

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

DISSERTAÇÃO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA E PRESSÃO NO
COMBATE À PERDA DE CIRCULAÇÃO UTILIZANDO MATERIAIS
FIBROSOS E GRANULARES**

TAYNA MONTEIRO DE SOUZA

Dezembro/2021



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

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA E PRESSÃO NO COMBATE À
PERDA DE CIRCULAÇÃO UTILIZANDO MATERIAIS FIBROSOS E
GRANULARES**

TAYNA MONTEIRO DE SOUZA

Sob a Orientação de

Cláudia Miriam Scheid

e Coorientação de

Luís Américo Calçada

Dissertação submetida como requisito parcial para
obtenção do grau de **Mestre em Engenharia
Química**, Área de Concentração em Tecnologia
Química.

Seropédica, RJ

Dezembro/2021

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

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

Souza, Tayna Monteiro de, 1994-
S719a AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA E PRESSÃO NO COMBATE
À PERDA DE CIRCULAÇÃO UTILIZANDO MATERIAIS FIBROSOS E
GRANULARES / Tayna Monteiro de Souza. -
Seropédica, 2021.
150 f.: il.

Orientadora: Cláudia Miriam Scheid.

Coorientador: Luís Américo Calçada.

Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química, 2021.

1. Fluido de perfuração. 2. Materiais de combate à perda
de circulação. 3. Mecanismos de selamento de fraturas. 4.
Material fibroso. 5. Material granular. I. Scheid, Cláudia
Miriam, 1968-, orient. II. Calçada, Luís Américo, 1966-,
coorient. III. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 “This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001”.

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

TAYNA MONTEIRO DE SOUZA

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 21/12/2021.

Conforme deliberação número 001/2020 da PROPPG, de 30/06/2020, tendo em vista a implementação de trabalho remoto e durante a vigência do período de suspensão das atividades acadêmicas presenciais, em virtude das medidas adotadas para reduzir a propagação da pandemia de Covid-19, nas versões finais das teses e dissertações as assinaturas originais dos membros da banca examinadora poderão ser substituídas por documento(s) com assinaturas eletrônicas. Estas devem ser feitas na própria folha de assinaturas, através do SIPAC, ou do Sistema Eletrônico de Informações (SEI) e neste caso a folha com a assinatura deve constar como anexo ao final da tese / dissertação.

Membros da banca:

Claudia Miriam Scheid. Dra. UFRRJ. (Orientadora/Presidente da banca)

Alexandre Rodrigues Torres,. Dr. UERJ.

Andrea Lucia Teixeira Charbel,. Dra. UFSJ.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
SISTEMA INTEGRADO DE PATRIMÔNIO, ADMINISTRAÇÃO E
CONTRATOS

FOLHA DE ASSINATURAS

Emitido em 2021

TERMO Nº 1359/2021 - PPGEQ (12.28.01.00.00.00.42)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 22/12/2021 10:33)

CLAUDIA MIRIAM SCHEID PEREIRA

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOREQ

(12.28.01.00.00.00.45)

Matrícula: 1154800

(Assinado digitalmente em 15/01/2022 10:18)

ALEXANDRE RODRIGUES TORRES

ASSINANTE EXTERNO

CPF: 807.542.797-15

(Assinado digitalmente em 22/12/2021 17:57)

ANDREA LUCIA TEIXEIRA CHARBEL

ASSINANTE EXTERNO

CPF: 785.433.046-87

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número:
1359, ano: **2021**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **22/12/2021** e o código de verificação: **e44e409f08**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por me proporcionar chegar a esse momento e concluir mais uma etapa. Sem ele nada seria possível.

Agradeço aos meus queridos pais Marcos Luis e Katia Cristina. Obrigada por me incentivar sempre e acreditar que era possível concluir mais essa etapa tão importante. Agradeço por todas as vezes que estiveram ao meu lado. Por me fazer lembrar sempre que cada hora de estudo, cada noite mal dormida e cada lágrima será recompensada. Agradeço por todo ensinamento, todas as risadas, toda ajuda até nos experimentos, por sempre me oferecerem um abraço ou consolo nas horas mais intensas. Agradeço também meus irmãos, Thais e Talyson, que estão sempre ao meu lado. Agradeço por serem meus maiores confidentes, mesmo quando não entendem nada do que eu estou falando. Vocês me dão toda força que eu preciso para continuar lutando.

Gostaria de agradecer também, minha avó Gildete e meus tios por sempre estarem sempre presentes nas nossas vidas, nos momentos ruins e nos alegres. Obrigada por todo aconselhamento e tranquilização durante todos os momentos, por me ajudarem a crescer e melhorar a cada dia.

Um agradecimento especial as minhas amigas por toda ajuda e todo apoio. Obrigada pelas histórias, as risadas, o conhecimento compartilhado e a paciência. Lis e Gabi sem vocês o mestrado não seria igual, mesmo cada uma em um lugar agora, as experiências ficarão para sempre.

Agradeço ao engenheiro do LEF Eduardo Paraiso e ao técnico em eletrotécnica, senhor Elias Pacheco, por todo o suporte e toda colaboração durante esse projeto. Também agradeço de maneira especial ao Moacyr Nogueira Borges Filho que trabalhou diretamente comigo e foi fundamental para realização do projeto.

Agradeço imensamente aos meus professores e orientadores, Cláudia Míriam Scheid e Luís Américo Calçada. Muito obrigada por todas as ponderações e por todo crescimento pessoal, profissional que vocês me proporcionaram o longo do período do mestrado. Obrigada por todo acolhimento e a perfeita orientação para desenvolver esse trabalho. Agradeço imensamente pela oportunidade e de ter trabalhado com vocês.

Agradeço a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e aos alunos de iniciação científica que me ajudaram durante o mestrado: Bruno e Clarissa. A ajuda e o esforço de vocês fizeram toda diferença. Agradeço ao Thales, Felipe, Rodrigo, Cristiano, Carol e o Robson por todas as conversas e o compartilhamento de informações no laboratório.

E por fim, agradeço às instituições CAPES e Petrobras pelo suporte financeiro.

RESUMO

SOUZA, Tayna Monteiro de. **Avaliação do efeito da temperatura e pressão no combate à perda de circulação utilizando materiais fibrosos e granulares**. 2021. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

Durante o processo de perfuração de poços de petróleo pode ocorrer o fenômeno da perda de circulação de fluido, através de regiões de alta porosidade ou fraturas, presentes nas formações rochosas perfuradas que podem ser naturais ou induzidas pelo processo. As ocorrências de perdas de circulação são classificadas analisando a vazão de fluido perdida em parciais, severas ou totais, que têm potencial para inviabilizar um poço de perfuração. Os principais tratamentos para conter ou prevenir a perda de circulação são o uso de materiais de fortalecimento de poços ou materiais de combate à perda de circulação. Para a escolha da técnica e dos materiais mais eficientes é necessário entender os mecanismos de selamento do material, os processos de escoamento em fratura e os efeitos que as condições operacionais, como temperatura e pressão, afetam a eficácia desses materiais. Neste trabalho foram estudados os efeitos da influência da pressão e temperatura no combate à perda de circulação em diferentes metodologias. Quatro metodologias são abordadas, sendo duas estaticamente em bancada e duas dinamicamente nos Simuladores de Escoamento em Fraturas. Na abordagem estática foram contemplados os ensaios de filtração e de selamento de fenda na célula de filtração HTHP, nas temperaturas de 25, 50 e 75 °C e pressões de 300, 500 e 700 psi. Com os ensaios de filtração foi possível avaliar o potencial de redução de filtrado de cada material e a influência das condições de processo no volume de filtrado. Nos ensaios de selamento foram analisadas as influências da temperatura, pressão, concentração dos materiais puros e das misturas no volume de fluido perdido para fenda de 2 mm de abertura. Visando assim, identificar os fatores e as combinações de fatores que mais influenciaram estatisticamente no volume perdido. A modelagem preditiva possibilitou a previsão dos melhores pontos de operação para os materiais escolhidos, sob as condições de alta pressão e alta temperatura. Os mecanismos de selamento dos dois materiais também foram observados experimentalmente. Além disso, pode-se comprovar a eficiência dos materiais e dos *blends* desenvolvidos. Para abordagem dinâmica utilizou-se dois Simuladores de Escoamento em Fratura, SEF 1.0 a temperatura de 25 °C e pressão de 60 psi e SEF 2.0 a pressão diferencial de 100 psi e temperaturas de 25 °C e 50 °C. Nos simuladores os fluidos são impelidos a escoar sob condições de rugosidade, tortuosidade, temperatura e pressão semelhantes às encontradas no poço de perfuração. Os canais fraturados do SEF 1.0 possuem 1,02 m de comprimento e foram usadas as fraturas de 5 e 10 mm de espessura. Para o SEF 2.0 utilizou-se canais de 1 m de comprimento e fraturas de 5 e 10 mm de espessura sendo, neste caso, avaliado o escoamento em elevadas quedas de pressão e temperatura. Os fluidos preparados apresentaram comportamento reológico que pode ser ajustado pelo modelo da Potência. Os dados obtidos nos simuladores foram usados para analisar o comportamento dos fluidos em escoamento e traçar padrões. Esses dados também foram usados na técnica de monitoramento do selamento da fratura por intermédio do acompanhamento do diâmetro hidráulico, proposto por Borges Filho (2018). O modelo correlaciona os dados de escoamento e o comportamento reológico para o monitoramento do selamento, pelo cálculo do diâmetro hidráulico. O monitoramento foi efetivo e os *Blends* desenvolvidos foram capazes de selar as fraturas e apresentar um desempenho, por vezes, melhor que os fluidos puros.

Palavras-chaves: Fluidos de perfuração, materiais de combate à perda de circulação, mecanismos de selamento, material fibroso, material granular, selamento de fratura.

ABSTRACT

SOUZA, Tayna Monteiro de. **Evaluation of the effect of temperature and pressure on combating loss of circulation using fibrous and granular materials.** 2021. 150 p. Dissertation (Master of Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Technology Institute, Chemical Engineering Department, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

During the process of drilling oil wells, the phenomenon of loss of fluid circulation for the formation can occur. It is a consequence of the loss of drilling fluid through regions of high porosity or fractures, which can be natural or induced by the process, present in the drilled rock formations. As a result, there are partial, severe, or total circulation losses, which can make drilling well unfeasible. The main treatments to contain loss of circulation are the use of materials to strengthen wells or materials to combat loss of circulation. To choose the most efficient technique and materials, it is necessary to understand the material's sealing mechanisms, the flow processes in fractures, and the effects that operating conditions, such as temperature and pressure, affect the effectiveness of the materials. This work aims to evaluate the influence of the effect of pressure and temperature on combating loss of circulation in different methodologies. Four proposals are addressed, being two statically in the bench and two dynamically in the fracture flow simulators. In the static approach, the filtration and gap sealing tests in the HTHP filtration cell were contemplated, varying the temperature at 25, 50, and 75 °C and pressure at 300, 500, and 700 psi. With the filtration tests, it was possible to evaluate the potential for reducing the filtrate of each material and the influence of process conditions on the filtrate volume. In the sealing tests, the influences of temperature, pressure, concentration of pure materials and mixtures on the lost fluid volume for a 2 mm fracture were analyzed. In order to identify the factors and combinations of factors that had the greatest statistical influence on the lost volume. Through predictive modeling, it enabled the prediction of the optimal operating points for the chosen materials, under conditions of high pressure and high temperature. The sealing mechanisms of the two materials were experimentally observed. In addition, it is possible to prove the efficiency of the materials and *blends* developed. For the dynamic approach, two fracture flow simulators were used, SEF 1.0 at a temperature of 25 °C and a pressure of 60 psi and SEF 2.0 at a differential pressure of 100 psi and temperatures of 25 °C and 50 °C. In the simulators, the fluids are forced to flow under conditions of roughness, tortuosity, temperature and pressure similar to those found in the drilling well. The fractured canals of SEF 1.0 are 1.02 m long and have fractures of 5 and 10 mm in thickness. For the SEF 2.0, despite being modular, 1-meter-long channels and 5 and 10 mm-thick fractures were used. The prepared fluids showed rheological behavior that can be helped by the Power Law model. The data obtained from the simulators were used to analyze the behavior of fluids in flow and trace patterns. These data were also used in the technique of monitoring the fracture sealing by monitoring the hydraulic diameter. Monitoring was effective and the developed *Blends* were able to seal fractures and sometimes perform better than pure fluids.

Keywords: lost circulation materials, fibrous material, granular material, sealing mechanism, fracture sealing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de perfuração de poços de petróleo.	4
Figura 2. Exemplo de curvas de fluxo. (A) Fluido Newtoniano; (B) Fluido de Bingham; (C) Fluido Pseudoplástico; (D) Fluido Dilatante; (E) Fluido Pseudoplástico com limite de escoamento.	9
Figura 3. Processo de perda de circulação.....	12
Figura 4. Representação de zonas de acúmulo de fluido de perfuração.....	13
Figura 5. Mecanismo de selamento por preenchimento de fraturas.	15
Figura 6. Mecanismo de selamento de fratura por fortalecimento do poço (Wellbore Strengthening).	17
Figura 7. (A) Aparato experimental e (B) núcleo de arenito utilizado.....	18
Figura 8. Núcleos após os experimentos de selamento de fratura.....	19
Figura 9. Curva de pressão versus tempo da amostra de controle (CS) e amostras contendo nanopartículas de ferro em diferentes concentrações (DF).	19
Figura 10. Tipos de LCMs convencionais. (A) Granular, (B) Flocos, (C) Fibrosos e (D) Mistura de LCM's.....	20
Figura 11. Simulador de Escoamento em Fraturas (SEF).	27
Figura 12. Fraturas contidas no SEF.	27
Figura 13. Teste de selamento da fratura de 10 mm no anular de 12 1/4.....	28
Figura 14. Dados de pressão diferencial versus tempo para fratura de 2 mm utilizando fluido contendo o carbonato de cálcio laminar (CF) em diferentes concentrações.	29
Figura 15. Dados de vazão versus tempo de teste para o fluido contendo goma xantana 2 lb/bbl e LCM 5 lb/bbl. Para as três fraturas existentes no SEF.	31
Figura 16. Dados de queda de pressão versus tempo de teste para o fluido contendo goma xantana 2 lb/bbl e LCM 5 lb/bbl. Para as três fraturas existentes no SEF.....	32
Figura 17. Aparato experimental (BMT).....	34
Figura 18. Pressão versus volume de fluido perdido, utilizando diferentes concentrações de LCM em lama de bentonita.	35
Figura 19. (A) Célula de filtração HTHP; (B) slot de fratura.	35
Figura 20. Influência da temperatura no volume perdido para LCM de semente-de-dendê...36	
Figura 21. Influência da pressão no volume perdido para LCM de semente-de-dendê.	36
Figura 22. (A) base original utilizada na metodologia atual; (B) base modificada por Magalhães et al (2019).....	37

Figura 23. (A) Fluido utilizado em duas metodologias de selamento de fratura. Célula OFITE selamento empistonado fraturas de 1,5 mm e 3,7 mm e (B) simulado de escoamento em fraturas SEF fratura de 2 mm.....	38
Figura 24. Visão geral do simulador de escoamento em fraturas longas (LFA).....	38
Figura 25. Zona de selamento dentro da fratura de 2 mm. (A) 10% de SCC, (B) 10% de NS e (C) 10 % de RUB.....	39
Figura 26. Pressão da célula versus tempo de teste de selamento.....	40
Figura 27. Materiais de combate à perda escolhidos. (A) LCM fibroso e (B) LCM granular.	42
Figura 28. Picnômetro a gás AccuPyc II 1340.	43
Figura 29. Analisador de partículas por espalhamento de luz Malvern Mastersizer 2000.....	43
Figura 30. Viscosímetro utilizado no estudo do comportamento reológico dos fluidos.	44
Figura 31. Balança de lama.	44
Figura 32. (A) Esquema da célula de filtração HTHP; (B) Célula HTHP no suporte; (C) Sistema de pressurização.....	45
Figura 33. (A) Base original de filtração; (B) base original para teste de selamento em fendas; (C) Base modificada por Magalhães et al. (2019); (D) Base modificada.....	46
Figura 34. Discos ranhurados utilizados na célula de filtração HTHP. (A) Disco de rocha porosa e (B) disco de aço INOX.....	47
Figura 35. Simulador de Escoamento em Fraturas 1.0. (A) Desenho em 3D do Simulador físico e (B) simulador montado no laboratório.....	48
Figura 36. Simulador de escoamento em fraturas 2.0. Superior desenho 3D do simulador e inferior foto do simulador montado.....	49
Figura 37. Braços de fratura do simulador de escoamento em fratura. (A) desenho em 3D do braço de fratura, (B) estrutura interna e (C) foto do braço já montado no laboratório.....	50
Figura 38. Diagrama de processo da unidade experimental (SEF).	51
Figura 39. Desenho esquemático 3D da unidade experimental da unidade 2.0.	51
Figura 40. Diagrama de processos da unidade do SEF 2.0, sensores destacados.	52
Figura 41. Imagens da unidade experimental.....	53
Figura 42. (A) Tanque de preparo de fluido e (B) sensor de nível e agitador.....	54
Figura 43. Bomba helicoidal.	54
Figura 44. (A) Transdutor de pressão da SMAR e (B) transdutor de pressão da Yokogawa.	55
Figura 45. Tanque trocador de calor.....	55

Figura 46. (A) Termopar tipo T para aquisição de temperatura; (B) termopar instalado na unidade; e (C) visão interna do termopar instalado na fratura.	56
Figura 47. Válvulas automáticas e compressor. (A) Válvula de abertura da fratura; (B) Válvula proporcional; e (C) compressor de ar.	57
Figura 48. Medidor de vazão.	57
Figura 49. Balança e tanque de volume perdido pela fratura.	58
Figura 50. Chassi Modular - National Instruments.	58
Figura 51. Placa de aquisição de dados (NI-DAQ).	59
Figura 52. Quadro de comando.	59
Figura 53. Interfaces do software com as abas de: (A) leitura; (B) sem aquecimento; e (C) com aquecimento.	60
Figura 54. Distribuição volumétrica de tamanho de partícula para o LCM granular.	69
Figura 55. Distribuição volumétrica de tamanho de partícula para o LCM fibroso.	70
Figura 56. Curvas de viscosidade aparente das suspensões do LCM granular nas concentrações (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.	71
Figura 57. Curvas de viscosidade aparente das suspensões do LCM fibroso nas concentrações (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.	72
Figura 58. Curvas de viscosidade aparente das suspensões dos Blends nas composições: (A) Blend 1 (75% LCM fibroso e 25% LCM granular), (B) Blend 2 (50% LCM fibroso/LCM granular) e (C) Blend 3 (25% LCM fibroso e 75% LCM granular).	73
Figura 59. Efeito da pressão e concentração no volume de filtrado final do LCM granular, nas temperaturas de (A) 25°, (B) 50° e (C) 75°C.	76
Figura 60. Efeito da pressão e concentração no volume de filtrado final do LCM fibroso, nas temperaturas de (A) 25°, (B) 50° e (C) 75°C.	77
Figura 61. Efeito da pressão e concentração no volume de filtrado final dos Blends, nas temperaturas de (A) 25°, (B) 50° e (C) 75°C.	78
Figura 62. Efeito da pressão e concentração no volume de fluido perdido para fratura do LCM granular, nas temperaturas de (A) 25 °C, (B) 50 °C e (C) 75°C.	79
Figura 63. Efeito da temperatura no volume de fluido perdido para fratura do LCM granular, nas pressões de (A) 300 psi, (B) 500 psi e (C) 700 psi.	80
Figura 64. Slot contendo LCM granular após o teste de selamento de fenda. Condições: 20 lb/bbl, 500 psi e 50°C.	81
Figura 65. Diagrama de Pareto construído a partir da tabela ANOVA, análise da significância dos fatores e suas interações do LCM granular. Nível de significância de 5% e $R^2 = 0,895$	83

Figura 66. Efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para as suspensões contendo LCM granular (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.....	83
Figura 67. Gráfico de contorno efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para as suspensões contendo LCM granular (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.....	84
Figura 68. Efeito da variação da pressão e concentração no volume de fluido perdido para fenda do LCM fibroso, nas temperaturas de (A) 25 °C, (B) 50°C e (C) 75 °C.....	85
Figura 69. Efeito da temperatura no volume de fluido perdido para fratura do LCM fibroso, nas pressões de (A) 300 psi, (B) 500 psi e (C) 700 psi.....	86
Figura 70. Slot contendo LCM fibroso após o teste de selamento de fenda. Condições: 20 lb/bbl, 500 psi e 50°C.	87
Figura 71. Diagrama de Pareto construído a partir da tabela ANOVA, análise da significância dos fatores e suas interações do LCM fibroso. Nível de significância de 5% e $R^2 = 0,809$..	88
Figura 72. Efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para as suspensões contendo LCM fibroso (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.....	88
Figura 73. Gráfico de contorno efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para as suspensões contendo LCM fibroso (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.....	89
Figura 74. Efeito da variação da pressão e concentração no volume de fluido perdido para fenda dos blends, nas temperaturas de (A) 25 °C, (B) 50 °C e (C) 75 °C.....	90
Figura 75. Efeito da temperatura no volume de fluido perdido para fratura dos <i>blends</i> , nas pressões de (A) 300 psi, (B) 500 psi e (C) 700 psi.....	91
Figura 76. Fendas contendo os três blends após o teste de selamento de fenda. Condições: 500 psi e 50°C. Onde: (A) blend 1, (B) blend 2 e (C) blend 3.	92
Figura 77. Diagrama de Pareto construído a partir da tabela ANOVA, análise da significância dos fatores e suas interações dos Blends. Nível de significância de 5% e $R^2 = 0,879$	93
Figura 78. Efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para as suspensões contendo os blends (A) Blend 1, (B) Blend 2 e (C) Blend 3.....	93
Figura 79. Gráfico de contorno do efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para os blends: (A) Blend 1, (B) Blend 2 e (C) Blend 3.....	94
Figura 80. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o LCM granular (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 5 mm. Diferencial de pressão, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.....	96

Figura 81. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o LCM granular (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 10 mm. Diferencial de pressão na fratura, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.....	97
Figura 82. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o LCM granular no SEF 1.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.	98
Figura 83. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o LCM fibroso (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 5 mm. Diferencial de pressão na fratura, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.....	98
Figura 84. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o LCM fibroso (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 10 mm. Diferencial de pressão, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.....	99
Figura 85. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o LCM fibroso no SEF 1.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.....	100
Figura 86. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o Blend 3 (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 5 mm. Diferencial de pressão, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.....	100
Figura 87. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o Blend 3 (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 10 mm. Diferencial de pressão na fratura, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.	101
Figura 88. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o Blend 3 no SEF 1.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.	102
Figura 89. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM granular (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 5 mm.	103

Figura 90. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM granular (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 10 mm.	103
Figura 91. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM granular (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 50 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 5 mm.	104
Figura 92. Fratura de 5 mm do SEF 2.0 após o teste de selamento do LCM granular.....	105
Figura 93. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o LCM granular no SEF 2.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.	106
Figura 94. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM fibroso (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 5 mm.	107
Figura 95. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM fibroso (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 10 mm.	107
Figura 96. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM fibroso (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 50 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 5 mm.	108
Figura 97. Fratura de 5 mm do SEF 2.0 após o teste de selamento do LCM fibroso.....	109
Figura 98. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o LCM fibroso no SEF 2.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.....	109
Figura 99. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o Blend 3 (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 5 mm.	110
Figura 100. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o Blend 3 (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 10 mm. Diferencial de pressão, vazão volumétrica no anular, volume de fluido perdido e vazão volumétrica na fratura.	111
Figura 101. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o Blend 3 (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 10 mm.	112

Figura 102. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o Blend 3 no SEF 2.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.	112
Figura 103. Curvas de escoamento das suspensões dos LCM em diferentes concentrações e temperatura. Onde: (A) LCM granular, (B) LCM fibroso e (C) blends.....	124
Figura 104. Curvas de escoamento para diferentes concentrações e temperatura do LCM granular a (A) 25°C, (B) 50°C e (C) 75°C (dados experimentais e ajuste do Modelo Power-Law).....	125
Figura 105. Curvas de escoamento para diferentes concentrações e temperatura do LCM fibroso a (A) 25°C, (B) 50°C e (C) 75°C (dados experimentais e ajuste do Modelo Power-Law).	125
Figura 106. Curvas de escoamento para diferentes composições e temperatura dos Blends a (A) 25°C, (B) 50°C e (C) 75°C (dados experimentais e ajuste do Modelo Power-Law).....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Equações matemáticas dos principais modelos reológicos de fluidos não-Newtonianos.	10
Tabela 2. Tipos de materiais de combate à perda de circulação e seus respectivos mecanismos de selamento.	22
Tabela 3. Fatores e níveis avaliados no presente trabalho para o LCM fibroso e para o LCM granular.	62
Tabela 4. Fatores e níveis avaliados no presente trabalho para os blends.	63
Tabela 5. Diâmetros característicos das partículas do LCM granular.	69
Tabela 6. Diâmetros característicos das partículas do LCM fibroso.	70
Tabela 7. Dados de densidade dos sólidos.	70
Tabela 8. Dados de densidade dos fluidos.	71
Tabela 9. Condições de teste e parâmetros do modelo reológico Power-Law.	74
Tabela 10. Estimativa de efeitos e suas interações com o volume de fluido perdido para o LCM granular.	82
Tabela 11. Estimativa de efeitos e suas interações com o volume de fluido perdido para o LCM fibroso.	87
Tabela 12. Estimativa de efeitos e suas interações com o volume de fluido perdido para os blends.	92
Tabela 13. Comparação dos resultados obtidos nos Simuladores de Escoamento em Fratura, versões 1.0 e 2.0 à temperatura ambiente.	113
Tabela 14. Efeito da temperatura nos testes de escoamento no SEF 2.0. Pressão diferencial de 100 psi na fratura de 5 mm.	114
Tabela 15. Volumes de filtrado encontrados nos ensaios de filtração.	127
Tabela 16. Volumes de fluido perdido encontrados nos ensaios de selamento de fenda.	128

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

CENPES - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobrás;

LCM – Material de Combate  Perda de Circulao (*lost circulation materials*);

NPT – Tempo Não Produtivo (non-productive time);

SEF – Simulador de Escoamento em Fraturas;

UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro;

WSM – Material de Fortalecimento de Poço (*wellbore strengthening materials*).

LISTA DE SÍMBOLOS

C - Constante utilizada por Witherspoon
D - Diâmetro da tubulação (m)
D1 -Diâmetro externo do anular
D2 -Diâmetro interno do anular
DH - Diâmetro hidráulico (m);
dP - Diferencial de pressão (Pa);
dx - Diferencial de comprimento da fratura (m);
e -Altura da rugosidade na fratura (m);
f - Fator de atrito de Darcy (adim.);
gc - Fator de conversão massa/força (N/kg).
H - Largura da fratura (m);
h - Metade da largura da fratura (m);
he - Abertura equivalente (m);
Heff - Espessura efetiva da fratura (m);
Heff - Abertura efetiva da fratura (m);
 ΔH - Perda de carga na fratura (m);
K - Permeabilidade da matriz rochosa (m²);
k - Índice de consistência do fluido (Pa.sn);
L - Comprimento da fratura (m);
L - Comprimento da tubulação (m);
m - Gradiente local de tensão cisalhante;
n - Índice de comportamento do fluido (adim.)
 ∇P - Gradiente da queda de pressão (Pa/m);
 ΔP - Pressão diferencial na fratura (Pa);
Q - Vazão volumétrica na fratura (m³/s);
Q - Vetor vazão do fluido na fratura (m³/s);
Re - Número de Reynolds;
ReH - Número de Reynolds na fratura (adim.);
 $\langle v \rangle$ - Velocidade média de escoamento do fluido (m/s);
w - Espessura da fratura (m);
 ΔH - Perda de carga na fratura (m);

Letras Gregas

η_0 - viscosidade plástica (Pa s);
 μ_0 - viscosidade plástica do fluido de bingham (Pa s);
 γ - Taxa de deformação (s⁻¹);
 δ - Constante no valor de 6,40 (adim.);
 θ - ângulo de inclinação da fratura (adim.);
 μ - Viscosidade do fluido (Pa.s);
 μ_{app} - Viscosidade aparente do fluido (Pa s);
 ρ - Densidade do fluido (kg/m³);
 τ - Tensão de cisalhamento (Pa);
 τ_0 - Tensão crítica (Pa);
 ϕ - Tortuosidade da fratura (adim);

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Indústria de Petróleo	3
2.1.1	Petróleo brasileiro	3
2.1.2	Perfuração de poços	4
2.2	Fluidos de perfuração	5
2.2.1	Funções dos fluidos de perfuração	6
2.2.2	Características e composições dos fluidos de perfuração	6
2.3	Reologia	8
2.3.1	Fundamentos da reologia	8
2.3.2	Classificação dos fluidos conforme o comportamento reológico	9
2.4	Perda de circulação	10
2.4.1	Decorência da perda de circulação	11
2.4.2	Classificação e identificação dos locais de perda de circulação	12
2.4.3	Métodos de combate à perda de circulação	14
2.4.4	Mecanismos de combate à perda de circulação	15
2.4.5	Tipos de materiais de combate à perda de circulação (LCM)	20
2.4.5.1	Materiais granulares	20
2.4.5.2	Materiais fibrosos	21
2.4.5.3	Materiais em flocos	21
2.4.5.4	Misturas de LCM's	21
2.4.6	Escoamento de fluidos ao longo de fraturas	23
2.4.6.1	Escoamento de fluidos Newtoniano ao longo de fraturas	24
2.4.6.2	Escoamento de fluidos não-Newtoniano ao longo das fraturas	26
2.4.7	Características e estudos sobre a eficiência dos materiais de combate à perda de circulação	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Caracterização dos sólidos e das suspensões	41
3.1.1	Caracterização dos sólidos	41
3.1.1.1	Escolha do tipo de material	41
3.1.1.2	Densidade dos sólidos	42
3.1.1.3	Distribuição do tamanho de partículas	43

3.1.2	Caracterização dos fluidos testados	43
3.1.2.1	Comportamento reológico.....	43
3.1.2.2	Densidade das suspensões.....	44
3.2	Descrição da unidade experimental.....	45
3.2.1	Unidade experimental: Célula HTHP.....	45
3.2.2	Unidade experimental: SEF.....	47
3.2.2.1	Descrição dos equipamentos e instrumentos.....	53
3.2.2.2	Aquisição de dados e sistema de controle.....	58
3.3	Planejamento e Metodologia experimental.....	62
3.3.1	Planejamento experimental.....	62
3.3.2	Preparo dos fluidos: célula HTHP	63
3.3.3	Ensaio de selamento de fenda e filtração: Célula HTHP	63
3.3.4	Preparo dos fluidos: SEF	64
3.3.5	Experimentos no simulador de escoamento em fratura (SEF)	65
3.3.5.1	SEF 1.0.....	65
3.3.5.2	SEF 2.0.....	65
3.4	Modelagem estatística e estimação de parâmetros.....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
4.1	Caracterização dos materiais testados	68
4.1.1	Caracterização do tamanho das partículas.....	68
4.1.2	Densidade dos sólidos.....	70
4.1.3	Densidade dos fluidos.....	71
4.1.4	Reologia dos fluidos	71
4.2	Experimentos na célula HTHP.....	75
4.2.1	Experimentos de filtração.....	75
4.2.1.1	Teste de filtração: LCM granular.....	75
4.2.1.2	Teste de filtração: LCM fibroso.....	77
4.2.1.3	Teste de filtração: <i>Blends</i>	78
4.2.2	Ensaio de selamento de fenda	79
4.2.2.1	LCM granular.....	79
4.2.2.2	LCM fibroso.....	85
4.2.2.3	<i>Blends</i>	Erro! Indicador não definido.
4.3	Experimentos nos simuladores de escoamento em fratura (sef).....	95
4.3.1	Experimentos de selamento SEF 1.0	95

4.3.1.1	Teste de escoamento SEF 1.0: LCM granular.....	96
4.3.1.2	Teste de escoamento SEF 1.0: LCM fibroso.....	98
4.3.1.3	Teste de selamento SEF 1.0: <i>Blend 3</i>	100
4.3.2	Experimentos de selamento SEF 2.0	102
4.3.2.1	Teste de selamento SEF 2.0: LCM granular	102
4.3.2.2	Teste de selamento SEF 2.0: LCM fibroso	106
4.3.2.3	Teste de selamento SEF 2.0: <i>Blend 3</i>	109
4.3.3	Comparação dos resultados dos Simuladores.....	113
5	CONCLUSÕES.....	115
	REFERÊNCIAS.....	117
	APÊNDICE A - CURVAS DE ESCOAMENTO PARA TODOS OS FLUIDOS TESTADOS.....	124
	APÊNDICE B - CURVAS DE ESCOAMENTO PARA TODOS OS FLUIDOS TESTADOS E AJUSTE PELO MODELO DA POTÊNCIA	125
	APÊNDICE C - RESULTADOS DE VOLUME FINAL DE FILTRADO DOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO.....	127
	APÊNDICE D - RESULTADOS DE VOLUME DE FLUIDO PERDIDO NOS ENSAIOS DE SELAMENTO DE FENDA.....	128

1 INTRODUÇÃO

A perda de fluido de perfuração é detectada quando a taxa de fluido que retorna a superfície é menor que a taxa de fluido injetada no poço de perfuração (FINGER & BLANKENSHIP, 2010). Pode ocorrer durante o processo de perfuração de poços e é um dos problemas mais críticos encontrados na indústria de exploração do petróleo. Tal fenômeno acontece naturalmente durante o processo de perfuração e é intensificado quando estão presentes zonas fraturadas ou cavernosas na formação rochosa (WALDMANN, 2014). As fraturas são aberturas presentes na formação rochosa, que podem ser naturais ou induzidas pelo processo.

