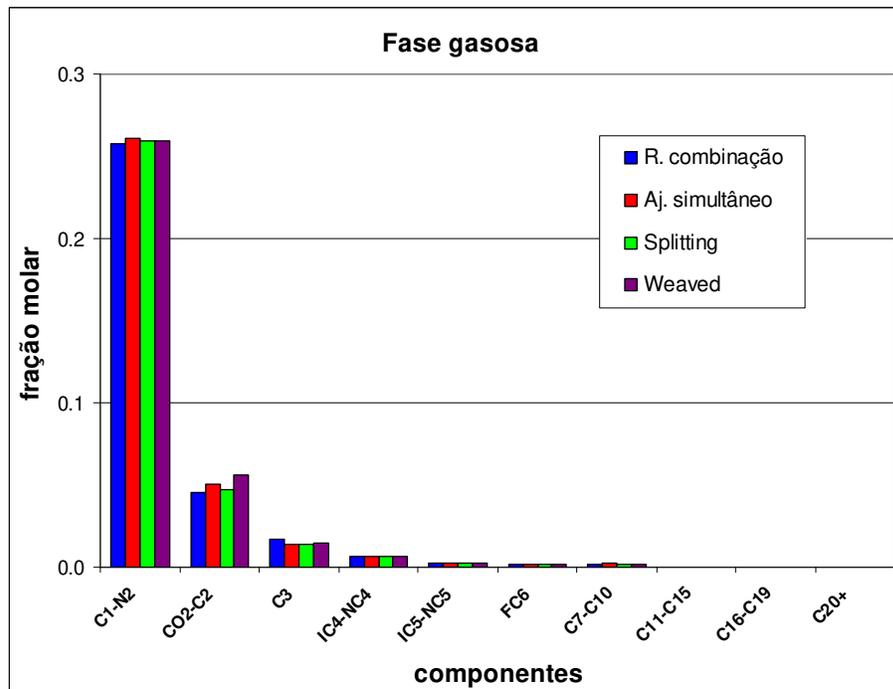


Figura 5.10 - Composição do agrupamento de 10 componentes (fase gasosa), para os 4 métodos de ajuste propostos.

As diferenças em função do método de ajuste com regras de mistura são mostradas na Tabela 5.4 e somente na fase líquida, pois na fase gasosa alguns componentes encontram-se em ínfimas quantidades, tornando errônea qualquer avaliação entre os métodos de ajustes.

Além das frações mais leves, outro componente que apresentou uma variação relevante foi o C₃. Entretanto, os resultados dos outros 3 métodos de ajuste foram semelhantes entre si, indicando que apenas um ajuste se apresentava diferente dos outros. Tal diferença se originou do ajuste da PVT Well 4 com as regras de combinação. Nesse ajuste, o coeficiente de interação binária do C₃ foi modificado na tentativa de atender os valores de tolerância da regressão. Tal recurso não necessitou ser empregado nos outros 3 ajustes. Essa necessidade revela uma característica que pode ser limitante para o método, pois o ajuste pontual de um componente qualquer, em apenas um fluido, pode resultar em uma mistura mal ajustada.

Tabela 5.4 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os diversos métodos de ajuste propostos e método de ajuste com regras de combinação (10 componentes).

Componentes	Aj. simultâneo	<i>Splitting</i>	<i>Weaved</i>
C1-N2	2,26	0,86	1,23
CO2-C2	9,24	2,68	20,04
C3	-9,03	-9,65	-6,28
IC4-NC4	-0,18	-0,55	1,03
IC5-NC5	0,14	-0,10	0,64
FC6	0,29	0,16	0,36
C7-C10	0,24	0,18	0,14
C11-C15	0,06	0,03	0,03
C16-C19	0,02	0,00	0,02
C20+	0,00	0,10	0,00

Para 8 componentes optou-se pelo agrupamento descrito na Tabela 5.1. Os resultados após a simulação *flash* observados são fração volume (Figura 5.11), fração molar (Figura 5.12), peso molecular (Figura 5.13) e massa específica (Figura 5.14).

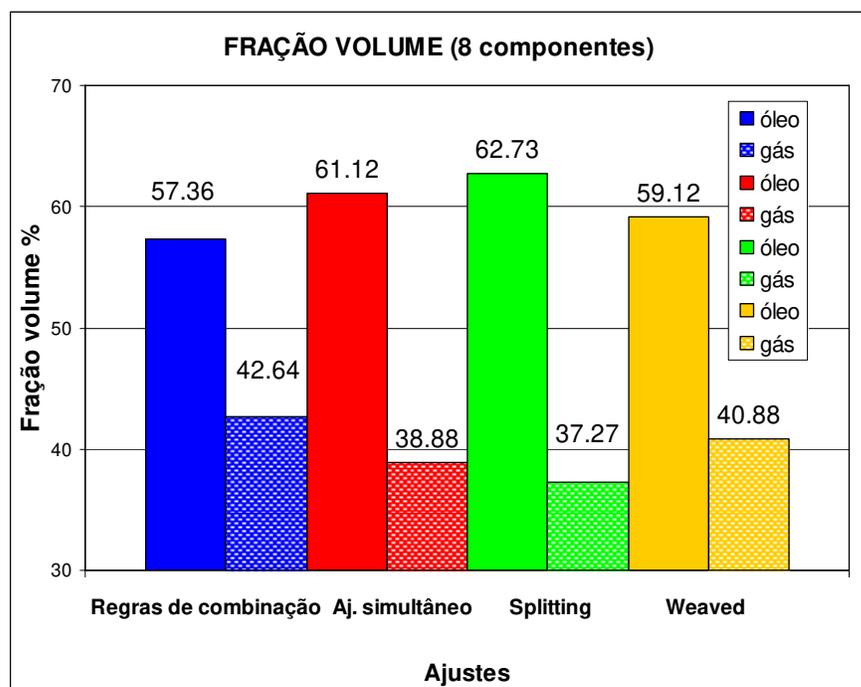


Figura 5.11 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

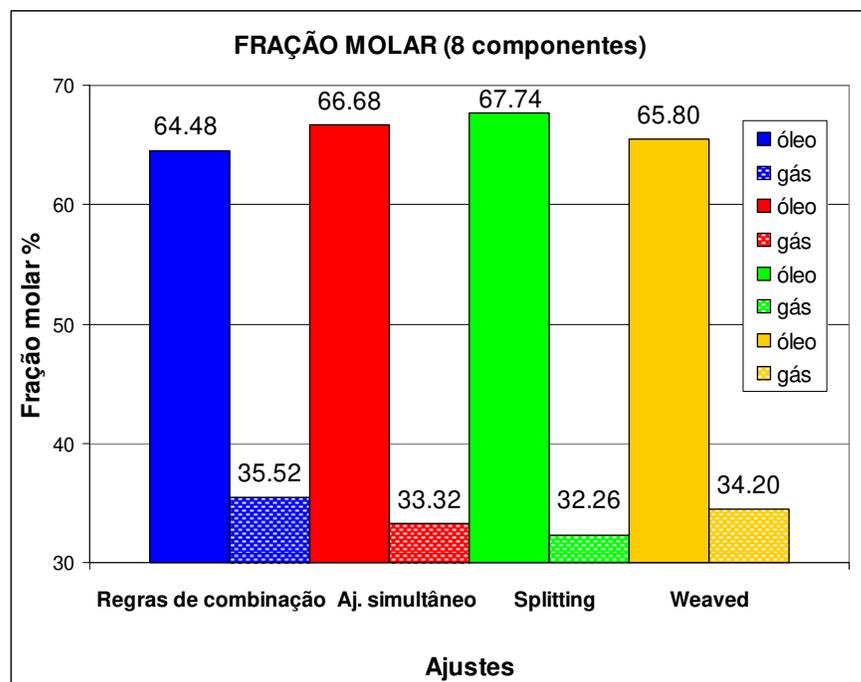


Figura 5.12 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

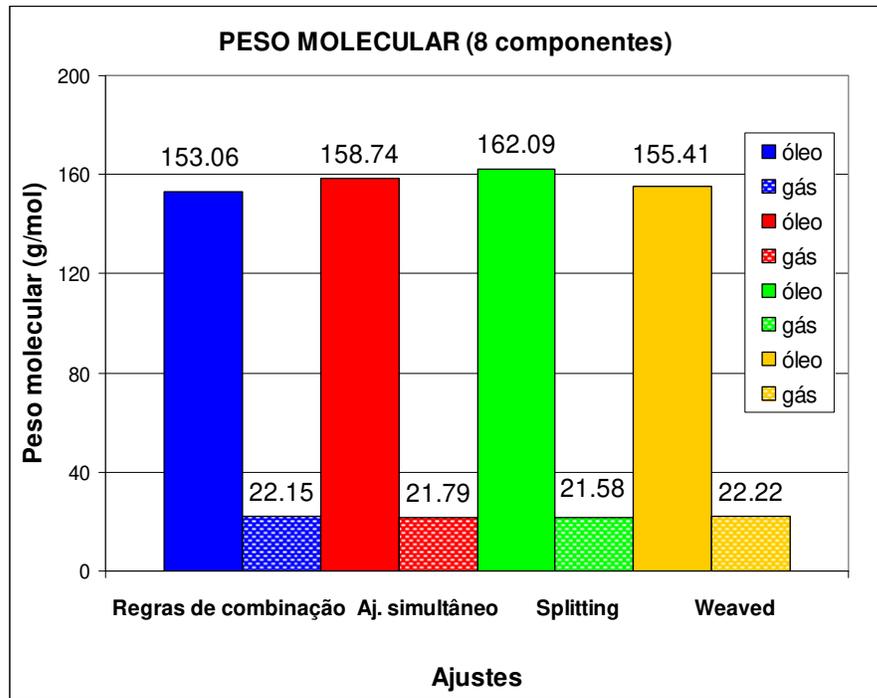


Figura 5.13 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

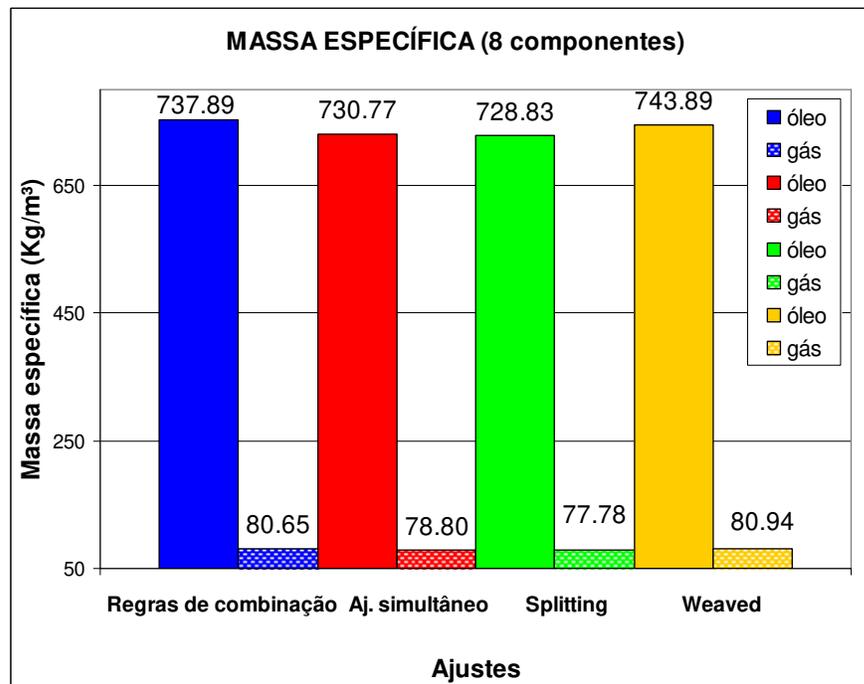


Figura 5.14 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

Observa-se nos gráficos das figuras anteriores que algumas propriedades avaliadas apresentaram variações significativas. Essas variações são também evidenciadas em termos percentuais através da Tabela 5.5, onde o método de ajuste com regras de combinação é novamente comparado percentualmente aos outros 3 métodos de ajuste para misturas.

Tabela 5.5 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação *flash*, entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos (8 componentes).

FRAÇÃO VOLUME	Óleo	Gás	FRAÇÃO MOLAR	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	6,6	-8,8	Aj. simultâneo	3,4	-6,2
<i>Splitting</i>	9,4	-12,6	<i>Splitting</i>	5,0	-9,2
<i>Weaved</i>	3,1	-4,1	<i>Weaved</i>	1,6	-2,9
PESO MOLECULAR	Óleo	Gás	MASSA ESPECÍFICA	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	3,7	-1,6	Aj. simultâneo	-2,9	-2,3
<i>Splitting</i>	5,9	-2,6	<i>Splitting</i>	-3,1	-3,6
<i>Weaved</i>	1,5	0,3	<i>Weaved</i>	-1,1	0,4

No que se refere aos métodos de ajuste, as maiores diferenças ocorrem em relação ao método de ajuste com *splitting*. Analisando o processo de regressão observa-se que cada método utilizou diferentes parâmetros de ajuste na regressão. Nos ajustes dos óleos em separado (regras de combinação) observa-se que o Well 4 usa apenas um único parâmetro de regressão (pressão crítica), já o Mixture 2 utiliza sete parâmetros (pressão crítica, temperatura crítica, fator acêntrico, peso molecular, translação de volume, BIC do par C_1-N_2 x C_{20+} e o expoente dos BIC). Novamente aqui, o ajuste independente dos fluidos pode gerar uma EOS muito diferente em relação aos outros métodos comparativos.

Repetindo a mesma sequência do agrupamento anterior na simulação *flash* é possível também analisar a composição por componente em cada fase. Na Figura 5.15, há uma comparação dos 4 métodos de ajuste em função da fase líquida e na Figura 5.16 em função da fase gasosa.

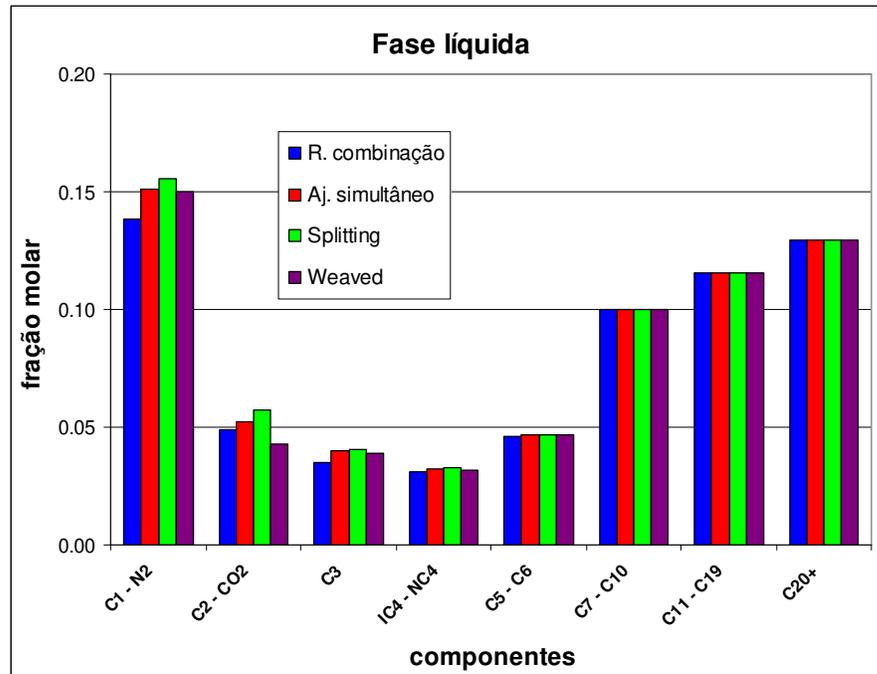


Figura 5.15 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos.

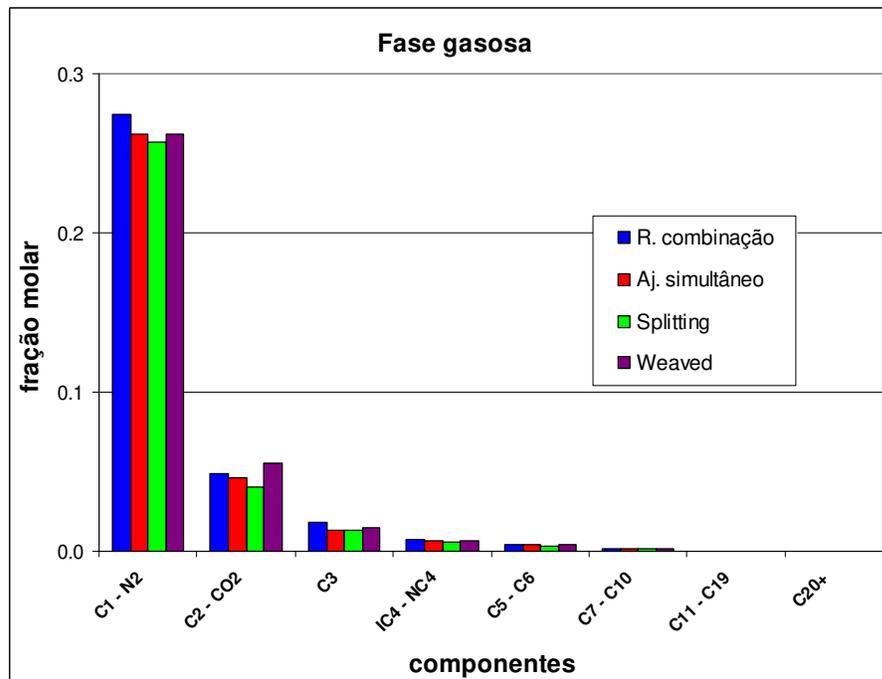


Figura 5.16 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase gasosa), para os 4 métodos de ajuste propostos.

Observa-se nas Figuras 5.15 e 5.16 diferenças de composição entre os métodos de ajuste, principalmente nos componentes mais leves (C₁-N₂, CO₂-C₂, e C₃).

As diferenças em função do método de ajuste com regras de mistura são mostradas na Tabela 5.6 na fase líquida, apresentando diferenças um pouco maiores que as apresentadas para 10 componentes. Tais diferenças ocorreram devido aos parâmetros de ajustes utilizados em cada método, principalmente aos coeficientes de interação binária das frações leves com a fração pesada. As diferenças causadas pelas frações leves foram suficientemente relevantes para causar diferenças entre os métodos, nas propriedades geradas pela simulação (fração volume, fração molar, peso molecular e massa específica).

O agrupamento para 6 componentes está descrito na Tabela 5.1. Os resultados após a simulação *flash* podem ser observados nos gráficos das Figuras 5.17 a 5.20.

Pode-se observar nos gráficos das Figuras 5.19 e 5.20 que, para este último agrupamento (6 componentes), algumas propriedades avaliadas apresentaram variações pouco significativas. Essas variações são também evidenciadas em termos percentuais através da Tabela 5.7, onde o método de ajuste com regras de combinação é comparado aos outros 3 métodos de ajuste para misturas.

Tabela 5.6 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os diversos métodos de ajuste propostos e método de ajuste com regras de combinação (8 pseudocomponentes).

Componentes	Aj. simultâneo	<i>Splitting</i>	<i>Weaved</i>
C1-N2	8,43	-2,94	0,45
CO2-C2	5,73	-9,98	17,54
C3	12,15	-1,44	2,59
IC4-NC4	2,99	-0,79	1,39
C5-C6	0,86	-0,26	0,40
C7-C10	0,04	-0,02	0,00
C11-C19	-0,01	0,00	0,00
C20+	0,00	0,00	0,00

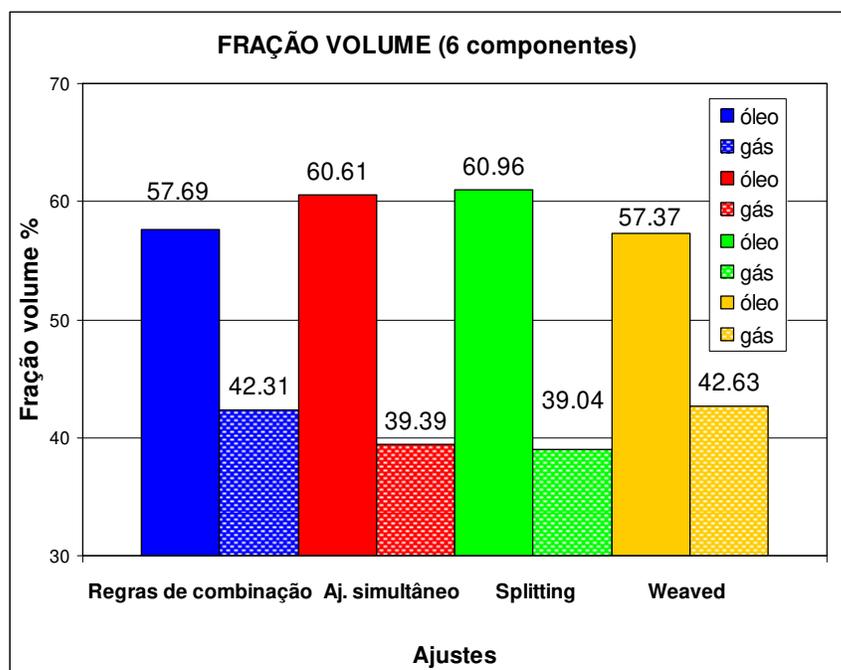


Figura 5.17 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

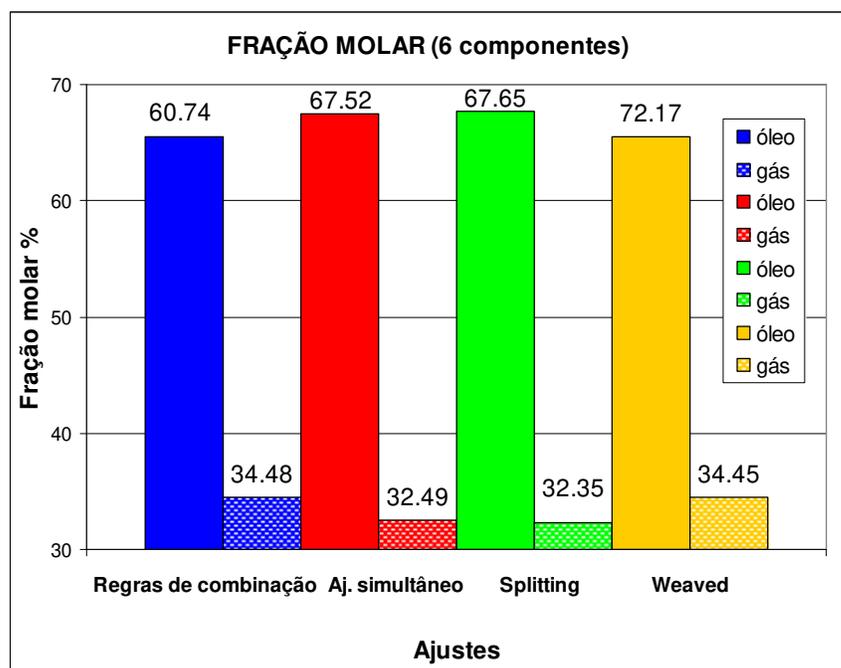


Figura 5.18 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

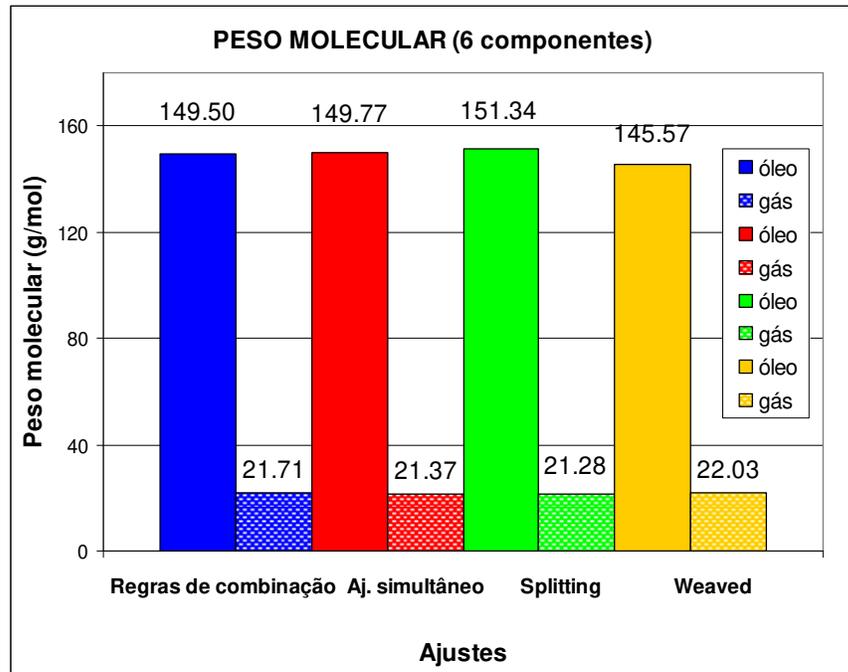


Figura 5.19 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

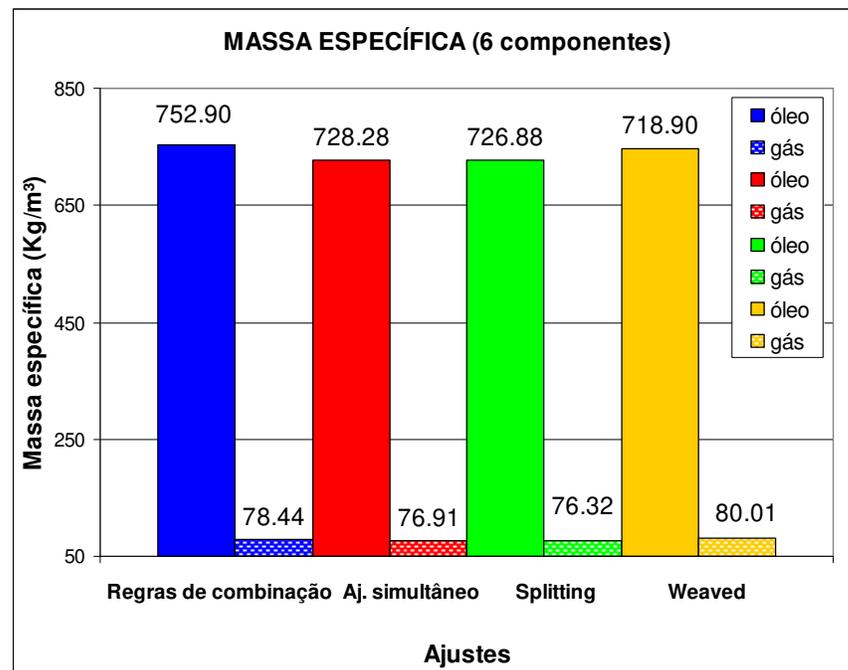


Figura 5.20 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

Tabela 5.7 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação *flash*, entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos (6 componentes).

FRAÇÃO VOLUME	Óleo	Gás	FRAÇÃO MOLAR	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	5,1	-6,9	Aj. simultâneo	3,0	-5,8
Splitting	5,7	-7,7	Splitting	3,2	-6,2
Weaved	-0,6	0,8	Weaved	0,0	-0,1
PESO MOLECULAR	Óleo	Gás	MASSA ESPECÍFICA	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	0,2	-1,6	Aj. simultâneo	-3,3	-1,9
Splitting	1,2	-2,0	Splitting	-3,5	-2,7
Weaved	-2,6	1,5	Weaved	-0,7	2,0

As maiores diferenças percentuais apresentadas na Tabela 5.7 ocorrem para a propriedade de fração volume, nos métodos de ajuste *splitting* e *weaved*, entretanto os valores encontram-se dentro da margem de tolerância aceitável

Repetindo a mesma sequência dos agrupamentos anteriores, na simulação *flash* é possível também analisar a composição por componente em cada fase. Nas Figuras 5.21 e 5.22 há uma comparação dos 4 métodos de ajuste em função das fases.

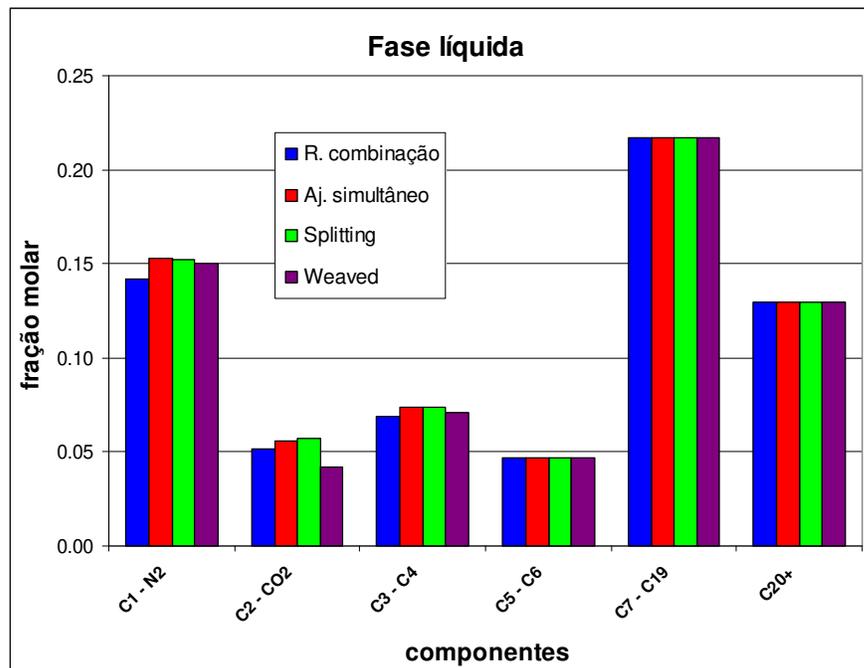


Figura 5.21 - Composição do agrupamento de 6 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos.

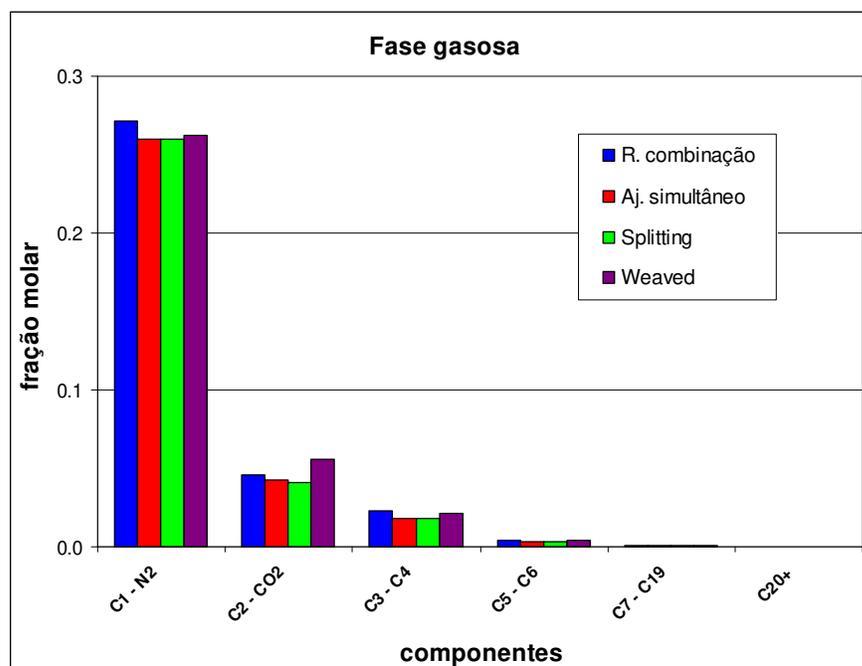


Figura 5.22 - Composição do agrupamento de 6 componentes (fase gasosa), para os 4 métodos de ajuste propostos.

As diferenças em função do método de ajuste com regras de mistura são mostradas na Tabela 5.8 e somente na fase líquida. Observa-se que há uma grande diferença para o pseudocomponente CO₂-C₂ no ajuste *weaved*, inclusive em relação aos outros dois métodos comparativos. Esta diferença é justificável, pois neste método um número menor de parâmetros de ajuste foi utilizado (temperatura crítica e peso molecular), causando a distorção nos valores finais, entretanto não foi suficiente para alterar as propriedades citadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.8 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os diversos métodos de ajuste propostos e método de ajuste com regras de combinação (6 pseudocomponentes).

Componentes	Aj. simultâneo	Splitting	Weaved
C1-N2	7,39	7,21	5,58
CO2-C2	6,41	9,46	-23,93
C3-C4	6,73	6,28	2,85
C5-C6	0,53	0,60	-0,14
C7-C19	-0,07	-0,03	-0,01
C20+	0,00	0,00	0,00

5.1.3 Envelopes de fases da primeira mistura

Os envelopes de fases foram gerados e ordenados em função dos quatro métodos de ajuste e seus agrupamentos, e estão representados nas Figuras 5.23 a 5.26.

Na Figura 5.23, que representa o equilíbrio das fases em função de p e T do método de ajuste com regras de combinação, observa-se uma variação nos envelopes de todos os agrupamentos. Com isso, na faixa de interesse (temperatura = 98,6°C), os valores de pressão chegam a variar em cerca de 30 kgf/cm², um valor considerável para uma predição. Essa variação pode ter como causa o uso das regras de combinação, pois neste tipo de ajuste os parâmetros de regressão são ajustados independentemente para cada fluido pertencente à mistura, ocasionando comportamentos diferentes dependendo do agrupamento escolhido.

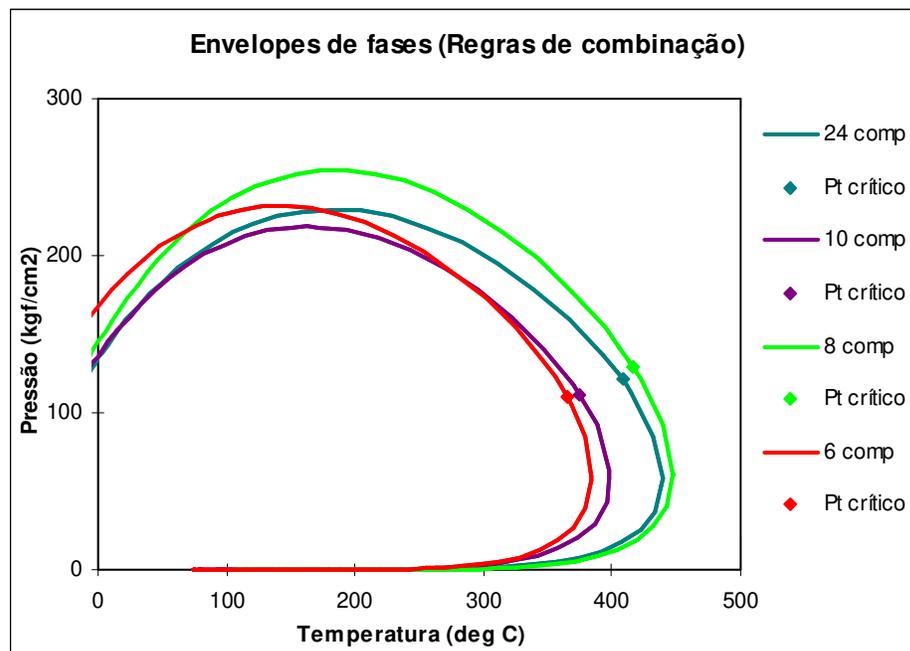


Figura 5.23 – Envelopes de fases para o método de ajuste com regras de combinação nos diversos agrupamentos propostos.

Nas Figuras 5.24 e 5.25, que representam respectivamente o ajuste simultâneo e o ajuste com *splitting*, observam-se situações semelhantes entre si: o envelope de fases com 24 componentes apresentou um formato que se descaracteriza a partir do agrupamento com 10 componentes, mantendo-se praticamente igual para os agrupamentos restantes. Na temperatura de

interesse (98,6°C) os envelopes com 24 componentes convergiram com os outros agrupamentos propostos.

Segundo Mello (2011), a variação do envelope em função do agrupamento é devido à regressão da EOS ser um problema inverso, com uma infinidade de alterações distintas que podem alcançar o mesmo resultado. Portanto, em diferentes tipos de agrupamento que alcancem bons ajustes na regressão, existe a possibilidade de ocorrerem diferenças no formato do envelope de fases devido ao arranjo escolhido. O ideal é que seja escolhido outro arranjo no processo de pseudoização.

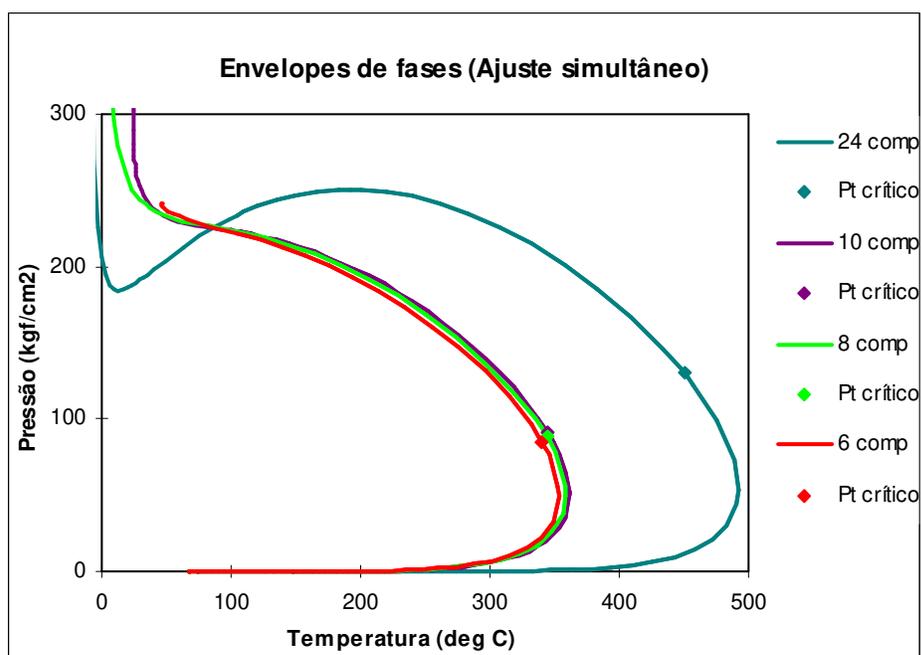


Figura 5.24 - Envelopes de fases para o método de ajuste simultâneo nos diversos agrupamentos propostos.

Para este caso de estudo, uma mudança na configuração do agrupamento pode alterar seu formato, aproximando-o do envelope de 24 componentes, que é a informação mais completa do fluido. No entanto, a variação da configuração do agrupamento nos diferentes métodos de ajuste penalizaria a comparação por pseudocomponentes em cada fase. A aquisição de dados PVT em diferentes temperaturas também contribuiria para um envelope mais representativo.

Outra observação importante é o surgimento de uma inversão da tendência dos envelopes das Figuras 5.23 e 5.24 à medida que se diminui a temperatura. Esse brusco aumento da pressão é indicativo de um equilíbrio líquido-líquido, onde naquela faixa é impossível distinguir as fases, sendo causado por grandes alterações da EOS (uso excessivo de parâmetros de regressão) ou um agrupamento não representativo.

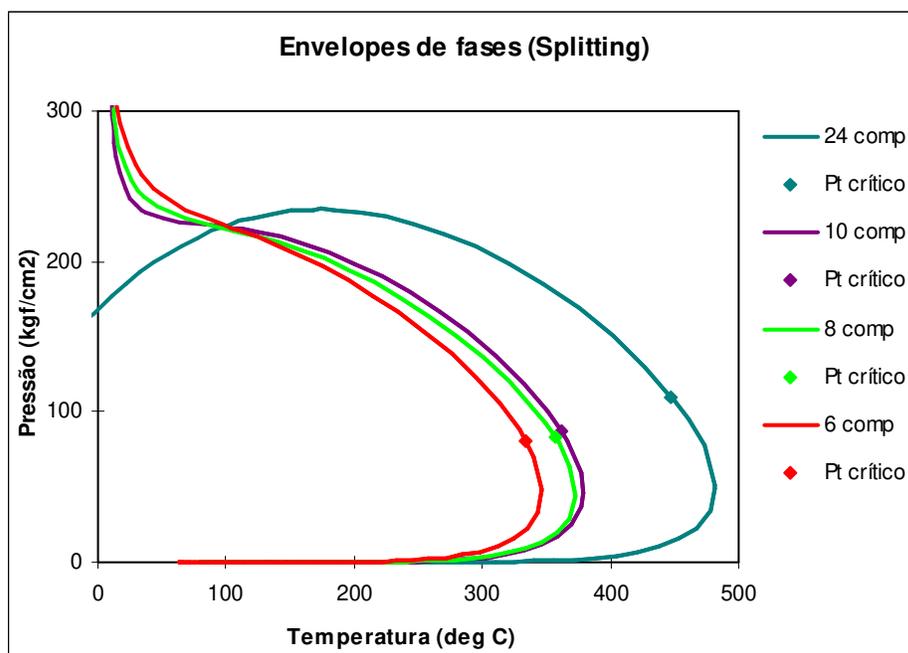


Figura 5.25 - Envelopes de fases para o método de ajuste *splitting* nos diversos agrupamentos propostos.

Na Figura 5.26, que representa o método de ajuste *weaved*, pode ser observado um comportamento similar entre o envelope com 24 componentes e os agrupamentos gerados. A manutenção da fração pesada (C20+) de cada fluido pode ter atenuado as distorções observadas nas três figuras anteriores, fazendo com que os agrupamentos escolhidos não mascarem o comportamento das frações que justamente carregam maior incerteza podendo alterar o valor do ponto de orvalho.

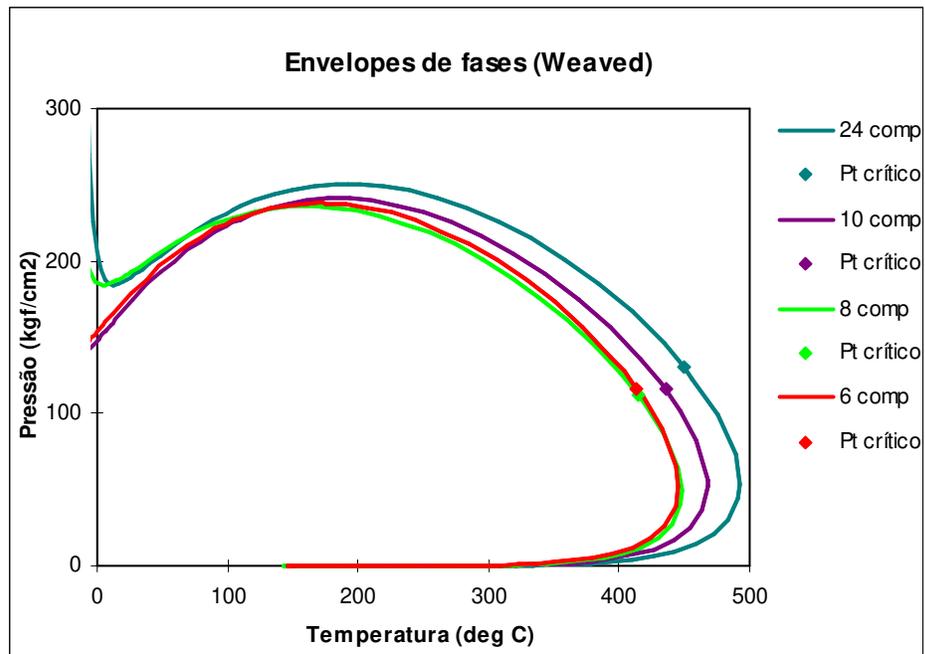


Figura 5.26 - Envelopes de fases para o método de ajuste *weaved* nos diversos agrupamentos propostos.

5.1.4 Avaliação dos resultados da primeira mistura.

Através dos resultados do cálculo do equilíbrio de fases para os diversos agrupamentos, o método com as regras de combinação, em geral, apresentou resultados similares aos outros métodos de ajuste comparativos. Quando ocorreram diferenças significativas, foi possível constatar que o ajuste separado para cada fluido constituinte da mistura causou distorções em relação aos outros métodos de ajuste, devido ao uso de diferentes parâmetros de regressão.

