

MELHORIA DA CORRELAÇÃO DE BRILL E BEGGS (1974) PARA O CÁLCULO DO FATOR DE COMPRESSIBILIDADE DE GÁS NATURAL COM ALTO TEOR DE CO₂

Nathan Aduino Jales Pinheiro¹

Orientador do Trabalho: Frederico Ribeiro do Carmo²

RESUMO

O fator de compressibilidade é uma das propriedades mais requisitadas em cálculos de engenharia envolvendo gás natural, pois está diretamente relacionada com o volume ocupado pelo gás em uma dada condição de temperatura e pressão. Devido a obtenção experimental dessa propriedade ser geralmente demorada e onerosa, é comum a utilização de correlações empíricas para sua estimativa em projetos de reservatórios. De modo a ter um modelo mais acurado para gases contendo altos teores de dióxido de carbono (bastante comuns nos reservatórios do pré-sal), neste trabalho, foram propostos novos parâmetros para a correlação de Brill e Beggs, uma das mais utilizadas por engenheiros de petróleo. Para este objetivo, utilizaram-se 62 dados experimentais para a otimização do modelo e 230 para o seu teste. **A média dos desvios relativos absolutos obtida foi igual a 0,732%.**

Palavras-chave: Fator de compressibilidade; Correlações empíricas; Gás natural; Otimização.

INTRODUÇÃO

Com os avanços da tecnologia na área petrolífera, a obtenção de propriedades termodinâmicas acuradas torna-se uma etapa importante de projetos de exploração e produção. O fator de compressibilidade (Z) é a propriedade que quantifica o desvio de um gás real do comportamento idealizado, sendo bastante empregado em cálculos de projeto de produção de reservatórios de gás. Além do fator de compressibilidade, outras propriedades requeridas em projetos de óleo e gás são: densidade, compressibilidade, viscosidade e fator volume de formação. (ELSHARKAWY; ELKAMEL, 2000; MAMEDOV; SOMUNCU; ASKEROV, 2017; ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006)

A obtenção do fator de compressibilidade pode ser realizada de três formas, a saber: via análise laboratorial, a qual tende a ser muito cara e demorada, o que torna o processo economicamente inviável na maioria dos casos; via equações de estado; e via correlações. (MAMEDOV; SOMUNCU; ASKEROV, 2017; ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006).

¹ Graduando do Curso de Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, nathanjales@outlook.com;

² Professor orientador: Prof. Dr. Frederico Ribeiro do Carmo, Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, frederico.ribeiro.c@ufersa.edu.br.

Dentre esses métodos, o que apresenta melhor custo-benefício é o uso de correlações, visto que tendem ter melhor acurácia que as equações de estado, no entanto, a qualidade das correlações está intimamente ligada aos dados experimentais utilizados durante a estimativa de seus parâmetros.

Devido à facilidade da criação de novas correlações para as mais diversas necessidades na área de petróleo, diversos modelos para obtenção do fator de compressibilidade foram criados, alguns exemplos são: Brill e Beggs (BeB) (BRILL; BEGGS, 1974), Dranchuk e Abou-Kassem (DRANCHUK; ABOU-KASSEM, 1975), Hall e Yarborough (HALL; YARBOROUGH, 1973), entre outras (ADEL; LEENA, 2020; BIAN et al., 2012; HEIDARYAN; SALARABADI; MOGHADASI, 2010; MAHMOUD, 2014). Muitas dessas equações fazem uso de principalmente duas propriedades termodinâmicas: as temperaturas e pressões reduzidas – ou pseudoreduzidas, quando se trata de uma mistura – do sistema analisado. De acordo com o princípio dos estados correspondentes, todos os gases exibem fatores de compressibilidade similares quando se encontram nas mesmas condições de temperatura e pressão reduzidas (CASTELLAN, 1986; ROSA; CARVALHO; XAVIER, 2006).

