

UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
TECNOLOGIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO

**ESTUDO DA PERDA DE CARGA E DO ESCOAMENTO DE
SUSPENSÕES DE MATERIAIS UTILIZADOS NO COMBATE À
PERDA DE CIRCULAÇÃO EM FRATURAS**

FELIPE AUGUSTO PAES DE GODOI

2017



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
TECNOLOGIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA PERDA DE CARGA E DO ESCOAMENTO DE
SUSPENSÕES DE MATERIAIS UTILIZADOS NO COMBATE À
PERDA DE CIRCULAÇÃO EM FRATURAS**

FELIPE AUGUSTO PAES DE GODOI

Sob a Orientação de

Luís Américo Calçada

e Co-orientação de

Cláudia Miriam Scheid

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Área de Concentração em Tecnologia Química.

Seropédica, RJ.
Agosto de 2017

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G588e Godoi, Felipe Augusto Paes de , 1991-
Estudo da perda de carga e do escoamento de
suspensões de materiais utilizados no combate à perda
de circulação em fraturas / Felipe Augusto Paes de
Godoi. - 2017.
123 f.

Orientador: Luís Américo Calçada.
Coorientadora: Cláudia Míriam Scheid.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Química, 2017.

1. Perda de circulação. 2. Materiais de controle de
perda. 3. Materiais de fortalecimento de poço. 4.
Carbonato de cálcio laminar. I. Calçada, Luís Américo ,
1966-, orient. II. Scheid, Cláudia Míriam , 1968-,
coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química.
IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

FELIPE AUGUSTO PAES DE GODOI

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de Concentração em Tecnologia Química.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28./08./2017

Luís Américo Calçada, D.Sc., DEQ/UFRRJ
(Orientador)

Alexandre Rodrigues Tôres, D.Sc., DEQA/FAT/UERJ

Alexandre Lioi Nascentes, D.Sc., DE/UFRRJ

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele não conseguiria chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais, Carlos Roberto de Godoi e Janete D'arc Paes de Godoi, e à minha irmã Carla Veridiana Paes de Godoi, que sempre me forneceram todo o suporte necessário para realizar meus objetivos e me apoiaram em todas as decisões.

Agradeço aos professores Luís Américo Calçada e Cláudia Míriam Scheid por terem me dado a oportunidade de trabalhar no LEF e pelo apoio e ajuda fornecida durante a realização dessa pesquisa.

Agradeço aos professores do DEQ pelos conhecimentos transmitidos, que foram de fundamental importância para a minha formação. Agradeço aos professores que fizeram parte das bancas examinadoras dos seminários realizados.

Agradeço aos engenheiros do LEF, Sérgio Magalhães Filho, Eduardo Paraiso e Gabrielle Fontella, e ao técnico em eletrotécnica, senhor Elias Pacheco, por todo o suporte e toda a colaboração com esse projeto.

Agradeço aos amigos e companheiros de LEF e de UFRRJ, especialmente Mateus Dalbone, Victor Saide, Victor Matos, João Albuquerque e Antônio Alexandre, com os quais espero sempre manter a amizade. Também agradeço de maneira especial à Michelle Fernandes da Silveira, Letícia Siqueira Bernardo, Moacyr Nogueira Borges Filho e Beatriz Rosas de Oliveira, que trabalharam diretamente comigo e foram fundamentais para a realização desse projeto.

Agradeço ao CENPES/PETROBRAS e ao PPGEQ/UFRRJ pelo apoio financeiro dado a esta pesquisa.

Agradeço aos amigos e companheiros do alojamento da pós-graduação e do alojamento da graduação da UFRRJ, em especial do quarto M5-527, por me apoiarem sempre durante esta caminhada.

Agradeço aos professores membros da banca examinadora pela atenção ao ler e ao estudar este trabalho e pelas contribuições dadas.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização desse projeto.

RESUMO

GODOI, Felipe Augusto Paes de. **Estudo da perda de carga e do escoamento de suspensões de materiais utilizados no combate à perda de circulação em fraturas**. 2017. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

Um grande desafio enfrentado durante a perfuração de poços de petróleo corresponde à perda de circulação. Esse fenômeno consiste na perda do fluido de perfuração através de poros ou fraturas presentes nas formações a serem perfuradas. O tratamento mais utilizado no combate à perda de circulação corresponde à utilização de materiais de controle de perda e de materiais de fortalecimento de poço. Neste trabalho, foi realizado um estudo experimental e teórico com o objetivo de analisar o escoamento de suspensões e a perda de carga em fraturas. O trabalho também teve como objetivo a avaliação da influência de fatores como vazão, concentração e tamanho das partículas no escoamento das suspensões e na eficiência dos materiais utilizados no controle da perda de circulação. Foi utilizado um simulador físico de escoamento em fraturas, cujo objetivo é descrever o escoamento de suspensões em fraturas com 2 mm, 5 mm e 10 mm de abertura e 1,5 m de comprimento. Foram estudadas suspensões contendo materiais a base de flocos de carbonato de cálcio na forma laminar com concentrações e distribuições granulométricas diferentes. Os fluidos foram caracterizados a partir da realização de ensaios reológicos e da determinação da massa específica e da distribuição do tamanho das partículas. Para os sistemas estudados, registraram-se dados de vazão das suspensões e da perda de carga em função do tempo. Foram propostas duas metodologias para correlacionar a perda de carga e a vazão nas fraturas. Os fluidos preparados apresentaram um comportamento reológico que pode ser ajustado pelo modelo de Herschel-Buckley. A suspensão contendo partículas médias foi eficiente no selamento das fraturas, enquanto que as suspensões de partículas finas selaram apenas a fratura de 2 mm. Com o aumento da concentração do carbonato de cálcio fino, a fratura de 2 mm foi tamponada mais rapidamente. Não foi observada uma influência muito significativa da concentração na perda de carga nas fraturas de 10 mm e 5 mm. Os valores preditos pelos modelos matemáticos propostos para correlacionar perda de carga e vazão nas fraturas foram superiores aos valores experimentais. Após a realização de um ajuste linear dos modelos, os valores preditos aproximaram-se dos experimentais. Com os dados obtidos a partir dos ensaios reológicos, observou-se a influência da presença e do tamanho das partículas na reologia dos fluidos. O simulador de escoamento em fraturas foi capaz de caracterizar a eficiência dos materiais utilizados no combate à perda de circulação. Com os resultados obtidos no equipamento, foi possível avaliar a influência da concentração e do tamanho das partículas no escoamento das suspensões. Esses resultados demonstraram o efeito da perda de carga no processo de selamento das fraturas. Os dados experimentais permitiram a validação dos modelos matemáticos propostos. Verificou-se que na modelagem matemática do escoamento em fraturas, deve ser considerado o efeito da rugosidade relativa das fraturas.

Palavras-chave: Perda de circulação, materiais de controle de perda, materiais de fortalecimento de poço, carbonato de cálcio laminar.

ABSTRACT

GODOI, Felipe Augusto Paes de. **Study of the pressure drop and the flow of suspensions of materials used to combat the loss of circulation in fractures.** 2017. 107 p. Thesis (Master of Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

The loss of circulation is a major challenge faced during the drilling of oil wells. This phenomenon consists in the loss of the drilling fluid through pores or fractures present in the formations to be drilled. The most used treatment to combat the loss of circulation is the use of lost circulation materials and wellbore strengthening materials. In this work, an experimental and theoretical study was carried out with the objective of analyzing the flow of suspensions and the pressure drop in fractures. Another objective of this study was to evaluate the influence of factors such as flow rate, concentration and particle size in the flow of suspensions and in the efficiency of materials used to combat the loss of circulation. The experimental equipment used was a physical simulator whose objective is to describe the flow of suspensions in fractures with openings of 2 mm, 5 mm and 10 mm and 1.5 m of length. Suspensions containing calcium carbonate flake-based materials in laminar form with different concentrations and particle size distributions were studied. The fluids were characterized from rheological tests and density and particle size distribution. For the systems studied, data on the flow rate of the suspensions and the pressure drop were recorded as a function of time. Two methodologies were proposed to correlate the pressure drop and flow rate in fractures. The prepared fluids presented a rheological behavior that can be adjusted by the Herschel-Buckley model. The suspension containing medium particles was efficient in sealing the fractures, whereas the suspensions of fine particles sealed only the fracture of 2 mm. With the increase of fine calcium carbonate concentration, the fracture of 2 mm was sealed more rapidly. No significant influence of the concentration on the pressure drop was observed on fractures of 10 mm and 5 mm. The values predicted by the mathematical models proposed to correlate the pressure drop and flow rate in the fractures were higher than the experimental values. After a linear adjustment of the models, the predicted values approached the experimental ones. With the data obtained from the rheological tests, the influence of the presence and size of the particles in the fluid rheology was observed. The simulator of flow in fractures was able to characterize the efficiency of the materials used to combat the loss of circulation. With the results obtained in the equipment, it was possible to evaluate the influence of the concentration and the size of the particles in the flow of the suspensions. These results demonstrated the effect of the pressure drop in the sealing process of the fractures. The experimental data allowed the validation of the proposed mathematical models. It was verified that in the mathematical modeling of the flow in fractures, the effect of the relative roughness of the fractures should be considered.

Keywords: loss of circulation, lost circulation materials, wellbore strengthening materials, laminar calcium carbonate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfuração rotativa. Adaptado de Bourgoyne <i>et al.</i> (1991).....	3
Figura 2. (a) Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos. (b) Viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos. Fonte: FOX (1998).....	12
Figura 3. Esquema de circulação dos fluidos na unidade experimental e no SEF. Fonte: Duque Neto (2015).....	13
Figura 4. Bomba helicoidal de deslocamento positivo.....	14
Figura 5. Divisão da tubulação horizontal em duas linhas.....	14
Figura 6. Inversor de frequência.....	15
Figura 7. Tanque da unidade experimental.....	15
Figura 8. Painel de controle acoplado ao tanque.....	16
Figura 9. (A) Geometrias das regiões anulares representadas pelo SEF. (B) Seções transversais das regiões anulares representadas pelo SEF. Fonte: Duque Neto (2015).....	16
Figura 10. Visão geral do SEF: (A) anular 12 ¼ . (B) anular 8 ½.....	17
Figura 11. Transdutor de pressão diferencial com selo remoto. Fonte: Adaptado do Manual da SMAR (2016).....	17
Figura 12. Pontos de medição da pressão diferencial: (A), (B) e (C) posicionados na saída das fraturas; (D), (E) e (F) instalados na entrada das fraturas. Fonte: Duque Neto (2015).....	18
Figura 13. Imagens obtidas por MEV, com ampliação de 1000x. (A) Imagem do carbonato de cálcio laminar fino. (B) Imagem do carbonato de cálcio laminar médio. Fonte: Duque Neto (2015).....	18
Figura 14. Agitador eletromagnético. Fonte: Bertel (2016).....	19
Figura 15. Balança de lama Fann modelo 140. Fonte: Fann (2016).....	21
Figura 16. Termômetro portátil Traceable®.....	21
Figura 17. Agitador Hamilton Beach-Fann®.....	22
Figura 18. Viscosímetro FANN 35A.....	22
Figura 19. Balança móvel de piso Digi-Tron®.....	24
Figura 20. Distribuição granulométrica do carbonato de cálcio laminar fino.....	27
Figura 21. Distribuição granulométrica do carbonato de cálcio laminar médio.....	28
Figura 22. Curvas de escoamento da solução de Goma Xantana e das suspensões dos materiais de controle de perda.....	30
Figura 23. Dados de vazão mássica nas fraturas em função do tempo para a água industrial e a solução aquosa de Goma Xantana na vazão de 0,30 kg/s na região anular.....	31
Figura 24. Dados de pressão diferencial nas fraturas em função do tempo para a água industrial e a solução aquosa de Goma Xantana na vazão de 0,30 kg/s na região anular.....	32
Figura 25. Dados de vazão mássica e pressão diferencial, na vazão de 0,30 kg/s no anular, na fratura de 10 mm para a suspensão de 15 lbm/bbl (42,8 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar fino.....	33
Figura 26. Dados de vazão mássica e pressão diferencial, na vazão de 0,30 kg/s no anular, na fratura de 10 mm para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio.....	33
Figura 27. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 1 a 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³), na vazão de 0,30 kg/s no anular, na fratura de 10 mm.....	34
Figura 28. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 6 a 9 lbm/bbl (25,68 kg/m ³), na vazão de 0,30 kg/s no anular na fratura de 10 mm.....	34

Figura 29. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 12 a 18 lbm/bbl ($51,35 \text{ kg/m}^3$), na vazão de 0,30 kg/s no anular, na fratura de 10 mm.....	35
Figura 30. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 1 a 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$), na vazão de 0,30 kg/s no anular, na fratura de 5 mm.....	35
Figura 31. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 6 a 9 lbm/bbl ($25,68 \text{ kg/m}^3$), na vazão de 0,30 kg/s no anular, na fratura de 5 mm.....	36
Figura 32. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 12 a 18 lbm/bbl ($51,35 \text{ kg/m}^3$), na vazão de 0,30 kg/s no anular, na fratura de 5 mm.....	36
Figura 33. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 1 a 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$), na vazão de 0,30 kg/s no anular, na fratura de 2 mm.....	37
Figura 34. Valores de vazão (predito versus experimental) na fratura de 5 mm para suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$), utilizando a Equação 14.....	38
Figura 35. Valores de vazão (predito versus experimental) na fratura de 5 mm para suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 15 lbm/bbl ($42,8 \text{ kg/m}^3$), utilizando a Equação 14.....	39
Figura 36. Valores de vazão (predito versus experimental) na fratura de 5 mm para as suspensões de carbonato de cálcio laminar fino após o ajuste da Equação 14.....	39
Figura 37. Valores de vazão (predito versus experimental) na fratura de 5 mm para suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$), utilizando a Equação 15.....	40
Figura 38. Valores de vazão (predito versus experimental) na fratura de 5 mm para suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 15 lbm/bbl ($42,8 \text{ kg/m}^3$), utilizando a Equação 15.....	40
Figura 39. Valores de vazão (predito versus experimental) na fratura de 5 mm para as suspensões de carbonato de cálcio laminar fino após o ajuste linear da Equação 15.....	41
Figura 40. Valores de vazão obtidos após o ajuste das Equações 14 e 15, para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) na fratura de 5 mm.....	41
Figura D1. Curvas de escoamento dos Fluidos de 2 a 6.....	54
Figura D2. Curvas de escoamento dos Fluidos de 7 a 11.....	54
Figura D3. Curvas de escoamento dos Fluidos de 12 a 16.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição dos fluidos preparados adicionando 2,0 lbm/bbl (5,71 kg/m ³) de GX em água e os sólidos.....	20
Tabela 2. Constantes do viscosímetro FANN 35A.....	23
Tabela 3. Dimensões das fraturas.....	26
Tabela 4. Diâmetros médios de Sauter das partículas dos materiais.....	28
Tabela 5. Massas específicas dos materiais.....	28
Tabela 6. Parâmetros do modelo ajustado aos dados reológicos.....	29
Tabela 7. Massa específica dos fluidos a 27 °C.....	30
Tabela 8. Temperaturas dos fluidos durante os experimentos.....	31
Tabela 9. Tempo de selamento da fratura de 2 mm em função da concentração de carbonato laminar fino, na vazão de 0,30 kg/s no anular.....	37
Tabela B1. Ângulo de deflexão em diferentes velocidades de rotação.....	52
Tabela C1. Dados de Tensão cisalhante e taxa de deformação para os fluidos 2, 3, 4, 5 e 6.....	53
Tabela C2. Dados de Tensão cisalhante e taxa de deformação para os fluidos 7, 8, 9, 10 e 11.....	53
Tabela C3. Dados de Tensão cisalhante e taxa de deformação para os fluidos 12, 13, 14, 15 e 16.....	53
Tabela E1. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,06 kg/s no anular.....	56
Tabela E2. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,13 kg/s no anular.....	56
Tabela E3. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,17 kg/s no anular.....	56
Tabela E4. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,21 kg/s no anular.....	56
Tabela E5. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,25 kg/s no anular.....	57
Tabela E6. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,30 kg/s no anular.....	57
Tabela E7. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,06 kg/s no anular.....	57
Tabela E8. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,13 kg/s no anular.....	57
Tabela E9. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,17 kg/s no anular.....	58
Tabela E10. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,21 kg/s no anular.....	58
Tabela E11. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,25 kg/s no anular.....	58
Tabela E12. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,30 kg/s no anular.....	58
Tabela E13. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.....	59
Tabela E14. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.....	59
Tabela E15. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.....	60
Tabela E16. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.....	60
Tabela E17. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.....	61
Tabela E18. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.....	61

Tabela E94. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 10 mm na vazão de 0,13 kg/s no anular.....	100
Tabela E95. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 5 mm na vazão de 0,13 kg/s no anular.....	101
Tabela E96. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 2 mm na vazão de 0,13 kg/s no anular.....	102
Tabela E97. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 10 mm na vazão de 0,17 kg/s no anular.....	102
Tabela E98. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 5 mm na vazão de 0,17 kg/s no anular.....	102
Tabela E99. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 2 mm na vazão de 0,17 kg/s no anular.....	103
Tabela E100. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 10 mm na vazão de 0,21 kg/s no anular.....	104
Tabela E101. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 5 mm na vazão de 0,21 kg/s no anular.....	104
Tabela E102. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 2 mm na vazão de 0,21 kg/s no anular.....	104
Tabela E103. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 10 mm na vazão de 0,25 kg/s no anular.....	105
Tabela E104. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 5 mm na vazão de 0,25 kg/s no anular.....	105
Tabela E105. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 2 mm na vazão de 0,25 kg/s no anular.....	105
Tabela E106. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 10 mm na vazão de 0,30 kg/s no anular.....	106
Tabela E107. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 5 mm na vazão de 0,30 kg/s no anular.....	106
Tabela E108. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m ³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 2 mm na vazão de 0,30 kg/s no anular.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API- *American Petroleum Institute*;
WSM- *wellbore strengthening materials*;
LCM- *lost circulation materials*;
SEF- Simulador de escoamento em fraturas;
GX- Goma Xantana;
CF- Carbonato de cálcio laminar fino;
CM- Carbonato de cálcio laminar médio.

LISTA DE SÍMBOLOS

Caracteres Latinos

- k- Índice de consistência do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$);
n- Índice de comportamento do fluido (adim.)
L- Comprimento da fratura (m);
w- Profundidade da fratura (m);
h- Metade da abertura da fratura (m);
H- Abertura da fratura (m);
 D_h - Diâmetro hidráulico (m);
 ΔP - Pressão diferencial na fratura (Pa);
 Q_1 - Vazão volumétrica na fratura, predita pelo modelo em função dos parâmetros reológicos (m^3/s);
 Q_2 - Vazão volumétrica na fratura, predita pelo modelo em função da viscosidade aparente (m^3/s);
 Q_{exp} - Vazão volumétrica na fratura, obtida experimentalmente (m^3/s);
Re- número de Reynolds (adim.);
 R_H - raio hidráulico (m);
 P_1, P_2 - pressões nos pontos 1 e 2 (Pa);
 z_1, z_2 - cotas nos pontos 1 e 2 (m);
N- velocidade de rotação (rpm).
D- diâmetro da tubulação (m)
L- comprimento da tubulação (m);
 f_d - fator de atrito de Darcy (adim.);
f- fator de atrito de Fanning (adim.);
 $\langle v \rangle$ - velocidade média do fluido (m/s);
g- aceleração da gravidade (m/s^2);
K- coeficiente de perda de carga (adim.);
 h_s - perda de carga localizada (Pa);
 L_{eq} - comprimento equivalente do acidente (m);
 m_p - massa do picnômetro vazio (g);
 m_{ps} - massa do picnômetro com sólidos (g);
 m_{pL} - massa do picnômetro com água (g);
 m_{psL} - massa do picnômetro com sólidos e água (g);
 h_d - perda de carga distribuída;

Caracteres Gregos

- γ - Taxa de deformação (s^{-1});
 τ_0 - Tensão crítica (Pa);
 τ - Tensão de cisalhamento (Pa);
 μ - Viscosidade aparente do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$);
 δ - Constante no valor de 6,40 (adim.);
 ρ - Massa específica (g/cm^3);
 θ - ângulo de deflexão ($^\circ$).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Estrutura do Trabalho.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Fluidos de Perfuração.....	3
2.1.1 Características dos fluidos de perfuração.....	4
2.1.2 Funções dos fluidos de perfuração.....	4
2.1.3 Classificação dos fluidos de perfuração.....	4
2.2 Perda de Fluidos de Perfuração.....	5
2.2.1 Fluidos de combate à perda de circulação.....	6
2.3 Critérios de Transição entre os Regimes de Escoamento.....	8
2.4 Balanço de Energia no Escoamento de Fluidos.....	9
2.5 Fundamentos da Reologia.....	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
3.1 Descrição da Unidade Experimental.....	13
3.2 Metodologia Experimental.....	18
3.2.1 Materiais de combate à perda de circulação.....	18
3.2.2 Determinação da granulometria.....	19
3.2.3 Massa específica dos sólidos.....	19
3.2.4 Preparação dos fluidos.....	20
3.2.5 Caracterização dos fluidos.....	20
3.2.5.1 Massa específica.....	20
3.2.5.2 Temperatura.....	21
3.2.5.3 Reologia.....	21
3.2.6 Ensaio na unidade experimental.....	23
3.3 Modelagem Matemática do Escoamento em Fraturas.....	25
3.3.1 Modelo em função dos parâmetros reológicos.....	25
3.3.2 Modelo em função da viscosidade aparente.....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1 Caracterização de Tamanho das Partículas.....	27
4.2 Massa específica dos Sólidos.....	28
4.3 Avaliação do comportamento reológico.....	28
4.4 Massa específica e temperatura dos fluidos.....	30
4.5 Dados Obtidos no Simulador de Escoamento em Fraturas (SEF).....	31
4.6 Resultados dos Modelos no Estudo Escoamento das Suspensões em Fraturas.....	38
5 CONCLUSÕES.....	42
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	44
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
ANEXOS.....	50

1 INTRODUÇÃO

Com o esgotamento de fontes naturais de hidrocarbonetos, devido ao aumento da demanda de petróleo, tem sido cada vez maior a necessidade de exploração de reservatórios mais profundos e complexos. Geralmente, esses reservatórios mais profundos apresentam zonas fraturadas ou redes de fraturas interligadas. A ocorrência de um diferencial positivo de pressão entre o poço e a formação pode contribuir para a criação dessas fraturas, levando à perda do fluido de perfuração para a formação. Esse fenômeno é denominado perda de circulação (KUMAR & SAVARI, 2011; ALSABA & NYGAARD, 2014).

No Brasil, a PETROBRAS realiza a exploração desses tipos de reservatórios, que possuem, em média, profundidades de 5500 m. Esses reservatórios são compostos, geralmente, por carbonatos naturalmente fraturados. Aproximadamente, um terço dos poços perfurados pela PETROBRAS apresenta perdas de circulação (OLIVEIRA *et al.*, 2013; WALDMANN *et al.*, 2005).

Um dos grandes desafios encontrados durante as operações de perfuração corresponde à perda de circulação. Essa perda aumenta os custos e diminui a produtividade do poço, além de contribuir para o aumento do tempo não produtivo. Em alguns casos, dependendo da severidade da perda de circulação, o poço pode ser perdido completamente (FINGER & BLANKENSHIP, 2010; DATWANI, 2012). Além disso, a perda de circulação compromete a segurança operacional e ambiental (WALDMANN *et al.*, 2005).

Pode-se combater a perda de circulação de diversas maneiras, dependendo da taxa de perda. Dentre as formas de combate à perda de circulação, a mais comum é a utilização de materiais de controle de perda. Esses materiais são adicionados ao fluido de perfuração com o objetivo de selar as fraturas criadas durante a perfuração ou fraturas já presentes na formação (ALSABAGH *et al.*, 2015; NYGAARD & SALEHI, 2011).

Este trabalho tem como motivação o estudo do combate à perda de circulação, já que esta corresponde a um dos problemas mais dispendiosos encontrados durante a perfuração. A perda de circulação é responsável por, aproximadamente, de 3,5 a 10% dos custos totais de um projeto geotérmico. Em situações severas, a perda de circulação pode custar milhões de dólares (KUMAR & SAVARI, 2011; FINGER & BLANKENSHIP, 2010).

O objetivo deste trabalho consiste na análise do escoamento de suspensões e na determinação da perda de carga em fraturas em um simulador físico de escoamento em fraturas. Esse equipamento descreve o escoamento de suspensões em fraturas de 2 mm, 5 mm e 10 mm de abertura, 9° de inclinação e 1,5 m de comprimento. No equipamento, foram registrados dados de vazão das suspensões e da perda de carga em função do tempo. Os dados obtidos foram utilizados na avaliação da eficiência de cada material no selamento das fraturas. Para a realização deste estudo, utilizaram-se suspensões compostas por Goma Xantana e materiais a base de flocos de carbonato de cálcio na forma laminar com concentrações e distribuições granulométricas diferentes. Calçada *et al.* (2015) estudaram o efeito da distribuição granulométrica de vários materiais no selamento de fraturas e validaram o simulador de escoamento em fraturas utilizado neste trabalho. Foram propostas duas metodologias para descrever o escoamento das suspensões nas fraturas baseados em modelos reológicos.

1.1 Estrutura do Trabalho

Este trabalho possui a seguinte estrutura:

O Capítulo 1 apresenta o objetivo e as motivações deste trabalho.

No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica dos assuntos referentes ao trabalho, tais como o processo de perfuração, fluidos de perfuração, reologia de fluidos, perda de circulação e métodos de combate a esta perda.

O Capítulo 3 apresenta a descrição dos equipamentos, dentre os quais se destaca o simulador físico de escoamento em fraturas utilizado na análise do escoamento e da perda de carga nas fraturas. Nesse capítulo também é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos e a discussão dos mesmos.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho.

O Capítulo 6 aborda as sugestões para trabalhos futuros.

No Capítulo 7, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste trabalho, estudou-se o escoamento de suspensões em fraturas. Nesse contexto, esta revisão, além de tratar da cura de fraturas, traz informações sobre fluidos de perfuração e suas propriedades no escoamento em fraturas.

2.1 Fluidos de Perfuração

O método mais utilizado na perfuração de poços corresponde à perfuração rotativa. Nesse método, as formações são fragmentadas por meio da combinação dos efeitos do peso aplicado e da rotação da broca presente na extremidade da coluna de perfuração. A remoção desses fragmentos de rochas é realizada por fluidos de perfuração, que são injetados para o interior da coluna de perfuração por meio de bombas. Esses fluidos são liberados por jatos existentes na broca e retornam à superfície pelo espaço anular formado entre a parede do poço e a coluna de perfuração. A profundidade do poço aumenta na medida em que a fragmentação das rochas e a retirada dos cascalhos vão ocorrendo. Esses cascalhos são armazenados em tanques na superfície. O método da perfuração rotativa é ilustrado na Figura 1 (LIMA, 2001; THOMAS, 2001).

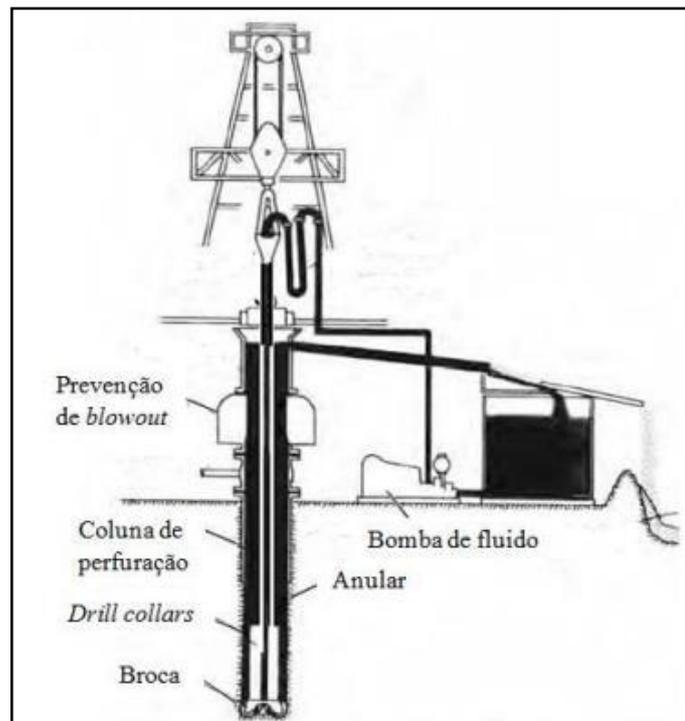


Figura 1. Perfuração rotativa. Adaptado de Bourgoyne *et al.* (1991).

Boa parte dos problemas encontrados durante a perfuração está relacionada ao fluido utilizado. Por isso, a seleção do fluido adequado é fundamental para o sucesso da perfuração. Os principais fatores que devem ser considerados na seleção do fluido são os tipos de formações a serem perfuradas, a faixa de temperatura, dureza, permeabilidade e pressão de poros apresentada pelas formações. Além disso, deve-se considerar a qualidade da água disponível e devem ser realizadas considerações ambientais. Outros fatores a serem considerados correspondem às condições geológicas da formação e às características da perfuração (BOURGOYNE *et al.*, 1991; DEMORE, 2005).

2.1.1 Características dos fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração são conceituados de diferentes maneiras na literatura. Thomas (2001) define fluidos de perfuração como misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e, em alguns casos, gases. Os aspectos que esses fluidos podem apresentar, tais como suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependem do estado físico dos componentes. De acordo com o *American Petroleum Institute* – API, fluido de perfuração é um fluido de circulação que torna viável a operação de perfuração (GUIMARÃES & ROSSI, 2008).

Segundo Thomas (2001), para realizar suas funções, um fluido de perfuração deve apresentar as seguintes características:

- Ser estável quimicamente;
- Estabilizar as paredes do poço, mecânica e quimicamente;
- Facilitar a separação dos sólidos perfurados (cascalhos) na superfície;
- Aceitar qualquer tratamento, físico e químico;
- Ser bombeável;
- Facilitar interpretações geológicas;
- Sustentar as paredes do poço evitando o seu desmoronamento;
- Manter os sólidos em suspensão quando estiver em repouso;
- Ser inerte em relação a danos às rochas produtoras;
- Apresentar baixo grau de corrosão e de abrasão em relação a coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação.

2.1.2 Funções dos fluidos de perfuração

Algumas das principais funções dos fluidos de perfuração consistem em: transportar os cascalhos gerados pela broca até a superfície, resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca. Os fluidos de perfuração também são responsáveis por exercer pressão hidrostática sobre as formações, de modo a evitar o influxo de fluidos indesejáveis (*kick*) e estabilizar as paredes do poço. Além disso, os fluidos de perfuração permitem a coleta de informações geológicas, formam uma torta de filtração semipermeável que sela os poros presentes nas formações e transmitem potência hidráulica para a broca (BOURGOYNE *et al.*, 1991; FINGER & BLANKENSHIP, 2010).

2.1.3 Classificação dos fluidos de perfuração

A classificação dos fluidos de perfuração é baseada no constituinte principal. Assim, eles podem ser classificados em: fluidos base água, fluidos base óleo ou fluidos a base de gás. Geralmente, utiliza-se o termo lama para os fluidos de perfuração cujo constituinte principal é um líquido (água ou óleo) (CAENN & CHILLINGAR, 1996; BALTAR & LUZ, 2003).

Os fluidos base água correspondem aos fluidos nos quais as partículas sólidas encontram-se em suspensão em água doce, água do mar ou salmoura. Alguns dos sólidos presentes na mistura são denominados sólidos ativos por reagir com a água e com os produtos químicos dissolvidos. Os principais exemplos de sólidos ativos correspondem às argilas hidratáveis. A atividade desses sólidos é restrita pelos produtos químicos adicionados ao fluido. Dessa forma, as propriedades do fluido são mantidas. Os sólidos que não sofrem reação são denominados sólidos inertes (DARLEY & GRAY, 1988; BOURGOYNE *et al.*, 1991).