A perda de fluido ocorre por infiltração de fluidos através de poros ou fraturas existentes na formação rochosa. Ocorre então, um fluxo descontrolado de fluido em toda a formação que contribui para o aumento dos custos operacionais, tempo não produtivo (NPT) e diminuição da produtividade do poço. Para casos extremos, dependendo da seriedade da perda, pode-se inviabilizar totalmente o poço em questão (DATWANI, 2012; GODOI *et al.*, 2018).

O acúmulo de fluido no interior do poço ou da formação rochosa, pode causar imenso prejuízo financeiro e ambiental. Além disso, ocorre a diminuição da vazão de fluido ascendendo pela região anular do poço, conseqüentemente, ocorrerá a redução da pressão exercida pelo fluido na parede do poço. Caso a pressão não seja controlada, ocorre o fenômeno chamado *kick*, no qual os fluidos contidos no interior da formação rochosa infiltram para o interior do poço (FINGER & BLANKENSHIP, 2010; BORGES FILHO, 2018; COOK *et al.*, 2012).

Para evitar que haja perda de circulação no processo de perfuração de poços, materiais para fortalecimento dos poços (*WSM's – Wellbore Strengthening Materials*) podem ser acrescidos aos fluidos de perfuração. Entretanto, quando a perda de circulação está em curso, o controle pode ocorrer através da inserção no poço de materiais de combate à perda de circulação (*Lost Circulation Materials – LCM's*). Esses materiais, possuem ação obturante e são responsáveis por selar as fraturas contidas na formação rochosa, visando mitigar ou encerrar a perda de fluido. O presente trabalho visa estudar materiais de combate à perda de circulação.

Dentro desse contexto é necessário estudar a efetividade e os mecanismos de selamento dos materiais de combate à perda de circulação. Esses materiais podem sofrer alterações mediante as variações de temperatura e pressão encontradas no poço de perfuração, por isso é

importante prever o comportamento dos materiais. Torna-se necessário também, avaliar o comportamento do escoamento dos fluidos dentro das fraturas, visto que possuem rugosidade e tortuosidades características. Os simuladores físicos de escoamento em fratura são equipamentos criados para suprir a demanda dos estudos do escoamento de fluidos em fratura, pois o fluido escoar sob condições semelhantes às encontradas em poços de perfuração reais.

Neste cenário, os objetivos deste trabalho são:

- Avaliar experimentalmente materiais convencionais de combate à perda de circulação nas categorias de fibroso e de granular, variando temperatura, pressão e concentração de obturante;
- Avaliar o comportamento dos materiais de combate à perda de circulação através de duas metodologias de fluido estático e duas metodologias de fluido dinâmico;
- Propor *blends* dos materiais escolhidos e analisar a efetividade desses *blends*;
- Montar e automatizar um Simulador de Escoamento em Fratura (SEF);
- Avaliar e comparar as principais diferenças no escoamento dos fluidos contendo os materiais de combate à perda e das misturas;
- Usar as correlações do modelo de Borges Filho (2018) para o monitoramento do selamento pelo diâmetro hidráulico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentado um panorama da perda de circulação e como esse problema afeta no processo de perfuração de poços de petróleo. Serão apresentados os conceitos básicos para entender como funciona o processo da identificação, previsão e mitigação da perda de circulação. São apresentados também os tipos de materiais, mecanismos e processos de selamento. Em seguida, serão discutidos trabalhos desenvolvidos sobre esse tema.

2.1 INDÚSTRIA DE PETRÓLEO

O registro do uso do petróleo no cotidiano do ser humano é antigo, datado de antes dos tempos bíblicos. Existem registros de sua utilização nas civilizações egípcia, babilônica, incas, maias, grega e romana. Eram utilizados para diversas finalidades entre elas: pavimentação de estradas, embalsamento de mortos, fins bélicos e em grandes construções (THOMAS *et al.*, 2001).

Segundo Thomas *et al.* (2001), sustentação da produção e comercialização de petróleo moderno datam de 1859, quando teve início a exploração comercial nos Estados Unidos, após a descoberta de Cel. Drake, em Tittusville, Pensilvânia. Posteriormente, descobriu-se que a destilação do petróleo resultava em produtos que substituiriam o querosene obtido a partir do óleo de baleia e do carvão, iniciando-se assim a Era do Petróleo.

Fundamentalmente a partir da década de 1960, após a Segunda Guerra Mundial, o petróleo se tornou a fonte energética dominante do mundo. Substituiu o carvão, devido a praticidades em todos os sentidos quando comparados os dois combustíveis, tornando-se assim insumo base para os séculos XX e início do século XXI (CAMPOS, 2005).

2.1.1 Petróleo brasileiro

No Brasil, a história do petróleo começou em 1858, na então província da Bahia, através da extração de betume para produção de querosene. Entretanto, o primeiro poço de perfuração foi construído apenas em 1897, em São Paulo. A indústria petrolífera brasileira obteve grande avanço tecnológico a partir da criação da Petrobras em 1953, no final da década de 90 mais de 182.000 m³/dias eram extraídos (THOMAS *et al.*, 2001).

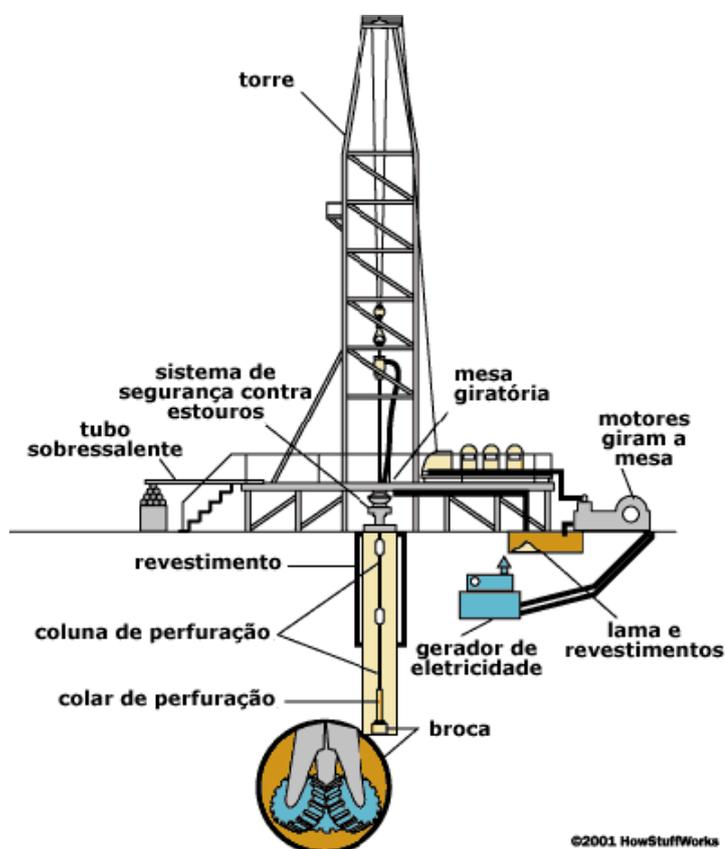
A partir dos anos 2000, a história do petróleo no Brasil mudou drasticamente, quando foram descobertas novas bacias no território, e iniciou a exploração do Pré-Sal, marcado como

ponto chave de mudança nesse cenário. Segundo dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP), em 2016, o país conquistou o marco de maior produtor de petróleo da América Latina, se posicionando, assim, à frente do México e da Venezuela, países que são historicamente grandes produtores e exportadores de petróleo.

2.1.2 Perfuração de poços

A perfuração de poços tem por finalidade extrair os recursos naturais, como por exemplo, petróleo e gás, contidos em reservatórios na formação rochosa. Esses reservatórios estão localizados em grandes ou pequenas profundidades (BAGERI *et al.*, 2019). Thomas *et al.* (2001) descreveram que a perfuração consiste, basicamente, na inserção rotacional da broca na formação rochosa. Pelo interior da broca, percola o fluido de perfuração e ascende pelo anular no túnel formado, carregando os cascalhos e fragmentos de rocha gerados pelo processo.

Figura 1. Sistema de perfuração de poços de petróleo.



Fonte: Adaptado de HowStuffWorks, 2001.

O processo de perfuração e construção de poços de petróleo é um processo caro, demorado e extremamente complexo. Além disso, demanda alto nível de qualificação dos

profissionais e estudos específicos são realizados constantemente a fim de aumentar a eficiência e diminuir os custos do processo (GUILHERME *et al.*, 2011).

Os três tipos de processo de perfuração:

- a) Perfuração *over-balance*: a pressão do poço é mantida acima da pressão da formação rochosa. Nesse processo ocorre maior desgaste da broca de perfuração e maior incidência de perda de circulação de fluido.
- b) Perfuração *near-balanced*: a pressão do poço é mantida semelhante, próxima à pressão da formação rochosa.
- c) Perfuração *under-balanced*: a pressão do poço é mantida abaixo de pressão da formação, comum a ocorrência de *kicks* leves durante o processo de perfuração.

O processo escolhido para perfuração e controle dependerá das propriedades físico-químicas da formação rochosa. O método de controle mais utilizado na perfuração de poços é o *over-balanced*. Segundo Nygaard e Naedval (2006), essa preferência ocorre devido ao menor custo com equipamentos, baixa complexibilidade de controle e menor riscos de influxos. Como resultados indesejados da operação *over-balanced*, acontece a perda de circulação, redução da pressão e da produtividade (JAFFAL *et al.*, 2017; BORGES, 2019).

2.2 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Durante o processo de perfuração rotativa de poços de petróleo os fatores de extrema importância são a fricção da broca e o carregamento dos cascalhos e fragmentos de rocha. Tais fatores precisam ser controlados, pois o bom funcionamento da broca garante a efetividade do processo. Portanto, são circulados fluidos de perfuração, também denominados lamas de perfuração, para garantir o bom funcionamento da broca e sucesso do processo de perfuração (BORGES FILHO, 2018; FANCHI, 2010).

Segundo Thomas *et al.* (2001), o fluido de perfuração é bombeado para o interior da coluna de perfuração e retorna à superfície através da região anular entre a parede do reservatório e a coluna. O anular formado entre a parede do poço e os tubos de revestimentos é cimentado, com o intuito de isolar as rochas, permitindo assim que a perfuração avance com segurança.

As propriedades físico-químicas dos fluidos de perfuração devem ser controladas e medidas frequentemente. As propriedades físicas, ressaltadas por Thomas *et al.* (2001), como

mais importantes são: densidade, parâmetros reológicos, forças-géis, parâmetros de filtração e teor de sólidos. O autor também enumera as propriedades químicas medidas frequentemente nos laboratórios das sondas, são elas: pH, teores de bentonita, teor de cloreto e alcalinidade.

2.2.1 Funções dos fluidos de perfuração

Os denominados fluidos ou lamas de perfuração, são projetados para assumir característica e funções específicas durante o processo de perfuração de poços. Possuem, assim, grande importância ao longo do processo uma vez que os poços ficam mais profundos e a janela operacional fica mais estreita. Tais fluidos não devem ser prejudiciais aos equipamentos e aos manipuladores (GOMAA *et al.*, 2020; BOURGOYNE *et al.*, 1991).

As principais funções dos fluidos de perfuração são (GOMAA *et al.*, 2020; THOMAS *et al.*, 2001):

- Resfriar e lubrificar os equipamentos de perfuração;
- Reduzir o atrito entre a coluna de perfuração e o reservatório;
- Carrear os cascalhos gerados do fundo do poço e transportá-los a superfície;
- Fornecer pressão suficiente para controlar a pressão da formação rochosa, evitando então influxos de fluidos (*kick*);
- Estabilizar as paredes dos poços;
- Formar rapidamente uma película de baixa permeabilidade, para selar as formações rochosas, impedindo que o fluido percole pela rocha;
- Não contaminar o meio ambiente, os manipuladores e o reservatório.

Vale ressaltar que tais funções podem se sobrepor devido à variação da formação rochosa e do reservatório. Além disso, os fluidos de perfuração devem possuir propriedades físico-químicas facilmente controladas, visando assim, se ajustarem as condições variáveis dentro do poço (SERRA, 2003).

2.2.2 Características e composições dos fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração são misturas extremamente complexas de sólidos, líquidos e compostos químicos e, por vezes, gases. Mediante aos componentes utilizados em sua composição, podem assumir diferentes aspectos como: suspensão, dispersão coloidal ou

emulsão. Tais fluidos tem por finalidade, garantir segurança e rapidez à perfuração. Assim, segundo Thomas (2001) é desejável que o mesmo apresente as seguintes características:

- Ser quimicamente estável;
- Ser bombeável;
- Ser inerte em relação à rocha;
- Apresentar baixo grau de corrosão;
- Facilitar a separação dos cascalhos;
- Manter os sólidos em suspensão.

A classificação dos fluidos de perfuração é comumente feita de acordo com o principal componente que constitui a fase contínua. Portanto, o critério mais utilizado é classificá-lo de acordo com o dispersante, componente em maior proporção. São classificados, assim, em fluidos à base de água, fluidos à base de óleo e fluidos à base de gás (BAGERI *et al.*, 2019; THOMAS, 2001).

Nos fluidos a base de água o componente predominante é a água pura, parcialmente ou inteiramente saturada. Adicionam-se aditivos na água como sais, surfactante, polímeros orgânicos, floculantes, redutores de filtrado, redutores de filtrado e adensantes, com a finalidade de conferir a propriedade desejada ao fluido. A seleção dos aditivos deve considerar, também, as propriedades da formação rochosa a ser perfurada (BORGES, 2019; APALEKE *et al.*, 2012).

Os fluidos a base de água possuem vantagens e desvantagens frente ao fluido a base de óleo. Segundo Mellot (2008), são desvantagens atreladas a esse tipo de fluidos, o aumento da massa específica do fluido devido ao grau de dissolução do sal em água, facilidade de dispersão de argilas e elevado poder corrosivo da solução água e sal. Como vantagens o autor destaca o menor custo de manutenção e fabricação, a facilidade no preparo e obtenção do componente base e o baixo grau de contaminação ao meio ambiente (BORGES, 2019).

Os fluidos a base de óleo são aqueles em que o componente predominante é composto de hidrocarbonetos líquidos, dentre eles óleo cru, diesel, óleo mineral e outros produtos (SERRA, 2003). Nos sistemas mais comuns os fluidos base óleo, contém os seguintes aditivos: viscosificante, umidificantes, surfactantes e emulsificadores. A seleção também deve ser feita considerando as propriedades da formação rochosa (THOMAS *et al.*, 2001).

As principais vantagens para esse fluido são a possibilidade de estabilizá-lo facilmente em altas pressões e altas temperaturas, além de possuir baixa solubilidade em sais orgânicos, baixo potencial de corrosão e elevado grau de lubrificidade. No entanto, como desvantagem pode-se destacar que são fluidos caros, nocivos ao meio ambiente e apresentam dificuldade no combate à perda de circulação (SERRA, 2003; BORGES, 2019).

Os fluidos a base de gás ou ar são fluidos comumente utilizados em locais ou situações que recomenda-se a utilização de fluidos de baixa densidade, tais como zonas de perda de circulação severa, formações produtoras com pressão muito baixa e zonas com grande possibilidade de danos (THOMAS et al., 2001).

2.3 REOLOGIA

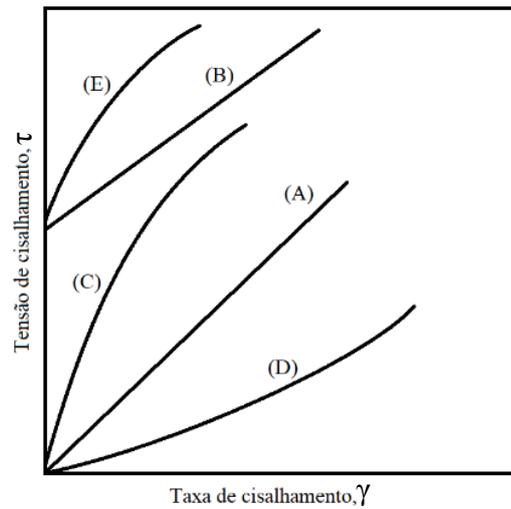
Segundo Machado (2002), reologia é o estudo do escoamento e deformação da matéria, mediante as forças externas. Estudar o comportamento dos fluidos é de suma importância para controlar e prever o comportamento dos fluidos utilizados na perfuração de poços. Permite compreender sua estrutura, além de prever as características e as propriedades em diferentes etapas do processo. Os fluidos de combate à perda de circulação e os fluidos de perfuração são, normalmente, fluidos não-Newtonianos puramente viscosos e independentes do tempo.

2.3.1 Fundamentos da reologia

As teorias sobre a reologia são sustentadas em modelos idealizados, baseados fundamentalmente em equações diferenciais de primeira ordem. Assume-se que as constantes nessas equações não mudam mediante a mudança das variáveis, são chamados modelos ideais. Entretanto existem exceções aos modelos ideais, chamados de anômalos, onde são tratados individualmente e são mais comuns que os modelos ideais (MACHADO, 2002).

A equação matemática que relaciona a taxa de deformação com a tensão de cisalhamento é conhecida como equação de fluxo e sua representação gráfica como curva de fluxo. O cientista Isaac Newton, foi um dos pioneiros no estudo dos fluidos, classificou os fluidos em Newtonianos e não Newtonianos (ROCHA, 2011; BARNES, 2000). Na Figura 2, estão representadas as curvas de fluxo dos principais modelos reológicos estudados.

Figura 2. Exemplo de curvas de fluxo. (A) Fluido Newtoniano; (B) Fluido de Bingham; (C) Fluido Pseudoplástico; (D) Fluido Dilatante; (E) Fluido Pseudoplástico com limite de escoamento.



Fonte: MACHADO, 2002.

2.3.2 Classificação dos fluidos conforme o comportamento reológico

Para fluidos Newtonianos a curva de fluxo é simplificada, consiste em uma reta crescendo positivamente passando pela origem, a tensão é diretamente proporcional a taxa e a constante linear entre as grandezas denomina-se viscosidade. Fluidos não-Newtonianos se comportam de maneira contrária, não existe proporcionalidade entre as variáveis tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento (ROCHA, 2011; BARNES, 2000).

A Equação (1) define matematicamente os fluidos Newtonianos, onde μ é a viscosidade dinâmica absoluta, τ é a tensão de cisalhamento e γ é a taxa de cisalhamento. Para descrever o comportamento dos fluidos não-Newtoniano pode ser utilizada a Equação (2), onde μ_a é a viscosidade aparente que varia em função de γ taxa de cisalhamento.

$$\tau = \mu \cdot \gamma \quad (1)$$

$$\mu_a = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

Na indústria de petróleo, o conhecimento sobre a reologia dos fluidos é de suma importância. Irá nortear e auxiliar a análise do comportamento reológico dos diferentes tipos de fluidos que serão utilizados durante o processo de perfuração de poços. Equações empíricas foram desenvolvidas para modelar a correlação entre tensão de cisalhamento e a taxa de

cisalhamento, como citado anteriormente. Os modelos reológicos não-Newtonianos mais utilizados são o modelo da Potência (*Power Law*), modelo de Bingham ou plástico ideal e o modelo de Herschel-Bulkley (MACOSKO, 1993; BORGES, 2019; FOX & McDONALD, 1998).

Na Tabela 1 estão apresentadas as equações de fluxo dos modelos reológicos mais utilizados (FOX & McDONALD, 1998; ROCHA, 2011). O modelo de Bingham (Equação (3)) e da Potência (Equação (4)) são muito utilizados para indústria de petróleo, pois descrevem bem os sistemas além de simplificar os cálculos. Os parâmetros do fluido de Bingham são τ_0 – tensão crítica de escoamento e μ_p – viscosidade plástica. Os parâmetros do modelo da potência são: k - índice de consistência e n - índice de comportamento.

O modelo de Herschel-Bulkley (Equação (5)) descreve os sistemas hidráulicos com maior precisão, entretanto é mais complexo matematicamente; os parâmetros do modelo são: k - índice de consistência, n - índice de comportamento, τ_0 – tensão limite de escoamento.

Tabela 1. Equações matemáticas dos principais modelos reológicos de fluidos não-Newtonianos.

Modelo Reológico não Newtoniano	Equação de referência
Modelo de Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma$ (3)
Modelo da Potência	$\tau = K \cdot \gamma^n$ (4)
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n$ (5)

Vale ressaltar a importância da utilização de equipamentos confiáveis e calibrados, além de métodos e procedimentos seguros. A determinação dos parâmetros reológicos dos fluidos garante repetibilidade e aproximação da realidade. Tais atividades cooperam para otimização dos processos de perfuração e prospecção de poços, produção, refino e transporte de transporte (MACHADO, 2002; MACOSKO, 1993).

2.4 PERDA DE CIRCULAÇÃO

A perda de circulação é um fenômeno que ocorre naturalmente durante o processo de perfuração de poços. É ocasionado pela invasão do fluido de perfuração através dos poros ou fraturas contidas na formação rochosa. Ela é identificada quando a vazão de fluido de perfuração que é injetado no poço é superior a vazão de fluido que retorna à superfície. Entretanto, o seu agravamento acarreta graves problemas no processo. Os principais problemas

encontrados são: aumento dos custos operacionais, tempo não produtivo (NPT) e diminuição da efetividade do poço. Para casos extremos, dependendo da seriedade da perda, pode inviabilizar totalmente o poço em questão (DATWANI, 2012; GODOI *et al.*, 2018).

A invasão do fluido na matriz rochosa ocorre através das cavidades contidas na formação chamadas fraturas, poros ou cavernas. As fraturas são estruturas mais abundantes da crosta terrestre. Seu tamanho pode variar de microscópicas como por exemplo, microfaturas, formações porosas e redes de fraturas, a zonas cavernosas. Sendo assim, o estudo de rochas fraturadas e redes de fraturas é de suma importância para indústria do petróleo (KLIMCZAK, 2010).

Para o selamento total ou parcial dessas fraturas são utilizados materiais de combate à perda de circulação (LCM), que são responsáveis por selar as fraturas contidas na matriz rochosa. Os materiais são adicionados aos fluidos de perfuração ou inseridos diretamente no poço com a finalidade de encerrar a ocorrência da perda de circulação (BORGES FILHO, 2018; COOK *et al.*, 2012).

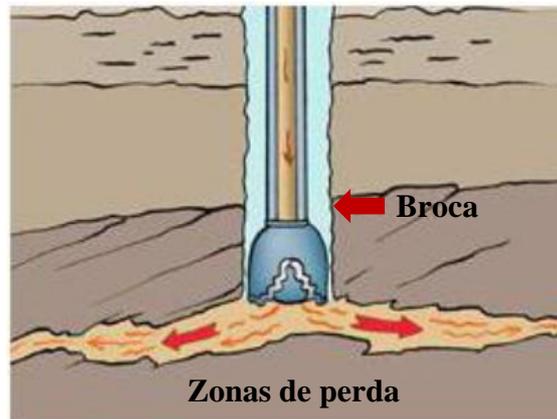
2.4.1 Decorrência da perda de circulação

Os condutos nos quais os fluidos escoam são denominados como fraturas, ou poros dilatados, são de natureza fechada ou aberta. Em outras palavras, o fluido de perfuração flui em contrapressão aos fluidos contidos nas fraturas (WANG, 2011).

Grande parcela dos processos pressupõe que o poço tenha fraturas, sem informações sobre a dimensão e o caminho onde o fluido de perfuração percorrerá. Os insucessos relacionados ao selamento de fraturas estão em não prever corretamente os caminhos que o fluido percorrerá. Além disso, observa-se que as partículas utilizadas convencionalmente, são ineficientes quando não usadas corretamente (WANG, 2011; ALSABA & NYGAARD, 2014).

A Figura 3 representa um sistema esquemático da invasão do fluido na rocha. A broca de perfuração desce em movimento giratório, o fluido de perfuração que descende pelo interior da broca preenche as fissuras contidas na formação rochosa. Uma das funcionalidades do fluido de perfuração é manter a pressão hidrostática do poço e a perda desse fluido culmina em desequilíbrios de pressão graves. A perda de circulação pode progredir a danos estruturais severos. (MURCHISON, 2006).

Figura 3. Processo de perda de circulação.



Fonte: Adaptada GPCPETRON, (2011).

Segundo Datwani (2012), as condições que favorecem a perda de circulação são:

- Presença de formações cavernosas;
- Presença de formações não consolidadas;
- Presença de formações naturais;
- Presença de poros na rocha maiores que as partículas do fluido de perfuração;
- Utilização de fluidos com a densidade média maior que o recomendado para determinada área.

2.4.2 Classificação e identificação dos locais de perda de circulação

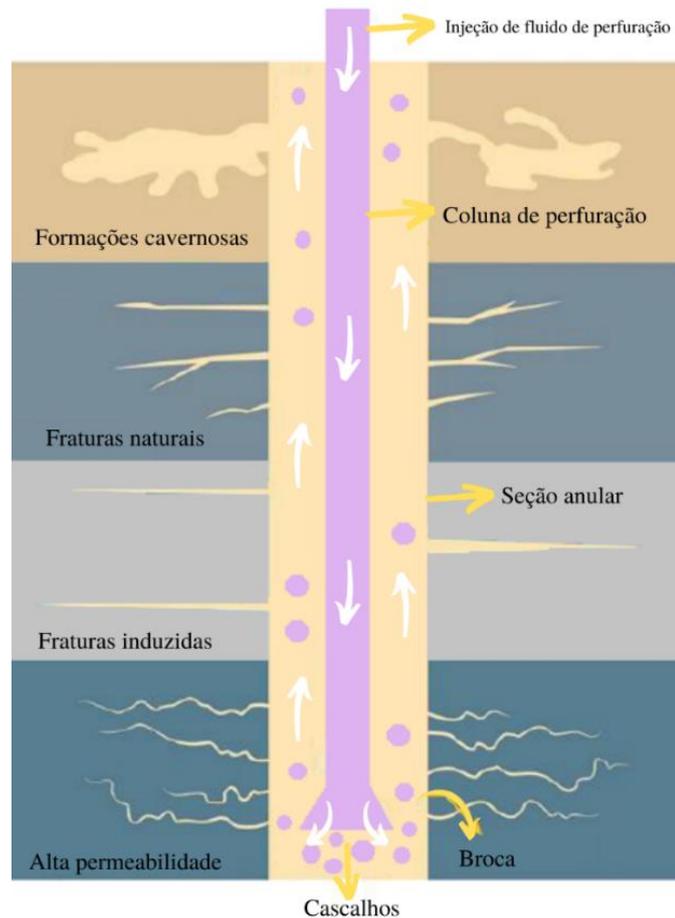
A perda de circulação é classificada mediante a taxa de perda, ou seja, a quantidade de fluido perdida para a formação. É considerada uma perda de circulação pequena taxas de perda menores que 10 bbl/h. Taxas entre 10 e 100 bbl/h são consideradas perdas de circulação parciais. Para taxas maiores que 100 bbl/h as perdas de circulação são chamadas de perdas severas. Além disso, existem casos que o fluido de perfuração não retorna a superfície, sendo considerados como perdas de circulação totais ou completas (ABBAS *et al.*, 2004; ALMAGRO *et al.*, 2014; GODOI *et al.*, 2018, DUARTE *et al.*, 2018).

Em determinadas formações rochosas, a perda de circulação ocorre naturalmente, são os casos das formações permeáveis. Existem diferentes tipos de formações rochosas, que podem ser identificadas através da causa e da magnitude da perda de circulação. Segundo Howard & Scott (1951), são classificadas como:

- Fraturas naturais: São comuns podem ocorrer em qualquer tipo de formação. Possuem espessuras menores, por isso a taxa de perda é menor. No entanto, devem ser seladas a fim de evitar a ocorrência de novas fraturas;
- Fraturas induzidas: São fraturas que surgem durante o processo de perfuração. Podem ser produzidas pelo aumento excessivo da densidade do fluido de perfuração utilizado, irregularidades no projeto ou devido a fragilidade da formação;
- Formações cavernosas: São zonas onde ocorrem perda severa de fluidos de perfuração. Áreas onde contenham aberturas não mapeadas e mediante o processo de perfuração acontece a invasão do fluido. O processo de selamento é o mais complicado, visto que a perda de circulação acontece rapidamente;
- Formações não consolidadas: São formações com alto grau de permeabilidade, entre 10 até 100 Darcy. O fluido percola pelos poros e não retorna.

Na Figura 4, pode-se observar as diferentes zonas de perda de circulação (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Figura 4. Representação de zonas de acúmulo de fluido de perfuração.



Fonte: Adaptada de Alsaba & Nygaard (2014).

Segundo Wang (2011), problemas com perda de circulação eram frequentes no Golfo do México, Oklahoma, Canadá e algumas áreas no Oriente Médio, devido as conformações da formação rochosa. Nestes locais, *softwares* de controle são utilizados e desenvolvidos durante a fase de planejamento, visando garantir a utilização de produtos e sistemas eficientes no combate à perda de circulação. Isso inclui o estudo da viabilidade por especialistas da área, instrumentação de aquisição de dados, modelagem, designs, modelagem hidráulica e caracterização das fraturas (MILLER *et al.*, 2013).

2.4.3 Métodos de combate à perda de circulação

Diferentes métodos podem ser utilizados no combate à perda de circulação. A seleção do método baseia-se etapa do processo que são aplicados. A escolha do método de tratamento, depende da proporção e do tipo da perda de circulação (WANG *et al.*, 2009; COOK *et al.*, 2012; GODOI *et al.*, 2018). Os métodos de tratamentos são classificados em preventivos (pré-tratamentos e tratamentos de estresse para reforçar o poço) e corretivos (mitigação da circulação perdida e “fornecimento de força adicional” ao poço) (MILLER *et al.*, 2013). O tratamento adequado da pré-perfuração possibilita a identificação de riscos, zonas de perda, otimização de práticas de perfuração e estabelecimento de tratamentos corretivos e preventivos (KAAGESON-LOE *et al.*, 2008).

Os **métodos preventivos** são realizados antes que ocorra a perda de circulação. Consistem na adição de materiais para fortalecimento dos poços (*WSM's – Wellbore Strengthening Materials*). Tais materiais possuem mecanismos distintos que serão apresentados na seção 2.4.4. A adição desses materiais visa selar ou cessar o crescimento das fraturas naturais antes da perfuração dos poços de petróleo (COOK *et al.*, 2012).

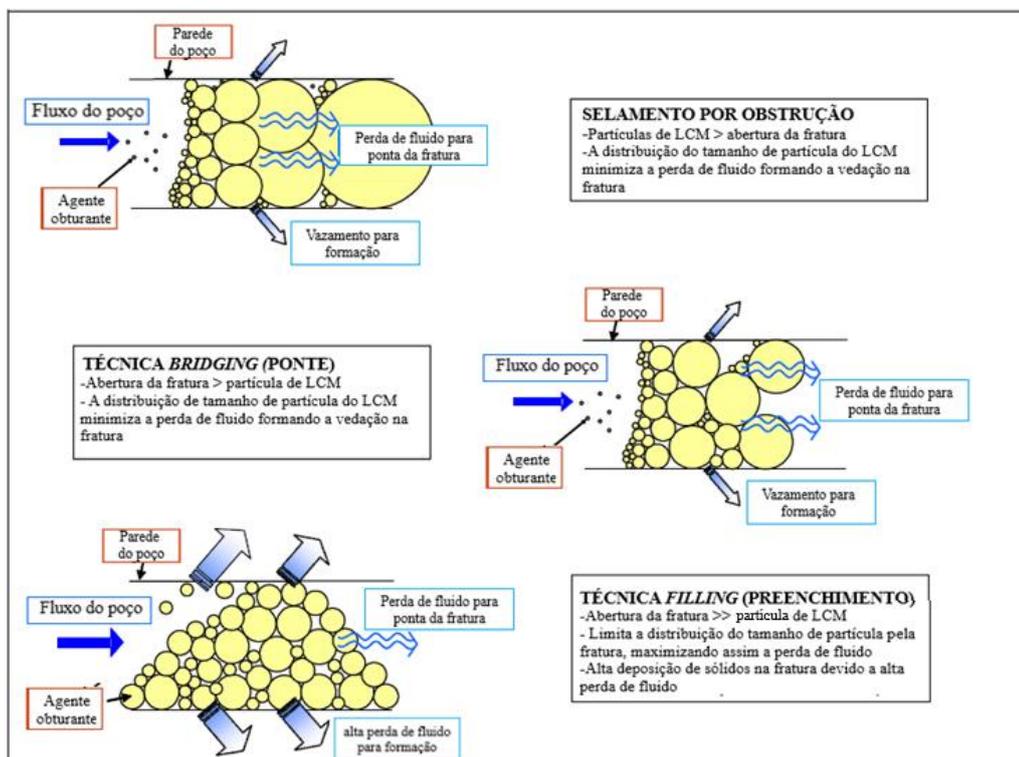
Os **métodos corretivos** são realizados após a ocorrência da perda de circulação. Consiste na utilização de materiais de combate à perda de circulação (*LCM's - Lost Circulation Materials*). Os materiais adicionados ao fluido de perfuração possuem o propósito de selar as fraturas existentes e evitar a formação de novas fraturas durante a perfuração (fraturas induzidas). A seleção dos LCM's deve considerar o custo, o tipo de formação que será utilizado, a disponibilidade, o mecanismo de selamento do material e a seriedade da perda. Os mecanismos e técnicas de selamento serão apresentados na próxima seção (GODOI *et al.*, 2018; PILEHVARI & NYSHADHAM, 2002; ALSABA, 2014a).