Como as correlações empíricas disponíveis na literatura geralmente apresentarem resultados insatisfatórios para gases contendo alto teor de CO₂, no presente trabalho, foram propostos novos parâmetros para a correlação de BeB. Para esta finalidade, coletaram-se 292 dados experimentais da literatura, dos quais 62 foram utilizados como dados de correlação e o restante para o teste do modelo. O método proposto por Wichert e Aziz (WeA) (WICHERT; AZIZ, 1972) foi utilizado para o cálculo das propriedades pseudoreduzidas. Para o processo de otimização criou-se um algoritmo Python, enquanto o tratamento de dados foi realizado no MS Excel.

REFERENCIAL TEÓRICO

A correlação proposta por BeB tem a seguinte forma:

$$Z = A + \frac{1 - A}{\exp B} + CP_{pr}^D \quad (1)$$

Onde A , B , C e D são calculados da seguinte maneira:

$$A = a_1(T_{pr} - a_2)^{0,5} - a_3T_{pr} - a_4 \quad (2)$$

$$B = (a_5 - a_6T_{pr})P_{pr} + \left(\frac{a_7}{T_{pr} - a_8} - a_9 \right) P_{pr}^2 + \frac{a_{10}}{10^{9(T_{pr}-1)}} P_{pr}^6 \quad (3)$$

$$C = a_{11} - a_{12} \log T_{pr} \quad (4)$$

$$D = 10^{a_{13} - a_{14}T_{pr} + a_{15}T_{pr}^2} \quad (5)$$

Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros das Equações 2 a 5 originalmente propostos por BeB.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros da equação de BeB.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
a_1	1,39	a_6	0,23	a_{11}	0,132
a_2	0,92	a_7	0,066	a_{12}	0,32
a_3	0,36	a_8	0,86	a_{13}	0,3106
a_4	0,101	a_9	0,037	a_{14}	0,49
a_5	0,62	a_{10}	0,32	a_{15}	0,1824

Conforme já mencionado, o presente trabalho tem como propósito a otimização destes parâmetros para amostras de gases com teor de CO₂.

Como pode ser observado nas Equações 1 a 5, as temperatura e pressão pseudoreduzidas são parâmetros de entrada para o modelo analisado. O cálculo de tais propriedades é dado a seguir:

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} \quad (6)$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \quad (7)$$

Onde T e P são a temperatura e pressão do gás, respectivamente; e T_{pc} e P_{pc} são, respectivamente, a temperatura e pressão pseudocríticas do gás.

A obtenção das propriedades pseudocríticas de um gás é feito a partir de regras de misturas. No presente estudo será utilizada a proposta por Kay (KAY, 1936), conforme apresentada a seguir para a pressão e a temperatura pseudocríticas, respectivamente.

$$P_{pc} = \Sigma(y_i P_{ci}) \quad (8)$$

$$T_{pc} = \Sigma(y_i T_{ci}) \quad (9)$$

Onde y_i , P_{ci} e T_{ci} representam, respectivamente, a fração, a temperatura crítica e a pressão crítica da substância i contida no gás.

Segundo Rosa, Carvalho e Xavier (2006), essa correlação tende a ter uma boa precisão, com erro da ordem de 2 a 3% para gases “doces” (sem presença de contaminantes, como CO₂). Para casos em que há presença de contaminantes é necessário aplicar um fator de correção sobre esse valor de coordenadas pseudocríticas. O cálculo desse fator de correção utilizado neste trabalho foi o proposto por WeA:

$$T_{pc'} = T_{pc} - \varepsilon \quad (10)$$

$$P_{pc'} = \frac{P_{pc} T_{pc'}}{[T_{pc} + B_{WA} (1 - B_{WA}) \varepsilon]} \quad (11)$$

Onde $T_{pc'}$ e $P_{pc'}$ são respectivamente, as temperaturas e pressões pseudocríticas corrigidas. O parâmetro de correção ε é calculado da seguinte forma:

$$\varepsilon = 120(A_{WA}^{0,9} - A_{WA}^{1,6}) + 1.5(B_{WA}^{0,5} - B_{WA}^4) \quad (12)$$

Onde A_{WA} é o somatório das frações de sulfeto de hidrogênio (H_2S) e CO_2 e B_{WA} é a fração molar de H_2S . Como no banco de dados do presente trabalho não há gases com a presença de H_2S , $B_{WA} = 0$ para todos os casos estudados.