Os fluidos base óleo apresentam composição semelhante a dos fluidos base água. A fase contínua desses fluidos é composta, geralmente, por hidrocarbonetos líquidos, enquanto a fase descontínua é composta por pequenas gotículas de água ou de solução aquosa. Todos os sólidos presentes nesses fluidos são considerados inertes por não reagir com o óleo. Esses fluidos podem ser emulsões água/óleo, com teor de água abaixo de 10 %, ou emulsões inversas, com teor de água de 10 % a 45 % (BOURGOYNE *et al.*, 1991; THOMAS, 2001).

Os fluidos base óleo apresentam muitas vantagens em relação aos fluidos base água, tais como a menor corrosão, alta lubrificidade e a capacidade de causar menos danos à formação. Por outro lado, algumas desvantagens apresentadas pelos fluidos base óleo consistem no alto custo inicial, no alto potencial de perda de circulação e na alta sensibilidade à pressão e à temperatura. Além disso, existem as preocupações ambientais relacionadas ao uso desse tipo de fluido de perfuração. Apesar dessas desvantagens, os fluidos base óleo tem sido utilizados há muitas décadas (GROWCOCK & PATEL, 2011).

Os fluidos a base de gás são utilizados, principalmente, em zonas com perdas de circulação severas e formações produtoras com pressão muito baixa ou formações muito susceptíveis a danos (DARLEY & GRAY, 1988; THOMAS, 2001).

2.2 Perda de Fluidos de Perfuração

Um dos grandes desafios encontrados durante as operações de perfuração corresponde à perda do fluido de perfuração através de poros ou fraturas presentes nas formações rochosas a serem perfuradas. Esse fenômeno é denominado perda de circulação. Essa perda aumenta os custos e diminui a produtividade do poço, além de contribuir para o aumento do tempo não produtivo. Em alguns casos, dependendo da severidade da perda de circulação, o poço pode ser perdido completamente (FINGER & BLANKENSHIP, 2010; DATWANI, 2012).

A perda de circulação é classificada com base na taxa de perda. Considera-se uma perda de circulação pequena quando a taxa de perda é inferior a 10 bbl/h (1,59 m³/h). Para taxas de perda entre 10 e 100 bbl/h (15,9 m³/h), a perda é classificada como parcial. Quando as taxas de perda são superiores a 100 bbl/h (15,9 m³/h), a perda de circulação é considerada severa. Existem perdas de circulação totais ou completas, em que o fluido não retorna à superfície (ALMAGRO *et al.*, 2014; ABBAS *et al.*, 2004).

As perdas de circulação ocorrem de maneira natural, no caso de formações altamente permeáveis ou que apresentam fraturas pré-existentes e cavernas, ou podem ocorrer devido à formação de fraturas induzidas. A identificação do tipo de fratura responsável pela perda de circulação é fundamental para a seleção adequada do método de combate à perda (KUMAR & SAVARI, 2011; FIAGBOR, 2011).

Pode-se definir uma fratura natural como uma descontinuidade planar macroscópica, resultante de uma pressão muito maior do que a resistência da rocha à ruptura. Esse tipo de fratura pode ocorrer em qualquer tipo de formação. Nesse caso, o nível de fluido diminui lentamente. Na medida em que a perfuração continua e uma maior quantidade de fraturas fica exposta ao fluido, pode ocorrer uma perda de circulação total (DATWANI, 2012).

As fraturas induzidas são encontradas com mais frequência em formações frágeis, tais como argilas e carbonatos. Algumas das causas desse tipo de fratura correspondem ao uso de fluidos muito pesados, a irregularidades no poço e à pressão de retorno excessiva. Além disso, geralmente, o próprio processo de perfuração resulta na formação de fraturas induzidas. A pressão necessária para a fratura se propagar é menor do que a pressão necessária para esta se iniciar. Por isso, a propagação das fraturas induzidas ocorre de maneira relativamente fácil (COOK *et al.*, 2012; HOWARD & SCOTT, 1951).

As cavernas apresentam grandes proporções e ocorrem normalmente em formações de calcário. O selamento desse tipo de fratura é muito difícil, já que a perda de circulação ocorre

de maneira muito rápida, devido às grandes proporções apresentadas. As formações inconsolidadas, por sua vez, apresentam alta permeabilidade, o que ocasiona uma alta perda do fluido de perfuração. Nesse caso, se não for realizada nenhuma medida de combate ao problema, a continuidade da perfuração pode resultar na perda total do fluido (DATWANI, 2012).

Diversos métodos podem ser utilizados no combate à perda de circulação. A classificação desses métodos baseia-se no tempo em que são aplicados. Os métodos utilizados antes da ocorrência da perda de circulação são denominados métodos de prevenção, enquanto os métodos de correção são aplicados após a ocorrência dessa perda. Na escolha do tratamento adequado de combate à perda de circulação deve-se considerar, principalmente, o tipo e a causa da perda, além das características da formação (ALSABAGH *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2009; ALMAGRO *et al.*, 2014).

O objetivo geral dos métodos de prevenção corresponde ao fortalecimento do poço. Esse fortalecimento pode ser definido como uma combinação de técnicas usadas para selar eficientemente fraturas induzidas durante a perfuração. Isso aumenta a “gaiola de tensão” na região próxima ao poço, o que aumenta a capacidade de controle da pressão no poço. Além disso, o fortalecimento do poço aumenta a resistência da formação à propagação da fratura. O principal método de prevenção de perdas de circulação consiste na utilização de materiais de fortalecimento de poço (*WSM's- wellbore strengthening materials*). Esses materiais são responsáveis pelo selamento de fraturas induzidas durante o processo de perfuração (ALSABA & NYGAARD, 2014; KUMAR & SAVARI, 2011; VAN OORT *et al.* 2009).

Os métodos de correção de perdas de circulação incluem a utilização de materiais de controle de perda (*LCM's- lost circulation materials*). Esses materiais são adicionados ao fluido de perfuração com o objetivo de selar fraturas naturais pré-existentes nas formações e evitar o crescimento de fraturas induzidas formadas durante a perfuração. A correção das perdas de circulação pode ser realizada com o uso de uma grande variedade de materiais de controle de perda. A seleção dos materiais de controle de perda adequados deve considerar, principalmente, o custo e a disponibilidade (PILEHVARI & NYSHADHAM, 2002; JIAO & SHARMA, 1996).

2.2.1 Fluidos de combate à perda de circulação

Os materiais de controle de perda (LCM's) são classificados de acordo com suas características físicas e químicas. Assim, eles dividem-se em: materiais de controle de perda convencionais, *Squeezes* de LCM's para elevada perda de fluido, pastas de precipitados químicos, lamas de polímeros reticulados e pastas dilatantes (ONYEKWERE, 2002).

Os materiais de controle de perda convencionais são divididos, com base em suas aparências, em: materiais granulares, materiais na forma de flocos, materiais fibrosos e misturas entre eles (CANSON, 1985).

O combate à perda de circulação pelos materiais granulares ocorre pela vedação da superfície da formação e pela formação de um tampão no interior da fratura. O selamento dentro das fraturas é mais eficiente, pois a vedação formada tem maior durabilidade. Em alguns casos, nem mesmo movimentos da broca são capazes de remover o tampão formado. Os materiais granulares são utilizados com frequência em processos de fortalecimento de poço. Isso se deve à alta rigidez e maior resistência de esmagamento em relação aos outros materiais de controle de perda convencionais. Alguns exemplos de materiais granulares utilizados para controlar a perda de circulação são: o grafite, cascas de nozes, carbonato de cálcio, bentonita e asfalto (FIAGBOR, 2011; NAYBERG & PETTY, 1986; WHITE, 1956).

Os materiais na forma de flocos caracterizam-se pelo aspecto fino e plano. Esses materiais apresentam uma grande área superficial e diferentes graus de rigidez. Alguns

exemplos de materiais em flocos são: o celofane, a mica, espigas de milho trituradas e carbonatos de cálcio em flocos (GOCKEL *et al.*, 1987; HOWARD & SCOTT, 1951; NAYBERG & PETTY, 1986).

Os materiais fibrosos são alongados, finos e flexíveis e apresentam diversos tamanhos. Esses materiais, apesar de serem pouco rígidos, apresentam alta eficiência no combate a perdas de circulação em formações porosas e altamente permeáveis. A alta eficiência desses materiais pode ser explicada pelo fato de eles formarem um tampão tipo tapete sobre as aberturas dos poros. Esse tampão reduz o tamanho das aberturas da formação, permitindo a deposição das partículas menores, que formam uma torta de filtração sobre as fraturas. Alguns exemplos de LCM's fibrosos são: as fibras de celulose, fibras de nylon, serragem e papel picado (FIAGBOR, 2011; WHITE, 1956; HOWARD & SCOTT, 1951; NAYBERG & PETTY, 1986).

As misturas de LCM's são utilizadas por apresentarem uma melhor capacidade de eliminar a perda de circulação. Essa capacidade se deve à diferença de propriedades e de tamanhos de partículas dos componentes da mistura. Por outro lado, se a distribuição granulométrica não for adequada, a mistura de LCM's pode apresentar um desempenho ruim. Diversos estudos são utilizados para avaliar a eficiência desses materiais no selamento de fraturas. Além disso, esses estudos são utilizados para verificar a distribuição ótima de tamanho de partículas desses materiais, de forma a melhorar seu desempenho (NAYBERG & PETTY, 1986; WITHFILL, 2008; VAN OORT *et al.*, 2007; WHITE, 1956).

Os *squeezes* para alta perda de fluido são misturas de LCM's. Essas misturas são utilizadas, principalmente, no combate a perdas de circulação severas ou totais ocorridas, por exemplo, em formações altamente permeáveis. Geralmente, há a necessidade de procedimentos especiais para realizar a compressão (*squeeze*) desses materiais para o interior das zonas de perda de circulação. Um dos principais exemplos desse tipo de material de controle de perda corresponde à mistura entre carbonato de cálcio e atapulgita, um silicato complexo de magnésio constituído por cristais alongados (ALSABA & NYGAARD, 2014; ONYEKWERE, 2002).

As pastas de precipitados químicos são combinações de pastas de silicatos ou aditivos de látex comercial utilizados na cimentação. Esses fluidos misturam-se com pastas que contém cloreto de cálcio e formam um tampão viscoso que pode selar muitas zonas de perda de circulação (ONYEKWERE, 2002).

Os polímeros reticulados são formados pela ligação entre as cadeias de dois polímeros independentes. As lamas compostas por esse tipo de polímero podem ser utilizadas no combate a perdas de fluidos de perfuração base água, base óleo ou sintéticos. Por outro lado, essas lamas, por não serem biodegradáveis, devem ser utilizadas com muito cuidado. (BRUTON *et al.*, 2001).

As lamas dilatantes são compostas por polímeros e sólidos de tamanhos específicos, os quais podem ser solúveis ou insolúveis em água. Esses fluidos tornam-se mais viscosos na medida em que passam por regiões de alto cisalhamento na broca. Isso permite que esses fluidos sejam eficientes no combate a perda de circulação em muitas zonas de perda (ONYEKWERE, 2002).

A eficiência dos materiais de controle de perda e dos materiais de fortalecimento de poço depende de muitos fatores. Dentre esses fatores, destacam-se: o tamanho das partículas, a distribuição granulométrica, a concentração e a forma das partículas. Na medida em que a pressão de bombeio aumenta, as fraturas tendem a se propagar, aumentando suas dimensões. Com isso, torna-se necessário uma maior quantidade de partículas grandes. Por outro lado, se essas partículas estiverem em excesso, a transmissão de pressão pode diminuir. Isso explica a influência da distribuição granulométrica no desempenho dos LCM's e WSM's. O efeito da concentração na eficiência dos materiais de combate à perda de circulação relaciona-se ao

tamanho das fraturas. Geralmente, no entanto, para concentrações superiores a 40 lbm/bbl (114,12 kg/m³), dificilmente são obtidas melhorias (FREIDHEIM *et al.*, 2008; SANDERS *et al.*, 2008). Duque Neto (2015) avaliou a eficiência de diversos materiais particulados no combate à perda de circulação. Esses materiais eram compostos por partículas de carbonato de cálcio de diferentes formas. Os materiais compostos por partículas que apresentavam forma laminar foram capazes de selar as fraturas. O material que apresentava partículas granulares, por outro lado, não se mostrou eficiente no selamento das fraturas. Os resultados desse trabalho demonstram a influência da forma das partículas na eficiência dos materiais de controle de perda.

2.3 Critérios de Transição entre os Regimes de Escoamento

De acordo com Bird *et al.* (2013), a natureza do escoamento dos fluidos depende, principalmente, da relação entre forças viscosas e forças inerciais. Para os fluidos Newtonianos, essa relação é traduzida por um adimensional, conhecido como número de Reynolds, dado pela Equação (1)

$$Re = \frac{D_H v \rho}{\mu}, \quad (1)$$

onde:

Re- número de Reynolds;
D_H- diâmetro hidráulico;
v- velocidade de escoamento do fluido;
ρ- massa específica do fluido;
μ- viscosidade do fluido.

O diâmetro hidráulico para escoamentos com áreas da seção circulares corresponde ao diâmetro da tubulação. Segundo Bourgoyne *et al.* (1991), para escoamentos em regiões anulares que apresentam seções retangulares, o diâmetro hidráulico pode ser determinado com base na teoria do raio hidráulico. Dessa forma, pode-se determinar o diâmetro hidráulico aplicado a uma fratura por meio da Equação (2), que corresponde à razão entre a área da seção transversal e o perímetro molhado da região anular.

$$D_H = 4R_H = 4 \frac{wH}{2w + 2H}, \quad (2)$$

onde:

D_H- diâmetro hidráulico;
R_H- raio hidráulico;
w- profundidade da fratura;
H- abertura da fratura.

O escoamento de fluidos Newtonianos é considerado laminar se o número de Reynolds é inferior a 2100. Esse regime de escoamento caracteriza-se por ser um escoamento ordenado, no qual as partículas fluidas movimentam-se em camadas lisas, ou lâminas. Para valores de números de Reynolds entre 2100 e 4000, tem-se o regime de transição. Nesse

regime de escoamento, as partículas fluidas começam a deslocar-se das camadas ordenadas e o movimento começa a tornar-se mais aleatório. O regime turbulento é caracterizado pelo movimento rápido e desordenado das partículas fluidas, que se misturam enquanto se movimentam ao longo do escoamento. Nesse regime, os valores dos números de Reynolds são superiores a 4000 (BIRD *et al.*, 2013).

Para fluidos não-Newtonianos, o número de Reynolds não é suficiente para definir a transição entre o regime laminar e o regime turbulento. Nesse caso, os regimes de escoamento são definidos pela combinação entre os parâmetros reológicos do fluido e o número de Reynolds, modificado de acordo com o modelo reológico. Para isso, podem ser utilizadas diversas correlações presentes na literatura (BIRD *et al.*, 2013).

2.4 Balanço de Energia no Escoamento de Fluidos

De acordo com Fox (1998), o balanço de energia mecânica para o escoamento isotérmico e permanente de um fluido incompressível entre dois pontos quaisquer, dados por 1 e 2, sem fornecimento de energia é dado pela Equação (3)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\langle v_1 \rangle^2}{2g} + z_1 - h_d - h_s = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\langle v_2 \rangle^2}{2g} + z_2, \quad (3)$$

onde:

P_1, P_2 - pressões nos pontos 1 e 2;

$\langle v_1 \rangle, \langle v_2 \rangle$ - velocidades médias nos pontos 1 e 2;

z_1, z_2 - cotas nos pontos 1 e 2;

ρ - massa específica do fluido;

g - aceleração da gravidade;

h_d - perda de carga distribuída entre os pontos 1 e 2;

h_s - perda de carga localizada entre os pontos 1 e 2.

A perda de carga distribuída (h_d) é resultante do atrito do fluido ao longo do trecho reto. A perda de carga localizada (h_s) é ocasionada pela presença de acidentes no sistema, tais como válvulas, joelhos e reduções. O somatório desses dois tipos de perda de carga corresponde à perda de carga total entre os pontos 1 e 2 (FOX, 1998).

Segundo Bird *et al.* (2013), o cálculo da perda de carga distribuída pode ser realizado por meio da Equação (4)

$$h_d = 4f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\langle v \rangle^2}{2g}, \quad (4)$$

onde:

h_d - perda de carga distribuída;

$\langle v \rangle$ - velocidade média do fluido;

L - comprimento da tubulação;

D - diâmetro da tubulação;

g - aceleração da gravidade;

f- número adimensional, denominado fator de atrito de Fanning.

Além do fator de atrito de Fanning, também é encontrada na literatura a definição do fator de atrito de Darcy (f_d). A relação entre os dois fatores de atrito presentes na literatura é dada pela Equação (5)

$$f_d = 4f, \quad (5)$$

onde:

f_d - fator de atrito de Darcy;
f- fator de atrito de Fanning.

Segundo Munson *et al.* (2002), as perdas de carga localizadas podem ser determinadas por meio da Equação (6)

$$h_s = K \frac{\langle v \rangle^2}{2g}, \quad (6)$$

onde:

h_s - perda de carga localizada;
 $\langle v \rangle$ - velocidade média do fluido;
g- aceleração da gravidade;
K- coeficiente de perda de carga, definido como o número de cargas cinéticas perdidas.

De acordo com Munson *et al.* (2004), além da Equação (6), pode-se determinar a perda de carga localizada pela Equação (7)

$$h_s = 4f \frac{L_{eq}}{D} \frac{\langle v \rangle^2}{2g}, \quad (7)$$

onde:

h_s - perda de carga localizada;
 $\langle v \rangle$ - velocidade média do fluido;
 $\frac{L_{eq}}{D}$ - comprimento equivalente do acidente em diâmetros de tubo reto que causa a mesma perda de carga quando submetido às mesmas condições de escoamento;
g- aceleração da gravidade;
f- fator de atrito de Fanning.

2.5 Fundamentos da Reologia

O termo “Reologia” significa o estudo da deformação e do escoamento da matéria. Essa definição foi introduzida por Bingham em 1929, ano em que a Sociedade Americana de Reologia foi fundada. Nos últimos anos, vem sendo realizados muitos avanços na reologia de

polímeros e de suspensões. Além disso, a reologia tem sido cada vez mais utilizada nos processos químicos industriais (BARNES *et al.*, 1989).

Um fluido pode ser definido como uma substância que sofre deformação contínua sob a ação de uma tensão cisalhante. A classificação geral dos fluidos baseia-se na relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação. Os fluidos para os quais a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação é linear são denominados fluidos Newtonianos. Para os fluidos não-Newtonianos, essa relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação é não linear (FOX, 1998; MUNSON *et al.*, 2004).

Alguns fluidos apresentam comportamento reológico dependente do tempo. Nesse caso, a viscosidade aparente depende do tempo de aplicação do cisalhamento. Esses fluidos podem ser classificados em fluidos tixotrópicos ou fluidos reopéticos. A tixotropia pode ser definida como a diminuição gradual da viscosidade sob ação de uma tensão cisalhante, seguida por uma recuperação gradual da estrutura quando essa tensão é removida. Os fluidos reopéticos caracterizam-se pelo aumento da viscosidade com o tempo de cisalhamento. Nesse caso, ocorre o comportamento oposto ao dos fluidos tixotrópicos. A tixotropia é um comportamento comum para muitos líquidos, enquanto a reopexia é encontrada com muito menos frequência (BARNES, 2000; SCHRAMM, 2000).

No caso dos fluidos independentes do tempo, o comportamento reológico não depende do tempo e sim da taxa de cisalhamento. A relação entre tensão e taxa de cisalhamento para esses fluidos pode ser modelada por diversas equações ou modelos reológicos (FOX, 1998). Um dos principais modelos utilizados corresponde ao modelo da potência (*power-law*), dado pela Equação (8)

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n, \quad (8)$$

onde:

τ - tensão de cisalhamento;
 $\dot{\gamma}$ - taxa de deformação;
 n - índice de comportamento;
 k - índice de consistência.

O modelo da potência corresponde a uma boa aproximação dos dados de viscosidade e taxa de cisalhamento no processamento de muitos líquidos poliméricos e dispersões. Os fluidos cujo comportamento reológico pode ser modelado por essa equação são divididos em pseudoplásticos e dilatantes (FOX, 1998; MACOSKO, 1994).

Os fluidos pseudoplásticos apresentam índice de consistência menor que 1 e se caracterizam pela diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento. Muitas substâncias como emulsões, suspensões e dispersões com alta importância comercial apresentam esse comportamento (SCHRAMM, 2000).

Os fluidos dilatantes, para os quais o valor de n é superior a 1, são caracterizados pelo aumento da viscosidade aparente na medida em que a taxa de cisalhamento aumenta. Esse comportamento é mais raro de ser encontrado, porém alguns exemplos de fluidos dilatantes são as misturas água-frutose e água-areia (areia movediça) (SCHRAMM, 2000; MUNSON *et al.*, 2004).

Outro modelo reológico frequentemente utilizado corresponde ao modelo de Bingham, dado pela Equação (9)

$$\tau = k\dot{\gamma} + \tau_0, \quad (9)$$

onde:

τ - tensão de cisalhamento;

$\dot{\gamma}$ - taxa de deformação;

τ_0 - tensão crítica, também denominada limite de escoamento;

k -viscosidade plástica.

A tensão crítica corresponde à tensão necessária para o fluido começar a escoar, sendo que abaixo desse valor, o material comporta-se como sólido (STEFFE, 1996).

Um modelo que também é utilizado corresponde ao modelo de Herschel-Buckley, dado pela Equação (10)

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n + \tau_0, \quad (10)$$

onde:

τ - tensão de cisalhamento;

$\dot{\gamma}$ - taxa de deformação;

τ_0 - tensão crítica;

k - índice de consistência;

n - índice de comportamento.

A Figura 2 ilustra a variação da tensão de cisalhamento e da viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para os fluidos Newtonianos e alguns fluidos não-Newtonianos.

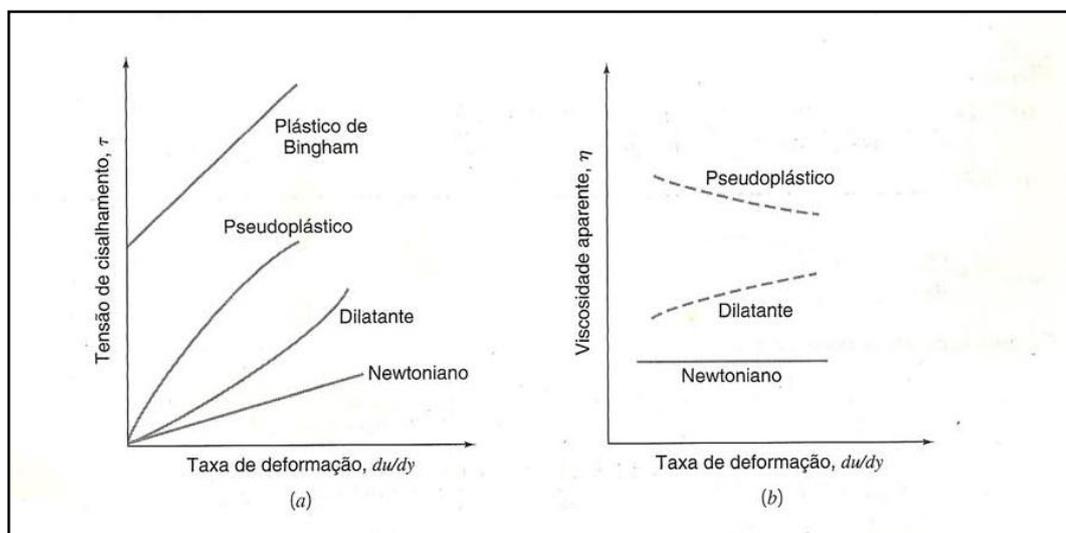


Figura 2. (a) Tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos. (b) Viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos. Fonte: FOX (1998).

Além dos fluidos dependentes e independentes do tempo, existem fluidos denominados viscoelásticos. Esses fluidos apresentam, simultaneamente, propriedades de fluido viscoso e de sólido elástico, pois após sofrerem a deformação, retornam parcialmente ao seu estado original, quando a tensão aplicada é retirada (FOX, 1998; BARNES, 2000).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foram realizados experimentos de escoamento de suspensões em fraturas. As suspensões foram preparadas adicionando Goma Xantana em água e, posteriormente, materiais obturantes de diferentes granulometrias. Este capítulo apresenta a descrição da unidade experimental, assim como as técnicas e métodos utilizados na condução do trabalho experimental.

3.1 Descrição da Unidade Experimental

Para a realização do estudo proposto, foi construída uma unidade experimental composta pelo simulador de escoamento em fraturas (SEF), por um tanque de armazenamento/mistura, tubos de ferro galvanizado, mangueiras industriais de 1300 psi. A unidade apresenta uma bomba de deslocamento positivo do tipo helicoidal, fabricada pela WEATHERFORD de 25 HP de potência. Essa bomba permite a circulação do fluido de perfuração do tanque de mistura/armazenamento para o sistema com vazões de até 20 m³/h e pressões de recalque da ordem de 12 kgf/cm².

O esquema da circulação dos fluidos na unidade experimental, assim como no simulador de escoamento em fraturas, pode ser observado na Figura 3.

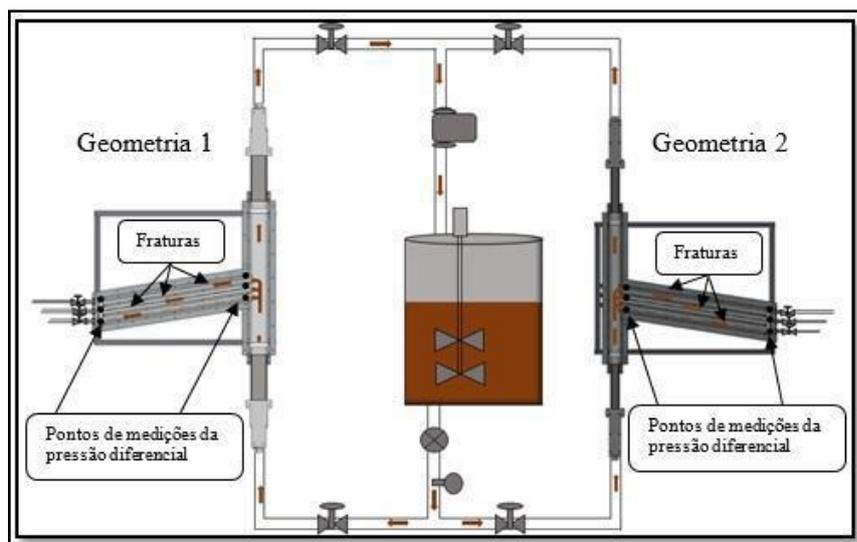


Figura 3. Esquema de circulação dos fluidos na unidade experimental e no SEF. Fonte: Duque Neto (2015).

A bomba, ilustrada na Figura 4, conecta-se a uma tubulação horizontal de 1", que se divide em duas linhas. A primeira linha corresponde a uma tubulação de 2" de by-pass, pela qual o fluido retorna ao tanque de alimentação. A principal função dessa linha consiste em aliviar o sistema para o caso da pressão atingir valores maiores do que 150 psi. A outra linha consiste em uma tubulação que sofre uma redução de 1" para um tubo de 5,5 cm de comprimento. Esse tubo conecta-se a uma mangueira industrial de 3 m de comprimento, que alcança a parte inferior da região anular do SEF. Após atingir a região anular, o fluido percorre uma mangueira industrial de 9 m de comprimento presente na parte superior do SEF. Posteriormente, o fluido segue para uma tubulação de 2,25 m e uma mangueira de 2,72 m de comprimento até retornar ao tanque de alimentação. A divisão da tubulação horizontal em duas linhas pode ser observada na Figura 5.

A pressão de saída da bomba foi monitorada por meio de um transdutor de pressão manométrico da marca SMAR modelo LD 301M. Esse transdutor de pressão foi instalado logo após a saída da bomba.



Figura 4. Bomba helicoidal de deslocamento positivo.



Figura 5. Divisão da tubulação horizontal em duas linhas.

O ajuste da velocidade de rotação da bomba é realizado pela utilização do inversor de frequência instalado no painel de controle, ilustrado na Figura 6. Com esse ajuste da velocidade da bomba, pode-se alterar a velocidade de escoamento do fluido e, consequentemente, a vazão, o que permite a análise da perda de carga nas fraturas.



Figura 6. Inversor de frequência.

O tanque de mistura/armazenamento utilizado foi fabricado em aço inox e apresenta um volume útil de 200 L. O fluido é homogeneizado no tanque por um sistema de agitação com motor de 3,3 kW de potência e velocidade de rotação de até 1800 rpm. O tanque possui uma camisa, por meio da qual ele pode ser aquecido por três resistências elétricas de 5000 kW ou refrigerado pela circulação de água gelada. A velocidade de agitação pode ser ajustada no painel de controle acoplado ao tanque. Esse painel também é utilizado para controlar a temperatura do produto e a temperatura da camisa. O tanque de mistura/armazenamento e o painel de controle acoplado ao mesmo podem ser observados na Figura 7 e na Figura 8, respectivamente.



Figura 7. Tanque da unidade experimental.



Figura 8. Painel de controle acoplado ao tanque.

O simulador de escoamento em fraturas (SEF) apresenta configuração com similaridade com o escoamento de fluidos na região anular do poço real. O equipamento apresenta duas seções verticais de forma retangular, que representam regiões anulares de um poço aberto de 12 ¼ e 8 ½ polegadas com uma coluna de perfuração de 5 polegadas. As geometrias das regiões anulares representadas pelo simulador e as seções transversais dessas regiões são apresentadas na Figura 9.

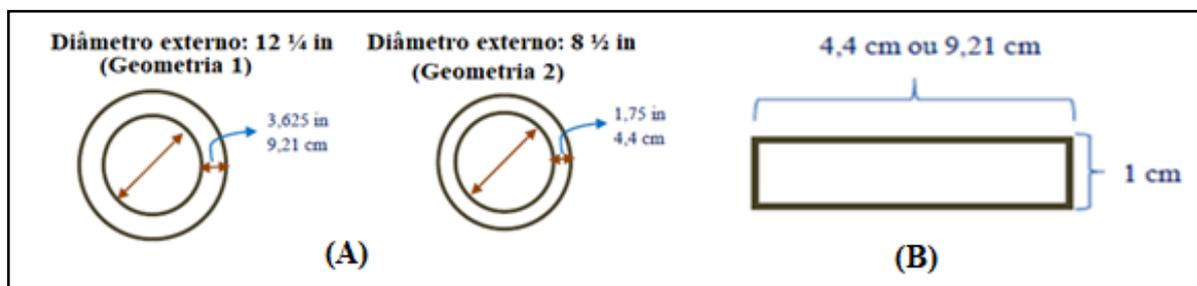


Figura 9. (A) Geometrias das regiões anulares representadas pelo SEF. (B) Seções transversais das regiões anulares representadas pelo SEF. Fonte: Duque Neto (2015).

As duas seções verticais do equipamento possuem três saídas laterais de geometria irregular. Essas saídas laterais simulam fraturas de aberturas de 2 mm, 5 mm e 10 mm e apresentam 9 ° de inclinação e 1,5 m de comprimento. As aberturas dessas fraturas representam valores médios das encontradas com frequência nas formações de carbonato de cálcio presentes na região do pré-sal. Na região terminal das saídas laterais encontram-se

válvulas, que regulam a saída do fluido das fraturas. Para realizar a análise da perda de carga durante o escoamento das suspensões dos materiais particulados, foi conectado um transdutor de pressão diferencial em pontos de medição instalados nas extremidades de cada fratura.

O simulador de escoamento em fraturas apresenta paredes frontais em acrílico. Esse material, apesar de limitar a pressão máxima de operação em, aproximadamente, 150 psi, facilita a visualização do escoamento do fluido. A estrutura do equipamento foi fabricada em aço inox com o objetivo de evitar a corrosão. A Figura 10 pode ser observada uma visão geral do simulador.