2.4.4 Mecanismos de combate à perda de circulação

Segundo Kaageson-lee *et al.* (2008) existem duas principais formas de tratar as perdas de fluidos: por baixa perda de fluido e por alta perda de fluido. O método de tratamento dependerá da fase do processo em que é realizado, do comportamento das partículas e do mecanismo que o tipo de material segue. A deposição de partículas sólidas no poço perfurado ocorre de duas formas: por deposição gravitacional ou pela formação de tortas na superfície das paredes. Entretanto os diferentes tipos de materiais de combate à perda apresentam por diferentes mecanismos de selamento. Nessa seção serão apresentados três mecanismos de selamento de fraturas distintos e algumas técnicas de execução. São eles: mecanismo de preenchimento, mecanismo de fortalecimento de poços e mecanismo de baixa invasão.

O **mecanismo de preenchimento** consiste na injeção de materiais de combate à perda de circulação para o selamento da fratura e concentra-se na diferenciação das partículas. O mecanismo em questão é afetado pela distribuição granulométrica do material, abertura da fratura, vazamento de fluido através das paredes da formação rochosa e perda de fluido da extremidade da fratura. Como demonstrado na Figura 5, existem técnicas para selar pelo mecanismo de preenchimento, que diferem entre si na formulação de LCM e pelo escoamento do fluido na fratura.

Figura 5. Mecanismo de selamento por preenchimento de fraturas.



Fonte: Adaptada de KAAGESON-LEE *et al.*, (2008).

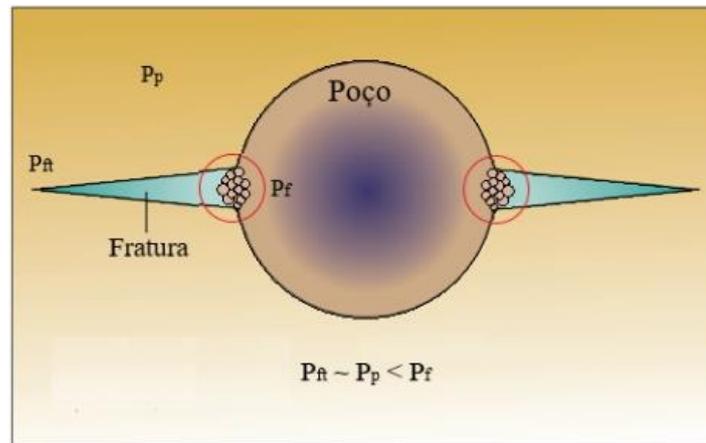
São classificadas em obstrução, técnica *bridging* (ponte) e técnica *filling* (preenchimento) (KAAGESON-LEE *et al.*, 2008).

- No selamento por obstrução são adicionados LCM's que contenham partículas de LCM de diferentes diâmetros. As partículas de maior diâmetro possuem a finalidade de estruturar o selo e as de menores diâmetros de preencher os espaços vazios entre elas. Diferencia-se das outras técnicas pelo uso de partículas com diâmetros maiores que o diâmetro de abertura das fraturas (KAAGESON-LEE *et al.*, 2008).
- Na técnica *bridging* também é necessária a diferença na distribuição granulométrica, porém para esse mecanismo precisa-se de partículas mais finas para preencher as lacunas. As partículas finas contribuem para formação de um bolo de filtro fino, facilita a saída de fluido e ocorre a desidratação do selo. Nesse caso, a abertura da fratura é maior que o diâmetro das partículas de LCM (KAAGESON-LEE *et al.*, 2008).
- Na técnica de *filling* a distribuição granulométrica é necessária, entretanto o tamanho da abertura da fratura é muito maior que o diâmetro das partículas de LCM. Durante a aplicação da presente técnica é necessário que haja tempo de sedimentação das partículas nas fraturas, diferente do necessário nas demais técnicas (KAAGESON-LEE *et al.*, 2008).

O **mecanismo de fortalecimento de poços** (*Wellbore Strengthening*) consiste no selamento prévio (antes que ocorra a operação) das fraturas injetando-se fluidos acrescidos a materiais chamados de fortalecimento de poços ao fluido de perfuração. As fraturas são seladas internamente e espera-se que não haja o rompimento durante a perfuração de poços.

Na Figura 6 está representado o mecanismo de fortalecimento de poço, onde o material sela o início da fratura. Para obter a estabilidade do poço a pressão na ponta da fratura (P_{ft}) e a pressão do poro (P_p) deve ser inferior a pressão do fluido (P_f) (COOK *et al.*, 2012).

Figura 6. Mecanismo de selamento de fratura por fortalecimento do poço (Wellbore Strengthening).



Fonte: Adaptada de COOK *et al.* (2012).

Segundo Cook *et al.* (2012), as principais técnicas de fortalecimento de poços são: resistência a propagação de fraturas, gaiola de tensão, isolamento das paredes dos poços e tensão de fechamento de fraturas.

- A resistência à propagação de fraturas, consiste na utilização de materiais selantes para vedar ou isolar a ponta da fratura, aumentando assim a resistência da formação e evitando a formação de novas fraturas. A eficiência da técnica consiste em evitar a formação ou propagação de fraturas (COOK *et al.*, 2012).
- Os esforços tangenciais ou gaiola de tensão, consistem na adição de materiais de fortalecimento de poços (WSM) ao fluido de perfuração e circulação em condições de desequilíbrio de pressão. Tal etapa, ocorre visando a indução de fraturas rasas nas regiões próximas ao poço, estas fraturas gerarão tensões tangenciais. As tensões adicionais empurram o fluido de perfuração contendo WSM para as fraturas induzidas, formando assim um tampão na entrada dos canais fraturados. O acúmulo de WSM gera uma vedação hidráulica na frente da fratura, o fluido contido no interior da fratura flui para o poço (COOK *et al.*, 2012).
- O isolamento das paredes dos poços consiste na criação de uma camada de material de fortalecimento de poços cobrindo a zona de alta permeabilidade. Essa técnica é utilizada principalmente para formações rochosas permeáveis (COOK *et al.*, 2012).
- Na técnica de tensão de fechamento de fratura, os materiais de fortalecimento de poços são adicionados ao fluido de perfuração para o selamento das fraturas. O consequente aumento significativo da pressão visa empurrar as partículas de WSM para o interior das fraturas já seladas. Dessa forma, garante-se o aumento da

espessura do selo formado, tornando assim o poço mais resistente. Essa técnica é chamada de *squeeze*, tal teste pode ser realizado em laboratório (COOK *et al.*, 2012; BORGES FILHO, 2018).

Baixa invasão (*Low Invasion Fluids*) o mecanismo de consiste na deposição de partículas na parede do poço, formando uma torta fina e resistente sobre os pontos de invasão de fluido. No entanto, essa torta pode-se romper facilmente em casos de influxo não planejado de fluido da formação para o poço.

Contreras *et al.* (2014), estudaram experimentalmente os mecanismos de selamento de fratura induzidas em núcleos cilíndricos de parede espessa por materiais de combate à perda de circulação. O estudo se desenvolveu utilizando a célula de filtração *High Temperature-High Pressure* (HTHP) preenchida por um núcleo de arenito mostrada na Figura 7. O trabalho objetivou analisar a junção de LCM com nanopartículas a base de ferro e de cálcio com a finalidade de potencializar os mecanismos de selamento de LCM's.

Figura 7. (A) Aparato experimental e (B) núcleo de arenito utilizado.

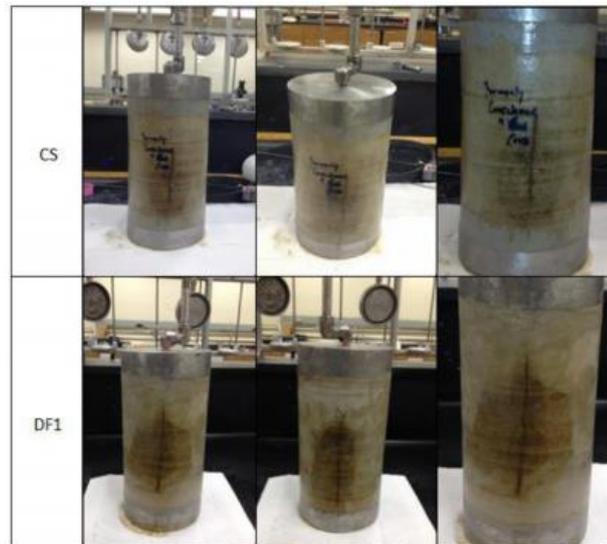


Fonte: CONTRERAS *et al.*, 2014.

O estudo teve como objetivo identificar os mecanismos de selamento que ocorreram durante os experimentos. Foi utilizada uma rampa de pressão em função do tempo para construção das curvas representadas na Figura 9. Cada linha representa um tipo de amostra contendo nanopartículas de ferro em diferentes concentrações e pode-se analisar a influência das concentrações de nanopartículas de ferro na pressão de teste.

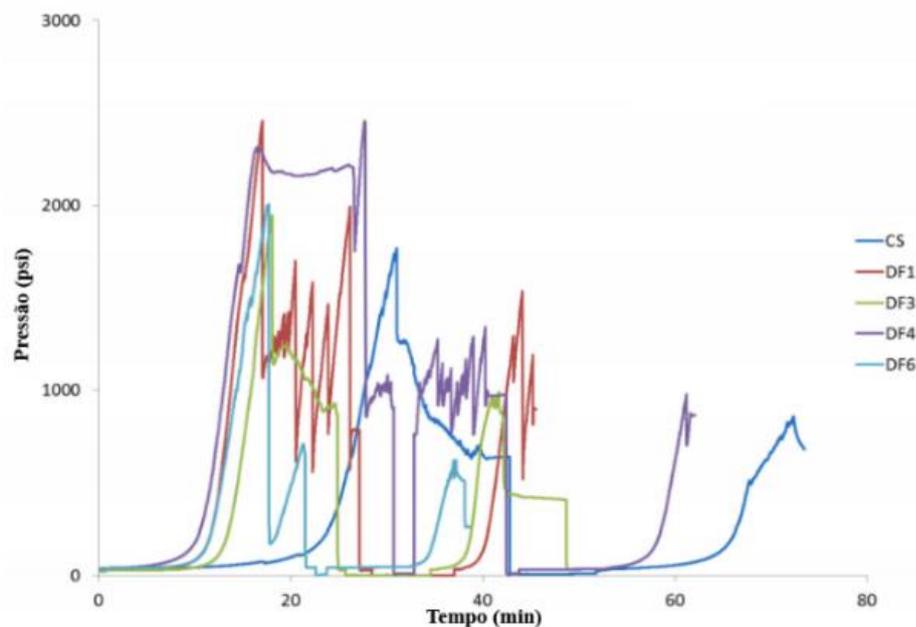
Os fluidos analisados utilizaram LCM's unidos à nanopartícula a base de ferro. Na Figura 8 pode-se observar os núcleos de arenito após os ensaios de selamento. Obteve-se resultados relevantes quanto a pressão e os mecanismos de selamento, no entanto em alguns mecanismos não houve a constatação visual do modo de selamento.

Figura 8. Núcleos após os experimentos de selamento de fratura.



Fonte: CONTRERAS *et al.*, 2014.

Figura 9. Curva de pressão versus tempo da amostra de controle (CS) e amostras contendo nanopartículas de ferro em diferentes concentrações (DF).



Fonte: Adaptada de Contreras *et al.*, (2014).

2.4.5 Tipos de materiais de combate à perda de circulação (LCM)

Os materiais de combate à perda de circulação são classificados de acordo com as propriedades físicas, propriedades químicas, aspecto e mecanismos de selamento. São divididos pela aparência das partículas sólidas, em: granulares, fibrosos, flocos e mistura entre eles. Os primeiros materiais de combate à perda eram resíduos sólidos, pois apresentam baixo custo e são fáceis de encontrar (BORGES FILHO, 2018; NASIRI *et al.*, 2018).

Atualmente, novos materiais estão sendo utilizados e desenvolvidos. Materiais tecnológicos, fluidos dilatantes, materiais sem partículas sólidas, materiais ecológicos, são as novas tendências para os LCM's. As empresas de petróleo gastam milhões de dólares todos os anos para combater a perda de circulação (NASIRI *et al.*, 2018). A utilização de espumas e materiais reticulados acrescidos a espumas são tendências também encontradas que obtiveram êxito no combate à perda de circulação (IVANOV *et al.*, 2016). A seguir serão apresentados alguns aspectos de cada tipo de material e na Figura 10 estão apresentados os tipos de materiais.

Figura 10. Tipos de LCMs convencionais. (A) Granular, (B) Flocos, (C) Fibrosos e (D) Mistura de LCM's.



Fonte: Adaptada de Alsaba *et al.*, (2014a).

2.4.5.1 Materiais granulares

Os materiais de combate à perda com partículas granulares, consiste em sua estrutura dois agentes que funcionam como tampões. Podem permanecer na entrada ou na superfície interna da formação. Sua eficácia depende do tamanho da partícula, há formação de uma ponte

estável se a partícula for maior que a largura da fratura. Logo, a distribuição granulométrica tem grande influência na eficiência dos LCM's desse tipo. Podem ser utilizados como materiais de fortalecimento de poços ou como materiais de combate à perda de circulação (NAYBERG & PETTY, 1986).

2.4.5.2 Materiais fibrosos

São os materiais mais indicados para controlar a perda de circulação em formações com alta permeabilidade ou porosas. Em sua composição encontram-se inibidores com partículas granulares em sua estrutura. As partículas maiores ocupam os poros e as menores preenchem os espaços entre elas (NASIRI *et al.*, 2018). Forma-se uma película uniforme sobre os espaços vazios, funciona como um adesivo nas paredes internas do poço. Permitem que as partículas se aglomerem e precipitem rapidamente, formando tampas nas extremidades dos poros selando as fraturas (NASIRI *et al.*, 2018).

Tais materiais, geralmente, possuem origem vegetal e simplificada funcionam como um meio filtrante. Filtram as partículas sólidas do fluido de perfuração, escoando para dentro da fratura apenas o material mais leve 'filtrado', ocorre devido a estrutura, organização das partículas e a granulometria do material (NASIRI *et al.*, 2018; BORGES FILHO, 2018; NAYBERG & PETTY, 1986).

2.4.5.3 Materiais em flocos

São materiais capazes de criar forte bloqueio contra fraturas e formações permeáveis. Apresentam grande área superficial, podem apresentar alto grau de rigidez. As partículas se depositam nos poros impossibilitando a percolação do fluido de perfuração na formação rochosa. São muito eficientes quando utilizados nos processos certos, erros de projetos envolvendo esse tipo de material acarretarão desperdício de tempo e material. Caso não suportem a pressão do poço em questão, funcionarão como os materiais fibrosos, criando o meio filtrante para estancar o fluido (HOWARD & SCOOT, 1951).

2.4.5.4 Misturas de LCM's

A junção de dois ou mais diferentes tipos de LCM, possui a finalidade de unir as características positivas de cada material e bloquear as fraturas com mais eficiência. No entanto, a composição da mistura precisa ser planejada e analisada com o intuito das características de

cada material se potencializem e, conseqüentemente, melhorar o material final. A mistura cria materiais que podem ser utilizados em diferentes tipos de formações (ALSABA *et al.*, 2014a).

Na Tabela 2 estão listados alguns exemplos de materiais de combate à perda convencionais, suas respectivas especificações e tipo de selamento. Foram selecionados visando exemplificar todos os tipos de materiais relacionados com o mecanismo de selamento.

Tabela 2. Tipos de materiais de combate à perda de circulação e seus respectivos mecanismos de selamento.

Nome comercial	Tipo	Selamento	Especificações
N-Seal®	Fibroso	Baixa invasão	Produto à base de fibra de mineral. Formulado para perda de circulação na concentração de até 30 lb/bbl (85,6 kg/m ³), como aditivo para todo sistema de fluido (HALLIBURTON 2014).
Mix II Fine®	Fibroso	Baixa invasão	Produtos à base de fibra de celulose. Utilizados em fluido base água, óleo e sintético. O tratamento recomendável para perdas pequenas é de 5 a 10 lb/bbl (14 a 29 kg/m ³), para perdas parciais é de 10 a 20 lb/bbl (29 a 57 kg/m ³) e para perdas severas é de 20 a 35 lb/bbl (57 a 100 kg/m ³). 55% solúvel em ácido, HCl (15%) a 100 °C (MI SWACO, 2013).
Fiber plug®	Fibroso	Preenchimento e fortalecimento de poços	É adicionado a todo sistema de fluido de perfuração. É aplicável onde as perdas são moderadas na concentração de 5 a 25 lb/bbl (14,3 a 71,25 kg/m ³) ou 40 lb/bbl (114 kg/m ³) para perdas severas.
Magma Fiber®	Fibroso – Solúvel	Baixa invasão	Produto à base de fibra de mineral, solúvel em ácido. Utilizado em fluido base água e óleo. De acordo com o fabricante pode ser utilizado para até 30 lb/bbl.
Hydro Plug®	Mistura de LCM com polímero	Preenchimento	Produto que incha na presença de água doce. Utilizado em fluido base água ou óleo. Ideal para perdas severas em operações de águas profundas (HALLIBURTON 2014).
Wallnut®	Granular	Preenchimento	Produto à base de casca de nozes moídas e secas. Devido à sua elevada resistência à compressão, são os mais resistentes ao colapso e degradação de todos os LCM. Na concentração de 2 a 10 ppb são adaptados para pluguear fraturas induzidas e formações de alta porosidade. Na concentração de 5 a 10 sacos (50 pounds).
Frac Attack®	Mistura Granular – Solúvel	Preenchimento e fortalecimento de poços	Produto à base de hidróxido de cálcio, cristais de sílica. Na concentração de 112 lb/bbl em água é usado para zonas de perdas elevadas.
Soluflake®	Flocos	Preenchimento e fortalecimento de poços	Produto laminar à base de flocos de carbonato de cálcio. Utilizado para controle de infiltração e perdas de circulação severas. Utilizado em fluidos base água, sintético e óleo. Não absorve água. O tratamento deve ser de 6 a 12 lb/bbl (17,1 a 34,2 kg/m ³). Excelente aditivo para ser utilizado nas zonas produtoras. 85 a 99,99% solúvel em ácido, HCl 10-15%.

2.4.6 Escoamento de fluidos ao longo de fraturas

Para que o processo de perfuração de poços ocorra sem problemas estruturais severos é importante entender os processos hidrodinâmicos e o que ocorre durante o escoamento dos fluidos. A natureza do escoamento é governada pelas forças inerciais e viscosas que agem sobre o fluido (BIRD *et al.*, 2013).

Para fluidos Newtonianos a relação entre as forças inerciais e viscosas é traduzida pelo número de Reynolds, adimensional dado pela Equação (6). Os regimes de escoamento em tubos são classificados como: regime laminar, regime de transição e regime turbulento. No regime laminar as partículas de fluido movimentam-se em lâminas, caracteriza-se como movimento ordenado das partículas do fluido, valores de Reynolds inferior a 2100. No regime de transição as partículas do fluido iniciam o deslocamento desordenado das partículas, valores de Reynolds entre 2100 e 4000. O regime turbulento é caracterizado pelo movimento aleatório e desordenado das partículas, valores de Reynolds superiores a 4000 (BIRD *et al.*, 2013).

$$Re = \frac{D_h v \rho}{\mu} \quad (6)$$

Sendo, Re o número de Reynolds, D_h o diâmetro hidráulico, v a velocidade média de escoamento do fluido, ρ a massa específica do fluido e μ a viscosidade dinâmica do fluido.

Para fluidos não newtonianos a equação de Reynolds não é suficiente, os regimes de escoamento devem ser definidos pela combinação entre parâmetros reológicos e o número de Reynolds modificado. O diâmetro hidráulico para sistemas de área de seção não circular pode ser calculado por diferentes equações. A Equação (7) foi desenvolvida por Bourgoyne *et al.* (1991), sua teoria é conhecida como *slot* é válida para razão entre o diâmetro interno (D_1) e diâmetro externo (D_2) for maior que 0,3.

$$D_h = 0,816 (D_2 - D_1) \quad (7)$$

Diversos autores estudaram o escoamento de fluidos Newtonianos e não Newtonianos em fraturas. A próxima seção destaca alguns desses autores que estudaram a interferência da perda de carga, da forma da fratura, irregularidades na superfície no escoamento dos fluidos confinados em fraturas. Além das principais considerações de fator de atrito e número de Reynolds utilizadas. No presente trabalho a fratura será considerada um tubo com rugosidade característica.

2.4.6.1 Escoamento de fluidos Newtoniano ao longo de fraturas

Huitt (1956) propôs que o fluxo dentro da fratura é tratado de forma semelhante ao fluxo entre placas paralelas. A fratura é definida como um duto tridimensional, possui comprimento, largura e profundidade definidas. Qualquer irregularidade na superfície da placa é denominada de rugosidade da superfície. O autor propôs as correlações contidas nas Equações (8), (9) e (10) para o número de Reynolds e o fator de atrito. A Equação (11) descreve a queda de pressão na fratura segundo o autor.

$$f = \frac{24}{Re}, Re < 1800 \quad (8)$$

$$f = 0,55 \left(\frac{z}{W_f} \right)^{0,472}, Re < 1800 \quad (9)$$

$$Re = \frac{2W_f v \rho}{\mu} \quad (10)$$

$$\Delta P = \frac{Lp v^2 f}{W_f g_c} \quad (11)$$

onde, W_f é a espessura da fratura, z a altura da rugosidade na fratura, f é o fator de atrito do escoamento, v é a velocidade média na fratura, ΔP é a queda de pressão na fratura, g_c é o fator de conversão massa/força e L é o comprimento da fratura.

Os resultados obtidos pelo autor, assim como os observados na literatura, mostraram que as fraturas podem ser tratadas como fluxo em duto circular. Além disso, as correlações para o fator de atrito foram satisfatórias.

Witherspoon *et al.* (1980) também estudaram o comportamento dos fluidos newtonianos em fraturas. O escoamento em fraturas foi aproximado ao escoamento entre placas paralelas, assim como no trabalho de Huitt (1956). Foram usadas fraturas induzidas artificialmente em amostras de granito, basalto e mármore. Em seu estudo os autores utilizaram água em regime laminar, comprovaram que a Lei Cúbica para o escoamento em fraturas é válida. A lei cúbica demonstrada por Witherspoon está descrita na Equação (12) e entre a perda de carga e a vazão na fratura nas Equações (13) e (14).

$$\frac{Q}{\Delta H} = \frac{C(2h)^3}{1 + 6,0 \left(\frac{e}{2h} \right)^{1,5}} \quad (12)$$

$$C = \left(\frac{W}{L}\right) \left(\frac{\rho g}{12\mu}\right) \quad (13)$$

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (14)$$

Onde, Q é a vazão da fratura, f é o fator de desvio da idealidade, C é a constante de WITHERSPOON, ΔH é a perda de carga, h é metade da largura da fratura, L é o comprimento da fratura, W é a largura da fratura, ρ a massa específica do fluido e μ a viscosidade dinâmica do fluido. O trabalho concluiu que a lei cúbica permanece válida para fraturas abertas ou fechada, independentemente do tipo de rocha.

O fluxo através da rocha fraturada é comumente descrito através da lei cúbica, Equação (12), entretanto sem relacionar o comprimento e abertura da fratura. Experimentos laboratoriais sobre o fluxo em fratura criadas artificialmente, como por exemplo o estudo desenvolvido por Watanabe *et al.*, (2008) e fraturas naturais, como por exemplo Raven e Gale (1985), (KLIMCZAK *et al.*, 2010).

Olson (2003) estabeleceu a correlação entre o comprimento e a distância média entre as paredes da fratura de parede lisa com um perfil elíptico. O autor relacionou a abertura máxima da fratura com a abertura ao deslocamento médio do fluido na fratura Equação (15) e Equação (16). Substituindo a D_{ang}/L na equação cúbica Equação (12) resultando a Equação (17). A correlação proposta por Olson (2003), propôs que todas as fraturas têm o mesmo fator de intensidade de tensão, que se alinharão com o comprimento da fratura. Facilitando assim, as considerações sobre o limite de propagação dos fluidos dentro da fratura.

$$D_{avg} = \frac{\pi}{4} D_{max} \quad (15)$$

$$L = \frac{16 D_{avg}^2}{(\pi \alpha^2)} \quad (16)$$

$$\frac{Q}{\Delta H} = - \frac{4 \rho g}{3\mu (\pi \alpha^2)} b^5 \quad (17)$$

Onde, Q é a vazão na fratura, D_{avg} é a abertura da fratura, D_{max} é a abertura máxima da fratura, L é a altura da fratura, ρ é a viscosidade aparente do fluido, g é a aceleração da gravidade.

2.4.6.2 Escoamento de fluidos não-Newtoniano ao longo das fraturas

Os autores Rossen e Kumar (1992) estudaram o escoamento de fluidos não newtonianos em fraturas. Propuseram o modelo que relaciona a queda de pressão com a vazão na fratura para fluidos não-Newtonianos. Os autores propuseram as Equações (18), (19) e (20) para descrever a vazão como uma função dos parâmetros reológicos dos fluidos. Sendo, (18) para fluidos *Power Law*, (19) para fluidos de Bingham e (20) para o cálculo da abertura efetiva.

$$Q = \frac{2W(h)^{\left(2+\frac{1}{n}\right)}}{2 + \left(\frac{1}{n}\right) k^{\frac{1}{n}}} \nabla P^{\frac{1}{n}} \quad (18)$$

$$Q = \frac{2}{3} \frac{h^3 W}{\mu_0} \nabla P \left(1 - \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\nabla P h} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_0}{\nabla P h} \right)^3 \right) \quad (19)$$

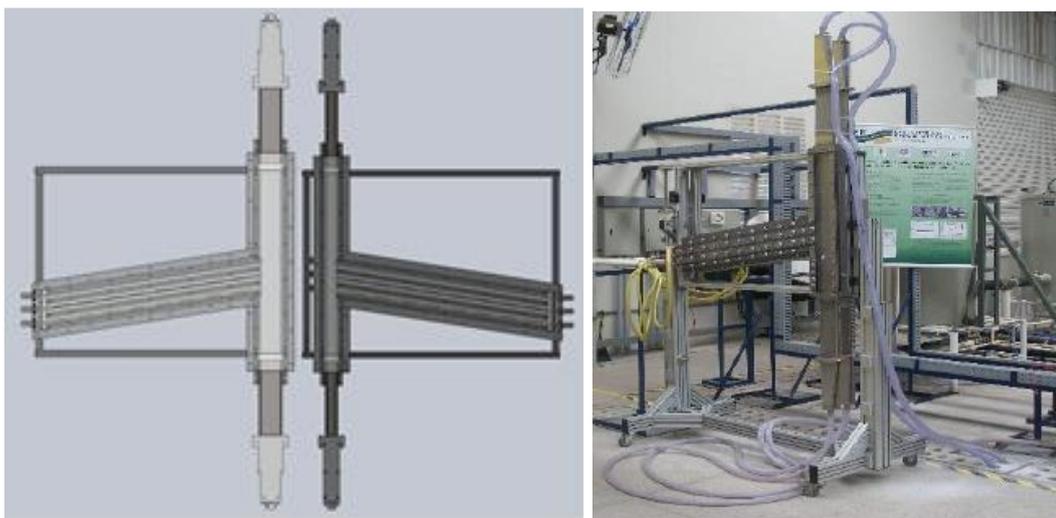
$$h_{eff} = \left(\frac{Q}{\nabla P^{\frac{1}{n}}} \frac{2 + \frac{1}{n}}{2W} K^{\frac{1}{n}} \right)^{\frac{1}{2+\frac{1}{n}}} \quad (20)$$

Onde, ∇P é o gradiente da queda de pressão, h_{eff} é a abertura efetiva da fratura, Q é a vazão na fratura, h é metade da largura da fratura, W é o diâmetro hidráulico, K e n são os parâmetros reológicos do modelo *Power Law* e τ_0 é a tensão limite de escoamento.

Os autores concluíram que a viscosidade tem influência na fase de permeabilidade relativa entre os fluidos e a formação rochosa. No mais, reduzir a fração de área de fratura na fase da invasão do fluido na formação rochosa, pode reduzir a taxa de invasão do fluido. Além disso, fraturas com ampla distribuição de abertura, requerem uma tensão de rendimento maior para obstruir as fraturas.

Os três trabalhos a seguir utilizaram a mesma unidade experimental o Simulador de Escoamento em Fraturas (SEF), versão 1.0. O equipamento foi desenvolvido para simular o escoamento de fluido de perfuração em fraturas, a estrutura em acrílico permite a observação tamponamento dessas fraturas. O acrílico que permite a visualização do tamponamento limita a pressão máxima de operação a 150 psi. Como pode ser observado na Figura 11, o SEF foi projetado para simular o escoamento na perfuração vertical e horizontal. No entanto, os estudos desenvolvidos no laboratório priorizaram apenas a direção vertical de forma ascendente (de baixo para cima), visto que se assemelha aos cenários da PETROBRAS (CALÇADA *et al.*, 2015).

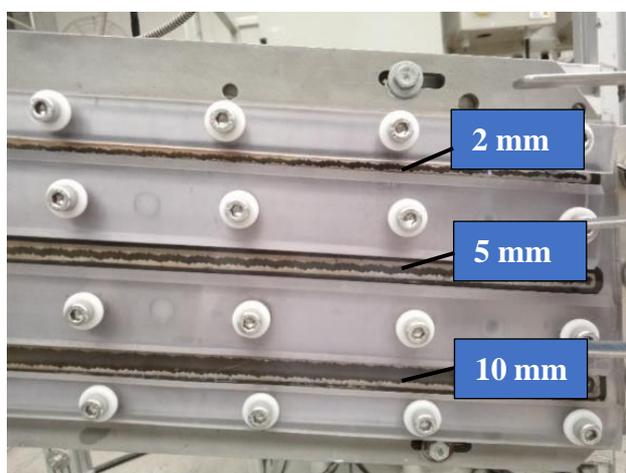
Figura 11. Simulador de Escoamento em Fraturas (SEF).



Fonte: CALÇADA *et al.*, (2015).

O equipamento possui duas seções retangulares (geometria 1 de $12 \frac{1}{4}$ e geometria 2 de $8 \frac{1}{2}$) que possibilita simular o número de Reynolds em anulares de poço aberto com coluna de 5 polegadas (GODOI *et al.*, 2018). O fluido é direcionado em rugosidades e dimensões conhecidas, as saídas laterais possuem fraturas de 10 mm, 5 mm e 2 mm de 1,5 m de comprimento e inclinação de 9° (Figura 12). Essas saídas são abertas por válvula esfera manuais, para simular a perda de fluido na direção da formação rochosa. Para analisar os dados de perda de carga durante o escoamento foi conectado um transdutor de pressão diferencial nas extremidades da fratura. A vazão mássica foi medida através da coleta seguida pela pesagem de todo o fluido que escoou pela fratura (CALÇADA *et al.*, 2015).

Figura 12. Fraturas contidas no SEF.