Outra forma de obter ε foi proposta por Bian et al. (Bea) (BIAN et al., 2012), a qual é dada a seguir:

$$\varepsilon = \frac{5}{9} [120(A_{WA}^{0,9} - A_{WA}^{1,6}) + 15(B_{WA}^{0,5} - B_{WA}^4)] \quad (13)$$

É importante mencionar que, como todos os gases estudados neste trabalho apresentavam CO_2 em suas composições, os valores de propriedades pseudocríticas utilizados no cálculo das propriedades pseudoreduzidas (Equações 6 e 7) foram os obtidos pelas Equações 10 e 11.

METODOLOGIA

Banco de dados

Uma importante etapa no desenvolvimento de novas correlações é o conjunto de dados utilizado. Neste trabalho, foram utilizados 292 dados experimentais de fator de compressibilidade de 8 diferentes amostras de gás natural (BIAN et al., 2012; ZHANG et al., 2011), que apresentam as seguintes faixas de temperatura, pressão e composição molar de CO_2 , respectivamente: 263,30 K a 408,71 K; 3,0 MPa a 94,34 MPa e 0,92% a 50,99%. As faixas de temperatura e pressão reduzidas dos dados coletados são, respectivamente: $1,2 < T_{pr} < 2,4$ e $0 < P_{pr} < 13$.

Otimização do modelo

De modo a analisar a influência das propriedades pseudocríticas no desenvolvimento do modelo, utilizaram-se duas estratégias de otimização, de acordo com o método para a correção das propriedades pseudocríticas, a saber: (1) utilizando o modelo WeA e (2) utilizando a modificação de Bea.

Neste sentido, para cada abordagem, dividiu-se o banco de dados em 4 subdivisões: (1) o grupo de correlação, conjunto de dados utilizado para otimização; (2) conjunto de testes com

alto teor de CO₂, (3) conjunto de teste com baixo teor de CO₂, e (4) conjunto geral, que é o grupo composto pelos três conjuntos anteriores.

Na Tabela 2 apresenta-se o quantitativo de dados para cada um dos conjuntos de cada estratégia avaliada. Para o cálculo de ε utilizando WeA, os conjuntos de dados seguem a seguinte nomenclatura: correlação (WA_{corr}), alto teor de CO₂ (WA_{CO_2+}), baixo teor de CO₂ (WA_{CO_2-}) e o conjunto geral (WA_{total}). E por Bea são: correlação modificada (BA_{corr}), o teste modificado com alto teor de CO₂ (BA_{CO_2+}), teste modificado com baixo teor de CO₂ (BA_{CO_2-}) e o conjunto geral modificado (BA_{total}).

Tabela 2 – Quantificação dos dados e dos respectivos bancos de dados usados neste trabalho.

Cálculo de ε	Banco de dados	Quantidade de dados
WeA padrão	WA_{corr}	62
	WA_{CO_2+}	39
	WA_{CO_2-}	43
	WA_{total}	144
WeA modificada por Bea.	BA_{corr}	66
	BA_{CO_2+}	39
	BA_{CO_2-}	43
	BA_{total}	148

O computador usado para a otimização dos fatores possui um Intel Core i5-9400f de 2,90 gigahertz, 16 Gb de memória RAM DDR4 de 2666 MHz e uma placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 750 de 2 Gb. O Microsoft Excel foi utilizado como ferramenta de gerenciamento de dados e resultados e a linguagem de programação Python para realizar a otimização dos fatores, via função *least_squares* (Método dos Mínimos Quadrados) da biblioteca *Scipy*.