Os parâmetros de regressão que causaram as maiores distorções foram: a pressão crítica, temperatura crítica e os BIC. A pressão crítica incide direto na EOS, sendo um parâmetro de regressão necessário em todos os ajustes realizados. A temperatura crítica, que também incide direto na EOS, foi um parâmetro utilizado quando a pressão crítica não foi suficiente para ajustar a EOS. Já os BIC são sempre parâmetros de ajuste importantes, pois esse tipo de dado é estimado para misturas binárias ou terciárias, não refletindo os efeitos de fluidos tão complexos como os discutidos no presente trabalho, principalmente em interações que envolvam frações leves com a fração pesada C20+.

A similaridade dos resultados dos três métodos comparativos indica que os artifícios usados como o *splitting* e o *weaved* não alteraram de forma significativa a resposta final (os dois artifícios são adaptados ao método de ajuste simultâneo, que é a base de todos os métodos de ajuste). Isso ocorre porque a fração pesada (C20+), que é onde incidem os artifícios, quase não varia entre as fases. Entretanto, pelas diferentes maneiras como o C20+ foi caracterizado, em uma condição de p e T de reservatório, é possível que diferenças sejam observadas.

Por não haver o dado experimental da mistura resultante, não há como afirmar que determinado método apresenta maior eficácia, mas sim que para os dados selecionados, o método com regras de combinação, em geral, apresentou resultados similares aos outros métodos utilizados para simular misturas de óleos.

5.2 Resultados da segunda mistura

A segunda mistura simulada tem como constituintes dois conjuntos de dados PVT denominados Óleo A e Óleo B. Completando os dados, há também os ensaios PVT da mistura desses dois óleos, na proporção de 50% cada, propiciando uma comparação dos dados experimentais com o método de ajuste com regras de combinação e com outros métodos de ajuste comparativos.

Todos os conjuntos de dados PVT relativos à segunda mistura foram inicialmente ajustados para vinte quatro componentes através de uma regressão não-linear. Esses primeiros ajustes formam a base para os agrupamentos de todos os métodos de ajustes propostos. Cada método de ajuste foi agrupado em três diferentes números de componentes e pseudocomponentes. Os diferentes tipos de agrupamento podem ser observados na Tabela 5.9.

Os ajustes são validados seguindo os limites aceitáveis de cada dado experimental (Item 3.4) e os dados experimentais ajustados, para todos os agrupamentos, podem ser observadas no Anexo 1 (Item II).

Tabela 5.9 - Agrupamentos propostos para a segunda mistura.

10 componentes	8 componentes	6 componentes
C1 - N2	C1 - N2	C1 - N2
C2 - CO2	C2 - CO2	C2 - CO2
C3	C3	C3 - C4
IC4 - NC4	IC4 - NC4	C5 - C6
IC5 - NC5	C5 - C6	C7 - C19
C6	C7 - C10	C20+
C7 - C10	C11 - C19	-
C11 - C15	C20+	-
C16 - C19	-	-
C20+	-	-

Após o ajuste das PVT nas EOS (tanto para a composição inicial quanto para os agrupamentos), foram executadas as simulações *flash* em condições de pressão e temperatura pré-estabelecidas: pressão de 100 Kgf/cm² e temperatura de 40 °C. Em seguida, o método com regras de mistura foi comparado ao ajuste com dados experimentais da mistura, assim como os outros três métodos. As propriedades avaliadas são aquelas usualmente utilizadas dentro de uma simulação composicional: fração volume, fração molar, peso molecular e massa específica. A simulação executada é equivalente a um passo de tempo de um simulador numérico de fluxo de uso comercial.

5.2.1 Resultados para 24 componentes.

Os relatórios com dados PVT têm sua composição definida em número de carbono, totalizando 24 componentes entre isômeros, compostos inorgânicos (N₂ e CO₂) e uma fração pesada denominada de C20+. Para os agrupamentos definidos na Tabela 5.9 exige-se que a composição inicial esteja ajustada, sendo posteriormente utilizada como base de comparação para os agrupamentos ajustados. Essa etapa corresponde aos dois primeiros diagramas dos procedimentos de ajuste nas Figuras 3.3 a 3.6.

Os dados experimentais da mistura foram ajustados sem nenhum artifício adicional como *weaved* ou *splitting*, seguindo apenas os critérios para regressão citados no Item 3.4.

Após a simulação *flash* os resultados em função das propriedades geradas na simulação foram dispostos nos gráficos das Figuras 5.27 a 5.30. O método de ajuste simultâneo (Aj. simultâneo) inicialmente também representa o método de ajuste *weaved*, pois serve de base para ambos nos agrupamentos.

Diferentemente da primeira mistura, o ajuste que será tomado como base de comparação será o realizado com os dados experimentais. Na Tabela 5.10 as diferenças em função dos dados experimentais ajustados, em relação a cada método de ajuste proposto, são expressas em termos percentuais.

Observam-se na Figura 5.27 pequenas diferenças dos dados experimentais em relação aos outros métodos, mas que não chegam a ser relevantes, podendo ser atribuídas às variações de massa específica e peso molecular. Analisando as outras três propriedades restantes (Figuras 5.28, 5.29 e 5.30) todos os métodos propostos alcançaram resultados muito semelhantes (Tabela 5.10), tanto nas colunas que representam o óleo como nas colunas de gás.

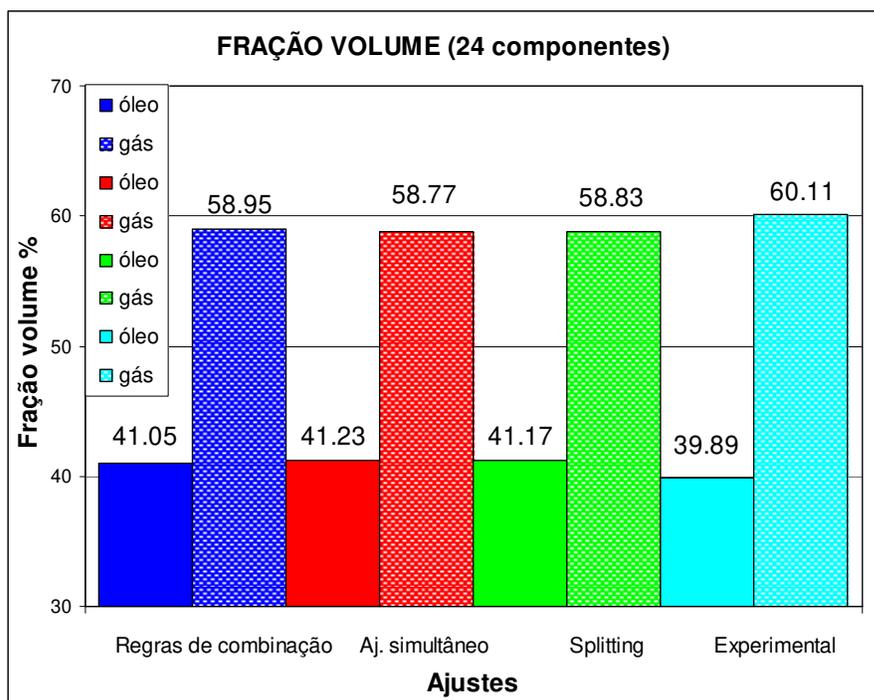


Figura 5.27 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste e o ajuste com dados experimentais da mistura, para 24 componentes.

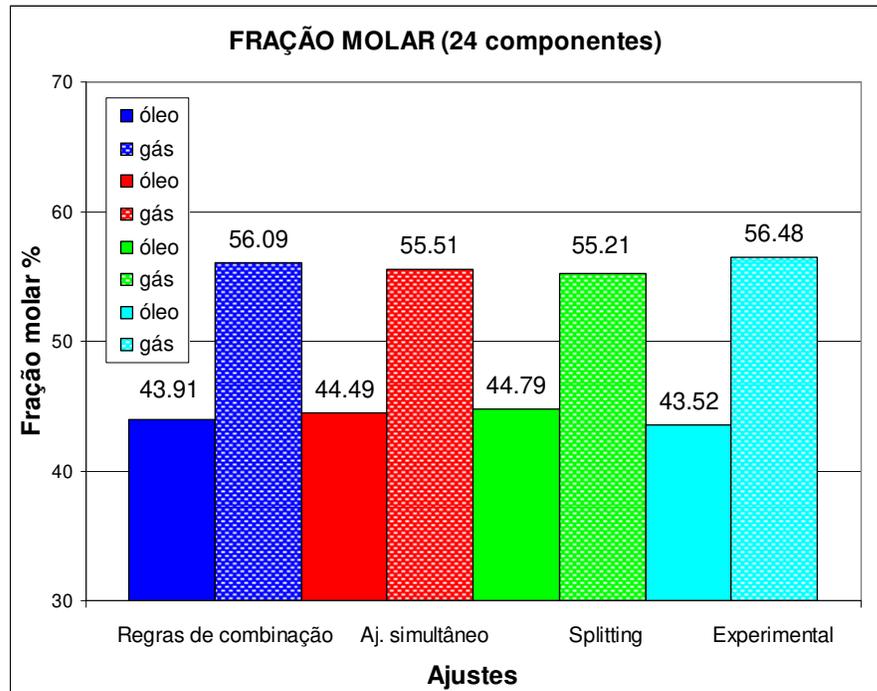


Figura 5.28 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste e o ajuste com dados experimentais da mistura, para 24 componentes.

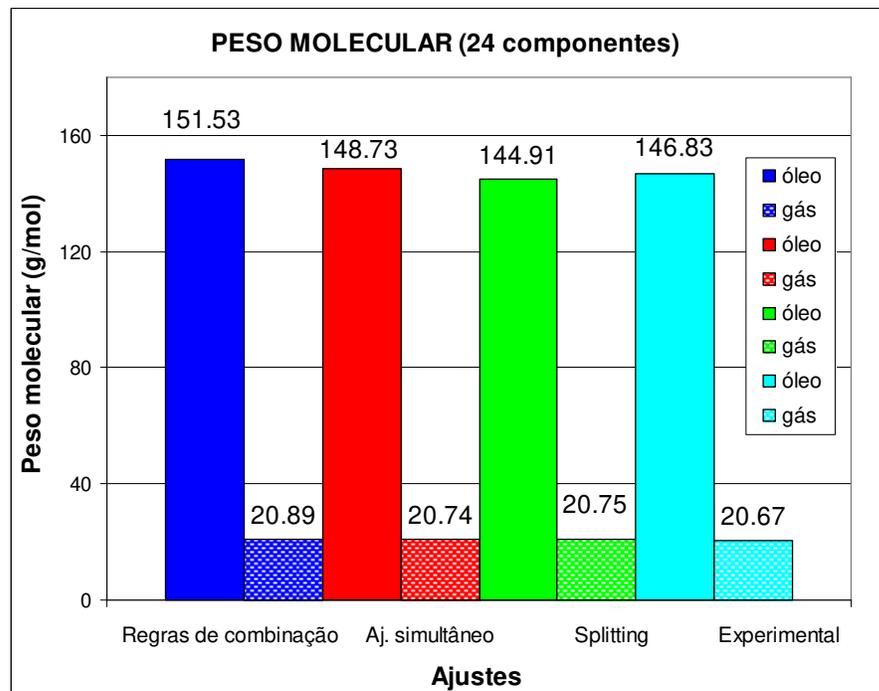


Figura 5.29 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste e o ajuste com dados experimentais da mistura, para 24 componentes.

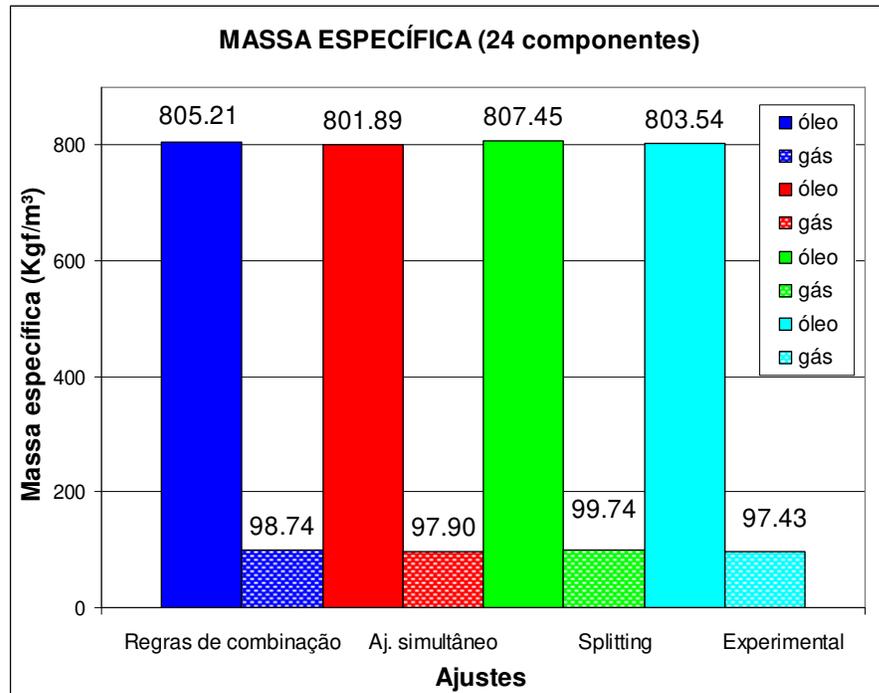


Figura 5.30 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste e o ajuste com dados experimentais da mistura, para 24 componentes.

Tabela 5.10 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação *flash*, entre o ajuste com os dados experimentais, o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos.

FRAÇÃO VOLUME	Óleo	Gás	FRAÇÃO MOLAR	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	3,3	-2,2	Aj. simultâneo	2,2	-1,7
Splitting	3,2	-2,1	Splitting	2,9	-2,2
R. Combinação	2,9	-1,9	R, Combinação	0,9	-0,7
PESO MOLECULAR	Óleo	Gás	MASSA ESPECÍFICA	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	1,3	0,3	Aj. simultâneo	-0,2	0,5
Splitting	-1,3	0,4	Splitting	0,5	2,4
R. Combinação	3,2	1,1	R. Combinação	0,2	1,3

5.2.2 Resultados para os agrupamentos propostos

Após o ajuste para 24 componentes, os componentes das EOS ajustadas foram agrupados em 10, 8 e 6 componentes e pseudocomponentes. Cada novo agrupamento gerado seguiu um dos quatro procedimentos propostos no Item 3.4.

O agrupamento com 10 componentes está descrito na Tabela 5.9 e foi usado para todos os métodos de ajuste. As propriedades como fração volume, fração molar, peso molecular e massa específica podem ser observados respectivamente nas Figuras 5.31 a 5.34.

Observa-se através da Tabela 5.11 uma comparação percentual do método de ajuste com regras de combinação e os métodos de ajustes comparativos. Nessa tabela, as diferenças percentuais encontradas foram consideradas pequenas.

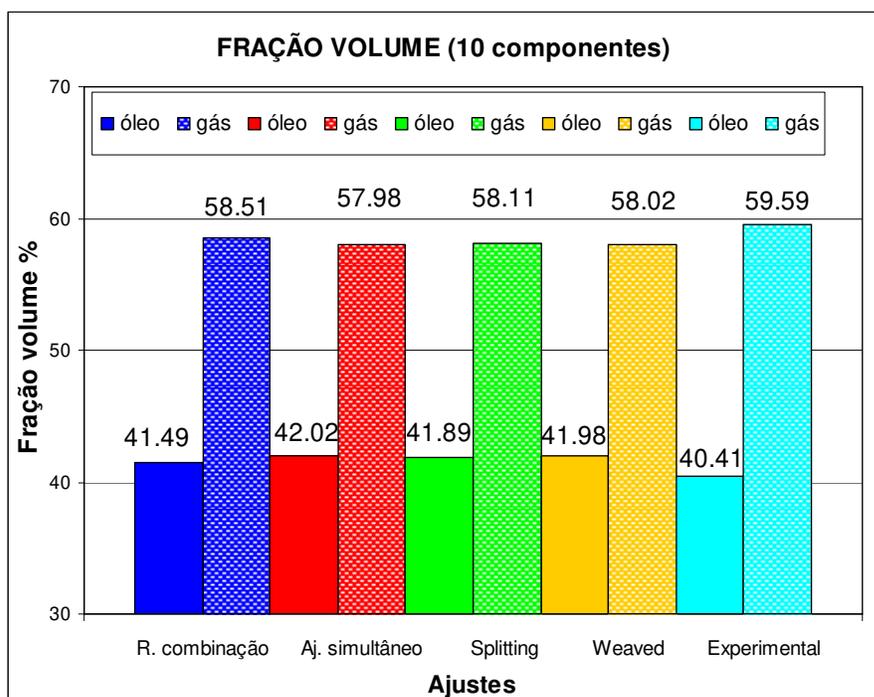


Figura 5.31 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 10 componentes.

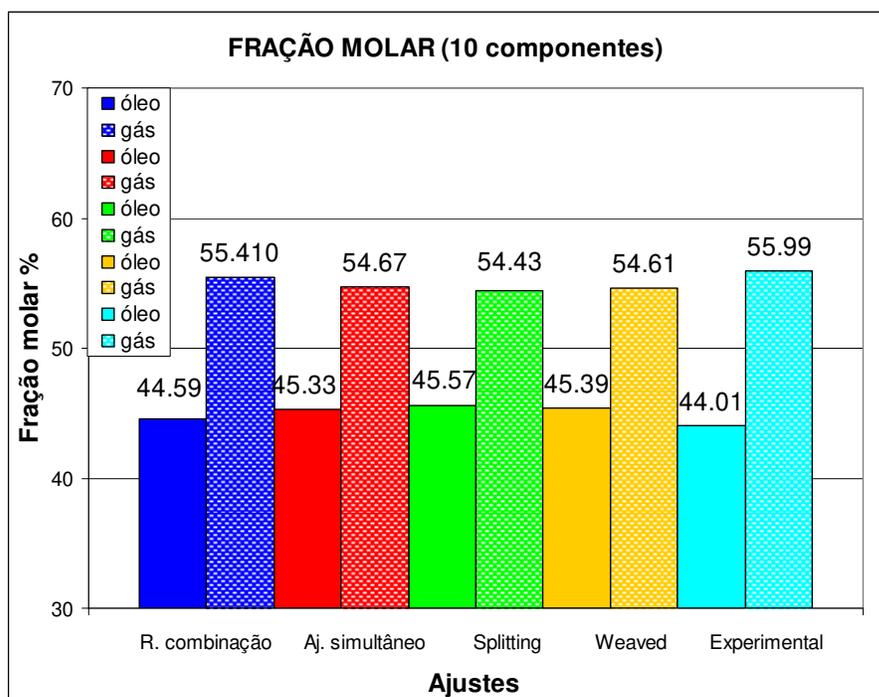


Figura 5.32 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 10 componentes.

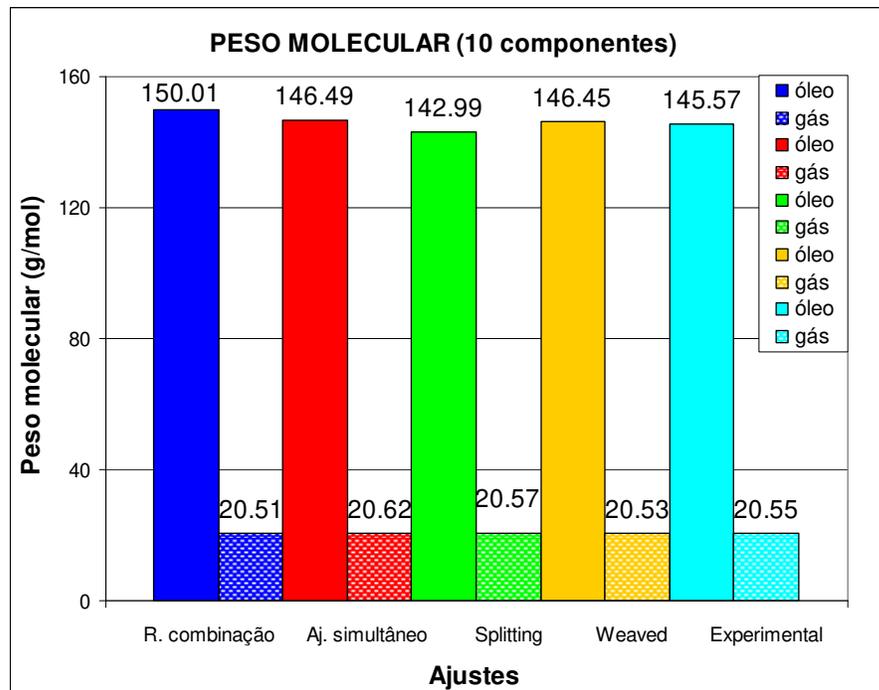


Figura 5.33 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 10 componentes.

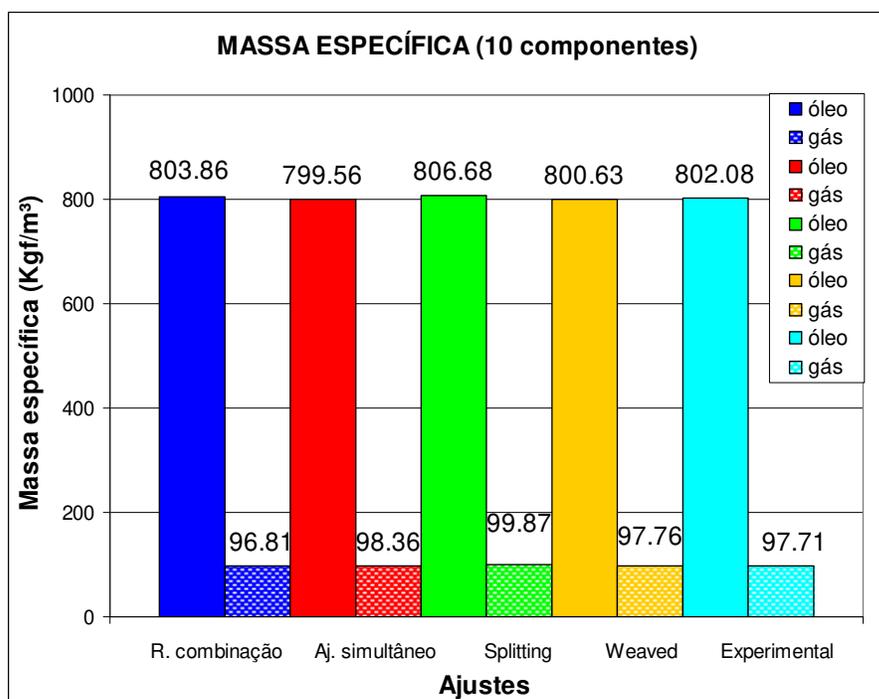


Figura 5.34 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 10 componentes.

Tabela 5.11 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação *flash*, entre o ajuste com os dados experimentais, o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos.

FRAÇÃO VOLUME	Óleo	Gás	FRAÇÃO MOLAR	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	4,0	-2,7	Aj. simultâneo	3,0	-2,4
Splitting	3,6	-2,5	Splitting	3,5	-2,8
Weaved	3,9	-2,6	Weaved	3,1	-2,5
R. Combinação	2,7	-1,8	R. Combinação	1,3	-1,0
PESO MOLECULAR	Óleo	Gás	MASSA ESPECÍFICA	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	0,6	0,3	Aj. simultâneo	-0,3	0,3
Splitting	-1,8	0,1	Splitting	0,6	0,1
Weaved	0,6	-0,1	Weaved	-0,2	-0,1
R. Combinação	3,1	-0,2	R. Combinação	0,2	-0,9

Nas Figuras 5.9 e 5.10 há uma comparação dos 4 métodos de ajuste em função da composição de cada fase. Tanto na Figura 5.9 (fase líquida), como na Figura 5.10 (fase gasosa) são observadas algumas diferenças de composição entre as fases, principalmente no pseudocomponente C1-N2. Nessa fração, a diferença ocorreu devido aos diferentes valores atribuídos aos coeficientes de interação binária com a fração pesada durante o processo de ajuste. Tais diferenças podem ser observadas em termos percentuais (em função dos dados

experimentais) na Tabela 5.12, e somente na fase líquida, pois assim como na primeira mistura na fase gasosa alguns componentes encontram-se em quantidades ínfimas, tornando considerável e errônea qualquer variação entre os métodos de ajustes.

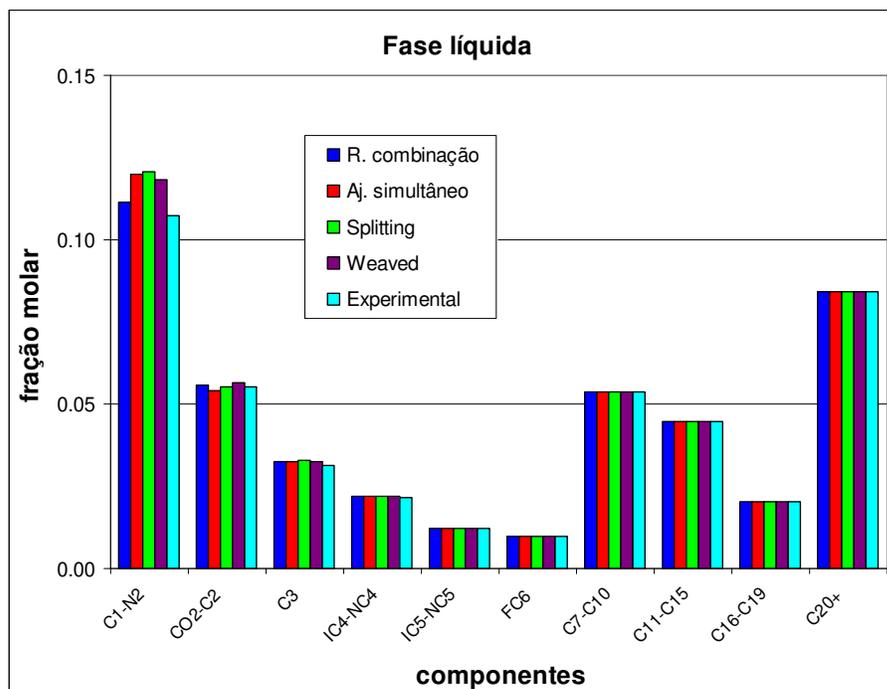


Figura 5.35 - Composição do agrupamento de 10 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos mais o ajuste com os dados experimentais da mistura..

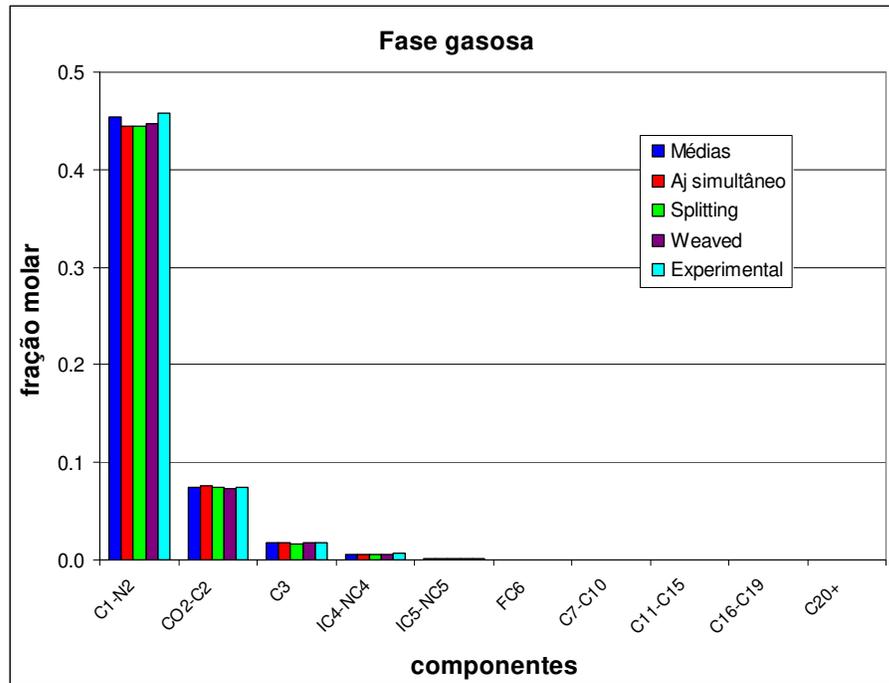


Figura 5.36 - Composição do agrupamento de 10 componentes (fase gasosa), para os 4 métodos de ajuste propostos mais o ajuste com os dados experimentais da mistura.

Tabela 5.12 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os dados experimentais da mistura e os diversos métodos de ajuste propostos (10 componentes).

Componentes	Aj. simultâneo	Splitting	Weaved	R. Combinação
C1-N2	-11,97	-12,65	-10,14	-3,72
CO2-C2	2,28	-0,10	-2,47	-0,58
C3	-4,03	-4,71	-3,75	-3,61
IC4-NC4	-1,65	-2,07	-1,51	-1,52
IC5-NC5	-0,48	-0,70	-0,42	-0,49
FC6	-0,06	-0,16	-0,06	-0,09
C7-C10	0,09	0,07	0,08	0,07
C11-C15	0,02	0,02	0,02	0,02
C16-C19	0,00	0,00	0,00	0,00
C20+	0,00	0,00	0,00	0,00

O agrupamento com 8 componentes está descrito na Tabela 5.9. Os resultados em função das propriedades geradas, na simulação *flash*, podem ser observados nos gráficos das Figuras 5.37 a 5.40.

Com o auxílio da Tabela 5.13, aferem-se novamente as diferenças percentuais em relação aos dados experimentais, observam-se diferenças muito pequenas dos métodos de ajuste, em relação aos dados experimentais. Novamente aqui atribuídas a erros experimentais, tolerâncias atribuídas à regressão etc.

Nas Figuras 5.41 e 5.42 há, respectivamente, a composição na fase óleo e na fase gás. As diferenças percentuais de cada componente da fase líquida, em relação aos dados experimentais, foram colocadas na Tabela 5.14, onde é possível observar diferenças consideráveis para o pseudocomponente C2-CO2.

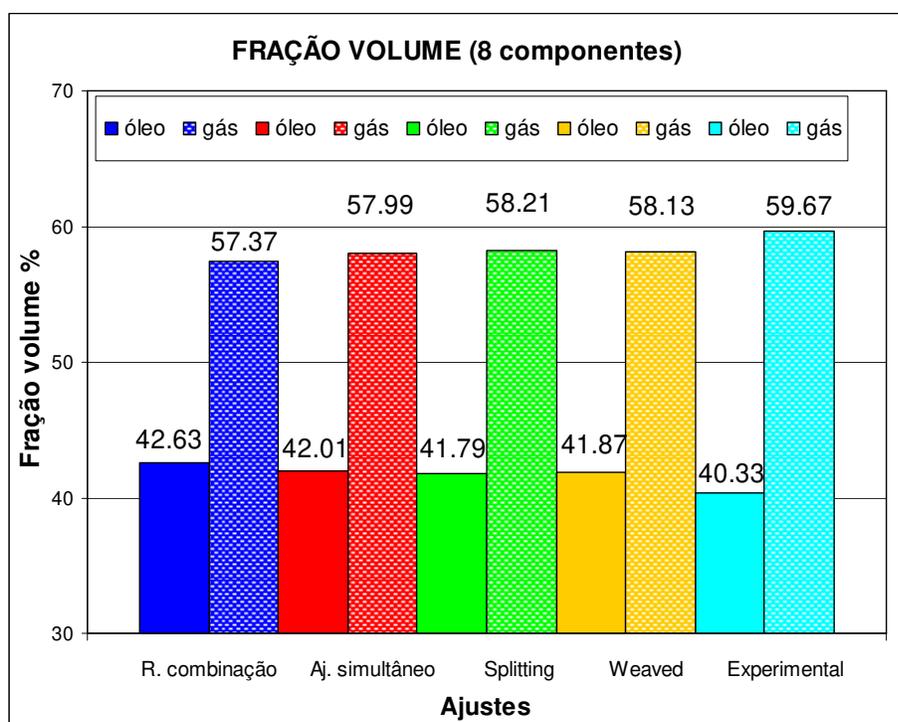


Figura 5.37 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

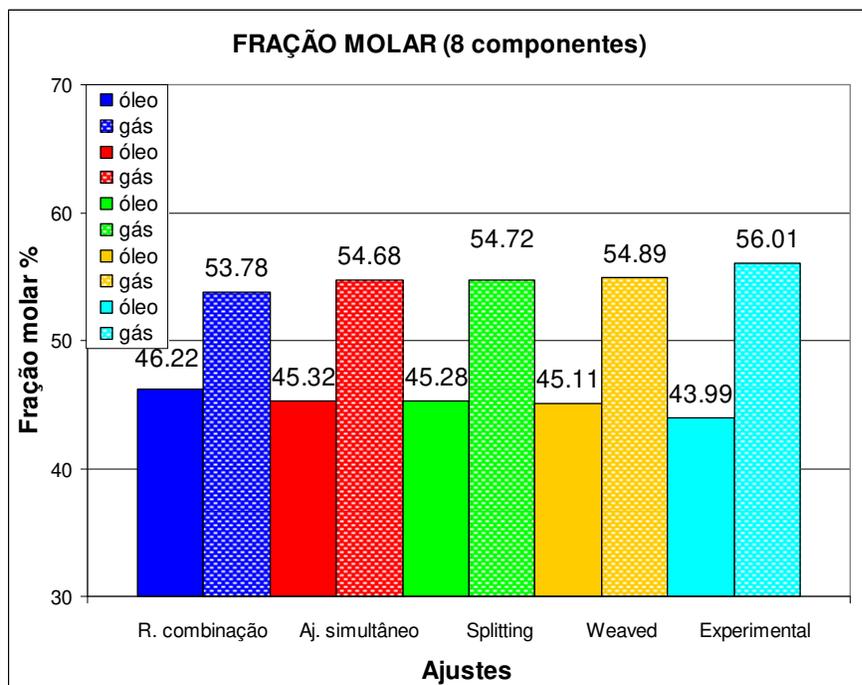


Figura 5.38 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

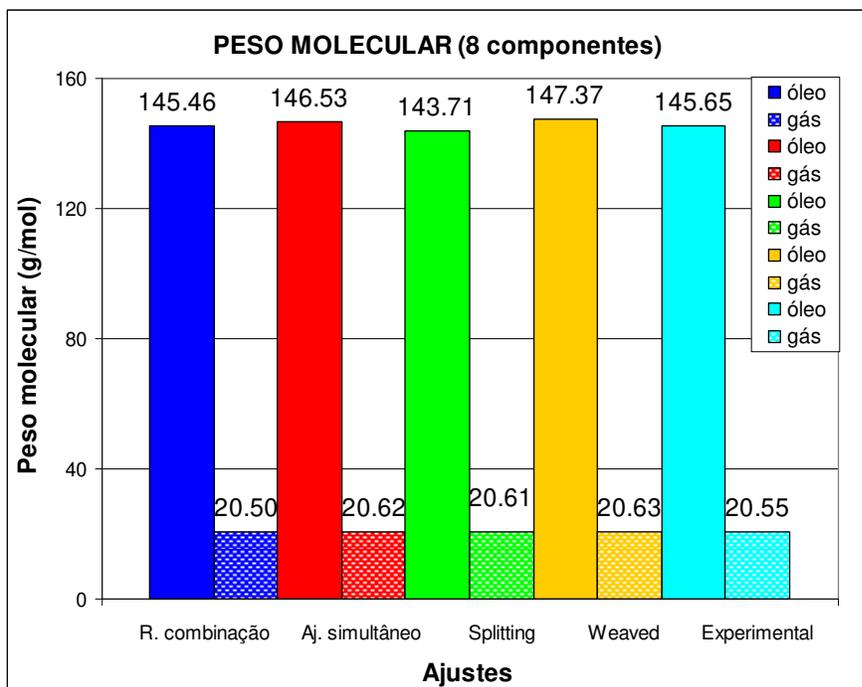


Figura 5.39 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

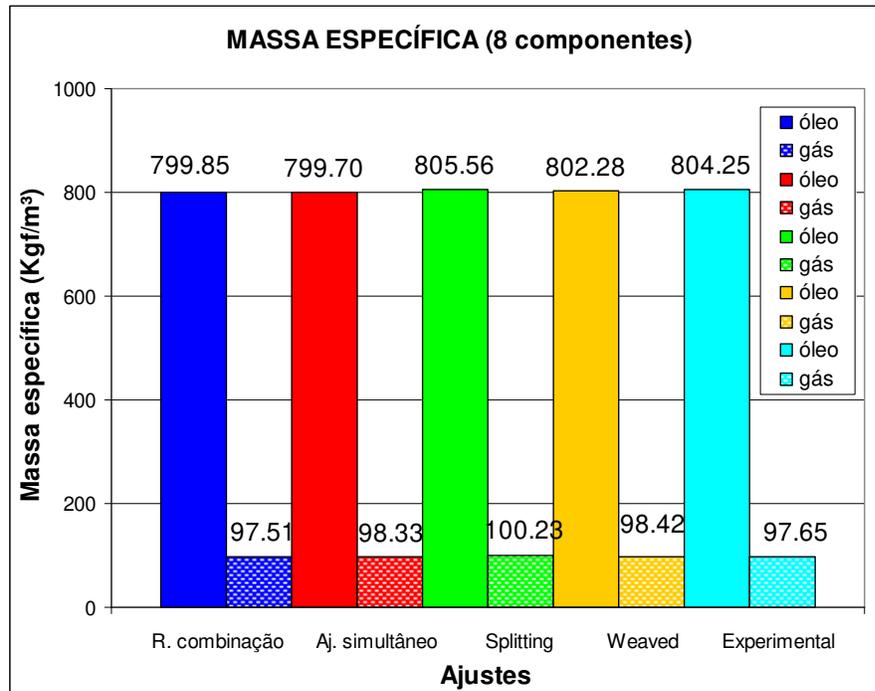


Figura 5.40 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

Tabela 5.13 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação *flash*, entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos (8 componentes).

FRAÇÃO VOLUME	Óleo	Gás	FRAÇÃO MOLAR	Óleo	Gás
Aj. Simultâneo	4,2	-2,8	Aj. Simultâneo	3,0	-2,4
Splitting	3,6	-2,4	Splitting	2,9	-2,3
Weaved	3,8	-2,6	Weaved	2,5	-2,0
R. combinação	5,7	-3,9	R. combinação	5,1	-4,0
PESO MOLECULAR	Óleo	Gás	MASSA ESPECÍFICA	Óleo	Gás
Aj. Simultâneo	0,6	0,3	Aj. Simultâneo	-0,6	0,3
Splitting	-1,3	0,3	Splitting	0,2	0,3
Weaved	1,2	0,4	Weaved	-0,2	0,4
R. combinação	-0,1	-0,2	R. combinação	-0,5	-0,1

Analisando o processo de ajuste constata-se que a regressão com dados experimentais usou o BIC entre C_1-N_2 e C_{20+} como parâmetro de regressão, enquanto os outros métodos de ajuste usaram o BIC entre C_2-CO_2 e C_{20+} . A diferente escolha de parâmetros ocasionou diferenças percentuais consideráveis para C_1-N_2 , como observado na Tabela 5.14.

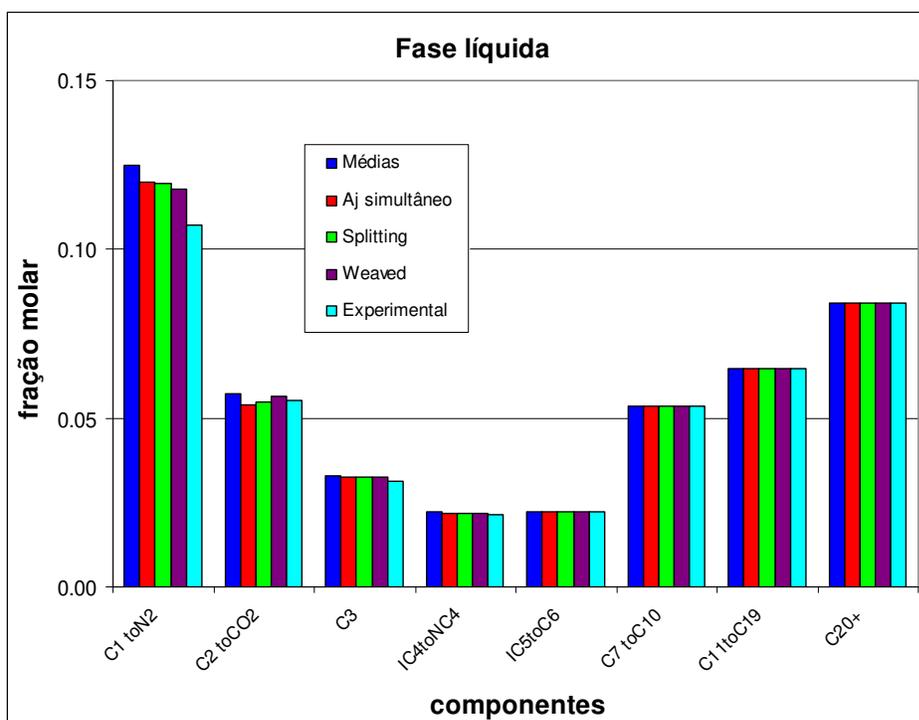


Figura 5.41 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos mais o ajuste com os dados experimentais da mistura.

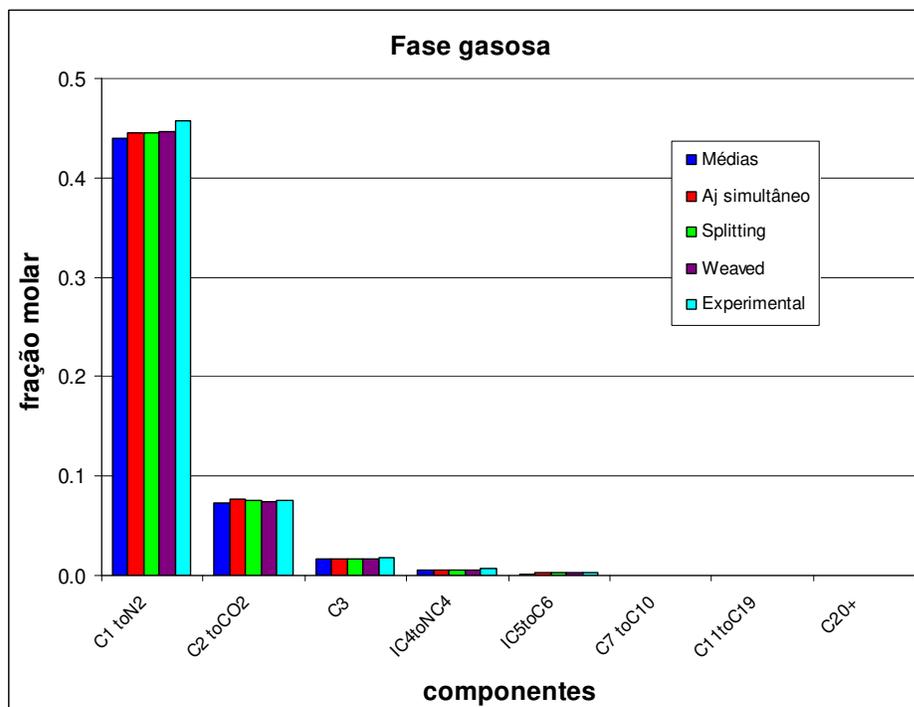


Figura 5.42 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase líquida), para os 4 métodos de ajuste propostos mais o ajuste com os dados experimentais da mistura.

Tabela 5.14 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os dados experimentais da mistura e os diversos métodos de ajuste propostos (8 componentes).

Componentes	Aj. simultâneo	<i>Splitting</i>	<i>Weaved</i>	R. Combinação
C1-N2	-12,21	-11,91	-10,34	-16,61
CO2-C2	2,46	0,84	-2,60	-3,81
C3	-4,03	-4,03	-3,75	-5,61
IC4-NC4	-1,65	-1,66	-1,51	-2,61
C5-C6	-0,24	-0,25	-0,22	-0,62
C7-C10	0,09	0,09	0,08	0,04
C11-C19	0,01	0,01	0,01	0,01
C20+	0,00	0,00	0,00	0,00

O último agrupamento proposto é o agrupamento 6 componentes (Tabela 5.9). Os resultados após a simulação *flash* podem ser observados nos gráficos das Figuras 5.43 a 5.46.

Com o auxílio da Tabela 5.15, novamente observam-se diferenças muito pequenas dos métodos de ajuste em relação aos dados experimentais.