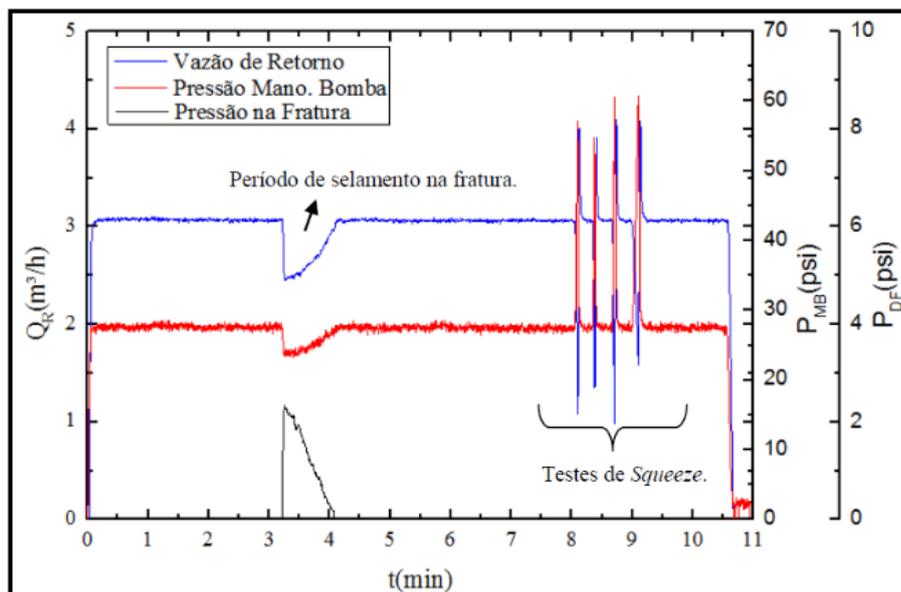
Calçada *et al.*, (2015) desenvolveram um estudo experimental objetivando avaliar diferentes partículas de calcário no combate à perda de circulação e o escoamento de diferentes

fluidos não newtonianos em fraturas. Utilizaram o simulador de escoamento de fluido (SEF) descrito acima, obtendo assim dados de diferencial de pressão e velocidade de escoamento. Usaram a goma xantana (1,5 lb/bbl), amido e água industrial para preparação dos fluidos, além da adição de calcário como adensante e facilitador de obstrução de fraturas. Os autores selecionaram o calcário como materiais de combate à perda, em flocos e granular, e desenvolveram um *blend* contendo os dois materiais. O equipamento permite a obtenção de dados de vazão, pressão na fratura e velocidade de escoamento.

Os autores selecionaram para os testes as concentrações de 0 lb/bbl, 17,5 lb/bbl e 30 lb/bbl. Na Figura 13 está contida uma seção dos resultados obtidos pelo autor para o material granular (17,5 lb/bbl) e material em flocos (17,5 lb/bbl) na fratura de 10 mm. A curva azul (Q_R) ilustra a vazão de retorno ao anular, a curva vermelha a pressão de bombeio (P_{MB}) e a curva preta indica a pressão diferencial na fratura (P_{DF}).

Na Figura 13 pode-se observar o comportamento dos materiais observado por Calçada *et al.*, (2015) durante o escoamento na fratura de 10 mm. Aos 3 minutos as válvulas de saída foram abertas, simulando a perda de fluido, conseqüentemente, observou-se a redução da vazão de retorno e da pressão da bomba. Além disso, aumento significativo da pressão na fratura até o selamento dela, após a pressão retorna a pressão do sistema. Foram realizados testes *squeeze* para analisar a resistência do tampão formado, condições extremas de pressão foram aplicadas e medidas as respostas do sistema. Observou-se que o tampão formado resistiu as perturbações.

Figura 13. Teste de selamento da fratura de 10 mm no anular de 12 1/4.

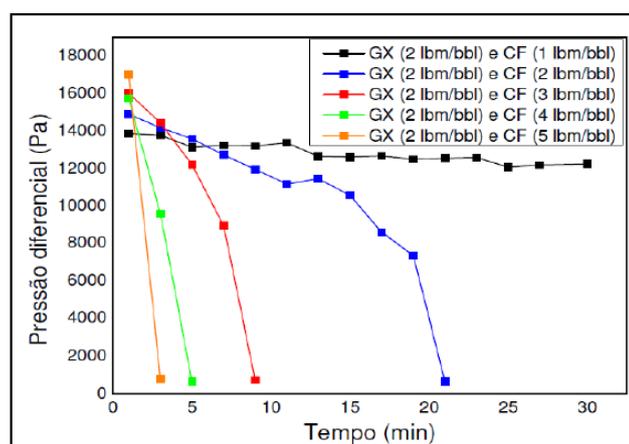


Fonte: Calçada *et al.* (2015).

Os autores concluíram que as suspensões contendo goma xantana e as suspensões contendo LMC apresentaram comportamento reológico de um fluido Herschel-Bulkley, como esperado. Observou-se também que a granulometria do material de combate à perda segue a distribuição bimodal. Com relação aos testes realizados, o calcário na forma granular não obteve eficiência no selamento das fraturas. Todavia, os carbonatos de cálcio na forma laminar, associados aos polímeros, obtiveram grande eficiência no selamento das fraturas. O equipamento foi eficiente para simular a perda de fluido para fratura.

Godoi *et al.*, (2018), dando prosseguimento ao trabalho de Calçada *et al.* (2015), avaliaram a eficiência de suspensões de combate à perda de circulação utilizando compostos de calcário laminar e goma xantana. Os autores usaram goma xantana (2 lb/bbl) como fluido base, carbonato de cálcio laminar fino nas concentrações de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 15, 16 e 18 lb/bbl e fluido contendo 5 lb/bbl de carbonato de cálcio laminar médio como materiais de combate à perda de circulação. Na Figura 14 estão contidos os resultados obtidos para o selamento da fratura de 2 mm fluidos contendo o calcário (LCM). Com o aumento da concentração de calcário laminar, observou-se a redução do tempo de selamento das fraturas. concentração e a reologia são fatores que devem ser considerados no estudo do escoamento de fluidos em fraturas.

Figura 14. Dados de pressão diferencial *versus* tempo para fratura de 2 mm utilizando fluido contendo o carbonato de cálcio laminar (CF) em diferentes concentrações.



Fonte: GODOI *et al.*, (2018).

Ademais, os autores analisaram o efeito concentração de obturante na reologia das suspensões. Propuseram dois modelos matemáticos para descrever o escoamento dos fluidos em fraturas que correlacionam a queda de pressão na fratura com a vazão do fluido escoando. O primeiro utiliza a equação de Navier-Stokes para placas paralelas e o perfil de velocidade

para um fluido Herschel-Bulkley, leva em consideração os parâmetros reológicos do fluido. Como resultado, os autores obtiveram a equação (21), que relaciona o escoamento em função da queda de pressão e dos parâmetros reológicos.

$$Q = \frac{2Lkwn}{\Delta P(1+n\Delta)} \left(\frac{\left(\frac{\Delta P}{Lk} - \frac{\tau_0}{k}\right)^{\frac{1+2n}{n}}}{\frac{\Delta P}{Lk} - \frac{2n}{n}} - h \left(\frac{\Delta Ph}{Lk} - \frac{\tau_0}{k}\right)^{\frac{1+n}{n}} \right) \quad (21)$$

Onde, L é o comprimento da fratura, τ_0 ; k e n são os parâmetros reológicos de Herschel-Bulkley, w é a profundidade da fratura, h é a metade da abertura da fratura, ΔP é a pressão diferencial na fratura, Q é a vazão na fratura.

O segundo modelo utilizou a proposta semelhante ao de Chemy & Lapin (2016), entretanto Godoi *et al.*, (2018) calcularam a viscosidade aparente do fluido pela taxa de cisalhamento. Como resultado os autores obtiveram a Equação (22) para vazão das suspensões nas fraturas. A partir das vazões obtidas experimentalmente, calculou-se a velocidade de escoamento por meio da Equação (23) e as taxas de deformação das suspensões por meio da Equação (24), proposta por Massarani (1999). A viscosidade aparente dos fluidos foi determinada pela Equação (25) e os diâmetros hidráulicos das fraturas pela Equação (26).

$$Q = \frac{2 \Delta P w h^3}{3 L \mu_{ap}} \quad (22)$$

$$v = \frac{Q_{exp}}{w H} \quad (23)$$

$$\gamma = \delta \frac{v}{D_h} \quad (24)$$

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\tau_0 + k.\gamma^n}{\gamma} \quad (25)$$

$$D_h = 2 \left(\frac{w H}{w + H} \right) \quad (26)$$

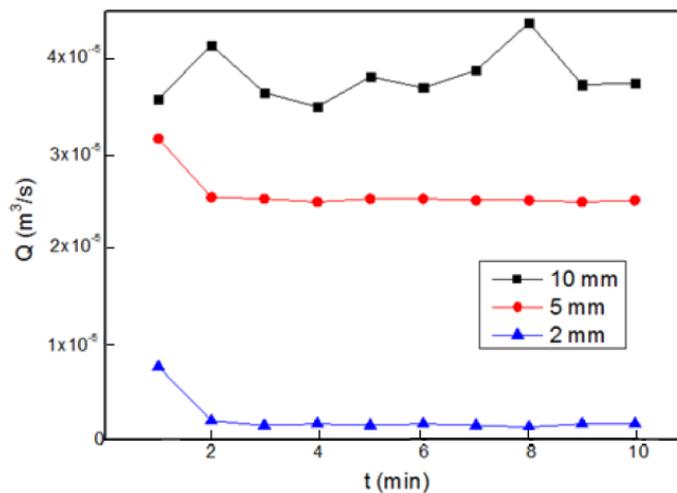
Onde, Q é a vazão da fratura, Q_{exp} é a vazão obtida experimentalmente, ΔP é a pressão diferencial na fratura, w é a profundidade da fratura, h é a metade da abertura da fratura, H é a abertura da fratura, L é o comprimento da fratura, μ_{ap} é a viscosidade aparente do fluido, τ é a

tensão de cisalhamento, γ é a taxa de deformação, δ é a constante equivalente a 6,40, v é a velocidade de escoamento, D_h é o diâmetro hidráulico e τ_0 ; k e n são os parâmetros reológicos de Herschel-Bulkley.

Os fluidos preparados obtiveram comportamento reológico de um fluido Herschel-Buckley, possibilitando assim o ajuste por este modelo. Os autores observaram que quanto maior o diâmetro das partículas, maiores foram as tensões cisalhantes aplicadas para ocorrer o escoamento. Obteve-se maior eficiência de selamento de fratura para o cálcio laminar médio, quando comparado ao cálcio laminar fino. Demonstrando assim a grande influência do tamanho das partículas no controle da perda de circulação. Os dois modelos concederam resultados semelhantes e sensíveis aos parâmetros reológicos das suspensões.

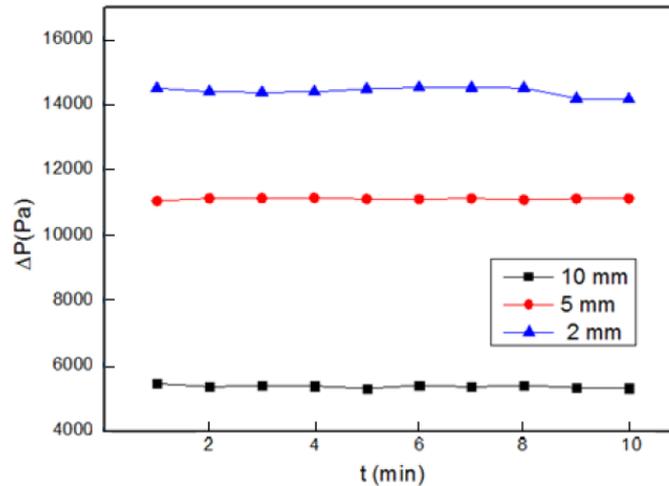
Borges Filho (2018) estudou o efeito do diâmetro hidráulico no cálculo da perda de carga no escoamento de suspensões e selamento de fraturas. O autor também utilizou o SEF 1.0 e analisou experimentalmente o selamento de fraturas adicionando materiais de combate à perda de circulação. Usou uma mistura de polímeros e borato denominado PBS como material de combate à perda, diferentemente dos dois últimos trabalhos que utilizaram o calcário como LCM. As concentrações de LCM escolhidas foram 5, 10, 15, 25 e 50 lb/bbl. O fluido base utilizado foi goma xantana (2 lb/bbl) e foi testado também um fluido contendo amido (6 lb/bbl) e LCM (PBS - 15 lb/bbl). Os resultados de vazão versus tempo (Figura 15) e queda de pressão versus tempo (Figura 16) obtidos para o fluido contendo 5 lb/bbl de LCM estão apresentados abaixo.

Figura 15. Dados de vazão *versus* tempo de teste para o fluido contendo goma xantana 2 lb/bbl e LCM 5 lb/bbl. Para as três fraturas existentes no SEF.



Fonte: BORGES FILHO, (2018).

Figura 16. Dados de queda de pressão *versus* tempo de teste para o fluido contendo goma xantana 2 lb/bbl e LCM 5 lb/bbl. Para as três fraturas existentes no SEF.



Fonte: BORGES FILHO, (2018).

Borges Filho (2018) propôs um modelo para monitorar a variação do diâmetro hidráulico da fratura Equação (29) e propôs que a mesma pode ser utilizada para avaliar a progressão do selamento. O autor monitorou experimentalmente o selamento da fratura com dados de diminuição do diâmetro hidráulico da fratura com o tempo. Como resultado o autor obteve o modelo considerando a variação do tempo presente na Equação (30). Onde, α e β são os parâmetros são definidos pelo autor na Equações (24) e (25).

$$\alpha = \frac{\tau_0 a L}{2 \delta} \quad (27)$$

$$\beta = \frac{K a L \delta^{n-1}}{2^{n+2} n^n} \quad (28)$$

$$D_H = 2 \left(\frac{\beta}{\Delta P} \right)^{\frac{1}{3n+1}} Q^{\frac{n}{3n+1}} \quad (29)$$

$$\frac{d(D_h)}{dt} = \frac{2 (\beta)^{\frac{1}{3n+1}}}{3n+1} \left[\frac{n Q^{1-2n}}{3n+1} \left(\frac{dQ}{dt} \right) - \frac{\Delta P^{-(3n+2)}}{3n+1} \left(\frac{d\Delta P}{dt} \right) \right] \quad (30)$$

Onde, τ_0 ; k e n são os parâmetros reológicos de Herschel-Bulkley, γ é a taxa de cisalhamento, δ é a constante equivalente a 6,40, v é a velocidade de escoamento, D_h é o diâmetro hidráulico, ΔP é a pressão diferencial na fratura, L é o comprimento da fratura e Q é a vazão na fratura.

Os fluidos contendo o material de combate à perda, a base de polímero e borato, obtiveram bons resultados no selamento das fraturas no SEF. O aumento na concentração de LCM forneceu boa resposta aumento da velocidade de tamponamento, quanto maior a concentração menor o tempo e a perda de fluido. O autor obteve êxito no cálculo do diâmetro hidráulico durante os testes. Demonstrando assim que é possível o monitoramento do selamento, utilizando uma derivada temporal. O modelo proposto pelo autor foi eficiente para o monitoramento do selamento da fratura, além de relacionar os parâmetros reológicos do fluido. Foi escolhido para o monitoramento do selamento do presente trabalho.

2.4.7 Características e estudos sobre a eficiência dos materiais de combate à perda de circulação

Kumar *et al.* (2011) e Alsaba *et al.* (2014a) analisaram a eficiência de materiais de combate à perda distintos. Kumar *et al.* (2011) desenvolveram fluidos de perfuração acrescido à materiais de combate à perda, semelhantes aos utilizados comercialmente a base de carbono. com materiais granulares como carbono, são mais eficientes que fibra mais curtas.

O experimento de Kumar *et al.* (2011) consistiu em analisar uma combinação de mármore moído e carbono grafítico em suspensão, acrescidos a fibras celulósicas de viscose, fibras celulósicas revestidas de óleos e fibras de carbono. Utilizando um *slot* cônico, com maior abertura e reduz o tamanho ao longo do comprimento. Demonstraram que os fluidos preparados eram eficientes em tamponar as fraturas. Ademais, observaram que fibras mais longas combinadas. Os testes foram realizados a 60°C em uma célula empistonada. Os autores concluíram que as fibras puras não, foram efetivas para prevenir a perda de fluido. Entretanto, as fibras combinadas ao material granular de carbono foram capazes de conter rapidamente a perda e a combinação levaram a um tampão sólido e imóvel.

Alsaba *et al.* (2014a) analisaram o efeito do tamanho da partícula, tipo, concentração e variação da pressão na efetividade dos materiais. Obtiveram que são fatores importantes para analisar a efetividade e acrescentaram que o mecanismo de selamento é outro fator que deve ser analisado. Para realização dos testes, foram usados dois equipamentos com 4 *slots* de fratura diferentes e quatro materiais com diferentes concentrações e combinações. Para otimizar e avaliar o desempenho dos LCMs e das vedações formadas.

Os autores obtiveram maior desempenho dos materiais convencionais fibrosos utilizados e atrelaram o resultado a ampla distribuição granulométrica, as propriedades físicas

e no grau de deformabilidade que esses materiais possuem. Viram também, que a concentração tem grande influência nos resultados e os materiais granulares possuem integridade de vedação relativamente baixa, quando comparados aos materiais fibrosos. Entretanto, a união entre esses materiais forma misturas mais eficientes.

Nasiri *et al.* (2018) avaliaram a efetividade de diferentes materiais de combate à perda de circulação utilizando meios fraturados tridimensionais em condições semelhantes às condições reais do poço. O equipamento denominado *Bridging Testing Materials* (BMT) foi utilizado para avaliar o desempenho de diversos LCMS (Figura 17). Os LCMS usados foram o Quick Seal[®], a Mica[®], Oyster Shell[®] e RIPI-LQF[®] em lama de bentonita. Nesse aparelho, constam fraturas 3D com 1,96 de profundidade, 1,38 de comprimento e 0,04, 0,08, 0,12, 0,16, 0,2 polegadas de largura de fratura. Os testes foram realizados a um diferencial de pressão de 1000 psi.

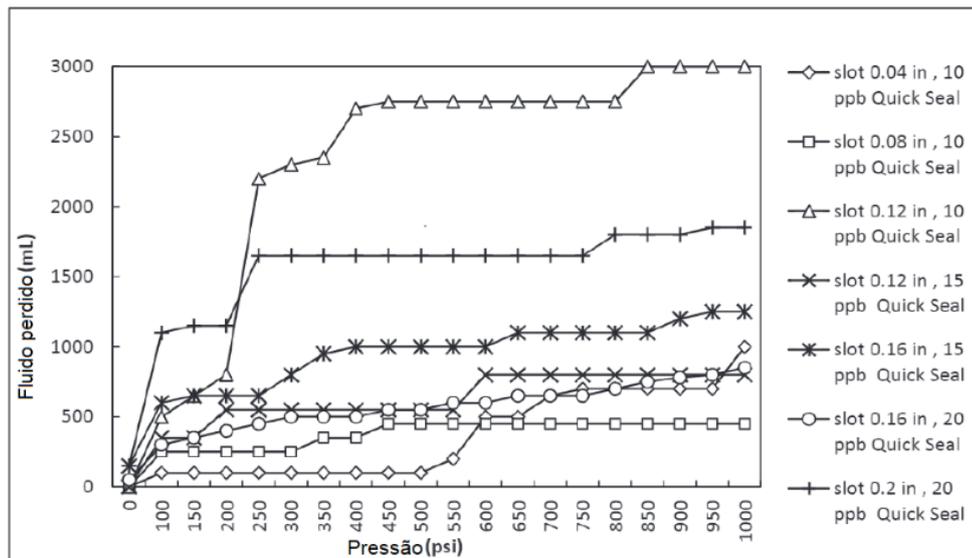
Figura 17. Aparato experimental (BMT).



Fonte: NASIRI *et al.*, (2018).

Foram analisados cinco materiais de combate à perda, utilizando a lama de bentonita como fluido base. A pressão do teste foi elevada em 50 psi a cada 10 s e o volume de saída da fratura foi aferido. O trabalho avaliou a influência da pressão e da concentração no selamento fraturas de diferentes tamanhos e obteve bons resultados. Como observado na Figura 18, quanto maior a pressão, maior foi o volume de fluido perdido pela fratura (NASIRI *et al.*, 2018).

Figura 18. Pressão versus volume de fluido perdido, utilizando diferentes concentrações de LCM em lama de bentonita.



Fonte: Adaptado de Nasiri *et al.* (2018).

Musaed & Fattah (2019) analisaram a influência da pressão, temperatura e espessura do *slot* na efetividade de materiais de combate à perda de circulação, constituído por sementes-de-dendê finas e grossas. O equipamento utilizado para análise foi a célula de filtração HTHP, observada na Figura 19.a O equipamento em questão possibilita a controle de temperatura e pressão em escala laboratorial para testes de filtração e selamento de fraturas. Para avaliação da efetividade os autores utilizaram as temperaturas 25 °C, 60 °C e 90 °C, pressão de 200, 400 e 600 psi, e diferentes espessuras de *slot* (Figura 19.b).

Figura 19. (A) Célula de filtração HTHP; (B) *slot* de fratura.

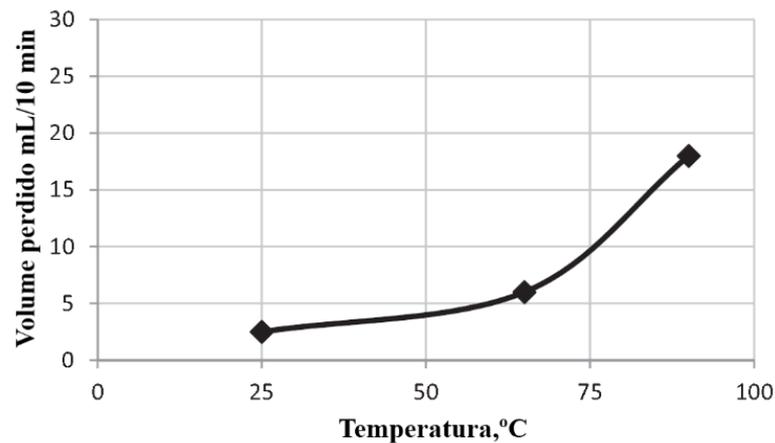


Fonte: Musaed & Fattah (2019).

Os autores obtiveram êxito no selamento das fraturas, principalmente as fraturas de maior distribuição granulométrica. Analisando os dados obtidos, observaram que com o aumento da temperatura e da pressão houve aumento no volume de fluido perdido pela fratura.

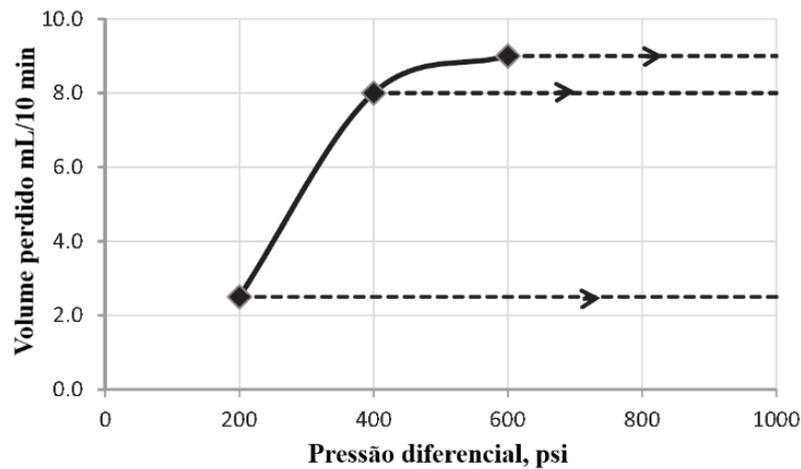
Analisando o fator espessura, o aumento da espessura do *slot* contribuiu para maior retenção do material particulado. Nas Figura 20 e Figura 21 pode-se observar os resultados obtidos, o aumento da temperatura promoveu maior volume de fluido perdido, devido à diminuição da viscosidade. Analisando o diferencial de pressão conclui-se que de 200 psi para 400 psi o efeito do aumento do diferencial de pressão foi acentuado. Entretanto, de 400 psi para 600 psi o efeito foi brando. Os autores explicaram o fenômeno ocorrido devido efeito de colmatção do material que foi pronunciado em altas pressões. O selamento ocorreu a partir do selamento superficial da fratura devido ao tamanho elevado das partículas, impossibilitando assim um resultado conclusivo sobre o material em questão.

Figura 20. Influência da temperatura no volume perdido para LCM de semente-de-dendê.



Fonte: Musaed & Fattah (2019).

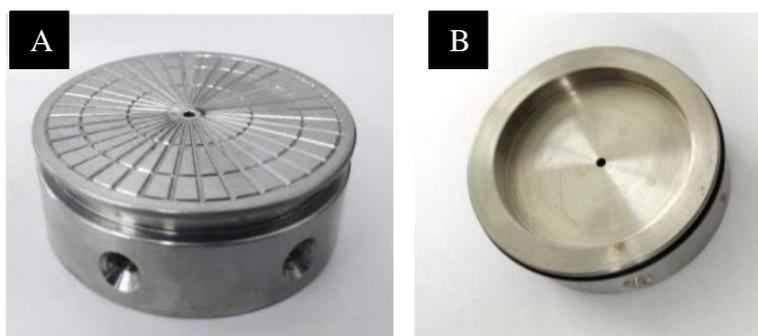
Figura 21. Influência da pressão no volume perdido para LCM de semente-de-dendê.



Fonte: Musaed & Fattah (2019).

Magalhães *et al.* (2019) e Chellappah *et al.* (2015) utilizaram discos ranhurados de aço inox na célula de filtração HTHP da marca Ofite. A proposta de discos ranhurados utilizando a base original para testes de selamento de fraturas (Figura 22.A), não foi eficiente pois a base inferior que o suporta e o disco ranhurado permaneciam em contato direto. Tal configuração, de acordo com os autores, poderia simular um “falso positivo” visto que o espaço entre a base e o disco era menor que fratura. Magalhães *et al.* (2019) desenvolveram uma base modificada com recuo (Figura 22.B), a fim eliminar o ponto de retenção e aumentar espaço de escoamento.

Figura 22. (A) base original utilizada na metodologia atual; (B) base modificada por Magalhães et al (2019).



Fonte: Adaptada de Magalhães *et al.* (2019).

A modificação foi necessária visto que a abertura de saída do fluido era menor que a dimensão da fratura. Os autores utilizaram duas técnicas de avaliação quantitativa e qualitativa para avaliação de materiais de combate à perda de circulação. Técnicas semelhantes serão abordadas no presente trabalho. Na primeira abordagem, o fluido foi mantido estático e empistonado à pressão de 1200 psi e temperatura ambiente. Para a segunda abordagem os autores utilizaram o SEF 1.0, o mesma unidade experimental usado por Calçada *et al.* (2015), Godoi *et al.* (2018) e Borges Filho (2018), circulou-se continuamente o material mantido a pressão de 90 psi e temperatura ambiente (MAGALHÃES *et al.*, 2019).

Os autores prepararam seis fluidos, contendo como fluido base goma xantana a 1,5 lb/bbl, barita suficiente para alcançar 9,2 ppg de massa específica e diferentes LCM's utilizados convencionalmente. Foram usados seis LCMs usados comercialmente que tiveram seus nomes suprimidos e chamados de A, B, C, D E e F. Os produtos A, B e C, foram submetidos aos ensaios de bancada, e os produtos D, E e F foram submetidos aos testes no Simulador físico. Os testes objetivaram analisar a capacidade dos materiais de mitigar a perda de fluido. As duas metodologias forneceram dados satisfatórios para avaliar a eficiência de tamponamento dos

materiais. Na Figura 23 pode-se observar os diferentes tamponamentos obtidos no trabalho dos autores em questão (MAGALHÃES *et al.*, 2019).

Figura 23. (A) Fluido utilizado em duas metodologias de selamento de fratura. Célula OFITE selamento empistonado fraturas de 1,5 mm e 3,7 mm e (B) simulado de escoamento em fraturas SEF fratura de 2 mm.



Fonte: MAGALHÃES *et al.*, (2019).

Bao *et al.* (2019) estudaram o efeito do tipo de LCM, concentração e distribuição granulométrica de partícula no selamento de fratura utilizando um *slot* de fratura de 1,0 metro de comprimento. Os autores desenvolveram um equipamento de teste contendo um *slot* longo de fratura (LFA) (Figura 24). Os autores utilizaram quatro LCM's convencionais granulares e fibrosos para avaliar o selamento de fraturas foram eles: carbonato de cálcio (SCC), cascas de nozes (NS), borracha resiliente (RUB) e fibra de polipropileno (PPF).

Figura 24. Visão geral do simulador de escoamento em fraturas longas (LFA).



Fonte: BAO *et al.* (2019).

O equipamento desenvolvido objetivou simular as condições reais do poço, com adendo de investigar a posição, espessura e microestrutura do selo. Tal investigação foi possível pois a fratura do simulador pode ser removida e aberta ao final de cada teste (Figura 25). Como pode ser observado na imagem a fratura tem estrutura cônica, afunilando ao longo da estrutura (BAO *et al.*, 2019). Os experimentos foram realizados a 80 °C e 3,5 MPa durante 10 minutos.

Figura 25. Zona de selamento dentro da fratura de 2 mm. (A) 10% de SCC, (B) 10% de NS e (C) 10 % de RUB.



Fonte: BAO *et al.* (2019).

Bao *et al.* (2019) obtiveram bons resultados de selamento de fratura e observação de tamanho do *plug* formado. No gráfico de tempo de teste *versus* pressão da célula, pode-se observar aumento gradativo da pressão (I) até a formação do selo. A pressão permanece constante (II) e caso o selo seja rompido a pressão cai significativamente (III). A região A identifica a região dos testes a baixa pressão, onde o material foi submetido a uma pressão constante até o rompimento do tampão formado. A região B é o tempo entre aumento de pressão. A região C é identificada com um novo aumento na pressão na célula para testar a nova pressão de ruptura do material. Todos os fluidos testados obtiveram redução significativa de perda. Os fluidos contendo fibra de polipropileno (FP) foram os que obtiveram menor perda de fluido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo, serão apresentadas as técnicas empregadas na pesquisa, as etapas de caracterização dos materiais e os procedimentos experimentais usados. O trabalho desenvolvido objetivou analisar o efeito da temperatura e da pressão no combate à perda de circulação. Estudou-se a efetividade dos materiais selecionados em três equipamentos: célula de filtração de laboratório HTHP (*High Temperature High Pressure*) e unidades piloto de simulação de escoamento em fraturas (SEF 1.0 e SEF 2.0). As metodologias utilizadas serão descritas nas próximas seções.

A metodologia pode ser dividida em quadro unidades macro:

- Seleção e caracterização dos materiais;
- Ensaio de selamento de fenda na unidade de laboratório célula de filtração HTHP;
- Ensaio de filtração na unidade laboratório célula de filtração HTHP;
- Experimentos nos Simuladores de Escoamento em Fraturas.
- Seleção de dois materiais de combate à perda de circulação disponíveis na indústria de petróleo, um fibroso e um granular. Análises desses materiais variando a concentração, temperatura e pressão e em ensaios de bancada e nas unidades piloto;
- Propostas de misturas desses dois materiais e análise da efetividade de selamento frente a variação de composição, temperatura e pressão.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SÓLIDOS E DAS SUSPENSÕES

A caracterização dos materiais particulados, utilizados na presente dissertação, foi realizada a partir das técnicas: picnometria a gás para determinação da densidade e espalhamento de luz para determinar a distribuição granulométrica das partículas. Para as suspensões preparadas foram realizados ensaios reológicos e de densidade, além da aferição constante da temperatura. Os métodos de realização dos ensaios serão descritos a seguir.

3.1.1 Caracterização dos sólidos

3.1.1.1 Escolha do tipo de material

Galey *et al.*, (2017) afirmam que os materiais mais adequados para o combate à perda de circulação são, preferencialmente, os materiais fibrosos e granulares. Se destacam, como citado anteriormente, pela ampla distribuição granulométrica, agregam ao fluido propriedades

tixotrópicas e normalmente não possuem propriedades exotérmicas. Não obstante, tais materiais suportam variações elevadas de temperatura e pressão.

Para o presente trabalho, foram selecionados dois tipos de materiais de combate à perda de circulação, um do tipo granular e um do tipo fibroso, disponíveis no mercado da indústria do petróleo. O material fibroso é à base de fibra mineral, óxido de cálcio, carbonato de magnésio, solúvel em ácido e contém sílica. O material granular é à base de hidróxido de cálcio, composto por cristais de sílica e hidróxido de cálcio. Foram desenvolvidas misturas (*blend*) utilizando os dois materiais em questão, com o propósito de potencializar as propriedades de cada material. A diferença na natureza dos materiais permitiu a avaliação dos tipos de mecanismo de selamento. Na Figura 27 pode-se observar os materiais selecionados.

Figura 27. Materiais de combate à perda escolhidos. (A) LCM fibroso e (B) LCM granular.



3.1.1.2 Densidade dos sólidos

Os ensaios de densidade dos sólidos foram realizados através da picnometria a gás. Foi utilizado um picnômetro a gás hélio modelo AccuPyc II 1340 da Micromeritics no qual o volume de uma amostra é obtido pela comparação da variação do volume de gás com uma câmara de volume calibrado. O gás mais utilizado para medida de massa específica é o gás Hélio, por ser um gás inerte e pelo tamanho dos átomos serem muito pequenos, logo penetram mais facilmente nos poros. Na Figura 28 está apresentado o picnômetro utilizado. A realização da técnica foi possível com apoio do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras (CENPES).

Figura 28. Picnômetro a gás AccuPyc II 1340.



3.1.1.3 Distribuição do tamanho de partículas

A distribuição do tamanho de partículas foi determinada a partir da técnica de espalhamento de luz. Utilizou-se o analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000 (Figura 29), com capacidade de identificação de partículas de 10 nm a 3,5 mm. Foi usada água destilada como meio dispersante, assim como na limpeza do equipamento. Foram utilizadas ondas ultrassônicas a fim de prevenir a aglomeração das partículas, necessário devido a conformação do material.

Figura 29. Analisador de partículas por espalhamento de luz Malvern Mastersizer 2000.