Parâmetros estatísticos

Para a avaliação dos resultados, foram usados os seguintes parâmetros estatísticos: Desvio Padrão (SD), que é o grau de dispersão do conjunto de dados; Desvio Absoluto Médio (AAD), que consiste na diferença, em módulo, entre o valor calculado e o valor experimental; o Desvio Absoluto Relativo Médio (%AARD), que representa o módulo da média aritmética geral dos desvios relativos; e o Desvio Relativo (RD), que mostra a divergência de um valor calculado em relação ao experimental nas mesmas condições. Esses parâmetros estatísticos são escritos da seguinte maneira:

$$SD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{dados}} (Z_{calc} - Z_{exp})^2}}{N_{data}} \quad (14)$$

$$AAD = \frac{1}{N_{dados}} \sum_{i=1}^{N_{dados}} |Z_{calc} - Z_{exp}| \quad (15)$$

$$\%AARD = \frac{1}{N_{dados}} \sum_{i=1}^{N_{dados}} \left| \frac{Z_{calc} - Z_{exp}}{Z_{exp}} \right| \times 100 \quad (16)$$

$$RD = \frac{Z_{calc} - Z_{exp}}{Z_{exp}} \quad (17)$$

Onde Z_{calc} , Z_{exp} e N_{dados} são os fatores de compressibilidade calculados, experimentais e o número total de dados analisados, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os grupos de dados com maior teor de CO_2 demonstraram os melhores resultados de Desvio Absoluto Relativo Médio, chamando atenção para o grupo BA_{corr} , que demonstrou o melhor %AARD (0,73%), enquanto os grupos de dados com resultados menos satisfatórios foram os com baixo teor de CO_2 , principalmente o grupo BA_{CO_2-} , que obteve o menor %AARD (27,72%).

Com isso, podemos concluir que os métodos do presente estudo convergiram para uma boa melhoria de fator de recuperação em gases com teor significativo de CO_2 (de no mínimo 9,84%), apresentando um comportamento mais satisfatório ainda com o aumento do teor de dióxido de carbono. Notou-se também que o mesmo apresentou valores não satisfatórios para baixos teores de CO_2 (abaixo de 9,84%), como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados estatísticos obtidos a partir de otimizações.

Conjunto de dados	SD	AAD	%AARD	Conjunto de dados	SD	AAD	%AARD
BA_{corr}	0,0843	0,0058	0,73%	WA_{corr}	0,0865	0,0133	1,77%
BA_{CO_2+}	0,0823	0,0138	1,81%	WA_{CO_2+}	0,0823	0,0196	2,71%
BA_{CO_2-}	0,3326	0,3904	27,72%	WA_{CO_2-}	0,3326	0,3892	27,61%

BA_{total}	0,3055	0,1197	8,86%	WA_{total}	0,3090	0,1272	9,74%
--------------	--------	--------	-------	--------------	--------	--------	-------

Na Tabela 4 estão presentes os valores dos parâmetros otimizados deste trabalho utilizando a equação de WeA modificada por Bea.

Tabela 4 – Resultados dos parâmetros otimizados.

Parâmetros	Valores otimizados	Parâmetros	Valor otimizado	Parâmetros	Valor otimizado
a_1	7,724553440	a_6	-1,118808030	a_{11}	-0,071242413
a_2	-0,570508107	a_7	0,001478690	a_{12}	-0,035228497
a_3	-0,248736112	a_8	1,200047390	a_{13}	-12,111791900
a_4	-0,950680377	a_9	-0,433241952	a_{14}	-9,666885320
a_5	-1,523392400	a_{10}	-0,202702569	a_{15}	-1,362359530

A seguir são apresentados os comportamentos dos valores calculados com parâmetros otimizados em relação aos dados experimentais para os seguintes conjunto de dados: BA_{corr} e BA_{CO_2+} (Figura 2), WA_{corr} e WA_{CO_2+} (Figura 3), BA_{corr} e BA_{CO_2-} (Figura 4), WA_{corr} e WA_{CO_2-} (Figura 5).