Nas Figuras 5.47 e 5.48 há, respectivamente, a composição na fase óleo e na fase gás. As diferenças percentuais de cada componente da fase líquida, em relação aos dados experimentais, foram colocadas na Tabela 5.16, onde é possível observar diferenças consideráveis para o pseudocomponente C₁-N₂.

As diferenças apresentadas pelo comportamento do C₁-N₂ podem ser explicadas pelo expoente do coeficiente de interação hidrocarboneto-hidrocarboneto, que é um parâmetro de regressão no WINPROP. Utilizando esse parâmetro é possível alterar todos os BIC disponíveis de uma só vez, já que o expoente é uma constante. Com esse parâmetro habilitado, alcançaram-se os valores de tolerância para regressão com um número mínimo de parâmetros utilizados. Entretanto o WINPROP alterou sensivelmente o expoente, levando-o para o valor zero. O único ajuste em que o expoente não foi alterado (mesmo estando habilitado) foi o método com regras de combinação que apresentou a menor das diferenças, 3,41%.

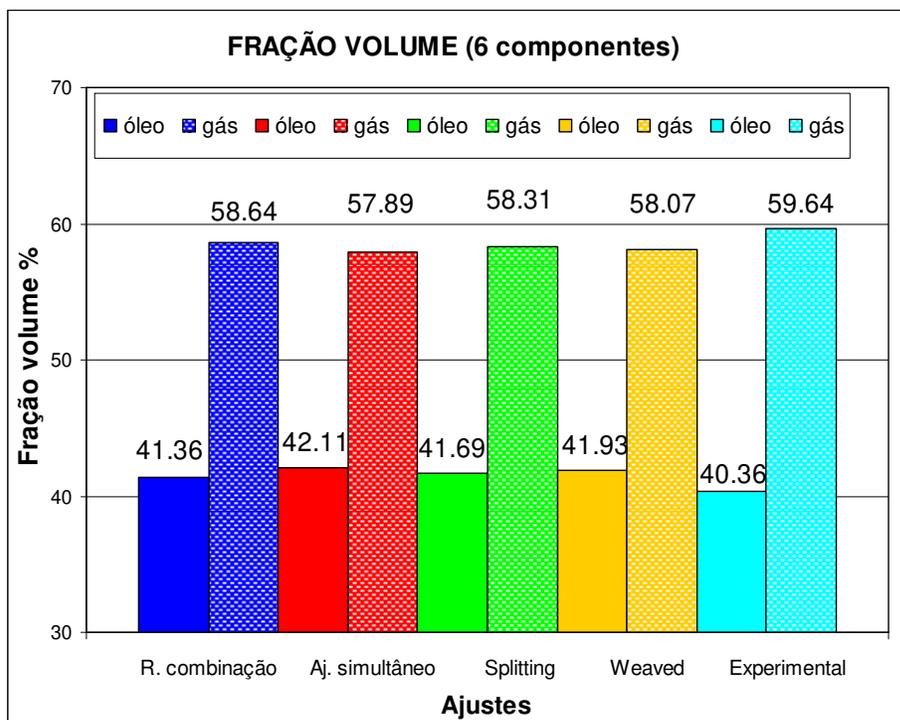


Figura 5.43 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

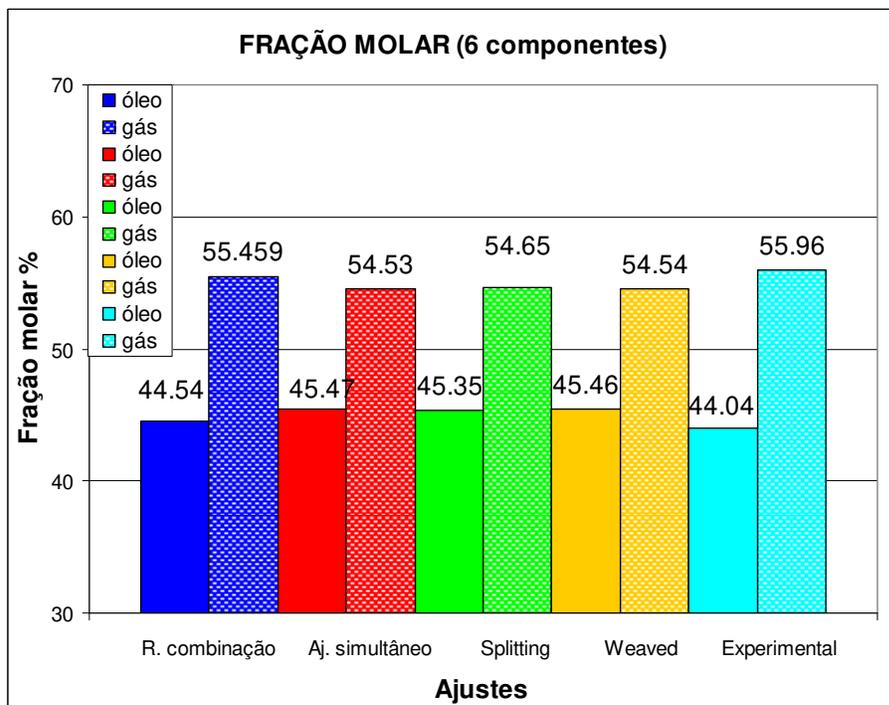


Figura 5.44 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

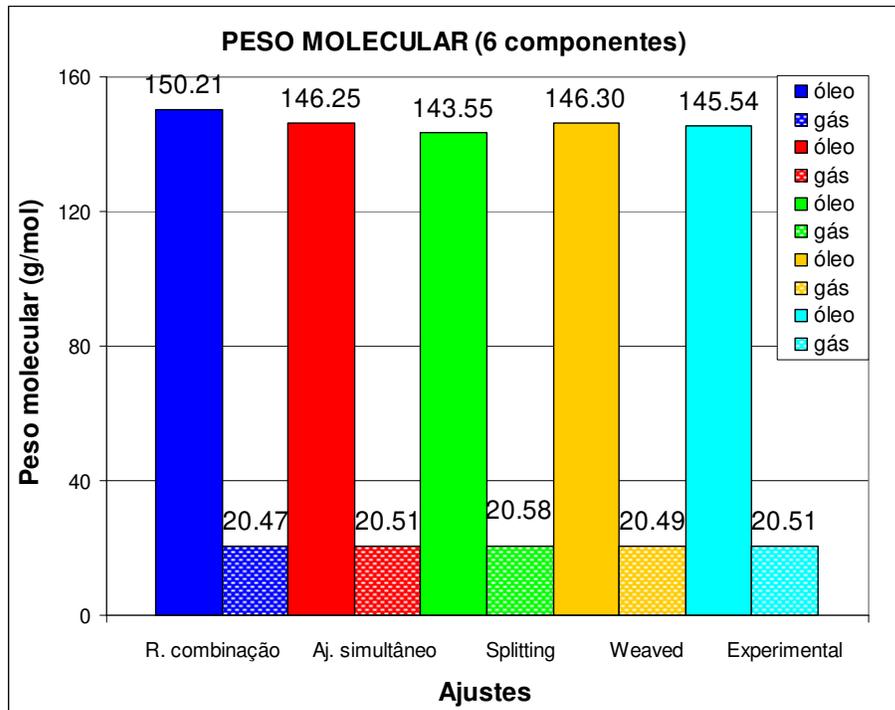


Figura 5.45 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

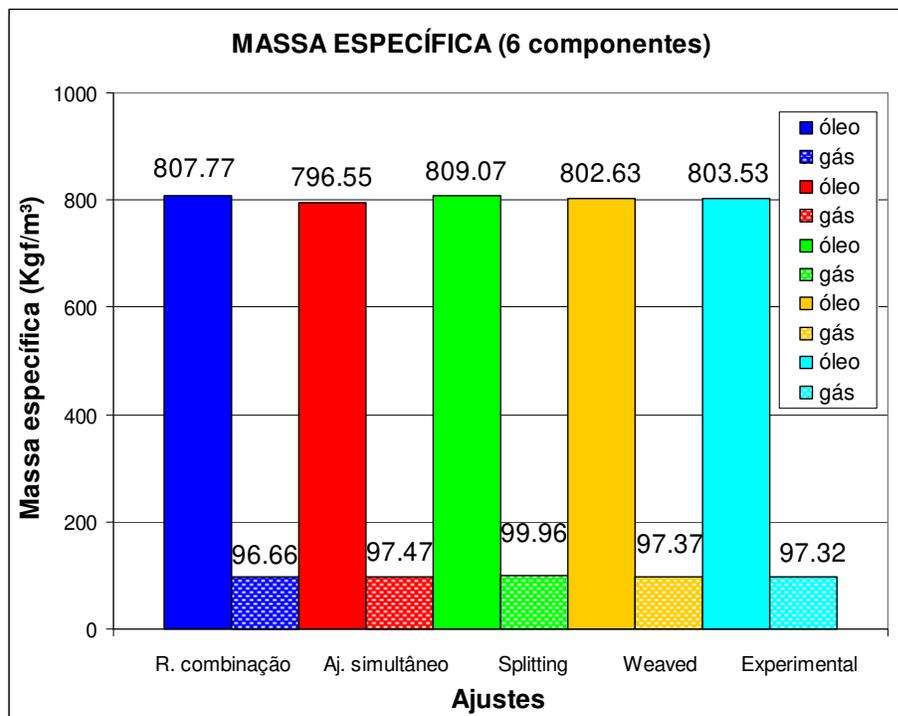


Figura 5.46 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

Tabela 5.15 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação *flash*, entre o método de ajuste com regras de combinação e os demais métodos comparativos (6 componentes).

FRAÇÃO VOLUME	Óleo	Gás	FRAÇÃO MOLAR	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	4,4	-2,9	Aj. simultâneo	3,2	-2,5
Splitting	3,3	-2,2	Splitting	3,0	-2,3
Weaved	3,9	-2,6	Weaved	3,2	-2,5
R. combinação	2,5	-1,7	R. combinação	1,1	-0,9
PESO MOLECULAR	Óleo	Gás	MASSA ESPECÍFICA	Óleo	Gás
Aj. simultâneo	0,5	0,0	Aj. simultâneo	-0,9	0,0
Splitting	-1,4	0,3	Splitting	0,7	0,3
Weaved	0,5	-0,1	Weaved	-0,1	-0,1
R. combinação	3,2	-0,2	R. combinação	0,5	-0,7

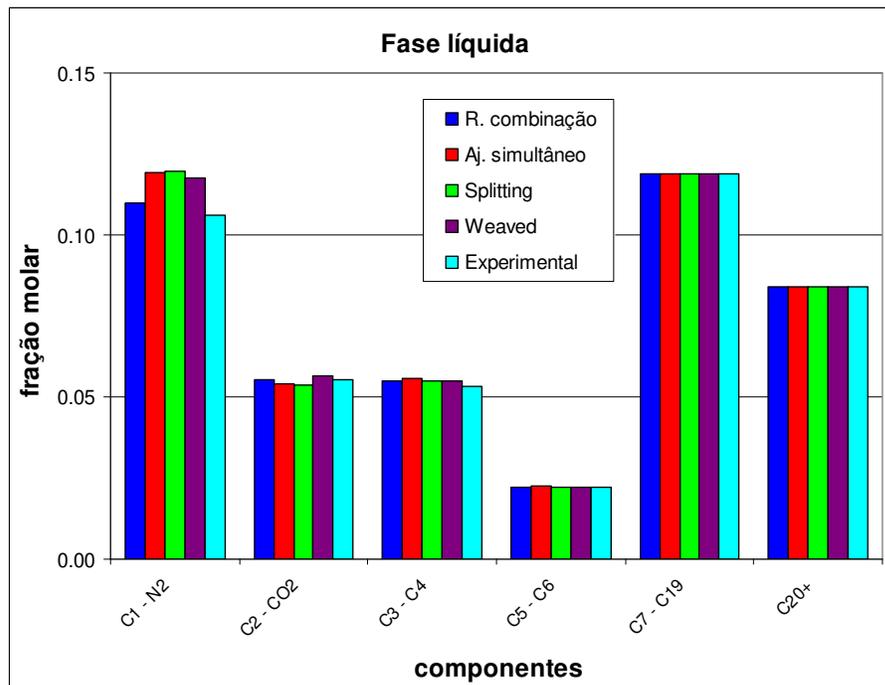


Figura 5.47 - Composição do agrupamento com 6 componentes na fase líquida, para os 4 métodos de ajuste propostos.

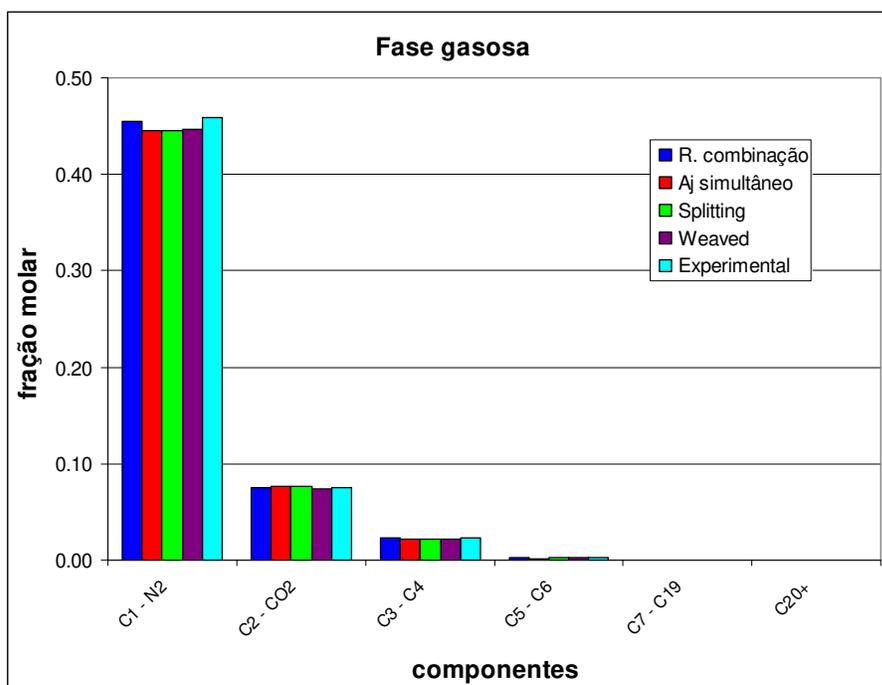


Figura 5.48 - Composição do agrupamento com 6 componentes na fase gasosa, para os 4 métodos de ajuste propostos.

Tabela 5.16 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida, entre os dados experimentais da mistura e os diversos métodos de ajuste propostos (6 componentes).

Componentes	Aj. simultâneo	Splitting	Weaved	R. Combinação
C1-N2	-12,07	-12,45	-10,72	-3,41
CO2-C2	1,90	2,99	-2,36	0,02
C3-C4	-4,45	-2,88	-2,71	-2,54
C5-C6	-0,54	-0,19	-0,18	-0,22
C7-C19	0,03	0,03	0,03	0,02
C20+	0,00	0,00	0,00	0,00

5.2.3 Envelopes de fases da segunda mistura

Os envelopes de fases foram gerados e ordenados em função dos dados experimentais e dos quatro métodos de ajuste, com seus respectivos agrupamentos, e estão representados nas Figuras 5.49 a 5.53.

O envelope de fases com os dados experimentais está representado na Figura 5.49, onde é possível observar que, para os diversos agrupamentos propostos, o formato da envoltória, bem como o ponto crítico não se alteram, evidenciando um bom ajuste em todos os agrupamentos.

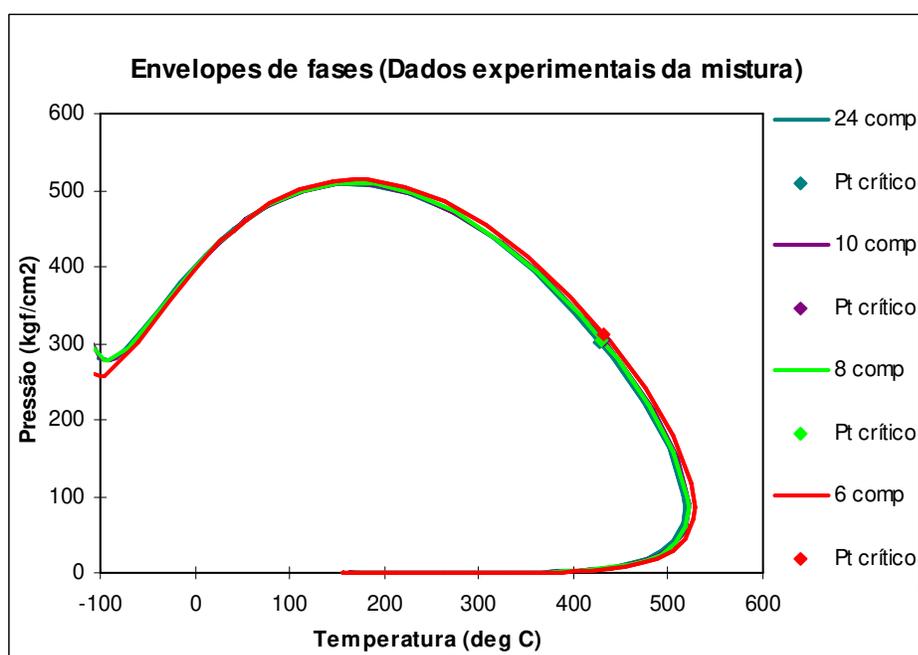


Figura 5.49 - Envelopes de fases para o método de ajuste com dados experimentais da mistura nos diversos agrupamentos propostos.

A Figura 5.50 contém o envelope de fases do método com regras de combinação, no qual é possível observar que para os diversos agrupamentos o envelope de fases com 8 componentes apresentou um formato que se descaracteriza sensivelmente dos outros, principalmente do envelope de 24 componentes. Essa variação pode ter como causa o uso de diferentes parâmetros de regressão, efeito causado pelo o uso das regras de combinação no ajuste da EOS.

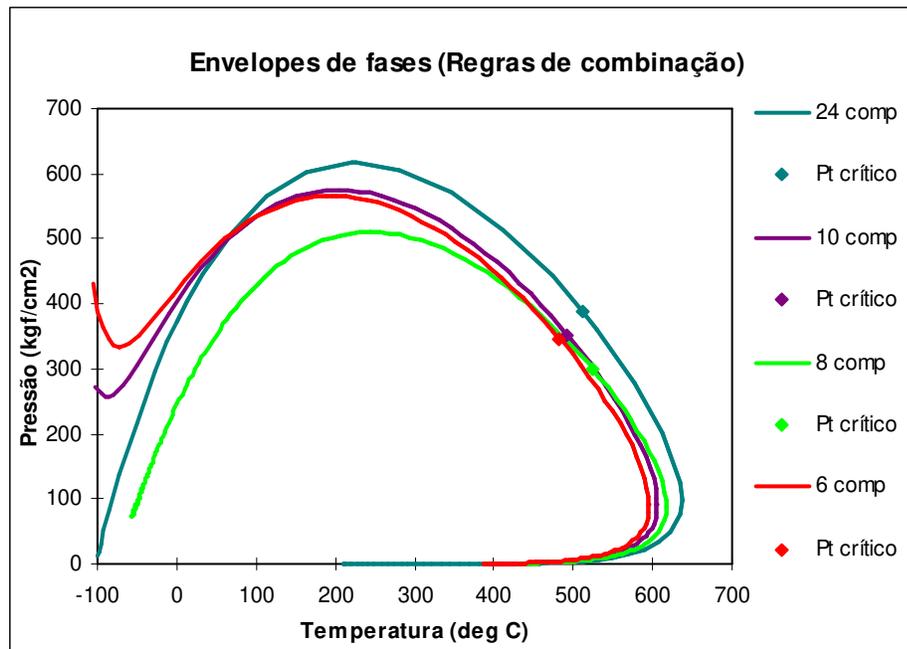


Figura 5.50 - Envelopes de fases para o método de ajuste com regras de combinação nos diversos agrupamentos propostos.

A Figura 5.51 contém o envelope de fases do método de ajuste simultâneo. Para o agrupamento com 10 e 8 componentes observou-se uma pequena alteração no formato, que não foi tão significativa na faixa de temperatura onde se tem os dados experimentais da P_{sat} . No envelope de 6 componente a alteração foi considerável, sendo este último arranjo não considerado o ideal para um ajuste.

Nas Figuras 5.52 e 5.53, que representam, respectivamente, o ajuste *splitting* e o ajuste com *weaved*, observam-se situações semelhantes entre si: para qualquer agrupamento não houve descaracterização do envelope original de 24 componentes.

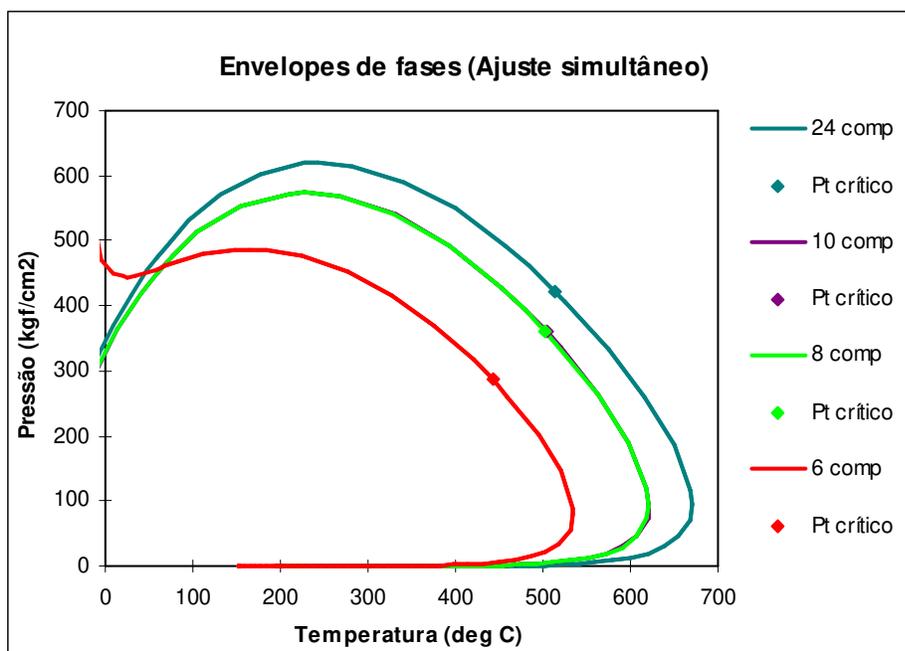


Figura 5.51 - Envelopes de fases para o método de ajuste simultâneo nos diversos agrupamentos propostos.

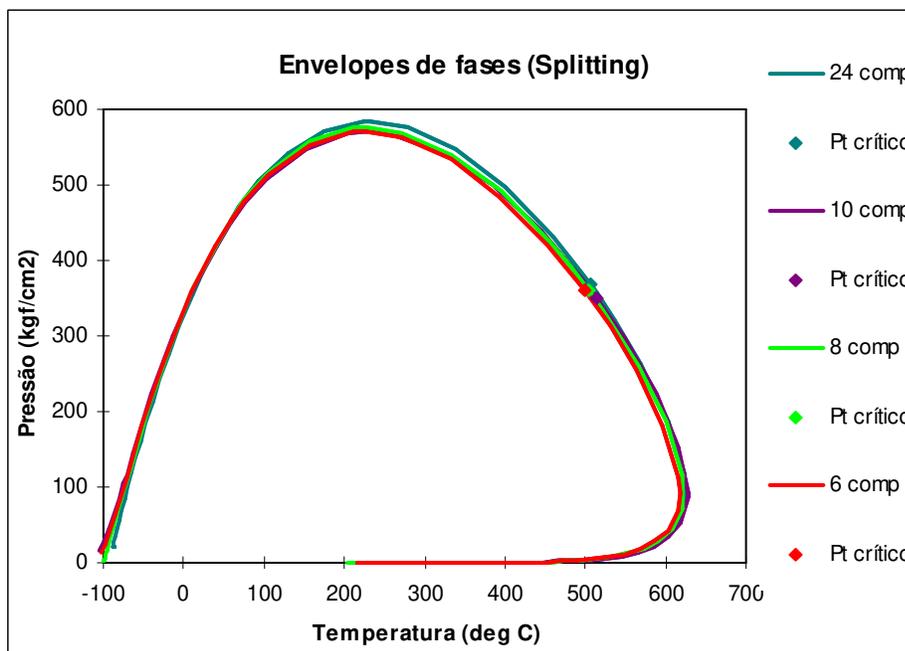


Figura 5.52 - Envelopes de fases para o método de ajuste *splitting* nos diversos agrupamentos propostos.

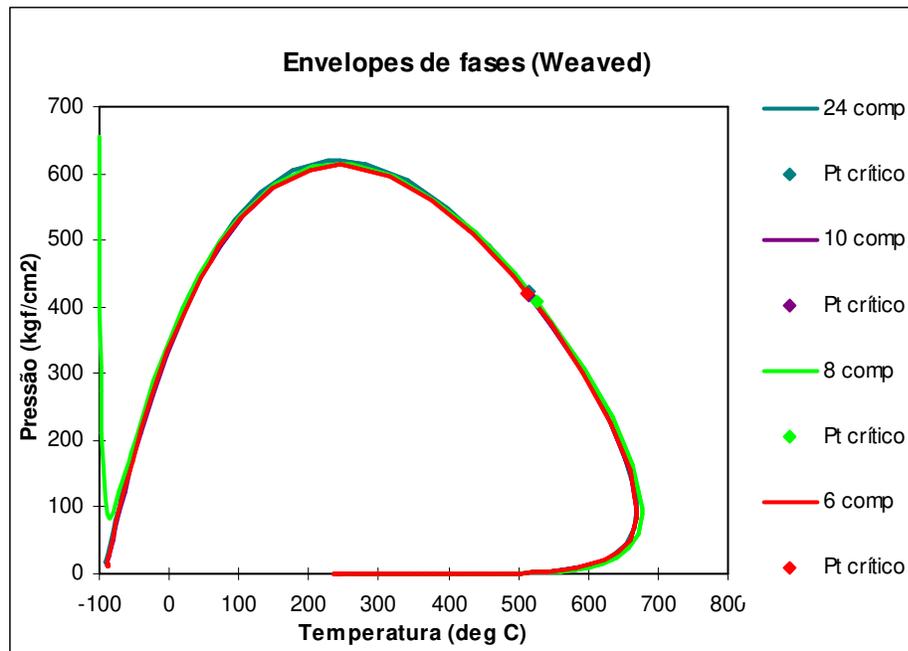


Figura 5.53 - Envelopes de fases para o método de ajuste *weaved* nos diversos agrupamentos propostos.

Com o dado experimental da segunda mistura torna-se possível fazer uma avaliação do comportamento dos envelopes de fases dos métodos de ajustes propostos. Na Figura 5.54, estão todos os envelopes dos diferentes métodos para 24 componentes. Comparando o envelope do dado experimental com os outros envelopes é possível ver um deslocamento para o dado experimental, só havendo concordância na área faixa de temperatura entre 40 e 100°C (onde há dados de P_{sat} experimentais). A diversidade dos formatos deveria evidenciar diferenças nos resultados dos ensaios *flash*, descritos nos itens anteriores, entretanto isso não ocorreu.

A justificativa para a não percepção das diferenças evidenciadas nos envelopes de fases, para os ensaios *flash*, pode ser observada na Figura 5.55, onde há dois envelopes de fases extraídos da Figura 5.54: o envelope com os dados experimentais e o envelope com as regras de combinação. Esses envelopes estão contemplados com linhas de qualidade, que facilitam a visualização nas condições estabelecidas para o *flash*. Na condição de pressão de 150 kgf/cm² e temperatura de 40°C as linhas de qualidade da ambos os métodos seguem a mesma tendência, logo não havendo diferenças significativas no equilíbrio de fases.

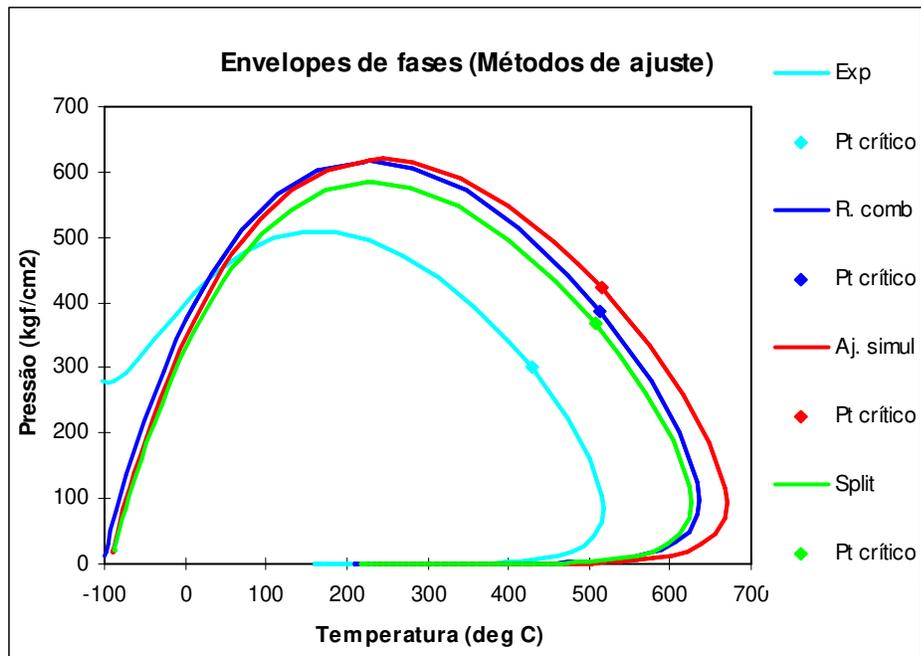


Figura 5.54 - Envelopes de fases para 24 componentes dos dados experimentais e dos diversos métodos de ajuste propostos.

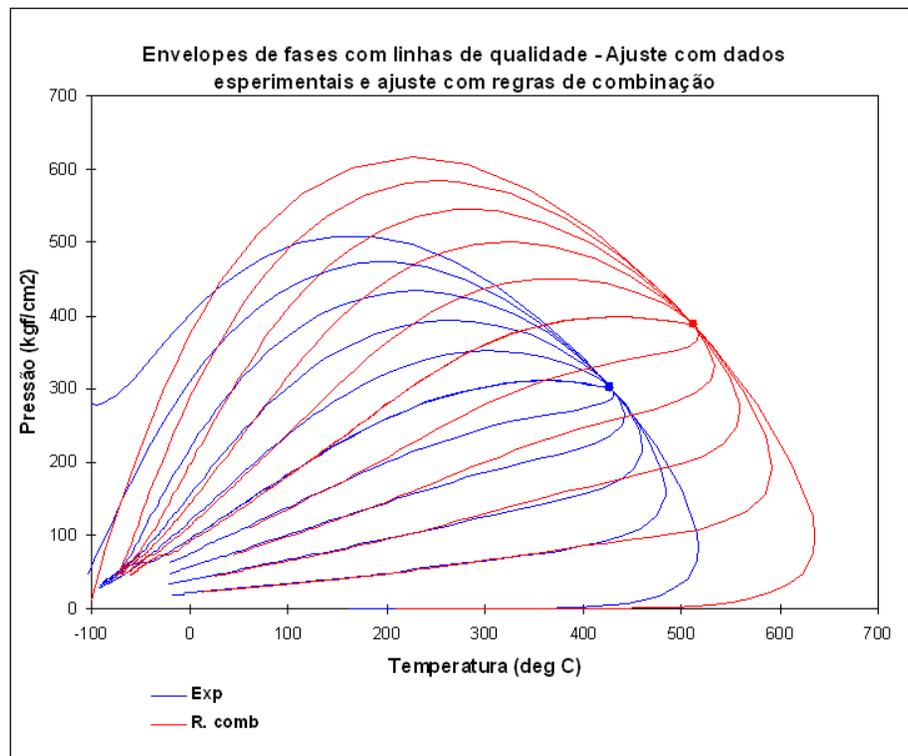


Figura 5.55 - Envelopes de fases com linhas de qualidade, para 24 componentes, dos dados experimentais e com o método de ajuste com regras de combinação.

Entretanto, com o aumento da temperatura e principalmente da pressão são percebidos comportamentos diferentes das linhas de qualidade o que acarretaria em diferentes respostas de equilíbrio termodinâmico.

5.2.4 Avaliação dos resultados da segunda mistura.

A segunda mistura difere basicamente da primeira por apresentar os dados experimentais da mistura proposta, sendo possível avaliar tanto o método com regras de combinação, como os outros métodos comparativos.

O resultado do cálculo do equilíbrio de fases da segunda mistura mostrou que os métodos de ajuste propostos alcançaram, no geral, resultados similares ao ajuste com os dados experimentais da mistura. Algumas diferenças significativas ocorreram, principalmente para o método de ajuste com regras de combinação e o *weaved*, sendo causadas pelo uso de diferentes parâmetros de regressão.

Os parâmetros de regressão que causaram as maiores distorções foram novamente: a pressão crítica, temperatura crítica e os expoentes dos BIC. A pressão crítica incide direto na EOS, sendo um parâmetro de regressão necessário em todos os ajustes realizados. A temperatura crítica, que também incide diretamente na EOS, foi um parâmetro utilizado quando a pressão crítica não foi suficiente para ajustar a EOS. Os expoentes dos BIC incidem diretamente no valor final, causando diferenças no equilíbrio até maiores que os próprios pesos nos BIC, já que os valores dos expoentes, na regressão, são tabelados e não calculados.

Com o envelope de fases dos dados experimentais foi possível concluir que mesmo com diferenças consideráveis em relação aos outros métodos de ajuste (Figura 5.54 e 5.55) os resultados das propriedades geradas foram similares. Isso ocorreu na medida em que, na faixa de trabalho, as linhas de qualidade convergem, evidenciando que o cálculo do equilíbrio de fases é similar.

5.3 Resultados da terceira mistura

A terceira mistura simula a combinação de dois gases condensados, os dois conjuntos de dados PVT constituintes são denominados Campo Nigéria e SPE 3. Inicialmente, tentou-se ajustar cada PVT com a composição original fornecida, de 11 componentes. Com a dificuldade em ajustar propriedades como P_{sat} e densidade, optou-se por fazer um *splitting* antes do início do processo de regressão não-linear. Esse *splitting* inicial diminuiu o número de métodos comparativos de três para um, sendo a mudança abordada no Item 5.3.1.

Após o ajuste inicial, as composições da EOS ajustadas foram agrupadas em 8 e 6 componentes, sendo novamente ajustados. A composição original, a distribuição molar resultante e os diferentes tipos de agrupamentos propostos podem ser observados na Tabela 5.17.

Os ajustes são validados seguindo os limites aceitáveis de cada dado experimental (Item 3.4), e os dados experimentais ajustados para os dois agrupamentos podem ser observadas no Anexo 1 (Item III).

Com as EOS já ajustadas (tanto para a composição inicial expandida quanto para os agrupamentos), foram executadas as simulações *flash* nas condições de pressão e temperatura pré-estabelecidas: pressão de 150 Kgf/cm² e temperatura de 60,0 °C. Após a simulação, o método com regras de mistura foi comparado ao método *splitting*, através das propriedades que são usualmente utilizadas dentro de uma simulação composicional: fração volume, fração molar, peso molecular e massa específica.

5.3.1 Composição expandida.

Conforme citado no item anterior, houve uma dificuldade em ajustar os dados de PVT, tanto nos gases em separado, como na mistura, para a composição inicial de 11 componentes. Com isso, não se alcançou, no processo de regressão, valores dentro das faixas aceitáveis de ajuste, principalmente para propriedades como P_{sat} e densidade.

Para contornar esse problema, optou-se por expandir a fração pesada (C7+) através de um método de distribuição molar (*splitting*), permitindo ao algoritmo de ajuste um maior grau de liberdade. Ao iniciar todo o processo de simulação com o *splitting* dois métodos de ajuste foram

descartados: o simultâneo, pois o *splitting* é uma adaptação deste método, e o *weaved*, pois usando o modelo de distribuição molar gama no *splitting* as frações pesadas dos gases são automaticamente somadas, gerando uma única composição.

Tabela 5.17 - Composição inicial, *splitting* e agrupamentos propostos para a terceira mistura.

Composição inicial	<i>Splitting</i> 14 componentes	8 componentes	6 componentes
C1	C1	C1 - N2	C1 - N2
N2	N2	C2 - CO2	C2 - CO2
C2	C2	C3	C3 - C4
CO2	CO2	IC4 - NC4	C5 - C6
IC4	C3	IC5 – NC5	C7-C9 ou PSC5
NC4	IC4	C7-C9 ou PSC5	C10+ ou PSC6+
IC5	NC4	C10+ ou PSC6+	-
NC5	IC5	-	-
C6	NC5	-	-
C7+	C6	-	-
-	PSC1	-	-
-	PSC2	-	-
-	PSC3	-	-
-	PSC4+	-	-

Com o *splitting* inicial outro problema foi gerado: tanto as PVT ajustadas com as regras de combinação, como as PVT no método comparativo não obtiveram a mesma composição após a distribuição molar, resultando em um problema de diferentes composições relatado no Item 2.6.1. Portanto, não foi possível fazer a comparação dos métodos de ajuste para a composição inicial.

Para que esse problema não inviabilizasse totalmente a simulação da terceira mistura, duas soluções foram aplicadas:

1. No método de ajuste com regras de combinação as duas PVT ajustadas com a composição inicial foram posteriormente agrupadas em 8 e 6 componentes, sendo possível com dois pseudocomponentes da fração pesada obter a mesma composição.

2. Para a comparação dos dois métodos restantes e mais especificadamente na comparação por componente, as frações pesadas foram somadas e denominadas como C7+.

Na Tabela 5.17 observa-se o esquema de todas as composições: desde o início com 11 componentes, passando pela distribuição molar da fração pesada (*splitting*), que foi generalizada pelas abreviações: PSC1, PSC2, PSC3 e PSC4+, e por fim pelos agrupamentos. Outra observação importante é referente às colunas dos agrupamentos, onde os pseudocomponentes são representados para as regras de combinação como C7-C9 e C10+ e para o ajuste *splitting* como PSC5 e PSC6+.

5.3.2 Resultados para os agrupamentos propostos

Após o *splitting* inicial e o processo de regressão, os componentes das EOS ajustadas foram agrupados em 8 e 6 componentes e pseudocomponentes. Cada novo agrupamento seguiu os procedimentos propostos nos itens 3.4.1 e 3.4.3.

Os agrupamentos com 8 e 6 componentes estão descritos na Tabela 5.17, nos quais foram realizadas as simulações *flash* com cada método proposto. Os resultados e as discussões a serem apresentados foram semelhantes, sendo abordados simultaneamente para ambos os agrupamentos.

Propriedades como fração volume, fração molar, peso molecular e massa específica podem ser observadas para 8 componentes nas Figuras 5.56 até 5.59, e para 6 componentes nas Figuras 5.60 até 5.63. Nas Tabelas 5.18 e 5.19, é possível observar em termos percentuais as diferenças nos gráficos anteriormente citados; nelas se encontram valores maiores que 40%, para fração volume e para fração molar do óleo. Comparando com as diferenças percentuais obtidas nas duas primeiras misturas, observa-se que na terceira mistura os valores são muito superiores podendo haver outras razões além dos ajustes nas frações leves e pesadas.

A fim de se buscar as razões das diferenças encontradas nos agrupamentos, os componentes e pseudocomponentes gerados foram comparados em função da sua distribuição em cada fase, sendo a fase óleo descrita nas Figuras 5.64 e 5.65 para 8 componentes e nas Figuras 5.66 e 5.67, para 6 componentes. As diferenças percentuais de cada componente e pseudocomponente encontram-se nas Tabelas 5.20 e 5.21. Com os diferentes pseudocomponentes gerados por

método de ajuste com o *splitting* inicial e para uma melhor comparação, optou-se por somar as frações resultantes e representá-las por uma única fração denominada C7+.

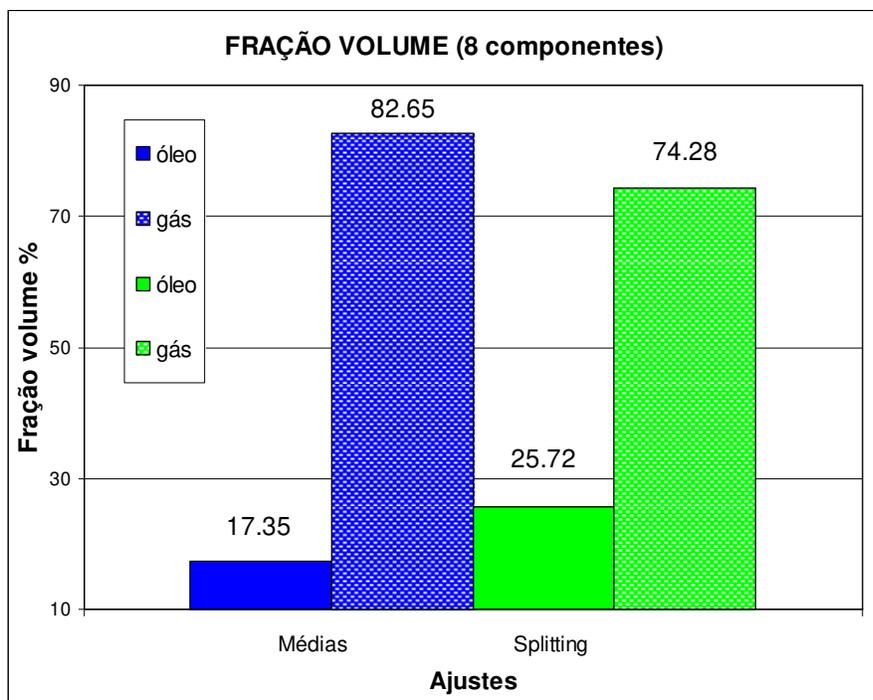


Figura 5.56 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

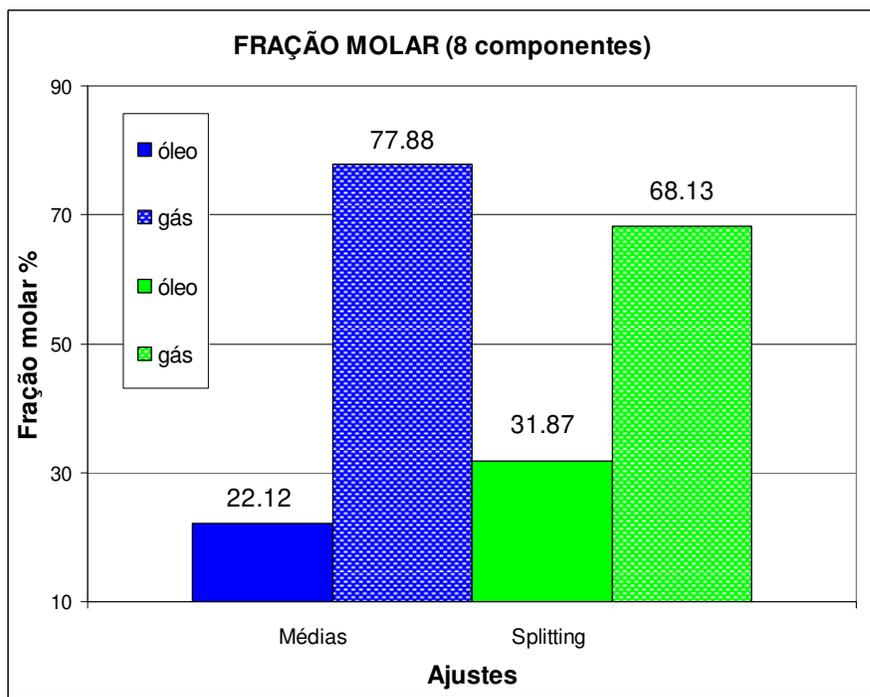


Figura 5.57 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

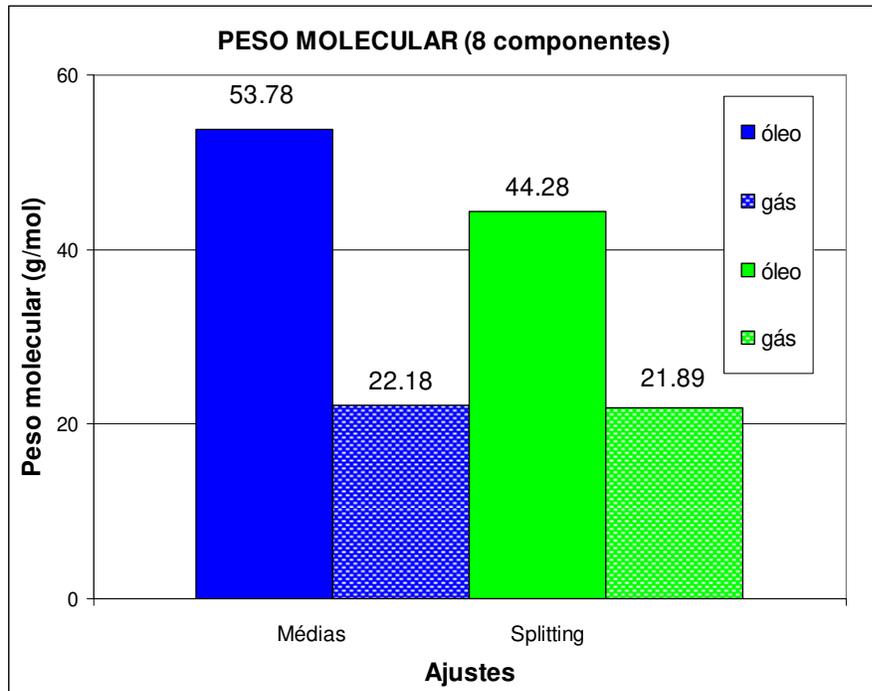


Figura 5.58 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

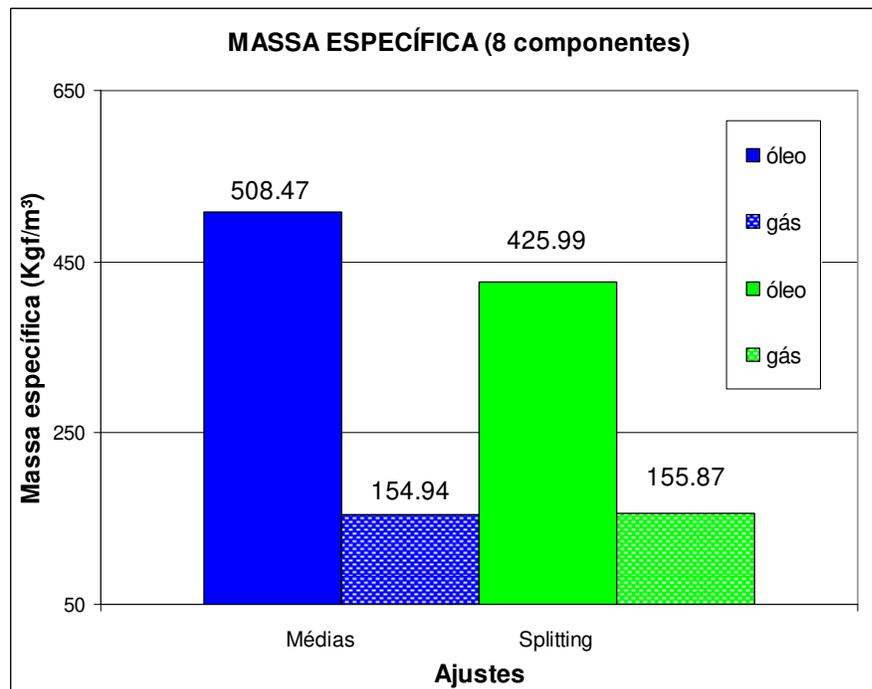


Figura 5.59 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 8 componentes.