Figura 10. Visão geral do SEF: (A) anular 12 ¼ . (B) anular 8 ½ .

O transdutor de pressão diferencial da marca SMAR modelo LD301D com selo remoto foi conectado nas extremidades de cada fratura. Esse transdutor fornece a diferença de pressão imposta no interior das fraturas, o que permite a determinação da perda de carga durante o escoamento. A utilização desse modelo de transdutor de pressão diferencial forneceu bons resultados em pesquisas realizadas com fluidos de perfuração por Rocha (2008) e Braga (2009). Paraíso (2011) também obteve bons resultados com o uso desse transdutor no estudo do escoamento de pastas de cimento. Com a presença do selo remoto neste transdutor de pressão diferencial, a leitura é realizada por meio de uma membrana interna de inox, denominada diafragma. Isso impede o contato direto com a célula de medição do aparelho (SMAR, 2008). O transdutor de pressão diferencial utilizado pode ser observado na Figura 11.

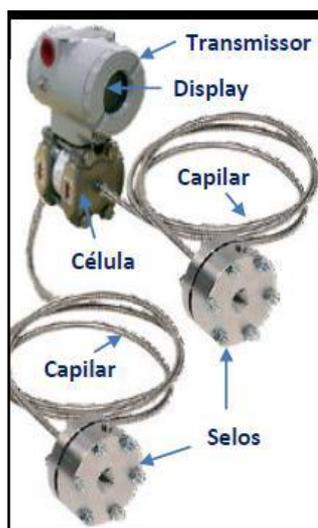


Figura 11. Transdutor de pressão diferencial com selo remoto. Fonte: Adaptado do Manual da SMAR (2016).

O fluido realiza um “golpe” no diafragma presente no interior do selo remoto, o que produz dados ou sinais. Esses sinais são transferidos até a célula do transmissor pelo capilar. A célula do transmissor transforma e transmite os sinais correspondentes para o display presente no transmissor. De acordo com a empresa SMAR, solicita-se que a faixa de calibração para este transdutor seja de 0 a 7 kgf/cm². Porém, é possível alterar essa faixa para intervalos entre 0 e 24 kgf/cm². Os pontos de medição do transdutor de pressão diferencial, posicionados nas extremidades de cada fratura, podem ser observados na Figura 12.

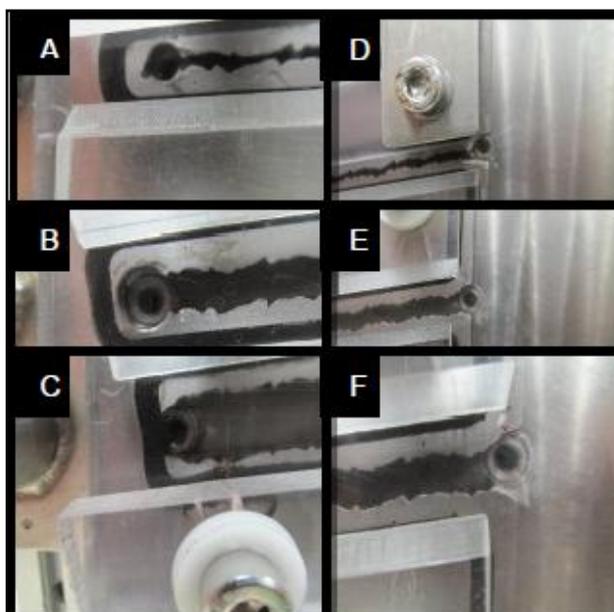


Figura 12. Pontos de medição da pressão diferencial: (A), (B) e (C) posicionados na saída das fraturas; (D), (E) e (F) instalados na entrada das fraturas. Fonte: Duque Neto (2015).

3.2 Metodologia Experimental

3.2.1 Materiais de combate à perda de circulação

Os materiais de controle de perda avaliados apresentavam forma laminar a base de flocos de carbonato de cálcio e diferentes faixas de distribuição de tamanho de partículas. Esses produtos foram selecionados devido à sua ampla faixa de distribuição granulométrica e ao seu uso frequente em poços nos quais ocorrem perdas de circulação moderadas. Duque Neto (2015) analisou as imagens das partículas desses materiais particulados. As formas das partículas dos materiais utilizados podem ser observadas na Figura 13.

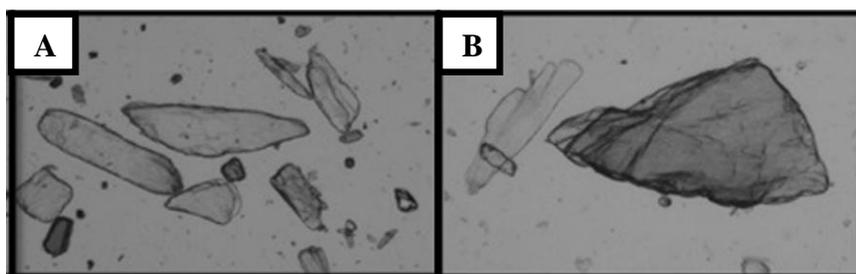


Figura 13. Imagens obtidas por MEV, com ampliação de 1000x. (A) Imagem do carbonato de cálcio laminar fino. (B) Imagem do carbonato de cálcio laminar médio. Fonte: Duque Neto (2015).

3.2.2 Determinação da granulometria

A separação por tamanho das partículas foi realizada por meio do método do peneiramento, utilizando diferentes conjuntos de peneiras presentes em um agitador eletromagnético da marca Bertel. O agitador pode ser observado na Figura 14.



Figura 14. Agitador eletromagnético. Fonte: Bertel (2016).

3.2.3 Massa específica dos sólidos

As massas específicas dos materiais obturantes foram determinadas pelo método da picnometria, utilizando-se um picnômetro de 150 mL. Primeiramente, realizou-se a calibração do picnômetro. Para isso, foi aferida a massa do picnômetro vazio (m_p) e, posteriormente, a massa do picnômetro com água (m_{pL}). Depois de calibrar o picnômetro, foram determinadas as massas específicas dos materiais de controle de perda avaliados. Dessa forma, aferiu-se a massa do picnômetro com uma determinada quantidade de sólidos (m_{ps}). O picnômetro foi preenchido com água e foi aferida a massa do sistema picnômetro+sólidos+água (m_{psL}). Com os dados obtidos, as massas específicas dos materiais particulados foram determinadas pela Equação 11

$$\rho_s = \frac{m_{ps} - m_p}{(m_{pL} - m_p) - (m_{psL} - m_{ps})} \times \rho_{ref}, \quad (11)$$

onde:

- ρ_s - massa específica dos sólidos;
- m_p - massa do picnômetro vazio;
- m_{ps} - massa do picnômetro com sólidos;
- m_{pL} - massa do picnômetro com água;
- m_{psL} - massa do picnômetro com sólidos e água;
- ρ_{ref} - massa específica de referência.

Para a realização dos cálculos, foi utilizada como massa específica de referência a massa específica da água, que equivale a 1 g/cm^3 .

3.2.4 Preparação dos fluidos

As composições dos fluidos preparados para a realização dos testes no SEF encontram-se na Tabela 1. Todos os fluidos foram preparados com adição de 150 L de água. O fluido 1 (água industrial pura) e o fluido 2 (solução aquosa de Goma Xantana) correspondem aos fluidos “brancos” utilizados para a validação da unidade experimental. A concentração de 2 lbm/bbl ($5,71 \text{ kg/m}^3$) da solução de Goma Xantana corresponde à concentração típica utilizada desse polímero em fluidos de perfuração. Os fluidos de 3 a 15 correspondem às suspensões aquosas de carbonato de cálcio laminar fino. Foi preparada uma suspensão aquosa de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio, denominada fluido 16. Para este material, foi utilizada somente uma suspensão, pois esta foi capaz de selar rapidamente as três fraturas. Assim, o estudo do escoamento foi feito apenas com os fluidos contendo material fino. As suspensões dos materiais obturantes foram preparadas a partir da adição desses materiais particulados à solução aquosa de Goma Xantana. As concentrações utilizadas dos materiais de controle de perda basearam-se no manual do fabricante (BAKER HUGHES, 2016).

Tabela 1. Composição dos fluidos preparados adicionando 2,0 lbm/bbl ($5,71 \text{ kg/m}^3$) de GX em água e os sólidos.

Fluido	CF (lbm/bbl)
Fluido 3	1,0
Fluido 4	2,0
Fluido 5	3,0
Fluido 6	4,0
Fluido 7	5,0
Fluido 8	6,0
Fluido 9	7,0
Fluido 10	8,0
Fluido 11	9,0
Fluido 12	12,0
Fluido 13	15,0
Fluido 14	16,0
Fluido 15	18,0

*GX: Goma Xantana

*CF: Carbonato de cálcio laminar fino

3.2.5 Caracterização dos fluidos

3.2.5.1 Massa específica

Com o objetivo de determinar as massas específicas reais dos fluidos, estes foram pesados em uma balança de lama Fann modelo 140, ilustrada na Figura 15. A massa específica do fluido é determinada por meio da observação da marcação presente no braço da balança, após esta ser equilibrada pelo ajuste da peça móvel.



Figura 15. Balança de lama Fann modelo 140. Fonte: Fann (2016).

3.2.5.2 Temperatura

As temperaturas dos fluidos durante os experimentos realizados no simulador foram medidas por um termômetro portátil à prova d'água com sensor, do fabricante Traceable®, que pode ser observado na Figura 16.



Figura 16. Termômetro portátil Traceable®.

3.2.5.3 Reologia

A solução de Goma Xantana foi hidratada com aproximadamente 200 mL de água na velocidade de rotação de 13000 rpm, no misturador Hamilton Beach-Fann® (Figura 17), durante 10 minutos. Após esse intervalo de tempo, completou-se o volume com água até que se atingisse 300 mL. Os materiais particulados foram adicionados aos poucos e sob agitação constante, sendo a velocidade de rotação alternada entre 13000 e 16000 rpm. Após a adição completa dos materiais particulados, para garantir a homogeneização dos fluidos, alterou-se a velocidade de rotação para 18000 rpm durante 10 minutos.



Figura 17. Agitador Hamilton Beach-Fann®.

Após serem deixados em repouso por 20 minutos, os fluidos foram transferidos para o copo do viscosímetro FANN modelo 35A (Figura 18), com o objetivo de determinar o comportamento reológico dos fluidos. Esse viscosímetro trabalha com taxas de cisalhamento controladas e com o sistema Couette. O cilindro externo, denominado rotor, cujo raio equivale a $1,84 \times 10^{-2}$ m, gira a uma velocidade constante e pré-selecionada. O cilindro interno, denominado “bob”, de raio equivalente a $1,72 \times 10^{-2}$ m, permanece estático. Com a rotação do cilindro externo, é produzido um torque no cilindro interno, que tem seu movimento restringido por uma mola conectada a um ponteiro. Esse ponteiro indica a deformação angular gerada pelo cisalhamento transmitido ao “bob” pelo fluido. O viscosímetro apresenta um sistema de engrenagens e motor. Esse sistema controla a velocidade de rotação, que pode variar conforme os valores de 3, 6, 100, 200, 300 e 600 rpm.



Figura 18. Viscosímetro FANN 35A.

Os ensaios reológicos foram realizados de maneira ascendente, ou seja, da menor para a maior velocidade de rotação. Para cada velocidade de rotação, foi aguardado um intervalo de 20 segundos antes da leitura do ângulo de deflexão. Com os valores de velocidade de rotação e ângulo de deflexão, podem ser calculadas a tensão e a taxa de cisalhamento, por meio das Equações 12 e 13, respectivamente (FANN, 1996).

$$\tau = k_1 k_2 \theta, \quad (12)$$

$$\gamma = k_3 N, \quad (13)$$

onde:

k_1 ; k_2 ; k_3 - constantes do equipamento;

τ - tensão de cisalhamento (Pa);

γ - taxa de cisalhamento (s^{-1});

θ - ângulo de deflexão ($^\circ$);

N - velocidade de rotação (rpm).

As constantes do equipamento dependem do modelo do rotor, do “bob” e da mola de torção utilizados, que, nesse caso, correspondem aos modelos R1, B1 e F1, respectivamente. Na Tabela 2, são apresentados os valores das constantes do equipamento utilizado.

Tabela 2. Constantes do viscosímetro FANN 35A.

Constante	Valor	Unidade
k_1	386	(dina.cm)/defl
k_2	0,0132	$1/cm^3$
k_3	1,7023	1/s.rpm

Os dados experimentais obtidos foram ajustados ao modelo Herschell-Buckley, a partir da utilização do software STATISTICA® 7.0.

3.2.6 Ensaios na unidade experimental

Realizaram-se medições de vazão mássica e pressão diferencial nas fraturas de 2 mm, 5 mm e 10 mm. A determinação da pressão diferencial foi realizada por um transdutor de pressão diferencial conectado às extremidades de cada fratura. A vazão foi determinada pela relação entre a massa de fluido coletada e o tempo decorrido para a coleta dessa massa de fluido. A massa de fluido coletada foi medida em uma balança móvel de piso da marca Digi-Tron®, apresentada na Figura 19.

Para a validação da unidade experimental, foram realizados testes iniciais com 150 L de água industrial e com o mesmo volume de solução aquosa de 2 lbm/bbl ($5,71 \text{ kg/m}^3$) de Goma Xantana. Essa solução foi preparada no tanque de mistura/armazenamento com um tempo de agitação de 2 h e velocidade de rotação de 1080 rpm. Após ser preparada, a solução de Goma Xantana foi deixada em repouso por 24 h para hidratação do polímero.

Os experimentos iniciaram-se com a circulação do fluido, na menor vazão utilizada, durante 3 minutos com as fraturas fechadas. Após esse intervalo, com as fraturas fechadas, foi medida a vazão mássica de retorno do fluido pelo anular. Essa vazão foi determinada pela relação entre a massa de fluido coletada e um intervalo de tempo de 15 segundos. A vazão total corresponde à soma da vazão no anular e da vazão na fratura, quando esta se encontra

aberta. O controle das vazões utilizadas foi realizado por meio do ajuste da velocidade de rotação da bomba e da válvula de by-pass. Foram utilizados valores de vazão de forma a representar valores médios daqueles encontrados nas operações reais em fraturas, os quais se encontram na ordem de 0,10 kg/s. Assim, utilizaram-se as seguintes vazões nos “anulares”: 0,06, 0,13, 0,17, 0,21, 0,25 e 0,30 kg/s. Após a circulação dos fluidos com a fratura fechada, a fratura de 10 mm foi aberta e foram medidas a vazão e a pressão diferencial na fratura durante 10 minutos. Os dados foram registrados nos seguintes intervalos: 0-1, 1-3, 3-6, 6-8 e 8-10 minutos. Após a realização dos testes para a fratura de 10 mm, o procedimento experimental foi repetido para as demais fraturas e vazões.



Figura 19. Balança móvel de piso Digi-Tron®.

Os testes realizados com as suspensões dos materiais particulados seguiram um procedimento experimental diferente daquele utilizado nos testes com os fluidos brancos. Nesse caso, os dados de vazão mássica e pressão diferencial nas fraturas foram registrados durante 30 minutos. Inicialmente, o registro dos dados foi realizado no primeiro minuto após a abertura da fratura. Após o primeiro minuto, os dados foram registrados em intervalos de 2 minutos e, por fim, em um intervalo de 3 minutos. Esse intervalo de duração dos testes possibilitou a análise da influência da concentração do material de controle de perda no selamento das fraturas e no escoamento das suspensões no interior das mesmas. Em alguns casos, o selamento das fraturas ocorreu em um tempo inferior a 30 minutos. Nesses casos, os dados foram registrados até o momento em que as fraturas foram tamponadas.

No caso das suspensões dos materiais de controle de perda, primeiramente foi preparada uma solução aquosa de 2 lbm/bbl (5,71 kg/m³) de Goma Xantana no tanque de armazenamento/mistura. Essa solução foi agitada por 2 h a uma velocidade de rotação de 1080 rpm e foi deixada 24 h em repouso para hidratação do polímero. Na sequência, os materiais particulados foram adicionados nas concentrações estipuladas de cada fluido, de acordo com a Tabela 1. Os materiais particulados foram homogeneizados no tanque durante 2 h a uma velocidade de rotação de 1080 rpm.

3.3 Modelagem Matemática do Escoamento em Fraturas

O escoamento de suspensões nas fraturas foi modelado por meio de duas metodologias baseadas em perfis de velocidade em placas paralelas.

3.3.1 Modelo em função dos parâmetros reológicos

Esta metodologia baseou-se na análise do perfil de velocidade em placas paralelas para fluidos não-Newtonianos seguindo o modelo reológico de Herschel-Bulkley. Desta forma, a vazão das suspensões nas fraturas pode ser determinada pela Equação 14. Essa equação descreve a vazão das suspensões nas fraturas em função da viscosidade, da perda de carga e das dimensões das fraturas. O Anexo A apresenta a descrição da sequência de cálculos realizados para a dedução da Equação 14.

$$Q_1 = \frac{2 \cdot L \cdot k \cdot w \cdot n}{\Delta P \cdot (1+n)} \left(\frac{\left(\frac{\Delta P \cdot h}{L \cdot k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1+2 \cdot n}{n}}}{\frac{\Delta P}{L \cdot k} \cdot \frac{1+2 \cdot n}{n}} - h \cdot \left(\frac{\Delta P \cdot h}{L \cdot k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1+n}{n}} \right), \quad (14)$$

onde:

- L- comprimento da fratura;
- τ_0 ; k; n- parâmetros do modelo Herschel-Bulkley;
- w- profundidade da fratura;
- h- metade da abertura da fratura;
- ΔP - pressão diferencial na fratura;
- Q_1 - vazão na fratura.

3.3.2 Modelo em função da viscosidade aparente

Esta metodologia foi baseada em uma análise do perfil de velocidade no escoamento de fluidos Newtonianos entre placas paralelas (MASSARANI, 1999). Nesse caso, pode-se determinar a vazão das suspensões nas fraturas pela Equação 15. A partir das vazões obtidas experimentalmente, calculou-se a velocidade de escoamento do fluido por meio da Equação 16. As taxas de deformação das suspensões nas fraturas foram determinadas por meio da Equação 17, proposta por Massarani (1999). Com as taxas de deformação, determinaram-se as tensões cisalhantes, obtidas graficamente nas curvas de escoamento dos fluidos, ajustadas pelo modelo de Herschel-Buckley. A viscosidade aparente dos fluidos foi determinada pela Equação 18. Os diâmetros hidráulicos das fraturas foram calculados de acordo com a Equação 19.

$$Q_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Delta P \cdot w \cdot h^3}{L \cdot \mu_{ap}}, \quad (15)$$

$$v = \frac{Q_{exp}}{w \cdot H}, \quad (16)$$

$$\gamma = \delta \cdot \frac{v}{D_h}, \quad (17)$$

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (18)$$

$$D_h = 2 \cdot \left(\frac{w \cdot H}{w + H} \right), \quad (19)$$

onde:

Q_2 - vazão na fratura;
 Q_{exp} - vazão obtida experimentalmente;
 ΔP - pressão diferencial na fratura;
 w - profundidade da fratura;
 h - metade da abertura da fratura;
 H - abertura da fratura;
 L - comprimento da fratura;
 μ_{ap} - viscosidade aparente do fluido;
 τ - tensão de cisalhamento;
 γ - taxa de deformação;
 δ - constante equivalente a 6,40;
 v - velocidade de escoamento;
 D_h - diâmetro hidráulico.

Os modelos matemáticos foram validados com base nos dados experimentais obtidos no escoamento das suspensões descritas na Tabela 1. As dimensões das fraturas estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Dimensões das fraturas.

Fratura	w (m)	L (m)	h (m)
5 mm	0,0097	1,02	0,0026
10 mm	0,0098	1,02	0,00515

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos testes realizados no simulador de escoamento em fraturas (SEF). Foi possível avaliar a influência da concentração e da distribuição do tamanho das partículas no escoamento das suspensões dos materiais de controle de perda nas fraturas e no selamento das mesmas. Este capítulo também apresenta a comparação entre os dados experimentais e os resultados obtidos pelas equações propostas com o objetivo de descrever a perda de carga em função da vazão das suspensões.

Os materiais de controle de perda foram caracterizados quanto à distribuição granulométrica. A caracterização dos fluidos utilizados foi realizada a partir da determinação da massa específica e do comportamento reológico, o qual foi avaliado pelo ajuste dos parâmetros do modelo reológico de Herschell-Buckley.

4.1 Caracterização de Tamanho das Partículas

As partículas dos materiais obturantes foram separadas por meio de diferentes conjuntos de peneiras presentes em um agitador eletromagnético da marca Bertel. Os resultados das análises granulométricas consistiram na avaliação dos tamanhos das partículas em relação ao peso total das amostras utilizadas.

As partículas do carbonato de cálcio laminar fino foram separadas em peneiras com as seguintes aberturas: 0,053; 0,105; 0,149; 0,297 e 0,595 mm. O resultado obtido da análise granulométrica desse material encontra-se na Figura 20. Pode-se observar que as partículas do material concentraram-se nas peneiras de 0,149 e, principalmente, de 0,105 mm de abertura.

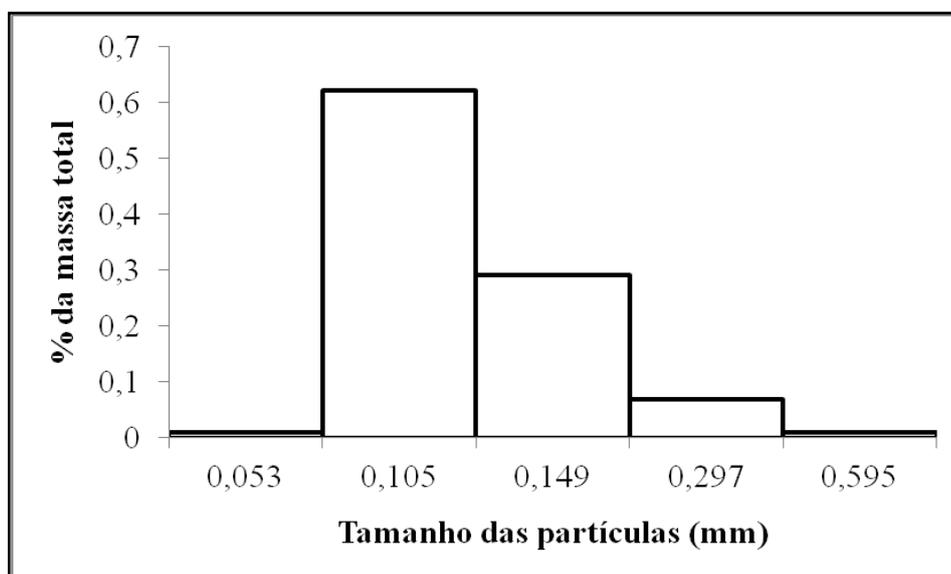


Figura 20. Distribuição granulométrica do carbonato de cálcio laminar fino.

O resultado obtido da análise granulométrica do carbonato de cálcio laminar médio encontra-se na Figura 21. Para esse material, foram utilizadas peneiras com aberturas de 0,074; 0,105; 0,149; 0,297; 0,595 e 0,841 mm. Pode-se observar que as partículas do material também se concentraram nas peneiras de 0,149 e 0,105 mm. Porém, a quantidade de partículas que se concentram na peneira de 0,149 mm é muito maior do que para o carbonato de cálcio laminar fino.

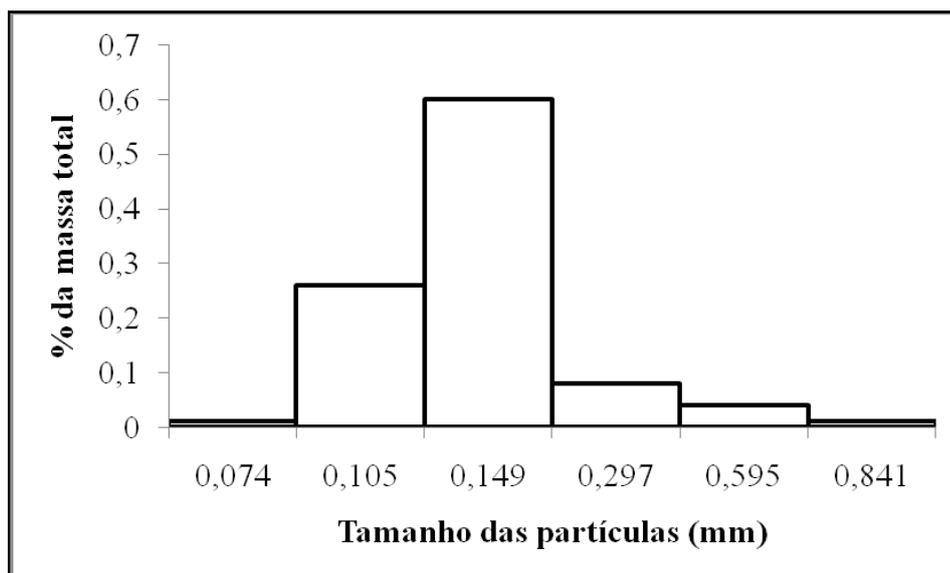


Figura 21. Distribuição granulométrica do carbonato de cálcio laminar médio.

Com os dados obtidos, foi possível determinar os diâmetros médios de Sauter das partículas. Os valores desses diâmetros encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Diâmetros médios de Sauter das partículas dos materiais.

Material	Diâmetro médio de Sauter (μm)
Carbonato de cálcio laminar fino	120,50
Carbonato de cálcio laminar médio	143,20

4.2 Massa específica dos Sólidos

As massas específicas dos materiais de controle de perda avaliados, obtidas pelo método da picnometria, são apresentadas na Tabela 5. Pode-se observar que o carbonato de cálcio laminar médio é mais denso do que o fino.

Tabela 5. Massas específicas dos materiais.

Material	Massa específica (g/cm^3)
Carbonato de cálcio laminar fino	$1,95 \pm 0,13$
Carbonato de cálcio laminar médio	$2,31 \pm 0,14$

4.3 Avaliação do comportamento reológico

Para avaliar o comportamento reológico dos fluidos, foi utilizado um viscosímetro FANN 35A. Foram obtidos dados de ângulo de deflexão em função da velocidade de rotação do cilindro interno do equipamento. Os dados obtidos podem ser encontrados na Tabela B1 do Anexo B e foram utilizados na construção dos gráficos de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento. A partir dos gráficos construídos, foi possível observar o comportamento reológico dos fluidos na faixa de tensões cisalhantes e taxas de deformação utilizadas. Os valores de tensão e taxa de cisalhamento, determinados, respectivamente, pelas Equações 12 e 13, são apresentados nas Tabelas de C1 a C3, presentes no Anexo C.

Os dados experimentais obtidos foram ajustados ao modelo Herschell-Buckley, utilizando o software STATISTICA® 7.0. Foi utilizado o método de estimação de Levenberg-

Marquardt. A função de minimização utilizada foi a função de mínimos quadrados e se utilizou um intervalo de confiança de 95%. Os parâmetros do modelo ajustado aos dados e os coeficientes de correlação obtidos encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros do modelo ajustado aos dados reológicos.

Fluido	Herschell-Buckley			
	τ_0 (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n (ad.)	R ²
Fluido 2	5,55±0,30	0,14±0,03	0,60±0,06	0,998
Fluido 3	6,01±0,35	0,17±0,04	0,58±0,05	0,999
Fluido 4	5,22±0,26	0,31±0,09	0,49±0,04	0,999
Fluido 5	5,54±0,28	0,17±0,04	0,56±0,05	0,999
Fluido 6	4,58±0,20	0,45±0,13	0,44±0,03	0,999
Fluido 7	5,34±0,27	0,31±0,09	0,49±0,04	0,999
Fluido 8	3,61±0,19	0,64±0,14	0,39±0,02	0,999
Fluido 9	4,78±0,22	0,55±0,09	0,41±0,02	0,999
Fluido 10	5,22±0,26	0,31±0,09	0,49±0,04	0,999
Fluido 11	4,98±0,28	0,23±0,08	0,53±0,05	0,999
Fluido 12	4,76±0,22	0,28±0,07	0,51±0,03	0,999
Fluido 13	4,99±0,30	0,23±0,08	0,53±0,05	0,998
Fluido 14	4,92±0,29	0,20±0,07	0,56±0,05	0,998
Fluido 15	4,50±0,20	0,55±0,09	0,42±0,02	0,999
Fluido 16	5,63±0,33	0,35±0,12	0,48±0,05	0,999

A Figura 22 apresenta curvas típicas de tensão versus taxa de cisalhamento obtidas para a solução de Goma Xantana e as suspensões dos materiais particulados. Pode ser observado que os fluidos apresentam um comportamento que pode ser ajustado pelo modelo de Herschel-Buckley, na faixa de tensões e taxas de cisalhamento utilizadas. Pode-se observar que, para uma mesma taxa de deformação, a tensão cisalhante aplicada para escoar as suspensões dos materiais obturantes é maior do que para a solução aquosa de Goma Xantana. Isso pode ser explicado pelo efeito da presença dos sólidos na reologia dos fluidos.

Observa-se que as tensões cisalhantes aplicadas para ocorrer o escoamento das suspensões são maiores para a suspensão de carbonato laminar médio em relação à suspensão de carbonato laminar fino, para uma mesma taxa de deformação. Isso pode ser explicado pelo efeito do tamanho das partículas dos materiais na reologia dos fluidos. Após a realização dos ensaios reológicos, observou-se que as tensões cisalhantes no escoamento das suspensões de carbonato de cálcio laminar fino aumentaram na medida em que se utilizaram concentrações maiores do material. Isso demonstra a influência da concentração na reologia dos fluidos. Nas Figuras D1, D2 e D3 presentes no Anexo D, são encontradas as curvas de tensão versus taxa de cisalhamento para os demais fluidos utilizados.

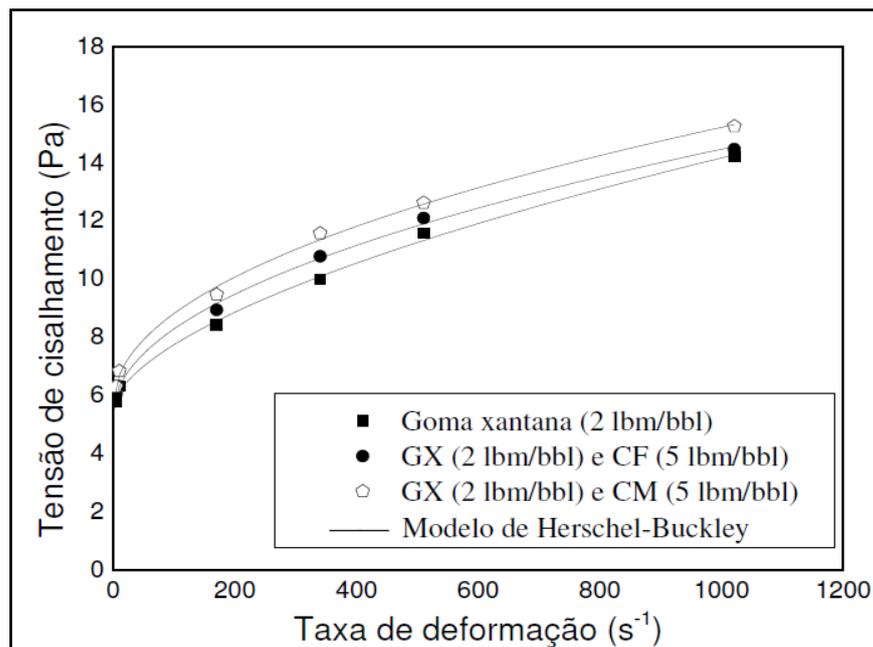


Figura 22. Curvas de escoamento da solução de Goma Xantana e das suspensões dos materiais de controle de perda.

4.4 Massa específica e temperatura dos fluidos

A massa específica dos fluidos utilizados foi obtida por meio de uma balança de lama Fann modelo 140. A temperatura dos fluidos durante os experimentos foi determinada por um termômetro portátil à prova d'água com sensor. Os valores de massa específica dos fluidos e das temperaturas destes durante os experimentos são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7. Massa específica dos fluidos a 27 °C.