3.1.2 Caracterização dos fluidos testados

3.1.2.1 Comportamento reológico

Foram realizados experimentos para caracterização reológica da solução base (água destilada e goma xantana) e das suspensões com diferentes concentrações dos LCM fibroso e do LCM granular. As concentrações usadas foram 10, 20 e 30 lb/bbl para cada tipo de LCM. Para os *blends* fixou-se a concentração em 30 lb/bbl e a composição variada em *Blend 1* (75% de LCM fibroso e 25% de LCM granular), *Blend 2* (50% LCM fibroso e 50% LCM granular) e *Blend 3* (25% de LCM fibroso e 75% de LCM granular).

O comportamento reológico das suspensões foi apurado com o viscosímetro da Brookfield modelo DV-III ultra, observado na Figura 30. Utilizando a geometria de cilindros

coaxiais, tornou possível submeter os fluidos a taxas de cisalhamento predefinidas e obter o comportamento da resposta da tensão de cisalhamento. Para os testes, uma alíquota de 9,5 mL dos fluidos preparados foi adicionada na região entre os cilindros coaxiais. O equipamento permite a realização de testes em diferentes condições de temperatura, as temperaturas usadas foram 25, 50 e 75°C. Todos os testes de foram realizados em sextuplicata com réplica no ponto central, totalizando 180 ensaios de comportamento reológicos.

Figura 30. Viscosímetro utilizado no estudo do comportamento reológico dos fluidos.



3.1.2.2 Densidade das suspensões

Os ensaios de medição da densidade das suspensões foram realizados com a balança de lama (*mud balance*) modelo 140 da FANN, a Figura 31 mostra o equipamento. Foi utilizada para determinar as massas específicas reais dos fluidos dos experimentos de bancada e no simulador. A densidade é determinada preenchendo o recipiente da balança com o fluido analisado e equilibrando-a pelo ajuste do contrapeso. O valor da densidade é observado no braço da balança.

Figura 31. Balança de lama.



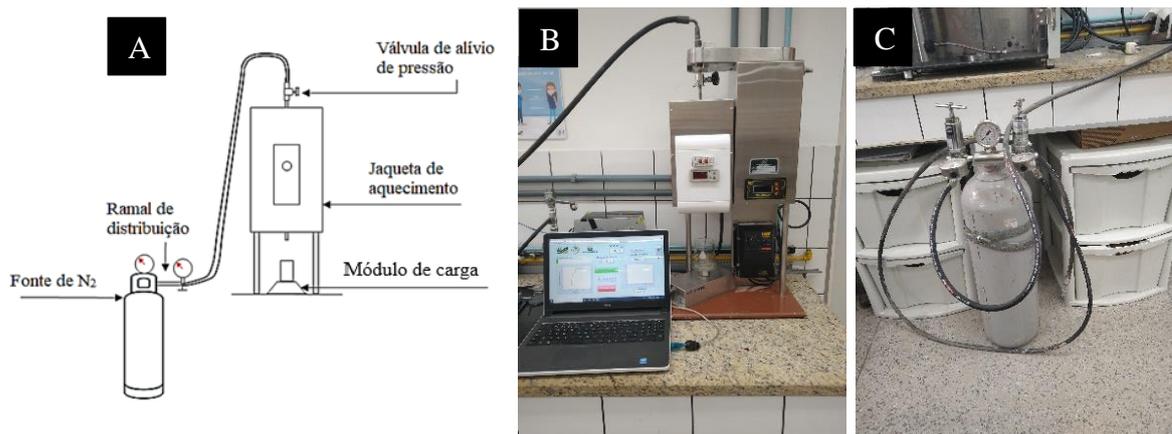
3.2 DESCRIÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL

No presente trabalho, foram utilizadas três unidades experimentais distintas. A unidade experimental de bancada, célula de filtração HTHP (*High Temperature High Pressure*) e as unidades experimentais SEF (Simulado de Escoamento em Fraturas versão 1.0 e 2.0). As três unidades experimentais possibilitaram analisar os fluidos estudados de forma dinâmica e estática.

3.2.1 Unidade experimental: Célula HTHP

A unidade experimental consiste em uma célula de filtração HTHP (*High Temperature High Pressure*) OFITE 171-01-C, com capacidade de 500 mL. Na Figura 32.A tem-se um desenho esquemático da unidade. A mesma é equipada com um sistema de pressurização a gás nitrogênio (Figura 32.C) e um módulo de carga para aquisição dos dados de massa em tempo real. O aparato em que a célula (Figura 32.B) é anexada possui uma camisa de aquecimento (800 W), com limite máximo de temperatura de 204°C (400°F).

Figura 32. (A) Esquema da célula de filtração HTHP; (B) Célula HTHP no suporte; (C) Sistema de pressurização.



Fonte: Adaptado de Borges (2019).

O equipamento foi originalmente desenvolvido para realizar teste de filtração estática e tem seu uso expandido para ensaio de selamento de fenda estática. Nesse equipamento é possível aplicar um diferencial de pressão de até 1300 psi e temperatura máxima de 204 °C (400° F). O sistema de pressurização é suprido por um cilindro contendo gás nitrogênio (N₂) com 20 L de capacidade e pressão máxima 2000 psi. O sistema é acoplado a célula por uma mangueira industrial conectada na válvula superior da célula.

A célula possui bases diferentes, como está destacado na Figura 33. A base A é utilizada para meio filtrante como papel de filtro. Na Figura 33.B está apresentada a base original da célula para meio filtrante de rocha porosa ou natural, material cerâmico ou para ensaios de selamento de fendas. Na proposta do equipamento original o espaço entre a base e a saída eram menores que a abertura da fenda. Possivelmente, resultando em falsos selamentos, pois a abertura de saída possivelmente selava antes da fenda. Dessa forma, Magalhães *et al.* (2019), como dito anteriormente, desenvolveram a nova base com o fundo recuado (Figura 33.C) para garantir que o reboco seja formado na face do disco. O trabalho utilizou a base modificada (Figura 33.D) que foi atualizada visando aumentar a saída do fluido que atravessou a fenda e impedir o entupimento dessa saída.

Figura 33. (A) Base original de filtração; (B) base original para teste de selamento em fendas; (C) Base modificada por Magalhães *et al.* (2019); (D) Base modificada.



Originalmente, os discos ranhurados utilizados para os ensaios de selamento de fenda foram confeccionados de rochas porosas (Figura 34.A), para simular também a infiltração do fluido nos poros da rocha. Devido a atualização da base da célula o material dos discos ranhurados foi alterado para aço INOX (Figura 34.B), para prevenir que se rompam durante a pressurização. Tal atualização foi necessária devido à falta do apoio que a base original oferecia e a base modificada não.

Figura 34. Discos ranhurados utilizados na célula de filtração HTHP. (A) Disco de rocha porosa e (B) disco de aço INOX.

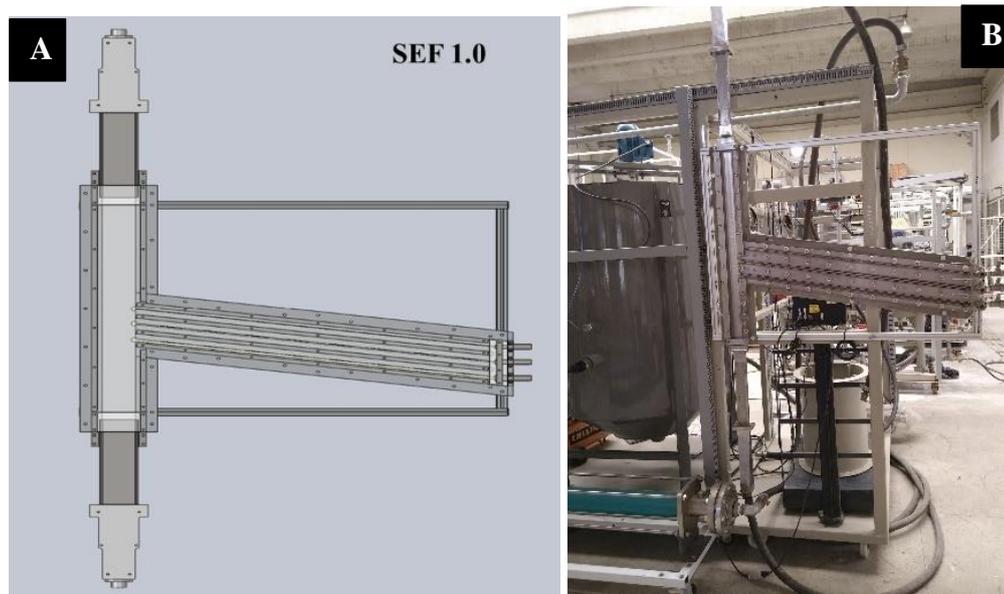


Foram realizados ensaios de filtração a elevadas pressões e elevadas temperaturas, para avaliar o comportamento dos LCM's e dos *blends* frente a um meio filtrante. Os ensaios de filtração mantiveram as condições dos ensaios de selamento de fenda. O papel de filtro usado foi o FANN com 23,3 cm² de área útil e faixa de abertura dos poros do papel de filtro 2,7 a 5,0 μm. A filtração é um dos processos que ocorre durante o selamento das fraturas no poço de petróleo. Consequentemente, se tornou importante analisar o efeito das no volume de filtrado e as características das tortas formadas.

3.2.2 Unidade experimental: SEF

O Simulador Escoamento em Fraturas (SEF) está disponível em duas versões e ambas foram utilizadas no presente trabalho. A versão 1.0, apresentada anteriormente e mostrado na Figura 35, foi utilizada por Magalhães *et al.* (2019), Borges Filho (2018), Godoi *et al.* (2018) e Calçada *et al.* (2015). O simulador 1.0 permite a visualização dos tampões sendo formados durante o teste e o escoamento do fluido no anular e nas fraturas. O equipamento possui duas seções retangulares (geometria 1 de 12 ¼ e geometria 2 de 8 ½) que possibilita simular o número de Reynolds em anulares de poço aberto com coluna de 5 polegadas. No presente trabalho foi usada a geometria de 8 ½ e possui três canais fraturados com abertura de 2, 5 e 10 mm. O fluido escoava de forma ascendente e permeia pelos canais fraturados que estão a um ângulo de 9° do anular. Aquisição dos dados de pressão diferencial na fratura, vazão de retorno do anular, comprimento do selo formado e volume perdido pela fratura. Devido à sua estrutura em acrílico que permite a visualização, a pressão máxima de operação é de 90 psi e temperatura máxima 40 °C.

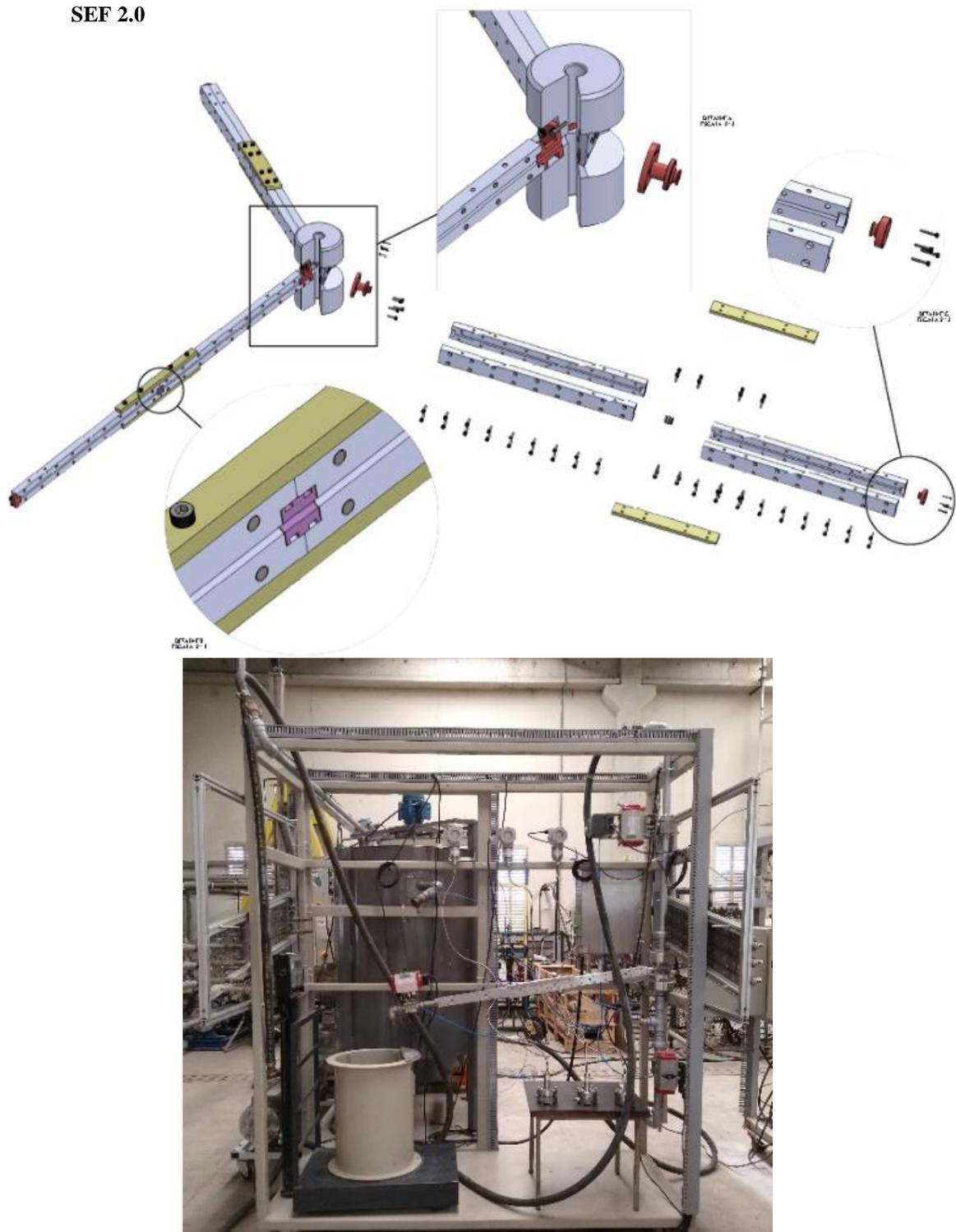
Figura 35. Simulador de Escoamento em Fraturas 1.0. (A) Desenho em 3D do Simulador físico e (B) simulador montado no laboratório.



A versão 2.0 (Figura 36) foi desenvolvida visando realizar experimentos em condições semelhantes às encontradas no poço de perfuração. O equipamento suporta até 2000 psi de pressão e 150 °C. Devido a configuração dos sensores instalados, as condições estão limitadas a 1000 psi de pressão e temperatura de 120 °C. O Simulador 2.0 é todo modular e conectando-se as fraturas podem alcançar até 3 metros de comprimento. Devido à modularidade do equipamento, os testes podem variar as fraturas, a configuração dos braços e do corpo central. O equipamento permite o uso das três fraturas simultaneamente ou não. Para o presente trabalho usou-se uma fratura de 1 metro de comprimento e mesmo diâmetro de abertura por vez. As duas saídas laterais do corpo central do equipamento foram adaptadas aos sensores para medida de temperatura e pressão.

Os melhores resultados encontrados na bancada (célula HTHP) para o LCM fibroso, LCM granular e os *blends* foram testados nos dois simuladores. O SEF 2.0 permite a aquisição de dados de pressão de injeção, diferencial de pressão na fratura, temperatura nos tanques, temperatura nas fraturas, volume perdido pela fratura, vazão na fratura, vazão de retorno ao anular e volume do tanque de preparo.

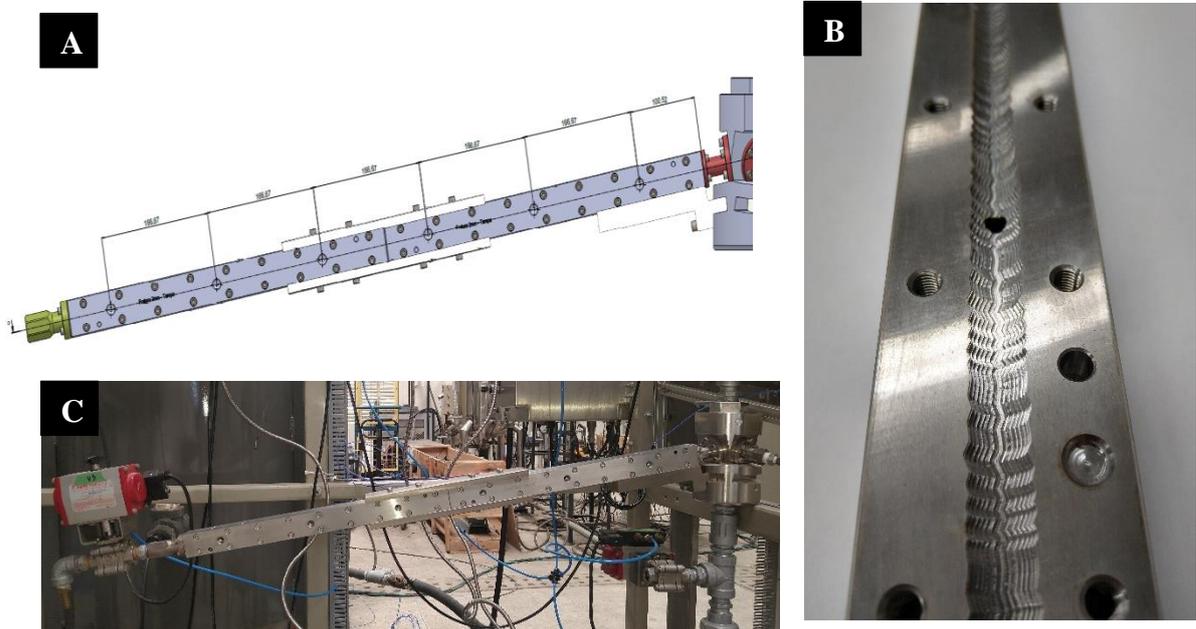
Figura 36. Simulador de escoamento em fraturas 2.0. Superior desenho 3D do simulador e inferior foto do simulador montado.



Diferente da versão 1.0 o SEF 2.0 permite a desmontagem das fraturas para analisar os plugs formados durante os ensaios de selamento. Na Figura 37 as imagens dos canais fraturados do simulador. Cada canal possui 6 saídas laterais de cada lado, como ilustrado na Figura 37.A, onde possibilitou a inserção dos sensores de temperatura e pressão. Os canais fraturados

simulam as fraturas contidas da formação rochosa, possuem diâmetros internos de 2, 5 e 10 mm. Na Figura 37.B está apresentada a estrutura interna e na Figura 37.C a visão externa da fratura de 10 mm.

Figura 37. Braços de fratura do simulador de escoamento em fratura. (A) desenho em 3D do braço de fratura, (B) estrutura interna e (C) foto do braço já montado no laboratório.



A unidade experimental piloto consiste em um *loop* que simula a circulação de um fluido na região anular do poço de petróleo e em canais fraturados que se assemelham as fraturas contidas na formação rochosa. Na Figura 38 está representado o diagrama do processo utilizado no SEF 2.0, o fluido inicia no tanque de preparo e retorna para ele. Estão destacados os principais equipamentos de medição e válvulas que serão explicitados a seguir. O corpo central, que simula a região anular, mede aproximadamente 20 cm de altura e três saídas laterais modulares (canais fraturados). Os canais fraturados simulam as fraturas contidas da formação rochosa, possuem diâmetros internos de 2, 5 e 10 mm. Cada canal possui 50 cm de comprimento que podem ser acoplados, para o presente trabalho utilizou-se cada canal com 1 metro de comprimento, como citado anteriormente. Para melhor visualização um desenho esquemático 3D da unidade está apresentado na Figura 39.

Figura 38. Diagrama de processo da unidade experimental (SEF).

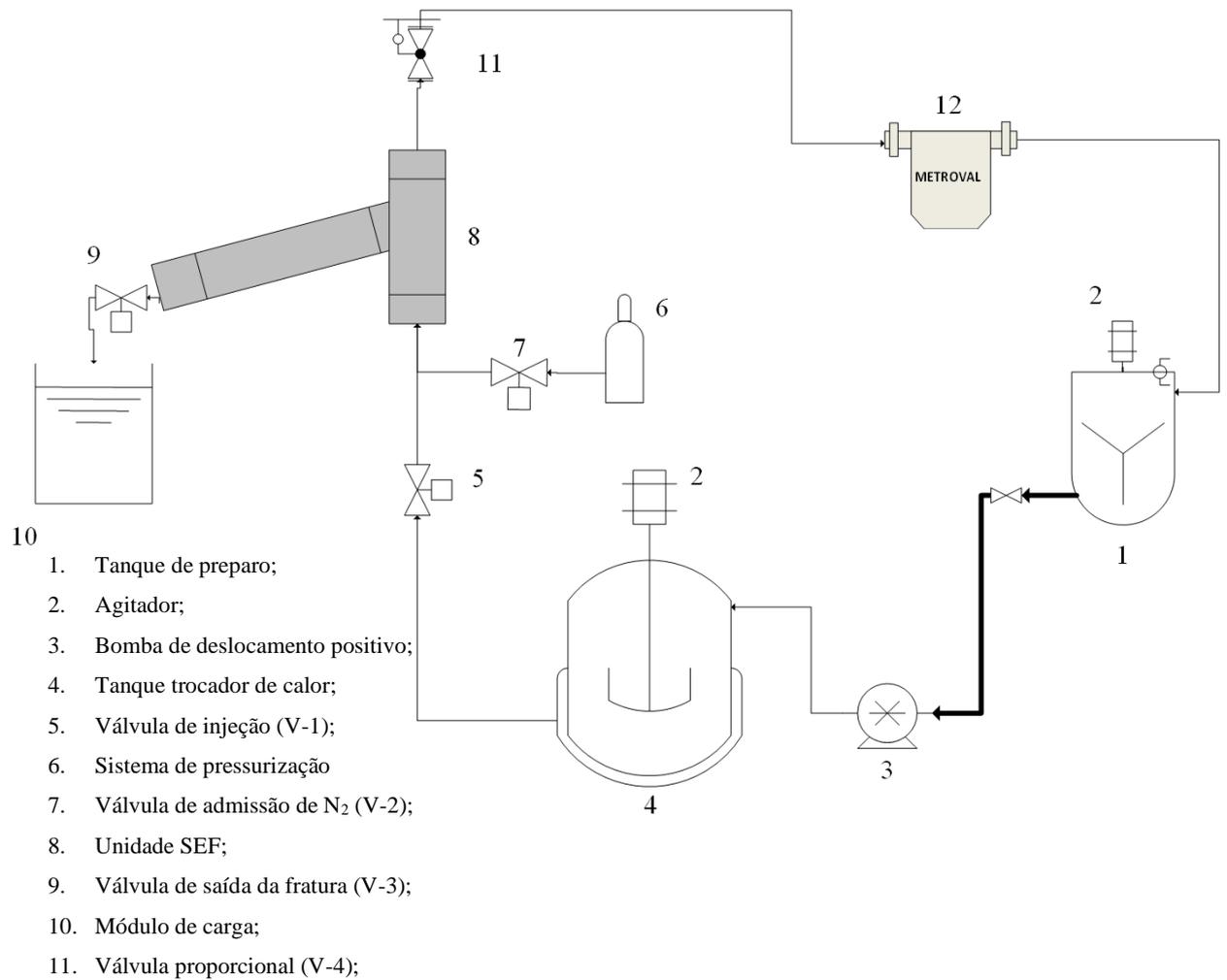
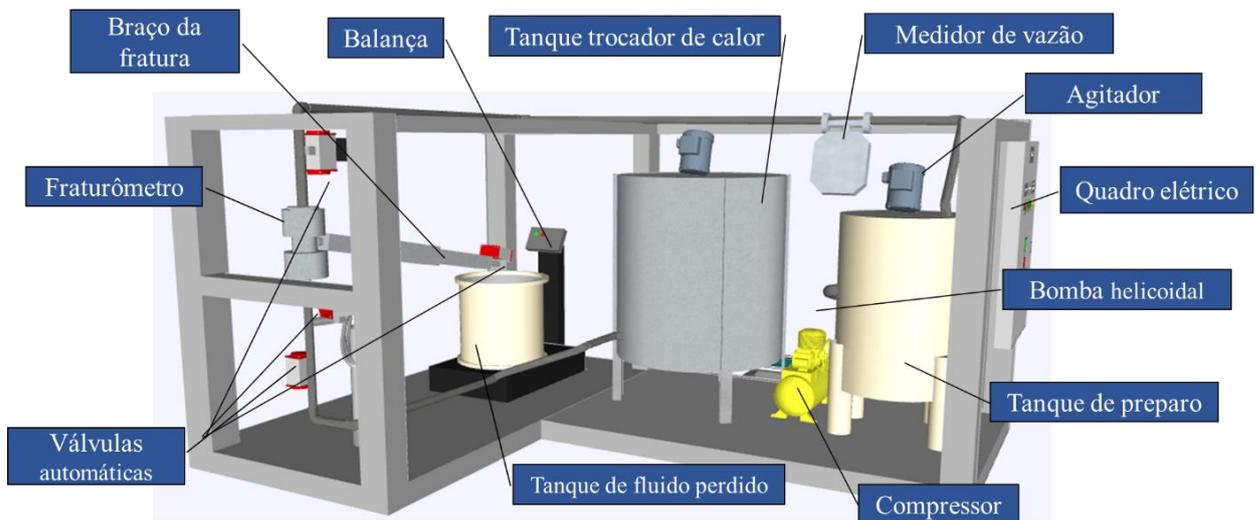


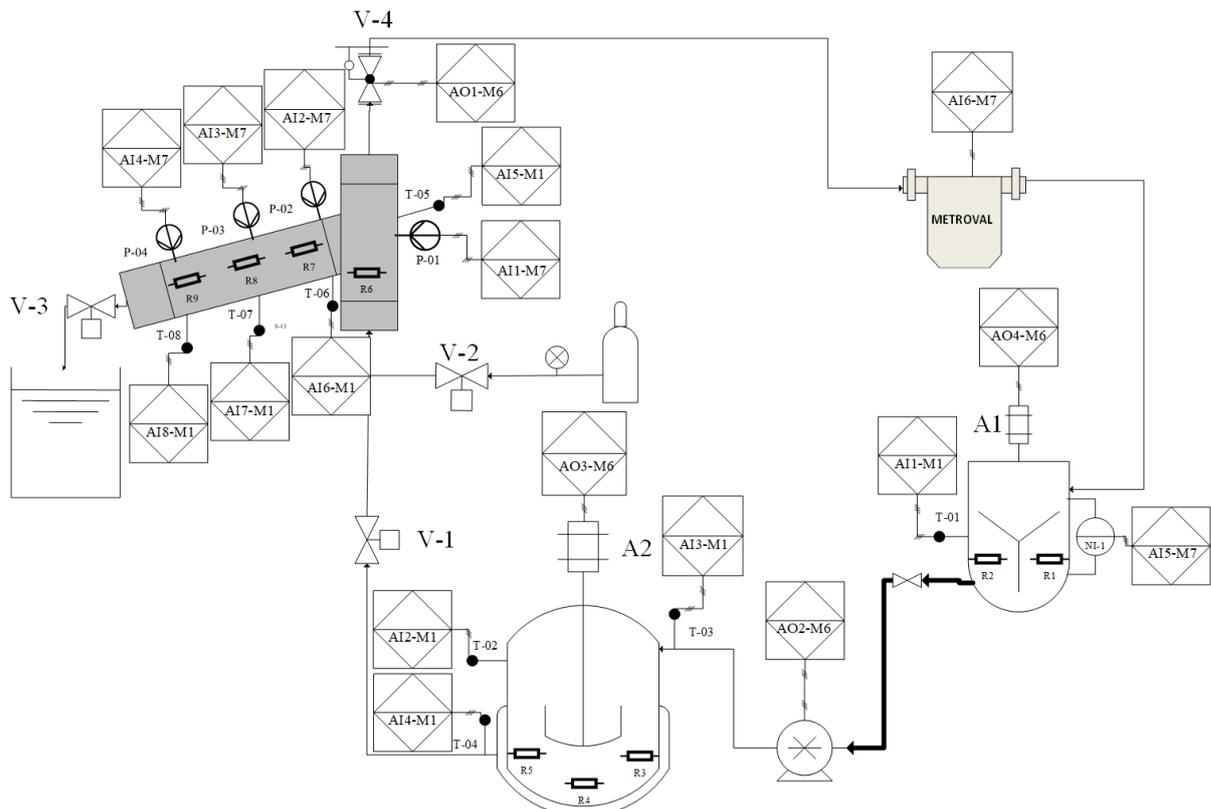
Figura 39. Desenho esquemático 3D da unidade experimental da unidade 2.0.



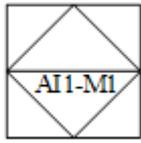
A unidade experimental possui: um tanque de preparo de fluido de 100 litros (1), agitadores (2), uma bomba helicoidal de deslocamento positivo (3), um tanque trocador de calor de 1000 litros (4), sistema de pressurização (6), três válvulas pneumáticas ON/OFF (5, 7 e 9), unidade SEF (8), módulo de carga (10), uma válvula pneumática proporcional (11), medidor de vazão (12), termopares, compressor e transdutores de pressão.

O fluido é misturado no tanque de preparo, onde, o sistema de agitação garante a homogeneização o mesmo. O controle de temperatura é feito através do tanque trocador de calor e das resistências acopladas ao tanque de preparo e a unidade SEF. As válvulas pneumáticas ON/OFF são responsáveis pela admissão de fluido sendo: V-1 (5) admissão do fluido no anular, V-2 (7) admissão de gás nitrogênio nos testes *squeeze* e V-3 (9) abertura de saída da fratura. O controle do fluxo pela linha é feito ajustando a abertura da válvula proporcional V-4 (11) e a rotação da bomba (3). O sistema de bombeio é composto pela bomba de deslocamento positivo, direciona o fluido para o tanque trocador de calor e para a unidade SEF. Após circular pelo *loop* o fluido passa por um medidor de vazão e retorna ao tanque de preparo. A Figura 40 ilustra o diagrama de processo da unidade do SEF 2.0, destacando todos os sensores utilizados.

Figura 40. Diagrama de processos da unidade do SEF 2.0, sensores destacados.



Legenda da simbologia apresentada na Figura 40:



Entrada analógica 1, conectada ao Módulo 1 do CLP.



Saída analógica 1, conectada ao Módulo 6 do CLP.



Sinal analógico elétrico (4-20 mA).

A Figura 41 apresenta imagens da unidade experimental descrita anteriormente. A seguir serão descritos todos os componentes da unidade experimental.

Figura 41. Imagens da unidade experimental.



3.2.2.1 Descrição dos equipamentos e instrumentos

O tanque de preparo utilizado (Figura 42) possui o volume de 100 L composto por uma entrada de 1" para retorno do fluido, duas saídas de 2" na parte inferior, uma para linha de sucção da bomba helicoidal e a outra para descarte do fluido. O tanque possui um sistema de aquecimento composto por duas resistências de 3000 W e um termopar tipo T da marca Contemp para acompanhamento da temperatura. O sistema de agitação do tanque é feito por um agitador mecânico (Figura 42) do fabricante Mixtura Equipamentos Hidráulicos Ltda,

modelo MIX159L, motor Weg, até 2300 rpm de agitação. O nível do tanque é acompanhado por transmissor indicador de nível ultrassônico (Figura 42) da marca Siemens, modelo Sitrans Probe LU 7ML5221-28A11.

Figura 42. (A) Tanque de preparo de fluido e (B) sensor de nível e agitador.



A unidade experimental é equipada com uma bomba helicoidal de deslocamento positivo (Figura 43) da marca Netzsch, motor Sew-Eurodrive (5 HP). A bomba possui uma adaptação interna para suportar circular os fluidos contendo material de combate à perda e é responsável por circular o fluido pelo *loop*.

Figura 43. Bomba helicoidal.



As leituras de pressão da unidade foram realizadas por transdutores de pressão manométricos das marcas SMAR modelo M3 e Yokogawa modelo EJA430E. Foram instalados quatro transdutores de pressão, um no anular para obter a informação da pressão de injeção, três ao longo da fratura para obter o diferencial de pressão nas fraturas. Os transdutores de SMAR foram instalados no início e no final da fratura, para obter o diferencial de pressão pois possuem um range de pressão de -1 a 2,5 bar. Os transdutores da Yokogawa foram instalados

um no anular para obter a pressão de injeção do fluido e um no final da fratura, em paralelo ao transdutor da SMAR, para obter o diferencial de pressão a altas pressões. Os transdutores da Yokogawa possuem uma faixa de pressão de 0-24 bar, com melhores resultados a altas pressões. Na Figura 44 estão apresentados os dois tipos de transdutores utilizados.

Figura 44. (A) Transdutor de pressão da SMAR e (B) transdutor de pressão da Yokogawa.