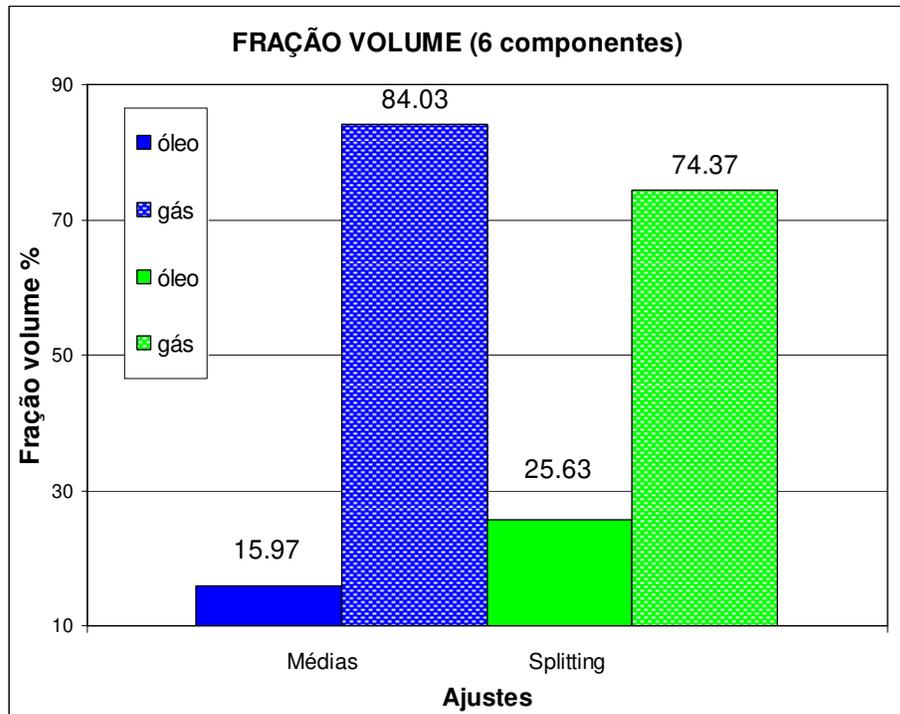


Figura 5.60 - Comparação da fração volume entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

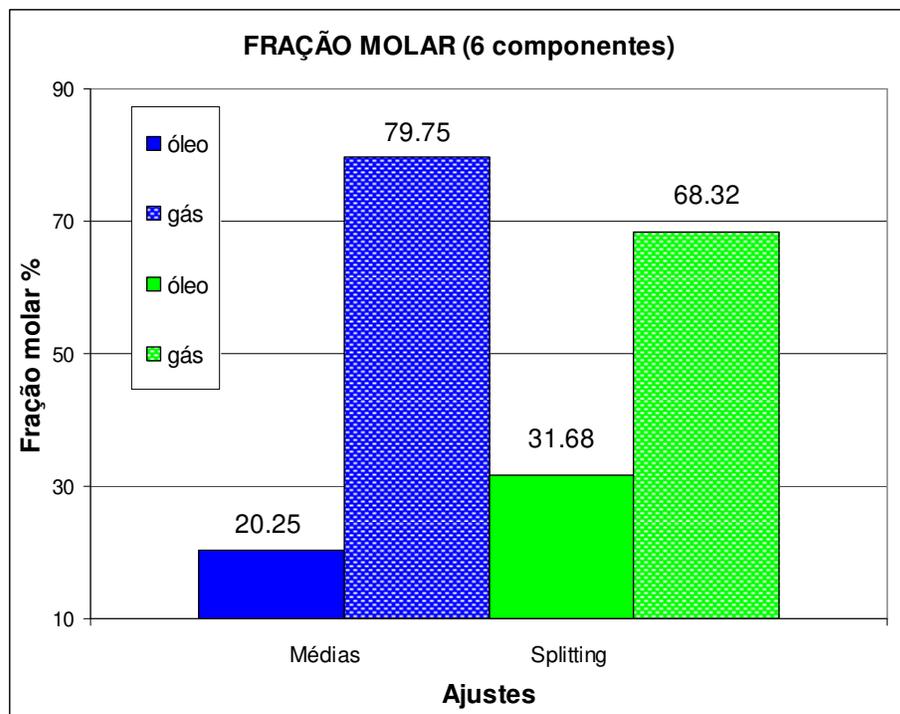


Figura 5.61 - Comparação da fração molar entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

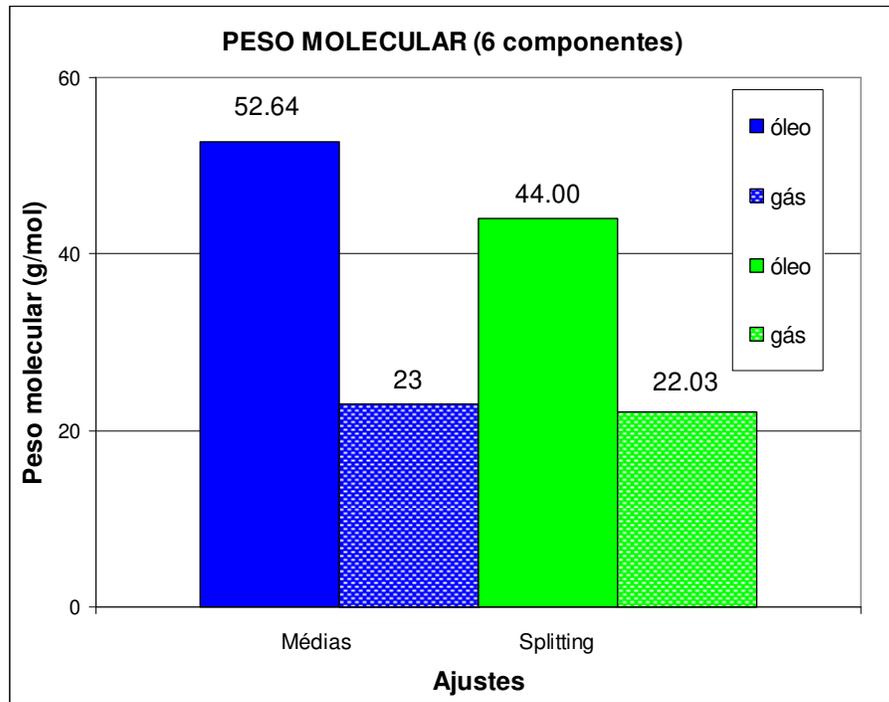


Figura 5.62 - Comparação do peso molecular entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

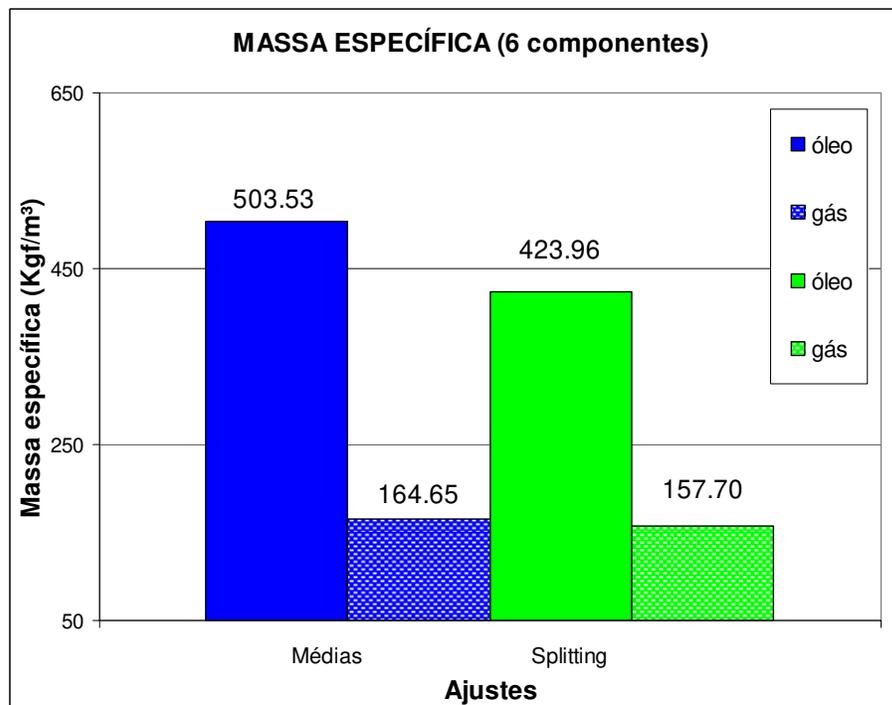


Figura 5.63 - Comparação da massa específica entre os métodos de ajuste para 6 componentes.

Tabela 5.18 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação *flash*, entre o método de ajuste com regras de combinação e o *splitting* (8 componentes).

FRAÇÃO VOLUME	Óleo	Gás	FRAÇÃO MOLAR	Óleo	Gás
<i>Splitting</i>	48,3	-10,1	<i>Splitting</i>	44,1	-12,5
PESO MOLECULAR	Óleo	Gás	MASSA ESPECÍFICA	Óleo	Gás
<i>Splitting</i>	-17,7	-1,3	<i>Splitting</i>	-16,2	0,6

Tabela 5.19 - Diferenças percentuais das propriedades geradas na simulação *flash*, entre o método de ajuste com regras de combinação e o *splitting* (6 componentes).

FRAÇÃO VOLUME	Óleo	Gás	FRAÇÃO MOLAR	Óleo	Gás
<i>Splitting</i>	60,5	-11,5	<i>Splitting</i>	56,4	-14,3
PESO MOLECULAR	Óleo	Gás	MASSA ESPECÍFICA	Óleo	Gás
<i>Splitting</i>	-16,4	-4,2	<i>Splitting</i>	-15,8	-4,2

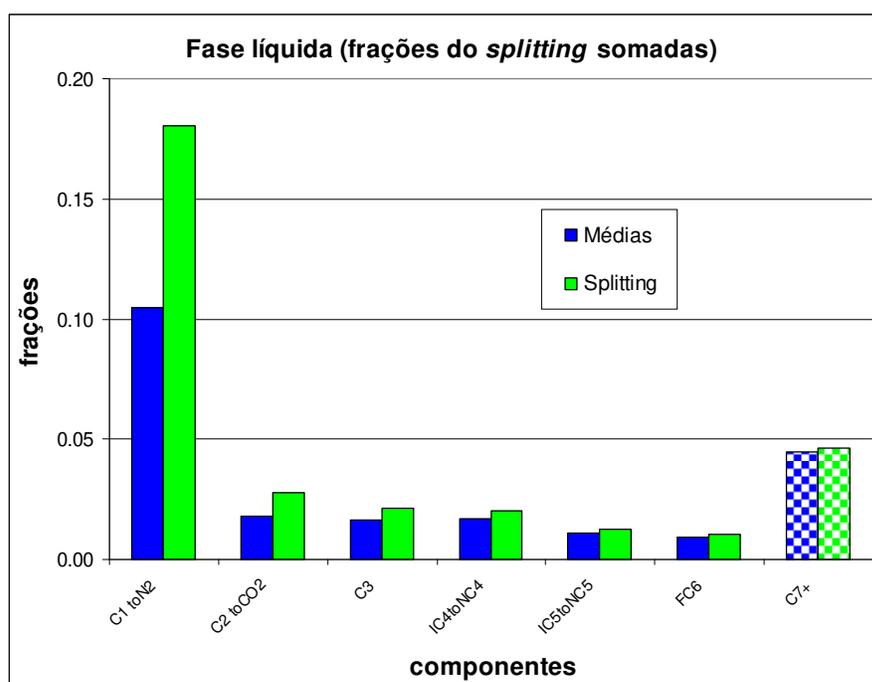


Figura 5.64 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase líquida), para os 2 métodos de ajustes propostos com as frações pesadas resumidas na fração C7+.

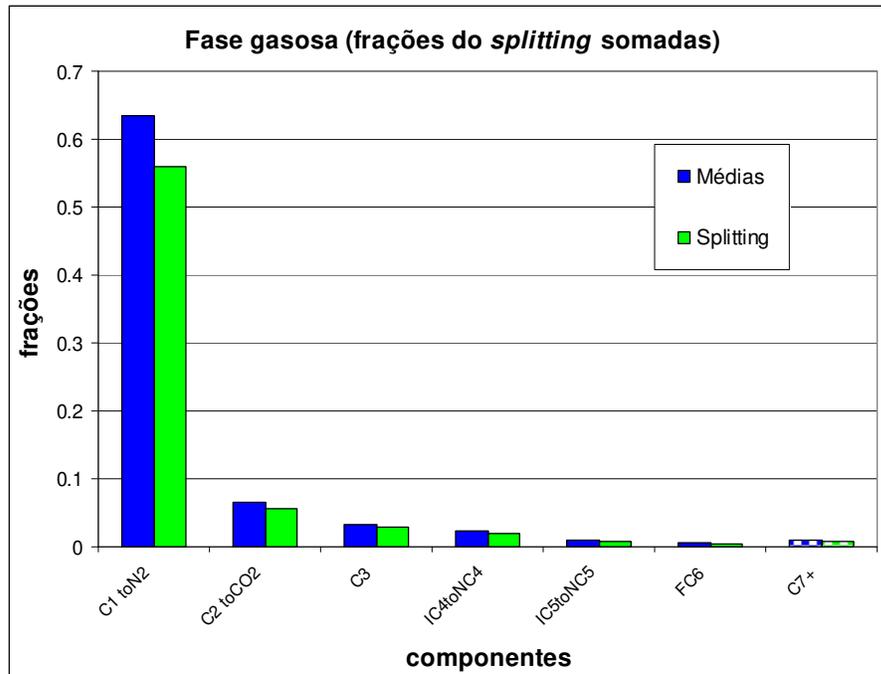


Figura 5.65 - Composição do agrupamento de 8 componentes (fase gasosa), para os 2 métodos de ajustes propostos com as frações pesadas resumidas na fração C7+.

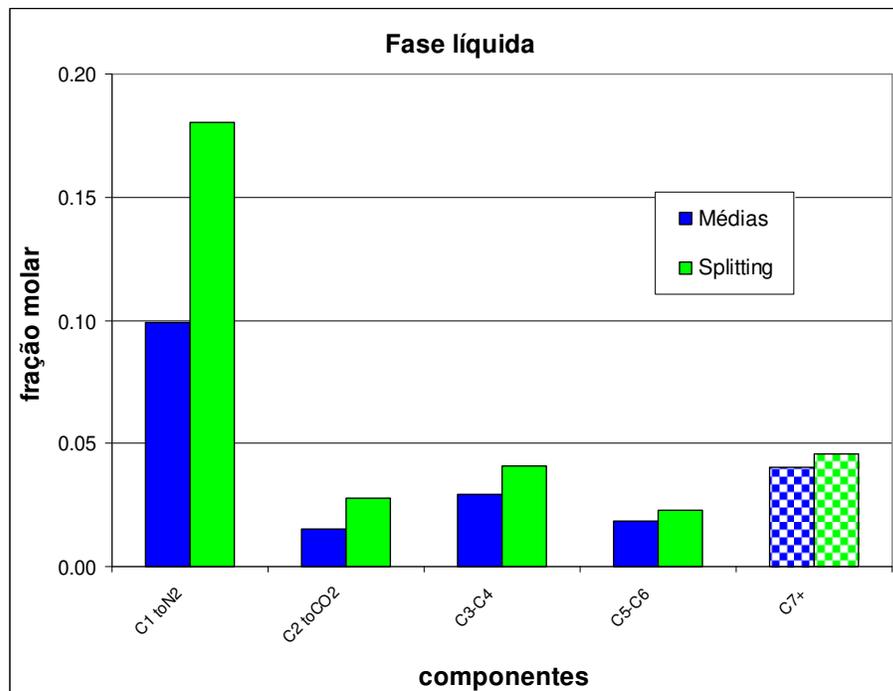


Figura 5.66 - Composição do agrupamento de 6 componentes (fase líquida), para os 2 métodos de ajustes propostos com as frações pesadas resumidas na fração C7+.

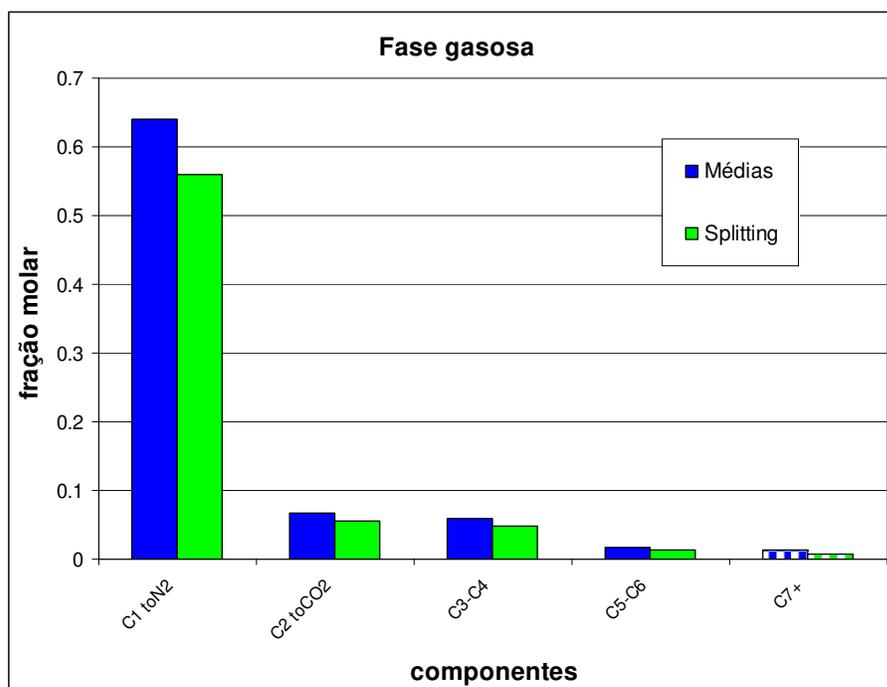


Figura 5.67 - Composição do agrupamento de 6 componentes (fase gasosa), para os 2 métodos de ajustes propostos com as frações pesadas resumidas na fração C7+.

A partir desses dados é possível verificar que em todos os componentes existem diferenças consideráveis, inclusive nos componentes intermediários que usualmente não tem suas propriedades alteradas. Analisando os parâmetros de regressão, observa-se que as maiores distorções ocorreram para pressão crítica, temperatura crítica e expoentes dos BIC. Tanto a pressão como a temperatura crítica, para este ajuste, incidem somente na fração pesada. O único parâmetro que afeta todos os componentes é o expoente dos BIC, causando diferenças no equilíbrio até maiores que os próprios pesos nos BIC. Esse parâmetro já havia sido alterado na segunda mistura, entretanto não causou distorções significativas.

Tabela 5.20 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida e gasosa, entre o método com regras de combinação e o *splitting* (8 componentes).

Componentes	<i>Splitting</i> (FASE LÍQUIDA)	<i>Splitting</i> (FASE GASOSA)
C1-N2	-72,72	11,95
CO2-C2	-54,14	15,06
C3	-28,94	14,64
IC4-NC4	-20,96	15,72
IC5-NC5	-13,53	15,78
C6	-8,03	14,55
C7+ (somado)	-2,84	14,47

Tabela 5.21 - Diferenças percentuais de cada componente, na fase líquida e gasosa, entre o método com regras de combinação e o *splitting* (6 componentes).

Componentes	<i>Splitting</i> (FASE LÍQUIDA)	<i>Splitting</i> (FASE GASOSA)
C1-N2	-81,88	12,66
CO2-C2	-81,22	18,24
C3-C4	-38,38	19,27
C5-C6	-21,97	24,49
C7+ (somado)	-13,51	39,99

Para a exata compreensão de como a alteração de todos os BIC causaram tamanha diferença nas predições, foram montados gráficos entre pressão e porcentagem de líquido condensado para os dois métodos de ajuste: Figura 5.68 (8 componentes) e Figura 5.69 (6 componentes). No gráfico fica evidente que a formação de líquido é bastante distinta entre os dois métodos, para a pressão de trabalho de 150 kgf/cm² em ambos os gráficos há uma variação de cerca de 9 pontos percentuais para o líquido condensado. Essa diferença causada pelos BIC reflete duas causas: a dificuldade no ajuste dos dados do ensaio CVD, que podem ser observados no Anexo 1 (Item III), no qual se buscou trabalhar dentro dos valores toleráveis da regressão (pelo menos na faixa de trabalho) e o fato da pressão e temperatura escolhidas estarem mais próximos do ponto crítico do que nas outras misturas (ver item 5.3.3).

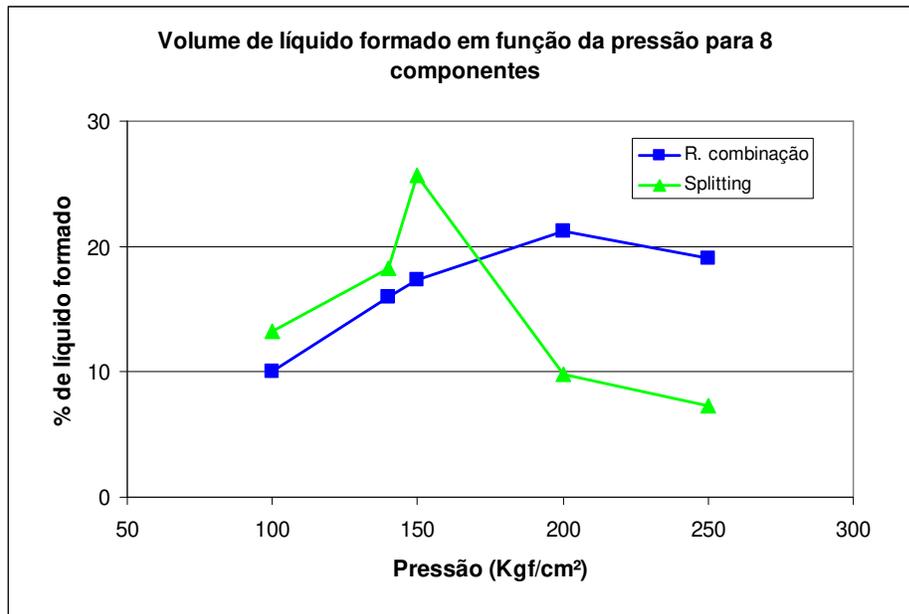


Figura 5.68 - Percentual do volume de líquido formado em função da pressão, para os dois métodos de ajuste propostos (8 componentes).

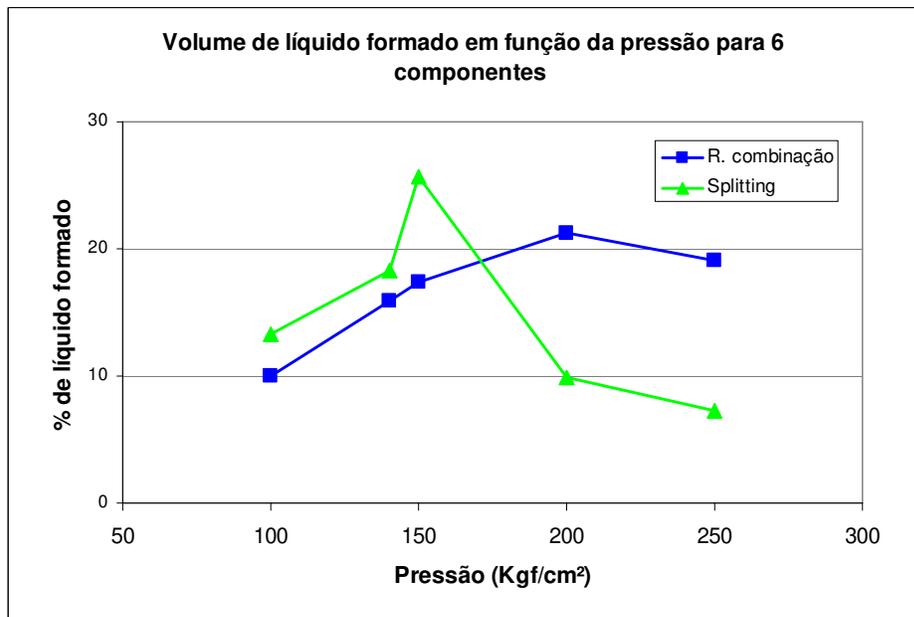


Figura 5.69 - Percentual do volume de líquido formado em função da pressão, para os dois métodos de ajuste propostos (6 componentes).

5.3.3 Envelopes de fases da terceira mistura

O fluido de um reservatório de gás tem por característica estar situado à direita do ponto crítico, em um diagrama de fases, logo apresentando um comportamento de fluido supercrítico. À medida que a pressão vai decaindo, a uma temperatura constante, um volume de líquido condensado começa a ser formado, alcançando um valor máximo até o volume novamente diminuir. Esse é um comportamento típico dos gases condensados e está exemplificado na Figura 5.70, onde o envelope do gás SPE 3 (antes da regressão) está representado com algumas linhas de qualidade.

Esse comportamento peculiar apresentado pelas linhas de qualidade dá uma ideia do comportamento a ser esperado em determinada pressão e temperatura, ou seja, quanto de líquido condensado é formado no ponto de convergência dos gases formadores da mistura.

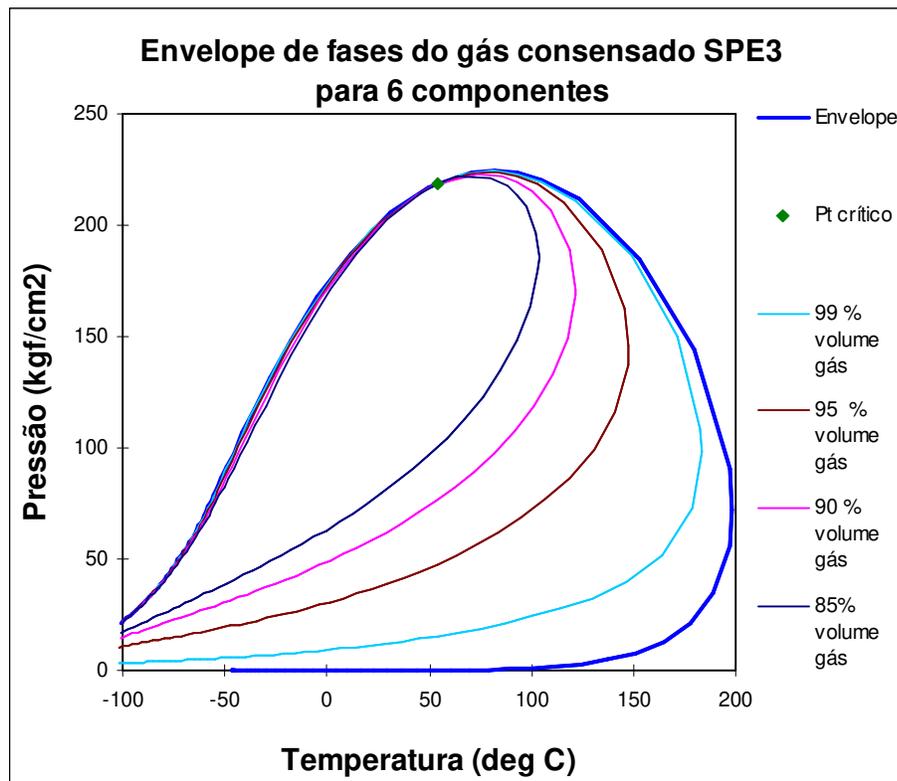


Figura 5.70 - Envelopes de fases para do gás condensado SPE 3 antes da regressão.

Na faixa de trabalho escolhida (parte centro-superior do envelope) espera-se que, para o caso de envelopes divergentes, seja por agrupamentos ou pelo método de ajuste escolhido, ocorram diferenças consideráveis no equilíbrio das fases como as discutidas no Item 5.3.2. Isso ocorre, porque quanto mais próximo do ponto crítico mais as linhas de qualidade tendem a ser divergentes, quando comparados envelopes do mesmo fluido. O mesmo foi relatado para a segunda mistura na Figura 5.55. Neste caso, a faixa de trabalho localizou-se no canto inferior esquerdo do envelope, não havendo diferenças consideráveis.

Esta região reflete uma limitação das EOS em prever o comportamento termodinâmico, limitação que aumenta quanto mais se aproxima do ponto crítico. Logo, é esperado que com diferentes metodologias de ajuste as diferenças sejam crescentes quanto mais próximo do ponto crítico.

A análise em função dos agrupamentos, com 6 e 8 componentes, é apresentada na Figura 5.71. Os dois envelopes apresentaram comportamento similar, o que não foi suficiente para evitar que diferenças ocorressem, sendo descritas no Item 5.3.2. Novamente aqui vale lembrar que, para faixa de trabalho, as diferenças nos envelopes são mais sensíveis na comparação do equilíbrio de fases.

Como não foi possível aplicar o método de ajuste com regras de combinação para a composição expandida, a Figura 5.72 e a Figura 5.73 mostram, respectivamente, os diagramas de fases dos gases SPE 3 e Campo Nigéria para os diversos agrupamentos. Na Figura 5.72, observa-se que o fluido SPE 3 apresentou comportamento muito similar em todos os envelopes, enquanto que na Figura 5.73 há diferenças no formato do envelopes ocorrendo equilíbrio líquido-líquido para 8 e 6 componentes.

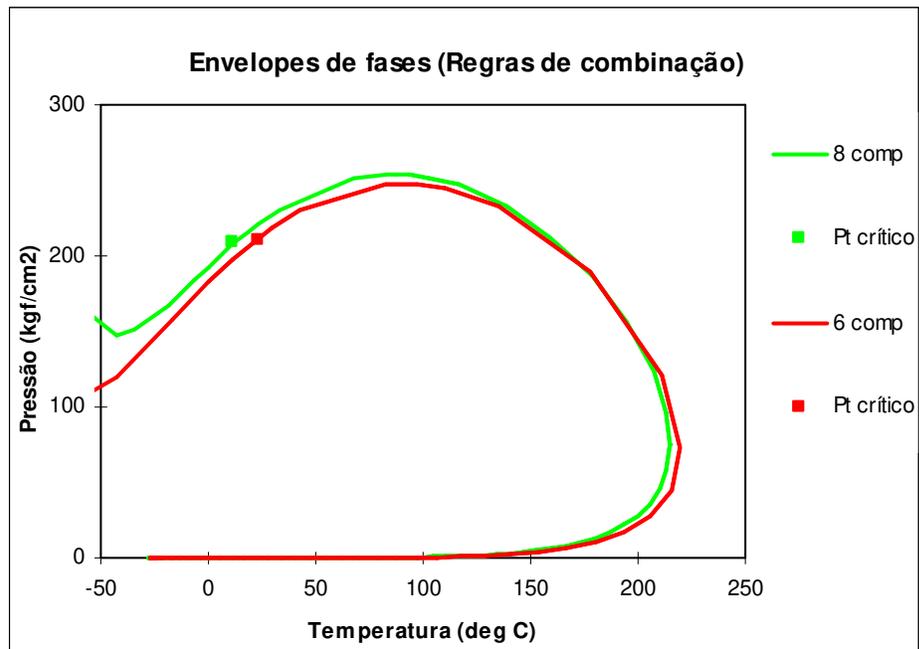


Figura 5.71 - Envelopes de fases para o método de ajuste com regras de combinação para agrupamentos com oito e seis componentes.

Assim como para o fluido do Campo Nigéria (método de ajuste com regras de combinação) o método de ajuste *splitting* (Figura 5.74) apresentou diferenças nos agrupamentos com a ocorrência de equilíbrio líquido-líquido devido ao excesso de parâmetros de regressão no ajuste.

Em função dos dois métodos de ajuste os envelopes das Figuras 5.71 e 5.74 divergem bastante, devido ao excesso de uso de parâmetros de regressão em alguns ajustes e a dificuldade em ajustar os dados experimentais do ensaio CVD. Essas diferenças refletem e corroboram os resultados obtidos e comentados no Item 5.3.2.

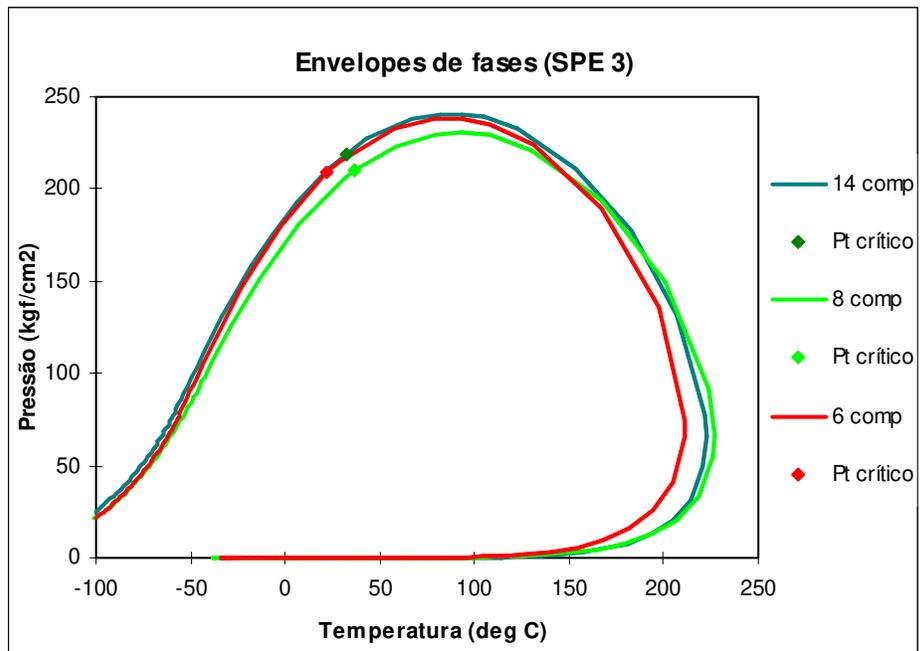


Figura 5.72 - Envelopes de fases do gás condensado SPE 3, com a composição expandida e para agrupamentos com oito e seis componentes.

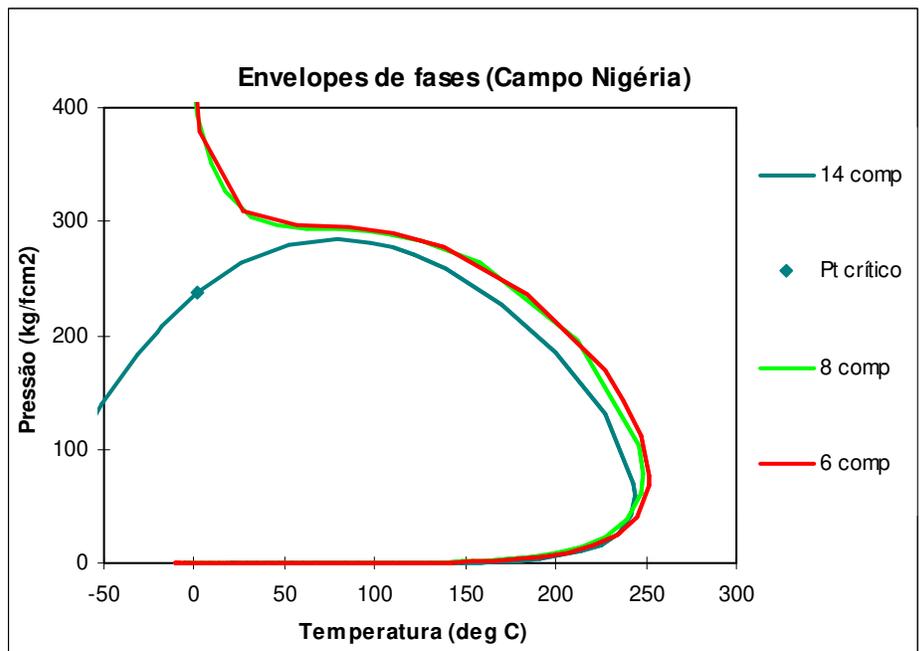


Figura 5.73 - Envelopes de fases do gás condensado Campo Nigéria, com a composição expandida e para agrupamentos com oito e seis componentes.

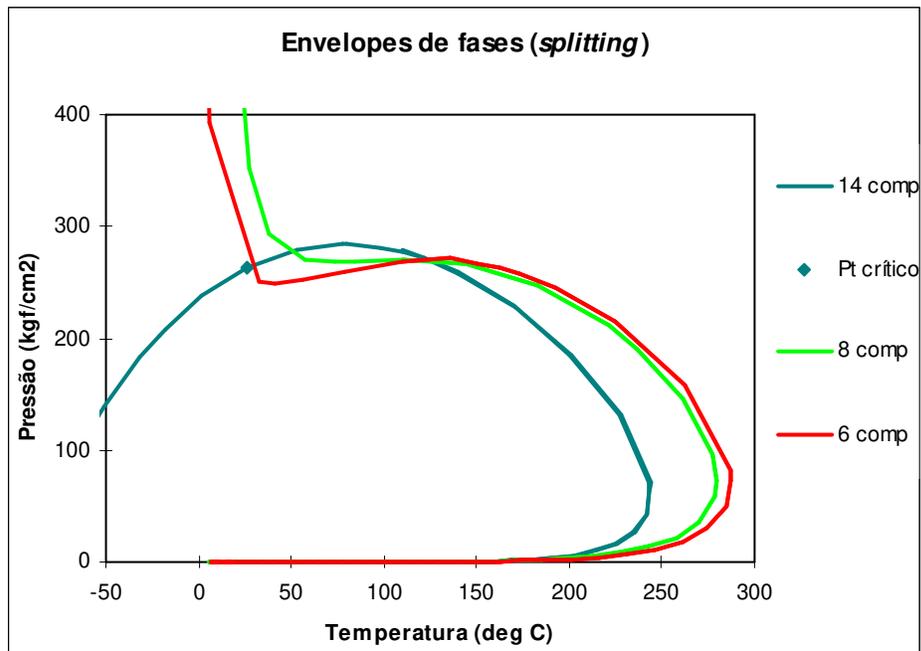


Figura 5.74 - Envelopes de fases para o método de ajuste *splitting*, com a composição expandida e para agrupamentos com oito e seis componentes.

5.3.4 Avaliação dos resultados da terceira mistura.

A simulação da terceira mistura apresentou duas adversidades: a primeira foi referente ao *splitting* inicial, necessário para o ajuste, o que dificultou a obtenção de composições idênticas nos gases constituintes; a segunda foi referente à regressão, pois a inclusão dos dados de ensaio CVD dificultou bastante o ajuste da EOS, não conseguindo em alguns casos chegar aos desvios aceitáveis.

Mesmo as dificuldades descritas, não era esperado que de um método de ajuste para outro ocorressem diferenças tão significativas. A hipótese inicial que as discrepâncias não eram causadas apenas pelo ajuste da fração pesada foi comprovada analisando as propriedades alteradas na EOS e os envelopes de fases.

O outro fator causador dos diferentes resultados encontrados foram os BIC que tiveram seus valores alterados para todos os componentes pelo expoente do BIC. Esse tipo de mudança já havia ocorrido na segunda mistura, mas como mostrado no Item 5.3.3, a região onde a mistura é

simulada tem certa proximidade com o ponto crítico. Se diferentes ajustes apresentam diferentes pontos críticos é esperado que o equilíbrio de fases varie bastante para cada método de ajuste.

Assim como na primeira mistura, por não existir o dado experimental da mistura resultante, não há como afirmar que determinado método apresenta maior eficácia, entretanto pode-se afirmar que qualquer simulação de mistura proposta apresentará incerteza considerável na resposta, pois as regiões de trabalho acerca do ponto crítico variam consideravelmente com a alteração dos BIC. Esse tipo de resposta é esperado já que a composição dos gases têm componentes mais leves que possuem interações maiores entre si e mais suscetíveis a grandes variações, portanto podendo afetar com maior facilidade a dinâmica do equilíbrio de fases.

5.4 Análises auxiliares

Uma série de simulações foi executada em paralelo aos resultados deste capítulo com o objetivo de corroborar as discussões e conclusões até agora apresentadas. Dentre todas as análises auxiliares executadas é possível destacar duas, que são apresentadas neste item: o cálculo da pressão de saturação após o processo de ajuste da EOS e simulações flash para várias condições de pressão e temperatura.

5.4.1 Cálculo da pressão de saturação após EOS ajustada

Após todo o processo de ajuste foram executadas algumas simulações a fim de testar a capacidade da EOS ajustada de reproduzir os dados experimentais. Entre os dados experimentais disponíveis está a pressão de saturação, que é um dado com uma confiabilidade experimental maior, logo foi exigida uma tolerância menor no processo de regressão (1%).

Na Tabela 5.22 são apresentados os valores de pressão de saturação calculada e as diferenças percentuais entre os métodos de ajuste, para 24 componentes na primeira e segunda mistura e para 8 componentes na terceira mistura. A referência é o método de ajuste com regras de combinação, exceto para a segunda mistura onde há o dado experimental da mistura. Vale lembrar que para 24 componentes o método de ajuste simultâneo e o *weaved* usam o mesmo ajuste.