Fluido	Componentes	ρ (g/cm ³)
Fluido 1	Água (150L)	1,00±0,01
Fluido 2	GX (2lbm/bbl)	0,98±0,02
Fluido 3	GX (2 lbm/bbl) + CF (1 lbm/bbl)	0,99±0,02
Fluido 4	GX (2 lbm/bbl) + CF (2 lbm/bbl)	1,00±0,01
Fluido 5	GX (2 lbm/bbl) + CF (3 lbm/bbl)	1,00±0,02
Fluido 6	GX (2 lbm/bbl) + CF (4 lbm/bbl)	1,01±0,01
Fluido 7	GX (2 lbm/bbl) + CF (5 lbm/bbl)	1,10±0,01
Fluido 8	GX (2 lbm/bbl) + CF (6 lbm/bbl)	1,11±0,02
Fluido 9	GX (2 lbm/bbl) + CF (7 lbm/bbl)	1,12±0,02
Fluido 10	GX (2 lbm/bbl) + CF (8 lbm/bbl)	1,12±0,01
Fluido 11	GX (2 lbm/bbl) + CF (9 lbm/bbl)	1,12±0,02
Fluido 12	GX (2 lbm/bbl) + CF (12 lbm/bbl)	1,13±0,01
Fluido 13	GX (2 lbm/bbl) + CF (15 lbm/bbl)	1,13±0,01
Fluido 14	GX (2 lbm/bbl) + CF (16 lbm/bbl)	1,14±0,02
Fluido 15	GX (2 lbm/bbl) + CF (18 lbm/bbl)	1,14±0,02
Fluido 16	GX (2 lbm/bbl) + CM (5 lbm/bbl)	1,12±0,01

Tabela 8. Temperaturas dos fluidos durante os experimentos.

Fluido	Componentes	T (°C)
Fluido 1	Água (150L)	26,5±2,1
Fluido 2	GX (2lbm/bbl)	27,1±2,3
Fluido 3	GX (2 lbm/bbl) + CF (1 lbm/bbl)	27,3±2,4
Fluido 4	GX (2 lbm/bbl) + CF (2 lbm/bbl)	27,4±2,6
Fluido 5	GX (2 lbm/bbl) + CF (3 lbm/bbl)	27,5±2,5
Fluido 6	GX (2 lbm/bbl) + CF (4 lbm/bbl)	27,4±2,3
Fluido 7	GX (2 lbm/bbl) + CF (5 lbm/bbl)	27,3±2,2
Fluido 8	GX (2 lbm/bbl) + CF (6 lbm/bbl)	27,5±2,4
Fluido 9	GX (2 lbm/bbl) + CF (7 lbm/bbl)	27,2±2,1
Fluido 10	GX (2 lbm/bbl) + CF (8 lbm/bbl)	27,5±2,0
Fluido 11	GX (2 lbm/bbl) + CF (9 lbm/bbl)	27,4±2,6
Fluido 12	GX (2 lbm/bbl) + CF (12 lbm/bbl)	27,6±2,4
Fluido 13	GX (2 lbm/bbl) + CF (15 lbm/bbl)	27,8±2,3
Fluido 14	GX (2 lbm/bbl) + CF (16 lbm/bbl)	27,8±2,5
Fluido 15	GX (2 lbm/bbl) + CF (18 lbm/bbl)	27,9±2,1
Fluido 16	GX (2 lbm/bbl) + CM (5 lbm/bbl)	27,6±2,3

4.5 Dados Obtidos no Simulador de Escoamento em Fraturas (SEF)

Com o objetivo de validar a unidade experimental, foram realizados testes iniciais com água industrial e solução aquosa de Goma Xantana com concentração de 2 lbm/bbl ($5,71 \text{ kg/m}^3$). Esses testes foram realizados de acordo com a metodologia apresentada na seção 3.2.6 e os dados experimentais obtidos encontram-se nas Tabelas de E1 a E12 do Anexo E. A partir dos dados obtidos, foi possível construir gráficos de vazão mássica e pressão diferencial em função do tempo, como pode ser observado, por exemplo, nas Figuras 23 e 24.

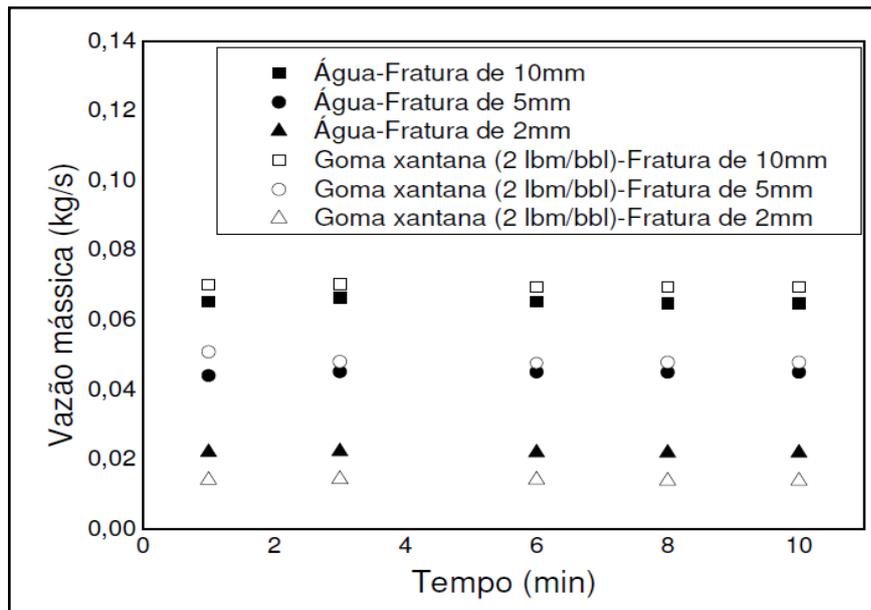


Figura 23. Dados de vazão mássica nas fraturas em função do tempo para a água industrial e a solução aquosa de Goma Xantana na vazão de 0,30 kg/s na região anular.

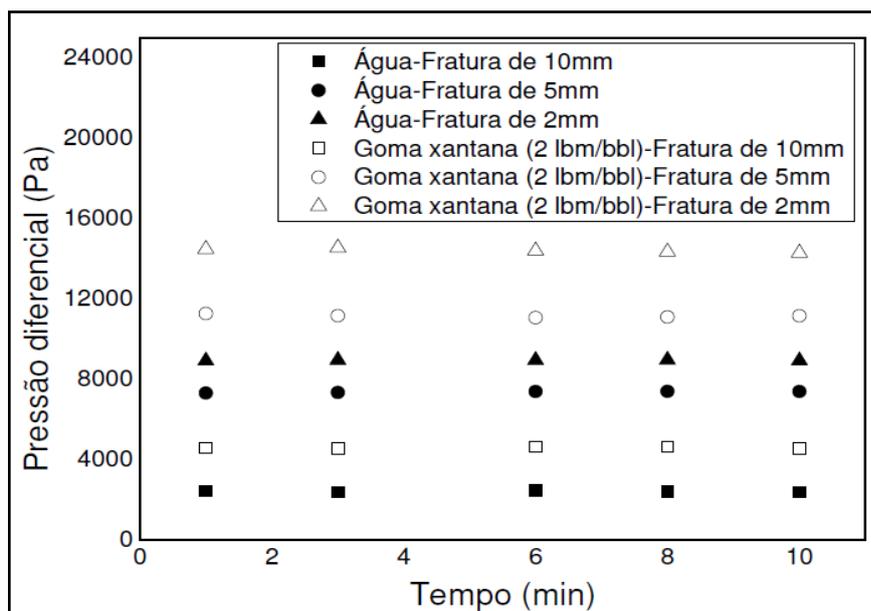


Figura 24. Dados de pressão diferencial nas fraturas em função do tempo para a água industrial e a solução aquosa de Goma Xantana na vazão de 0,30 kg/s na região anular.

Como pode ser observado, para os fluidos utilizados na validação da unidade, a vazão mássica nas fraturas atinge um valor constante em, aproximadamente, 3 minutos. Isso indica que o sistema atinge o regime permanente de maneira relativamente rápida. Além disso, observa-se que a vazão na fratura de 10 mm é maior quando se utiliza a solução de Goma Xantana. Na fratura de 2 mm, a vazão é maior ao se utilizar a água e na fratura de 5 mm as vazões dos dois fluidos atingem valores mais próximos. Observa-se que os valores de pressão diferencial ao se utilizar a solução de Goma Xantana são superiores aos valores obtidos quando se utiliza a água. Isso pode ser explicado pelo efeito do polímero na perda de carga nas fraturas.

Após a validação da unidade experimental, foi analisado o escoamento das suspensões dos materiais de controle de perda utilizados, além da capacidade de selamento desses materiais. Para realizar essa análise, as suspensões foram testadas na unidade de acordo com a metodologia apresentada na seção 3.2.6. Os dados experimentais obtidos são apresentados nas Tabelas de E13 a E108 do Anexo E.

A seguir são apresentados dados obtidos nos experimentos de selamento e escoamento das suspensões nas fraturas. A Figura 25 apresenta os dados de vazão mássica e pressão diferencial na fratura de 10 mm para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 15 lbm/bbl ($42,8 \text{ kg/m}^3$), na vazão de 0,30 kg/s na região anular. Observa-se uma diminuição da vazão na fratura na medida em que o tempo aumenta. Pode-se observar que essa vazão atinge um valor constante em 15 minutos. Isso indica que, na concentração utilizada, o carbonato de cálcio laminar fino não foi capaz de selar a fratura.

A Figura 26 apresenta os dados de vazão e pressão diferencial na fratura de 10 mm para a suspensão de carbonato de cálcio laminar médio de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) na vazão de 0,30 kg/s no anular. Pode-se observar que a vazão na fratura se anula, o que indica que o material foi capaz de tamponar a fratura. Observa-se que a pressão diferencial apresenta um comportamento semelhante ao apresentado pela vazão, pois também tende a anular-se na medida em que o tempo aumenta. Isso demonstra que o processo de selamento de fraturas é influenciado pela perda de carga, que auxilia a deposição das partículas durante o escoamento.

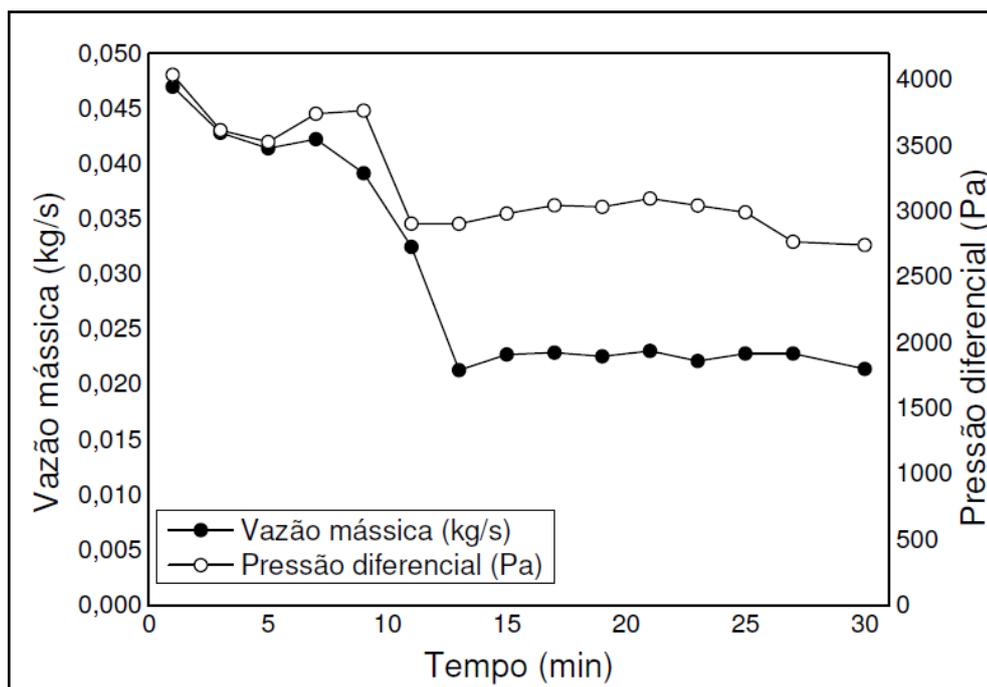


Figura 25. Dados de vazão mássica e pressão diferencial, na vazão de 0,30 kg/s no anular, na fratura de 10 mm para a suspensão de 15 lbm/bbl ($42,8 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar fino.

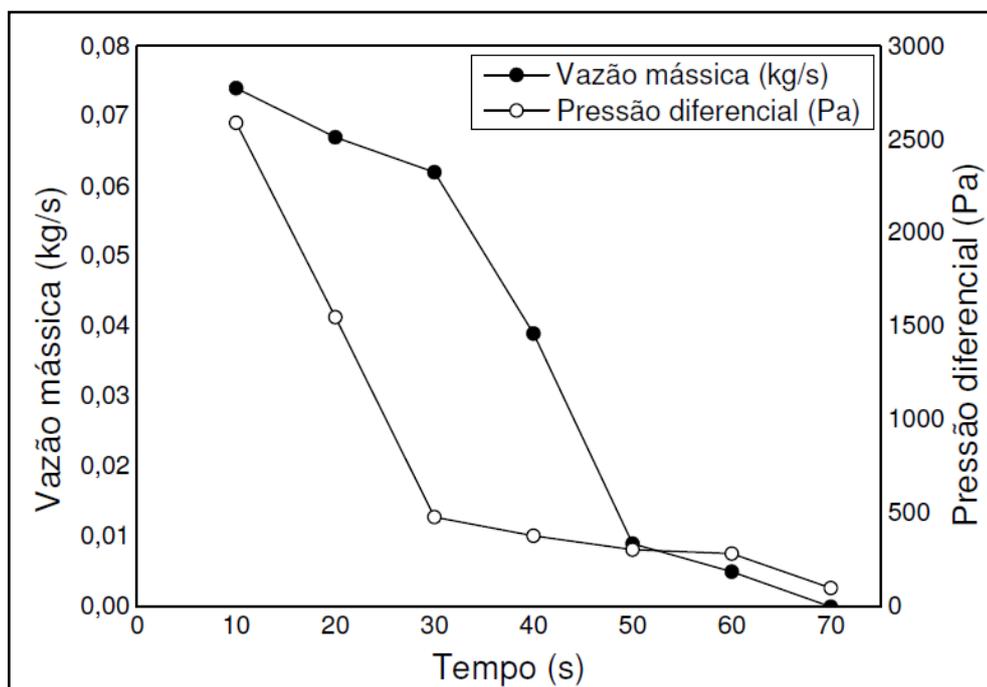


Figura 26. Dados de vazão mássica e pressão diferencial, na vazão de 0,30 kg/s no anular, na fratura de 10 mm para a suspensão de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio.

As Figuras de 27 a 32 apresentam os dados de pressão diferencial nas fraturas de 10 mm e 5 mm, para as suspensões de carbonato de cálcio laminar fino em diferentes concentrações, na vazão de 0,30 kg/s no anular.

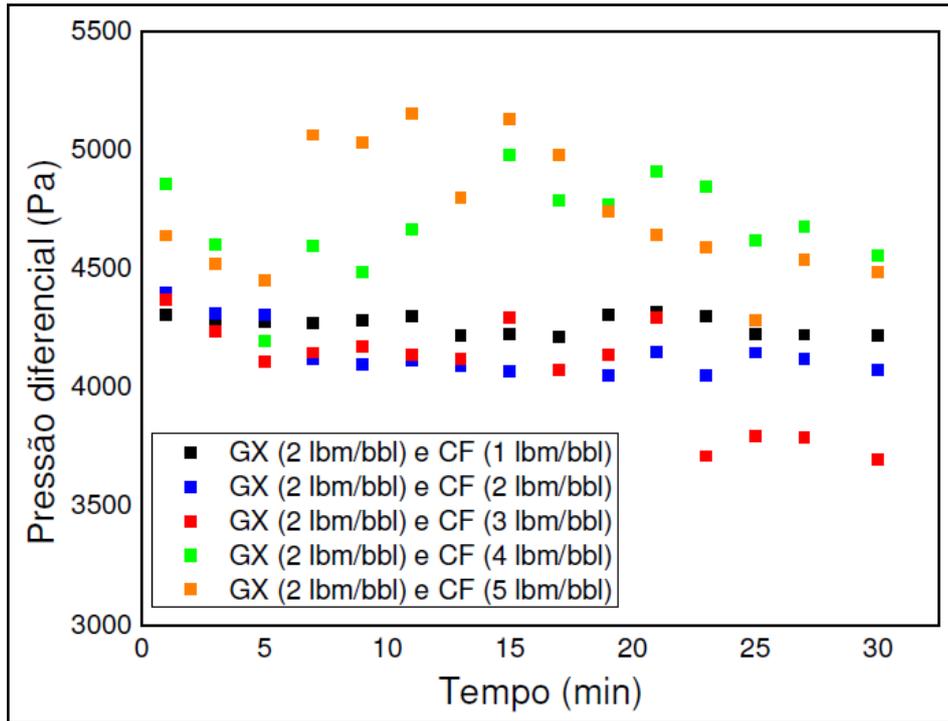


Figura 27. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 1 a 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$), na vazão de $0,30 \text{ kg/s}$ no anular, na fratura de 10 mm.

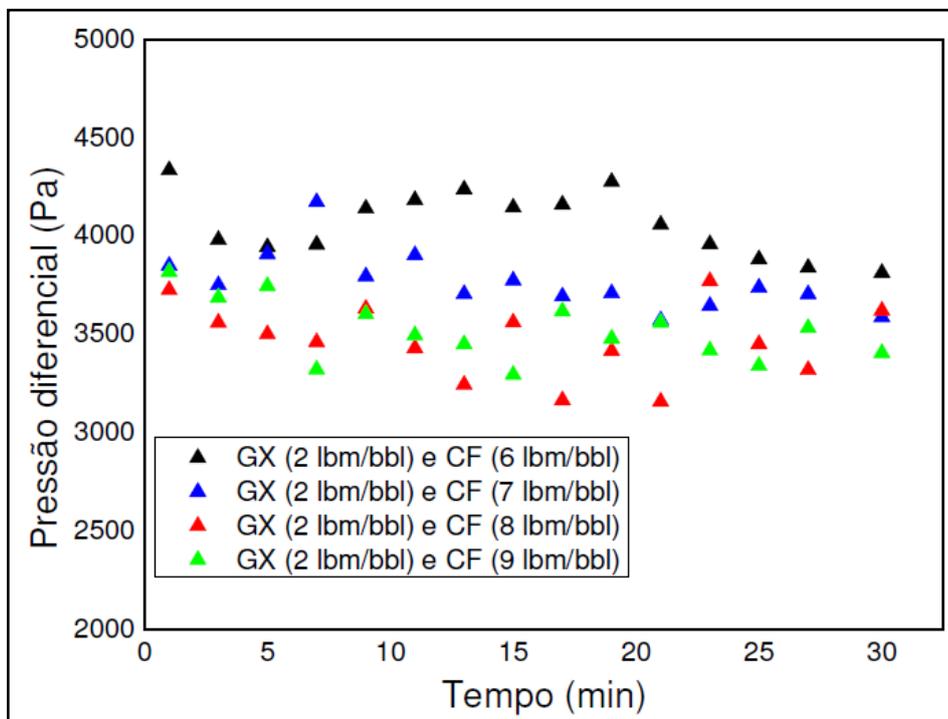


Figura 28. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 6 a 9 lbm/bbl ($25,68 \text{ kg/m}^3$), na vazão de $0,30 \text{ kg/s}$ no anular na fratura de 10 mm.

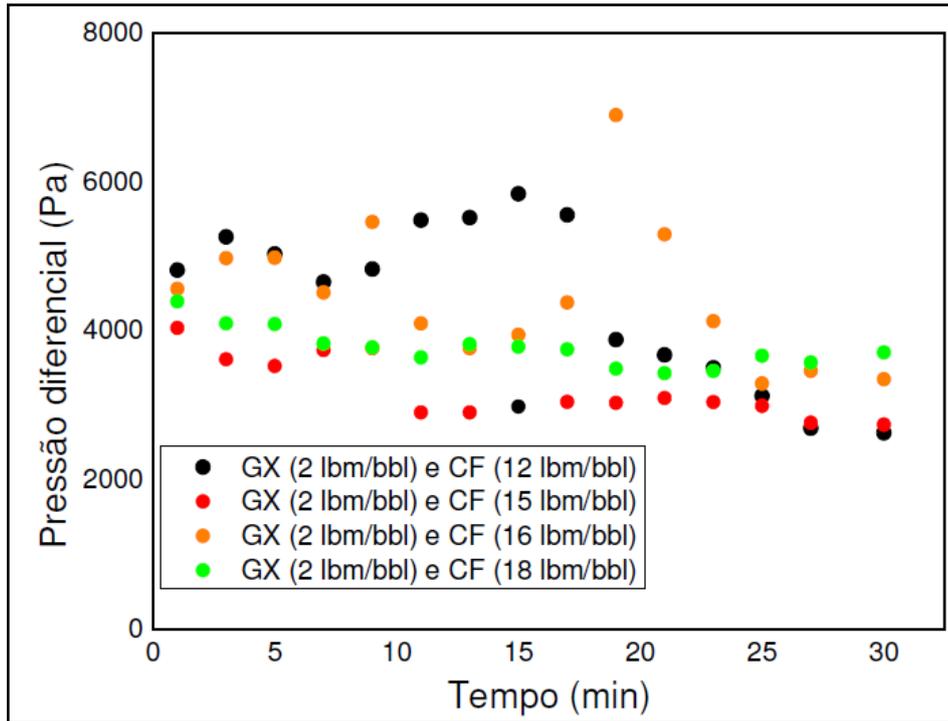


Figura 29. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 12 a 18 lbm/bbl ($51,35 \text{ kg/m}^3$), na vazão de $0,30 \text{ kg/s}$ no anular, na fratura de 10 mm.

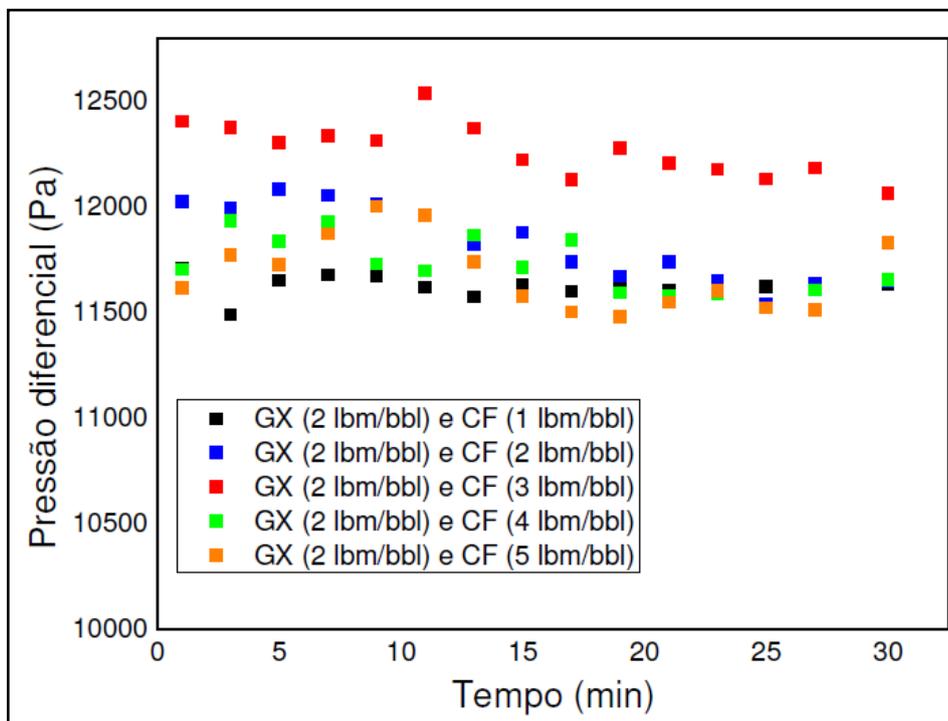


Figura 30. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 1 a 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$), na vazão de $0,30 \text{ kg/s}$ no anular, na fratura de 5 mm.

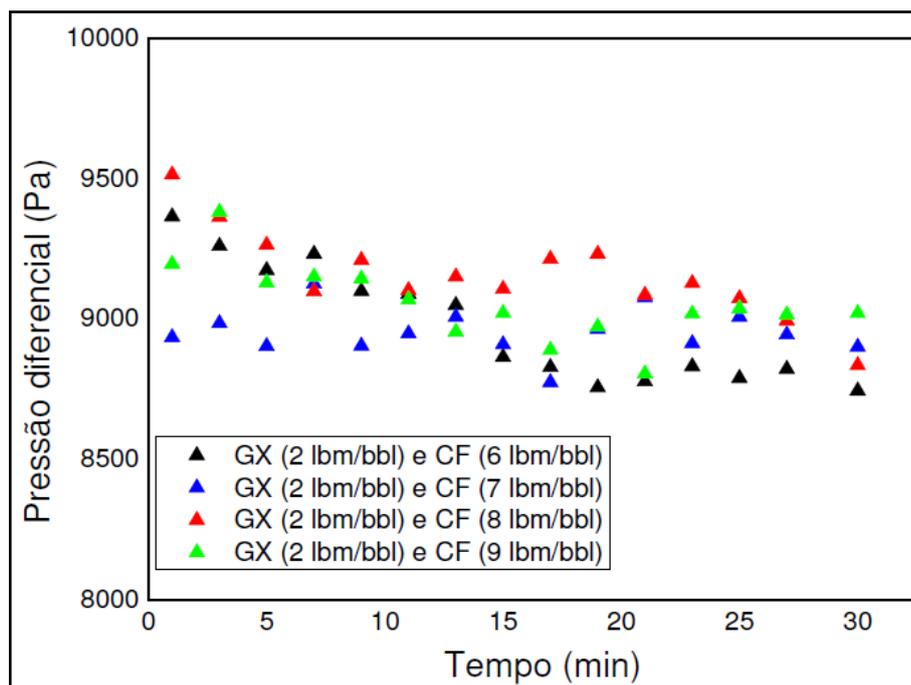


Figura 31. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 6 a 9 lbm/bbl ($25,68 \text{ kg/m}^3$), na vazão de $0,30 \text{ kg/s}$ no anular, na fratura de 5 mm.

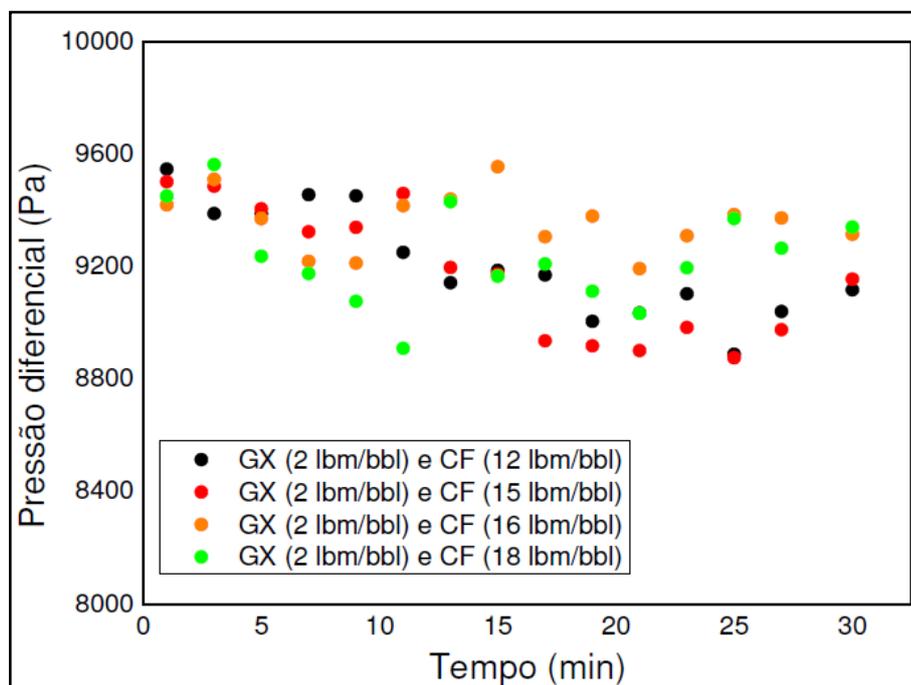


Figura 32. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 12 a 18 lbm/bbl ($51,35 \text{ kg/m}^3$), na vazão de $0,30 \text{ kg/s}$ no anular, na fratura de 5 mm.

Observa-se que, na fratura de 10 mm, são obtidos menores valores de pressão diferencial no escoamento das suspensões de 6 a 9 lbm/bbl ($25,68 \text{ kg/m}^3$) do que das suspensões de 1 a 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato fino. Porém, para as concentrações de 12 a 18 lbm/bbl ($51,35 \text{ kg/m}^3$), os valores de pressão diferencial são superiores aos das

suspensões de 6 a 9 lbm/bbl (25,68 kg/m³). Isso ocorre porque com o aumento da concentração, há uma maior deposição das partículas na fratura. Com isso, para o escoamento ser mantido, são necessárias pressões diferenciais maiores. Na fratura de 5 mm, pode-se observar que os valores de pressão diferencial para as suspensões de 6 a 9 lbm/bbl (25,68 kg/m³) são inferiores aos das suspensões de 1 a 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³). Por outro lado, comparando-se os dados obtidos no escoamento das suspensões de 6 a 9 lbm/bbl (25,68 kg/m³) e de 12 a 18 lbm/bbl (51,35 kg/m³), observa-se que as pressões diferenciais são praticamente equivalentes. Isso indica que a concentração de carbonato de cálcio laminar fino não influenciou de maneira tão significativa a perda de carga na fratura de 5 mm quanto na fratura de 10 mm. Os valores de perda de carga obtidos na fratura de 5 mm são superiores aos obtidos na fratura de 10 mm. Isso se deve à fratura de 5 mm apresentar uma largura menor, o que aumenta a resistência ao escoamento das suspensões.

Após a realização dos experimentos, observou-se que o carbonato de cálcio laminar fino foi capaz de selar apenas a fratura de 2 mm. O selamento dessa fratura apenas não foi observado para a suspensão de concentração de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m³) do material. Nas concentrações de 2 a 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³), observou-se que o material foi capaz de selar a fratura. Por isso, nessa fratura foram realizados experimentos com as suspensões de carbonato laminar fino com concentração até 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³). A Tabela 9 apresenta os dados de tempo de selamento da fratura de 2 mm em função da concentração de carbonato laminar fino. A Figura 33 apresenta os dados de pressão diferencial na fratura de 2 mm para as suspensões de carbonato de cálcio laminar fino nas concentrações utilizadas, na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tabela 9. Tempo de selamento da fratura de 2 mm em função da concentração de carbonato laminar fino, na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Fluido	Tempo de selamento (min)
GX (2 lbm/bbl) + CF (2 lbm/bbl)	21
GX (2 lbm/bbl) + CF (3 lbm/bbl)	9
GX (2 lbm/bbl) + CF (4 lbm/bbl)	5
GX (2 lbm/bbl) + CF (5 lbm/bbl)	3

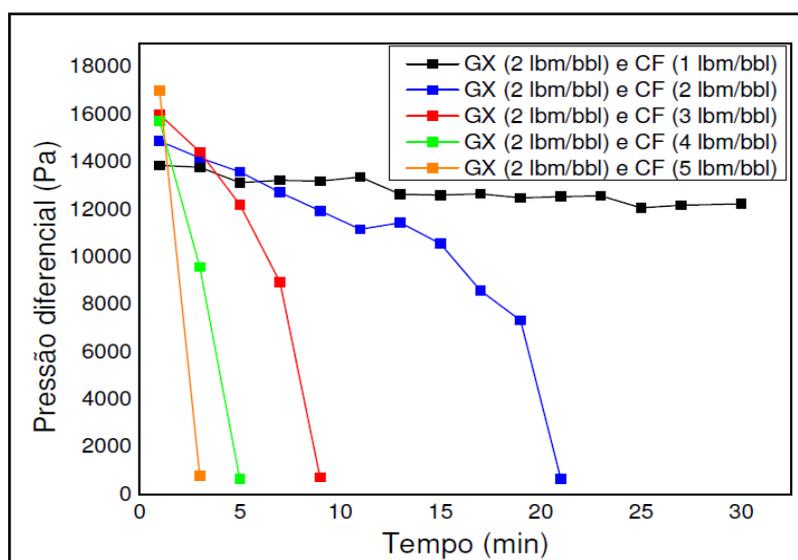


Figura 33. Dados de pressão diferencial para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino com concentrações de 1 a 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³), na vazão de 0,30 kg/s no anular, na fratura de 2 mm.