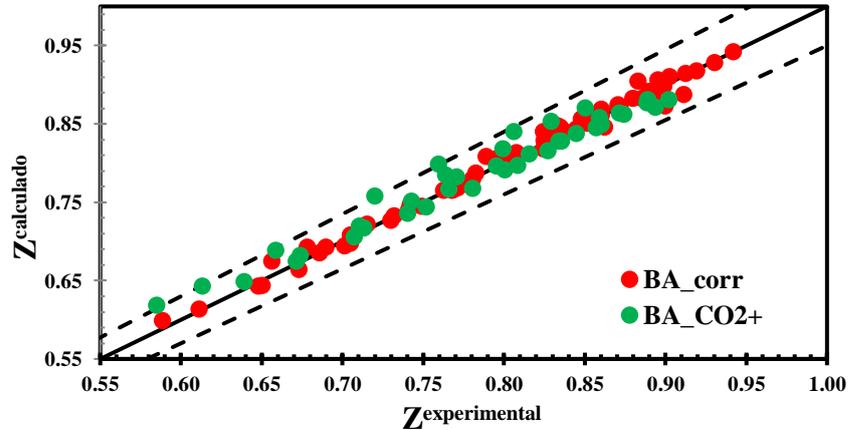


Figura 2 – Resultado dos fatores de compressibilidade dos grupos BA_{corr} e BA_{CO_2+}

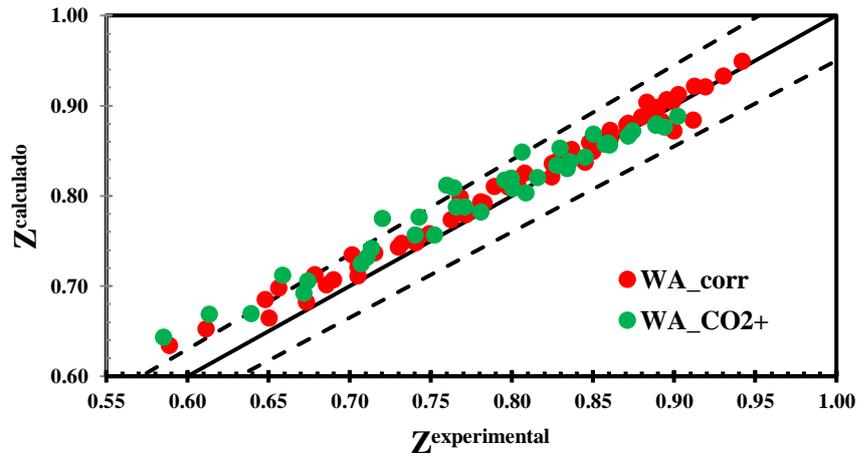


Figura 3 – Resultado dos fatores de compressibilidade dos grupos WA_{corr} e WA_{CO_2+} .

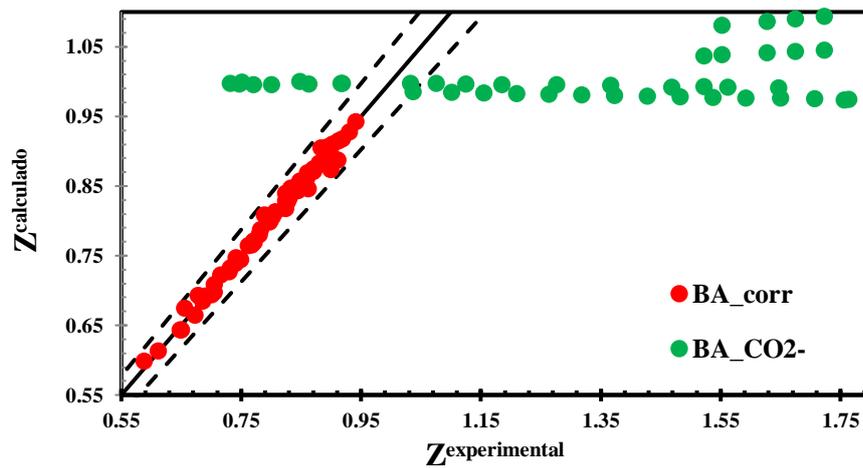


Figura 4 – Resultado dos fatores de compressibilidade dos grupos BA_{corr} e BA_{CO_2-} .