Tabela 5.22 - Diferenças percentuais do cálculo da pressão de saturação com as EOS já ajustadas.

MISTURA	Experimental	R. combinação	Aj. simultâneo	Splitting
Primeira	-	212,14	231,22 (9,0%)	223,52 (5,4%)
Segunda	450,33	461,00 (2,4%)	439,50 (-2,4%)	418,73 (-7,0%)
Terceira	-	236,16	269,58 (14,2%)	-

Pode-se observar na primeira mistura uma diferença percentual considerável em relação aos resultados descritos no Item 5.3. A diferença de 9,0% ressalta que o método de ajuste com regras de combinação não conseguiu similaridade entre os métodos. Logo, deve-se ter atenção a este resultado em uma simulação de escoamento.

Na segunda mistura de posse do dado experimental da mesma, observa-se que o método com regras de mistura apresentou um comportamento razoável, porém o mesmo não pode ser dito do método de ajuste *splitting*.

Na terceira mistura, onde ocorreram diferenças muito significativas entre os métodos de ajuste, o cálculo da pressão de saturação seguiu a mesma tendência, apresentando uma diferença considerável de 14,2%. Novamente aqui os resultados deste ensaio confirmam os resultados apresentados no Item 5.3.

5.4.2 Simulações flash para várias condições de pressão e temperatura

Conforme citado nos Itens 5.1 e 5.2, a primeira e segunda mistura apresentaram pequenas diferenças, devidas às condições de pressão e temperatura estabelecidas, condições que tentavam simular uma mistura em um *manifold* submarino.

Com o intuito de averiguar o comportamento preditivo de uma EOS ajustada em outras condições de p e T mais próximas do ponto crítico, foram usadas as EOS ajustadas na segunda mistura (que possui os dados experimentais), para os diversos métodos de ajuste propostos.

As Tabelas 5.23 e 5.24 mostram, respectivamente, as diferenças percentuais da fração molar na fase óleo e na fase gasosa, tendo como base as frações obtidas com a EOS ajustada com os dados experimentais.

Tabela 5.23 - Diferenças percentuais dos métodos de ajuste em relação aos dados experimentais da fração molar de óleo, em diversas condições de pressão e temperatura.

FRAÇÃO VOLUME ÓLEO	p = 100Kgf/cm ² T = 40°C	p = 300Kgf/cm ² T = 100°C	p = 400Kgf/cm ² T = 200°C	p = 400Kgf/cm ² T = 300°C
Aj. Simultâneo	3,2	-2,2	-10,3	-19,0
<i>Splitting</i>	3,0	5,7	7,9	14,1
<i>Weaved</i>	3,2	-0,8	-12,7	-23,7
R. combinação	1,1	-3,2	-18,4	-31,5

Tabela 5.24 - Diferenças percentuais dos métodos de ajuste em relação aos dados experimentais da fração molar de gás, em diversas condições de pressão e temperatura.

FRAÇÃO VOLUME GÁS	p = 100Kgf/cm ² T = 40°C	p = 300Kgf/cm ² T = 100°C	p = 400Kgf/cm ² T = 200°C	p = 400Kgf/cm ² T = 300°C
Aj. Simultâneo	-2,5	3,4	20,5	37,8
<i>Splitting</i>	-2,3	-8,8	-15,7	-28,0
<i>Weaved</i>	-2,5	1,3	25,3	47,2
R. combinação	-0,9	4,9	36,5	62,7

É possível observar tanto para fase óleo, como para fase gasosa que o aumento da pressão e da temperatura de equilíbrio elevam as diferenças percentuais. Este comportamento corrobora o que foi discutido no Item 5.3, em que à medida que o sistema em estudo aproxima-se do ponto crítico, as diferenças intrínsecas aos métodos ficam mais latentes, traduzindo-se em diferentes respostas para predições.

6. CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

Este trabalho apresentou através do ajuste de equações de estado e de simulações de misturas de óleos e gases, o comportamento de um método de ajuste com regras de combinação aplicável aos simuladores de escoamento, comparando-o com outras técnicas para simulação de misturas.

As pequenas diferenças constatadas nas propriedades geradas pela simulação *flash*, na primeira mistura, demonstram que inicialmente o método de ajuste com regras de combinação apresenta resposta similar aos outros métodos comparativos. Entretanto, quando os dados foram analisados de uma maneira mais criteriosa, através da distribuição dos componentes pelas fases, foram observadas diferenças consideráveis que por fim não afetaram as propriedades geradas, pois na soma total as frações dos componentes divergentes não representaram uma parcela considerável na fase observada.

Na segunda mistura, foi possível observar a predição do método de ajuste com regras de combinação, pois os dados PVT da mistura proposta estavam disponíveis. Assim como na primeira mistura, inicialmente o método apresentou respostas similares desta vez quando comparado aos dados experimentais, mas novamente, quando a predição foi analisada componente a componente, diferenças foram encontradas, não somente para o método avaliado, mas também nos métodos comparativos.

As diferenças discutidas para a primeira e segunda misturas tiveram como causa geradora as propriedades ajustadas durante o processo de regressão. Valores de pressão, temperatura e os BIC foram os parâmetros que mais influenciaram na regressão. Como pressão e temperatura foram ajustadas somente para fração pesada, e esta não transitou entre as fases para as condições estabelecidas, as diferenças relatadas, para as condições estabelecidas, couberam quase sempre à mudança dos valores dos BIC.

Por apresentarem valores provenientes de misturas binárias os BIC são parâmetros que necessitam de uma maior atenção, principalmente para as frações mais leves e pesadas. Pois, quando utilizados alteraram significativamente o equilíbrio de fases.

No que se refere às propriedades que foram ajustadas para o método de ajuste com regras de combinação, encontrou-se uma limitação. Ao ajustar separadamente os óleos constituintes, determinados parâmetros necessitaram ser ajustados apenas em um óleo. Tal ajuste, por não ser simultâneo aos dois conjuntos de dados PVT, dificulta uma resposta semelhante aos dados experimentais, logo a calibração com o ajuste simultâneo seria mais efetiva para um ajuste fino da EOS.

A terceira mistura apresentou dificuldades para uma comparação criteriosa entre os métodos de ajuste sendo, por fim, a comparação resumida a apenas dois métodos. Diferentemente das duas misturas anteriores os fluidos misturados foram gases condensáveis, o que garantiu uma variação mais intensa das frações pesadas entre as fases na simulação. Os resultados apresentados foram bastante distintos, tanto nas propriedades geradas, como na análise por componente em cada fase.

Além da pressão, temperatura e dos BIC, outros dados como o volume de líquido formado (CVD) receberam pesos para ajustar a EOS dentro dos limites estabelecidos. A dificuldade e como consequência, o excesso de parâmetros para a calibração, é uma das razões atribuídas às diferenças encontradas.

Outra razão é a proximidade da condição p e T do ponto crítico (em relação às duas misturas anteriores), refletindo mais severamente as diferenças das EOS ajustadas pelos métodos propostos. Um exemplo claro foi quando as condições de p e T foram alteradas na segunda mistura (Item 5.4.2), aproximando-se do ponto crítico, as diferenças ficaram mais evidentes, corroborando os resultados da terceira mistura.

Os envelopes de fases apresentaram resultados interessantes, principalmente na relação agrupamentos e formato dos envelopes. Em alguns ajustes, que ficaram dentro dos limites estabelecidos para regressão, os envelopes apresentaram formato divergente da composição não agrupada. Isso ocorre devido à regressão da EOS ser um problema inverso, que com diferentes parâmetros pode alcançar o mesmo resultado. Logo, se pode concluir que o agrupamento

escolhido, para esse caso, não é o mais adequado para representar a mistura devendo ser testado outro agrupamento.

Outro resultado interessante é que quando se comparou envelopes de diferentes métodos de ajuste na primeira e segunda mistura. Observou-se que alguns estavam bem divergentes entre si, no entanto essa divergência não se refletia nos resultados das propriedades geradas. Isso ocorre porque na faixa de trabalho proposta as linhas de qualidade estavam com a mesma tendência, divergindo apenas quando se aproximavam do ponto crítico.

Analisando o comportamento do método de ajuste com regras de combinação de uma maneira geral pode-se dizer que é um método eficiente quando aplicado a condições de baixa pressão e temperatura, portanto representa bem condições em linhas de escoamento para líquidos. Quando aplicado a condições de reservatório e em linhas gases condensáveis, os ajustes feitos na regressão podem apresentar erros significativos se comparados a dados experimentais, comprometendo assim o uso do método com regras de combinação.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

A linha de estudo deste trabalho foi observar o comportamento do método de ajuste com regras de combinação comparando-o a outros métodos de ajuste, ou a dados experimentais.

Recomenda-se, com objetivo de se aprofundar no tema executar mais ajustes com dados experimentais, a fim de comparar não somente o método em questão, mas também os métodos comparativos que na literatura não apresentaram nenhum estudo sobre sua capacidade preditiva, somente alguns relatos sobre como tais artifícios seriam úteis na ausência do dado experimental.

Há também a questão do impacto dos ajustes dentro de uma simulação de escoamento ao longo do tempo, pois neste trabalho avaliou-se a questão de uma maneira estática. As diferenças percentuais apresentadas podem ser maiores ou menores quando comparadas a produção de óleo e gás, pois os parâmetros podem somar ou anular seus próprios efeitos, é necessário então estudar o impacto individual de cada parâmetro.

Outra linha de estudo interessante é avaliar outras situações de mistura de fluidos durante a produção de um reservatório de petróleo. A primeira é a injeção de gás em um reservatório de

óleo, podendo ser um gás do próprio reservatório ou a purga de outro (CO₂, por exemplo), avaliando se o método em questão poderia prever o equilíbrio em uma simulação numérica, ou que outros artifícios poderiam ser empregados. A segunda é misturar os óleos ou gases de um poço completado em várias zonas. Nesta situação os valores de p e T são maiores, podendo limitar a capacidade de previsão do método em questão neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AHMED, T.. **Reservoir Engineering Handbook**. EUA: Gulf Professional Publishing, 2000.
- API. **Technical Data Book-Petroleum Refining**. NYC: API, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: Elaboração. Rio de Janeiro, 2002. 24p.
- BARKER J.W., LEIBOVICI C.F.. **Delumping Compositional Reservoir Simulation Results: Theory and Applications** – SPE 51896, 1999.
- BARROUX, C.C., DUCHIET-SUCHAUX, P., SAMIER P.; NABIL R.. **Linking Reservoir and Surface Simulators: How to Improve the Coupled Solutions**. SPE 65159, 1999.
- BEZERRA, E. M.. **Estudo do controle de poço considerando-se o comportamento de fases da mistura gás-líquido**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas, SP: [s.n.], 2006.
- CARPIO, R.S.; SLOBODCICOV, I; VIEIRA A.J.M.. **Modelagem Integrada de Reservatório e Malha de Elevação e Escoamento – Acoplamento GAP, IMEX, GEM**. Seminário de Reservas e Reservatórios, Petrobras, 2009.
- COATS, K.H. **An EOS Compositional Model**. SPEJ, 1980: 363.
- COATS, K.H., SMART, G.T.. **Application of a Regression-Based EOS PVT Program to Laboratory Data**. SPERE, 1986: 277.
- COMPUTER MODELLING GROUP: **User`s Guide Winprop**, Canada, 2008.
- DANESH, A.. **PVT and Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids**. Netherlands. Elsevier, 1998.
- DEGANI, A.L.G., CASS, Q.B., VIEIRA, P.C.. **Cromatografia um Breve Ensaio – Atualidades em Química**. Revista Química Nova na Escola, Maio, 1998.
- DEMPSEY, J.R., PATTERSON J.K., COATS K.H., BRILL J.P.. **An Efficient Model for Evaluating Gas field Gathering System Design**, SPE 3161, JPT, 1971: pp. 1067-1073.

- DENNIS Jr., J.E., GAY, D.M., WELSCH, R.E.. **An Adaptive Nonlinear Least-Squares Algorithm.** ACM Trans. Math. Software, Vol. 7, No. 3, 1981, pp. 348-368.
- EMERICK, A. A.; SLOBODCICOV, I.. **Modelagem Integrada do Reservatório e Elevação: Acoplamento GAP e IMEX.** CT 202/2005, Petrobras, 2005.
- FIROOZABADI, A.. **Thermodynamics of Hydrocarbon Reservoir.** McGraw-Hill, 1999.
- IMO-JACK, O.. **PVT Characterization of a Gas Condensate Reservoir and Investigation of factors affecting Deliverability.** SPE 140629, 2010.
- KAY, W.. **Gases and Vapors at High Temperature and Pressure – Density of Hydrocarbon.** Ind. Eng. Chem, 1936., pp. 28, 1014.
- KATZ, D.L., E A. FIROOZABADI.. **Predicting phase behavior of condensate/crude-oil systems using methane interaction coefficients.** JPT, 1978: 1649-1655.
- KENYON, D.E. and BEHIE, G.A.. **Third SPE Comparative Solution Project: Gas Cycling of Retrograde Condensate Reservoirs.** SPE 12278. Journal of Petroleum Technology, Aug. 1987, 981-997.
- KESLER, M.G., LEE, B.I.. **Improve Predictions of Enthalpy of Fractions.** Hydro. Proc., 1976: 55, 153.
- KESLER, M.G., LEE, B.I., SANDLER S.I.. **A Third Parameter for Use in Generalized Thermodynamic Correlations.** Ind. Eng. Chem. Fund., 1979: 18, No1, 49.
- KOSMALA, A., AANONSEN, S.I., GAJRAJ, A., BIRAN, V., BRUSDAL, K., STOKKENES, A., TORRENS, R.. **Coupling of a Surface Network With Reservoir Simulation.** SPE 84220, 2003.
- LEE, B.I., KESLER, M.G.. **A Generalized Thermodynamic Correlation Based on Three-Parameter Corresponding States.** AIChE Journal, 1975: 21, 510.
- LITVAK, M.L., DARLOW B.L.. **Surface Network and Well Tubinghead Pressure Constraints in Compositional Simulation,** SPE 29125, 13th SPE Symo. TX. U.S.A., Feb. 1995, 325-336.

- MCCAIN, W.D. Jr., **The Properties of Petroleum Fluids**. Tulsa, OK: Pennwell Publishing Co., 1990.
- McCAIN Jr, W.D., BRIDGES, B., **Volatile oils and retrograde gases – What’s the difference?** Petroleum Engineer International, January 1994, No. 35-36.
- MELLO, S. F.. **Estudo sobre simulação composicional de reservatórios de petróleo com injeção de CO₂**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas, SP: [s.n.], 2011.
- NGHIEM, L.X., AZIZ, K., LI, Y.K.. **A Robust Iterative Method for Flash Calculations Using the Soave-Redlich-Kwong or the Peng-Robinson Equation of State**. SPE Journal, 1983.
- PARDO, A. R. F.. **Roteiro para Inserção de Dados Provenientes de Análise de PVT do CENPES no WINPROP**. Petrobras, 2007.
- PEDERSEN, K.S., FREDENSLUND, A. THOMASSEN, E.P.. **Properties of Oils and Natural Gases**. Houston, TX: Gulf Publishing Co., 1989.
- PEDERSEN, K.S., CHRISTENSEN, P.L.. **Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids**. Taylor & Francis, 2007.
- PETROLEUM EXPERTS, **User Guide GAP**, Scotland, 2008.
- PETROLEUM EXPERTS, **Comunicação Técnica PETEX-PETROBRAS**, 2009.
- POLING, B.E.. **The Properties of Gases and Liquids**. McGraw-Hill, 2004.
- ROBINSON, D.B. E D.Y. PENG.. **The Characterization of the Heptanes and Heavier Fractions**. Research Report 28, Tulsa, Oklahoma: Gas Producers Association, 1978.
- RACHFORD, H.H., RICE, J.D.. **Procedure for Use of Electrical Digital Computers in Calculating Flash Vaporization Hydrocarbon Equilibrium**. JPT (1952) 19; Trans., AIME, 195.
- ROSA, A. J., CARVALHO, R. S., E XAVIER, J. A. D. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 2006.

SILVA, M. B.. **Desenvolvimento de um Simulador PVT para Caracterizar Misturas de Hidrocarbonetos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas, SP: [s.n.], 1991.

VIEIRA, A. J. M.. **Transparências do Curso de Simulação Aplicada.** Petrobras, 2011.

WATSON, A.T., Lee, W.J.. **A New Algorithm for Automatic History Matching Production Data.** SPE 15228, apresentado na Unconventional Gas Technology Symposium of SPE, Louisville, Kentucky, May 18-21, 1986.

WHITSON, C.H.. **Characterizing Hydrocarbon Plus Fractions.** SPEJ,1983: 683.

WHITSON, C.H.. **Effect of C7+ Properties on Equation-of-State Predictions.** SPEJ, 1984: 685.

WHITSON, C.H., ANDERSEN T.F., e SOREIDE. I.. **Characterization of Related Equilibrium Fluids Using the Gamma Distribution.** In *C7+ Fraction Characterization*, by L.G. Chorn and G.A. Mansoori, 35-36. New York City: Taylor&Francis, 1989.

WHITSON, C. H., BRULÉ, M.R.. **Phase Behavior.** Richardson, TX: SPE, 2000.

APÊNDICE A

Correlações usadas em programas comerciais para estimar propriedades críticas e fator acêntrico de pseudocomponentes da fração C_{7+} .

A.1 Temperatura crítica:

Kesler-Lee (1976):

$$T_c = 341,7 + 811SG + (0,4244 + 0,1174\gamma)T_b + (0,4669 - 3,2623\gamma) \times 10^5 T_b^{-1} \quad (\text{A.1})$$

onde SG é a densidade e T_b é a temperatura no ponto de bolha.

Riazi-Daubert (1980):

$$T_c = 24,2787T_b^{0,58848} SG^{0,3596} \quad (\text{A.2})$$

Twu (1984):

$$T_c = T_c^0 [(1 + 2f_T)/(1 - 2f_T)]^2 \quad (\text{A.3})$$

$$f_T = \Delta SG_T [-0,362456/T_b^{1/2} + (0,0398285 - 0,948125/T_b^{1/2})\Delta SG_T] \quad (\text{A.4})$$

$$\Delta SG_T = \exp[5(SG^0 - SG^1)] - 1 \quad (\text{A.5})$$

A.2 Pressão crítica:

Kesler-Lee (1976):

$$\ln p_c = 8,3634 - \frac{0,0566}{SG} - \left[\left(0,24244 + \frac{2,2898}{SG} + \frac{0,11857}{SG^2} \right) \times 10^{-3} \right] T_b \quad (\text{A.6})$$

$$+ \left[\left(1,4685 + \frac{3,648}{SG} + \frac{0,47227}{SG^2} \right) \times 10^{-7} \right] T_b^2 - \left[\left(0,42019 + \frac{1,6977}{SG^2} \right) \times 10^{-10} \right] T_b^3$$

Riazi-Daubert (1980):

$$p_c = \left(3,12281 \times 10^9 \right) T_b^{-2,3125} SG^{2,3201} \quad (\text{A.7})$$

Twu (1984):

$$p_c = p_c^0 \left(\frac{T_c}{T_{cp}} \right) \left(\frac{V_c}{V_{cp}} \right) \left(\frac{1+2f_p}{1-2f_p} \right)^2 \quad (\text{A.8})$$

$$f_p = \Delta SG_p \left[\left(2,53262 - \frac{46,1955}{T_b^{0,5}} - 0,00127885 T_b \right) + \left(-11,4277 + \frac{252,14}{T_b^{0,5}} + 0,00230535 T_b \right) \Delta SG_p \right] \quad (\text{A.9})$$

$$\Delta SG_T = \exp[5(SG_p - SG)] - 1 \quad (\text{A.10})$$

A.3 Volume crítico:

Riazi-Daubert (1980):

$$V_c = \left(7,0434 \times 10^{-7} \right) T_b^{2,3829} SG^{-1,683} \quad (\text{A.11})$$

Twu (1984):

$$V_c = V_c^0 \left(\frac{1+2f_v}{1-2f_v} \right)^2 \quad (\text{A.12})$$

$$f_v = \Delta SG_v \left[\frac{0,466590}{T_b^{0,5}} + \left(-0,182421 + \frac{3,01721}{T_b^{0,5}} \right) \Delta SG_v \right] \quad (\text{A.13})$$

$$\Delta SG_V = \exp[4((SG^0)^2 - SG^2)] - 1 \quad (\text{A.10})$$

A.4 Fator acêntrico:

Kesler-Lee (1975):

Para $T_{br}=T_b/T_c < 0,8$

$$\omega = \frac{-\ln(P_c / 14,7) - 5,92714 + 6,09648 / \theta + 1,28862 \ln \theta - 0,169347 \theta^6}{15,2518 - 15,6875 / \theta - 13,472 \ln \theta + 0,43577 \theta^2} \quad (\text{A.11})$$

Kesler-Lee (1976):

Para $T_{br}=T_b/T_c > 0,8$

$$\omega = -7,904 + 0,1352 K_w - 0,007465 K_w^2 + 8,359\theta - 8,359\theta + (1,408 - 0,01063 K) / \theta \quad (\text{A.12})$$

ANEXO 1 - CURVAS DE AJUSTE DOS DADOS PVT

Nesta seção encontram-se as curvas dos ajustes realizados para os diversos métodos apresentados. Algumas curvas foram excluídas como: viscosidade, alguns ajustes com o método *splitting* que apresentaram o mesmo envelope de fases da composição original e alguns ensaios que apresentavam dados distantes da faixa de trabalho selecionada.

I. Primeira Mistura

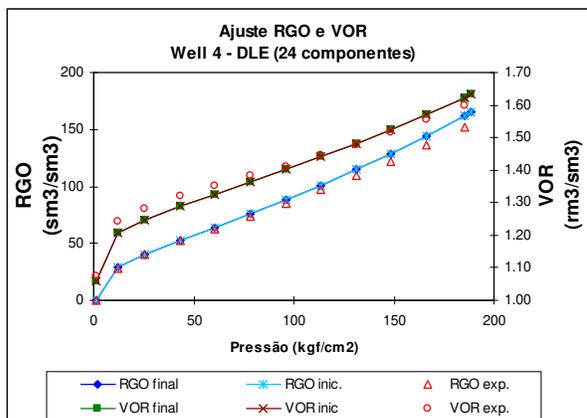


Figura I.1 - Ajuste da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Well 4.

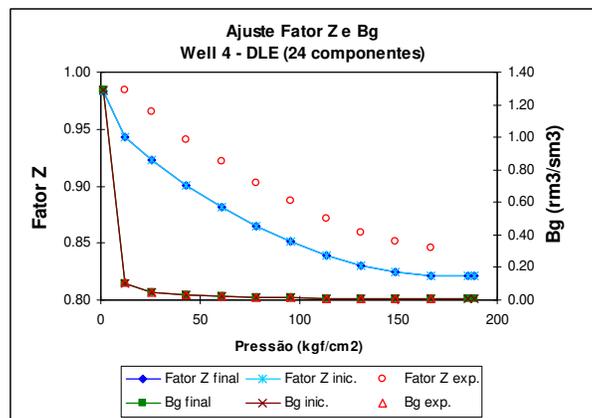


Figura I.3 - Ajuste do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Well 4.

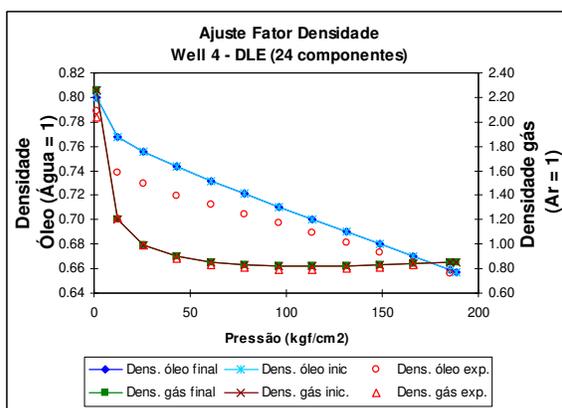


Figura I.2 - Ajuste da densidade para 24 componentes, DLE Well 4.

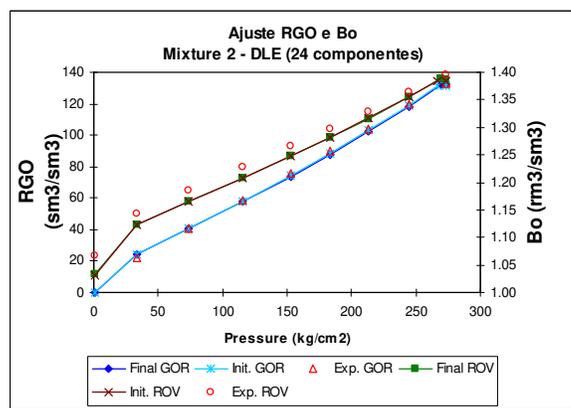


Figura I.4 - Ajuste da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Mixture 2.

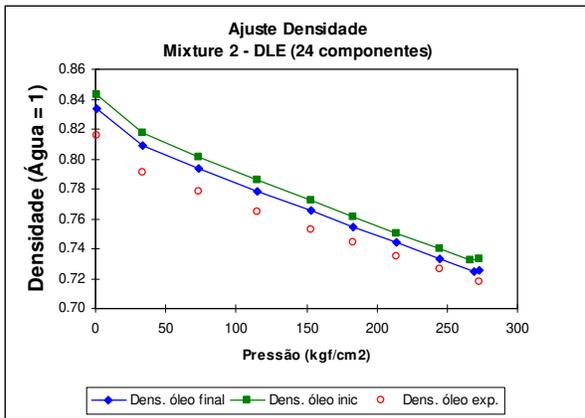


Figura I.5 - Ajuste da densidade para 24 componentes, DLE Mixture 2.

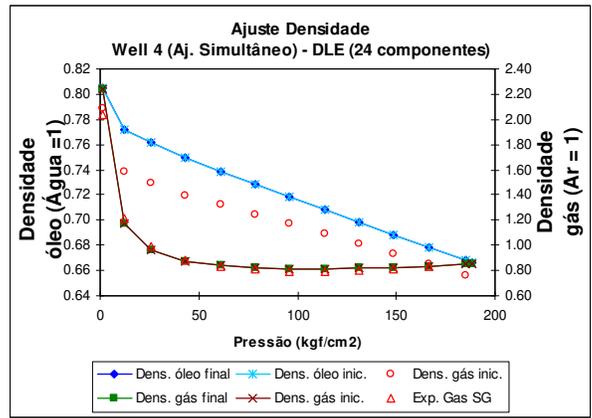


Figura I.8 - Ajuste simultâneo da densidade para 24 componentes, DLE Well 4.

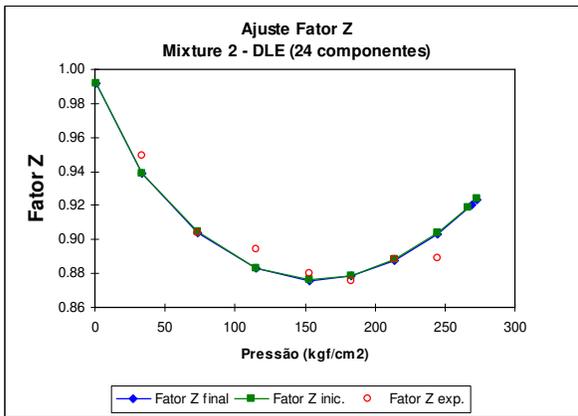


Figura I.6 - Ajuste do fator Z para 24 componentes, DLE Mixture 2.

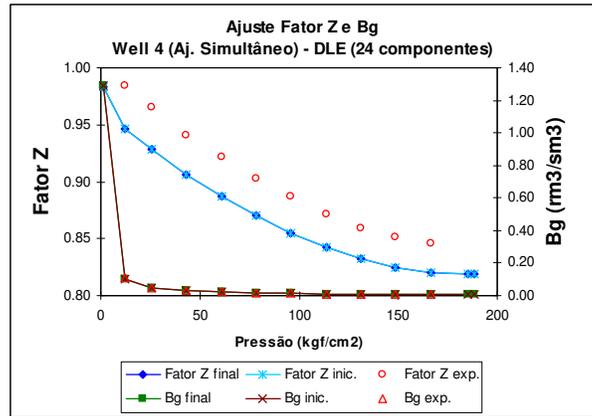


Figura I.9 - Ajuste simultâneo do fator Z para 24 componentes, DLE Well 4.

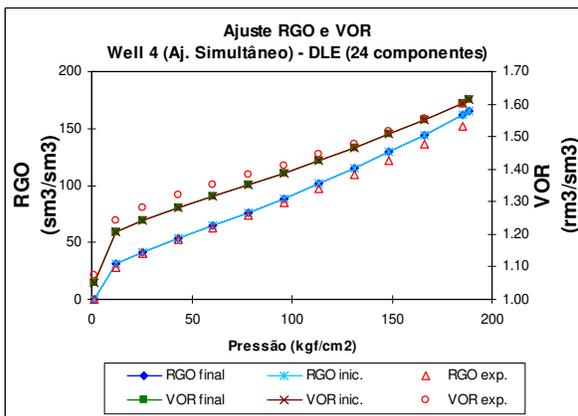


Figura I.7 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Well 4.

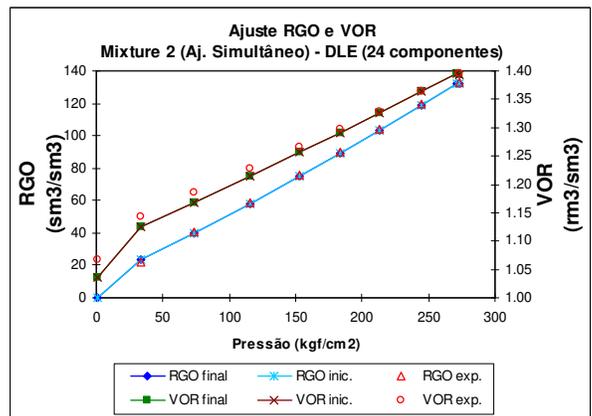


Figura I.10 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Mixture 2.

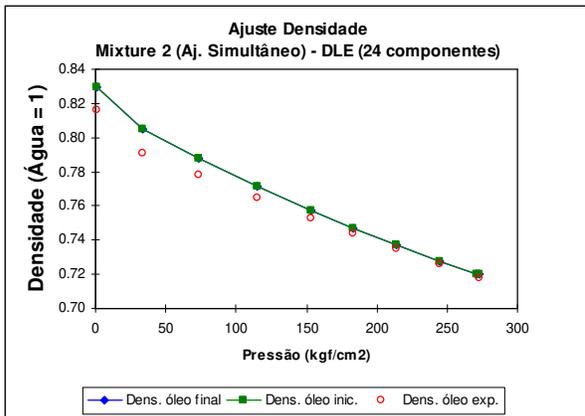


Figura I.11 - Ajuste simultâneo da densidade para 24 componentes, DLE Mixture 2.

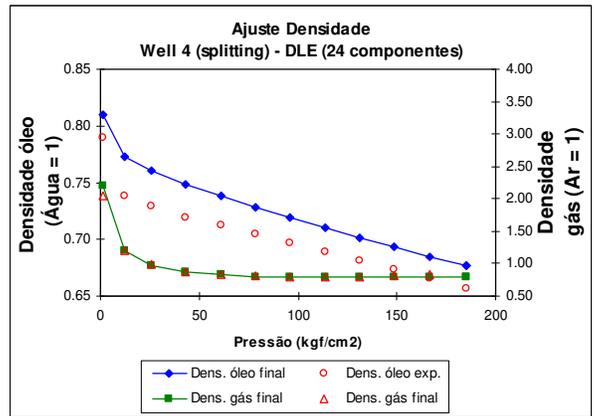


Figura I.14 - Ajuste *splitting* da densidade para 24 componentes, DLE Well 4.

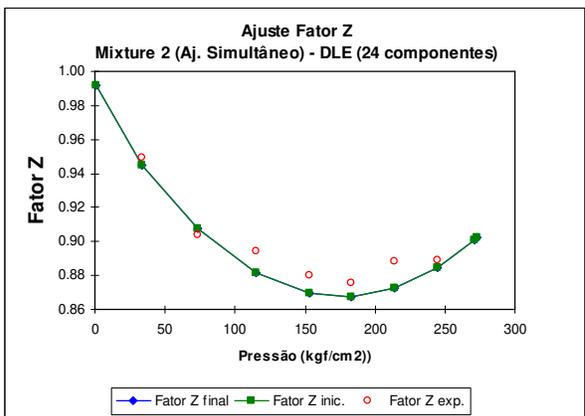


Figura I.12 - Ajuste simultâneo do fator Z para 24 componentes, DLE Mixture 2.

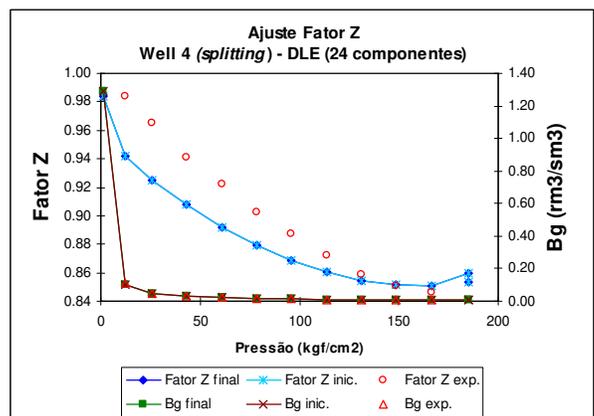


Figura I.15 - Ajuste *splitting* do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Well 4.

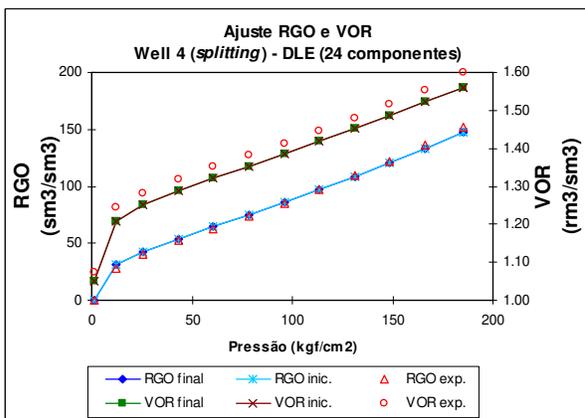


Figura I.13 - Ajuste *splitting* da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Well 4.

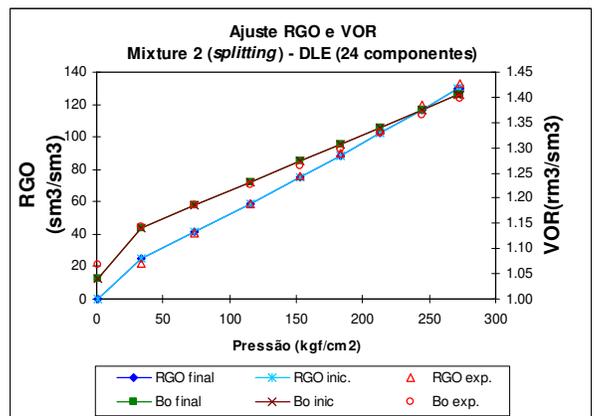


Figura I.16 - Ajuste *splitting* da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Mixture 2.

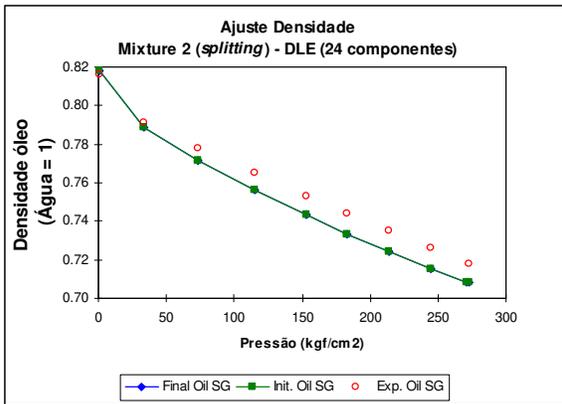


Figura I.17 - Ajuste *splitting* da densidade para 24 componentes, DLE Mixture 2.

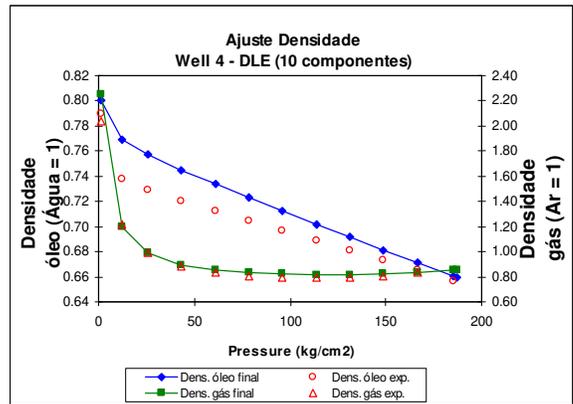


Figura I.20 - Ajuste da densidade para 10 componentes, DLE Well 4.

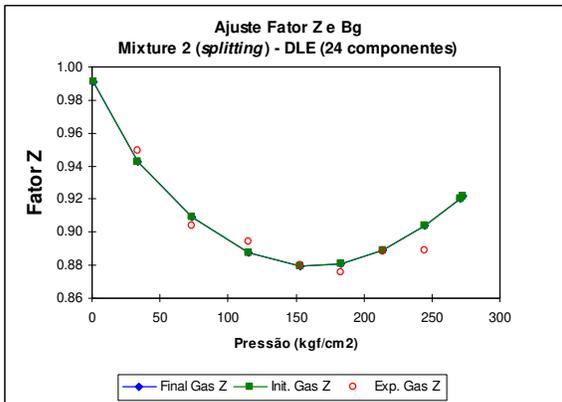


Figura I.18 - Ajuste *splitting* do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Mixture 2.

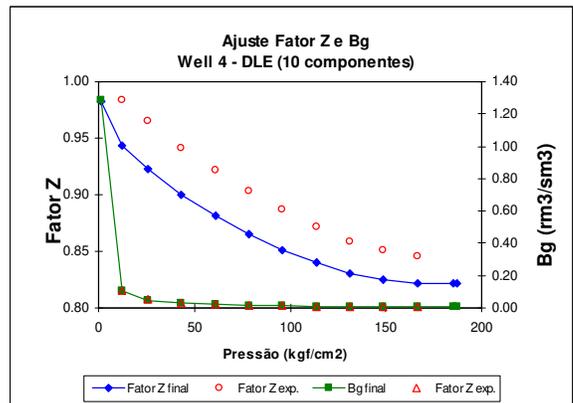


Figura I.21 - Ajuste do fator Z e Bg para 10 componentes, DLE Well 4.

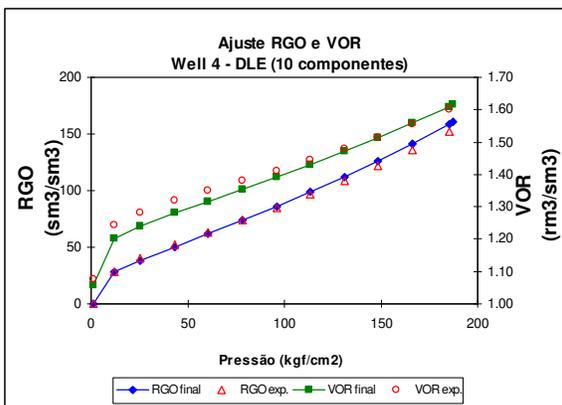


Figura I.19 - Ajuste da RGO e VOR para 10 componentes, DLE Well 4.

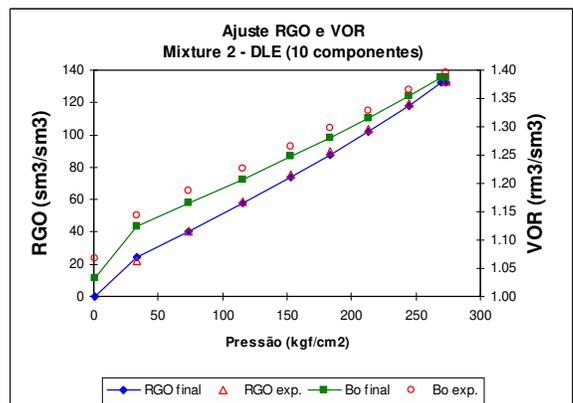


Figura I.22 - Ajuste da RGO e VOR para 10 componentes, DLE Mixture 2.

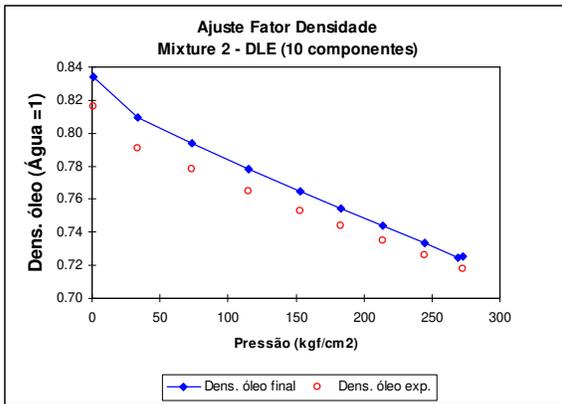


Figura I.23 - Ajuste da densidade para 10 componentes, DLE Mixture 2.

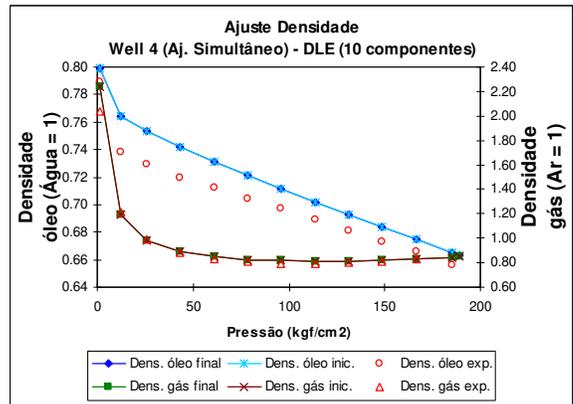


Figura I.26 - Ajuste simultâneo da densidade para 10 componentes, DLE Well 4.

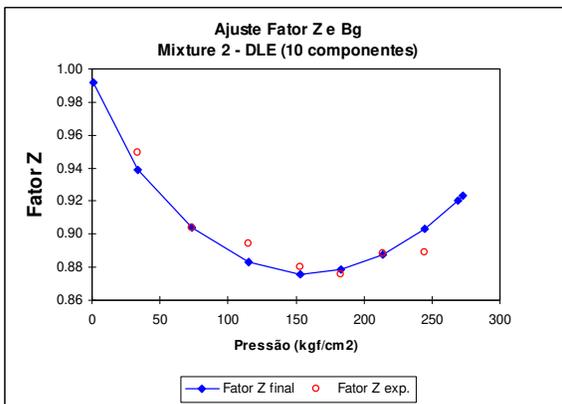


Figura I.24 - Ajuste do fator Z e Bg para 10 componentes, DLE Mixture 2.

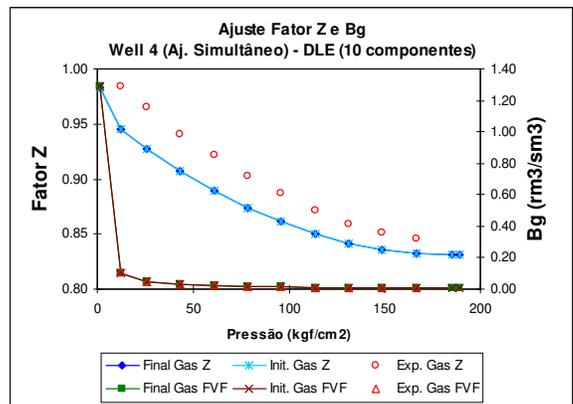


Figura I.27 - Ajuste simultâneo do fator Z para 10 componentes, DLE Well 4.

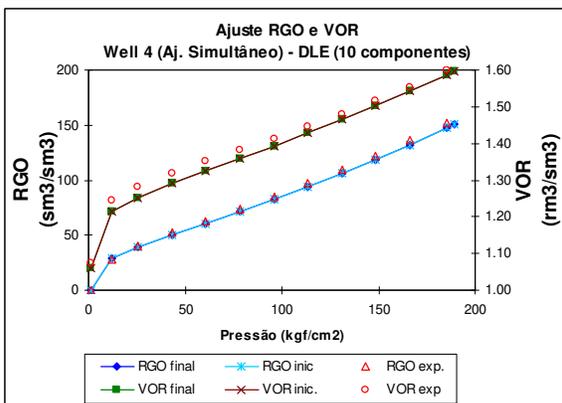


Figura I.25 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Well 4.