Pode-se observar que na medida em que se utilizam concentrações maiores, a fratura de 2 mm é tamponada mais rapidamente. Isso evidencia o efeito da concentração do material de controle de perda no selamento da fratura.

Como resultados gerais, observou-se que carbonato de cálcio laminar médio foi capaz de tamponar as três fraturas, em uma concentração significativamente inferior a maior concentração utilizada para o carbonato de cálcio laminar fino. Isso demonstra o efeito da distribuição do tamanho das partículas no processo de selamento de fraturas. Esses resultados mostram que o simulador de escoamento em fraturas foi capaz de discriminar a eficiência dos materiais particulados obturantes no combate à perda de circulação.

Nos testes realizados com os fluidos brancos (água industrial pura e solução aquosa de Goma Xantana), o regime permanente foi atingido de maneira relativamente rápida, em, aproximadamente, 3 minutos. Para as suspensões aquosas de carbonato de cálcio laminar fino nas fraturas de 10 mm e 5 mm, atingiu-se o regime permanente em um intervalo acima de 15 minutos, na maioria das concentrações utilizadas. O aumento da concentração desse material não influenciou de maneira significativa o período transiente do escoamento das suspensões nas fraturas. No escoamento da suspensão de carbonato de cálcio laminar médio, não foi possível observar o período permanente, pois o material selou rapidamente as fraturas.

Os dados experimentais possibilitaram avaliar a influência do tamanho das partículas e da concentração do material particulado no processo de selamento das fraturas e na determinação da perda de carga no escoamento das suspensões.

4.6 Resultados dos Modelos no Estudo Escoamento das Suspensões em Fraturas

Na Figura 34, são apresentadas as vazões preditas pela Equação 14, proposta em função dos parâmetros reológicos, e as vazões experimentais na fratura de 5 mm para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$).

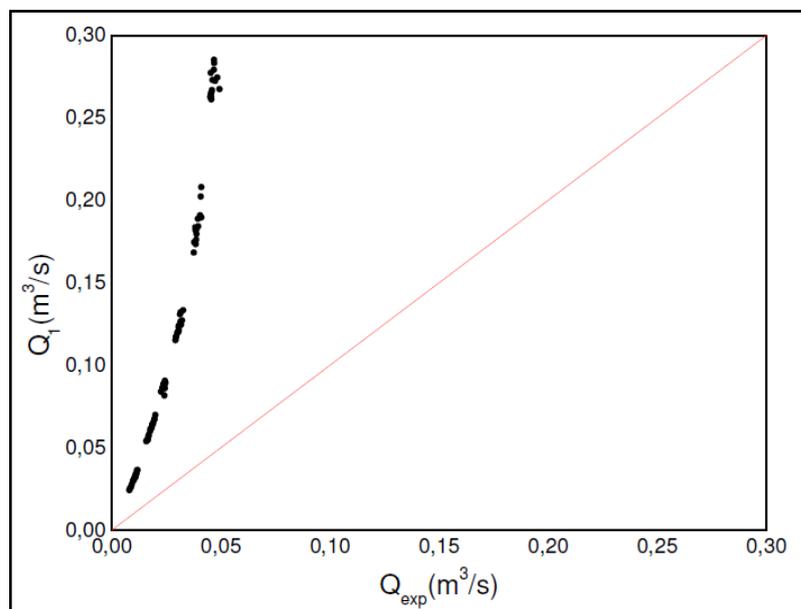


Figura 34. Valores de vazão (predito *versus* experimental) na fratura de 5 mm para suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$), utilizando a Equação 14.

A Figura 35 apresenta as vazões preditas pela Equação 14 e as vazões experimentais na fratura de 5 mm para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 15 lbm/bbl ($42,8 \text{ kg/m}^3$).

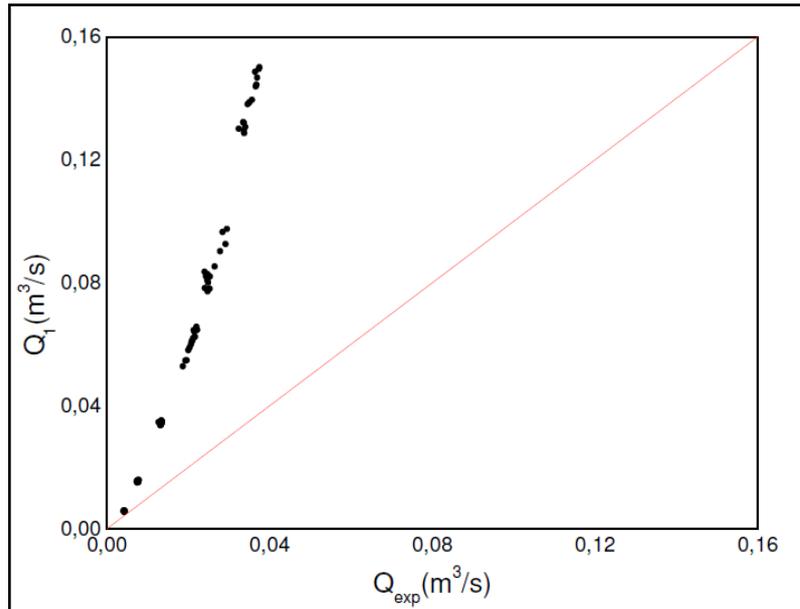


Figura 35. Valores de vazão (predito *versus* experimental) na fratura de 5 mm para suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 15 lbm/bbl ($42,8 \text{ kg/m}^3$), utilizando a Equação 14.

Como pode ser observado, as vazões previstas pela Equação 14 são maiores do que as vazões obtidas experimentalmente. Isso pode ser explicado pelo fato do modelo proposto desconsiderar a rugosidade da fratura e os fatores de atrito associados a ela, que oferecem resistência ao escoamento. Com o objetivo de ajustar os dados experimentais ao modelo e considerar o efeito da rugosidade da fratura, foi proposta uma calibração dos valores de vazão na Equação 14. Para realizar essa calibração, realizou-se um ajuste linear dos dados ao modelo proposto. Esse ajuste consistiu em multiplicar a equação do modelo por uma constante, no valor de 0,3. A Figura 36 apresenta as vazões experimentais e as vazões previstas após o ajuste linear da Equação 14. Pode-se observar que após o ajuste linear, os valores previstos pela Equação 14 aproximam-se dos valores obtidos experimentalmente.

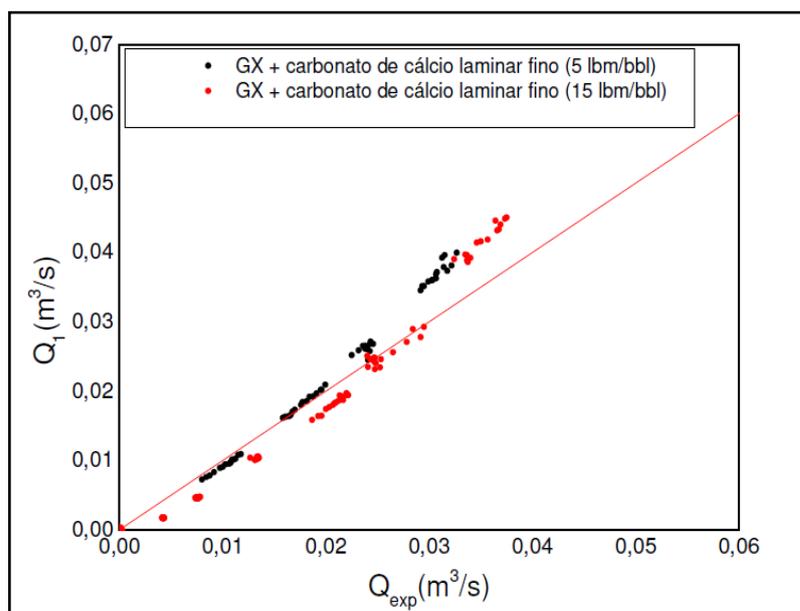


Figura 36. Valores de vazão (predito *versus* experimental) na fratura de 5 mm para as suspensões de carbonato de cálcio laminar fino após o ajuste da Equação 14.

As Figuras 37 e 38 apresentam as vazões preditas pela Equação 15, proposta em função da viscosidade aparente, e as vazões experimentais na fratura de 5 mm. Foram realizados cálculos para a suspensões de carbonato de cálcio laminar fino nas concentrações de 5 e 15 lbm/bbl ($42,8 \text{ kg/m}^3$).

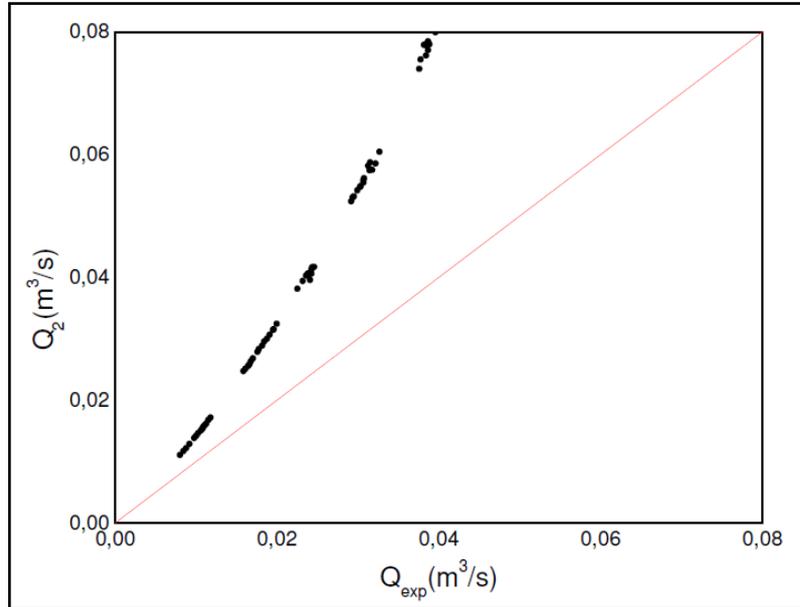


Figura 37. Valores de vazão (predito *versus* experimental) na fratura de 5 mm para suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$), utilizando a Equação 15.

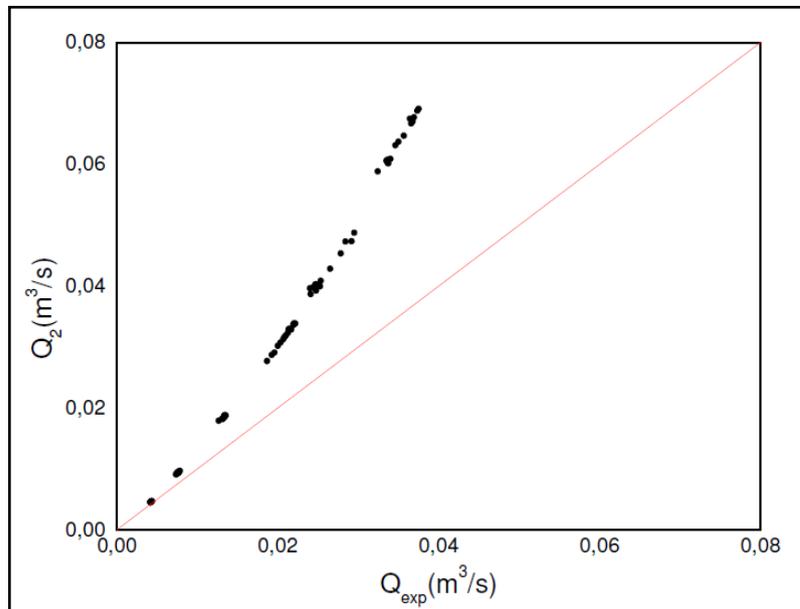


Figura 38. Valores de vazão (predito *versus* experimental) na fratura de 5 mm para suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 15 lbm/bbl ($42,8 \text{ kg/m}^3$), utilizando a Equação 15.

Assim como observado com o modelo anterior, os valores preditos são superiores aos experimentais. Isso também se deve ao fato do modelo proposto não levar em consideração a rugosidade relativa da fratura. Para realizar o ajuste linear da equação, utilizou-se o valor de

0,5. A Figura 39 apresenta as vazões experimentais e as vazões previstas após o ajuste linear da Equação 15.

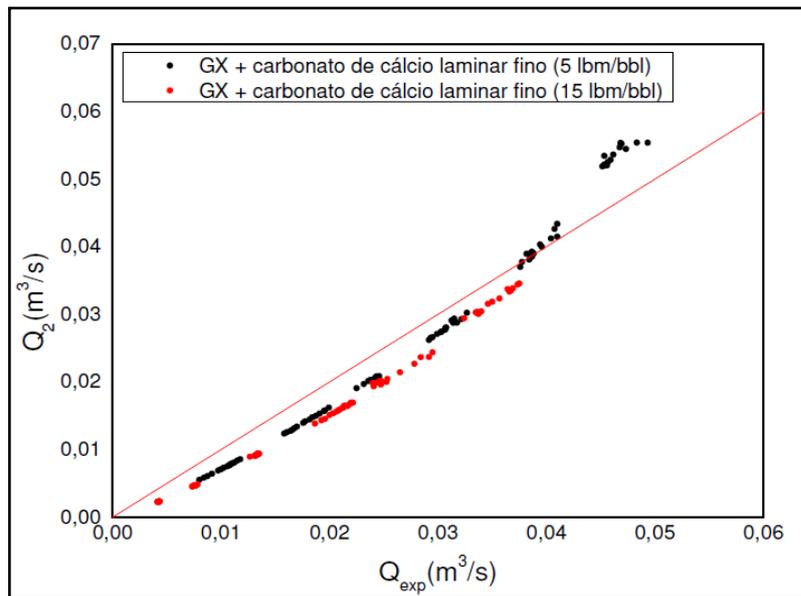


Figura 39. Valores de vazão (predito *versus* experimental) na fratura de 5 mm para as suspensões de carbonato de cálcio laminar fino após o ajuste linear da Equação 15.

Observa-se que com o ajuste da Equação 15, os valores preditos aproximam-se dos valores obtidos experimentalmente. Dessa forma, os dados experimentais podem ser ajustados ao modelo proposto.

A Figura 40 apresenta as vazões preditas pelos dois modelos ajustados para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) na fratura de 5 mm. O eixo das abscissas representa o modelo em função dos parâmetros reológicos. O modelo em função da viscosidade aparente é representado no eixo das ordenadas. Pode-se observar que, após o ajuste dos dois modelos propostos, ambos fornecem resultados semelhantes.

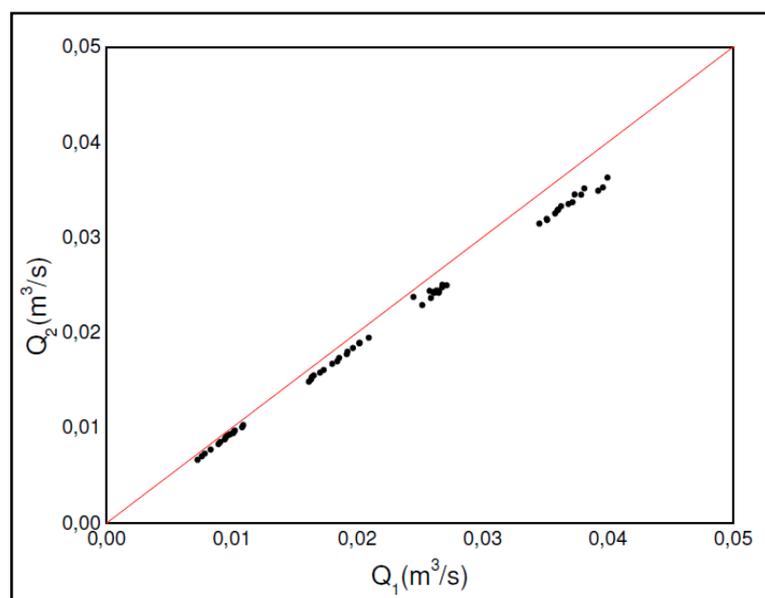


Figura 40. Valores de vazão obtidos após o ajuste das Equações 14 e 15, para a suspensão de carbonato de cálcio laminar fino de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) na fratura de 5 mm.

5 CONCLUSÕES

Os experimentos realizados com os fluidos preparados a partir da adição de Goma Xantana e das partículas de carbonato de cálcio de diferentes tamanho em água permitiram as seguintes conclusões.

- **Reologia**

A solução aquosa de Goma Xantana e as suspensões dos materiais de controle de perda avaliados apresentaram um comportamento reológico que pode ser ajustado pelo modelo de Herschell-Buckley, na faixa de tensões e taxas de cisalhamento utilizadas. As suspensões dos materiais particulados apresentaram tensões cisalhantes superiores às da solução de Goma Xantana em água, evidenciando o efeito das partículas dos sólidos na reologia dos fluidos. As tensões cisalhantes aplicadas para ocorrer o escoamento da suspensão de carbonato laminar médio são maiores do que para as suspensões de carbonato laminar fino. Isso pode ser explicado pelo efeito do tamanho das partículas dos materiais na reologia dos fluidos. As tensões cisalhantes no escoamento das suspensões de carbonato de cálcio laminar fino aumentaram na medida em que se utilizaram concentrações maiores do material. Isso demonstra a influência da concentração na reologia dos fluidos.

- **Materiais de combate à perda de circulação**

O simulador de escoamento em fraturas mostrou-se capaz de discriminar a eficiência dos materiais obturantes no combate à perda de circulação. O carbonato de cálcio laminar médio foi capaz de selar as três fraturas em uma concentração significativamente inferior à maior concentração utilizada para o carbonato laminar fino. Isso demonstra o efeito do tamanho das partículas na eficiência dos materiais de controle de perda. O carbonato de cálcio laminar fino foi capaz de selar apenas a fratura de 2 mm.

- **Efeito da concentração no escoamento das suspensões e no selamento das fraturas**

Foi possível observar o efeito da concentração na eficiência do material obturante, já que na medida em que a concentração foi aumentada, o selamento da fratura ocorreu mais rapidamente. A perda de carga nas fraturas de 10 mm e 5 mm não foi influenciada de maneira significativa pela concentração de carbonato de cálcio laminar fino. Em alguns casos, para a fratura de 10 mm, o aumento da concentração do material ocasionou maiores valores de perda de carga. Isso pode ser explicado pela maior deposição de partículas devido ao aumento da concentração. Com isso, são necessários maiores valores de pressão diferencial para manter o escoamento das suspensões de carbonato de cálcio laminar fino.

- **Efeito da perda de carga no selamento das fraturas**

Na medida em que a vazão nas fraturas diminuiu, observou-se a diminuição da pressão diferencial nas mesmas. Isso indica a influência da perda de carga no processo de selamento da fratura, já que a perda de carga auxilia a deposição das partículas durante o escoamento, ocasionando o selamento da fratura.

- **Regime permanente e regime transiente**

Nos testes realizados com os fluidos brancos (água industrial pura e solução aquosa de Goma Xantana), o regime permanente foi atingido de maneira relativamente rápida, em, aproximadamente, 3 minutos. Para as suspensões aquosas de carbonato de cálcio laminar fino nas fraturas de 10 mm e 5 mm, atingiu-se o regime permanente em um intervalo acima de 15 minutos, na maioria das concentrações utilizadas. O aumento da concentração desse material não influenciou de maneira significativa o período transiente do escoamento das suspensões nas fraturas. No escoamento da suspensão de carbonato de cálcio laminar médio, não foi possível observar o período permanente, pois o material selou rapidamente as fraturas.

- **Modelagem matemática do escoamento em fraturas**

Com os dados obtidos, foi possível determinar a correlação entre a vazão e a perda de carga no escoamento das suspensões de carbonato de cálcio laminar fino nas fraturas. Os dois modelos matemáticos propostos para correlacionar a perda de carga com a vazão são sensíveis aos parâmetros reológicos das suspensões. Esses modelos forneceram resultados muito semelhantes. Após a realização de um ajuste linear dos dados aos modelos, os valores preditos se aproximaram dos experimentais. No ajuste linear, foram utilizados os valores de 0,3 para o modelo proposto em função dos parâmetros reológicos e de 0,5 para o modelo proposto em função da viscosidade aparente. Observou-se que na modelagem matemática do escoamento de suspensões em fraturas, deve-se levar em consideração a rugosidade relativa das fraturas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar a eficiência de novos materiais de combate à perda de circulação e analisar o escoamento de suspensões desses materiais em fraturas;
- Avaliar o efeito de outros polímeros na reologia dos fluidos;
- Propor novas metodologias para correlacionar a vazão e a perda de carga no escoamento de suspensões em fraturas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, R.; JAROUJ, H.; DOLE, S.; EFFENDHLY, J. H.; EL-HASSAN, H.; FRANCIS, L.; HORNSBY, L.; MCCAITH, S.; SHUTTLEWORTH, N.; VAN DER PLAS, K.; MESSIER, E.; MUNK, T.; NADLAND, N.; SVENDSEN, R. K.; THEROND, E.; TAOUTAOU, S. **A safety net for controlling lost circulation**. Oilfield Review (winter, 2003/2004) 20.

ALMAGRO, S. P. B.; FRATES, C.; GARAND, J.; MEYER, A. **Sealing fractures: advances in lost circulation control treatments**. Oilfield Review Autumn, v. 26, n. 3, Copyright Schlumberger, p. 1-10, 2014.

ALSABA, M.; NYGAARD, R. **Review of lost circulation materials and treatments with an updated classification**. In: AADE-14-FTCE-25, AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 2014.

ALSABAGH, A. M.; ABDOU, M.I; AHMED, H. E; KHALIL, A.A; ABOULROUS, A. A. **Evaluation of some natural water-insoluble cellulosic material as lost circulation control additives in water-based drilling fluid**. Egyptian Journal of Petroleum, p. 461-468, 2015.

BAKER HUGHES. 2010. In: SPECIALTY PRODUCTS: DRILLING FLUIDS SOLUTION. Disponível em: <<http://www.bakerhughes.com/news-and-media/resources/brochures/specialty-products-brochure>>. Acesso em: 18. out. 2016.

BALTAR, C. A. M.; LUZ, A. B. **Insumos minerais para perfuração de poços de petróleo**. Recife: CTPETRO, 2003. 91 p.

BARNES, H. A. **A handbook of elementary rheology**. University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Aberystwyth, U.K, 2000.

BARNES, H.A.; HUTTON, J.F.; WALTERS, K. **An Introduction to Rheology**. Elsevier, Amsterdam, 1989.

BERTEL- www.bertel.com.br. Acesso em: 15. out. 2016.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte**. Livros Técnicos e Científicos, 2013.

BOURGOYNE JR, A. T.; MILLHEIM, K. K.; CHENEVERT, M. E.; YOUNG JR, F. S. **Applied drilling engineering**. Volume 2. 1991.

BRAGA, E. R. **Estudo do escoamento de fluidos de perfuração em dutos e em regiões anulares**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2009.

BRUTON, J. R.; IVAN, C. D.; HEINZ, T. J. **Lost Circulation Control: Evolving Techniques and Strategies to Reduce Downhole Mud Losses**. In: SPE 67735, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 27 February – 1 March 2001.

CAENN, R.; CHILLINGAR, G.V. **Drilling Fluids: State of the art**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v.14, p. 221, 1996.

CALÇADA, L.A.; DUQUE NETO, O.A.; MAGALHÃES, S.C.; SCHEID, C.M.; BORGES FILHO, M.N.; WALDMANN, A.T.A. **Evaluation of suspension flow and particulate materials for control of fluid losses in drilling operation.** Journal of Petroleum Science and Engineering, p.1–10, 2015.

CANSON, B. E. **Lost circulation treatment for naturally fractured, vugular, or cavernous formations.** In: SPE/IADC 13440, SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, USA, p. 5-8, March 1985.

COOK, J.; GROWCOCK, F.; GUO, G.; VAN OORT, E.; HODDER, M., **Stabilizing the wellbore to prevent lost circulation.** Oilfield Review Winter 2011/2012: 23, no. 4. Copyright 2012 Schlumberger.

DATWANI, A. **Review of lost circulation mechanisms with the focus on loss to natural and drilling induced fractures.** Dissertação (Mestrado), Dalhousie University, Nova Scotia, 2012.

DARLEY, H.C.H.; GRAY, G. R. **Composition and properties of drilling and completion fluids**, 5.ed. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1988.

DEMORA, J. P. **Avaliação das alterações ambientais causadas por perfuração exploratória em talude continental a partir de dados geoquímicos- Bacia de Campos, Brasil.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, 2005.

DUNSTER JN, 2004. **Drilling manual.** Northern Territory Geological Survey, Record 2004-007.

DUQUE NETO, O. A. **Estudo do escoamento de suspensões e da perda de carga em fraturas.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Concentração em Tecnologia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2015.

FANN INSTRUMENTS, revision C, Part No. 209064, Model 23D Electrical Stability Tester, **Instruction Manual.** Model 35 viscometer, 1996.

FANN - www.fann.com.br. Acesso em: 17. nov. 2016

FIAGBOR, H. T. **Practical approaches for solving lost circulation problems while drilling.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - African University of Science and Technology, 2011.

FINGER, J.; BLANKENSHIP, D. **Handbook of best practices for geothermal drilling.** Sandia national laboratories, Albuquerque, New Mexico, 2010.

FREIDHEIM, J.; SANDERS, M.; ROBERTS, N. **Unique drilling fluids additives for improved wellbore stability and reduced losses.** SEFLU Conference, Margarita Island, Venezuela, p. 19-23, May 2008.

FOX, R.W.; McDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. LTC Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, 5a Edição, 1998.

GOCKEL, J.F.; GOCKEL, C.E.; BRINEMANN, M. **Lost Circulation: A Solution Based on the Problem**. In: SPE-16082-MS, SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, p. 15-18, March 1987.

GROWCOCK, F. B.; PATEL, A. D. **The revolution in non-aqueous drilling fluids**. In: AADE-11-NTCE-33, AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 2011.

GUIMARÃES, I. B.; ROSSI, L. F. S. **Estudo dos constituintes dos fluidos de perfuração: proposta de uma formulação otimizada e ambientalmente correta**. 17º Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), Recife – PE, 2008.

HOWARD, G. C.; SCOTT, P. P. **An analysis and the control of lost circulation**. In: SPE 951171, Annual Meeting of the AIME, St. Louis, p. 19-21, February 1951.

JIAO, D.; SHARMA, M.M. **Mud-induced formation damage in fractured reservoirs**. In: SPE 30107. European Formation Damage Control Conference, The Hague, The Netherlands, p. 15-16, May 1995.

KUMAR, A.; SAVARI, S. **Lost circulation control and wellbore strengthening: looking beyond particle size distribution**. In: AADE-11-NTCE-21, AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 12-14, April 2011.

LIMA, H.R. **Perfuração de Poços de Petróleo: Sistema de Circulação**. Curso promovido pela ANP/PRH-25, UFPB, Campina Grande, 2001.

MACOSKO, C. W. **Rheology: Principles, Measurements and Applications**. VCH, New York, 1994.

MASSARANI, G. **Fluidos não-newtonianos e sistemas particulados**. XXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Campos do Jordão, 1999.

MUNSON, B.R., YOUNG, D.F., OKIISHI, T.H., **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. Ed. Edgard Blucher, Tradução da 4ª edição americana, 2002.

NAYBERG, T. M.; PETTY, B. R. **Laboratory Study of Lost Circulation Materials for use in Both Oil-base and Water-base Drilling Muds**. In: SPE-14723-PA, IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, USA, p.10-12, February 1986.

NYGAARD, R.; SALESHI, S. **A Critical Review of Wellbore Strengthening: Physical Model and Field Deployment**. In: AADE-11-NTCE-24, AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 2011.

ONYEKWERE, C. **Lost circulation material training manual**. Schlumberger, 2002.

OLIVEIRA, J. L.; SOUZA, E. A. **Avaliação da efetividade do colchão de perda sealbond plus em fratura artificial**. Relatório do CENPES, 2013.

PARAISO, E. C. **Estudo do escoamento de pasta de cimento em dutos circulares e anulares concêntricos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2011.

PILEHVARI, A.A.; NYSHADHAM, V.R. **Effect of material type and size distribution on performance of loss/seepage control material**. In: SPE 73791. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, p. 20-21, February 2002.

ROCHA, D. C. **Determinação da Perda de Carga de Fluidos de Perfuração no Escoamento Através de Acessórios Especiais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.

SANDERS, M. W.; YOUNG, S.; FRIEDHEIM, J. **Development and testing of novel additives for improved wellbore stability and reduced losses**. In: AADE-08-DF-HO-19, AADE Fluids Conference and Exhibition, Houston, USA, p. 8-9, April 2008.

SCHRAMM, G. **A Practical Approach to Rheology and Rheometry**. 2nd Edition, Gebrueder HAAKE GmbH, Karlsruhe, Federal Republic of Germany, 2000.

SMAR. **Manual de instruções, operação e manutenção “Transmissor inteligente de pressão com controle PID incorporado”** - modelo LD 301, Jan./2008, 6ª versão – Disponível em: <www.smar.com/brasil>. Acesso em: 16. nov. 2016.

STEFFE, J. F. **Rheological Methods in Food Process Engineering**, Second Edition. Freeman Press, East Lansing, Michigan, 1996.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 1. ed., Editora Interciência Ltda, Rio de Janeiro, RJ, 271p., 2001.

VAN OORT, E.; BROWNING, T.; BUTLER, F.; LEE, J.; FRIEDHEIM, J. **Enhanced Lost Circulation Control through Continuous Graphite Recovery**. In: AADE-07-NTCE-24. AADE National Technical Conference, 10-12 April 2007, Houston.

VAN OORT, E.; FRIEDHEIM, J.; PIERCE, T.; LEE, J. **Avoiding losses in depleted and weak zones by constantly strengthening wellbores**. In: SPE-125093-MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, p. 4-7 October 2009.

WALDMANN, A. T. A.; MARTINS, A. L.; ARAGÃO, A. F. L.; LOMBA, R. F. T. **Predicting and Monitoring Fluid Invasion in Exploratory Drilling**. In: SPE 86497-PA. Journal SPE Drilling & Completion, v. 20, n. 4, p. 268-275, 2005.

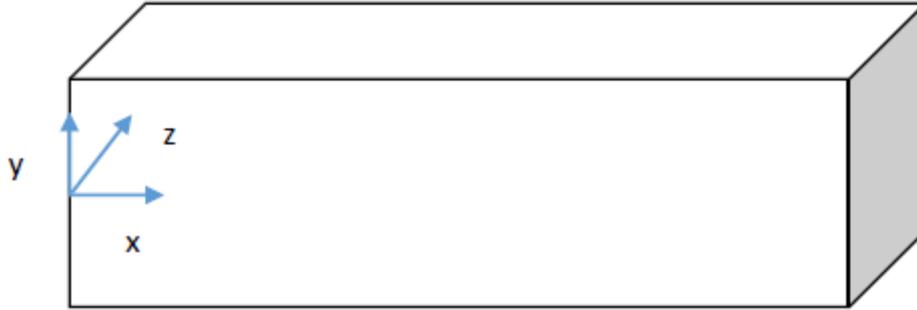
WANG, H., SOLIMAN, M.Y., TOWLER, B.F., AND SHAN, Z.. **Strengthening a wellbore with multiple fractures: further investigation of factors for strengthening a wellbore**. American Rock Mechanics Association, 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th USCanada Rock Mechanics Symposium, Asheville, NC, p. 09-67, 28 June – 1 July 2009.