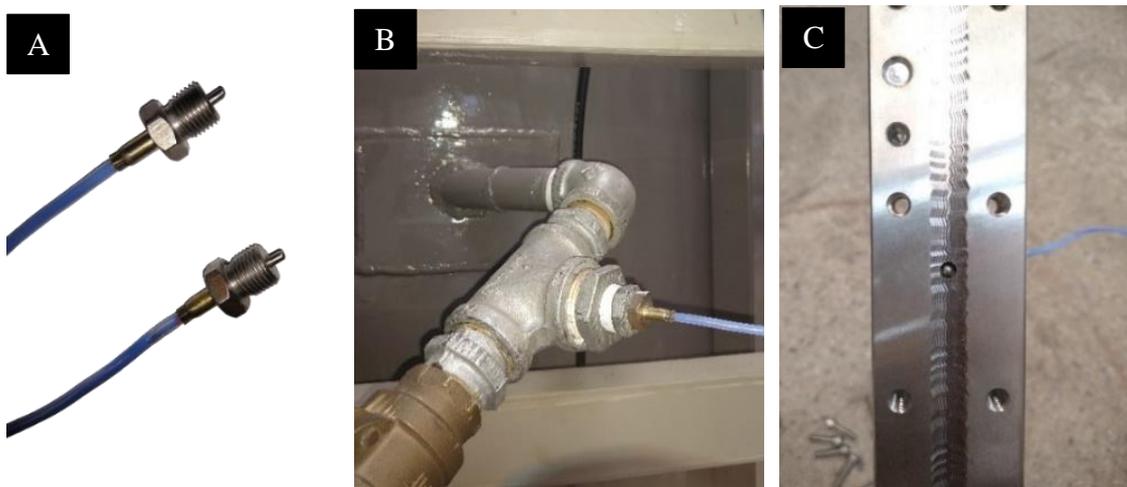
O tanque trocador de calor consiste em um tanque de aço inox com uma serpentina interna, responsável por finalizar o aquecimento do fluido antes de entrar no simulador. Possui três resistências internas de 3000 W e três termopares do tipo T da marca Contemp para acompanhamento da temperatura. Os termopares foram alocados na entrada do tanque trocador de calor, na saída e em contato com o banho. Na Figura 45 pode-se observar um desenho em 3D do tanque e a imagem do mesmo instalado na unidade.

Figura 45. Tanque trocador de calor.



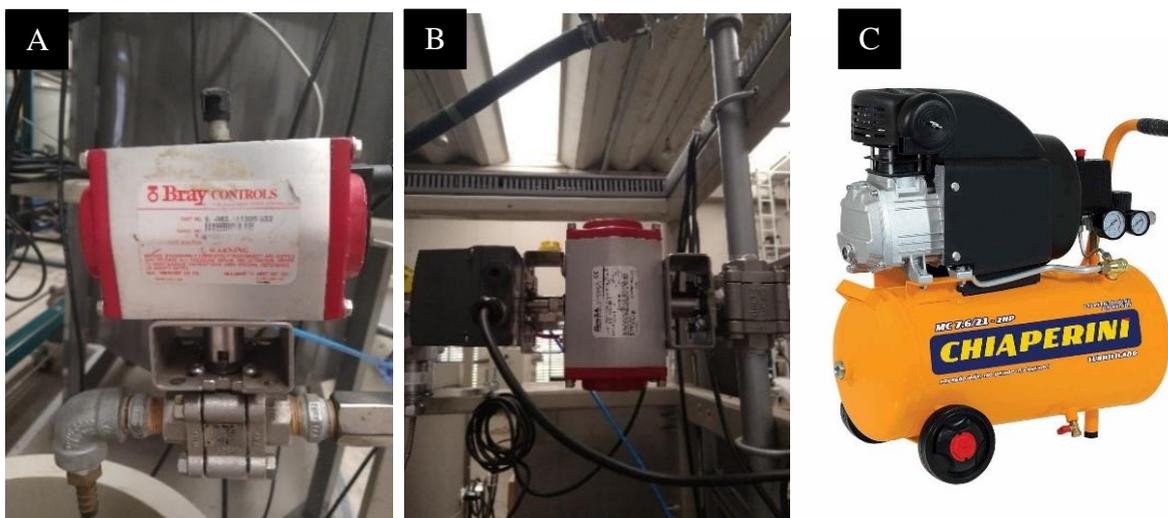
A unidade conta com oito termopares do tipo T da marca Contemp para medir a temperatura dos fluidos nos tanques, na fratura e no anular. Os termopares possuem rosca NPT de 1/4" com 3 mm de espessura e 15 mm de comprimento. Os termopares foram instalados de forma que a estrutura interior fique em contato com o fluido e não interfira no escoamento. A Figura 46.A apresenta as imagens dos termopares. A Figura 46.B o termopar instalado na entrada do tanque trocador de calor e na Figura 46.C a visão interna do termopar instalado na fratura de 5 mm. Como observado, não interfere no escoamento do fluido e na formação dos tampões.

Figura 46. (A) Termopar tipo T para aquisição de temperatura; (B) termopar instalado na unidade; e (C) visão interna do termopar instalado na fratura.



Foram acopladas ao sistema três válvulas automáticas ON/OFF de acionamento pneumático da marca O-Bray Controls (Figura 47.A) e uma válvula proporcional da marca Flow-Tek Automator (Figura 47.B). As válvulas ON/OFF, desempenharam as funções de: injeção do fluido no simulador, abertura da saída da fratura e injeção de nitrogênio no sistema para testes *squeeze*. A válvula proporcional, devido sua configuração, permite o controle de abertura pelo programa desenvolvido para unidade. O controle proporcional da válvula, juntamente com a bomba, foi utilizado para controlar a pressão de injeção no anular. Para o acionamento das válvulas utilizou-se um compressor de ar da marca Chiaperini 21 litros e potência de 2 HP (Figura 47.C).

Figura 47. Válvulas automáticas e compressor. (A) Válvula de abertura da fratura; (B) Válvula proporcional; e (C) compressor de ar.



A medição da vazão foi feita por meio de um medidor de vazão mássico da marca Metroval, modelo RHM 20 instalado na unidade. O equipamento mede o fluxo de massa por efeito Coriolis e possui boa precisão para fluidos de diferentes viscosidades contendo partículas sólidas. A Figura 48 apresenta o medidor de vazão e seu *display*.

Figura 48. Medidor de vazão.



O fluido perdido pela fratura foi recolhido por um tanque de 50 L e aferido por uma balança da marca Digi-Tron® adaptada a módulo de carga. Os dados de volume perdido foram captados pelo programa de aquisição de dados. A Figura 49 mostra a balança e o tanque de fluido perdido.

Figura 49. Balança e tanque de volume perdido pela fratura.



Para realização dos ensaios com elevação significativa de pressão denominados testes *Squeeze*, é utilizado um cilindro de nitrogênio de 20 L e pressão de até 2000 psi. Esses experimentos têm a finalidade de testar a resistência dos tampões formados, definir assim a pressão de ruptura do tampão formado. O cilindro foi acoplado ao simulador por uma válvula de acionamento pneumático ON/OFF e a injeção do gás realizada pelo programa desenvolvido.

3.2.2.2 Aquisição de dados e sistema de controle

O sistema de aquisição de dados em tempo real foi criado no ambiente de programação LabVIEW® da *National Instruments*, permitindo a coleta de dados online, controle remoto dos equipamentos ON/OFF e modular. Os módulos de aquisição utilizados foram da marca *National Instruments*, composto por chassis, fonte de alimentação 24VDC, módulos de entrada e saída analógica, módulo de entrada e saída digital e módulo de comunicação USB. Na Figura 50 está ilustrado o chassi compacto USB de 8 canais utilizado.

Figura 50. Chassi Modular - *National Instruments*.



Fonte: *National Instruments*, (2021).

Para aquisição dos dados de pressão, vazão, volume do tanque (Módulo 7) e temperatura (Módulo 1), foram usados dois módulos de aquisição de entrada analógica com oito canais cada. O Módulo 1 foi o utilizado para os termopares com entradas das termorresistências ou RTD's (*Resistance Temperature Detector*). No Módulo 7, com entrada analógica de 4-20 mA, foram instalados os transdutores de pressão, o sensor de nível e o medidor de vazão. A Figura 51 mostra um módulo de aquisição de dados usado na unidade.

Figura 51. Placa de aquisição de dados (NI-DAQ).



Fonte: *National Instruments*, (2021).

Além dos módulos aquisição, foram introduzidos quatro módulos de saída digitais, com oito canais cada, para ligação dos equipamentos (Módulos 2, 3, 4 e 5). Módulo 6, controlador de saída analógica, foi instalado e alimentado por inversores de frequência da marca WEG modelo CFW500 para controle proporcional da bomba, dois agitadores e a válvula proporcional (V-4). A balança usada possui um circuito eletrônico de comando do próprio fabricante que foi adaptado ao LabVIEW®. Os módulos foram instalados no quadro de comando (Figura 52), junto com as instalações elétricas.

Figura 52. Quadro de comando.

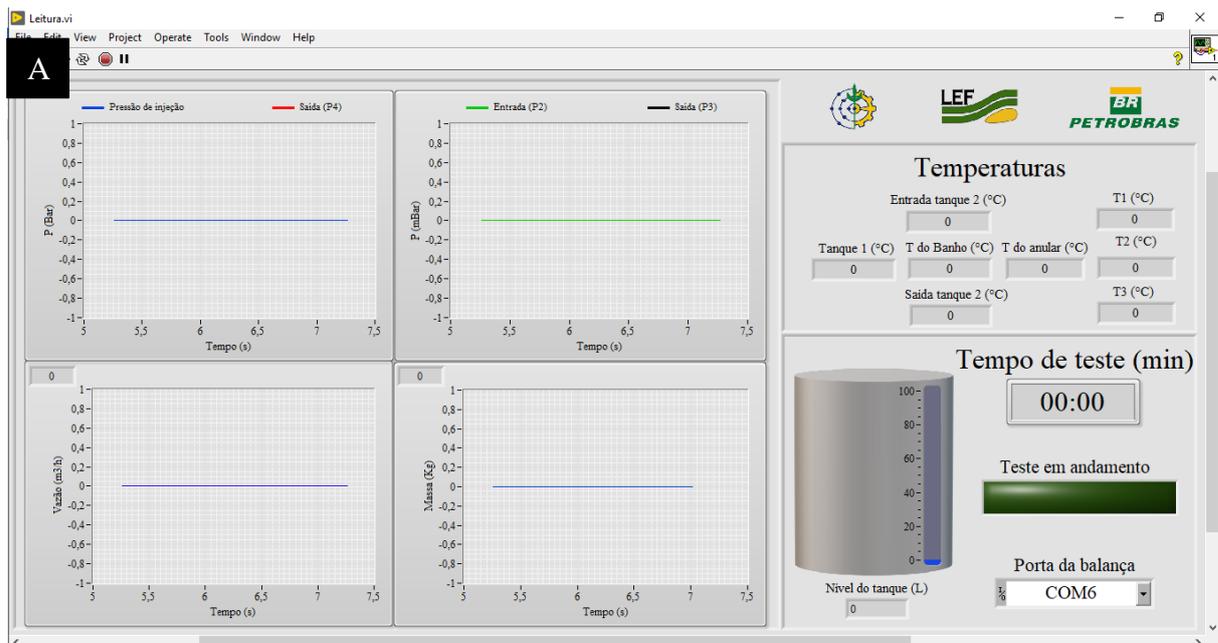


Foi desenvolvido um *software* no ambiente de programação LabVIEW® para visualização e controle dos dados, cuja interface apresenta todos os equipamentos listados. Através do programa é possível a visualização os dados, salvar em tempo real, ligar e desligar os equipamentos e válvulas, controlar alguns equipamentos, definir as condições do teste e escolher o fluido de utilização. O salvamento de dados feito no *software* em tempo real. A comunicação entre o *software* e os módulos de aquisição é feita através de um cabo USB.

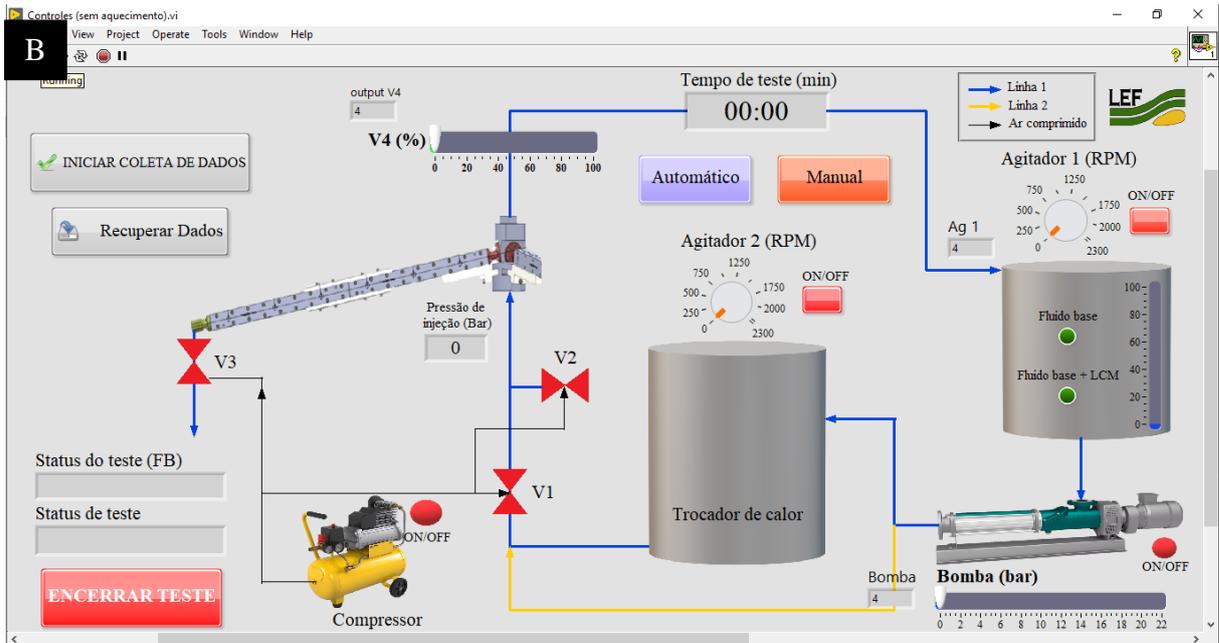
O *software* desenvolvido possui três interfaces que podem ser acompanhadas durante o teste. A primeira é a de leitura (Figura 53.A), onde estão disponíveis os dados de pressão, vazão, temperatura, vazão na fratura e nível do tanque. A segunda é do controle sem aquecimento (Figura 53.B), onde o usuário controla todos os equipamentos e válvulas, com a possibilidade de testes automáticos e manuais, sem o acionamento das resistências. A terceira é do controle com aquecimento (Figura 53.C), definida a temperatura do set-point e as condições do experimento, pode-se acompanhar o aquecimento e acionamento das resistências.

Figura 53. Interfaces do software com as abas de: (A) leitura; (B) sem aquecimento; e (C) com aquecimento.

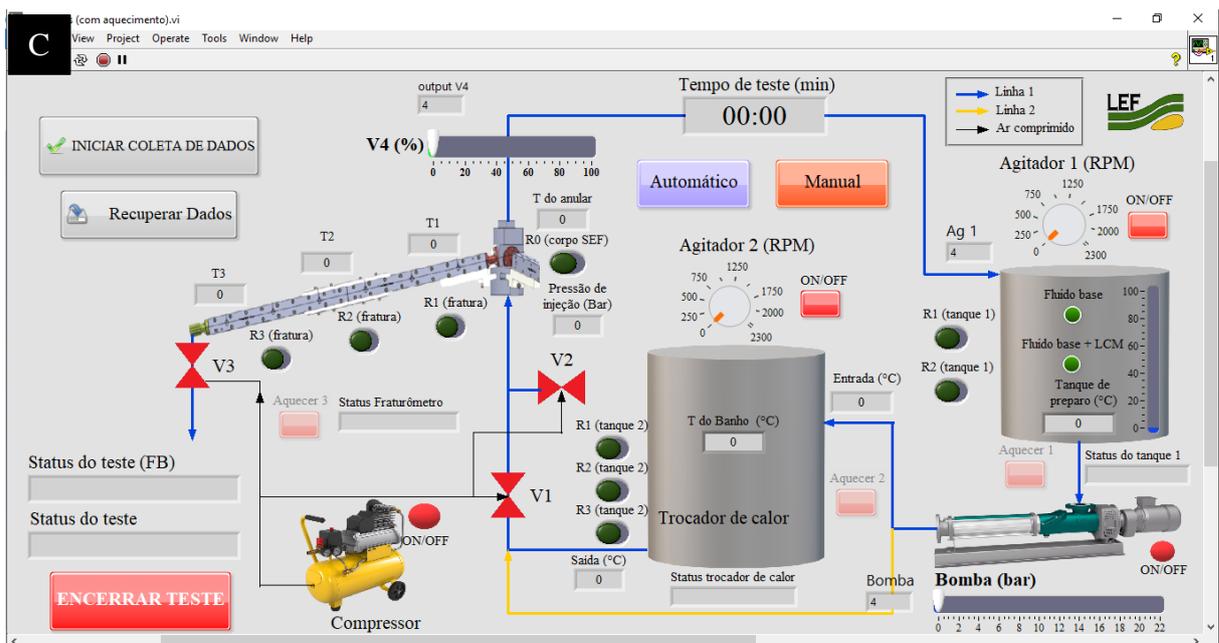
Aba de leitura



Teste sem aquecimento



Aba de teste com aquecimento



3.3 PLANEJAMENTO E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.3.1 Planejamento experimental

No presente trabalho, foi investigado o efeito da pressão, da temperatura e da concentração e composição de materiais de combate à perda, na selamento de fendas e na dinâmica da filtração. Foram utilizados fluidos à base de água contendo LCM fibroso e granular e viscosificados com goma xantana. Para tal, foram elaborados dois planejamentos fatoriais completos 3^3 com triplicatas no ponto central, pois o mesmo planejamento experimental foi usado para os ensaios de filtração. Foram executados 30 ensaios de selamento para cada material. Ao total foram realizados 180 ensaios, sendo eles 90 de ensaios de selamento de fenda e 90 ensaios de filtração.

A concentração de goma xantana usada foi de 2 lb/bbl, por ser uma formulação padrão da indústria de perfuração de poços. As temperaturas escolhidas para os experimentos foram 25, 50 e 75 °C, são condições semelhantes às encontradas no poço de perfuração. Os intervalos de pressão selecionados, apresentados na Tabela 3, foram pontos equidistantes do valor de pressão definido pelo teste API, 500 psi (API 13B-1, 2003).

A injeção de partículas sólidas em excesso no poço impacta as paredes e desgastam os equipamentos (WANG *et al.*, 2009). Atualmente, nos estudos referentes à materiais de combate à perda de circulação, uma crescente é a utilização de materiais e fluidos mais eficiente. São exemplos: polímeros, misturas entre materiais convencionais e a utilização de materiais puramente viscosos. Devido a esta tendência, definiu -se pelas concentrações 10, 20 e 30 lb/bbl para os dois LCMs estudados. A Tabela 3 apresenta os fatores de níveis avaliados.

Tabela 3. Fatores e níveis avaliados no presente trabalho para o LCM fibroso e para o LCM granular.

Níveis	P (psi)	T (°C)	Concentração (lb/bbl)
-1	300	25	10
0	500	50	20
+1	700	75	30

Além dos materiais selecionados forma desenvolvidos três *blends* visando uma resposta mais eficiente de selamento de fraturas. Mantendo-se a concentração de 30 lb/bbl foram selecionadas três composições de *blend*. Foram identificadas pela composição de LCM granular presente em 25% de LCM granular + 75% de LCM fibroso (*blend* 1), 50% de LCM

granular/LCM fibroso (*blend 2*) e 75% de LCM granular + 25% de LCM fibroso (*blend 3*), como citado anteriormente. A Tabela 4 apresenta os fatores e níveis avaliados. As misturas formadas também foram testadas sob as condições citadas anteriormente, para os ensaios de selamento e para os ensaios de filtração. As identificações dos *blends* foram tratadas como variáveis quantitativas para construção do planejamento experimental das misturas.

Tabela 4. Fatores e níveis avaliados no presente trabalho para os *blends*.

Níveis	P (psi)	T (°C)	Identificação
-1	300	25	<i>Blend 1</i>
0	500	50	<i>Blend 2</i>
+1	700	75	<i>Blend 3</i>

Admitiu-se que os dados obtidos na triplicata seguem a distribuição normal, o que foi comprovado posteriormente. Os melhores resultados obtidos na bancada foram testados nos simuladores.

3.3.2 Preparo dos fluidos: célula HTHP

Para a preparação dos fluidos foi pesado 2,85 g de Goma xantana e solubilizado em 500 mL de água destilada sobre agitação mecânica no agitador Hamilton Beach-Fann®, sob agitação de 16000 rpm por 15 minutos. Em seguida, o fluido formado foi mantido em repouso por 24 horas, para hidratação completa da goma xantana. Ao fim das 24 horas, agitou-se o fluido base com o LCM (nas quantidades 14,2; 28,5 e 42,8 g referente as concentrações das suspensões utilizadas) por 20 minutos sob agitação constante de 16000 rpm.

3.3.3 Ensaios de selamento de fenda e filtração: Célula HTHP

Foram realizadas duas metodologias de testes na célula HTHP os ensaios de selamento de fenda, usando um *slot* de 2 mm de abertura e os ensaios de filtração. Os ensaios de selamento de fenda objetivaram analisar a influência da temperatura, pressão e concentração na efetividade de selamento dos materiais, estaticamente. Os ensaios de filtração objetivaram analisar o comportamento do fluido mediante um meio filtrante, visto que, o uso de LCMs nos fluidos de perfuração influenciam na formação da torta nas paredes do poço.

A metodologia dos dois testes é muito semelhante, são diferenciadas apenas no início, pois para os ensaios de selamento é utilizada a fenda e para os ensaios de filtração o papel de

filtro. Antes de iniciar o teste necessita-se preparar a célula de filtração para receber a suspensão. Posicionou-se o anel de vedação e o *slot* para o teste de selamento de fenda ou o papel de filtro para o teste de filtração. Fecha-se a célula de filtração com o base inferior e a válvula, mantendo-a fechada. Após o preparo da suspensão, preencheu-se a célula de filtração HTHP até 1,5 cm da borda. A seguir, a base superior da célula foi fixada, mantendo-se a válvula aberta.

Para os ensaios a alta temperatura em que foi necessário o aquecimento, a célula com a suspensão foi mantida em aquecimento de 30 a 60 minutos dependendo da suspensão. Observou-se que os materiais possuíam tempos diferentes de aquecimento. A temperatura foi aferida antes do início do teste e retirou-se uma alíquota para os testes de reologia.

Já na estrutura, acoplou-se a válvula de alívio à base superior no topo da célula. Conectou-se a mangueira de alimentação do gás nitrogênio. Após a conexão, abriu-se completamente a válvula do cilindro de N₂, e em seguida abriu-se gradativamente a válvula reguladora do ramal até alcançar a pressão de teste desejada. A válvula do cilindro permaneceu aberta durante todo o teste, para que não houvesse queda de pressão na linha durante o teste.

Posteriormente, a válvula inferior foi aberta iniciando-se o teste de selamento ou filtração. Os dados de volume de filtrado e tempo de filtração foram registrados ao longo de 30 minutos, com intervalos regulares de 60 segundos. Os dados de volume de fluido perdido pela fenda foram registrados ao longo de 10 minutos, com intervalos regulares de 60 segundos.

Após o fim do teste, a válvula inferior e a válvula do cilindro de N₂ foram fechadas. Em seguida, permitiu-se a depressurização da linha após a abertura da válvula de alívio conectada no base superior. Fechou-se completamente a válvula reguladora e desengatou a mangueira e a válvula de alívio da base superior da célula. Removeu-se a célula do suporte, seguiu para o esvaziamento e descarte da suspensão que restou. Nos ensaios de filtração a torta formada foi recolhida e analisada. Nos ensaios de selamento o *slot* passou por uma análise visual da estrutura do tampão formado.

3.3.4 Preparo dos fluidos: SEF

Para a preparação dos fluidos para o SEF foi adicionado 343 g de goma xantana em 60 L de água para preparação fluido base com 2 lb/bbl. O fluido foi mantido sob agitação de 1300 rpm por 30 minutos. Em seguida, permaneceu em repouso por 24 horas, para devida hidratação

da goma xantana. Após o prazo de 24 horas, adicionou-se o peso 5,1 kg de LCM necessário para alcançar a concentração de 30 lb/bbl e foi mantido sob agitação de 2000 rpm por 30 minutos.

3.3.5 Experimentos no simulador de escoamento em fratura (SEF)

3.3.5.1 SEF 1.0

Os testes no SEF 1.0 objetivaram avaliar a eficiência das suspensões contendo os LCM's em selar as fraturas existentes no simulador. Devido sua estrutura, foi possível analisar visualmente a formação dos tampões e assim identificar o mecanismo de formação desses tampões.

Após o preparo do fluido base, a válvula de saída do tanque de preparo foi aberta. Em seguida, ligou-se a bomba de deslocamento positivo pelo *software* e circulou-se o fluido base na unidade por 2 minutos. Posteriormente, abriu-se as válvulas de saída da fratura para o preenchimento com goma xantana. A seguir, fechou-se as válvulas, desligou-se a bomba, fechou-se a válvula de saída do tanque de preparo e iniciou-se o preparo da suspensão com LCM.

A etapa seguinte consistiu na adição do LCM ao fluido base para o preparo da suspensão de teste. Após o preparo da suspensão, a válvula de saída do tanque de preparo foi aberta. Pelo *software* acionou-se a bomba de deslocamento positivo e forneceu-se ao *software* as condições de circulação: tempo de circulação de 5 minutos, pressão de teste de aproximadamente 50 psi e temperatura ambiente. Os dados obtidos para os testes no SEF 1.0 foram: volume de fluido perdido, diferencial de pressão, vazão de volumétrica no anular e vazão volumétrica na fratura.

3.3.5.2 SEF 2.0

Devido a configuração do *software* desenvolvido, o usuário fornece as condições de teste no início, são elas: velocidade de agitação (RPM), tempo de agitação (min), pressão (psi), temperatura (°C), tempo de circulação (min) e tempo de abertura da válvula V-3 (min). Os testes no SEF 2.0 foram realizados a pressão de 100 psi, nas temperaturas de 25 e 50°C. como dito anteriormente, o simulador permite alcançar pressões e temperaturas superiores às do SEF 1.0.

O teste consistiu no preparo do fluido base, seguido pela circulação do fluido base na unidade por 2 minutos e preenchimento da fratura, através da abertura da válvula de saída da

fratura (V-3). Finalizada a etapa com o fluido base, adicionou-se a quantidade de LCM necessária para o teste. O tempo de agitação foi de 30 min e velocidade de rotação de 2000 RPM. Após o preparo, a válvula de saída do tanque de preparo foi aberta e a bomba de deslocamento positivo ligada. A suspensão circulou na unidade por 5 minutos, até alcançar a pressão de teste de 100 psi. Nos testes com aquecimento, a suspensão circulou na unidade até alcançar a temperatura de teste 50°C.

Posteriormente, a válvula de saída da fratura (V-3) foi aberta para dar início ao teste de selamento. O tempo de abertura da válvula de saída foi de 5 minutos. Ao fim do teste, a válvula V-3 foi fechada e posteriormente a circulação. Em casos de selamento, realizou-se teste de elevação súbita de pressão, testes *squeeze*, para analisar se houve formação efetiva de tampão.

3.4 MODELAGEM ESTATÍSTICA E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

O comportamento do fluido, acrescido aos materiais de combate à perda, durante os cenários de perda de circulação, assim como a influência dos fatores pressão e temperatura não são facilmente encontrados na literatura. O presente trabalho propõe um modelo de predição estatística, utilizando o planejamento fatorial citado na Seção 3.3.1, para analisar os dados obtidos nos testes de selamento de fenda e de filtração. O modelo foi construído usando o *software* comercial *Statistica 7.0*, criado pela *Statsoft*.

Com o modelo foi possível analisar quanto cada fator é estatisticamente relevante, qual variável tem maior influência nos resultados e traçar faixas de operação ótimas para os LCM's e os *blends* testados. No presente trabalho, foi utilizado o planejamento 3 fatores e 3 níveis (3³). Segundo Montgomery e Calado (2003), o modelo de regressão para de planejamento com três fatores é dado pela Equação (31). Escalonando, aplicando os 3 níveis e a parte quadrática temos a Equação (32). Onde, pode-se observar a média quadrática, a efeito de cada fator isolado e da interação entre os fatores.

$$y_{ijk} = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j} \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon_{ijk} \quad (31)$$

$$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \end{cases}$$

Onde,

i, j e k – Níveis de experimentação = 3;

β_0 – Média das somas quadráticas;

τ_i, β_j e γ_k – Fatores.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \dots + \varepsilon \quad (32)$$

Para analisar numericamente o modelo proposto foi necessário analisar a qualidade do ajuste. As somas quadráticas, Equações 33 a 35, foram necessárias para analisar a variância e criar a tabela ANOVA. A Equação (32) mostra, como exemplo, o modelo preditivo para um fator β . A análise do p-valor, também foi utilizada para determinar os valores estatisticamente relevantes que comporiam o modelo. O p-valor é a probabilidade de se obter um valor de estatística amostral, em que esteja dentro da região de aceitação da hipótese nula. Os p-valores dos fatores ou interações abaixo de 0,05 são considerados com termos com significância estatística elevada. Em contrapartida os p-valores acima de 0,05 devem ser analisados pois podem ser marginalmente significativos ou não ter significância estatística para o modelo.

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk}^2 - \frac{y_{ttt}^2}{abc} \quad (33)$$

$$SQ_\beta = \frac{1}{bc} \sum_{i=1}^a y_{itt}^2 - \frac{y_{ttt}^2}{abc} \quad (34)$$

$$SQ_{\beta\tau} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ijt}^2 - \frac{y_{ttt}^2}{abc} - SQ_\beta - SQ_\tau \quad (35)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados referentes:

- À caracterização dos materiais de combate à perda;
- Os resultados experimentais dos ensaios de perda de fluido e filtração em bancada;
- Os resultados experimentais dos ensaios nos Simuladores de Escoamento em Fraturas (SEF 1.0 e SEF 2.0);
- Os resultados de predição dos modelos, considerando o efeito da temperatura, pressão e concentração dos LCM's;
- Os resultados do acompanhamento do selamento de fratura pelo diâmetro hidráulico, usando o modelo de Borges Filho (2018), citado anteriormente.

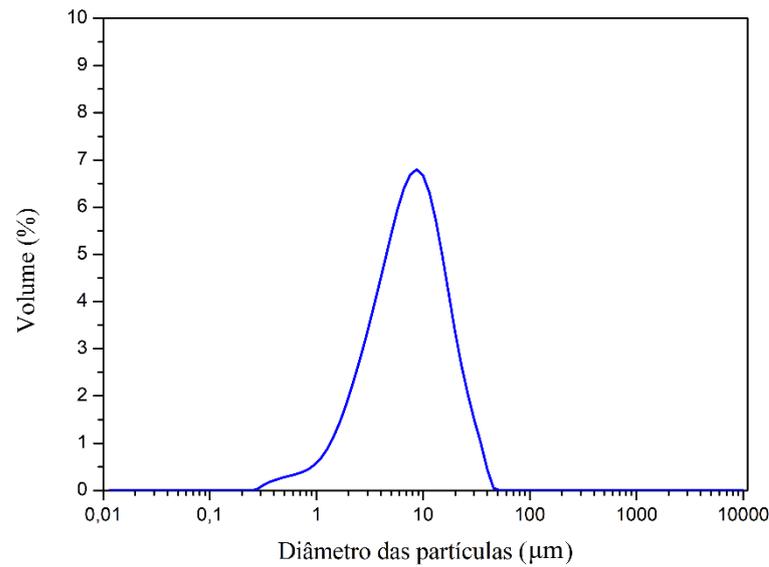
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS TESTADOS

Como citado anteriormente, os materiais de combate à perda e as suspensões utilizadas foram analisados em diferentes testes de caracterização: tamanho de partícula, picnometria dos sólidos, reologia dos fluidos e densidade dos fluidos.

4.1.1 Caracterização do tamanho das partículas

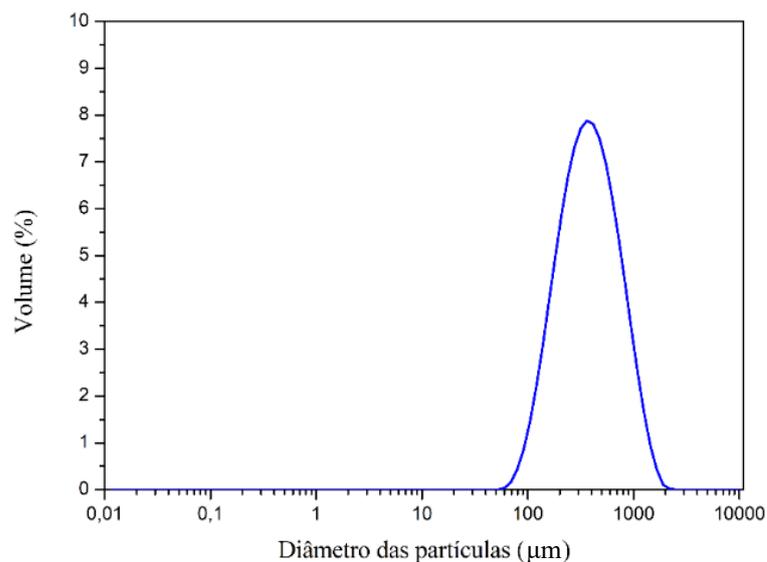
A determinação da distribuição de tamanhos de partículas do LCM fibroso e do LCM granular foi realizada no analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000, citado na Seção 3.1.1.3, pela técnica de espalhamento de luz. A distribuição no tamanho de partícula é um fator de suma importância na efetividade do selamento das fraturas.