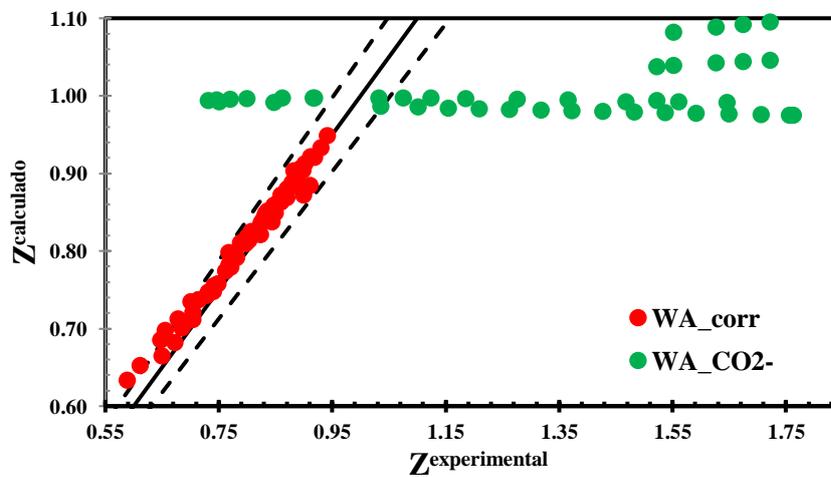


Figura 5 – Resultado dos fatores de compressibilidade dos grupos WA_{corr} e WA_{CO_2-} .

A partir da observação das Figuras 4 e 5, constata-se que os parâmetros otimizados não deram bons resultados para os grupos BA_{CO_2-} e WA_{CO_2-} , fato que se explica devido ao baixo teor de CO_2 deste grupo de testes, onde grande parte do grupo possui menos que 1% de CO_2 em sua composição. De acordo com Zhang et al. (2011), quando um gás possui mais de 1% de dióxido de carbono em sua composição é que a equação de WeA se mostra mais eficiente. Com isso, para casos de gases com baixos teores de CO_2 (menos de 1%), os parâmetros originais do modelo de BeB devem ser utilizados. Na Figura 6 e 7 são apresentados os comportamentos dos desvios relativos em relação à pressão para os conjuntos analisados.

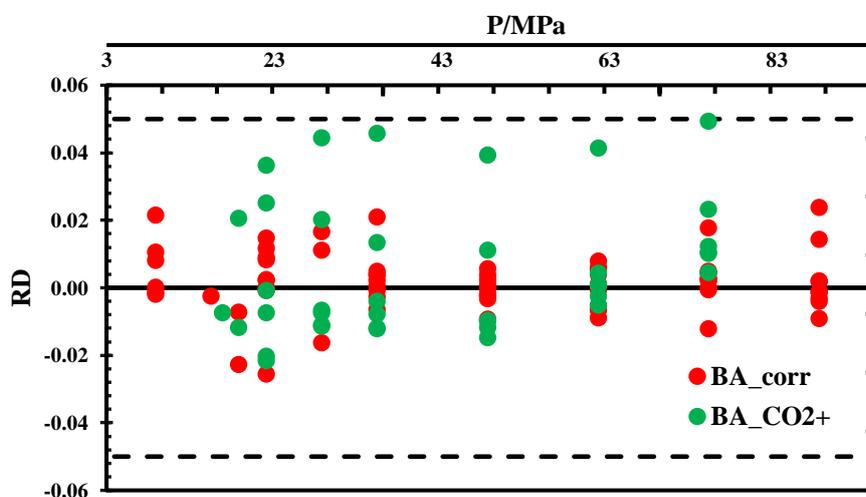


Figura 6 – Variação do desvio relativo dos grupos BA_{corr} e BA_{CO_2+} em relação a pressão.