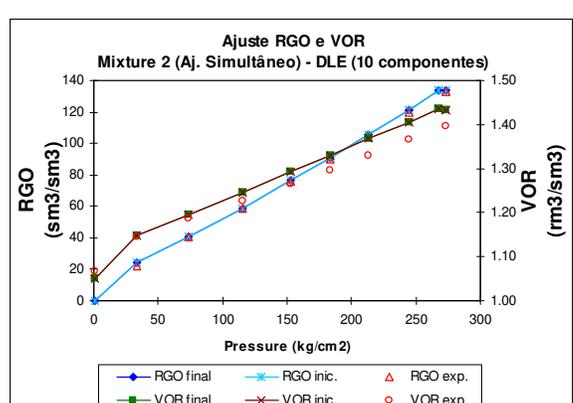


Figura I.28 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Mixture 2.

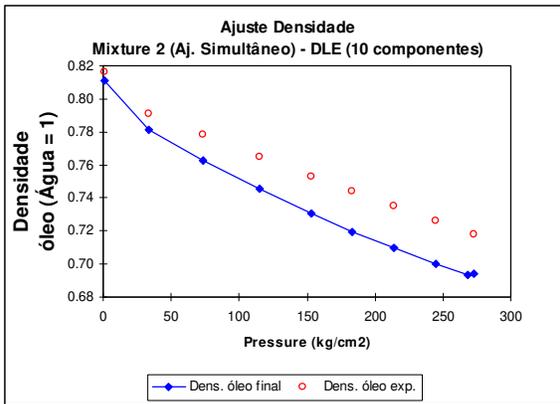


Figura I.29 - Ajuste simultâneo da densidade para 10 componentes, DLE Mixture 2.

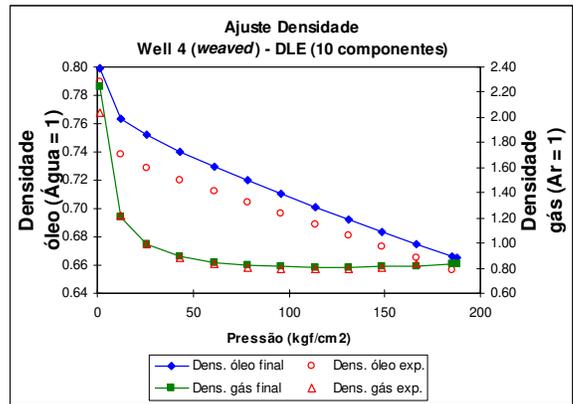


Figura I.32 - Ajuste *weaved* da densidade para 10 componentes, DLE Well 4.

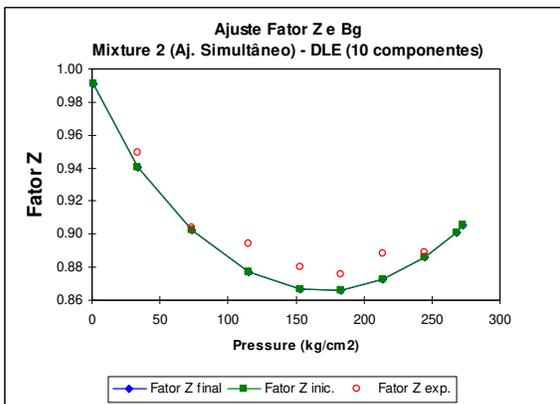


Figura I.30 - Ajuste simultâneo do fator Z e do Bg para 10 componentes, DLE Mixture 2.

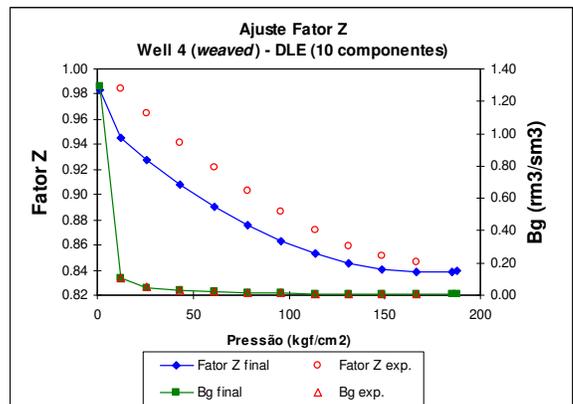


Figura I.33 - Ajuste *weaved* fator Z para 10 componentes, DLE Well 4.

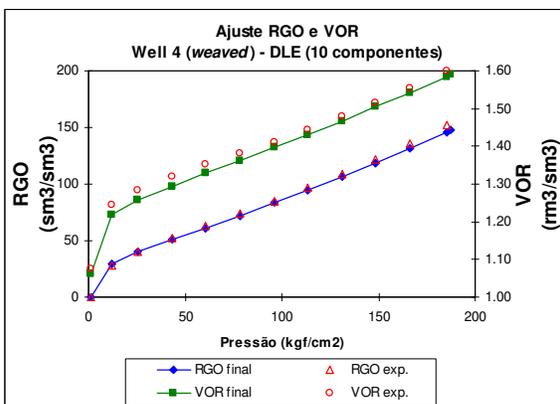


Figura I.31 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Well 4.

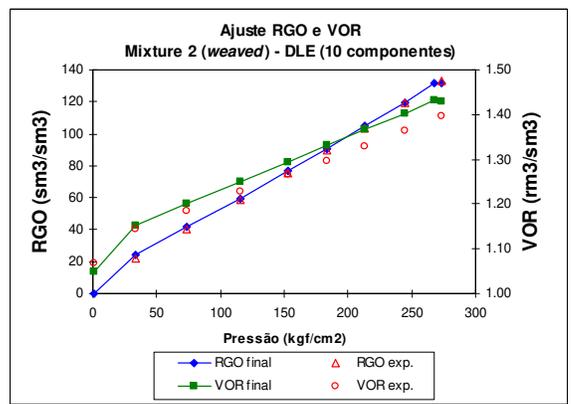


Figura I.34 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Mixture 2.

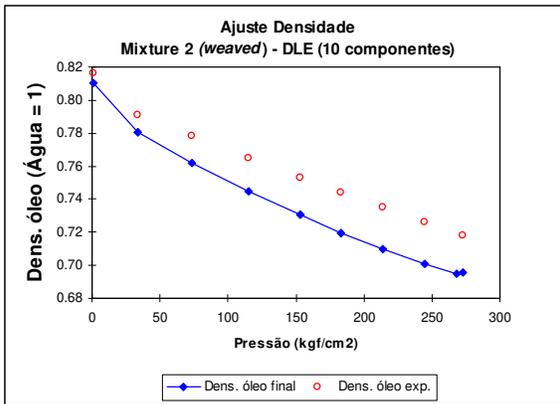


Figura I.35 - Ajuste *weaved* da densidade para 10 componentes, DLE Mixture 2.

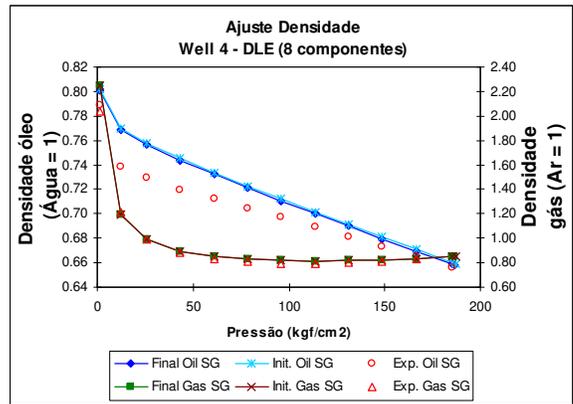


Figura I.38 - Ajuste da densidade para 8 componentes, DLE Well 4.

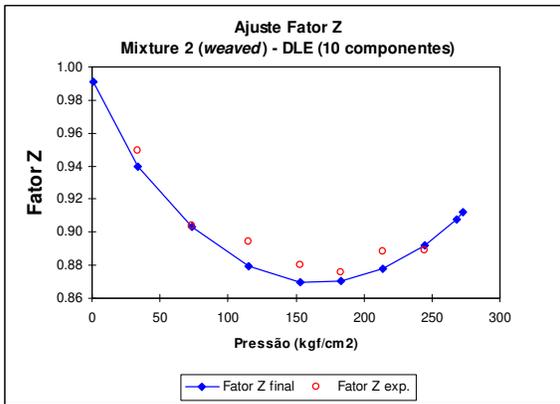


Figura I.36 - Ajuste *weaved* fator Z para 10 componentes, DLE Mixture 2.

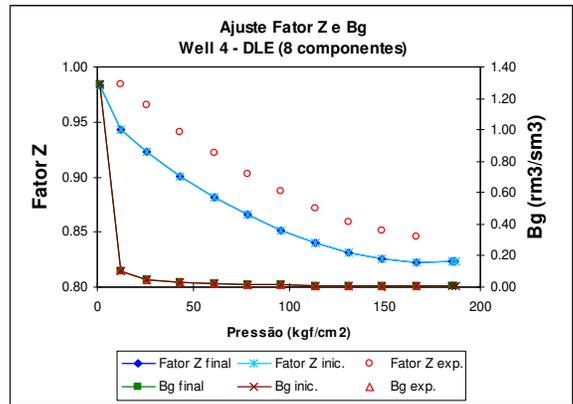


Figura I.39 - Ajuste do Fator Z e do Bg para 8 componentes, DLE Well 4.

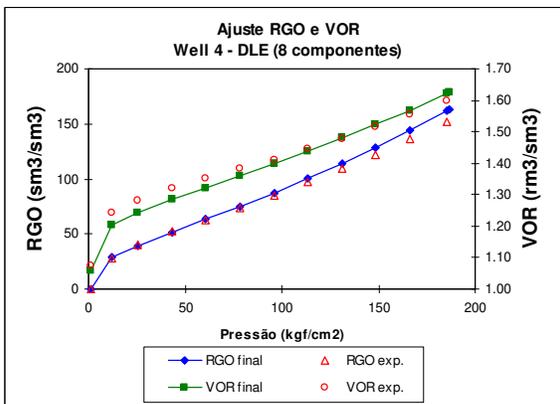


Figura I.37 - Ajuste da RGO e VOR para 8 componentes, DLE Well 4.

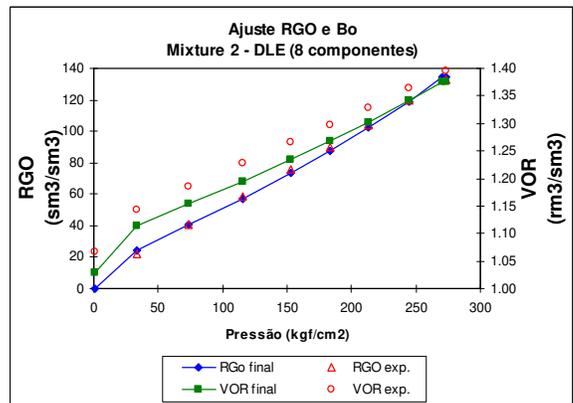


Figura I.40 - Ajuste da RGO e VOR para 8 componentes, DLE Mixture 2.

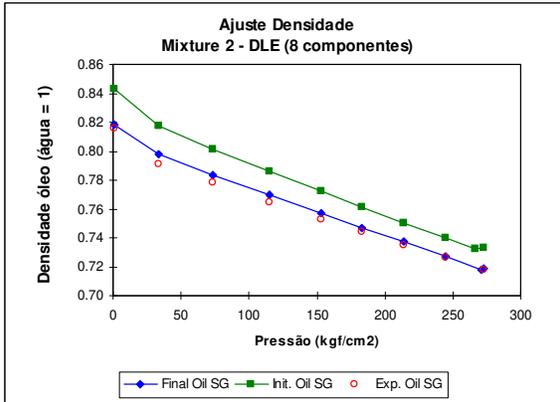


Figura I.41 - Ajuste da densidade para 8 componentes, DLE Mixture 2.

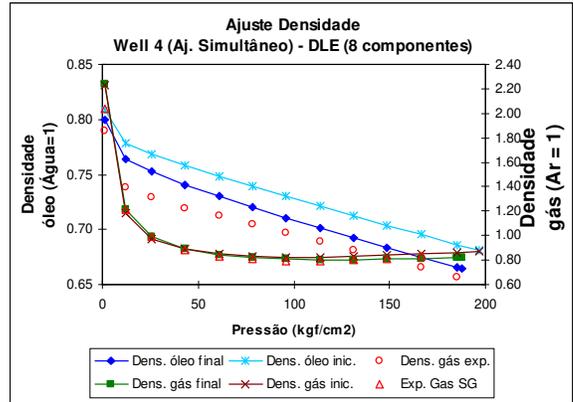


Figura I.44 - Ajuste simultâneo da densidade para 8 componentes, DLE Well 4.

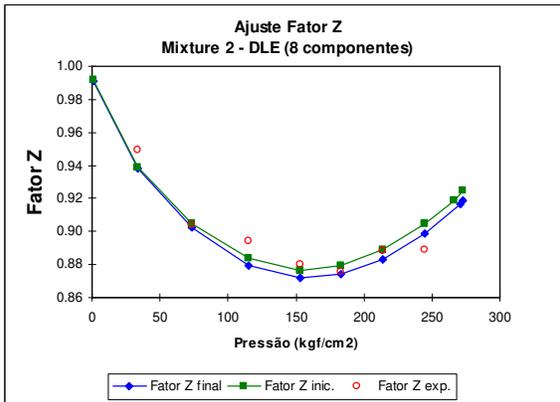


Figura I.42 - Ajuste do Fator Z para 8 componentes, DLE Mixture 2.

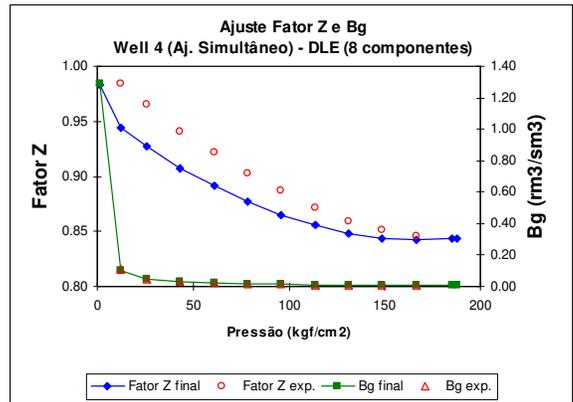


Figura I.45 - Ajuste simultâneo do fator Z e Bg para 8 componentes, DLE Well 4.

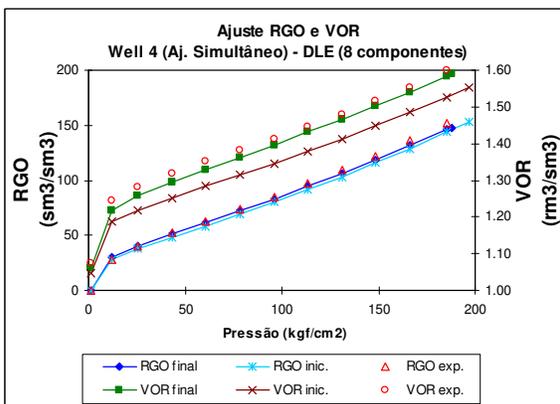


Figura I.43 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Well 4.

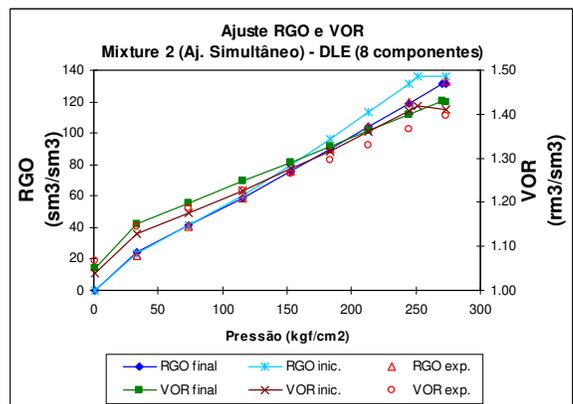


Figura I.46 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Mixture 2.

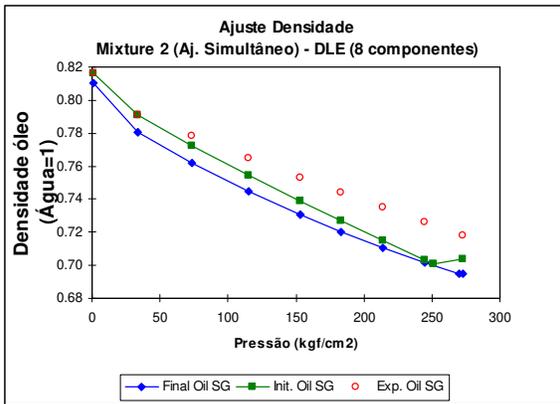


Figura I.47 - Ajuste simultâneo da densidade para 8 componentes, DLE Mixture 2.

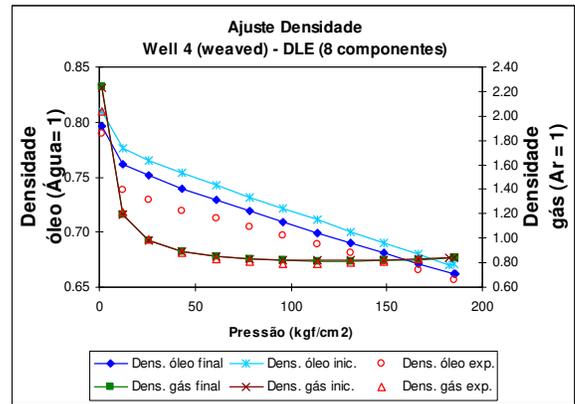


Figura I.50 - Ajuste *weaved* da densidade para 8 componentes, DLE Well 4.

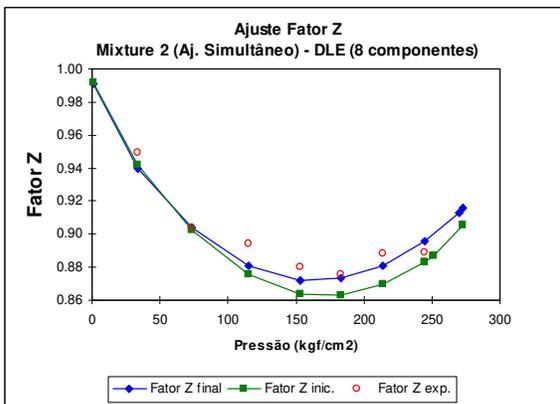


Figura I.48 - Ajuste simultâneo do fator Z e Bg para 8 componentes, DLE Mixture 2.

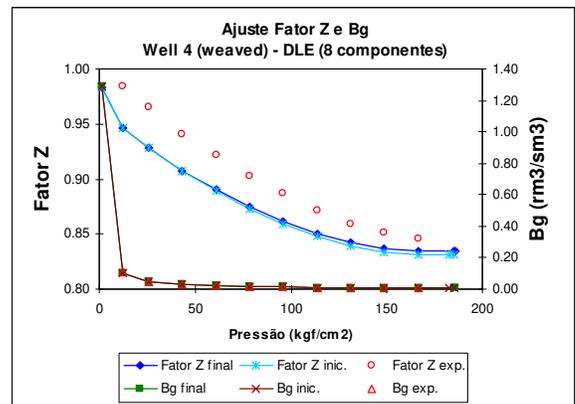


Figura I.51 - Ajuste *weaved* do fator Z e do Bg para 8 componentes, DLE Well 4.

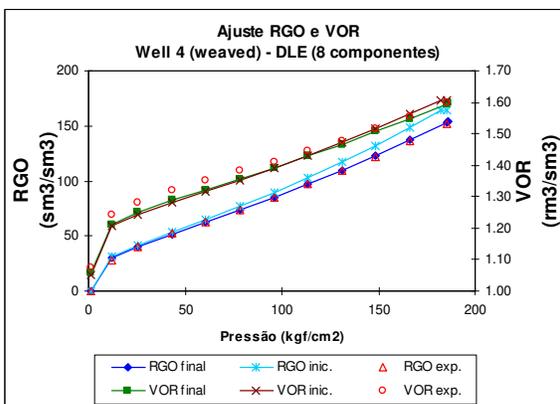


Figura I.49 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Well 4.

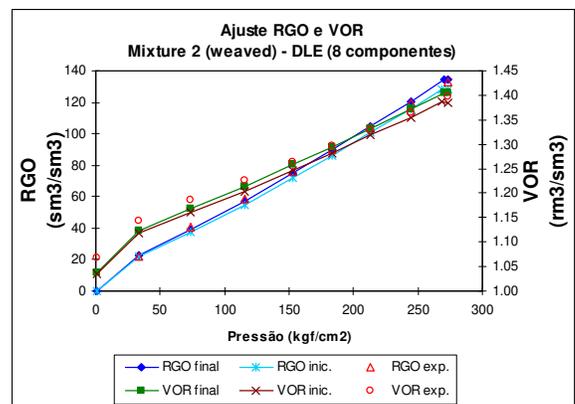


Figura I.52 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Mixture 2.

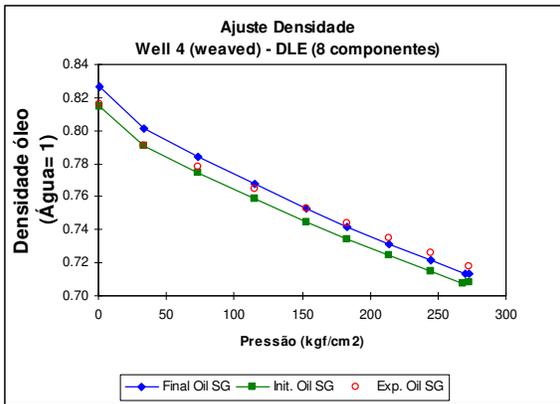


Figura I.53 - Ajuste *weaved* da densidade para 8 componentes, DLE Mixture 2.

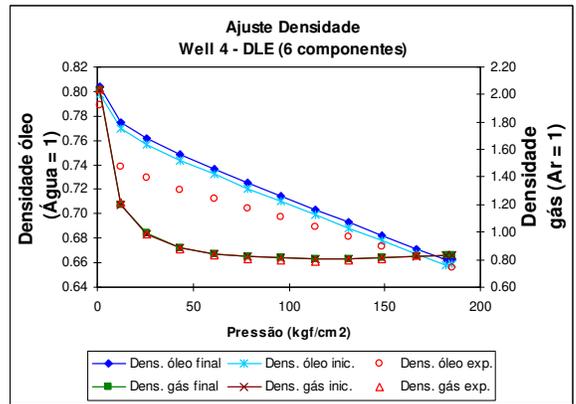


Figura I.56 - Ajuste da densidade para 6 componentes, DLE Well 4.

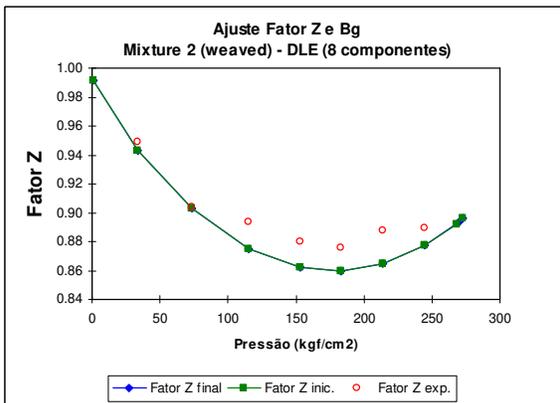


Figura I.54 - Ajuste *weaved* do fator Z para 8 componentes, DLE Mixture 2.

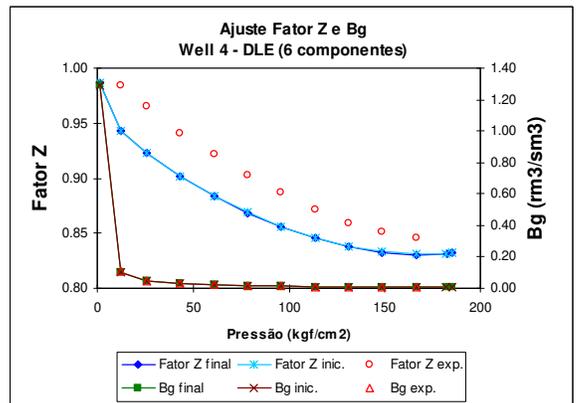


Figura I.57 - Ajuste do fator Z e do Bg para 6 componentes, DLE Well 4.

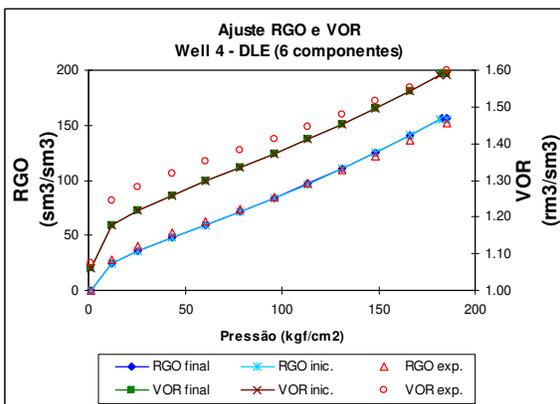


Figura I.55 - Ajuste da RGO e VOR para 6 componentes, DLE Well 4.

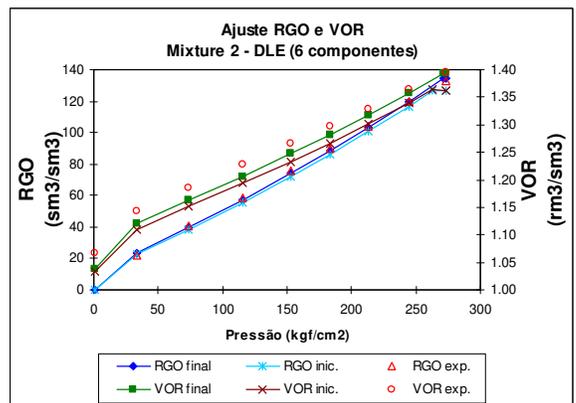


Figura I.58 - Ajuste da RGO e VOR para 6 componentes, DLE Mixture 2

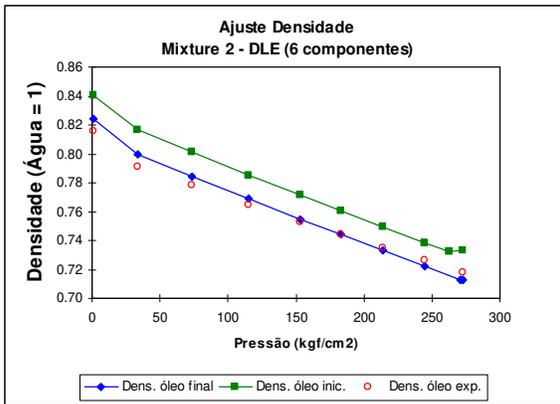


Figura I.59 - Ajuste da densidade para 6 componentes, DLE Mixture 2.

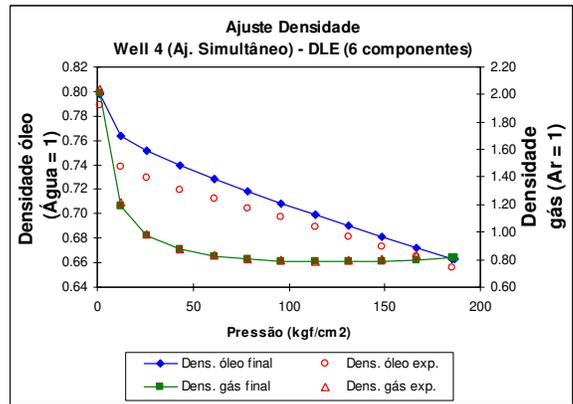


Figura I.62 - Ajuste simultâneo da Densidade para 6 componentes, DLE Well 4.

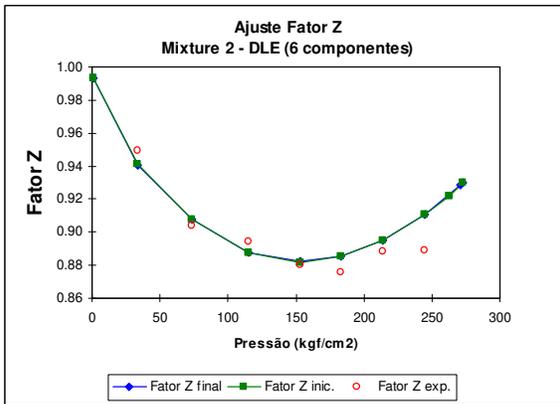


Figura I.60 - Ajuste do Fator Z e do Bg para 6 componentes, DLE Mixture 2.

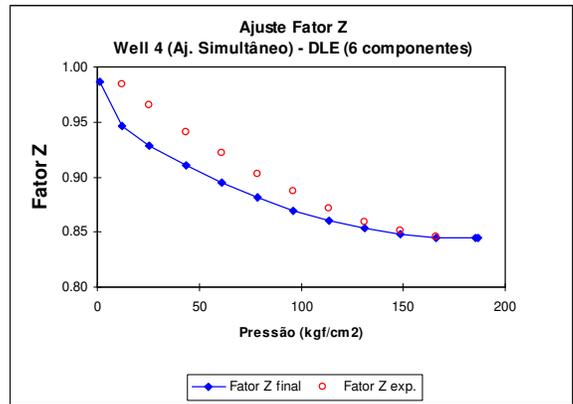


Figura I.63 - Ajuste simultâneo do Fator Z para 6 componentes, DLE Well 4.

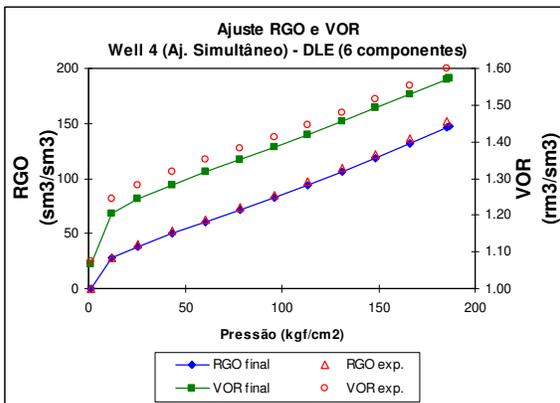


Figura I.61 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Well 4.

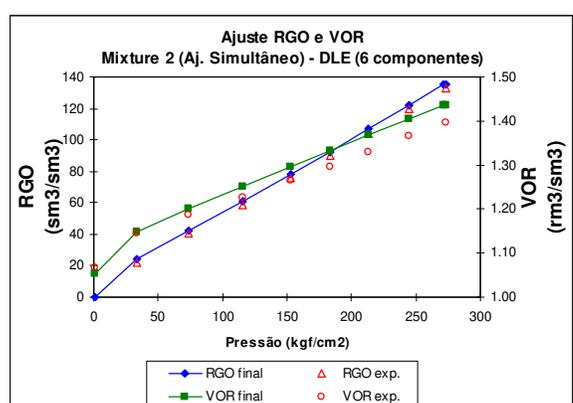


Figura I.64 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Mixture 2.

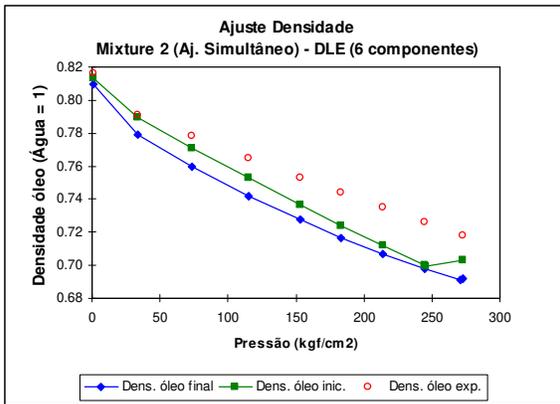


Figura I.65 - Ajuste simultâneo da densidade para 6 componentes, DLE Mixture 2.

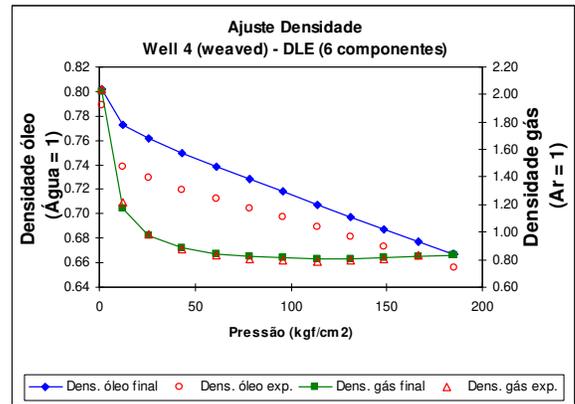


Figura I.68 - Ajuste *weaved* da densidade para 6 componentes, DLE Well 4.

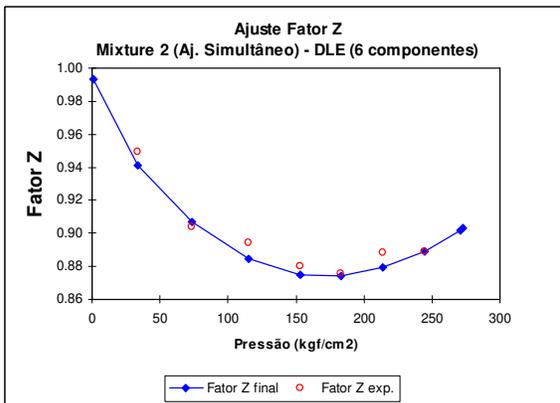


Figura I.66 - Ajuste simultâneo do fator Z para 6 componentes, DLE Mixture 2.

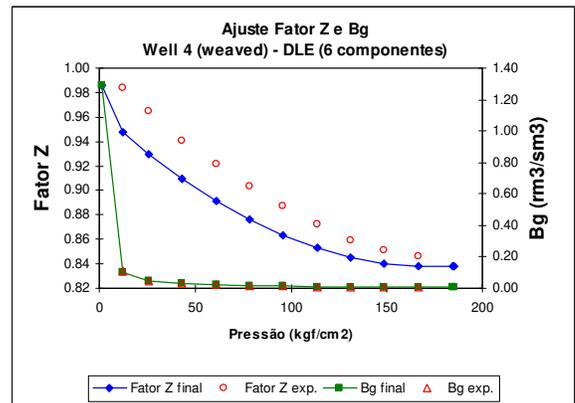


Figura I.69 - Ajuste *weaved* do fator Z e Bg para 6 componentes, DLE Well 4.

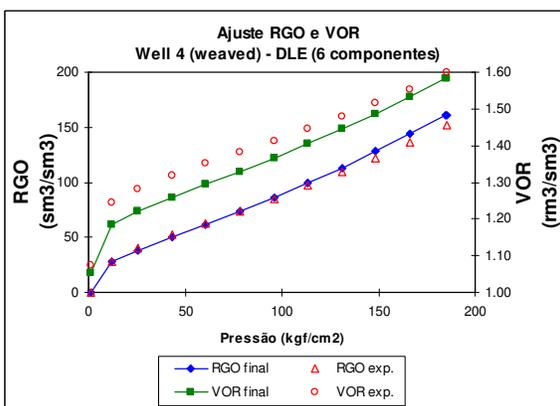


Figura I.67 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Well 4.

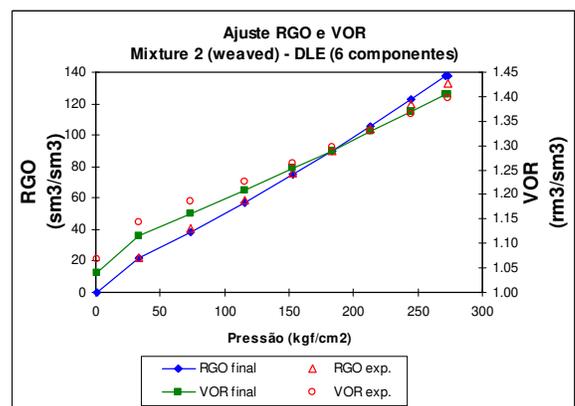


Figura I.70 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Mixture 2.

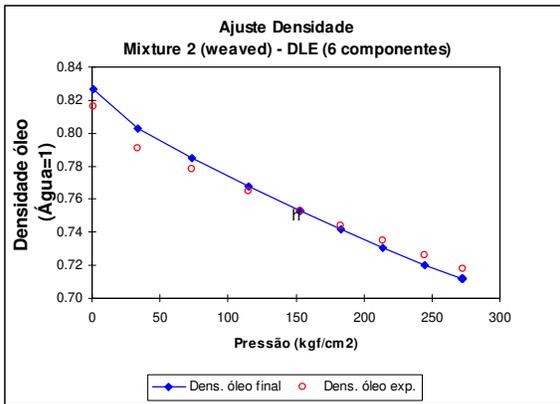


Figura I.71 - Ajuste *weaved* da densidade para 6 componentes, DLE Mixture 2.

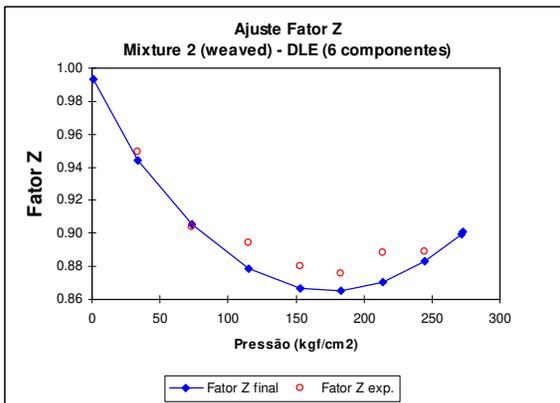


Figura I.72 - Ajuste *weaved* do fator Z para 6 componentes, DLE Mixture 2.

II. Segunda Mistura

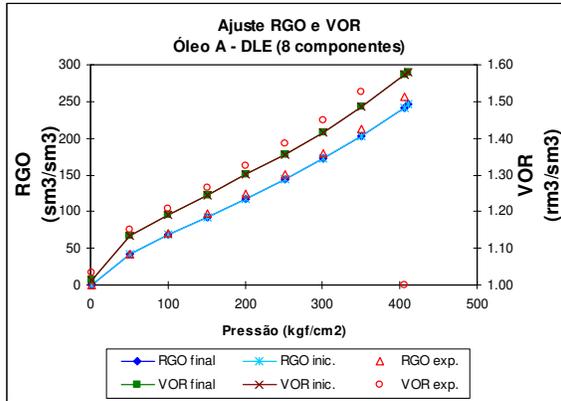


Figura II.1 - Ajuste da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo A.

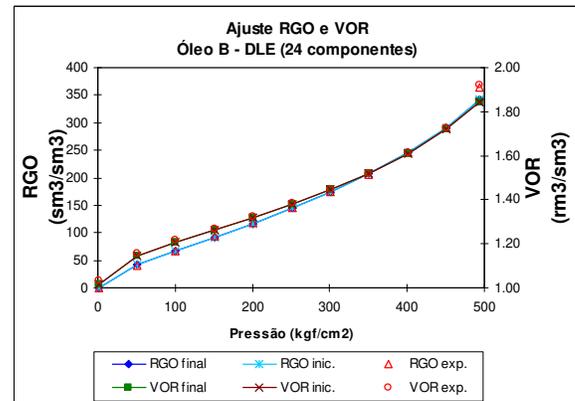


Figura II.4 - Ajuste da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo B.

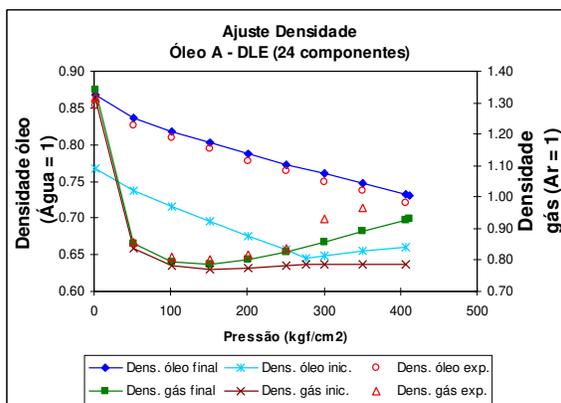


Figura II.2 - Ajuste da densidade para 24 componentes, DLE Óleo A.

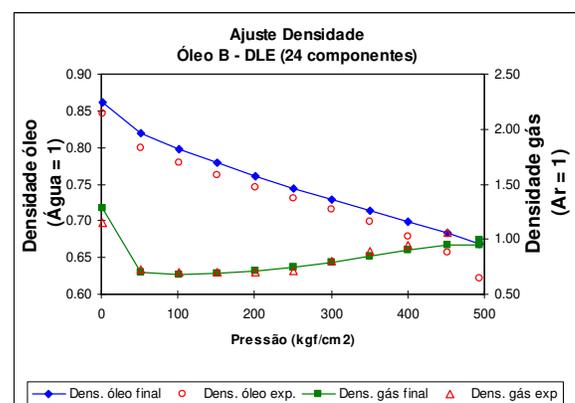


Figura II.5 - Ajuste da densidade para 24 componentes, DLE Óleo B.

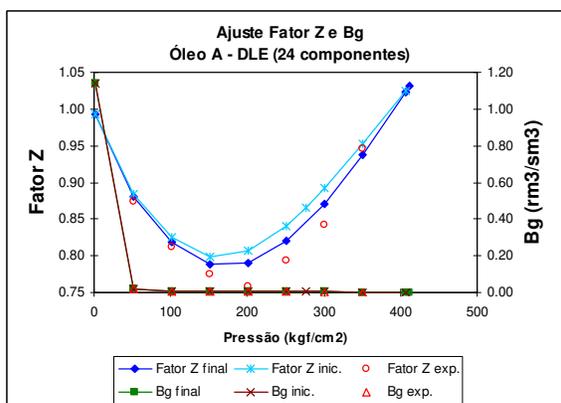


Figura II.3 - Ajuste do Fator Z e Bg para 24 componentes, DLE Óleo A.

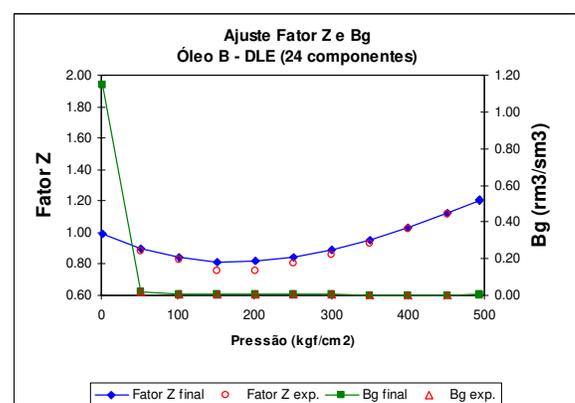


Figura II.6 - Ajuste do Fator Z e Bg para 24 componentes, DLE Óleo B.

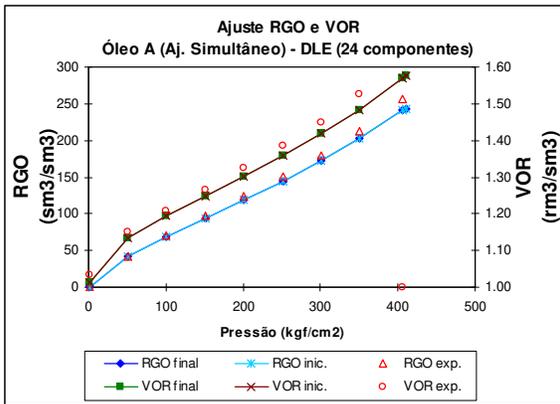


Figura II.7 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo A.

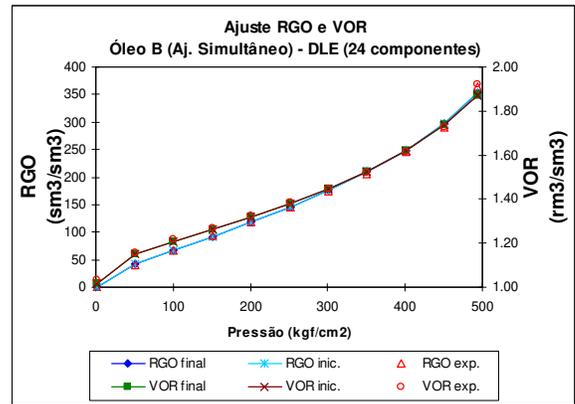


Figura II.10 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo B.