A distribuição volumétrica de tamanhos do LCM granular está ilustrada na Figura 54. Os valores dos diâmetros característicos do material estão apresentados na Tabela 5. O $d(0,9)$ é o diâmetro máximo de 90% das partículas presentes na amostra, como visto na tabela, ele apresentou o valor de 18 μm . Como observado, a distribuição granulométrica é bimodal, que influencia no tempo de cura da fratura. Os materiais granulares, geralmente, apresentam ampla faixa de distribuição granulométrica.

Figura 54. Distribuição volumétrica de tamanho de partícula para o LCM granular.**Tabela 5.** Diâmetros característicos das partículas do LCM granular.

Diâmetros característicos	
d (0,1)	2,05 µm
d (0,5)	6,93 µm
d (0,9)	18,06 µm
D _{3,2} (Sauter)	4,11 µm
D _{4,3}	8,76 µm

A distribuição volumétrica de tamanhos do LCM fibroso utilizado está apresentado na Figura 55. Os valores dos diâmetros característicos do material estão apresentados na Tabela 6. Como observado, a distribuição granulométrica é modal. O material fibroso possui tamanho de partículas superior ao material granular escolhido. Nota-se que 90% das partículas do total da distribuição granulométrica estão acima de 800 µm, devido a composição do LCM ser de fibra mineral. Os dois materiais possuem distribuições granulométricas distintas que influenciam no selamento das fraturas. As distribuições granulométricas tão diferentes contribuíram na efetividade das misturas formadas pelo dois LCM's.

Figura 55. Distribuição volumétrica de tamanho de partícula para o LCM fibroso.**Tabela 6.** Diâmetros característicos das partículas do LCM fibroso.

Diâmetros característicos	
d (0,1)	147,45 µm
d (0,5)	346,21 µm
d (0,9)	804,60 µm
D _{3,2} (Sauter)	281,54 µm
D _{4,3}	421,48 µm

4.1.2 Densidade dos sólidos

As densidades dos sólidos utilizados, descrito na Seção 3.1.1.2, foram obtidas pelo método da picnometria a gás. Os resultados obtidos na picnometria, para o LCM fibroso e o LCM granular, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Dados de densidade dos sólidos.

LCM	Densidade do material (g/cm³)
LCM granular	1,522 ± 0,001
LCM fibroso	2,84 ± 0,02

4.1.3 Densidade dos fluidos

A densidade do fluido foi aferida utilizando balança de lama da FANN[®], como citado na Seção 3.1.2.2. A Tabela 8 apresenta as densidades médias dos fluidos testados em bancada e nos simuladores de escoamento em fratura.

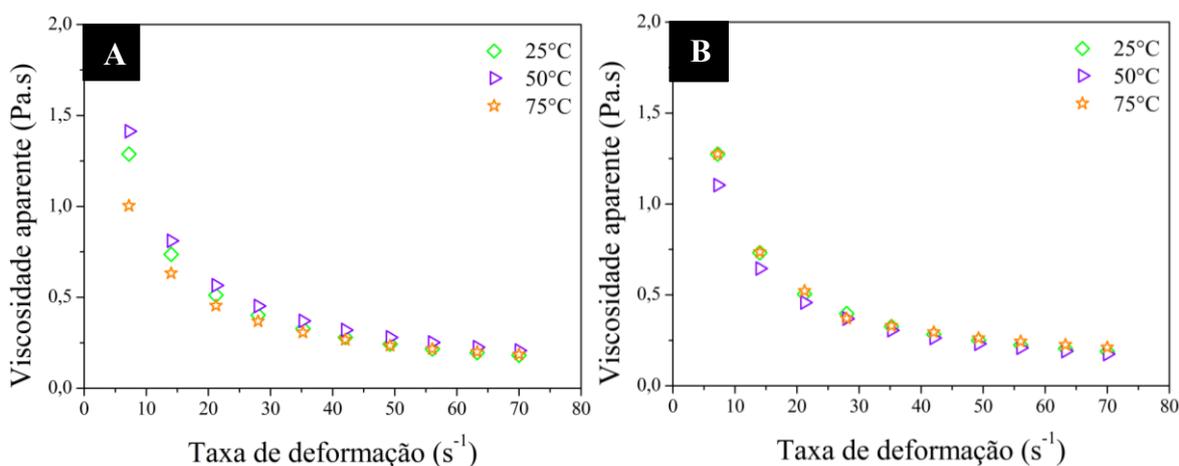
Tabela 8. Dados de densidade dos fluidos.

LCM	Densidade do fluido (g/cm ³) ± 0,01
LCM granular	1,01
LCM fibroso	1,04

4.1.4 Reologia dos fluidos

As Figura 56, 57 e 58 apresentam os resultados das curvas de viscosidade aparente para as suspensões água/goma xantana 2 lb/bbl e as seguintes concentrações de LCM: suspensões contendo o LCM granular (10, 20 e 30 lb/bbl), LCM fibroso (10, 20 e 30 lb/bbl), *Blend 1*, *Blend 2* e *Blend 3*. Os experimentos foram realizados em diferentes temperaturas: 25 °C, 50 °C e 75°C. As temperaturas estão representadas pelos diferentes símbolos nas figuras. Os LCM's e os *Blends* apresentaram comportamentos diferentes mediante a alteração de temperatura e concentração. As curvas de fluxo para todos os materiais e sob as condições testadas no presente trabalho estão apresentadas no Apêndice A.

Figura 56. Curvas de viscosidade aparente das suspensões do LCM granular nas concentrações (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.



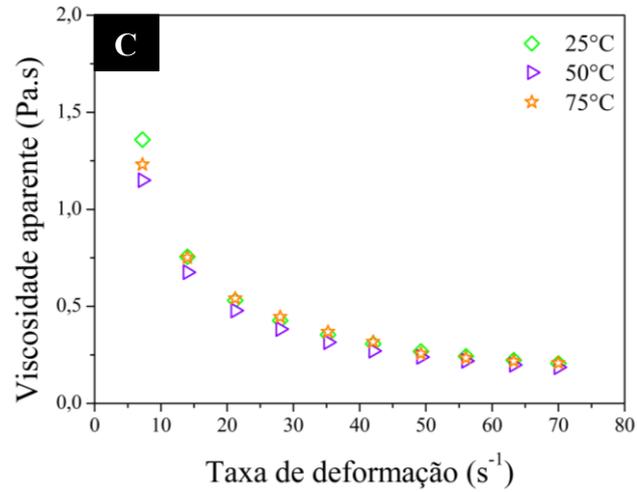


Figura 57. Curvas de viscosidade aparente das suspensões do LCM fibroso nas concentrações (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.

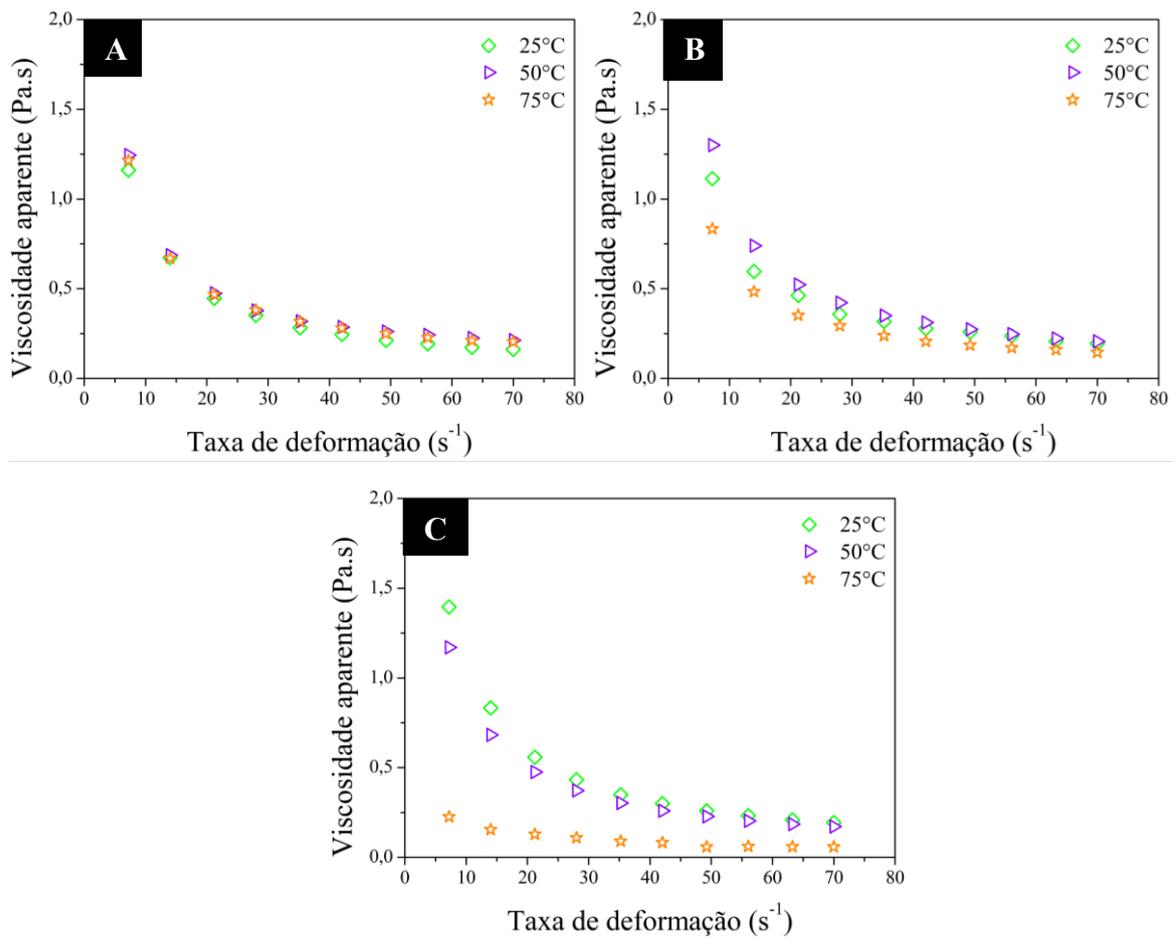
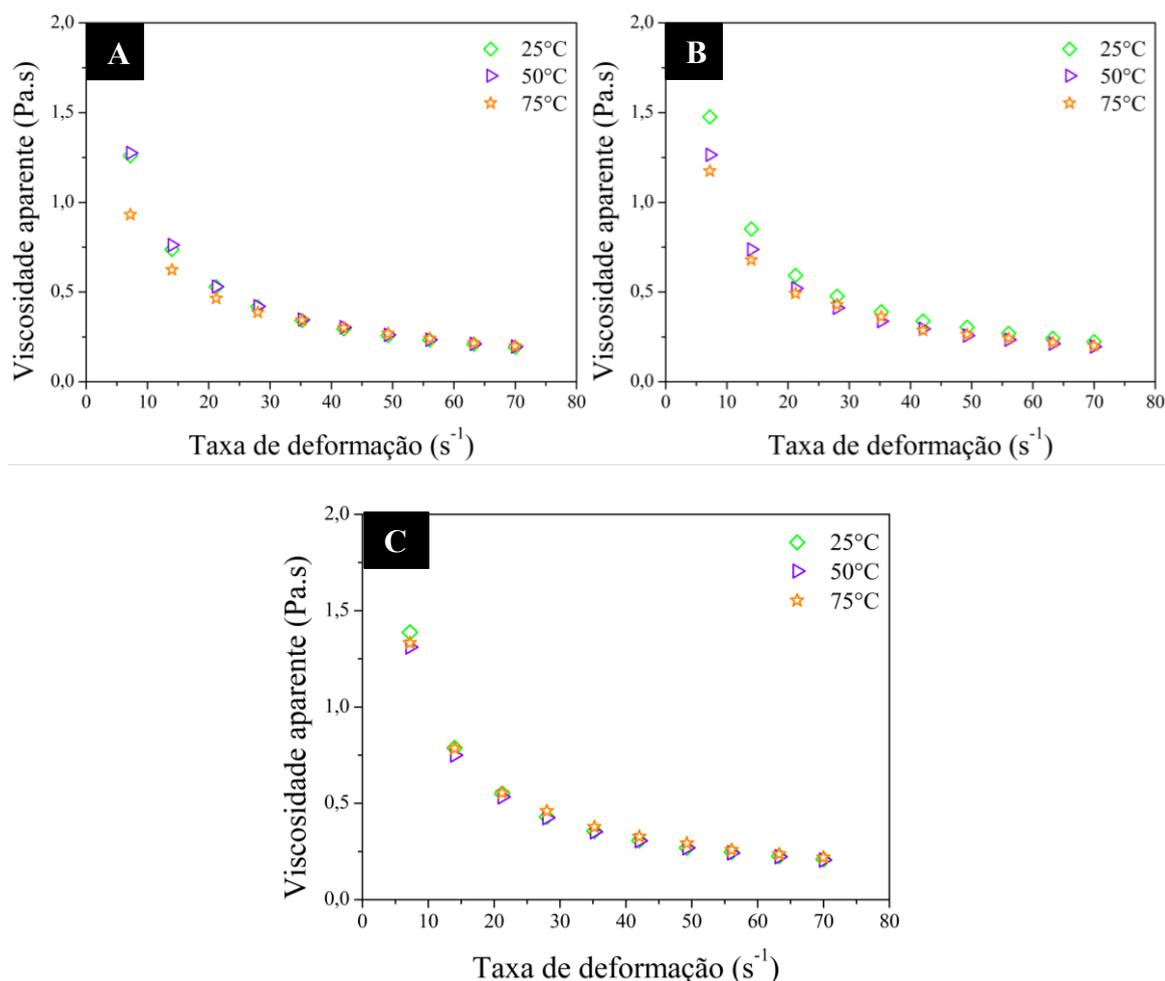


Figura 58. Curvas de viscosidade aparente das suspensões dos *Blends* nas composições: (A) *Blend* 1 (75% LCM fibroso e 25% LCM granular), (B) *Blend* 2 (50% LCM fibroso/LCM granular) e (C) *Blend* 3 (25% LCM fibroso e 75% LCM granular).



Observa-se que, em todas as concentrações e temperaturas analisadas houve redução da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação. Dessa forma, todos os fluidos testados podem ser caracterizados como fluidos Não-Newtonianos pseudoplásticos (CLASEN & KULICKE, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2021). O uso da solução de goma xantana como fluido base associada aos LCMs promove tal comportamento, que está vinculado ao desatamento e a reorientação das cadeias poliméricas presentes na solução na direção do escoamento.

Em relação a concentração de sólidos, observou-se que o aumento da variável promoveu aumento da tensão cisalhante, em temperatura e taxa de cisalhamento fixas. Entretanto, para o LCM fibroso na temperatura de 75 °C, observou-se uma inversão, quanto maior a concentração de sólidos menor a tensão cisalhante. Tal fenômeno, ocorreu devido a elevação da temperatura acima dos melhores pontos de operação do LCM, causando assim a degradação do material. A

temperatura afeta de forma significativa a solução base (goma xantana + água), efeito bem conhecido na literatura e, conseqüentemente, foi observado nos resultados obtidos.

Todos os fluidos testados apresentaram comportamento não-Newtoniano pseudoplástico sem tensão limite de escoamento. Os dados foram ajustados pelo Modelo da Potência (*Power-Law*), descrito na Seção 2.3.2. As figuras estão contidas no Apêndice B e apresentam os dados experimentais e ajuste pelo modelo *Power-Law* para os LCM's e os *Blends* testados. A Tabela 9 apresenta os parâmetros reológicos índice de comportamento (n), índice de consistência (k) do modelo com seus respectivos desvios padrão (σ_n e σ_k), a temperatura e os coeficientes de correlação. Todos os fluidos preparados apresentaram coeficientes de correlação acima de 0,90, indicando que o modelo *Power-Law* se ajustou de forma eficiente.

Tabela 9. Condições de teste e parâmetros do modelo reológico *Power-Law*.

Tipo	Concentração (lb/bbl)	Temperatura (°C) $\pm 0,5$	n	σ_n	k (Pa.s ⁿ)	σ_k	R ²		
LCM granular	10	25	0,120	0,002	7,46	0,07	0,99		
	20		0,178	0,007	6,12	0,16	0,99		
	30		0,179	0,007	6,58	0,15	0,99		
		10	50	0,194	0,006	6,52	0,15	0,99	
		20		0,251	0,003	4,24	0,05	0,99	
		30		0,197	0,006	5,53	0,13	0,99	
			10	75	0,256	0,006	4,37	0,09	0,99
			20		0,30	0,04	3,78	0,57	0,90
			30		0,22	0,02	5,30	0,42	0,96
LCM fibroso	10	25	0,13	0,01	6,41	0,26	0,91		
	20		0,18	0,01	5,98	0,30	0,97		
	30		0,17	0,01	6,51	0,38	0,97		
		10	50	0,149	0,002	6,55	0,01	0,99	
		20		0,183	0,001	6,39	0,02	0,99	
		30		0,216	0,004	4,85	0,08	0,99	
			10	75	0,19	0,01	5,87	0,21	0,98
			20		0,15	0,02	4,86	0,39	0,90
			30		0,30	0,02	1,01	0,09	0,97
Misturas	<i>Blend 1</i>	25	0,180	0,008	6,39	0,14	0,98		
	<i>Blend 2</i>		0,198	0,006	7,10	0,10	0,99		
	<i>Blend 3</i>		0,188	0,001	6,53	0,01	0,99		
		<i>Blend 1</i>	50	0,24	0,01	5,10	0,34	0,97	
		<i>Blend 2</i>		0,25	0,01	4,77	0,22	0,98	
		<i>Blend 3</i>		0,178	0,007	6,64	0,10	0,97	
			<i>Blend 1</i>	75	0,32	0,01	3,59	0,13	0,99
			<i>Blend 2</i>		0,26	0,01	4,59	0,19	0,98
			<i>Blend 3</i>		0,27	0,01	4,89	0,19	0,99

4.2 EXPERIMENTOS NA CÉLULA HTHP

Os ensaios de selamento de fenda e de filtração foram realizados na unidade experimental citada na seção 3.2.1. As análises de resultados obtidos para o volume de fluido perdido e o volume de filtrado foram realizadas no *software Statistica 7.0*. Nas próximas seções, serão apresentados os resultados obtidos, as observações experimentais e a modelagem estatística. As tabelas com todos os volumes encontrados para os ensaios de filtração e selamento de fenda estão, respectivamente, nos Apêndices C e D.

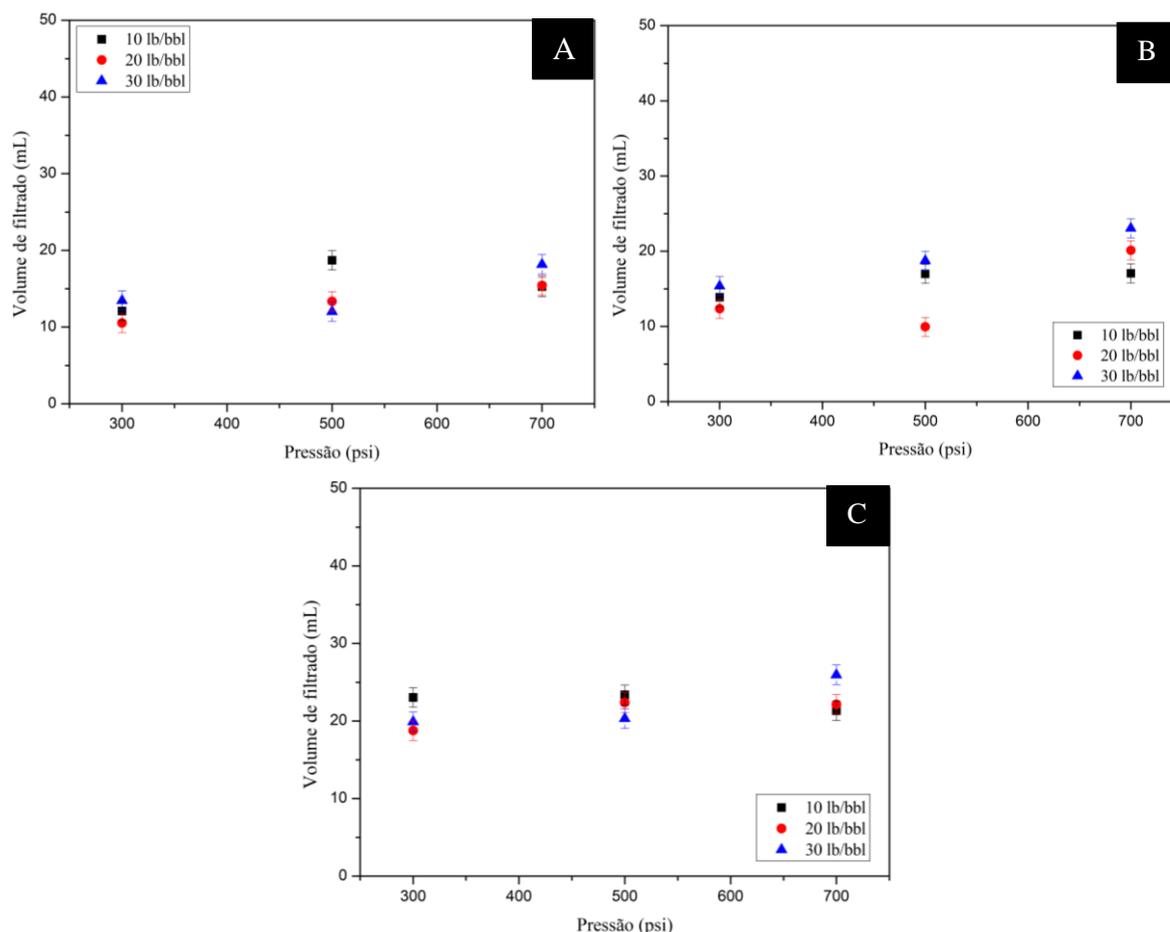
4.2.1 Experimentos de filtração

Os ensaios de filtração a alta pressão e alta temperatura foram executados a fim de analisar o comportamento das suspensões contendo os LCMs e os *Blends* mediante a um meio filtrante. As pressões, temperaturas e concentrações selecionadas, citadas anteriormente na Seção 3.3.1, foram as mesmas dos ensaios de selamento de fenda. A escolha das condições operacionais visou submeter os fluidos a condições semelhantes às encontradas no poço de perfuração. Os resultados observados contribuíram para avaliar os materiais como redutores de filtrado e ajudar na caracterização desses materiais. A tabela com todos os resultados de volume final de filtrado encontra-se no Apêndice C.

4.2.1.1 Teste de filtração: LCM granular

Na Figura 59 estão apresentados os resultados para os ensaios de filtração a alta pressão e alta temperatura na célula HTHP da marca Ofite. O eixo y representa o volume final de filtrado coletado após do teste de filtração. O eixo x representa as pressões de teste selecionadas, que foram 300, 500 e 700 psi. As Figura 59.A, 59.B e 59.C identificam as temperaturas de teste, que foram 25 °C, 50 °C e 75 °C. A concentração foi o fator que menos influenciou o volume de filtrado para o LCM granular. Analisando os gráficos, por vezes as barras de erro do ponto experimental se sobrepuseram, identificando que naquele ponto a variação da concentração não foi significativa.

Figura 59. Efeito da pressão e concentração no volume de filtrado final do LCM granular, nas temperaturas de (A) 25 °C, (B) 50 °C e (C) 75 °C.



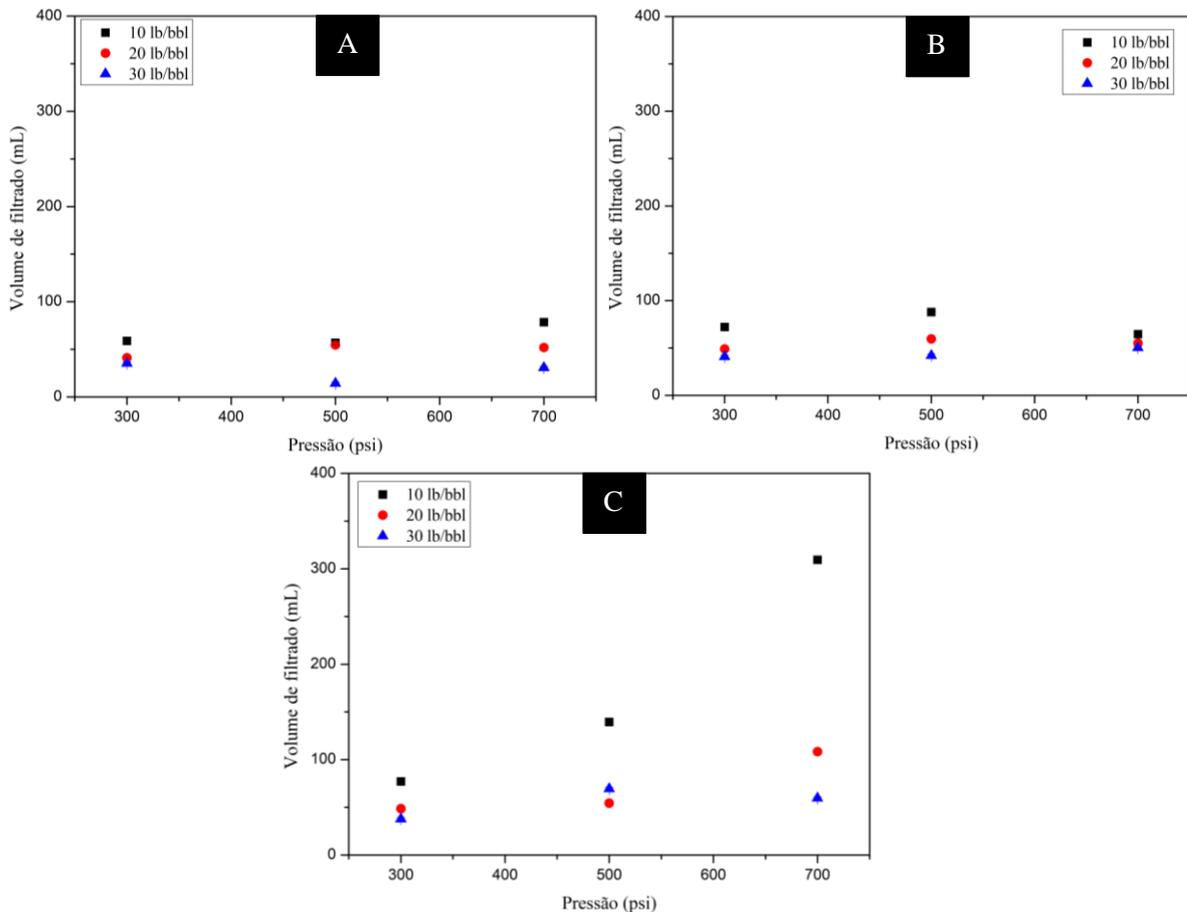
O comportamento esperado era que ao aumentarmos a concentração do material particulado em suspensão de goma xantana, o volume de filtrado reduzisse, considerando pressão e temperatura constante. No entanto, em alguns pontos esse comportamento não ocorreu devido a estrutura do material e a variabilidade na formação da torta de filtração. Observou-se que o efeito da temperatura, para as suspensões preparadas, foi significativo. Ao elevar a temperatura de teste, como resposta obteve-se aumento no volume de filtrado. O efeito é explicado devido a influência da temperatura no fluido base. Presume-se que a elevação da temperatura reduz as interações poliméricas do polímero usado como fluido base, gerando a diminuição da viscosidade aparente do fluido.

Analisando o efeito da pressão, como esperado, observou-se que a elevação da pressão ocasionou aumento do volume de filtrado. Esse fenômeno pode ser explicado pelo aumento da compressibilidade do tampão formado e eliminação de fluido.

4.2.1.2 Teste de filtração: LCM fibroso

Os resultados encontrados para o LCM fibroso estão apresentados na Figura 60. Onde, eixo y representa o volume final de filtrado coletado após do teste de filtração. O eixo x representa as pressões de teste utilizadas, que foram de 300, 500 e 700 psi. As Figura 60.A, 60.B e 60.C identificam as temperaturas de teste, que foram 25 °C, 50 °C e 75 °C. O comportamento dos resultados do LCM fibroso, frente a variação de pressão e de concentração, foi semelhante ao comportamento do LCM granular. Os materiais diferiram no volume final de filtrado. Os volumes encontrados para o LCM fibroso foram em torno de 100 mL, superiores aos encontrados para o LCM granular que foram em torno de 20 mL de fluido.

Figura 60. Efeito da pressão e concentração no volume de filtrado final do LCM fibroso, nas temperaturas de (A) 25 °C, (B) 50 °C e (C) 75 °C.



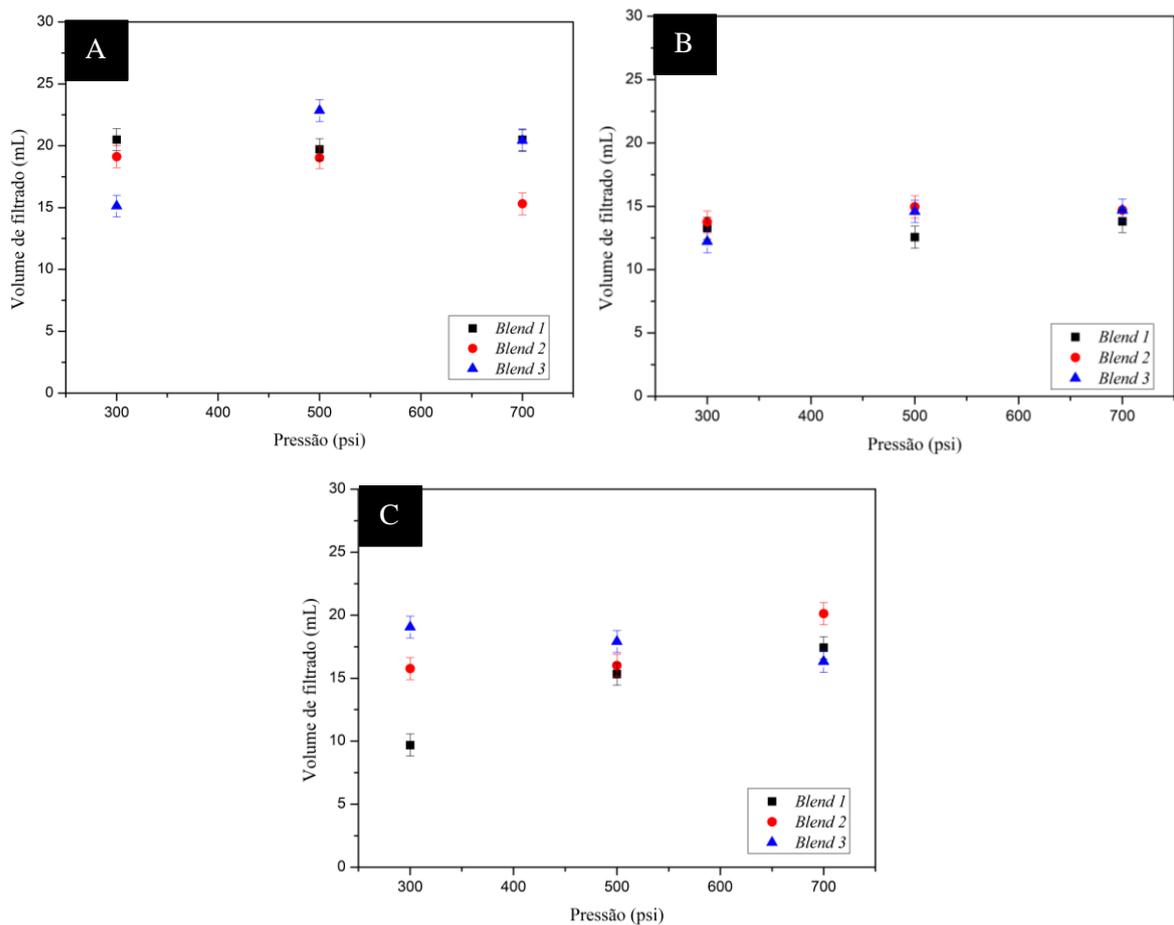
Os resultados estão atrelados a estrutura do LCM fibroso, observou-se que o material absorve, significativamente, a água presente no meio. O efeito do aumento pressão da torta formada foi maior para o LCM fibroso, devido as altas pressões de teste empregadas, resultando assim no aumento do volume de filtrado. Kumar *et al.* (2011), também encontraram dificuldade

no selamento das fendas propostas e atrelaram o fenômeno ao diferencial de pressão aplicado e a estrutura das fibras.