WHITE, R. J. **Lost-Circulation Materials and Their Evaluation**. API-56-352. Drilling and Production Practice, New York, New York, USA, 1 January 1956.

WHITFILL, D. L. Lost Circulation Material Selection, Particle Size Distribution and Fracture Modeling with Fracture Simulation Software. Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, p. 25-27, August 2008.

ANEXOS

ANEXO A. Dedução da Equação 14



Considerando escoamento em placas paralelas com altura igual a $2h$, espessura igual a w e comprimento igual a L , segue o perfil de velocidade abaixo. Foi considerada velocidade nula nas extremidades ($y=h$) e tensão nula no centro ($y=0$).

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\Delta P}{L} \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = -\frac{\Delta P}{L} \\ \tau_{yx} = -\frac{\Delta P}{L} \cdot y \end{array} \right.$$

Considerando o modelo reológico de Herschel-Buckley:

$$\tau_{yx} = \tau_0 + K \cdot \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^n$$

$$-\frac{\Delta P}{L} \cdot y = \tau_0 + K \cdot \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^n$$

$$-\frac{\Delta P}{L \cdot K} \cdot y = \frac{\tau_0}{K} + \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^n$$

Considerando $a = -\frac{\Delta P}{L \cdot K}$ e $b = \frac{\tau_0}{K}$:

$$\left(\frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^n = a \cdot y - b$$

$$\left(\frac{\partial Vx}{\partial y}\right) = (a \cdot y - b)^{\frac{1}{n}}$$

$$\int_0^{Vx} \partial Vx = \int_0^h (a \cdot y - b)^{\frac{1}{n}} \partial y$$

$$Vx = \frac{n}{a \cdot (1 + n)} \cdot \left[(a \cdot y - b)^{\frac{1}{n}+1} - (a \cdot h - b)^{\frac{1}{n}+1} \right]$$

Sabendo que a vazão é igual a $2 \cdot \int_0^w \int_0^h Vx \, dydz$:

$$Q = 2 \cdot w \cdot \int_0^h \frac{n}{a \cdot (1 + n)} \cdot \left[(a \cdot y - b)^{\frac{1}{n}+1} - (a \cdot h - b)^{\frac{1}{n}+1} \right] dy$$

$$Q = 2 \cdot \frac{L \cdot K \cdot w \cdot n}{\Delta P \cdot (1 + n)} \cdot \left(\frac{\left(\frac{\Delta P \cdot h}{L \cdot K} - \frac{\tau_0}{K} \right)^{\frac{1+2n}{n}}}{\frac{\Delta P}{L \cdot K} \cdot \frac{1+2n}{n}} - h \cdot \left(\frac{\Delta P \cdot h}{L \cdot K} - \frac{\tau_0}{K} \right)^{\frac{1+n}{n}} \right)$$

Anexo B. Dados obtidos no viscosímetro FANN 35A

Tabela B1. Ângulo de deflexão em diferentes velocidades de rotação.

Fluido	3 rpm	6 rpm	100 rpm	200 rpm	300 rpm	600 rpm
Fluido 2	11,37	12,40	16,53	19,63	22,73	27,90
Fluido 3	11,74	12,81	17,08	20,28	23,49	28,82
Fluido 4	11,37	12,40	17,56	20,66	22,73	27,90
Fluido 5	11,37	12,40	17,05	19,63	21,70	27,38
Fluido 6	10,85	11,37	17,56	20,66	22,73	27,90
Fluido 7	11,88	12,40	17,56	21,18	23,76	28,41
Fluido 8	9,30	10,33	16,53	19,11	21,18	25,83
Fluido 9	11,37	12,40	18,08	21,18	23,76	27,90
Fluido 10	11,37	12,40	17,56	20,66	22,73	27,90
Fluido 11	10,85	11,37	16,53	19,63	22,21	27,38
Fluido 12	10,33	11,37	17,05	19,63	22,21	27,90
Fluido 13	10,33	11,88	16,53	19,63	21,70	27,38
Fluido 14	10,33	11,37	16,53	20,15	21,70	28,41
Fluido 15	10,85	11,88	18,08	21,70	23,76	28,93
Fluido 16	11,37	12,40	18,08	20,66	22,73	28,41

Anexo C. Tabelas de tensão cisalhante e taxa de deformação

Tabela C1. Dados de Tensão cisalhante e taxa de deformação para os fluidos 2, 3, 4, 5 e 6.

rpm	Taxa (s^{-1})	Fluido 2	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 5	Fluido 6
		Tensão (Pa)				
3	5,1069	5,785	5,977	5,785	5,785	5,522
6	10,2138	6,311	6,521	6,311	6,311	5,785
100	170,23	8,415	8,694	8,941	8,678	8,941
200	340,46	9,992	10,324	10,518	9,992	10,518
300	510,69	11,570	11,955	11,570	11,044	11,570
600	1021,38	14,200	14,671	14,200	13,937	14,200

Tabela C2. Dados de Tensão cisalhante e taxa de deformação para os fluidos 7, 8, 9, 10 e 11.

rpm	Taxa (s^{-1})	Fluido 7	Fluido 8	Fluido 9	Fluido 10	Fluido 11
		Tensão (Pa)				
3	5,1069	6,048	4,733	5,785	5,785	5,522
6	10,2138	6,311	5,259	6,311	6,311	5,785
100	170,23	8,941	8,415	9,203	8,941	8,415
200	340,46	10,781	9,729	10,781	10,518	9,992
300	510,69	12,096	10,781	12,096	11,570	11,307
600	1021,38	14,463	13,148	14,200	14,200	13,937

Tabela C3. Dados de Tensão cisalhante e taxa de deformação para os fluidos 12, 13, 14, 15 e 16.

rpm	Taxa (s^{-1})	Fluido 12	Fluido 13	Fluido 14	Fluido 15	Fluido 16
		Tensão (Pa)				
3	5,1069	5,259	5,259	5,259	5,522	5,785
6	10,2138	5,785	6,048	5,785	6,048	6,311
100	170,23	8,678	8,415	8,415	9,203	9,203
200	340,46	9,992	9,992	10,255	11,044	10,518
300	510,69	11,307	11,044	11,044	12,096	11,570
600	1021,38	14,200	13,937	14,463	14,726	14,463

Anexo D. Gráficos de tensão cisalhante em função da taxa de deformação

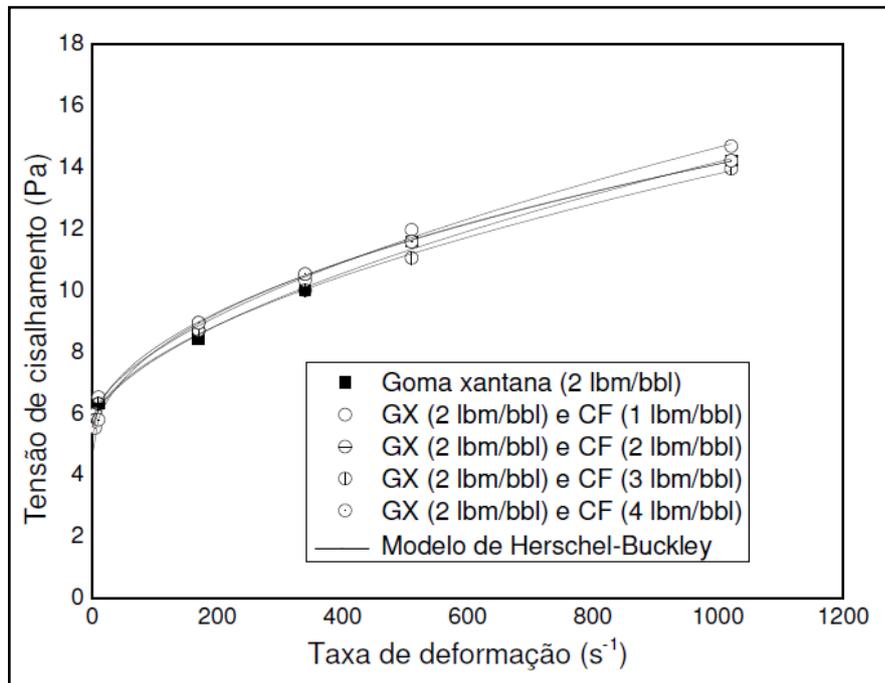


Figura D1. Curvas de escoamento dos Fluidos de 2 a 6.

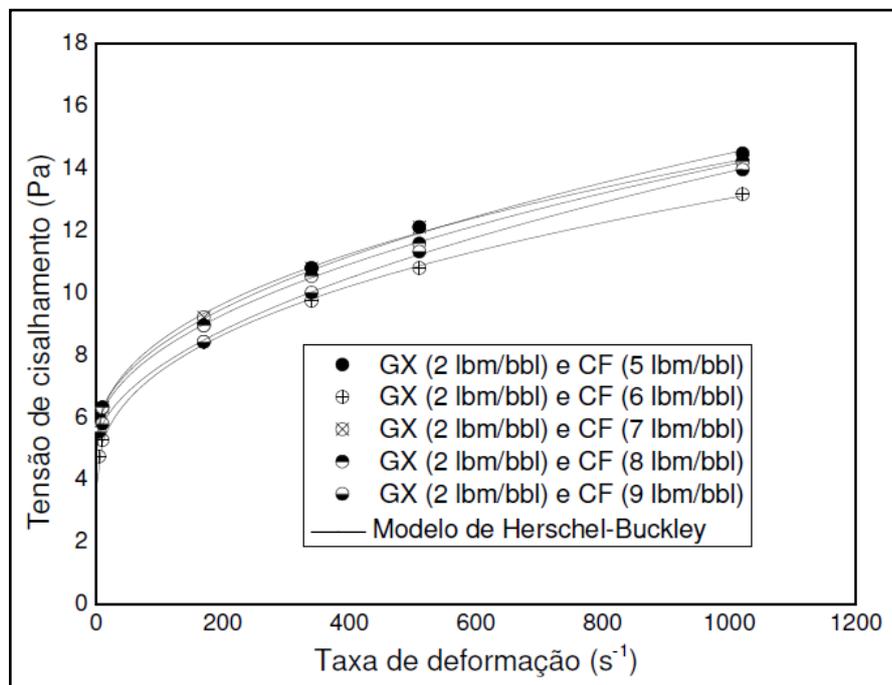


Figura D2. Curvas de escoamento dos Fluidos de 7 a 11.

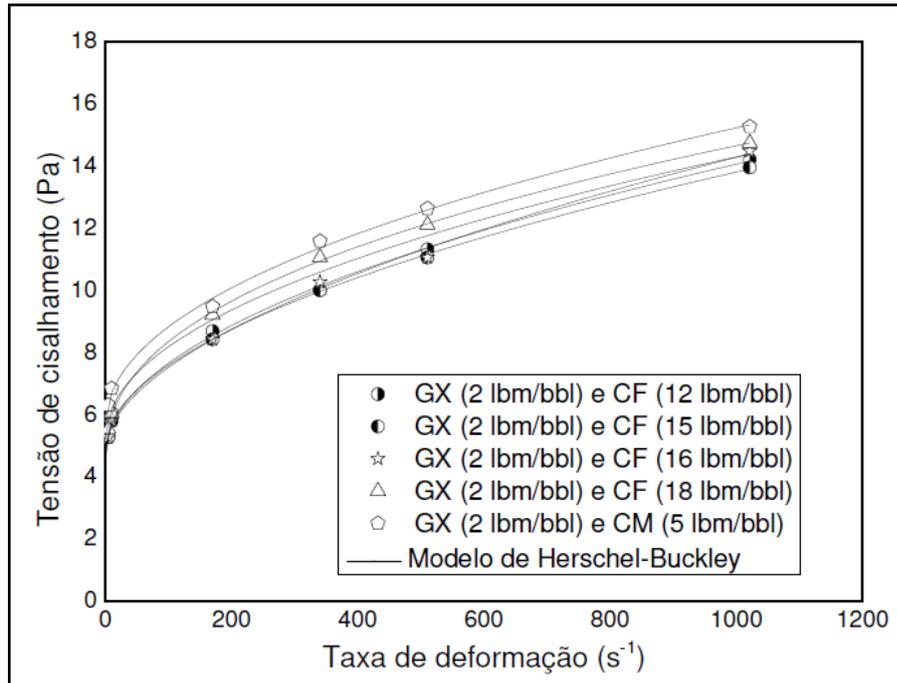


Figura D3. Curvas de escoamento dos Fluidos de 12 a 16.

Anexo E. Resultados obtidos no simulador de escoamento em fraturas (SEF)

Tabela E1. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0413	1048	0,0262	2709	0,0107	2954
3,00	0,0426	1041	0,0266	2701	0,0110	3061
6,00	0,0427	1043	0,0266	2705	0,0109	3036
8,00	0,0427	1039	0,0266	2707	0,0109	3029
10,00	0,0427	1044	0,0266	2702	0,0109	3034

Tabela E2. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0440	1221	0,0282	3222	0,0128	3606
3,00	0,0453	1227	0,0288	3219	0,0131	3624
6,00	0,0453	1221	0,0288	3225	0,0131	3727
8,00	0,0453	1225	0,0288	3220	0,0131	3612
10,00	0,0453	1229	0,0288	3211	0,0131	3621

Tabela E3. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0475	1396	0,0308	3765	0,0147	4281
3,00	0,0483	1371	0,0316	3785	0,0150	4279
6,00	0,0483	1369	0,0317	3772	0,0150	4272
8,00	0,0483	1370	0,0317	3780	0,0150	4266
10,00	0,0483	1368	0,0317	3784	0,0150	4248

Tabela E4. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0510	1528	0,0338	4508	0,0163	5176
3,00	0,0522	1538	0,0345	4528	0,0167	5255
6,00	0,0520	1538	0,0346	4457	0,0167	5228
8,00	0,0519	1530	0,0345	4478	0,0167	5260
10,00	0,0520	1558	0,0345	4468	0,0167	5193

Tabela E5. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0577	1949	0,0387	5865	0,0190	6902
3,00	0,0588	1920	0,0397	5880	0,0193	6942
6,00	0,0582	1859	0,0396	5801	0,0193	6986
8,00	0,0579	1871	0,0395	5818	0,0192	6926
10,00	0,0579	1861	0,0395	5871	0,0192	6917

Tabela E6. Dados experimentais para água pura na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0652	2419	0,0440	7297	0,0220	8907
3,00	0,0663	2356	0,0451	7326	0,0223	8942
6,00	0,0652	2438	0,0450	7379	0,0219	8940
8,00	0,0647	2388	0,0449	7386	0,0218	8953
10,00	0,0647	2377	0,0449	7377	0,0218	8916

Tabela E7. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0205	2345	0,0070	3532	0,0010	4169
3,00	0,0216	2395	0,0073	3440	0,0012	4242
6,00	0,0224	2498	0,0073	3539	0,0013	4338
8,00	0,0226	2457	0,0073	3525	0,0013	4308
10,00	0,0226	2446	0,0073	3530	0,0013	4287

Tabela E8. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0313	2749	0,0110	4668	0,0022	5174
3,00	0,0310	2785	0,0116	4692	0,0024	5277
6,00	0,0311	2779	0,0116	4698	0,0026	5468
8,00	0,0311	2773	0,0116	4679	0,0028	5356
10,00	0,0311	2752	0,0116	4686	0,0028	5342

Tabela E9. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0375	3105	0,0200	6186	0,0042	6734
3,00	0,0380	3056	0,0204	5980	0,0044	6759
6,00	0,0382	3071	0,0202	6076	0,0042	6706
8,00	0,0384	3079	0,0202	6047	0,0042	6721
10,00	0,0384	3075	0,0202	6033	0,0042	6697

Tabela E10. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0488	3555	0,0272	7374	0,0063	8446
3,00	0,0488	3458	0,0273	7293	0,0063	8430
6,00	0,0482	3432	0,0268	7248	0,0062	8332
8,00	0,0482	3449	0,0268	7256	0,0062	8358
10,00	0,0482	3443	0,0268	7253	0,0062	8349

Tabela E11. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0613	4145	0,0390	9525	0,0107	11764
3,00	0,0619	4072	0,0393	9453	0,0106	11870
6,00	0,0614	4079	0,0388	9211	0,0106	11694
8,00	0,0614	3952	0,0389	9121	0,0106	11642
10,00	0,0614	4007	0,0389	9132	0,0106	11571

Tabela E12. Dados experimentais para a solução de Goma Xantana na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0700	4560	0,0508	11259	0,0140	14465
3,00	0,0702	4545	0,0480	11151	0,0143	14529
6,00	0,0694	4624	0,0476	11050	0,0141	14384
8,00	0,0694	4613	0,0478	11089	0,0138	14337
10,00	0,0694	4550	0,0478	11146	0,0138	14275

Tabela E13. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0268	2655	0,0075	4497	0,0032	4579
3,00	0,0273	2670	0,0086	4479	0,0015	4112
5,00	0,0270	2667	0,0089	4512	0,0012	4103
7,00	0,0264	2651	0,0088	4504	0,0011	4094
9,00	0,0258	2642	0,0088	4468	0,0012	4096
11,00	0,0253	2635	0,0088	4491	0,0012	4099
13,00	0,0245	2613	0,0088	4412	0,0010	4041
15,00	0,0247	2626	0,0088	4432	0,0010	4046
17,00	0,0245	2608	0,0088	4412	0,0004	3651
19,00	0,0245	2608	0,0088	4405	0,0004	3558
21,00	0,0245	2572	0,0088	4398	0,0003	3513
23,00	0,0245	2495	0,0088	4354	0,0003	3477
25,00	0,0245	2593	0,0088	4379	0,0003	3416
27,00	0,0245	2602	0,0088	4352	0,0002	3123
30,00	0,0245	2621	0,0088	4354	0,0002	3111

Tabela E14. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0375	3193	0,0183	6166	0,0042	6728
3,00	0,0359	3156	0,0190	6217	0,0039	6667
5,00	0,0344	3136	0,0191	6231	0,0034	6648
7,00	0,0345	3130	0,0192	6230	0,0029	6611
9,00	0,0348	3117	0,0189	6215	0,0020	6581
11,00	0,0344	3090	0,0189	6207	0,0020	6587
13,00	0,0344	3118	0,0189	6150	0,0013	6277
15,00	0,0344	3115	0,0189	6112	0,0007	6112
17,00	0,0344	3125	0,0189	6135	0,0007	6007
19,00	0,0344	3108	0,0189	6122	0,0006	5982
21,00	0,0344	3112	0,0189	6143	0,0006	5966
23,00	0,0344	3117	0,0189	6117	0,0006	5951
25,00	0,0344	3115	0,0189	6126	0,0004	5830
27,00	0,0344	3119	0,0189	6134	0,0004	5805
30,00	0,0344	3116	0,0189	6122	0,0003	5797

Tabela E15. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0382	3204	0,0208	6527	0,0052	7601
3,00	0,0373	3166	0,0208	6525	0,0044	7551
5,00	0,0357	3099	0,0205	6492	0,0038	7534
7,00	0,0360	3120	0,0203	6522	0,0032	7523
9,00	0,0360	3126	0,0202	6464	0,0028	7518
11,00	0,0363	3139	0,0202	6493	0,0022	7509
13,00	0,0363	3133	0,0202	6506	0,0017	7487
15,00	0,0363	3143	0,0202	6522	0,0016	7473
17,00	0,0363	3135	0,0202	6513	0,0013	7440
19,00	0,0363	3149	0,0202	6501	0,0011	7415
21,00	0,0363	3131	0,0202	6522	0,0009	7404
23,00	0,0363	3136	0,0202	6519	0,0007	7382
25,00	0,0363	3145	0,0202	6498	0,0006	7374
27,00	0,0363	3139	0,0202	6510	0,0005	7365
30,00	0,0363	3147	0,0202	6523	0,0005	7354

Tabela E16. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0403	3831	0,0247	7521	0,0060	9224
3,00	0,0403	3876	0,0246	7544	0,0056	9157
5,00	0,0401	4027	0,0245	7546	0,0052	9154
7,00	0,0404	4026	0,0243	7595	0,0049	9140
9,00	0,0400	3897	0,0243	7597	0,0046	9115
11,00	0,0400	3889	0,0241	7589	0,0039	9104
13,00	0,0400	3865	0,0241	7585	0,0034	9091
15,00	0,0400	3865	0,0241	7595	0,0019	9061
17,00	0,0400	3877	0,0241	7801	0,0019	9059
19,00	0,0400	3851	0,0241	7583	0,0018	9037
21,00	0,0400	3863	0,0241	7591	0,0016	8988
23,00	0,0400	3885	0,0241	7599	0,0012	8925
25,00	0,0400	3874	0,0241	7579	0,0012	8911
27,00	0,0400	3865	0,0241	7586	0,0009	8877
30,00	0,0400	3871	0,0241	7594	0,0009	8861

Tabela E17. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0492	4762	0,0363	9510	0,0077	11470
3,00	0,0505	4328	0,0343	9307	0,0074	11423
5,00	0,0510	4431	0,0337	9363	0,0068	11411
7,00	0,0524	4412	0,0328	9478	0,0062	11398
9,00	0,0511	4370	0,0325	9383	0,0058	11365
11,00	0,0511	4352	0,0327	9466	0,0045	11321
13,00	0,0511	4330	0,0330	9410	0,0041	11310
15,00	0,0511	4305	0,0330	9464	0,0024	11258
17,00	0,0511	4322	0,0330	9425	0,0023	11224
19,00	0,0511	4356	0,0330	9438	0,0023	11229
21,00	0,0511	4333	0,0330	9411	0,0019	11207
23,00	0,0511	4326	0,0330	9427	0,0017	11196
25,00	0,0511	4315	0,0330	9451	0,0017	11185
27,00	0,0511	4345	0,0330	9433	0,0015	11166
30,00	0,0511	4332	0,0330	9429	0,0015	11144

Tabela E18. Dados experimentais para a suspensão de 1 lbm/bbl (2,85 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0588	4307	0,0452	11706	0,0137	13855
3,00	0,0569	4277	0,0454	11490	0,0130	13771
5,00	0,0563	4274	0,0443	11652	0,0119	13128
7,00	0,0558	4272	0,0437	11678	0,0116	13226
9,00	0,0563	4281	0,0438	11673	0,0109	13190
11,00	0,0563	4302	0,0438	11617	0,0108	13363
13,00	0,0563	4220	0,0438	11572	0,0092	12634
15,00	0,0563	4223	0,0438	11630	0,0094	12604
17,00	0,0563	4211	0,0438	11598	0,0077	12654
19,00	0,0563	4305	0,0438	11615	0,0060	12487
21,00	0,0563	4315	0,0438	11604	0,0060	12533
23,00	0,0563	4301	0,0438	11627	0,0054	12575
25,00	0,0563	4227	0,0438	11620	0,0042	12065
27,00	0,0563	4222	0,0438	11613	0,0035	12178
30,00	0,0563	4218	0,0438	11631	0,0035	12230

Tabela E19. Dados experimentais para a suspensão de 2 lbm/bbl ($5,71 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0250	2661	0,0070	3625	0,0018	4303
3,00	0,0246	2665	0,0070	3646	0,0012	4269
5,00	0,0243	2637	0,0069	3640	0,0008	4230
7,00	0,0238	2632	0,0067	3642	0,0003	4093
9,00	0,0238	2648	0,0067	3646	0,0003	4135
11,00	0,0239	2633	0,0066	3638	0,0003	4020
13,00	0,0238	2629	0,0068	3631	0,0002	3988
15,00	0,0238	2636	0,0066	3647	0,0003	3931
17,00	0,0241	2632	0,0067	3656	0,0002	3940
19,00	0,0238	2633	0,0067	3638	0,0003	3947
21,00	0,0239	2653	0,0067	3635	0,0002	3956
23,00	0,0239	2657	0,0067	3645	0,0002	3998
25,00	0,0238	2643	0,0066	3638	0,0002	3978
27,00	0,0238	2629	0,0067	3639	0,0001	3981
30,00	0,0238	2629	0,0067	3641	0,0002	3998

Tabela E20. Dados experimentais para a suspensão de 2 lbm/bbl ($5,71 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0323	3136	0,0157	5577	0,0052	6172
3,00	0,0326	3140	0,0158	5592	0,0023	6002
5,00	0,0328	3119	0,0158	5639	0,0011	6034
7,00	0,0320	3095	0,0161	5652	0,0006	6040
9,00	0,0322	3038	0,0166	5778	0,0005	6072
11,00	0,0310	2958	0,0172	5881	0,0005	6076
13,00	0,0316	3108	0,0178	6019	0,0004	6024
15,00	0,0316	3040	0,0187	6145	0,0004	6087
17,00	0,0316	2962	0,0192	6157	0,0003	6017
19,00	0,0316	3010	0,0193	6189	0,0004	6026
21,00	0,0316	2944	0,0193	6214	0,0003	6068
23,00	0,0316	3057	0,0195	6249	0,0003	6025
25,00	0,0316	2995	0,0198	6262	0,0001	6022
27,00	0,0316	3028	0,0198	6246	0,0001	4859
30,00	0,0316	2975	0,0198	6251	0,0000	339

Tabela E21. Dados experimentais para a suspensão de 2 lbm/bbl (5,71 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0378	3186	0,0270	7425	0,0067	7841
3,00	0,0378	3157	0,0268	7022	0,0032	7298
5,00	0,0366	3090	0,0237	6925	0,0013	6600
7,00	0,0377	3181	0,0233	6823	0,0012	6817
9,00	0,0384	3192	0,0225	6742	0,0008	5874
11,00	0,0387	3189	0,0218	6623	0,0006	5952
13,00	0,0382	3199	0,0219	6720	0,0005	5024
15,00	0,0383	3200	0,0225	6809	0,0003	4222
17,00	0,0380	3192	0,0229	6907	0,0000	556
19,00	0,0373	3140	0,0234	6900	-	-
21,00	0,0363	3126	0,0234	6902	-	-
23,00	0,0376	3229	0,0233	6870	-	-
25,00	0,0367	3111	0,0231	6832	-	-
27,00	0,0367	3070	0,0231	6862	-	-
30,00	0,0367	3079	0,0231	6858	-	-

Tabela E22. Dados experimentais para a suspensão de 2 lbm/bbl (5,71 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0448	3672	0,0310	7860	0,0095	9714
3,00	0,0447	3526	0,0303	7983	0,0046	9558
5,00	0,0435	3469	0,0306	7989	0,0038	9085
7,00	0,0433	3418	0,0300	7909	0,0013	8783
9,00	0,0416	3398	0,0300	7922	0,0008	8126
11,00	0,0407	3320	0,0300	7891	0,0007	8036
13,00	0,0402	3305	0,0298	7820	0,0006	8035
15,00	0,0399	3308	0,0289	7759	0,0004	8014
17,00	0,0395	3331	0,0292	7748	0,0002	7862
19,00	0,0394	3290	0,0289	7684	0,0001	7536
21,00	0,0390	3323	0,0280	7687	0,0000	723
23,00	0,0393	3223	0,0283	7589	-	-
25,00	0,0385	3278	0,0276	7625	-	-
27,00	0,0385	3270	0,0276	7562	-	-
30,00	0,0385	3280	0,0276	7481	-	-

Tabela E23. Dados experimentais para a suspensão de 2 lbm/bbl (5,71 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0527	4176	0,0408	9876	0,0107	11924
3,00	0,0538	3816	0,0402	9805	0,0048	11740
5,00	0,0527	3719	0,0399	9699	0,0043	11045
7,00	0,0511	3729	0,0394	9730	0,0015	10311
9,00	0,0500	3713	0,0389	9553	0,0009	9604
11,00	0,0518	3788	0,0381	9427	0,0008	9780
13,00	0,0518	3742	0,0379	9436	0,0007	9875
15,00	0,0509	3697	0,0375	9378	0,0005	9016
17,00	0,0504	3682	0,0374	9371	0,0001	6994
19,00	0,0495	3650	0,0372	9272	0,0001	4072
21,00	0,0496	3666	0,0366	9283	0,0000	598
23,00	0,0498	3638	0,0367	9105	-	-
25,00	0,0498	3664	0,0358	9099	-	-
27,00	0,0498	3681	0,0358	9085	-	-
30,00	0,0498	3685	0,0358	9137	-	-

Tabela E24. Dados experimentais para a suspensão de 2 lbm/bbl (5,71 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0643	4397	0,0498	12024	0,0138	14875
3,00	0,0632	4313	0,0496	11996	0,0098	14170
5,00	0,0608	4305	0,0485	12081	0,0054	13582
7,00	0,0599	4123	0,0483	12053	0,0026	12715
9,00	0,0587	4095	0,0478	12015	0,0016	11944
11,00	0,0587	4112	0,0477	11961	0,0009	11164
13,00	0,0580	4091	0,0475	11824	0,0008	11443
15,00	0,0578	4071	0,0469	11877	0,0006	10558
17,00	0,0576	4077	0,0469	11737	0,0002	8580
19,00	0,0577	4050	0,0468	11670	0,0001	7323
21,00	0,0577	4150	0,0463	11740	0,0000	661
23,00	0,0577	4052	0,0461	11651	-	-
25,00	0,0577	4147	0,0461	11536	-	-
27,00	0,0577	4120	0,0461	11636	-	-
30,00	0,0577	4073	0,0461	11646	-	-

Tabela E25. Dados experimentais para a suspensão de 3 lbm/bbl (8,56 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0245	2776	0,0070	3889	0,0008	3760
3,00	0,0247	2751	0,0071	3937	0,0007	3201
5,00	0,0243	2729	0,0071	3935	0,0003	3220
7,00	0,0233	2672	0,0071	3915	0,0003	3219
9,00	0,0229	2705	0,0072	3905	0,0002	3229
11,00	0,0226	2668	0,0072	3910	0,0003	3227
13,00	0,0225	2664	0,0071	3916	0,0003	3240
15,00	0,0221	2659	0,0072	3920	0,0002	3261
17,00	0,0215	2630	0,0072	3921	0,0002	3272
19,00	0,0213	2610	0,0071	3929	0,0002	3288
21,00	0,0211	2589	0,0072	3920	0,0002	3284
23,00	0,0210	2619	0,0073	3926	0,0002	3303
25,00	0,0217	2674	0,0072	3935	0,0002	3370
27,00	0,0211	2591	0,0072	3934	0,0002	3347
30,00	0,0215	2604	0,0072	3931	0,0001	3343

Tabela E26. Dados experimentais para a suspensão de 3 lbm/bbl (8,56 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0340	3050	0,0130	5231	0,0038	5689
3,00	0,0327	3076	0,0132	5209	0,0007	5148
5,00	0,0331	3082	0,0133	5227	0,0005	5193
7,00	0,0326	3020	0,0134	5244	0,0005	5216
9,00	0,0322	2817	0,0136	5269	0,0004	5250
11,00	0,0303	2841	0,0135	5268	0,0004	5206
13,00	0,0307	2882	0,0137	5286	0,0004	5248
15,00	0,0315	3065	0,0138	5291	0,0004	5284
17,00	0,0321	3085	0,0138	5323	0,0004	5316
19,00	0,0320	3042	0,0138	5312	0,0003	5338
21,00	0,0341	3115	0,0139	5337	0,0003	5406
23,00	0,0354	3100	0,0140	5357	0,0003	5439
25,00	0,0360	3162	0,0143	5391	0,0001	4569
27,00	0,0361	3066	0,0141	5360	0,0002	4460
30,00	0,0372	3351	0,0142	5366	0,0003	4438

Tabela E27. Dados experimentais para a suspensão de 3 lbm/bbl (8,56 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0452	3493	0,0247	7033	0,0060	7455
3,00	0,0454	3783	0,0247	7008	0,0019	6166
5,00	0,0444	3625	0,0244	7060	0,0009	5374
7,00	0,0432	3752	0,0246	7033	0,0007	4462
9,00	0,0434	3800	0,0244	7043	0,0003	3154
11,00	0,0437	3703	0,0243	7011	0,0000	457
13,00	0,0408	3348	0,0244	7032	-	-
15,00	0,0399	3482	0,0245	7053	-	-
17,00	0,0395	3387	0,0246	7029	-	-
19,00	0,0412	3591	0,0244	7029	-	-
21,00	0,0409	3522	0,0243	6991	-	-
23,00	0,0409	3486	0,0241	6959	-	-
25,00	0,0410	3542	0,0239	6927	-	-
27,00	0,0393	3398	0,0239	6973	-	-
30,00	0,0381	3434	0,0238	6873	-	-