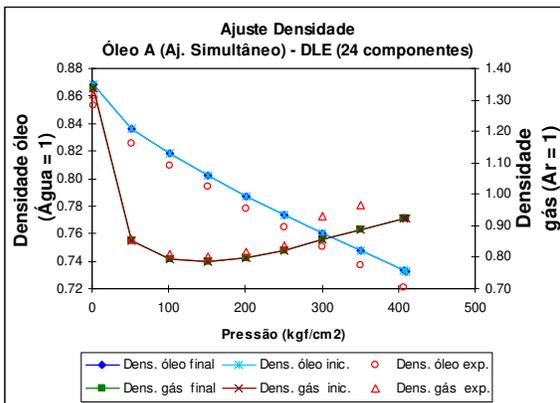


Figura II.8 - Ajuste simultâneo da densidade para 24 componentes, DLE Óleo A.

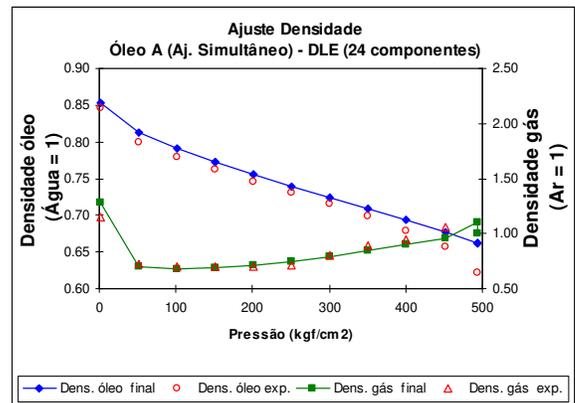


Figura II.11 - Ajuste simultâneo da densidade para 24 componentes, DLE Óleo B.

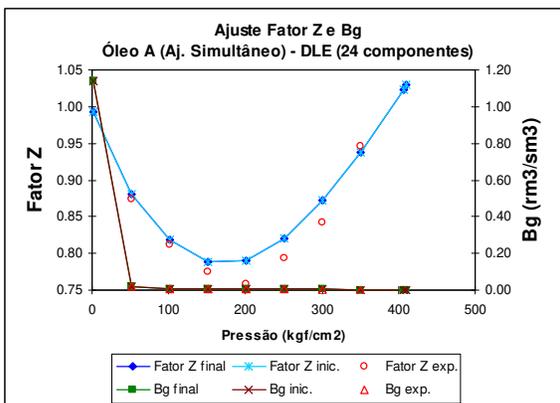


Figura II.9 - Ajuste simultâneo do fator Z para 24 componentes, DLE Óleo A.

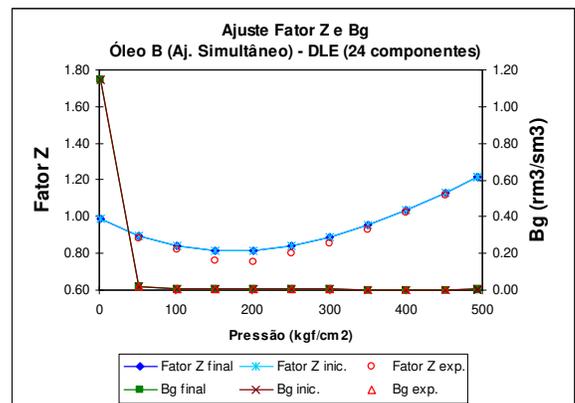


Figura II.12 - Ajuste simultâneo do fator Z e Bg para 24 componentes, DLE Óleo B.

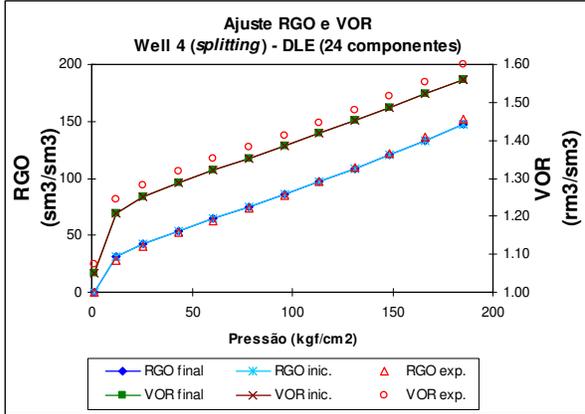


Figura II.13 - Ajuste *splitting* da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo A.

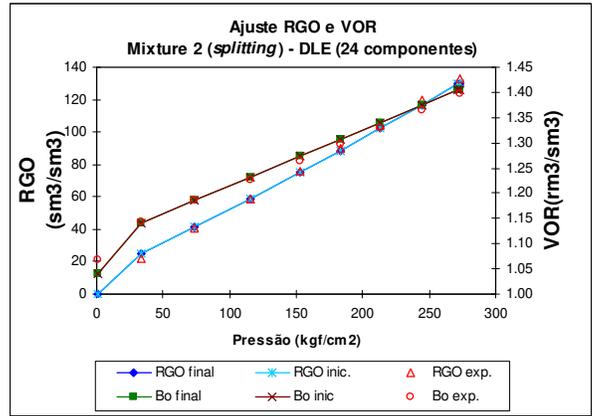


Figura II.16 - Ajuste *splitting* da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Óleo B.

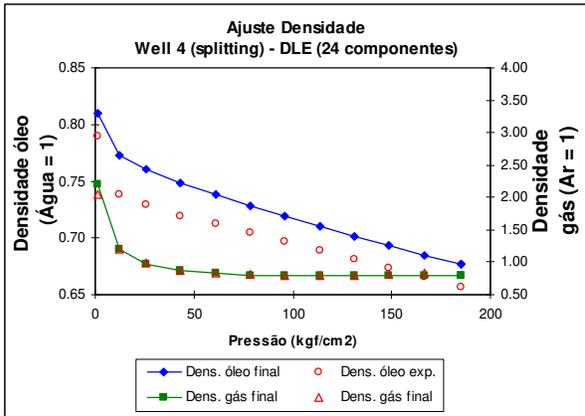


Figura II.14 - Ajuste *splitting* da densidade para 24 componentes, DLE Óleo A.

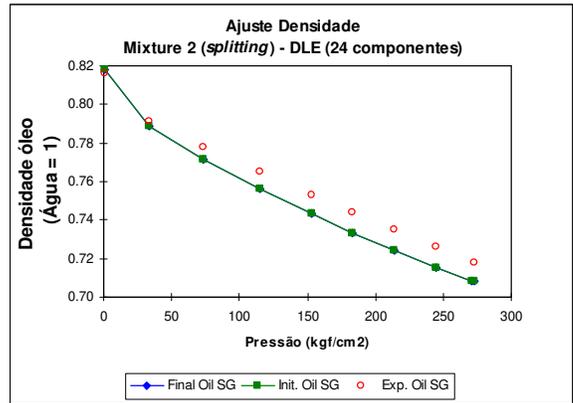


Figura II.17 - Ajuste *splitting* da densidade para 24 componentes, DLE Óleo B.

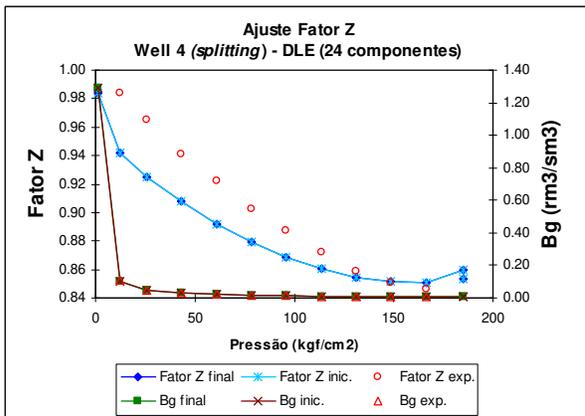


Figura II.15 - Ajuste *splitting* do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Óleo A.

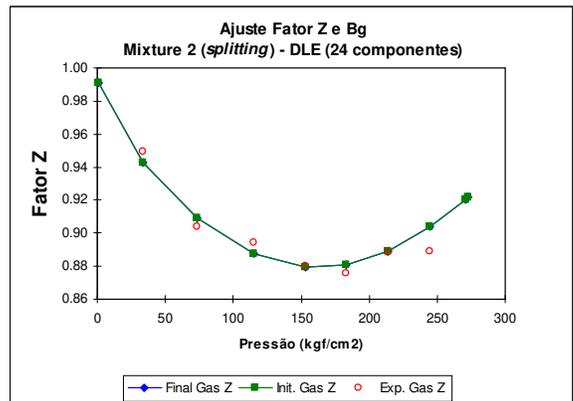


Figura II.18 - Ajuste *splitting* do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Óleo B.

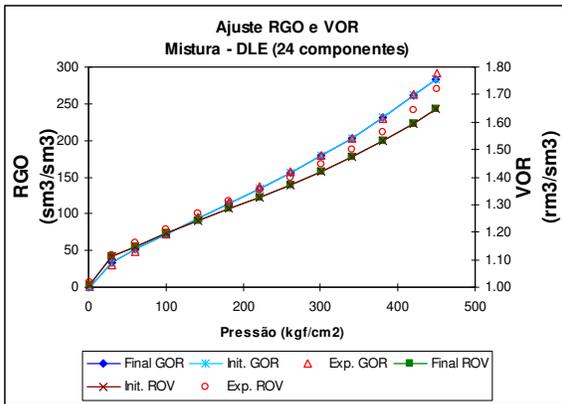


Figura II.19 - Ajuste experimental da RGO e do VOR para 24 componentes, DLE Mistura.

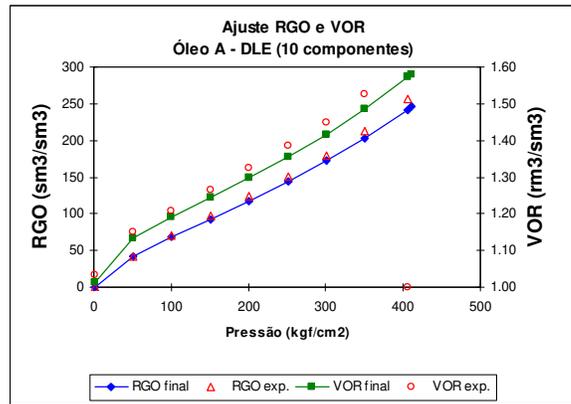


Figura II.22 - Ajuste da RGO e VOR para 10 componentes, DLE Óleo A.

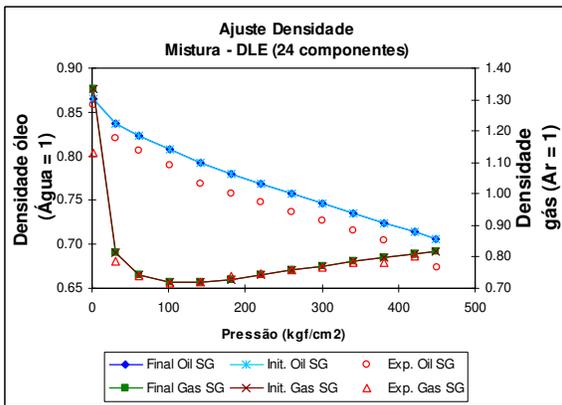


Figura II.20 - Ajuste experimental da densidade para 24 componentes, DLE Mistura.

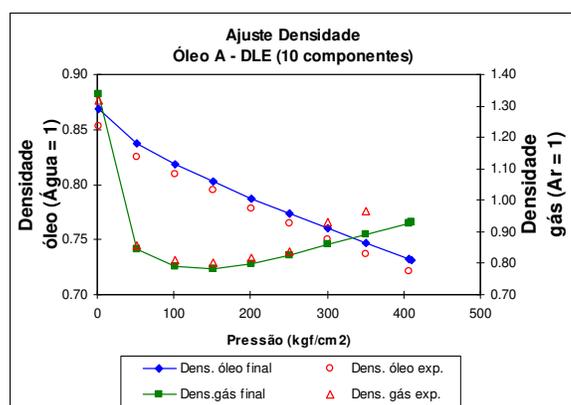


Figura II.23 - Ajuste da densidade para 10 componentes, DLE Óleo A.

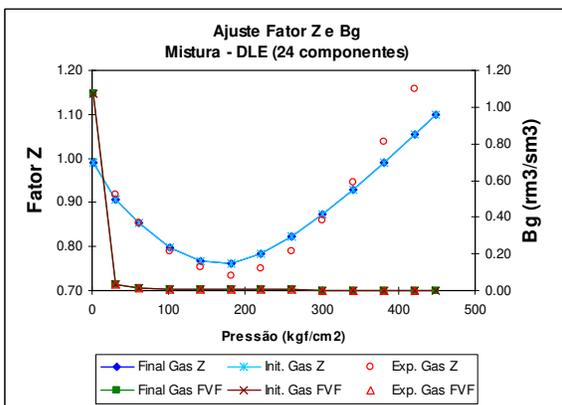


Figura II.21 - Ajuste experimental do fator Z e do Bg para 24 componentes, DLE Mistura.

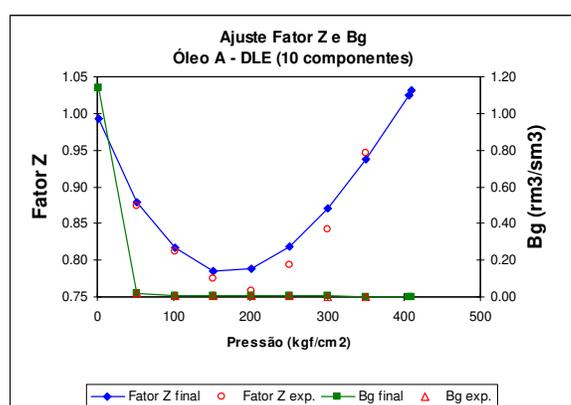


Figura II.24 - Ajuste do fator Z e Bg para 10 componentes, DLE Óleo A.

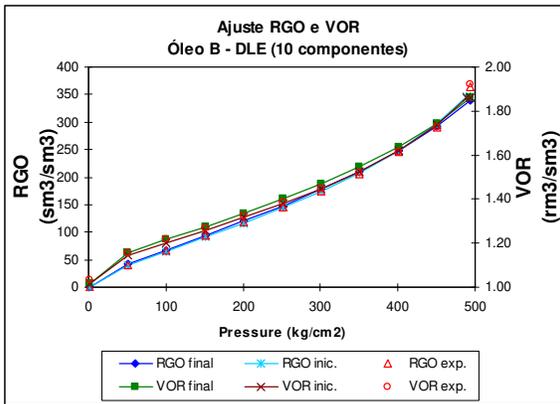


Figura II.25 - Ajuste da RGO e VOR para 10 componentes, DLE Óleo B.

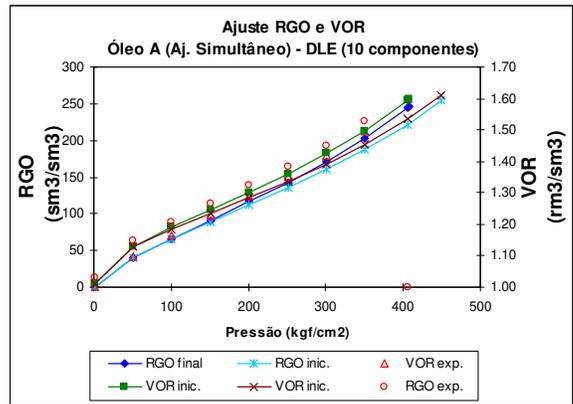


Figura II.28 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Óleo A.

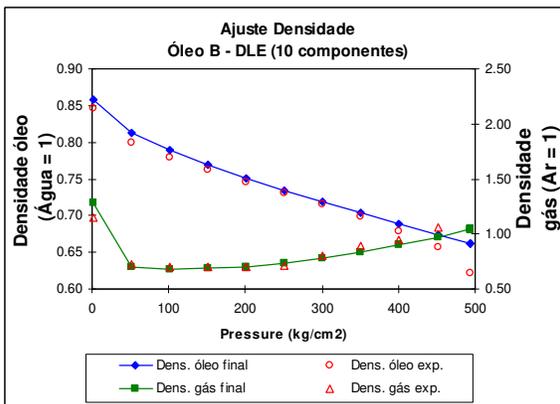


Figura II.26 - Ajuste da densidade para 10 componentes, DLE Óleo B.

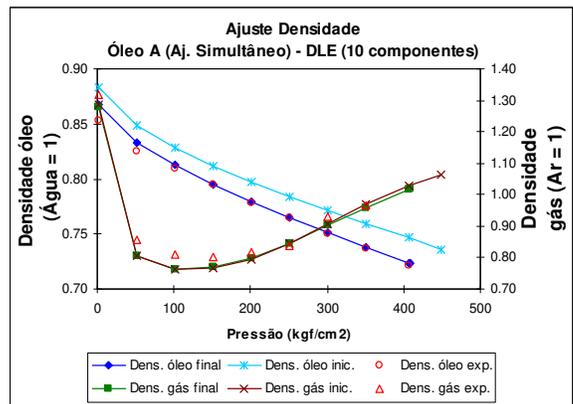


Figura II.29 - Ajuste simultâneo da densidade para 10 componentes, DLE Óleo A.

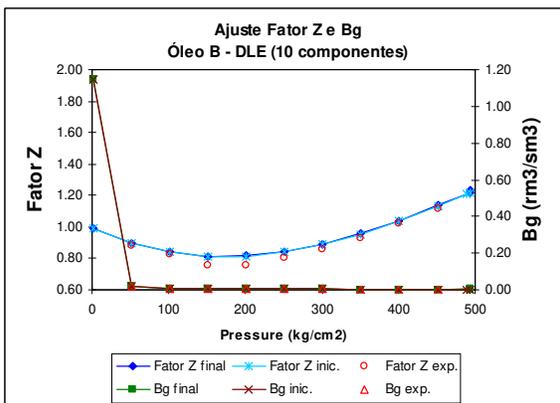


Figura II.27 - Ajuste do fator Z e Bg para 10 componentes, DLE Óleo B.

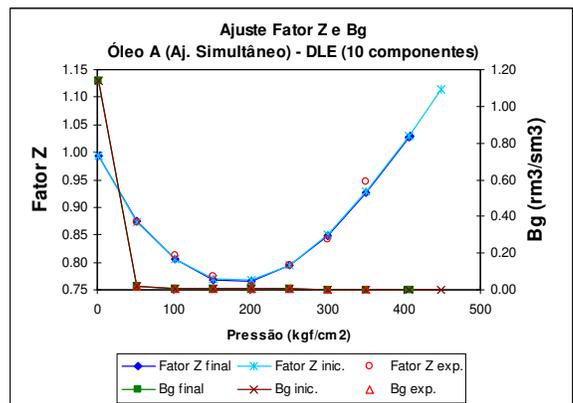


Figura II.30 - Ajuste simultâneo do fator Z para 10 componentes, DLE Óleo A.

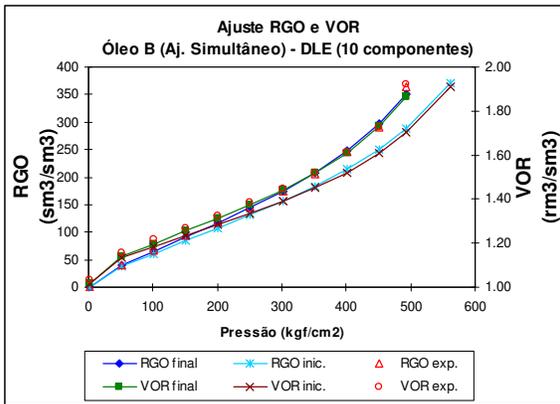


Figura II.31 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Óleo B.

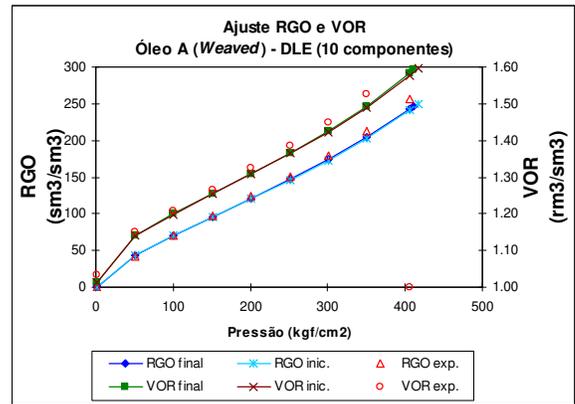


Figura II.34 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Óleo A.

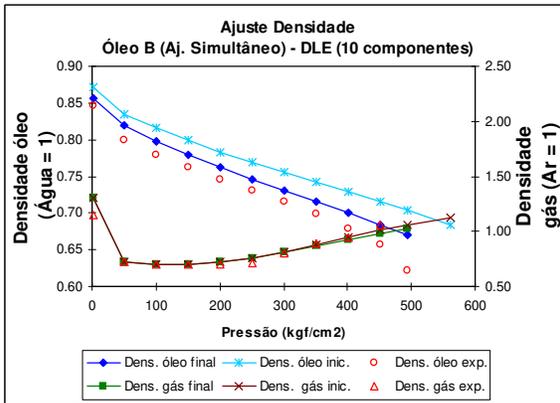


Figura II.32 - Ajuste simultâneo da densidade para 10 componentes, DLE Óleo B.

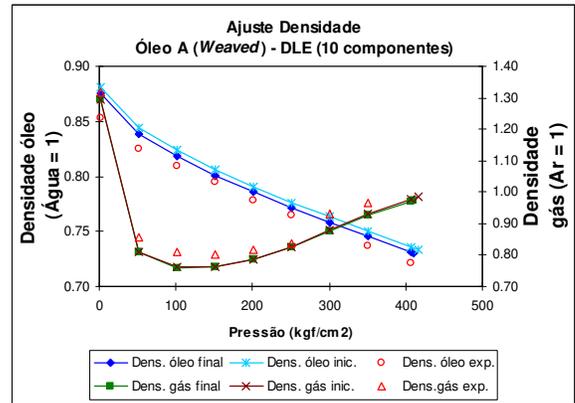


Figura II.35 - Ajuste *weaved* da densidade para 10 componentes, DLE Óleo A.

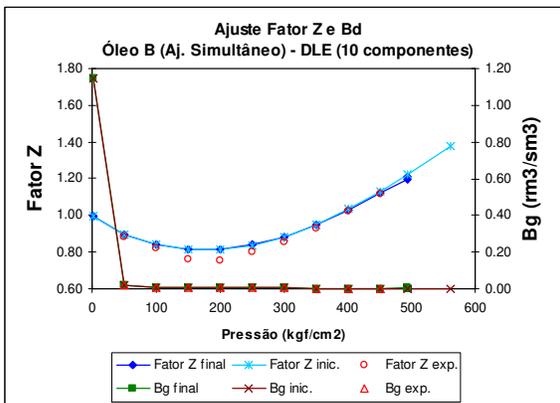


Figura II.33 - Ajuste simultâneo do fator Z e do Bg para 10 componentes, DLE Óleo B.

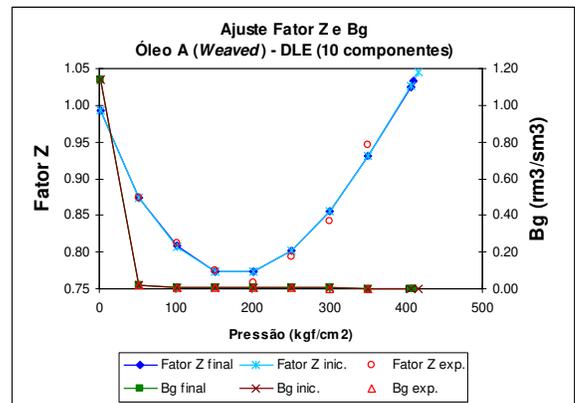


Figura II.36 - Ajuste *weaved* fator Z para 10 componentes, DLE Óleo A.

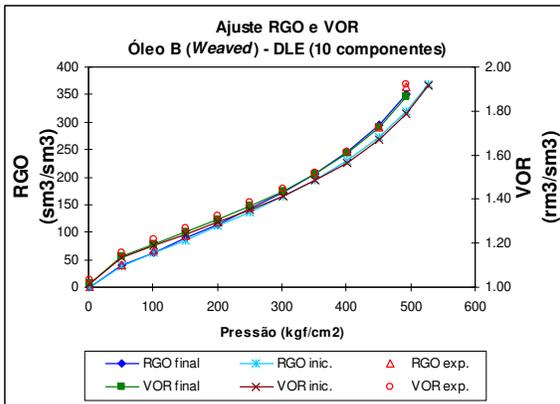


Figura II.37 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Óleo B.

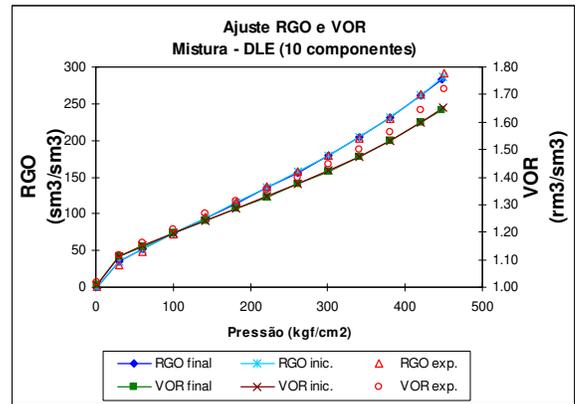


Figura II.40 - Ajuste experimental da RGO e do VOR para 10 componentes, DLE Mistura.

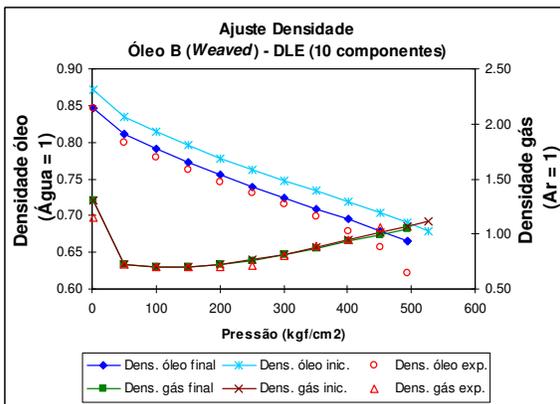


Figura II.38 - Ajuste *weaved* da densidade para 10 componentes, DLE Óleo B.

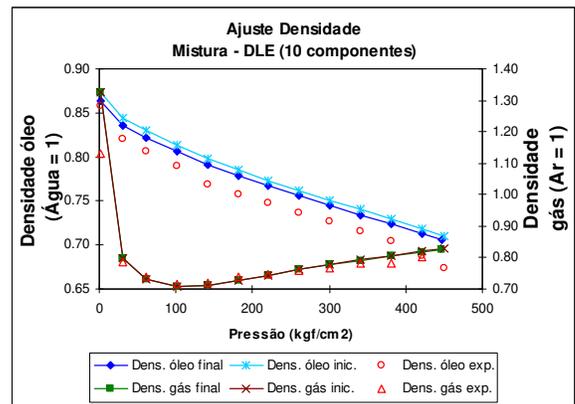


Figura II.41 - Ajuste experimental da densidade para 10 componentes, DLE Mistura.

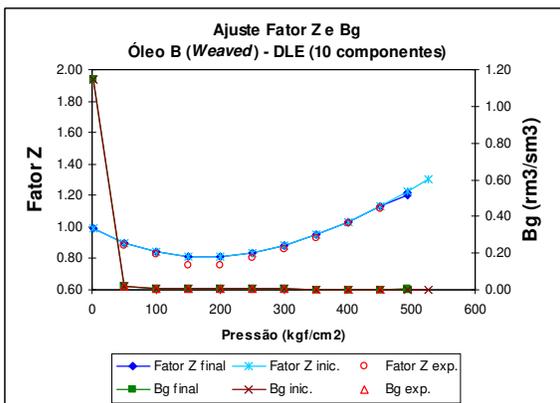


Figura II.39 - Ajuste *weaved* fator Z para 10 componentes, DLE Óleo B.

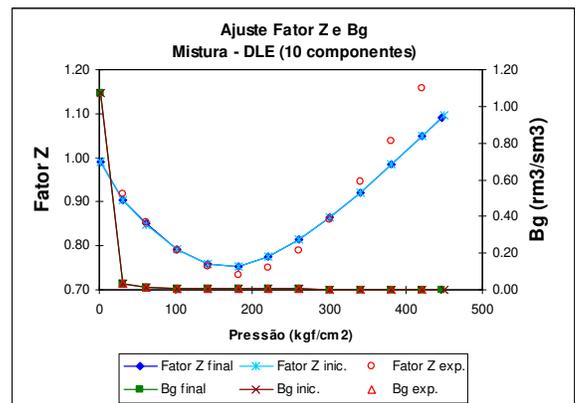


Figura II.42 - Ajuste experimental do fator Z e do Bg para 10 componentes, DLE Mistura.

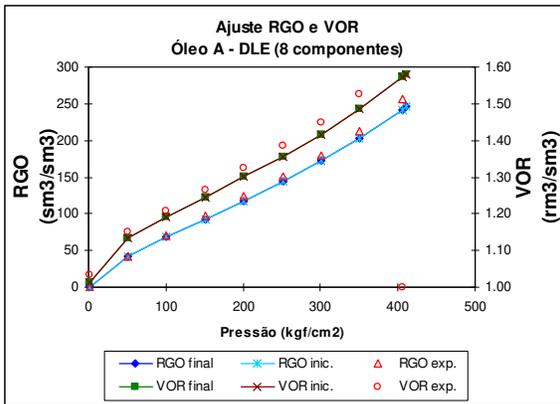


Figura II.43 - Ajuste da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo A.

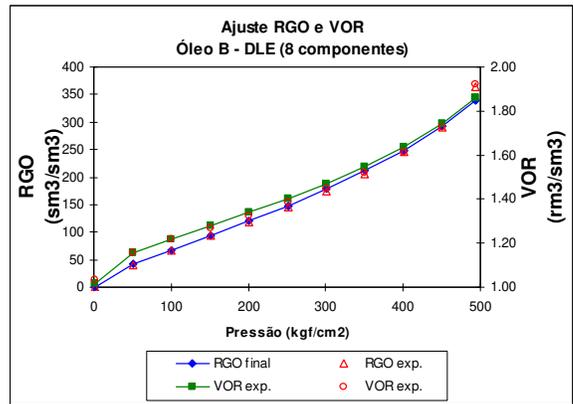


Figura II.46 - Ajuste da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo B.

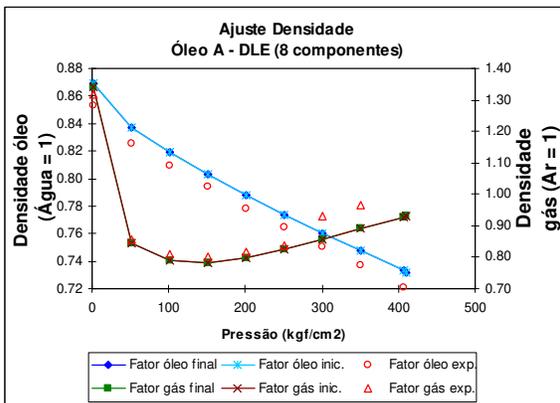


Figura II.44 - Ajuste da densidade para 8 componentes, DLE Óleo A.

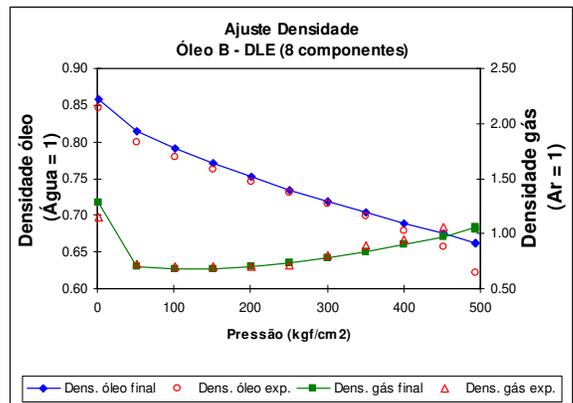


Figura II.47 - Ajuste da densidade para 8 componentes, DLE Óleo B.

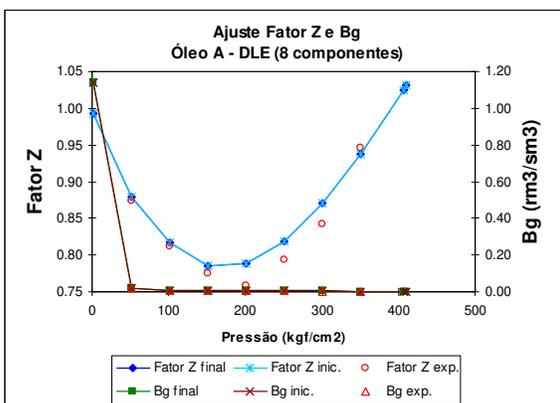


Figura II.45 - Ajuste do Fator Z e Bg para 8 componentes, DLE Óleo A.

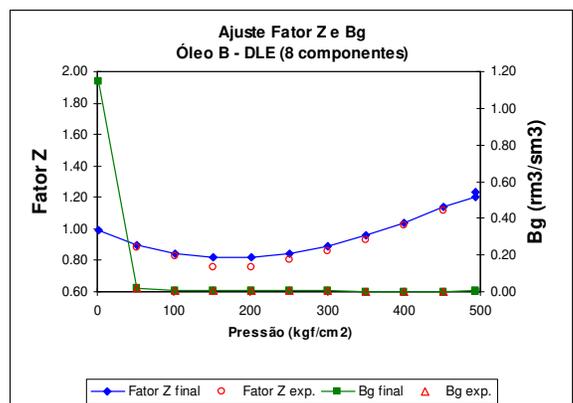


Figura II.48 - Ajuste do Fator Z e Bg para 8 componentes, DLE Óleo B.

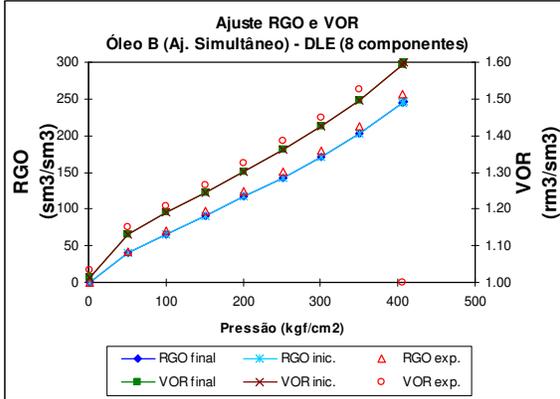


Figura II.49 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo A.

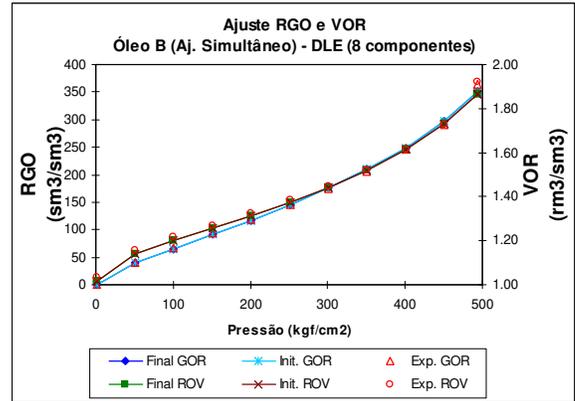


Figura II.52 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo B.

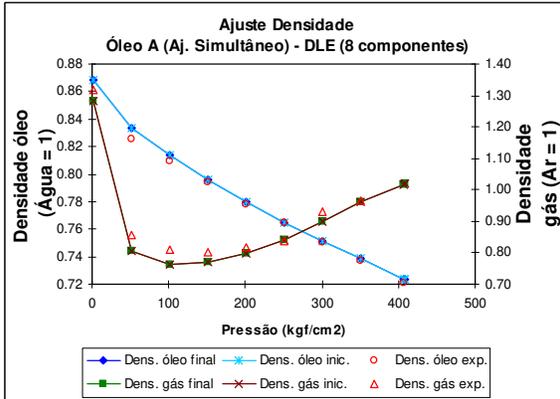


Figura II.50 - Ajuste simultâneo da densidade para 8 componentes, DLE Óleo A.

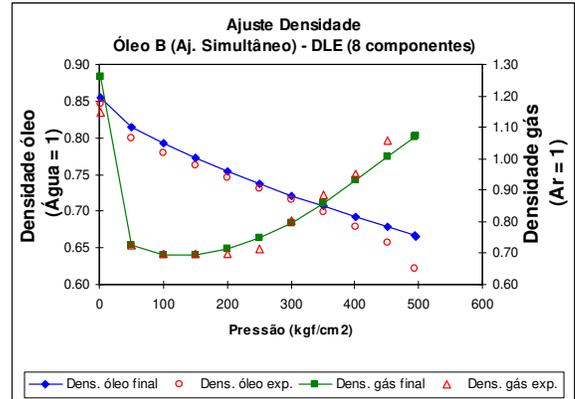


Figura II.53 - Ajuste simultâneo da densidade para 8 componentes, DLE Óleo B.

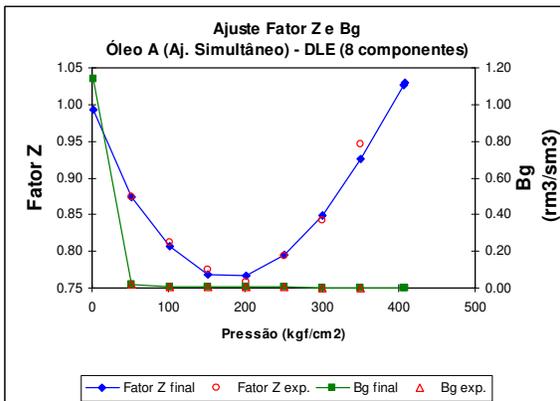


Figura II.51 - Ajuste simultâneo do fator Z para 8 componentes, DLE Óleo A.

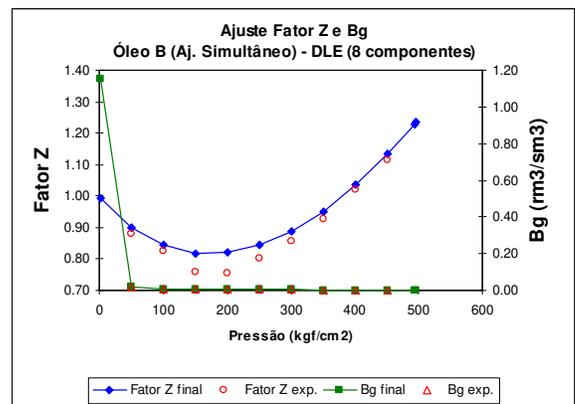


Figura II.54 - Ajuste simultâneo do fator Z e do Bg para 8 componentes, DLE Óleo B.

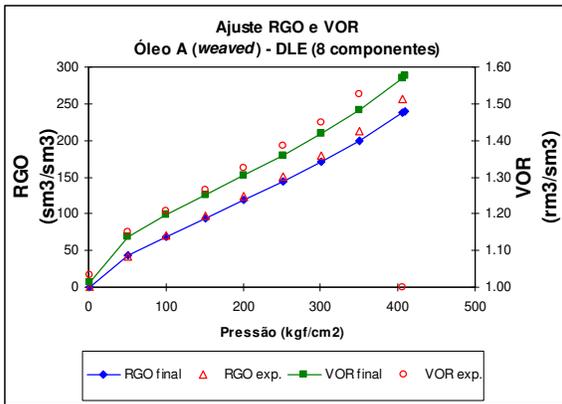


Figura II.55 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo A.

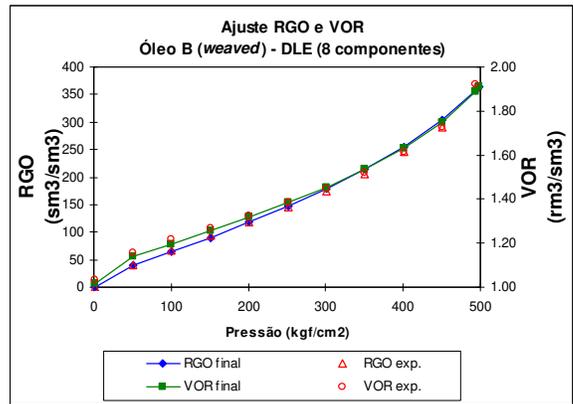


Figura II.58 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Óleo B.

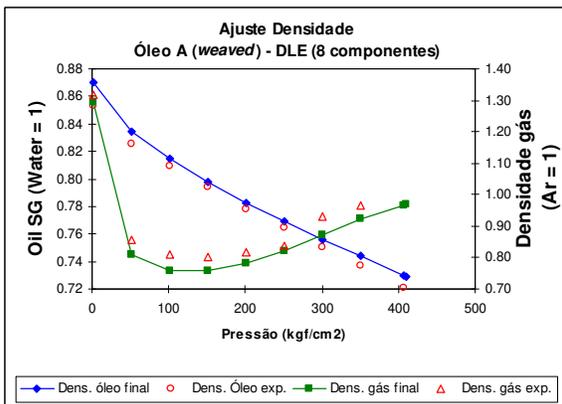


Figura II.56 - Ajuste *weaved* da densidade para 8 componentes, DLE Óleo A.

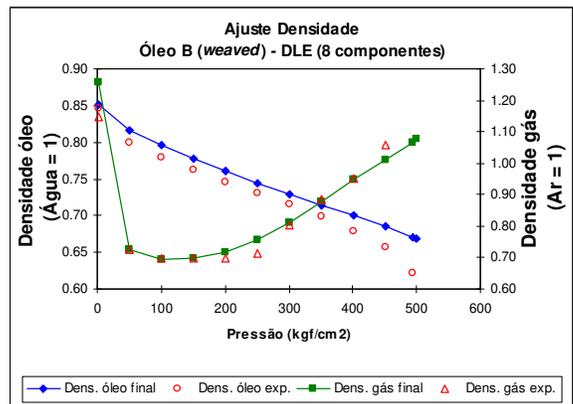


Figura II.59 - Ajuste *weaved* da densidade para 8 componentes, DLE Óleo B.

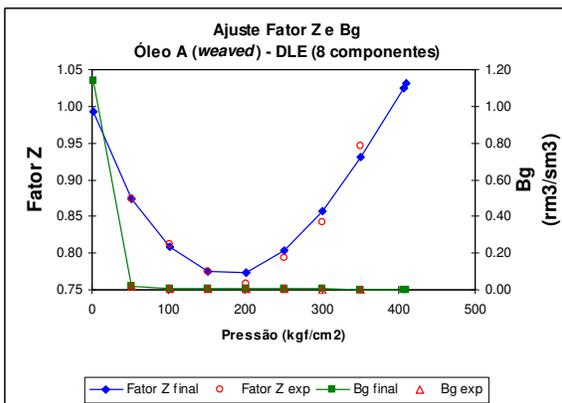


Figura II.57 - Ajuste *weaved* fator Z para 8 componentes, DLE Óleo A.

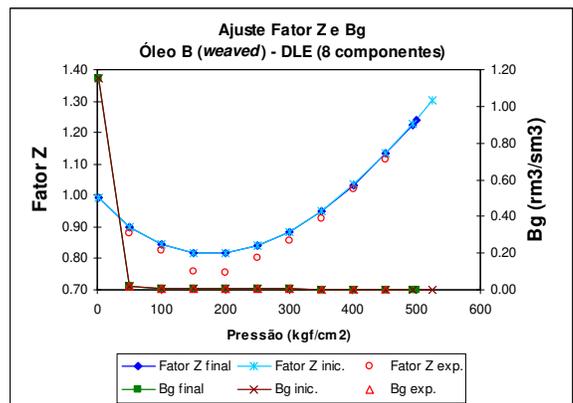


Figura II.60 - Ajuste *weaved* fator Z para 8 componentes, DLE Óleo B.