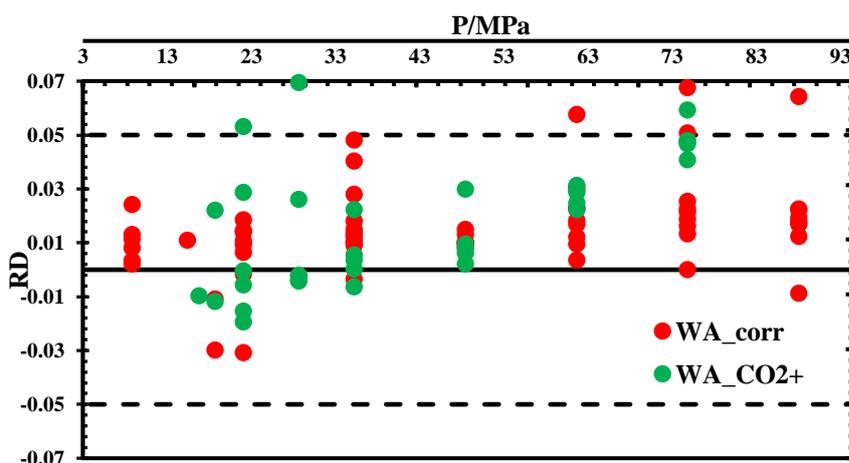


Figura 7 – Variação do desvio relativo dos grupos WA_{corr} e WA_{CO_2+} em relação a pressão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizada a otimização dos parâmetros da equação de BeB para gases com altos teores de CO₂, bem como foi avaliada a influência da modificação proposta por Bea para a equação de WeA.

A partir dos resultados obtidos, foi observado que a modificação proposta por Bea para WeA, para correção das temperaturas e pressões pseudoreduzidas, apresentou resultados melhores do que o método originalmente proposto por WeA. Além disso, os resultados não foram satisfatórios para gases com baixos teores de CO₂, sendo recomendado o método original de BeB para estes casos.

Para os futuros trabalhos nessa área, recomenda-se a construção de um banco de dados ainda mais robusto, com diferentes níveis de porcentagem de CO₂, para avaliar um espectro maior de variações de composições.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP) pelo financiamento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ADEL, M. E.; LEENA, A. E. Predicting the compressibility factor of natural gases containing various amounts of CO₂ at high temperatures and pressures. **Journal of Petroleum and Gas Engineering**, v. 11, n. 1, p. 19–36, 2020.

BIAN, X. et al. Measurement and correlation of compressibility factor of high CO₂-content natural gas. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 82–83, p. 38–43, 2012.

BRILL, J. P.; BEGGS, D. H. Two-Phase Flow in Pipes. **INTERCOMP Course**, 1974.

CASTELLAN, G. **Fundamentos de Físico-Química**. 1. ed. [s.l.] LTC, 1986.

DRANCHUK, P. M. ; ABOU-KASSEM, J. H. Calculation of Z Factors for Natural Gases Using Equations of State. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, v. 14, n. 3, p. 34–

36, 1975.

ELSHARKAWY, A. M.; ELKAMEL, A. Compressibility Factor for Sour Gas Reservoirs. **SPE - Asia Pacific Oil and Gas Conference**, n. March 2014, p. 143–154, 2000.

HALL, K. R.; YARBOROUGH, L. A new equation of state for aluminum. **Oil and Gas Journal**, v. 59, n. 1, p. 149–157, 1973.

HEIDARYAN, E.; SALARABADI, A.; MOGHADASI, J. A novel correlation approach for prediction of natural gas compressibility factor. **Journal of Natural Gas Chemistry**, v. 19, n. 2, p. 189–192, 2010.

KAY, W. B. Gases and Vapors At High Temperature and Pressure - Density of Hydrocarbon. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 28, n. 9, p. 1014–1019, 1936.

MAHMOUD, M. A. Development of a new correlation of gas compressibility factor (Z-factor) for high pressure gas reservoirs. **JOURNAL OF ENERGY RESOURCES TECHNOLOGY**, v. 136, 2014.

MAMEDOV, B. A.; SOMUNCU, E.; ASKEROV, I. M. Theoretical Assessment of Compressibility Factor of Gases by Using Second Virial Coefficient. **Zeitschrift fur Naturforschung - Section A Journal of Physical Sciences**, v. 73, n. 2, p. 121–125, 2017.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. DE S.; XAVIER, J. A. D. **Engenharia de Reservatório de Petróleo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

WICHERT, E.; AZIZ, K. Calculation of Z's for Sour Gases. **Hydrocarbon Processing**, v. 51, n. 5, p. 119–122, 1972.

ZHANG, X. et al. **Compressibility factor of gas with high content of CO₂ in gas reservoir**. Proceedings - 2011 International Conference on Computational and Information Sciences, ICCIS 2011. **Anais...IEEE**, 2011



IV CONEPETRO
EDIÇÃO DIGITAL

*IV Congresso Nacional de Engenharia de
Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
VI Workshop de Engenharia de Petróleo*

www.conepetro.com.br

ISSN: 2446-8339