Tabela E28. Dados experimentais para a suspensão de 3 lbm/bbl (8,56 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0478	3690	0,0322	8062	0,0092	9544
3,00	0,0484	3626	0,0318	8080	0,0065	8813
5,00	0,0473	3637	0,0316	8062	0,0038	7660
7,00	0,0481	3641	0,0314	8078	0,0003	5493
9,00	0,0468	3825	0,0318	8265	0,0000	321
11,00	0,0463	3615	0,0311	8024	-	-
13,00	0,0459	3520	0,0313	8074	-	-
15,00	0,0453	3481	0,0309	7945	-	-
17,00	0,0448	3350	0,0307	7902	-	-
19,00	0,0444	3431	0,0303	7826	-	-
21,00	0,0442	3469	0,0302	7894	-	-
23,00	0,0436	3519	0,0299	7825	-	-
25,00	0,0427	3469	0,0297	7823	-	-
27,00	0,0433	3660	0,0302	7814	-	-
30,00	0,0429	3492	0,0296	7828	-	-

Tabela E29. Dados experimentais para a suspensão de 3 lbm/bbl (8,56 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0578	3982	0,0413	10012	0,0092	11921
3,00	0,0569	3976	0,0406	9598	0,0026	8304
5,00	0,0557	3878	0,0403	9716	0,0011	6352
7,00	0,0539	3745	0,0398	9726	0,0002	3653
9,00	0,0532	3748	0,0394	9598	0,0000	478
11,00	0,0528	3708	0,0387	9665	-	-
13,00	0,0522	3679	0,0389	9483	-	-
15,00	0,0512	3710	0,0384	9408	-	-
17,00	0,0510	3700	0,0385	9278	-	-
19,00	0,0508	3851	0,0377	9248	-	-
21,00	0,0505	3716	0,0373	9137	-	-
23,00	0,0486	3627	0,0368	9083	-	-
25,00	0,0493	3586	0,0368	9098	-	-
27,00	0,0498	3605	0,0372	9194	-	-
30,00	0,0497	3666	0,0373	9130	-	-

Tabela E30. Dados experimentais para a suspensão de 3 lbm/bbl (8,56 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0692	4368	0,0495	12404	0,0157	15990
3,00	0,0644	4239	0,0499	12375	0,0128	14423
5,00	0,0641	4109	0,0494	12302	0,0072	12206
7,00	0,0641	4147	0,0493	12335	0,0004	8930
9,00	0,0633	4174	0,0494	12313	0,0000	717
11,00	0,0619	4140	0,0494	12536	-	-
13,00	0,0624	4118	0,0493	12372	-	-
15,00	0,0627	4293	0,0489	12223	-	-
17,00	0,0618	4076	0,0484	12128	-	-
19,00	0,0609	4138	0,0487	12278	-	-
21,00	0,0613	4294	0,0487	12205	-	-
23,00	0,0573	3712	0,0488	12177	-	-
25,00	0,0565	3793	0,0486	12131	-	-
27,00	0,0566	3792	0,0483	12182	-	-
30,00	0,0553	3699	0,0483	12065	-	-

Tabela E31. Dados experimentais para a suspensão de 4 lbm/bbl (11,41 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0253	2636	0,0077	3999	0,0025	4280
3,00	0,0254	2582	0,0078	4020	0,0013	4172
5,00	0,0247	2551	0,0079	4011	0,0007	4073
7,00	0,0234	2469	0,0079	4009	0,0003	4028
9,00	0,0232	2577	0,0079	4020	0,0003	4075
11,00	0,0230	2532	0,0080	4031	0,0003	3926
13,00	0,0228	2550	0,0078	4026	0,0002	3181
15,00	0,0224	2496	0,0080	4015	0,0002	3185
17,00	0,0218	2489	0,0080	4039	0,0002	3193
19,00	0,0220	2481	0,0080	4049	0,0003	3184
21,00	0,0217	2471	0,0079	4030	0,0002	3204
23,00	0,0218	2490	0,0080	4043	0,0002	3225
25,00	0,0218	2487	0,0080	4015	0,0002	3252
27,00	0,0222	2588	0,0080	4037	0,0001	3195
30,00	0,0218	2410	0,0080	4042	0,0001	3174

Tabela E32. Dados experimentais para a suspensão de 4 lbm/bbl (11,41 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0328	2924	0,0145	5311	0,0032	5294
3,00	0,0325	2883	0,0146	5319	0,0023	4630
5,00	0,0319	3038	0,0147	5305	0,0007	3864
7,00	0,0311	2957	0,0147	5338	0,0006	3910
9,00	0,0304	3011	0,0148	5312	0,0005	3913
11,00	0,0308	3062	0,0148	5339	0,0003	3006
13,00	0,0309	3200	0,0150	5356	0,0002	3164
15,00	0,0312	3174	0,0153	5424	0,0001	2957
17,00	0,0312	3075	0,0154	5450	0,0000	981
19,00	0,0316	3011	0,0155	5466	-	-
21,00	0,0318	3050	0,0155	5478	-	-
23,00	0,0319	3021	0,0154	5479	-	-
25,00	0,0323	3108	0,0158	5492	-	-
27,00	0,0328	3090	0,0157	5506	-	-
30,00	0,0331	3103	0,0157	5484	-	-

Tabela E33. Dados experimentais para a suspensão de 4 lbm/bbl (11,41 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0382	3546	0,0240	6640	0,0062	7765
3,00	0,0373	3347	0,0235	6609	0,0017	6175
5,00	0,0370	3245	0,0233	6550	0,0005	5520
7,00	0,0370	3112	0,0233	6585	0,0001	4714
9,00	0,0375	3244	0,0238	6700	0,0000	527
11,00	0,0375	3170	0,0238	6649	-	-
13,00	0,0380	3177	0,0235	6580	-	-
15,00	0,0381	3248	0,0234	6610	-	-
17,00	0,0367	3175	0,0234	6560	-	-
19,00	0,0356	3211	0,0233	6570	-	-
21,00	0,0362	3167	0,0232	6582	-	-
23,00	0,0363	3172	0,0233	6605	-	-
25,00	0,0356	3154	0,0233	6555	-	-
27,00	0,0353	3130	0,0229	6520	-	-
30,00	0,0353	3274	0,0228	6485	-	-

Tabela E34. Dados experimentais para a suspensão de 4 lbm/bbl (11,41 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0468	3443	0,0317	7950	0,0077	9435
3,00	0,0461	3433	0,0318	8040	0,0022	8805
5,00	0,0450	3273	0,0313	7940	0,0008	7065
7,00	0,0429	3245	0,0314	8033	0,0002	6019
9,00	0,0423	3269	0,0317	8051	0,0001	5027
11,00	0,0428	3232	0,0317	7970	0,0000	663
13,00	0,0425	3252	0,0312	7956	-	-
15,00	0,0426	3109	0,0312	7896	-	-
17,00	0,0403	3100	0,0308	7881	-	-
19,00	0,0391	3108	0,0308	7844	-	-
21,00	0,0410	3223	0,0303	7742	-	-
23,00	0,0427	3270	0,0298	7710	-	-
25,00	0,0418	3217	0,0293	7619	-	-
27,00	0,0414	3206	0,0291	7579	-	-
30,00	0,0426	3216	0,0293	7712	-	-

Tabela E35. Dados experimentais para a suspensão de 4 lbm/bbl (11,41 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0530	3847	0,0417	10029	0,0092	12026
3,00	0,0513	3724	0,0416	9741	0,0028	9425
5,00	0,0495	3773	0,0410	9805	0,0006	6650
7,00	0,0508	3689	0,0406	9689	0,0000	592
9,00	0,0504	3827	0,0408	9856	-	-
11,00	0,0512	3864	0,0405	9509	-	-
13,00	0,0515	3701	0,0401	9441	-	-
15,00	0,0509	3850	0,0398	9492	-	-
17,00	0,0498	3980	0,0390	9308	-	-
19,00	0,0494	3853	0,0388	9188	-	-
21,00	0,0503	3756	0,0383	9238	-	-
23,00	0,0507	3746	0,0382	9185	-	-
25,00	0,0508	3803	0,0382	9191	-	-
27,00	0,0504	3578	0,0380	9201	-	-
30,00	0,0493	3610	0,0381	9087	-	-

Tabela E36. Dados experimentais para a suspensão de 4 lbm/bbl (11,41 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0632	4856	0,0477	11703	0,0122	15723
3,00	0,0614	4604	0,0478	11932	0,0015	9582
5,00	0,0603	4195	0,0478	11836	0,0000	645
7,00	0,0587	4594	0,0478	11928	-	-
9,00	0,0607	4483	0,0477	11729	-	-
11,00	0,0615	4667	0,0472	11696	-	-
13,00	0,0623	4800	0,0472	11864	-	-
15,00	0,0626	4977	0,0473	11714	-	-
17,00	0,0621	4787	0,0471	11844	-	-
19,00	0,0618	4768	0,0468	11591	-	-
21,00	0,0613	4911	0,0464	11580	-	-
23,00	0,0611	4845	0,0463	11587	-	-
25,00	0,0610	4618	0,0465	11522	-	-
27,00	0,0613	4676	0,0464	11606	-	-
30,00	0,0593	4556	0,0464	11654	-	-

Tabela E37. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0213	2654	0,0080	4362	0,0013	3729
3,00	0,0215	2613	0,0084	4424	0,0013	3700
5,00	0,0220	2648	0,0088	4464	0,0009	3620
7,00	0,0224	2679	0,0092	4546	0,0003	3443
9,00	0,0226	2724	0,0098	4652	0,0003	3500
11,00	0,0226	2812	0,0100	4675	0,0002	3530
13,00	0,0225	2599	0,0103	4735	0,0003	3565
15,00	0,0238	2655	0,0106	4748	0,0003	3578
17,00	0,0239	2687	0,0108	4768	0,0002	3615
19,00	0,0234	2648	0,0108	4800	0,0002	3630
21,00	0,0228	2610	0,0109	4842	0,0002	3651
23,00	0,0238	2686	0,0111	4851	0,0002	3700
25,00	0,0256	2732	0,0113	4864	0,0001	2924
27,00	0,0256	2735	0,0115	4953	0,0000	503
30,00	0,0258	2754	0,0118	4968	-	-

Tabela E38. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0282	2814	0,0158	5712	0,0037	5991
3,00	0,0284	2801	0,0161	5734	0,0007	5355
5,00	0,0281	2861	0,0164	5743	0,0006	5309
7,00	0,0273	2808	0,0166	5763	0,0005	5373
9,00	0,0278	2824	0,0168	5829	0,0003	4995
11,00	0,0292	2847	0,0170	5867	0,0003	4998
13,00	0,0294	3014	0,0176	5953	0,0003	4996
15,00	0,0301	2955	0,0178	6005	0,0001	3771
17,00	0,0307	3069	0,0182	6023	0,0000	624
19,00	0,0306	3036	0,0184	6099	-	-
21,00	0,0308	3091	0,0188	6106	-	-
23,00	0,0311	3067	0,0191	6159	-	-
25,00	0,0315	3053	0,0195	6222	-	-
27,00	0,0313	3114	0,0196	6224	-	-
30,00	0,0317	3003	0,0199	6313	-	-

Tabela E39. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0330	2869	0,0225	6806	0,0055	7669
3,00	0,0343	2909	0,0236	6952	0,0014	6023
5,00	0,0341	3017	0,0243	6983	0,0008	6024
7,00	0,0338	2973	0,0246	6984	0,0006	5084
9,00	0,0339	3048	0,0243	6871	0,0003	4338
11,00	0,0343	3187	0,0238	6951	0,0000	849
13,00	0,0333	3065	0,0243	7022	-	-
15,00	0,0322	3046	0,0241	6727	-	-
17,00	0,0318	3046	0,0232	6883	-	-
19,00	0,0315	2975	0,0238	6925	-	-
21,00	0,0318	2915	0,0239	6904	-	-
23,00	0,0318	2925	0,0238	6952	-	-
25,00	0,0326	3018	0,0240	6933	-	-
27,00	0,0331	3085	0,0238	6947	-	-
30,00	0,0334	3025	0,0238	6913	-	-

Tabela E40. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0415	3404	0,0315	8280	0,0057	9693
3,00	0,0419	3426	0,0313	8245	0,0011	7073
5,00	0,0415	3384	0,0327	8315	0,0000	621
7,00	0,0409	3326	0,0322	8139	-	-
9,00	0,0408	3294	0,0314	8115	-	-
11,00	0,0407	3311	0,0318	8065	-	-
13,00	0,0399	3249	0,0307	7960	-	-
15,00	0,0393	3199	0,0308	8048	-	-
17,00	0,0393	3233	0,0307	8017	-	-
19,00	0,0388	3294	0,0303	7938	-	-
21,00	0,0394	3227	0,0303	7931	-	-
23,00	0,0393	3248	0,0299	7913	-	-
25,00	0,0392	3209	0,0295	7847	-	-
27,00	0,0401	3299	0,0293	7850	-	-
30,00	0,0396	3250	0,0292	7789	-	-

Tabela E41. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0545	3750	0,0410	10253	0,0087	12370
3,00	0,0536	3963	0,0410	9804	0,0008	7765
5,00	0,0548	3768	0,0408	10115	0,0000	828
7,00	0,0528	3755	0,0404	9835	-	-
9,00	0,0523	3974	0,0396	9668	-	-
11,00	0,0511	3698	0,0394	9782	-	-
13,00	0,0496	3843	0,0388	9551	-	-
15,00	0,0499	3788	0,0378	9424	-	-
17,00	0,0494	3848	0,0376	9261	-	-
19,00	0,0484	3743	0,0382	9651	-	-
21,00	0,0481	3591	0,0387	9635	-	-
23,00	0,0490	3625	0,0384	9395	-	-
25,00	0,0486	3759	0,0384	9604	-	-
27,00	0,0498	3678	0,0387	9631	-	-
30,00	0,0489	3647	0,0387	9463	-	-

Tabela E42. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0702	4639	0,0493	11615	0,0118	16998
3,00	0,0657	4520	0,0483	11771	0,0000	791
5,00	0,0646	4450	0,0473	11725	-	-
7,00	0,0664	5062	0,0468	11871	-	-
9,00	0,0663	5031	0,0468	12002	-	-
11,00	0,0635	5153	0,0469	11958	-	-
13,00	0,0644	4799	0,0462	11737	-	-
15,00	0,0643	5127	0,0457	11575	-	-
17,00	0,0654	4979	0,0454	11502	-	-
19,00	0,0638	4741	0,0456	11478	-	-
21,00	0,0629	4642	0,0453	11548	-	-
23,00	0,0639	4588	0,0459	11602	-	-
25,00	0,0609	4280	0,0454	11521	-	-
27,00	0,0583	4535	0,0452	11512	-	-
30,00	0,0591	4487	0,0453	11830	-	-

Tabela E43. Dados experimentais para a suspensão de 6 lbm/bbl (17,12 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0237	2918	0,0047	3306
3,00	0,0199	2452	0,0039	3195
5,00	0,0172	2385	0,0038	3210
7,00	0,0161	2202	0,0037	3203
9,00	0,0154	2200	0,0037	3191
11,00	0,0150	2192	0,0038	3189
13,00	0,0149	2225	0,0038	3199
15,00	0,0148	2211	0,0038	3202
17,00	0,0144	2184	0,0037	3194
19,00	0,0142	2204	0,0037	3190
21,00	0,0143	2208	0,0037	3205
23,00	0,0144	2202	0,0037	3204
25,00	0,0138	2187	0,0037	3209
27,00	0,0141	2222	0,0037	3226
30,00	0,0146	2242	0,0037	3231

Tabela E44. Dados experimentais para a suspensão de 6 lbm/bbl (17,12 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0202	2451	0,0067	3806
3,00	0,0207	2436	0,0068	3820
5,00	0,0193	2423	0,0068	3818
7,00	0,0188	2412	0,0068	3841
9,00	0,0181	2365	0,0068	3844
11,00	0,0167	2305	0,0068	3852
13,00	0,0169	2372	0,0068	3850
15,00	0,0171	2362	0,0067	3826
17,00	0,0168	2330	0,0067	3816
19,00	0,0166	2289	0,0066	3805
21,00	0,0158	2262	0,0066	3792
23,00	0,0156	2252	0,0065	3789
25,00	0,0149	2201	0,0065	3791
27,00	0,0145	2196	0,0065	3777
30,00	0,0146	2200	0,0064	3767

Tabela E45. Dados experimentais para a suspensão de 6 lbm/bbl (17,12 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0218	2560	0,0052	4155
3,00	0,0213	2595	0,0048	4050
5,00	0,0198	2466	0,0052	3990
7,00	0,0196	2430	0,0053	3903
9,00	0,0188	2386	0,0054	3899
11,00	0,0186	2355	0,0055	3933
13,00	0,0180	2300	0,0054	3938
15,00	0,0173	2230	0,0054	3876
17,00	0,0167	2275	0,0057	3905
19,00	0,0168	2279	0,0055	3853
21,00	0,0168	2290	0,0056	3844
23,00	0,0169	2268	0,0056	3772
25,00	0,0166	2274	0,0054	3820
27,00	0,0167	2289	0,0055	3819
30,00	0,0163	2239	0,0053	3850

Tabela E46. Dados experimentais para a suspensão de 6 lbm/bbl (17,12 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0353	3486	0,0125	5278
3,00	0,0345	3375	0,0128	5302
5,00	0,0333	3327	0,0128	5231
7,00	0,0311	3241	0,0124	5266
9,00	0,0297	3157	0,0121	5166
11,00	0,0290	3102	0,0122	5328
13,00	0,0285	3075	0,0118	5195
15,00	0,0263	3031	0,0115	5168
17,00	0,0243	3009	0,0115	5273
19,00	0,0221	3007	0,0115	5231
21,00	0,0236	3174	0,0116	5246
23,00	0,0232	3159	0,0116	5250
25,00	0,0217	3037	0,0114	5225
27,00	0,0181	2815	0,0113	5286
30,00	0,0166	2707	0,0113	5169

Tabela E47. Dados experimentais para a suspensão de 6 lbm/bbl (17,12 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0360	3924	0,0202	7619
3,00	0,0359	4026	0,0191	6768
5,00	0,0357	3886	0,0193	6916
7,00	0,0357	3900	0,0186	6786
9,00	0,0358	3831	0,0184	6944
11,00	0,0343	3754	0,0179	6830
13,00	0,0331	3699	0,0182	6800
15,00	0,0326	3830	0,0186	6901
17,00	0,0323	3786	0,0186	6980
19,00	0,0323	3769	0,0189	6988
21,00	0,0321	4105	0,0189	7020
23,00	0,0321	3849	0,0192	7132
25,00	0,0310	3852	0,0192	7091
27,00	0,0330	3800	0,0192	7063
30,00	0,0323	3826	0,0191	7100

Tabela E48. Dados experimentais para a suspensão de 6 lbm/bbl (17,12 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0453	4334	0,0382	9364
3,00	0,0441	3980	0,0373	9259
5,00	0,0405	3943	0,0365	9173
7,00	0,0356	3956	0,0355	9231
9,00	0,0382	4139	0,0347	9099
11,00	0,0406	4182	0,0339	9088
13,00	0,0407	4236	0,0336	9049
15,00	0,0373	4144	0,0331	8864
17,00	0,0375	4159	0,0323	8828
19,00	0,0390	4275	0,0320	8756
21,00	0,0371	4057	0,0310	8777
23,00	0,0344	3958	0,0307	8831
25,00	0,0338	3881	0,0298	8789
27,00	0,0316	3838	0,0303	8821
30,00	0,0322	3812	0,0301	8744

Tabela E49. Dados experimentais para a suspensão de 7 lbm/bbl (19,97 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0187	2310	0,0045	3147
3,00	0,0178	2342	0,0043	3092
5,00	0,0173	2367	0,0044	3087
7,00	0,0163	2295	0,0043	3079
9,00	0,0161	2234	0,0043	3078
11,00	0,0162	2290	0,0043	3068
13,00	0,0162	2253	0,0043	3075
15,00	0,0159	2242	0,0043	3085
17,00	0,0160	2203	0,0044	3079
19,00	0,0157	2351	0,0043	3082
21,00	0,0155	2422	0,0043	3075
23,00	0,0153	2213	0,0043	3084
25,00	0,0155	2206	0,0043	3081
27,00	0,0153	2198	0,0043	3076
30,00	0,0156	2190	0,0044	3078

Tabela E50. Dados experimentais para a suspensão de 7 lbm/bbl (19,97 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0233	2662	0,0063	4375
3,00	0,0223	2580	0,0064	4227
5,00	0,0218	2590	0,0071	4168
7,00	0,0218	2598	0,0073	4164
9,00	0,0206	2507	0,0073	4173
11,00	0,0195	2472	0,0073	4179
13,00	0,0194	2478	0,0073	4169
15,00	0,0190	2461	0,0073	4177
17,00	0,0189	2452	0,0072	4156
19,00	0,0191	2457	0,0071	4161
21,00	0,0178	2380	0,0071	4150
23,00	0,0173	2320	0,0071	4139
25,00	0,0173	2396	0,0071	4156
27,00	0,0181	2357	0,0071	4147
30,00	0,0171	2313	0,0070	4131

Tabela E51. Dados experimentais para a suspensão de 7 lbm/bbl (19,97 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0272	2722	0,0080	4193
3,00	0,0256	2652	0,0080	4130
5,00	0,0248	2620	0,0079	4093
7,00	0,0256	2750	0,0076	4058
9,00	0,0240	2661	0,0075	4018
11,00	0,0237	2725	0,0074	4008
13,00	0,0232	2664	0,0073	3966
15,00	0,0223	2623	0,0073	3974
17,00	0,0216	2595	0,0072	3955
19,00	0,0208	2630	0,0071	3922
21,00	0,0208	2549	0,0071	3945
23,00	0,0206	2545	0,0070	3945
25,00	0,0204	2515	0,0070	3926
27,00	0,0198	2509	0,0070	3931
30,00	0,0192	2513	0,0069	3920

Tabela E52. Dados experimentais para a suspensão de 7 lbm/bbl (19,97 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0393	3605	0,0157	5654
3,00	0,0403	3570	0,0156	5641
5,00	0,0365	3347	0,0155	5735
7,00	0,0332	3157	0,0150	5528
9,00	0,0322	3199	0,0152	5441
11,00	0,0313	3225	0,0152	5508
13,00	0,0305	3206	0,0149	5505
15,00	0,0292	2925	0,0146	5607
17,00	0,0286	3333	0,0148	5556
19,00	0,0306	3217	0,0144	5492
21,00	0,0305	3330	0,0145	5555
23,00	0,0317	3303	0,0143	5504
25,00	0,0328	3303	0,0143	5520
27,00	0,0320	3243	0,0143	5492
30,00	0,0316	3349	0,0143	5463

Tabela E53. Dados experimentais para a suspensão de 7 lbm/bbl (19,97 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0417	3682	0,0240	7178
3,00	0,0418	3602	0,0236	7378
5,00	0,0398	3630	0,0220	7344
7,00	0,0389	3786	0,0224	7593
9,00	0,0375	3717	0,0226	7314
11,00	0,0370	3634	0,0223	7283
13,00	0,0369	3949	0,0221	7361
15,00	0,0372	3727	0,0218	7256
17,00	0,0354	3420	0,0219	7279
19,00	0,0335	3410	0,0217	7310
21,00	0,0336	3420	0,0217	7248
23,00	0,0335	3293	0,0215	7149
25,00	0,0342	3376	0,0213	7190
27,00	0,0348	3436	0,0213	7104
30,00	0,0360	3284	0,0209	7172

Tabela E54. Dados experimentais para a suspensão de 7 lbm/bbl (19,97 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0470	3848	0,0327	8934
3,00	0,0449	3750	0,0325	8984
5,00	0,0448	3907	0,0320	8903
7,00	0,0437	4172	0,0319	9125
9,00	0,0432	3794	0,0319	8904
11,00	0,0420	3902	0,0318	8948
13,00	0,0413	3705	0,0318	9007
15,00	0,0417	3773	0,0316	8909
17,00	0,0416	3692	0,0317	8774
19,00	0,0419	3708	0,0318	8964
21,00	0,0411	3571	0,0318	9076
23,00	0,0402	3644	0,0318	8913
25,00	0,0402	3737	0,0318	9007
27,00	0,0388	3704	0,0320	8944
30,00	0,0390	3587	0,0319	8900

Tabela E55. Dados experimentais para a suspensão de 8 lbm/bbl (22,82 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0165	2087	0,0038	3003
3,00	0,0163	2057	0,0038	3010
5,00	0,0158	2034	0,0038	3016
7,00	0,0154	2039	0,0038	3028
9,00	0,0154	2038	0,0038	3014
11,00	0,0154	2075	0,0038	3012
13,00	0,0153	2071	0,0038	3056
15,00	0,0154	2078	0,0037	3038
17,00	0,0153	2070	0,0038	3019
19,00	0,0154	2076	0,0039	3037
21,00	0,0153	2080	0,0040	3016
23,00	0,0150	2044	0,0039	3011
25,00	0,0146	2050	0,0040	3019
27,00	0,0143	2044	0,0039	3036
30,00	0,0143	2028	0,0039	3013

Tabela E56. Dados experimentais para a suspensão de 8 lbm/bbl (22,82 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0220	2450	0,0068	4224
3,00	0,0212	2464	0,0068	4194
5,00	0,0208	2421	0,0069	4193
7,00	0,0209	2460	0,0071	4186
9,00	0,0209	2507	0,0072	4231
11,00	0,0203	2490	0,0071	4221
13,00	0,0198	2482	0,0071	4233
15,00	0,0193	2389	0,0071	4203
17,00	0,0186	2477	0,0070	4187
19,00	0,0186	2389	0,0070	4217
21,00	0,0179	2381	0,0069	4205
23,00	0,0177	2325	0,0070	4189
25,00	0,0176	2334	0,0069	4159
27,00	0,0175	2320	0,0069	4190
30,00	0,0171	2311	0,0069	4203

Tabela E57. Dados experimentais para a suspensão de 8 lbm/bbl (22,82 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0290	2884	0,0088	4309
3,00	0,0288	2965	0,0089	4308
5,00	0,0281	2904	0,0088	4280
7,00	0,0280	2946	0,0088	4250
9,00	0,0275	2949	0,0088	4259
11,00	0,0268	2878	0,0087	4280
13,00	0,0254	2737	0,0086	4280
15,00	0,0252	2776	0,0085	4203
17,00	0,0251	2737	0,0084	4211
19,00	0,0249	2762	0,0083	4175
21,00	0,0243	2705	0,0083	4169
23,00	0,0228	2614	0,0082	4163
25,00	0,0224	2615	0,0082	4143
27,00	0,0218	2591	0,0081	4147
30,00	0,0217	2529	0,0080	4120

Tabela E58. Dados experimentais para a suspensão de 8 lbm/bbl (22,82 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0323	2940	0,0213	6388
3,00	0,0314	3181	0,0213	6369
5,00	0,0318	3891	0,0210	6379
7,00	0,0313	3733	0,0205	6282
9,00	0,0308	3244	0,0199	6244
11,00	0,0303	3308	0,0194	6091
13,00	0,0296	3170	0,0188	6072
15,00	0,0288	3175	0,0182	5980
17,00	0,0276	3140	0,0178	5902
19,00	0,0262	3174	0,0175	5870
21,00	0,0267	3096	0,0173	5808
23,00	0,0264	3105	0,0169	5771
25,00	0,0264	3239	0,0167	5713
27,00	0,0283	2933	0,0167	5732
30,00	0,0258	2747	0,0166	5713

Tabela E59. Dados experimentais para a suspensão de 8 lbm/bbl (22,82 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0352	3161	0,0272	7739
3,00	0,0335	3177	0,0264	7550
5,00	0,0312	3235	0,0257	7356
7,00	0,0284	3242	0,0252	7209
9,00	0,0281	3240	0,0245	7254
11,00	0,0276	3224	0,0242	7336
13,00	0,0279	3291	0,0228	7217
15,00	0,0283	3230	0,0233	7259
17,00	0,0286	3294	0,0230	7160
19,00	0,0293	3371	0,0230	7269
21,00	0,0304	3490	0,0233	7241
23,00	0,0302	3368	0,0233	7443
25,00	0,0285	3493	0,0231	7129
27,00	0,0346	3373	0,0236	7226
30,00	0,0323	3041	0,0233	7332

Tabela E60. Dados experimentais para a suspensão de 8 lbm/bbl (22,82 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0430	3725	0,0360	9513
3,00	0,0414	3559	0,0348	9363
5,00	0,0412	3501	0,0339	9263
7,00	0,0441	3460	0,0333	9098
9,00	0,0423	3630	0,0323	9209
11,00	0,0414	3429	0,0321	9102
13,00	0,0407	3244	0,0332	9150
15,00	0,0392	3560	0,0333	9106
17,00	0,0380	3164	0,0331	9213
19,00	0,0361	3415	0,0329	9231
21,00	0,0362	3158	0,0329	9085
23,00	0,0356	3770	0,0325	9127
25,00	0,0353	3450	0,0323	9073
27,00	0,0352	3319	0,0320	8993
30,00	0,0353	3620	0,0318	8835

Tabela E61. Dados experimentais para a suspensão de 9 lbm/bbl (25,68 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0172	2270	0,0040	2929
3,00	0,0171	2258	0,0039	2937
5,00	0,0171	2238	0,0038	2936
7,00	0,0164	2165	0,0038	2933
9,00	0,0156	2147	0,0039	2935
11,00	0,0153	2148	0,0038	2941
13,00	0,0153	2209	0,0039	2925
15,00	0,0152	2300	0,0039	2927
17,00	0,0155	2342	0,0038	2931
19,00	0,0153	2342	0,0039	2944
21,00	0,0155	2356	0,0038	2922
23,00	0,0155	2335	0,0038	2938
25,00	0,0155	2408	0,0038	2942
27,00	0,0154	2389	0,0039	2932
30,00	0,0154	2430	0,0039	2944

Tabela E62. Dados experimentais para a suspensão de 9 lbm/bbl (25,68 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0232	2854	0,0065	4164
3,00	0,0227	2762	0,0068	4114
5,00	0,0224	2749	0,0070	4121
7,00	0,0213	2701	0,0071	4142
9,00	0,0212	2744	0,0071	4173
11,00	0,0215	2760	0,0071	4119
13,00	0,0212	2751	0,0070	4190
15,00	0,0210	2828	0,0071	4174
17,00	0,0210	2809	0,0071	4172
19,00	0,0204	2761	0,0071	4179
21,00	0,0194	2635	0,0070	4191
23,00	0,0188	2644	0,0070	4167
25,00	0,0183	2497	0,0070	4150
27,00	0,0187	2591	0,0069	4159
30,00	0,0185	2601	0,0069	4156

Tabela E63. Dados experimentais para a suspensão de 9 lbm/bbl (25,68 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0298	2792	0,0093	4428
3,00	0,0294	2839	0,0097	4405
5,00	0,0279	2836	0,0096	4433
7,00	0,0265	2716	0,0095	4414
9,00	0,0264	2712	0,0094	4391
11,00	0,0261	2864	0,0093	4341
13,00	0,0270	2878	0,0093	4371
15,00	0,0258	2847	0,0093	4326
17,00	0,0258	2795	0,0091	4317
19,00	0,0248	2788	0,0091	4335
21,00	0,0247	2768	0,0088	4297
23,00	0,0248	2839	0,0088	4266
25,00	0,0248	2772	0,0088	4269
27,00	0,0238	2684	0,0088	4252
30,00	0,0231	2631	0,0087	4248