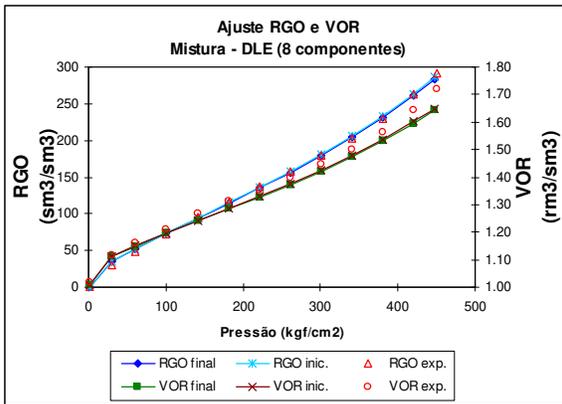


Figura II.61 - Ajuste experimental da RGO e do VOR para 8 componentes, DLE Mistura.

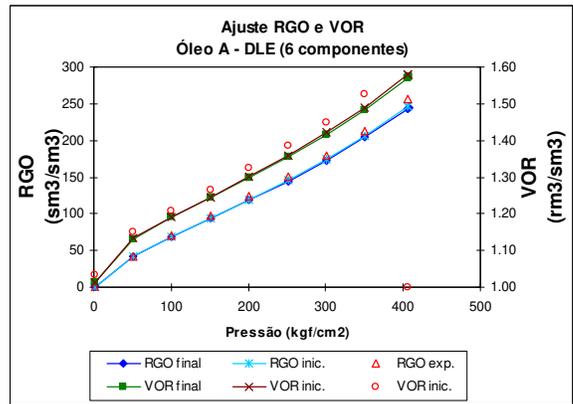


Figura II.64 - Ajuste da RGO e VOR para 6 componentes, DLE Óleo A.

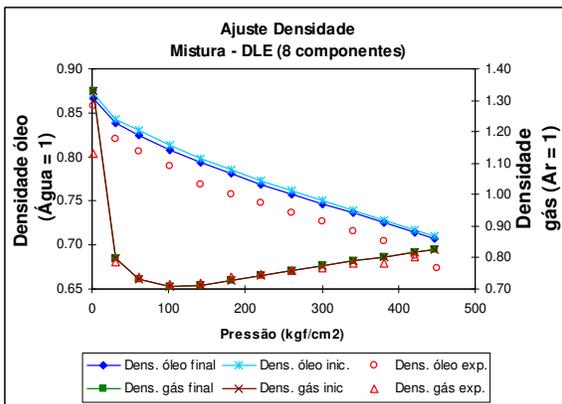


Figura II.62 - Ajuste experimental da densidade para 8 componentes, DLE Mistura.

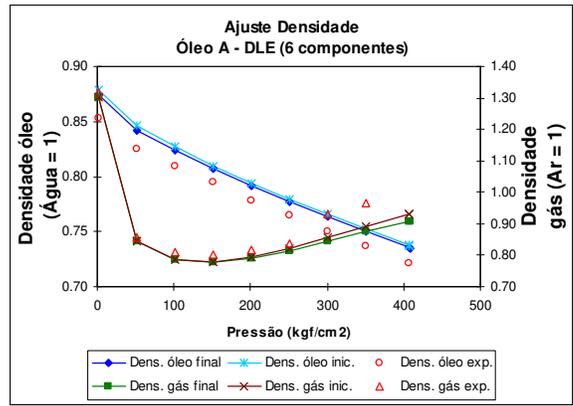


Figura II.65 - Ajuste da densidade para 6 componentes, DLE Óleo A.

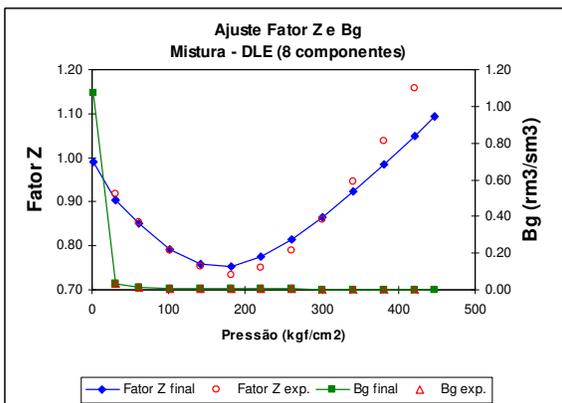


Figura II.63 - Ajuste experimental do fator Z e do Bg para 8 componentes, DLE Mistura.

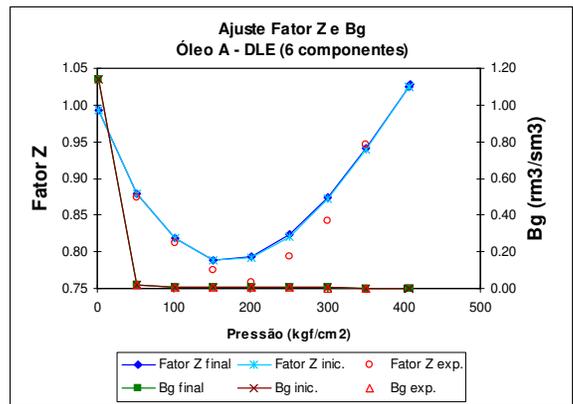


Figura II.66 - Ajuste do fator Z e Bg para 6 componentes, DLE Óleo A.

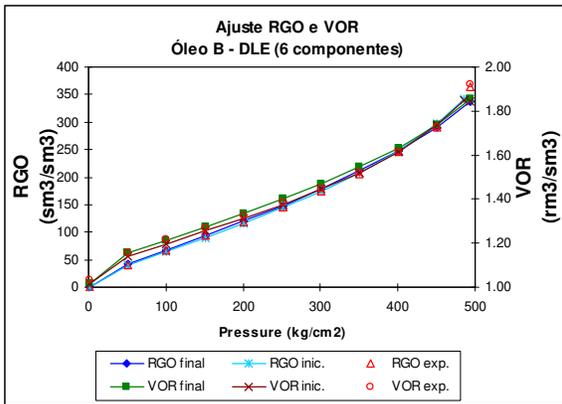


Figura II.67 - Ajuste da RGO e VOR para 6 componentes, DLE Óleo B.

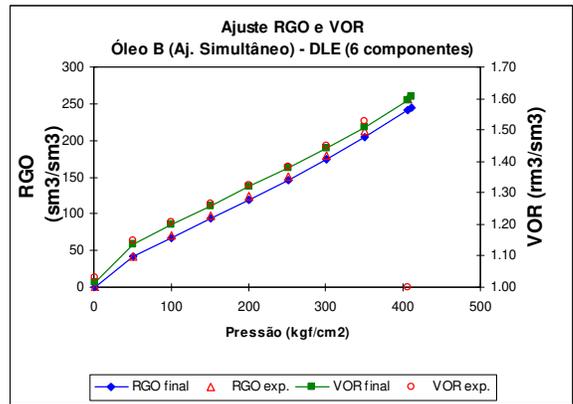


Figura II.70 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Óleo A.

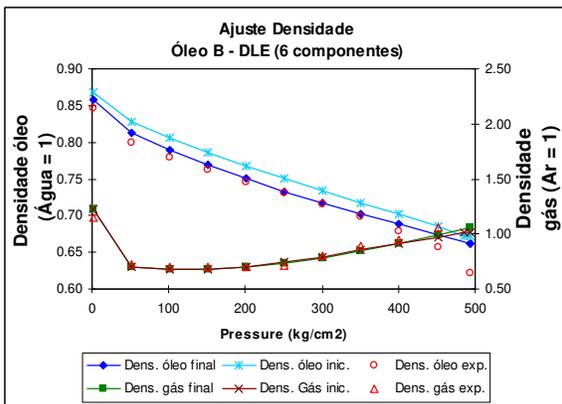


Figura II.68 - Ajuste da densidade para 6 componentes, DLE Óleo B.

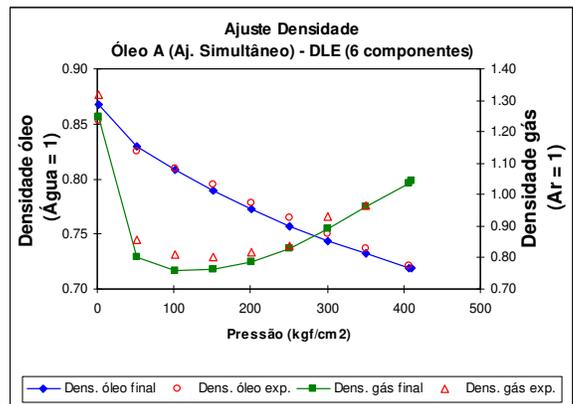


Figura II.71 - Ajuste simultâneo da densidade para 6 componentes, DLE Óleo A.

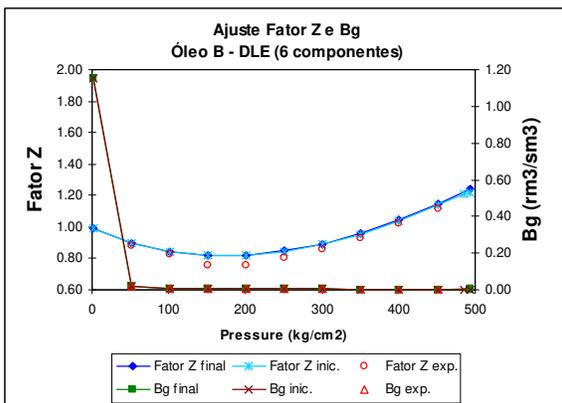


Figura II.69 - Ajuste do fator Z e Bg para 6 componentes, DLE Óleo B.

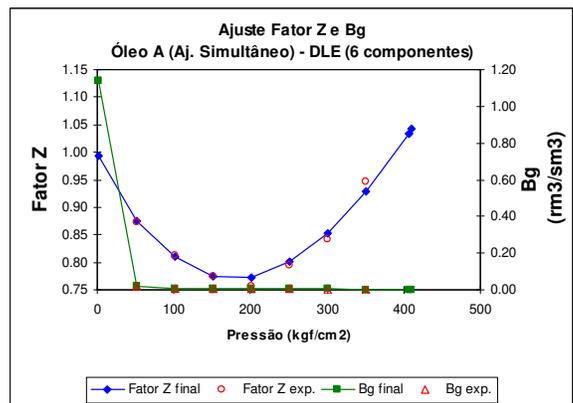


Figura II.72 - Ajuste simultâneo do fator Z para 6 componentes, DLE Óleo A.

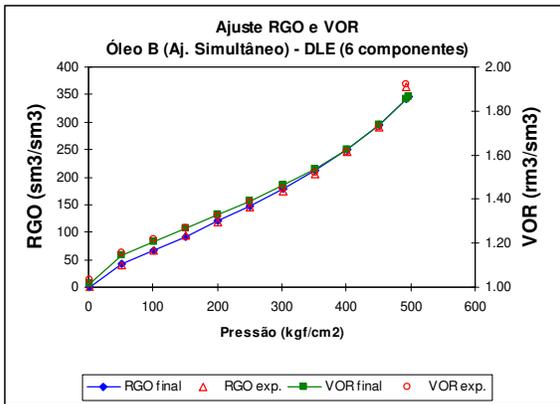


Figura II.73 - Ajuste simultâneo da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Óleo B.

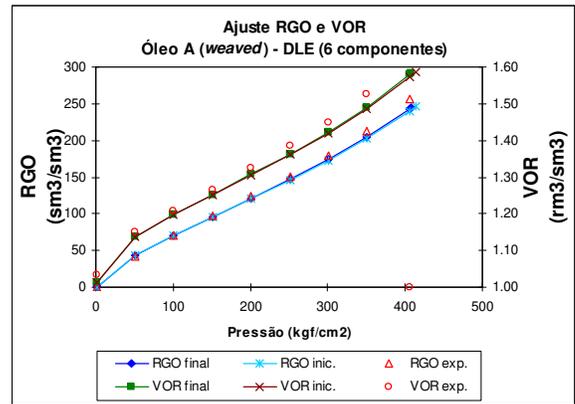


Figura II.76 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Óleo A.

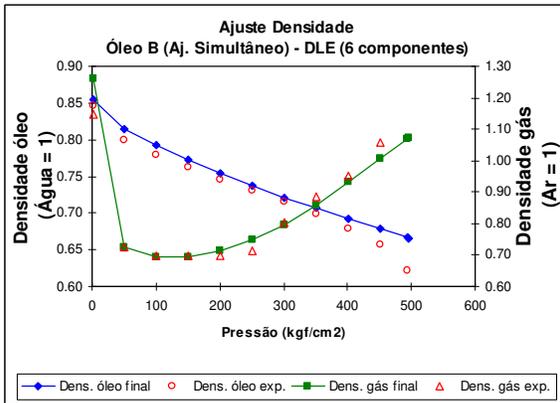


Figura II.74 - Ajuste simultâneo da densidade para 6 componentes, DLE Óleo B.

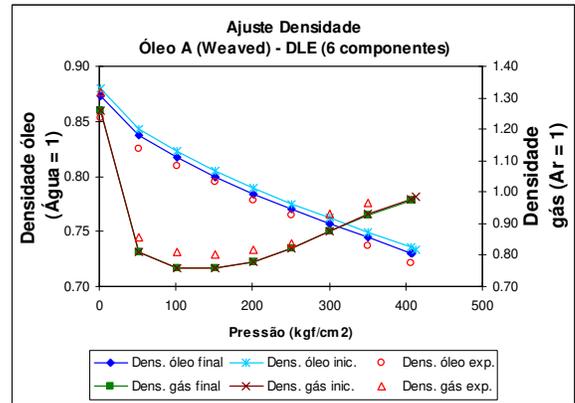


Figura II.77 - Ajuste *weaved* da densidade para 6 componentes, DLE Óleo A.

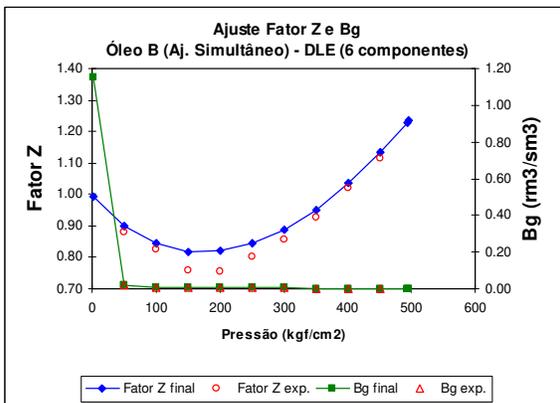


Figura II.75 - Ajuste simultâneo do fator Z e do Bg para 6 componentes, DLE Óleo B.

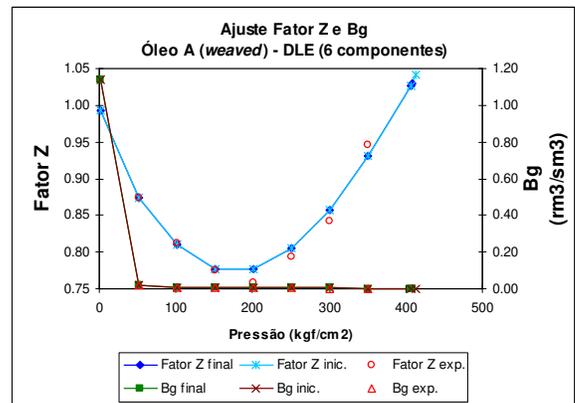


Figura II.78 - Ajuste *weaved* fator Z para 6 componentes, DLE Óleo A.

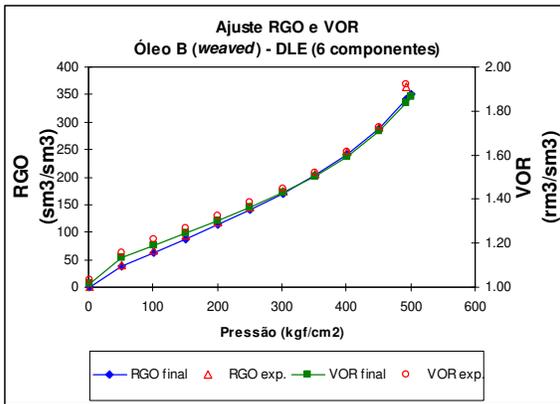


Figura II.79 - Ajuste *weaved* da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Óleo B.

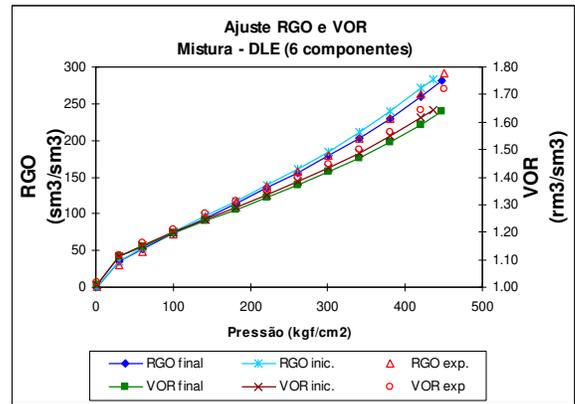


Figura II.82 - Ajuste experimental da RGO e do VOR para 6 componentes, DLE Mistura.

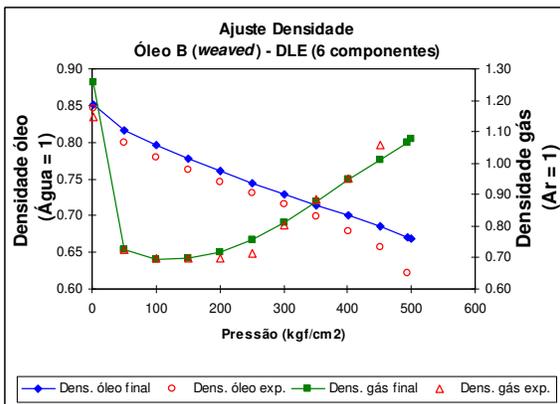


Figura II.80 - Ajuste *weaved* da densidade para 6 componentes, DLE Óleo B.

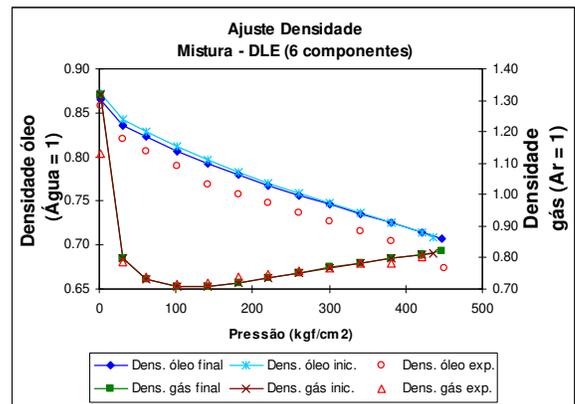


Figura II.83 - Ajuste experimental da densidade para 6 componentes, DLE Mistura.

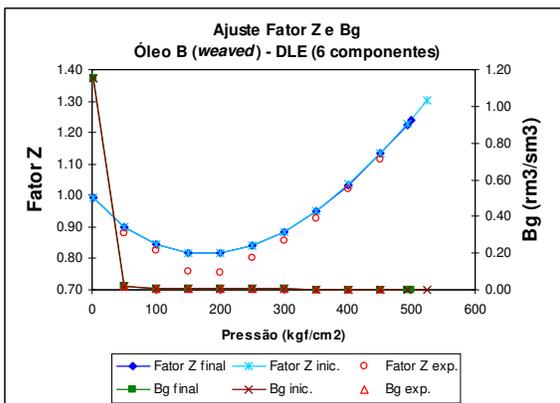


Figura II.81 - Ajuste *weaved* fator Z para 6 componentes, DLE Óleo B.

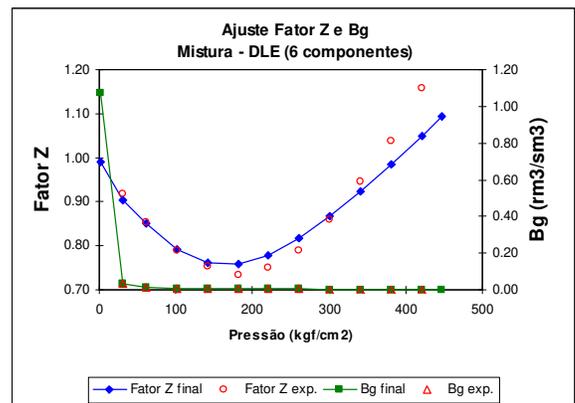


Figura II.84 - Ajuste experimental do fator Z e do Bg para 6 componentes, DLE Mistura.

II. Terceira Mistura

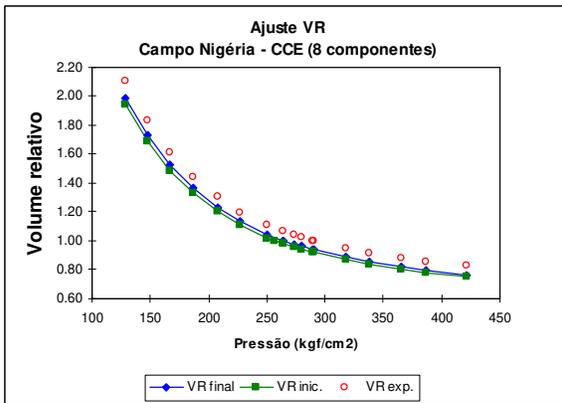


Figura III.1 - Ajuste da VR para 8 componentes, CCE Campo Nigéria.

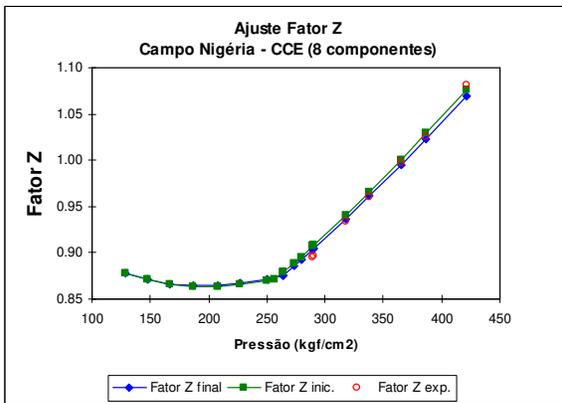


Figura III.2 - Ajuste do fator Z para 8 componentes, CCE Campo Nigéria.

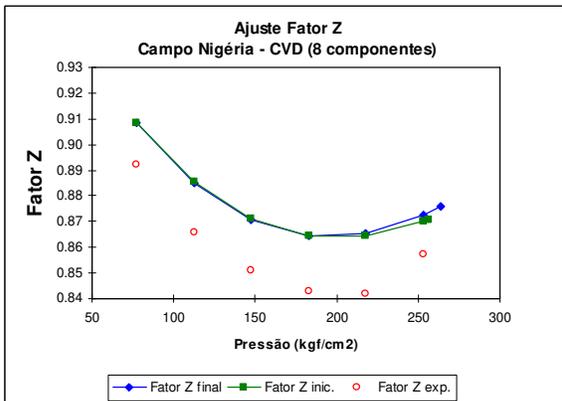


Figura III.3 - Ajuste do fator Z para 8 componentes, CVD Campo Nigéria.

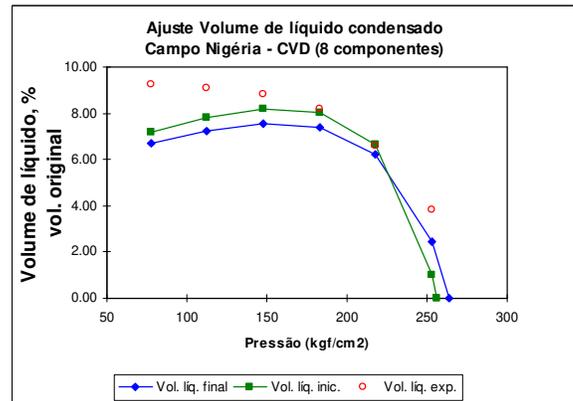


Figura III.4 - Ajuste do volume de líquido condensado para 8 componentes, CVD Campo Nigéria.

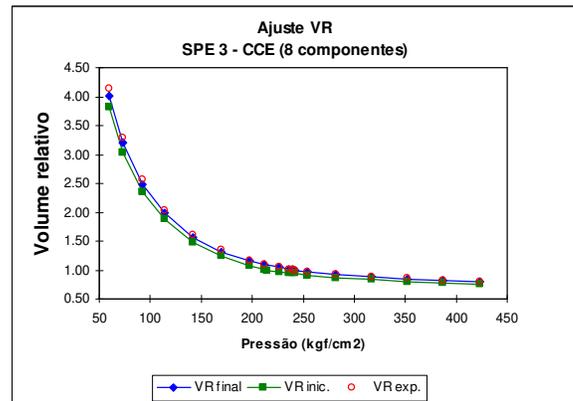


Figura III.5 - Ajuste do VR para 8 componentes, CCE SPE 3.

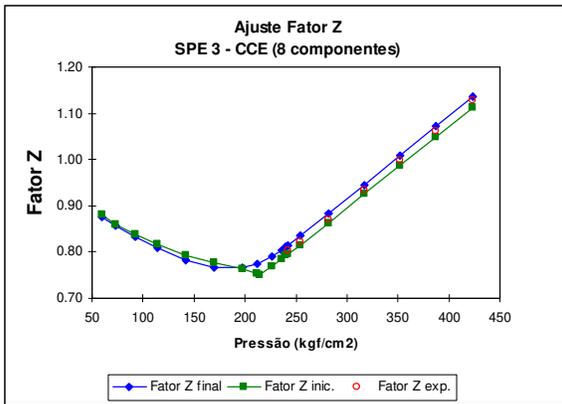


Figura III.6 - Ajuste do fator Z para 8 componentes, CCE SPE 3.

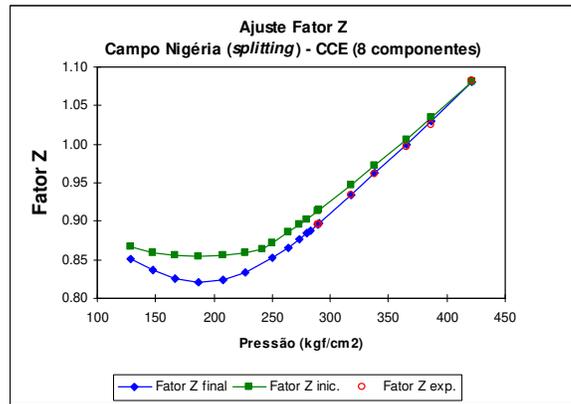


Figura III.9 - Ajuste *splitting* do fator Z para 8 componentes, CCE Campo Nigéria.

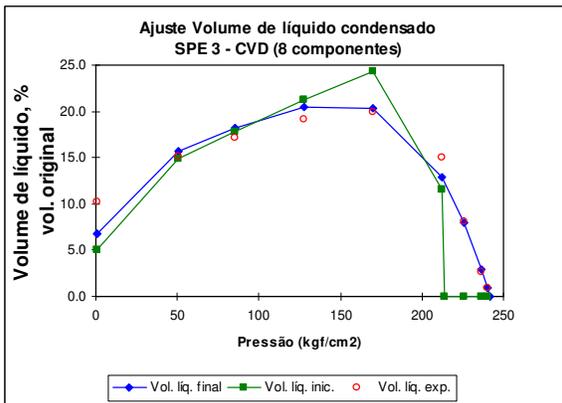


Figura III.7 - Ajuste do volume de líquido condensado para 8 componentes, CVD SPE 3.

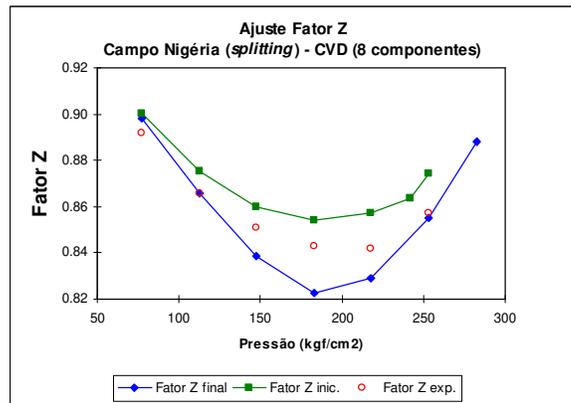


Figura III.10 - Ajuste *splitting* do fator Z para 8 componentes, CVD Campo Nigéria.

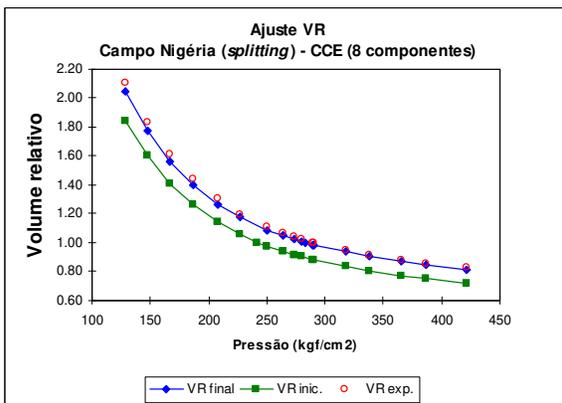


Figura III.8 - Ajuste *splitting* do VR para 8 componentes, CCE Campo Nigéria.

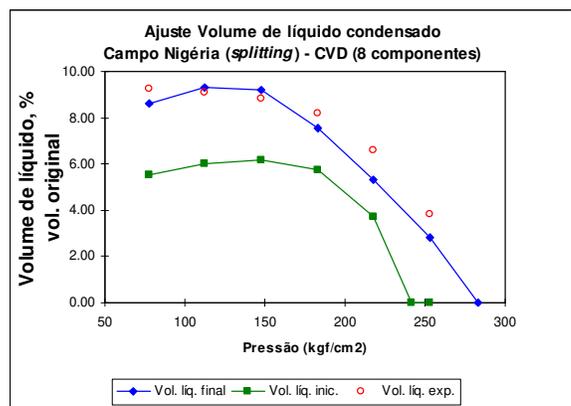


Figura III.11 - Ajuste *splitting* do volume de líquido condensado para 8 componentes, CVD Campo Nigéria.

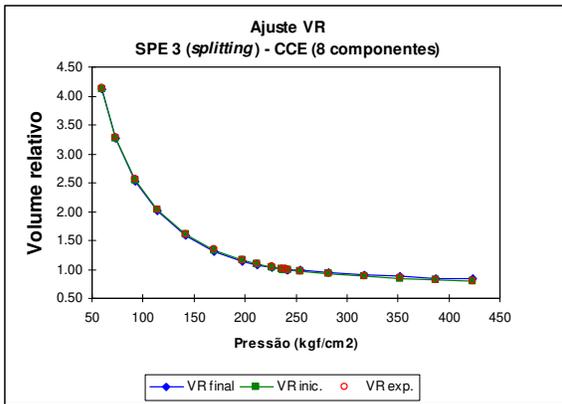


Figura III.12 - Ajuste *splitting* do VR para 8 componentes, CCE SPE 3.

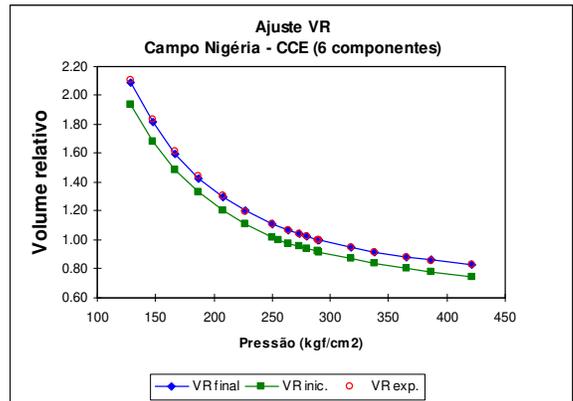


Figura III.15 - Ajuste da VR para 6 componentes, CCE Campo Nigéria.

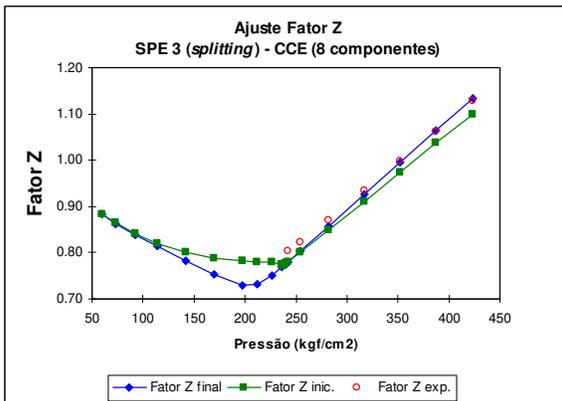


Figura III.13 - Ajuste *splitting* do fator Z para 8 componentes, CCE SPE 3.

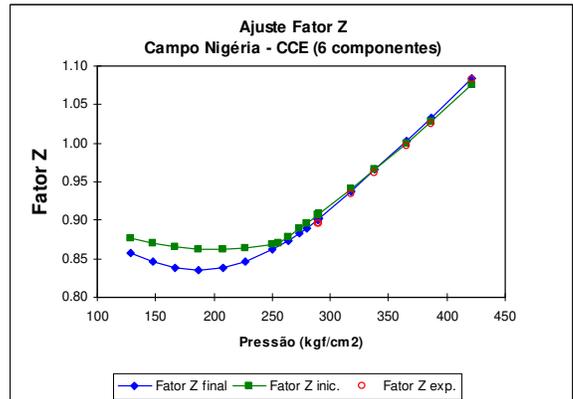


Figura III.16 - Ajuste do fator Z para 6 componentes, CCE Campo Nigéria.

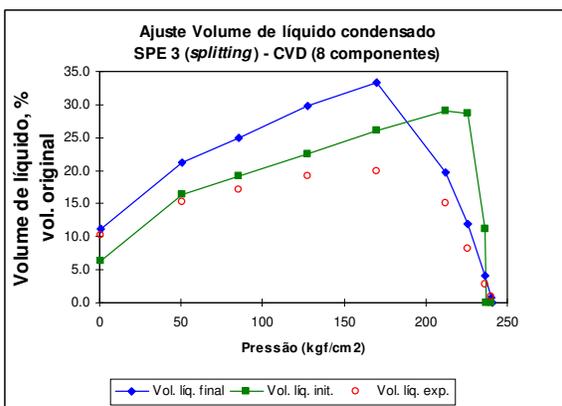


Figura III.14 - Ajuste *splitting* do volume de líquido condensado para 8 componentes, CVD SPE 3.

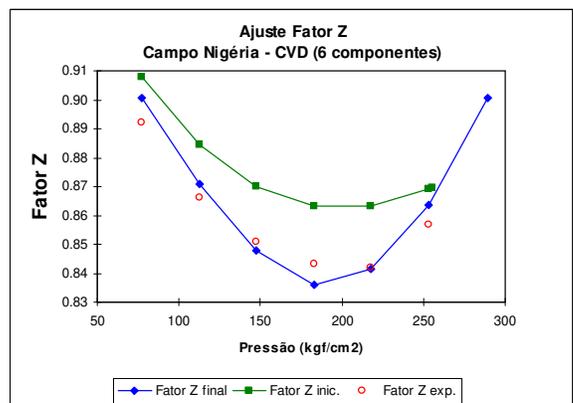


Figura III.17 - Ajuste do fator Z para 6 componentes, CVD Campo Nigéria.

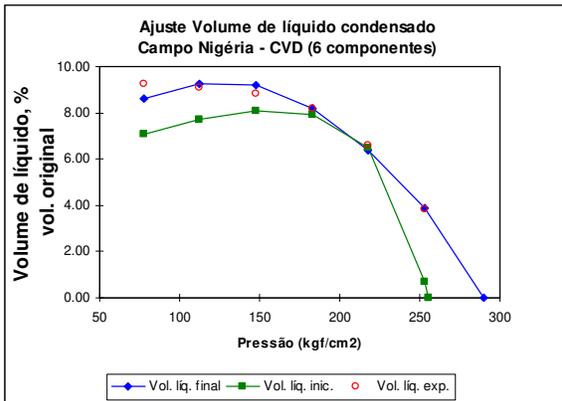


Figura III.18 - Ajuste do volume de líquido condensado para 6 componentes, CVD Campo Nigéria.

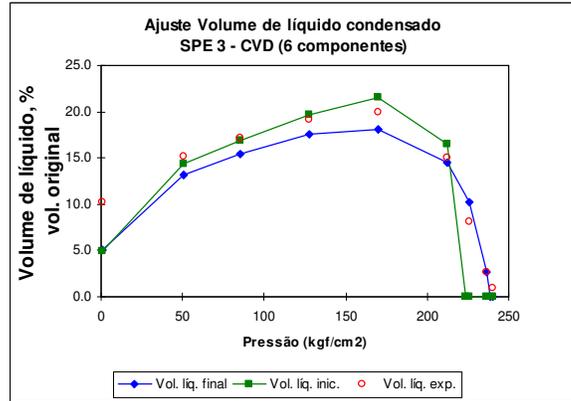


Figura III.21 - Ajuste do volume de líquido condensado para 6 componentes, CVD SPE 3.

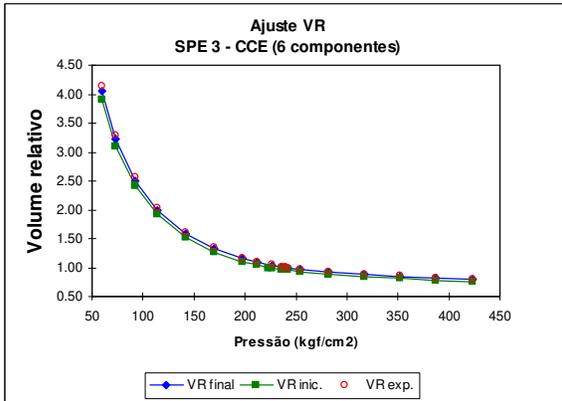


Figura III.19 - Ajuste do VR para 6 componentes, CCE SPE 3.

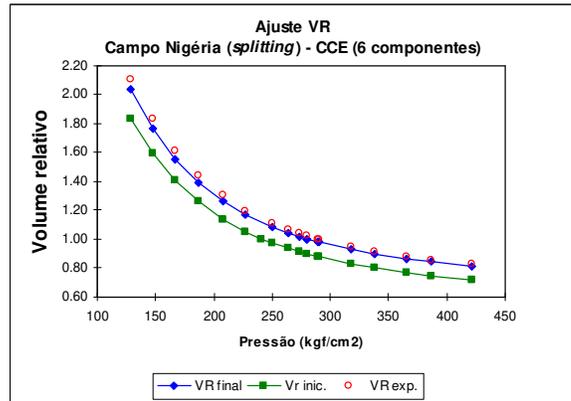


Figura III.22 - Ajuste *splitting* do VR para 6 componentes, CCE Campo Nigéria.

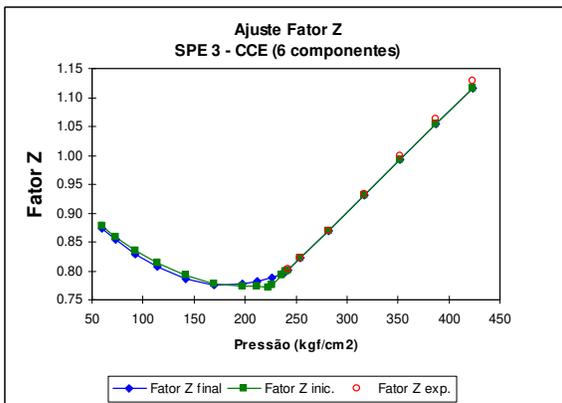


Figura III.20 - Ajuste do fator Z para 6 componentes, CCE SPE 3.

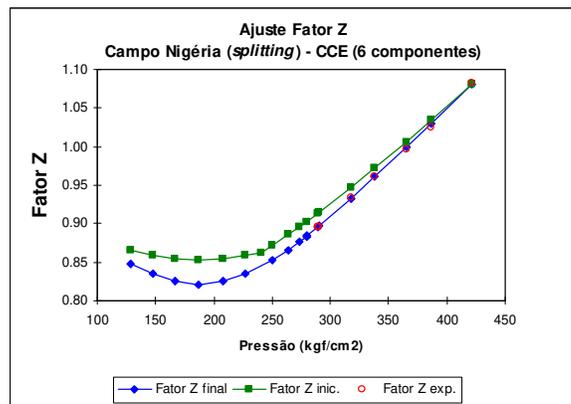


Figura III.23 - Ajuste *splitting* do fator Z para 6 componentes, CCE Campo Nigéria.

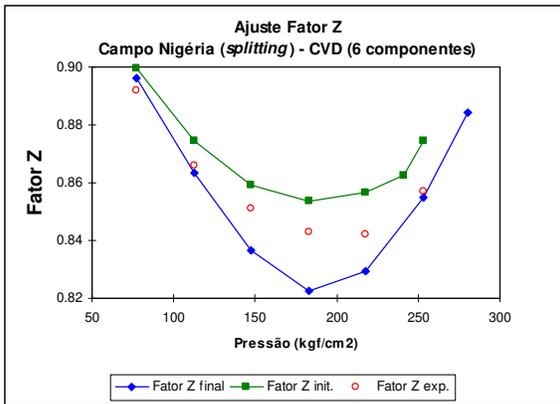


Figura III.24 - Ajuste *splitting* do fator Z para 6 componentes, CVD Campo Nigéria.

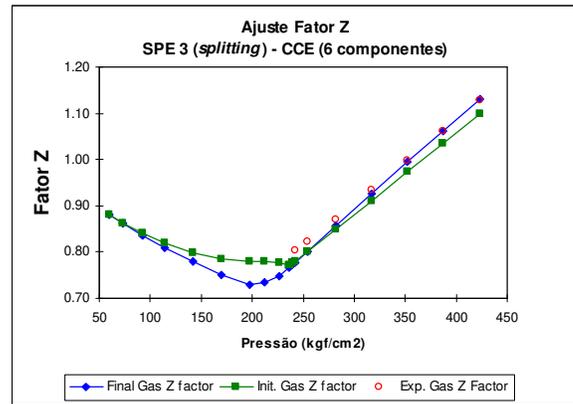


Figura III.27 - Ajuste *splitting* do fator Z para 6 componentes, CCE SPE 3.

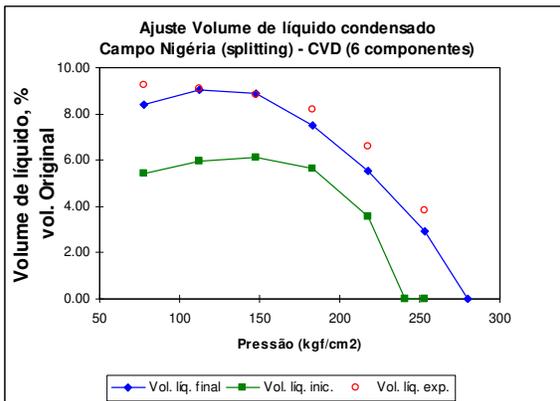


Figura III.25 - Ajuste *splitting* do volume de líquido condensado para 6 componentes, CVD Campo Nigéria.

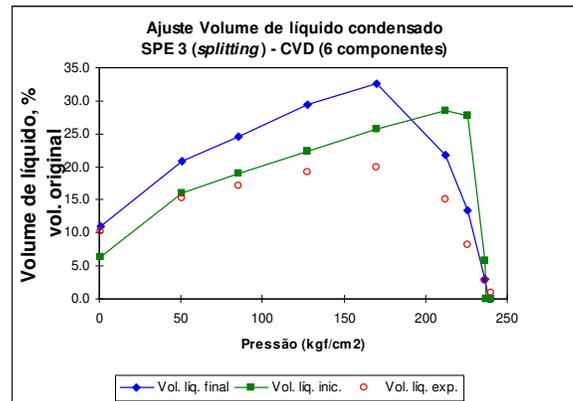


Figura III.28 - Ajuste *splitting* do volume de líquido condensado para 6 componentes, CVD SPE 3.

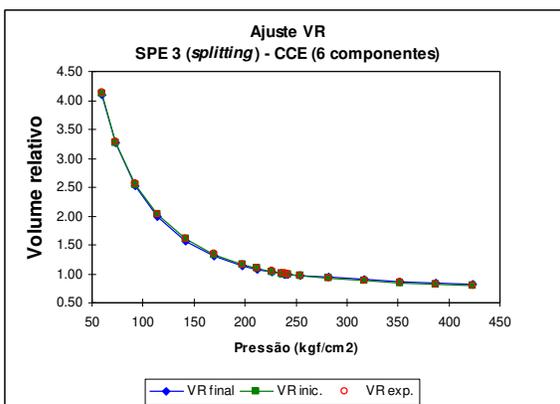


Figura III.26 - Ajuste *splitting* do VR para 6 componentes, CCE SPE 3.