Tabela E64. Dados experimentais para a suspensão de 9 lbm/bbl (25,68 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0350	3252	0,0215	6555
3,00	0,0327	3044	0,0216	6551
5,00	0,0314	2890	0,0214	6576
7,00	0,0304	3094	0,0210	6499
9,00	0,0323	2880	0,0205	6446
11,00	0,0318	2809	0,0204	6404
13,00	0,0319	3100	0,0200	6394
15,00	0,0318	2900	0,0196	6299
17,00	0,0309	2893	0,0193	6267
19,00	0,0308	3046	0,0189	6224
21,00	0,0305	2897	0,0186	6126
23,00	0,0303	3073	0,0181	6107
25,00	0,0298	3002	0,0178	6035
27,00	0,0292	3050	0,0177	6010
30,00	0,0289	2779	0,0173	5928

Tabela E65. Dados experimentais para a suspensão de 9 lbm/bbl (25,68 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0405	3591	0,0312	7895
3,00	0,0392	3575	0,0302	7569
5,00	0,0364	3479	0,0289	7676
7,00	0,0360	3180	0,0283	7467
9,00	0,0344	3302	0,0272	7416
11,00	0,0351	3260	0,0265	7279
13,00	0,0361	3320	0,0255	7127
15,00	0,0368	3525	0,0247	7338
17,00	0,0375	3414	0,0246	7154
19,00	0,0367	3391	0,0243	7075
21,00	0,0368	3321	0,0239	7074
23,00	0,0363	3257	0,0243	7325
25,00	0,0364	3295	0,0244	7003
27,00	0,0361	3272	0,0242	7002
30,00	0,0358	3273	0,0248	7062

Tabela E66. Dados experimentais para a suspensão de 9 lbm/bbl (25,68 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0487	3817	0,0368	9195
3,00	0,0460	3686	0,0364	9380
5,00	0,0463	3745	0,0351	9129
7,00	0,0468	3321	0,0357	9150
9,00	0,0473	3602	0,0347	9143
11,00	0,0464	3495	0,0345	9068
13,00	0,0453	3449	0,0341	8954
15,00	0,0443	3294	0,0339	9020
17,00	0,0448	3617	0,0339	8889
19,00	0,0448	3478	0,0345	8972
21,00	0,0448	3559	0,0341	8805
23,00	0,0443	3417	0,0339	9018
25,00	0,0428	3340	0,0342	9036
27,00	0,0442	3532	0,0343	9015
30,00	0,0448	3405	0,0348	9020

Tabela E67. Dados experimentais para a suspensão de 12 lbm/bbl (34,24 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0170	2268	0,0042	3234
3,00	0,0167	2305	0,0040	3258
5,00	0,0162	2318	0,0040	3258
7,00	0,0159	2300	0,0041	3256
9,00	0,0158	2330	0,0041	3248
11,00	0,0155	2293	0,0041	3247
13,00	0,0155	2302	0,0041	3245
15,00	0,0157	2306	0,0041	3248
17,00	0,0155	2281	0,0042	3251
19,00	0,0155	2295	0,0041	3254
21,00	0,0152	2261	0,0041	3264
23,00	0,0150	2263	0,0041	3268
25,00	0,0149	2300	0,0040	3264
27,00	0,0150	2306	0,0041	3260
30,00	0,0148	2209	0,0041	3261

Tabela E68. Dados experimentais para a suspensão de 12 lbm/bbl (34,24 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0228	2647	0,0070	4163
3,00	0,0207	2515	0,0071	4163
5,00	0,0198	2594	0,0073	4184
7,00	0,0196	2555	0,0073	4208
9,00	0,0194	2585	0,0072	4138
11,00	0,0194	2522	0,0073	4130
13,00	0,0196	2542	0,0072	4165
15,00	0,0194	2557	0,0073	4180
17,00	0,0189	2511	0,0072	4207
19,00	0,0190	2498	0,0071	4210
21,00	0,0188	2501	0,0072	4214
23,00	0,0181	2392	0,0072	4205
25,00	0,0166	2323	0,0072	4196
27,00	0,0161	2359	0,0071	4136
30,00	0,0158	2326	0,0072	4156

Tabela E69. Dados experimentais para a suspensão de 12 lbm/bbl (34,24 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0265	2750	0,0122	5194
3,00	0,0263	2679	0,0128	5198
5,00	0,0262	2590	0,0128	5196
7,00	0,0254	2761	0,0128	5183
9,00	0,0252	2737	0,0129	5180
11,00	0,0243	2760	0,0128	5178
13,00	0,0247	2767	0,0127	5175
15,00	0,0243	2715	0,0127	5157
17,00	0,0239	2728	0,0126	5155
19,00	0,0238	2741	0,0125	5128
21,00	0,0237	2716	0,0125	5135
23,00	0,0232	2681	0,0125	5115
25,00	0,0228	2651	0,0123	5109
27,00	0,0224	2620	0,0123	5092
30,00	0,0219	2606	0,0122	5069

Tabela E70. Dados experimentais para a suspensão de 12 lbm/bbl (34,24 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0318	3243	0,0200	6620
3,00	0,0327	3290	0,0203	6650
5,00	0,0319	3193	0,0203	6678
7,00	0,0313	3178	0,0203	6712
9,00	0,0307	3103	0,0199	6613
11,00	0,0303	3082	0,0196	6550
13,00	0,0299	3108	0,0191	6500
15,00	0,0306	3125	0,0187	6451
17,00	0,0301	3103	0,0183	6371
19,00	0,0289	2997	0,0179	6271
21,00	0,0282	3005	0,0176	6210
23,00	0,0283	2992	0,0173	6218
25,00	0,0281	3388	0,0172	6185
27,00	0,0288	3104	0,0169	6120
30,00	0,0294	3112	0,0167	6001

Tabela E71. Dados experimentais para a suspensão de 12 lbm/bbl (34,24 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0422	3555	0,0272	7731
3,00	0,0391	3303	0,0265	7789
5,00	0,0377	3368	0,0258	7613
7,00	0,0371	3382	0,0247	7471
9,00	0,0362	3355	0,0241	7391
11,00	0,0362	3480	0,0230	7180
13,00	0,0365	3581	0,0232	7267
15,00	0,0360	3718	0,0228	7151
17,00	0,0337	3331	0,0217	7207
19,00	0,0346	3185	0,0219	7106
21,00	0,0347	3270	0,0221	7217
23,00	0,0341	3236	0,0219	7402
25,00	0,0333	3285	0,0238	7480
27,00	0,0327	3045	0,0238	7511
30,00	0,0323	3053	0,0241	7439

Tabela E72. Dados experimentais para a suspensão de 12 lbm/bbl (34,24 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0452	4813	0,0375	9546
3,00	0,0448	5260	0,0366	9388
5,00	0,0438	5029	0,0362	9388
7,00	0,0410	4655	0,0363	9455
9,00	0,0418	4828	0,0358	9451
11,00	0,0442	5485	0,0350	9250
13,00	0,0458	5517	0,0351	9142
15,00	0,0455	5837	0,0344	9186
17,00	0,0462	5554	0,0343	9170
19,00	0,0427	3880	0,0335	9005
21,00	0,0341	3676	0,0339	9035
23,00	0,0333	3504	0,0341	9103
25,00	0,0314	3126	0,0332	8888
27,00	0,0273	2694	0,0331	9040
30,00	0,0231	2631	0,0344	9117

Tabela E73. Dados experimentais para a suspensão de 15 lbm/bbl (42,8 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0167	2201	0,0042	3367
3,00	0,0158	2113	0,0043	3350
5,00	0,0157	2111	0,0043	3349
7,00	0,0158	2097	0,0043	3347
9,00	0,0153	2098	0,0043	3342
11,00	0,0153	2125	0,0043	3349
13,00	0,0154	2110	0,0043	3341
15,00	0,0153	2087	0,0043	3357
17,00	0,0150	2112	0,0042	3356
19,00	0,0148	2089	0,0043	3353
21,00	0,0149	2067	0,0043	3355
23,00	0,0150	2052	0,0043	3316
25,00	0,0148	2040	0,0042	3344
27,00	0,0151	2056	0,0042	3334
30,00	0,0150	2089	0,0043	3340

Tabela E74. Dados experimentais para a suspensão de 15 lbm/bbl (42,8 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0222	2534	0,0073	4195
3,00	0,0222	2466	0,0075	4222
5,00	0,0217	2504	0,0078	4232
7,00	0,0201	2475	0,0078	4226
9,00	0,0194	2410	0,0077	4200
11,00	0,0188	2406	0,0077	4204
13,00	0,0188	2396	0,0076	4205
15,00	0,0183	2323	0,0075	4211
17,00	0,0174	2345	0,0074	4172
19,00	0,0183	2377	0,0076	4181
21,00	0,0183	2343	0,0076	4207
23,00	0,0177	2297	0,0077	4201
25,00	0,0170	2275	0,0076	4186
27,00	0,0167	2282	0,0077	4176
30,00	0,0166	2243	0,0076	4188

Tabela E75. Dados experimentais para a suspensão de 15 lbm/bbl (42,8 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0288	3013	0,0127	5351
3,00	0,0277	2765	0,0134	5363
5,00	0,0264	2797	0,0135	5340
7,00	0,0269	2913	0,0135	5358
9,00	0,0268	2892	0,0133	5371
11,00	0,0266	2791	0,0134	5356
13,00	0,0253	2855	0,0134	5353
15,00	0,0258	2795	0,0134	5381
17,00	0,0242	2594	0,0133	5350
19,00	0,0238	2624	0,0133	5344
21,00	0,0229	2595	0,0133	5318
23,00	0,0227	2604	0,0132	5306
25,00	0,0224	2565	0,0133	5311
27,00	0,0233	2662	0,0132	5301
30,00	0,0242	2642	0,0131	5301

Tabela E76. Dados experimentais para a suspensão de 15 lbm/bbl (42,8 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0345	3157	0,0222	6691
3,00	0,0312	3250	0,0219	6695
5,00	0,0314	3368	0,0220	6730
7,00	0,0325	3228	0,0217	6600
9,00	0,0311	3194	0,0210	6554
11,00	0,0303	3130	0,0213	6687
13,00	0,0296	3335	0,0215	6665
15,00	0,0288	3365	0,0213	6587
17,00	0,0276	2972	0,0208	6535
19,00	0,0244	2900	0,0207	6500
21,00	0,0224	2737	0,0203	6460
23,00	0,0228	2896	0,0200	6423
25,00	0,0235	2852	0,0196	6285
27,00	0,0245	2843	0,0193	6279
30,00	0,0253	2790	0,0187	6200

Tabela E77. Dados experimentais para a suspensão de 15 lbm/bbl (42,8 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0393	3690	0,0295	7885
3,00	0,0384	3394	0,0292	7718
5,00	0,0379	3528	0,0284	7851
7,00	0,0355	3388	0,0278	7637
9,00	0,0348	3363	0,0265	7464
11,00	0,0348	3662	0,0253	7346
13,00	0,0347	3744	0,0253	7202
15,00	0,0343	3679	0,0248	7275
17,00	0,0351	3469	0,0243	7350
19,00	0,0350	3618	0,0240	7401
21,00	0,0346	3347	0,0247	7304
23,00	0,0341	3322	0,0248	7364
25,00	0,0335	3209	0,0248	7171
27,00	0,0337	3151	0,0241	7209
30,00	0,0347	3407	0,0247	7374

Tabela E78. Dados experimentais para a suspensão de 15 lbm/bbl (42,8 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0470	4039	0,0375	9501
3,00	0,0428	3617	0,0373	9485
5,00	0,0414	3528	0,0369	9405
7,00	0,0423	3742	0,0366	9323
9,00	0,0392	3766	0,0368	9339
11,00	0,0325	2906	0,0364	9459
13,00	0,0213	2905	0,0357	9196
15,00	0,0228	2983	0,0350	9172
17,00	0,0229	3046	0,0340	8936
19,00	0,0226	3034	0,0324	8918
21,00	0,0231	3098	0,0337	8901
23,00	0,0222	3045	0,0335	8983
25,00	0,0228	2992	0,0338	8875
27,00	0,0228	2768	0,0337	8975
30,00	0,0214	2744	0,0346	9155

Tabela E79. Dados experimentais para a suspensão 16 lbm/bbl (45,65 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino de na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0177	2358	0,0048	3356
3,00	0,0138	2285	0,0038	3311
5,00	0,0139	2404	0,0038	3342
7,00	0,0144	2464	0,0037	3321
9,00	0,0143	2444	0,0038	3304
11,00	0,0142	2464	0,0038	3276
13,00	0,0140	2471	0,0037	3270
15,00	0,0137	2569	0,0037	3267
17,00	0,0136	2542	0,0037	3261
19,00	0,0135	2807	0,0037	3250
21,00	0,0135	2556	0,0038	3254
23,00	0,0134	2597	0,0036	3247
25,00	0,0121	2171	0,0037	3244
27,00	0,0113	2069	0,0038	3250
30,00	0,0119	2032	0,0037	3252

Tabela E80. Dados experimentais para a suspensão de 16 lbm/bbl (45,65 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0220	2674	0,0070	4295
3,00	0,0210	2498	0,0071	4261
5,00	0,0133	2156	0,0073	4280
7,00	0,0116	2053	0,0073	4274
9,00	0,0111	2072	0,0072	4253
11,00	0,0111	2070	0,0073	4225
13,00	0,0110	2082	0,0071	4260
15,00	0,0107	2064	0,0072	4233
17,00	0,0104	2056	0,0072	4242
19,00	0,0102	2032	0,0071	4263
21,00	0,0091	1909	0,0071	4232
23,00	0,0082	1898	0,0070	4239
25,00	0,0071	1844	0,0070	4219
27,00	0,0061	1800	0,0069	4228
30,00	0,0064	1862	0,0070	4226

Tabela E81. Dados experimentais para a suspensão de 16 lbm/bbl ($45,65 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0255	2764	0,0118	5308
3,00	0,0246	2564	0,0128	5296
5,00	0,0222	2732	0,0130	5299
7,00	0,0215	2654	0,0128	5282
9,00	0,0215	2746	0,0127	5238
11,00	0,0202	2583	0,0125	5221
13,00	0,0205	2621	0,0123	5183
15,00	0,0205	2521	0,0120	5119
17,00	0,0201	2504	0,0116	5040
19,00	0,0188	2582	0,0112	4992
21,00	0,0189	2506	0,0108	4962
23,00	0,0178	2434	0,0105	4893
25,00	0,0166	2438	0,0102	4841
27,00	0,0166	2428	0,0101	4811
30,00	0,0158	2403	0,0097	4735

Tabela E82. Dados experimentais para a suspensão de 16 lbm/bbl ($45,65 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0167	2472	0,0205	6583
3,00	0,0152	2340	0,0204	6600
5,00	0,0160	2426	0,0201	6567
7,00	0,0158	2375	0,0197	6564
9,00	0,0144	2375	0,0199	6584
11,00	0,0137	2379	0,0194	6460
13,00	0,0133	2313	0,0187	6335
15,00	0,0120	2378	0,0183	6277
17,00	0,0119	2408	0,0173	6180
19,00	0,0122	2422	0,0168	6028
21,00	0,0124	2459	0,0163	6026
23,00	0,0126	2389	0,0159	5887
25,00	0,0121	2421	0,0158	5914
27,00	0,0118	2385	0,0163	5990
30,00	0,0119	2323	0,0156	6110

Tabela E83. Dados experimentais para a suspensão de 16 lbm/bbl (45,65 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0382	3848	0,0273	7645
3,00	0,0383	4708	0,0266	7546
5,00	0,0359	5433	0,0252	7405
7,00	0,0353	5778	0,0243	7161
9,00	0,0353	4639	0,0239	7187
11,00	0,0340	4140	0,0234	7190
13,00	0,0337	4431	0,0229	7115
15,00	0,0327	3557	0,0228	7263
17,00	0,0329	3722	0,0222	7384
19,00	0,0331	3504	0,0228	7382
21,00	0,0323	3512	0,0231	7338
23,00	0,0303	3475	0,0233	7335
25,00	0,0288	3611	0,0231	7329
27,00	0,0296	3480	0,0233	7282
30,00	0,0301	3402	0,0237	7314

Tabela E84. Dados experimentais para a suspensão de 16 lbm/bbl (45,65 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0428	4563	0,0345	9419
3,00	0,0414	4973	0,0331	9510
5,00	0,0406	4978	0,0341	9370
7,00	0,0386	4513	0,0333	9218
9,00	0,0381	5459	0,0330	9212
11,00	0,0383	4098	0,0318	9416
13,00	0,0370	3767	0,0325	9439
15,00	0,0360	3946	0,0331	9554
17,00	0,0378	4379	0,0333	9306
19,00	0,0354	6891	0,0330	9379
21,00	0,0351	5293	0,0330	9192
23,00	0,0333	4129	0,0325	9309
25,00	0,0308	3293	0,0331	9384
27,00	0,0290	3462	0,0330	9372
30,00	0,0302	3351	0,0333	9314

Tabela E85. Dados experimentais para a suspensão de 18 lbm/bbl (51,35 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0078	1845	0,0037	3365
3,00	0,0078	1791	0,0037	3380
5,00	0,0074	1791	0,0037	3381
7,00	0,0088	1894	0,0036	3370
9,00	0,0094	1859	0,0036	3368
11,00	0,0093	1874	0,0037	3367
13,00	0,0093	1828	0,0037	3370
15,00	0,0082	1802	0,0038	3374
17,00	0,0085	1805	0,0037	3373
19,00	0,0081	1776	0,0038	3384
21,00	0,0067	1661	0,0038	3376
23,00	0,0061	1643	0,0038	3377
25,00	0,0058	1644	0,0038	3377
27,00	0,0058	1654	0,0038	3384
30,00	0,0046	1520	0,0038	3373

Tabela E86. Dados experimentais para a suspensão de 18 lbm/bbl (51,35 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0147	2393	0,0067	3989
3,00	0,0117	1986	0,0068	3978
5,00	0,0101	2018	0,0071	3969
7,00	0,0101	1979	0,0070	3960
9,00	0,0097	1965	0,0071	3936
11,00	0,0097	1956	0,0070	3944
13,00	0,0095	1965	0,0070	3956
15,00	0,0097	1954	0,0069	3985
17,00	0,0096	1966	0,0070	3969
19,00	0,0098	1963	0,0070	3952
21,00	0,0098	1964	0,0069	3978
23,00	0,0098	1958	0,0069	3966
25,00	0,0101	1973	0,0070	3987
27,00	0,0096	1947	0,0069	3967
30,00	0,0099	1967	0,0069	3962

Tabela E87. Dados experimentais para a suspensão de 18 lbm/bbl (51,35 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0220	2707	0,0100	4767
3,00	0,0209	2658	0,0103	4787
5,00	0,0208	2661	0,0103	4776
7,00	0,0209	2654	0,0103	4748
9,00	0,0208	2622	0,0102	4747
11,00	0,0206	2598	0,0103	4713
13,00	0,0201	2565	0,0101	4730
15,00	0,0198	2518	0,0101	4692
17,00	0,0190	2529	0,0099	4664
19,00	0,0180	2463	0,0099	4681
21,00	0,0181	2380	0,0100	4641
23,00	0,0177	2393	0,0098	4620
25,00	0,0166	2438	0,0098	4625
27,00	0,0182	2485	0,0096	4591
30,00	0,0180	2490	0,0096	4595

Tabela E88. Dados experimentais para a suspensão de 18 lbm/bbl (51,35 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0328	3247	0,0175	5912
3,00	0,0323	3313	0,0173	5823
5,00	0,0316	3195	0,0176	5971
7,00	0,0298	3055	0,0174	5882
9,00	0,0277	3043	0,0173	5846
11,00	0,0261	3323	0,0170	5807
13,00	0,0278	3110	0,0172	5852
15,00	0,0269	3005	0,0171	5790
17,00	0,0269	3065	0,0167	5759
19,00	0,0269	2858	0,0168	5798
21,00	0,0275	2934	0,0168	5729
23,00	0,0272	3067	0,0164	5749
25,00	0,0265	2980	0,0162	5782
27,00	0,0248	2995	0,0160	5734
30,00	0,0225	3010	0,0164	5747

Tabela E89. Dados experimentais para a suspensão de 18 lbm/bbl (51,35 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0403	3862	0,0298	8186
3,00	0,0384	3650	0,0283	7990
5,00	0,0373	3311	0,0280	7823
7,00	0,0363	3413	0,0265	7804
9,00	0,0333	3407	0,0259	7748
11,00	0,0328	3403	0,0250	7394
13,00	0,0329	3448	0,0238	7220
15,00	0,0332	3440	0,0233	7313
17,00	0,0327	3742	0,0222	7081
19,00	0,0328	3329	0,0226	7209
21,00	0,0321	3409	0,0222	7087
23,00	0,0305	3087	0,0223	7126
25,00	0,0290	3440	0,0224	7059
27,00	0,0293	3152	0,0226	7218
30,00	0,0301	3089	0,0228	7191

Tabela E90. Dados experimentais para a suspensão de 18 lbm/bbl (51,35 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar fino na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (min)	Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
1,00	0,0477	4393	0,0372	9450
3,00	0,0493	4098	0,0363	9562
5,00	0,0496	4091	0,0358	9236
7,00	0,0476	3832	0,0346	9175
9,00	0,0434	3777	0,0343	9076
11,00	0,0434	3642	0,0345	8909
13,00	0,0454	3821	0,0348	9430
15,00	0,0442	3786	0,0349	9165
17,00	0,0440	3751	0,0344	9209
19,00	0,0438	3491	0,0339	9112
21,00	0,0396	3432	0,0342	9033
23,00	0,0405	3460	0,0343	9195
25,00	0,0407	3666	0,0354	9370
27,00	0,0403	3575	0,0355	9265
30,00	0,0401	3709	0,0355	9340

Tabela E91. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 10 mm na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0390	2217
20,00	0,0390	2163
30,00	0,0400	2119
40,00	0,0380	2218
50,00	0,0360	2141
60,00	0,0360	2128
70,00	0,0330	2036
80,00	0,0290	1917
90,00	0,0290	1910
100,00	0,0300	2020
110,00	0,0300	1957
120,00	0,0280	1502
130,00	0,0200	1130
140,00	0,0150	922
150,00	0,0140	856
160,00	0,0120	772
170,00	0,0090	524

Tabela E92. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 5 mm na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0250	6348
20,00	0,0220	6369
30,00	0,0360	6247
40,00	0,0380	6289
50,00	0,0330	6367
60,00	0,0350	6410
70,00	0,0340	6423
80,00	0,0340	6469
90,00	0,0330	6306
100,00	0,0340	6165
110,00	0,0310	6255
120,00	0,0310	6170
130,00	0,0330	6228
140,00	0,0310	6165
150,00	0,0310	6077
160,00	0,0310	6026
170,00	0,0300	6060
180,00	0,0300	6245
190,00	0,0310	6292
200,00	0,0320	6349
210,00	0,0300	6273

220,00	0,0320	6268
230,00	0,0310	6253
240,00	0,0330	6249
250,00	0,0310	6173
260,00	0,0340	6116
270,00	0,0330	6149
280,00	0,0310	6266
290,00	0,0350	6287
300,00	0,0330	6100
310,00	0,0340	6102
320,00	0,0120	5512
330,00	0,0180	5818
340,00	0,0220	6224
350,00	0,0280	6276
360,00	0,0180	6198
370,00	0,0240	6215
380,00	0,0170	6188

Tabela E93. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 2 mm na vazão de 0,06 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0070	7865
20,00	0,0060	7874
30,00	0,0060	7852
40,00	0,0060	7888
50,00	0,0080	7929
60,00	0,0080	7915
70,00	0,0030	7063
80,00	0,0030	7266
90,00	0,0030	7439
100,00	0,0020	6480
110,00	0,0020	6648
120,00	0,0010	5718
130,00	0,0010	5846
140,00	0,0010	5950
150,00	0,0010	6015
160,00	0,0010	5088
170,00	0,0010	5107
180,00	0,0010	5162
190,00	0,0010	4203
200,00	0,0000	924

Tabela E94. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 10 mm na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0420	2212
20,00	0,0400	1879
30,00	0,0200	1613
40,00	0,0180	1568
50,00	0,0180	1653
60,00	0,0180	1585
70,00	0,0160	1550
80,00	0,0160	1498
90,00	0,0150	1472
100,00	0,0160	1486
110,00	0,0150	1477
120,00	0,0150	1486
130,00	0,0150	1430
140,00	0,0160	1478
150,00	0,0130	1349
160,00	0,0140	1373
170,00	0,0120	1412
180,00	0,0140	1425
190,00	0,0120	1356
200,00	0,0130	1551
210,00	0,0100	1435
220,00	0,0110	1194
230,00	0,0090	1330
240,00	0,0120	1355
250,00	0,0140	1398
260,00	0,0130	1404
270,00	0,0140	1402
280,00	0,0130	1354
290,00	0,0140	1365
300,00	0,0110	1316
310,00	0,0110	1328
320,00	0,0110	1276
330,00	0,0120	1293
340,00	0,0100	1209
350,00	0,0110	1320
360,00	0,0110	1288
370,00	0,0110	1261
380,00	0,0110	1254
390,00	0,0110	1215
400,00	0,0070	1013
410,00	0,0060	934
420,00	0,0010	314
430,00	0,0010	132
440,00	0,0010	109

450,00	0,0000	78
--------	--------	----

Tabela E95. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 5 mm na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0350	6241
20,00	0,0390	6088
30,00	0,0370	6048
40,00	0,0360	6102
50,00	0,0370	6089
60,00	0,0370	6048
70,00	0,0310	5902
80,00	0,0310	5870
90,00	0,0320	5842
100,00	0,0340	5916
110,00	0,0310	5840
120,00	0,0310	5940
130,00	0,0320	6068
140,00	0,0340	6224
150,00	0,0330	6298
160,00	0,0320	5942
170,00	0,0290	5686
180,00	0,0290	5564
190,00	0,0290	5501
200,00	0,0290	5453
210,00	0,0290	5649
220,00	0,0310	5432
230,00	0,0300	5643
240,00	0,0290	5567
250,00	0,0310	5579
260,00	0,0300	5469
270,00	0,0250	5025
280,00	0,0260	4972
290,00	0,0270	4869
300,00	0,0250	4914
310,00	0,0260	4854
320,00	0,0220	4649
330,00	0,0230	4534
340,00	0,0210	4461
350,00	0,0210	4348
360,00	0,0200	4201
370,00	0,0190	4178
380,00	0,0230	4289
390,00	0,0190	4203
400,00	0,0150	3223
410,00	0,0090	2659
420,00	0,0080	2565

430,00	0,0070	2501
440,00	0,0060	2564
450,00	0,0070	2357
460,00	0,0050	2242
470,00	0,0050	2179
480,00	0,0020	925
490,00	0,0010	542
500,00	0,0000	373

Tabela E96. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 2 mm na vazão de 0,13 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0240	9288
20,00	0,0150	8331
30,00	0,0060	7427
40,00	0,0050	7516
50,00	0,0030	6684
60,00	0,0010	4942
70,00	0,0010	5036
80,00	0,0010	5025
90,00	0,0010	5026
100,00	0,0010	4969
110,00	0,0000	560

Tabela E97. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 10 mm na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0320	2068
20,00	0,0130	1373
30,00	0,0070	1274
40,00	0,0040	968
50,00	0,0010	558
60,00	0,0010	465
70,00	0,0010	400
80,00	0,0010	367
90,00	0,0000	347

Tabela E98. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 5 mm na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0170	5826
20,00	0,0200	6017

30,00	0,0200	5812
40,00	0,0220	5730
50,00	0,0270	5726
60,00	0,0300	5374
70,00	0,0270	5000
80,00	0,0250	4956
90,00	0,0230	4914
100,00	0,0230	5129
110,00	0,0240	4714
120,00	0,0200	4396
130,00	0,0190	4174
140,00	0,0200	4108
150,00	0,0170	3868
160,00	0,0150	4096
170,00	0,0150	3910
180,00	0,0150	3988
190,00	0,0150	3841
200,00	0,0140	3743
210,00	0,0120	3590
220,00	0,0120	3553
230,00	0,0100	4060
240,00	0,0120	4455
250,00	0,0110	4583
260,00	0,0110	4675
270,00	0,0110	5076
280,00	0,0110	4786
290,00	0,0100	5099
300,00	0,0100	5363
310,00	0,0080	4449
320,00	0,0080	4708
330,00	0,0080	4998
340,00	0,0020	4083
350,00	0,0090	5078
360,00	0,0080	4374
370,00	0,0020	4646
380,00	0,0020	3896
390,00	0,0040	3954
400,00	0,0040	4007
410,00	0,0030	3613
420,00	0,0000	776

Tabela E99. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 2 mm na vazão de 0,17 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0030	7670
20,00	0,0010	5950
30,00	0,0010	6133

40,00	0,0010	6200
50,00	0,0010	5328
60,00	0,0000	834

Tabela E100. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 10 mm. na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0360	2785
20,00	0,0100	1755
30,00	0,0020	1242
40,00	0,0010	1174
50,00	0,0010	1153
60,00	0,0000	409

Tabela E101. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 5 mm na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0490	9585
20,00	0,0480	9406
30,00	0,0420	8641
40,00	0,0420	7327
50,00	0,0330	6645
60,00	0,0170	4873
70,00	0,0140	3550
80,00	0,0070	2624
90,00	0,0060	2698
100,00	0,0060	2696
110,00	0,0010	2111
120,00	0,0010	2079
130,00	0,0000	534

Tabela E102. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 2 mm na vazão de 0,21 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0040	10725
20,00	0,0010	7200
30,00	0,0010	7209
40,00	0,0010	7189
50,00	0,0010	7239
60,00	0,0000	692

Tabela E103. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 10 mm na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0350	1802
20,00	0,0270	975
30,00	0,0220	869
40,00	0,0220	826
50,00	0,0150	724
60,00	0,0140	689
70,00	0,0020	486
80,00	0,0010	319
90,00	0,0000	247

Tabela E104. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 5 mm na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0490	9334
20,00	0,0460	8778
30,00	0,0430	8048
40,00	0,0410	7867
50,00	0,0320	7588
60,00	0,0310	7295
70,00	0,0310	7424
80,00	0,0310	7378
90,00	0,0210	6834
100,00	0,0010	3256
110,00	0,0000	689

Tabela E105. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl (14,27 kg/m³) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 2 mm na vazão de 0,25 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0280	13078
20,00	0,0150	13295
30,00	0,0150	13432
40,00	0,0140	13431
50,00	0,0080	13964
60,00	0,0060	14327
70,00	0,0050	14512
80,00	0,0020	14502
90,00	0,0020	14407
100,00	0,0020	14577
110,00	0,0020	14574

120,00	0,0010	14631
130,00	0,0010	14813
140,00	0,0010	14930
150,00	0,0010	14945
160,00	0,0000	15023

Tabela E106. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 10 mm na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0740	2590
20,00	0,0670	1550
30,00	0,0620	480
40,00	0,0390	380
50,00	0,0090	306
60,00	0,0050	285
70,00	0,0000	100

Tabela E107. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 5 mm na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0600	11016
20,00	0,0520	11233
30,00	0,0520	11771
40,00	0,0560	11959
50,00	0,0500	10390
60,00	0,0460	10224
70,00	0,0460	9150
80,00	0,0380	6669
90,00	0,0270	5553
100,00	0,0230	1019
110,00	0,0010	621
120,00	0,0000	389

Tabela E108. Dados experimentais para a suspensão de 5 lbm/bbl ($14,27 \text{ kg/m}^3$) de carbonato de cálcio laminar médio para a fratura de 2 mm na vazão de 0,30 kg/s no anular.

Tempo (s)	Vazão na fratura (kg/s)	Pressão diferencial (Pa)
10,00	0,0450	11220
20,00	0,0400	11437
30,00	0,0380	11975
40,00	0,0390	12163
50,00	0,0280	10594
60,00	0,0220	10428

70,00	0,0170	9354
80,00	0,0120	6873
90,00	0,0100	5757
100,00	0,0050	1223
110,00	0,0010	825
120,00	0,0000	593