4.2.1.3 Teste de filtração: *Blends*

Os resultados do comportamento dos *Blend* estão apresentados na Figura 61. Os resultados do efeito da pressão e temperatura para os *Blends* foram semelhantes aos encontrados nos LCMs puros. Os volumes finais de filtrado para as misturas foram menores que os volumes encontrados nos LCM granular e LCM fibroso. O aumento da efetividade na redução de filtrado foi alcançada com as misturas produzidas. Observou-se a redução de até 90% de filtrado, comparando o maior valor encontrado para os LCM puros com o maior valor de volume perdido para os *Blends*. O comportamento ocorreu devido a ação dos dois mecanismos distintos dos materiais de base para as misturas. Na indústria de petróleo é comum a utilização de *blends* de materiais de combate à perda de circulação para aumentar a eficiência dos materiais. As fibras têm sido uma opção amplamente utilizada na indústria de petróleo para conferir resistência aos materiais (KUMAR *et al.*, 2011).

Figura 61. Efeito da pressão e concentração no volume de filtrado final dos *Blends*, nas temperaturas de (A) 25 °C, (B) 50 °C e (C) 75 °C.



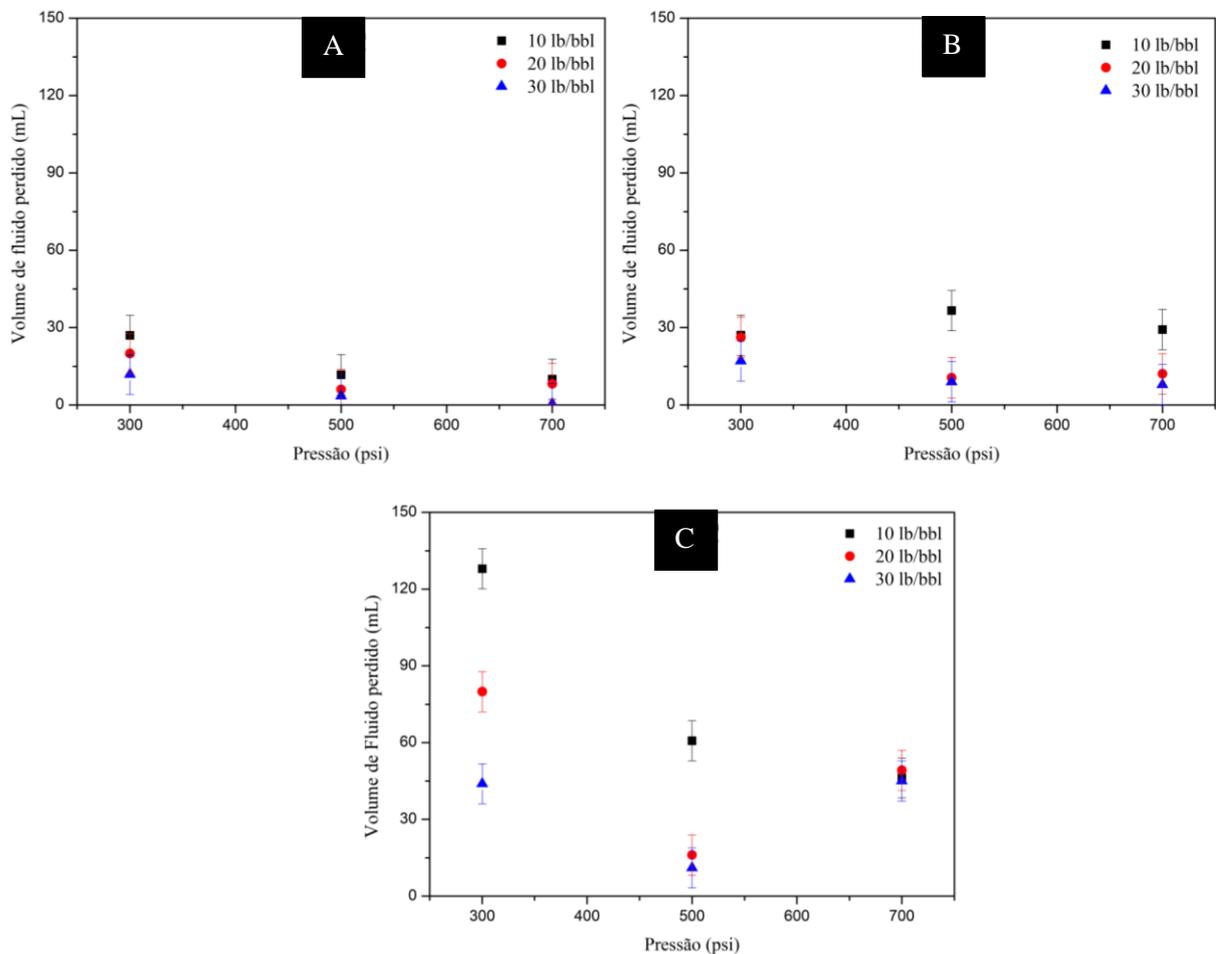
4.2.2 Ensaios de selamento de fenda

Os ensaios de selamento de fenda foram realizados na unidade experimental citada na seção 3.2.1, célula HTHP usando um *slot* de fenda de 2 mm. Os testes objetivaram analisar a eficiência e os mecanismo de selamento responsáveis pela formação dos tampões. Variando os valores de: temperatura, concentração, pressão e composição de mistura. A tabela com todos os resultados de volume de fluido perdido para fenda consta no Apêndice D.

4.2.2.1 LCM granular

A Figura 62 apresenta o efeito do diferencial de pressão e da temperatura no volume final de fluido perdido para as suspensões de 10 lb/bbl, 20 lb/bbl e 30 lb/bbl, e temperatura de 25 °C, 50 °C e 75 °C respectivamente.

Figura 62. Efeito da pressão e concentração no volume de fluido perdido para fratura do LCM granular, nas temperaturas de (A) 25 °C, (B) 50 °C e (C) 75 °C.

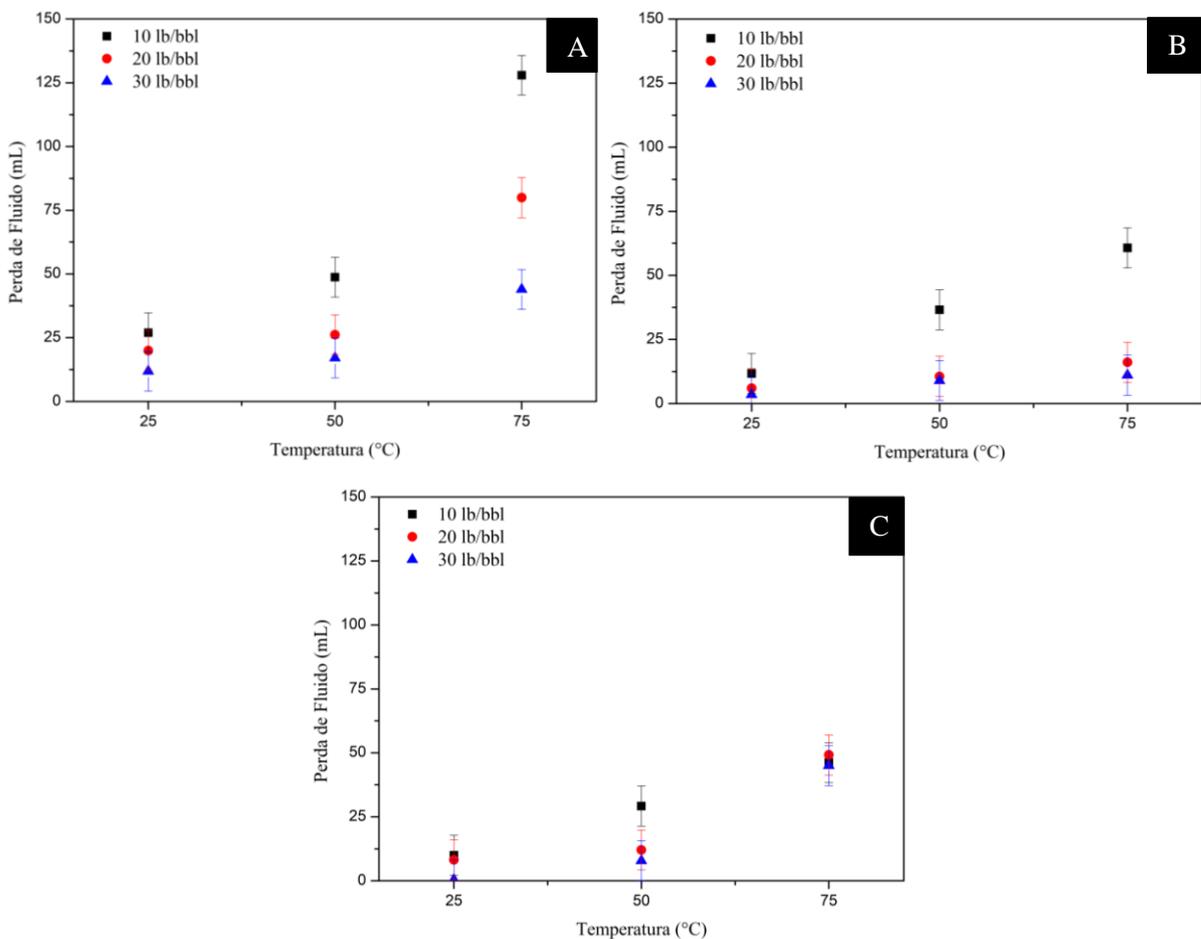


Foi observado, experimentalmente, que o aumento da pressão promoveu diminuição no volume de fluido perdido. A variável pressão tem grande influência no processo de selamento das fraturas. A pressão é a força que direciona as partículas para o interior das fraturas e

promove o selamento. Limitada até a pressão de ruptura do tampão formado (COOK *et al.*, 2012).

O efeito da elevação da temperatura associada à pressão foi pronunciado para o LCM granular. A Figura 63 apresenta os dados de volume final fixando a pressão, para analisar o efeito da temperatura no volume final de fluido perdido. O aumento da temperatura contribuiu para o aumento no volume de fluido perdido pela fratura. Como observado anteriormente na Figura 62, para elevadas pressões e temperaturas as suspensões contendo o LCM granular obtiveram volume maior. O aumento da temperatura contribuiu para diminuição da viscosidade aparente, observado na Figura 63 ocasionando aumento no volume perdido. Interessante salientar que, analisando o comportamento do LCM granular à 75°C, observou-se redução significativa no volume de fluido perdido nos testes à 700 psi.

Figura 63. Efeito da temperatura no volume de fluido perdido para fratura do LCM granular, nas pressões de (A) 300 psi, (B) 500 psi e (C) 700 psi.



Analisando a interação da suspensão com particulado e a pressão, o esperado seria que a elevação da pressão promovesse aumento no volume de fluido perdido para fratura. Todavia, o observado foi a redução do volume de fluido com a elevação da pressão. Esse fenômeno ocorreu devido a composição granular e a distribuição granulométrica do LCM que contribuíram na formação do tampão. O mecanismo de preenchimento, explicitado na Seção 2.4.4, foi observado durante a finalização dos ensaios de selamento de fenda. Na Figura 64 está apresentada o *slot* após um teste de selamento, pode-se observar a deposição do material na fenda.

Figura 64. *Slot* contendo LCM granular após o teste de selamento de fenda. Condições: 20 lb/bbl, 500 psi e 50°C.



Analisando os resultados obtidos, ficou evidente que a alteração da concentração em temperaturas abaixo de 50°C, não promove diferença significativa no volume de fluido perdido. Entretanto, a altas temperaturas a concentração tem grande influência no volume final.

A abordagem estatística, apresentada na seção 3.4, foi utilizada para analisar os dados obtidos experimentalmente. A Tabela 10 apresenta os valores da estimativa de efeito no modelo escolhido para todos os fatores. Quanto maior o valor absoluto do efeito maior é a sua influência no volume final. Os sinais de negativo (-) e positivo (+) indicam se a influência do efeito, os negativos diminuem o volume de fluido perdido e os positivos aumentam. As letras L e Q indicam, respectivamente, o termo linear do fator e o termo quadrático do fator no modelo.

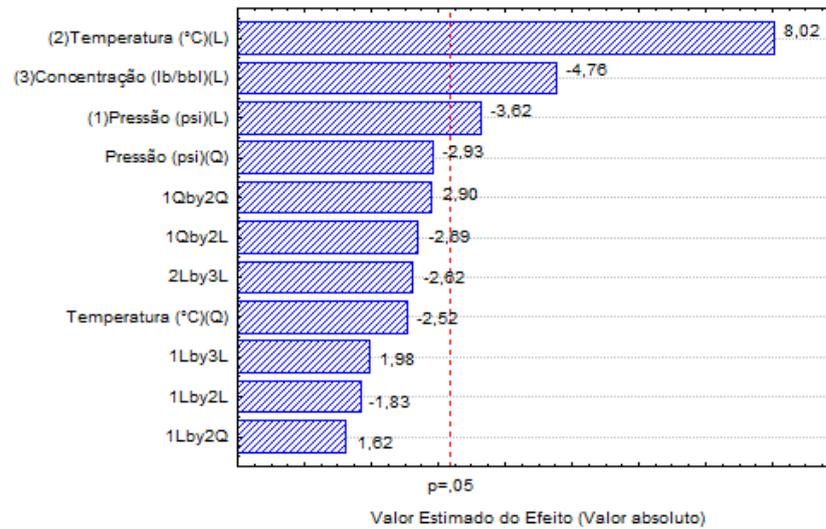
Tabela 10. Estimativa de efeitos e suas interações com o volume de fluido perdido para o LCM granular.

Parâmetros	Efeitos	Desvio Padrão	p-valor
Pressão (L)	-19,1811	0,7996	0,0360
Pressão (Q)	-12,6600	0,0008	0,0608
Temperatura (L)	42,4000	8,2313	0,0040
Temperatura (Q)	-10,9150	0,0812	0,0854
Concentração (L)	-25,1989	1,0693	0,0175
Pressão (L) e Temperatura (L)	-11,8767	0,0350	0,1638
Pressão (L) e Temperatura (Q)	9,1133	0,0003	0,2024
Pressão (Q) e Temperatura (L)	-15,1250	0,0000	0,0738
Pressão (Q) e Temperatura (Q)	12,4575	0,0000	0,0620
Pressão (L) e Concentração (L)	12,8500	0,0016	0,1413
Temperatura (L) e Concentração (L)	-16,9933	0,0129	0,0786

A Figura 65 mostra o diagrama de Pareto, uma forma de avaliar o efeito de cada fator de forma visual. A magnitude dos efeitos está representada pelo tamanho da barra horizontal e a linha do p-valor de 0,05 está representada em vermelho. Os fatores que passam da linha do p-valor são estatisticamente relevantes com nível de confiança de 95%. Já os fatores que não ultrapassam a linha, neste caso, são os fatores marginalmente relevantes. Ao lado de cada barra horizontal temos os valores de t, que são os valores das variáveis normalizadas, obtidos através da divisão do valor do efeito pelo desvio padrão de cada fator ou interação entre fatores.

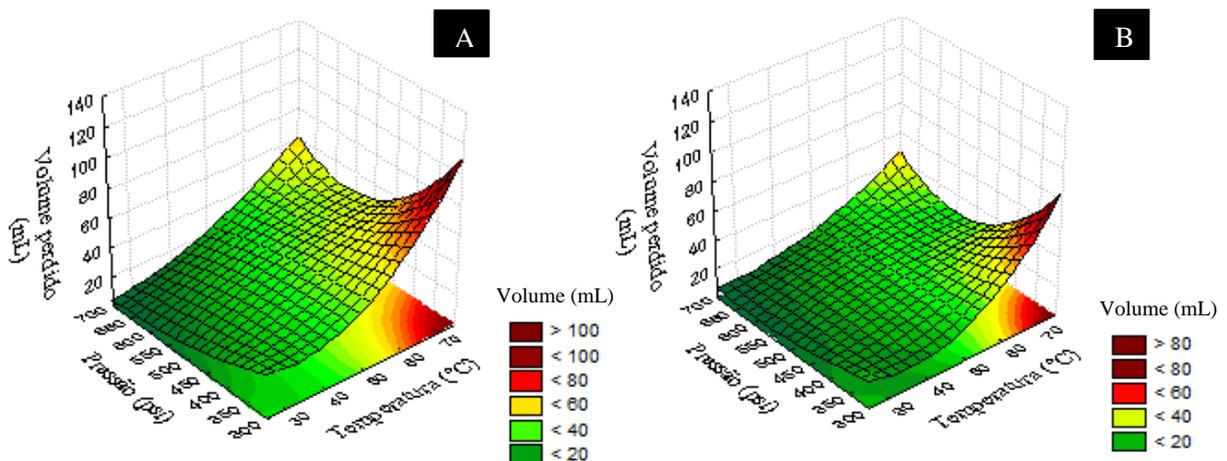
Baseado na observação da Figura 65, temos que para o LCM granular a temperatura e concentração são os fatores que mais influenciam na perda de circulação. Baseado nos resultados, quanto maior o termo linear da temperatura, maior o volume fluido perdido. Em contrapartida, para termo linear da concentração, quanto maior a concentração menor é o valor da variável de resposta, neste caso o volume de fluido. O resultado corrobora o esperado, quanto maior a temperatura menor é a viscosidade aparente do fluido, foi visto que a variação da temperatura tem muita influência sobre o LCM granular (MUSAED & FATTAH, 2019).

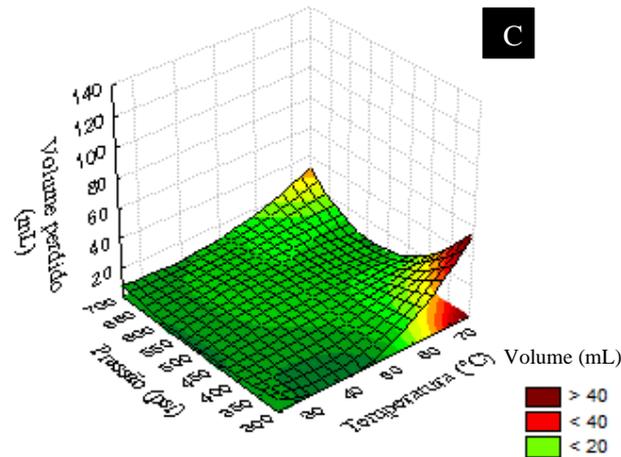
Figura 65. Diagrama de Pareto construído a partir da tabela ANOVA, análise da significância dos fatores e suas interações do LCM granular. Nível de significância de 5% e $R^2 = 0,895$.



A Figura 66 apresenta o efeito combinado da pressão e temperatura para as concentrações de 10, 20 e 30 lb/bbl. A superfície de resposta demonstra o modelo criado a partir dos resultados obtidos em bancada. Prevê os melhores pontos de operação e os pontos de atenção. A partir disso, pode-se criar, analisar e superestimar cenários de perda de fluido. Auxiliando na agilidade de detecção de falhas e na escolha do material a ser utilizado.

Figura 66. Efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para as suspensões contendo LCM granular (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.



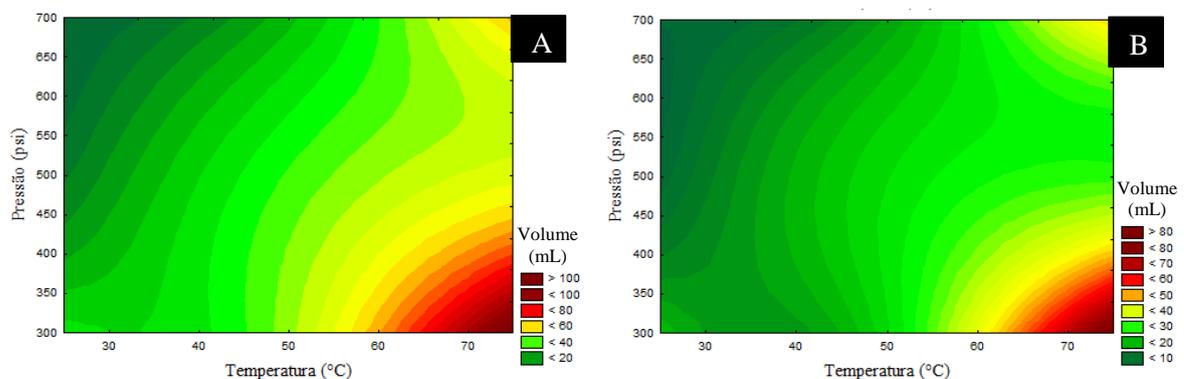


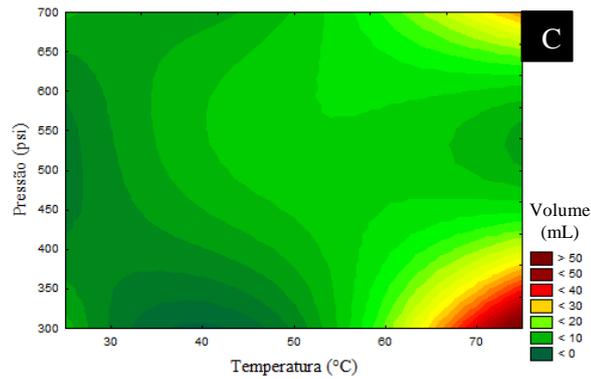
Os melhores desempenhos do LCM granular estudado foram observados na concentração de 30 lb/bbl. Os gráficos de contorno fornecem uma visão bidimensional da superfície de resposta, estão apresentados na Figura 68. As variáveis temperatura e pressão estão representadas nos eixos x e y, respectivamente, e as cores o volume de fluido perdido pela fenda. Na coloração verde escura, pode-se observar mais claramente os melhores pontos de operação, onde o modelo previu os menores volumes de fluido perdido. Na Equação (36) temos o modelo que descreve os efeitos dos fatores nas variáveis originais.

$$Y = 481,536 - 1,844 P + 0,0016 P^2 - 22,149 T + 0,276 T^2 - 1,166 C + \quad (36)$$

$$+ 0,090 P * T - 0,0011 P * T^2 - 0,0001 P^2 * T + 0,0032 P * C - 0,034 T * C + \varepsilon$$

Figura 67. Gráfico de contorno efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para as suspensões contendo LCM granular (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.

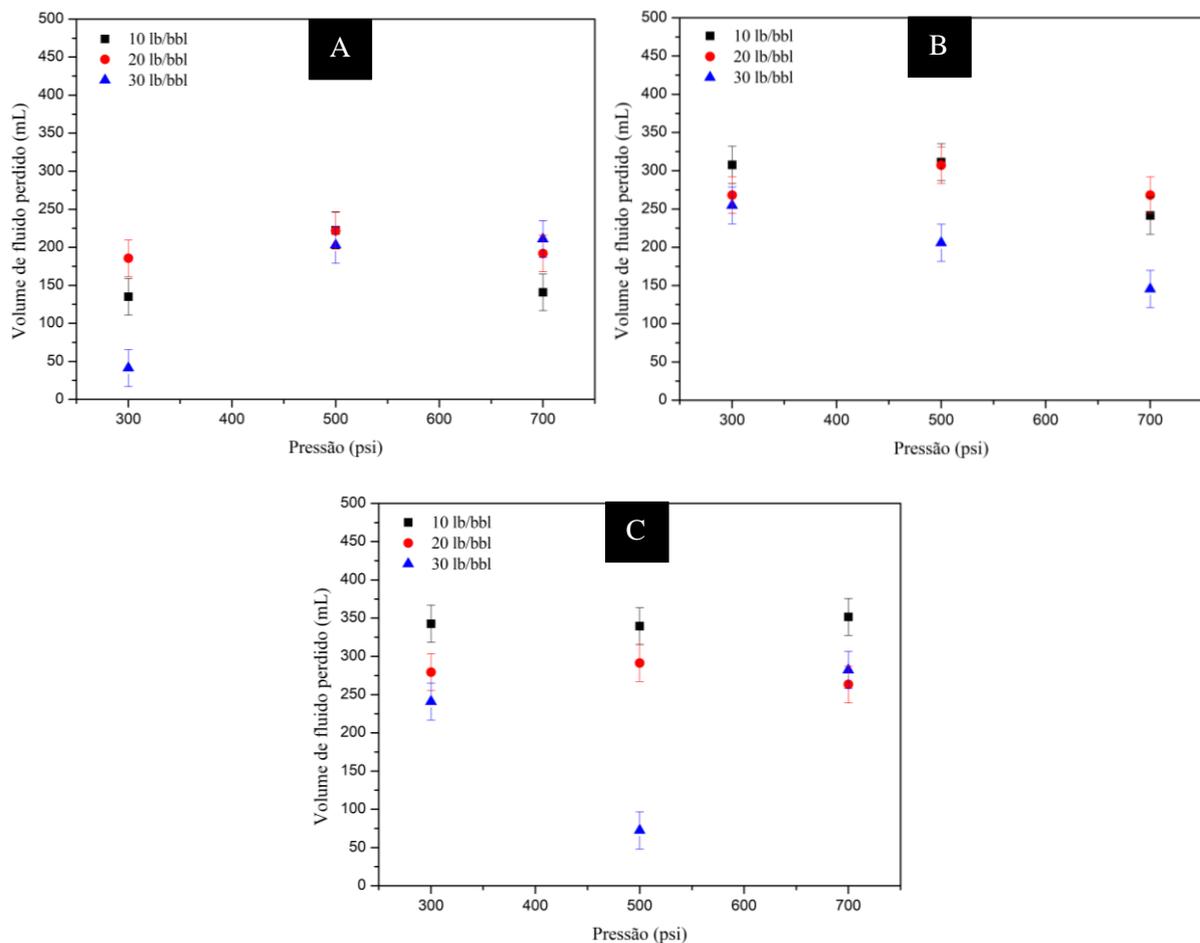




4.2.2.2 LCM fibroso

A Figura 68 apresenta os dados do efeito do diferencial de pressão e da temperatura no volume final de fluido perdido para o LCM fibroso. Nas temperaturas de 25 °C, 50 °C e 75 °C e concentração de 10, 20 e 30 lb/bbl, como apresentado no planejamento experimental.

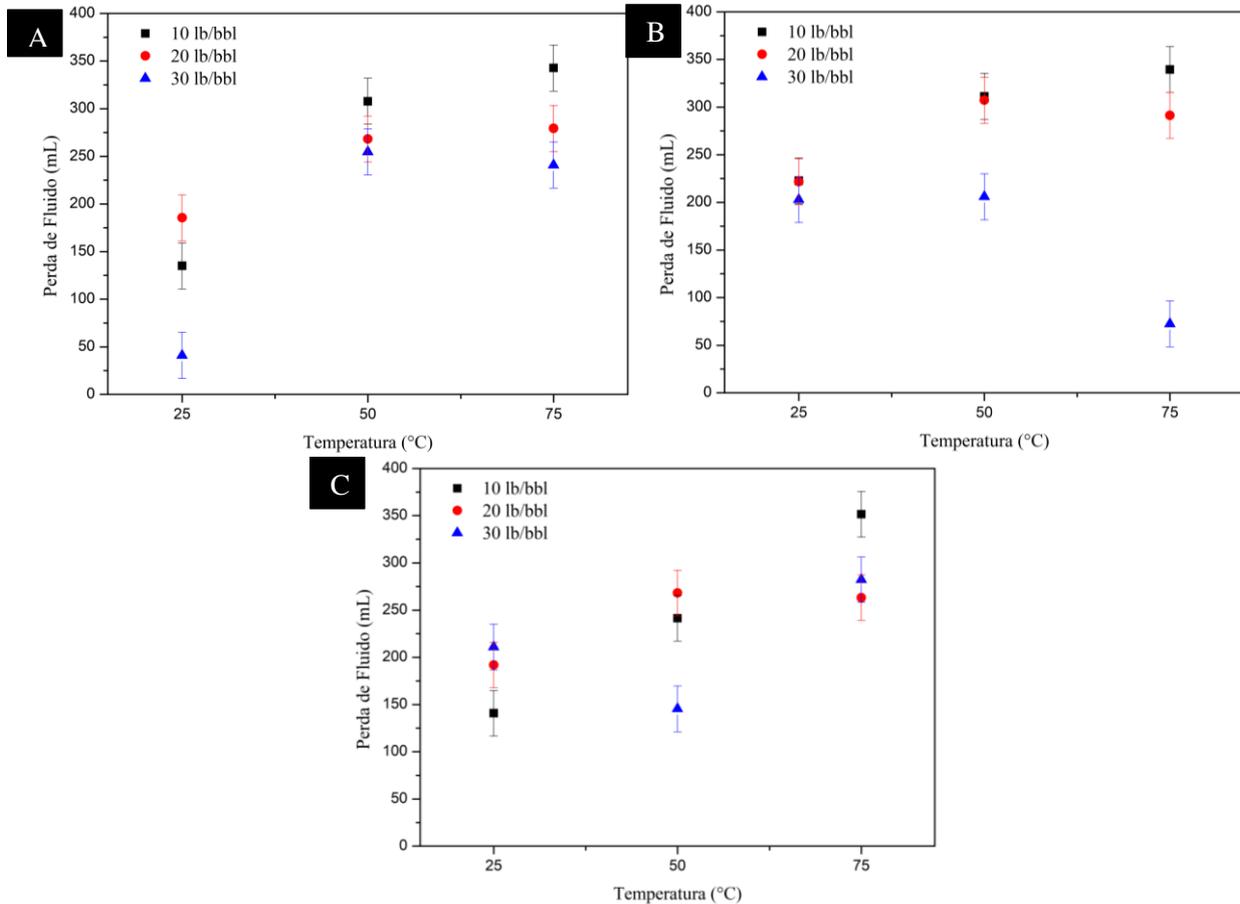
Figura 68. Efeito da variação da pressão e concentração no volume de fluido perdido para fenda do LCM fibroso, nas temperaturas de (A) 25 °C, (B) 50 °C e (C) 75 °C.



Devido a conformação, o LCM fibroso apresentou volumes de fluido perdido pela fenda elevados, em torno de 300 a 350 mL. A elevação de temperatura resultou em maiores valores

de volume perdido, devido a diminuição da viscosidade aparente. Em relação ao diferencial de pressão, foi notado um aumento significativo no volume de filtrado, diferentemente, do ocorrido para o LCM granular. A Figura 69 apresenta os resultados do efeito da temperatura no volume de filtrado.

Figura 69. Efeito da temperatura no volume de fluido perdido para fratura do LCM fibroso, nas pressões de (A) 300 psi, (B) 500 psi e (C) 700 psi.



A concentração de 30 lb/bbl do LCM fibroso apresentou os melhores resultados. A elevação da concentração de 10 para 20 lb/bbl resultou na elevação do volume de fluido perdido. O ocorrido é explicado processo de deposição das partículas no *slot* ser diferente. Os dois materiais escolhidos apresentaram comportamento tão distintos devido a conformação das partículas e dos mecanismos durante o processo de selamento.

O mecanismo de selamento observado para LCM fibroso foi o mecanismo de baixa invasão, onde, houve a deposição do material na superfície da fenda, formando um tipo de meio filtrante. O volume de fluido perdido, passou a depender da efetividade de filtração do meio filtrante formado, da pressão e temperatura de operação. Na Figura 70 observa-se uma imagem do meio filtrante formado na superfície da fenda após ensaio de selamento de fenda.

Figura 70. Slot contendo LCM fibroso após o teste de selamento de fenda. Condições: 20 lb/bbl, 500 psi e 50°C.



A abordagem estatística, apresentada na seção 3.4, foi utilizada para analisar os dados obtidos experimentalmente. A Tabela 11 apresenta os valores da estimativa de efeito, para todos os fatores da equação do modelo escolhido. Como citado anteriormente, quanto maior o valor absoluto do efeito, maior é a sua influência no volume final. Os sinais de negativo (-) e positivo (+) indicam se a influência do efeito, os negativos influenciam diminuindo o volume de fluido perdido e os positivos aumentam. As letras L e Q indicam, respectivamente, o termo linear do fator e o termo quadrático do fator no modelo.

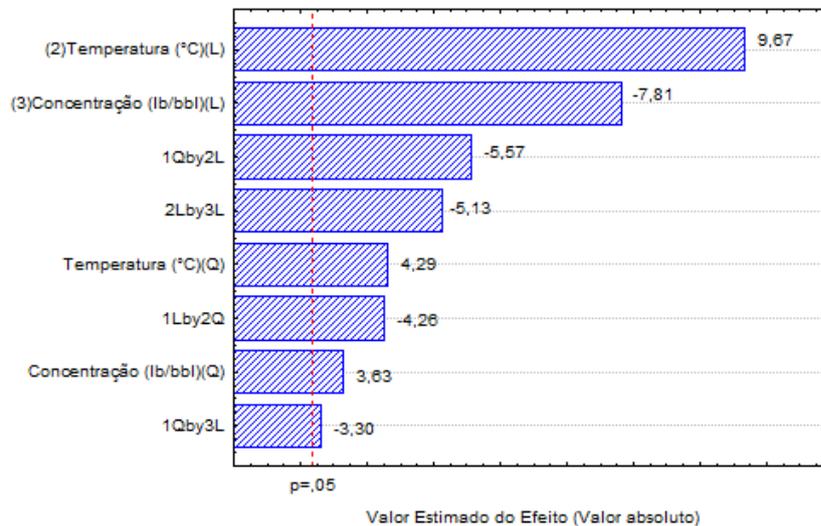
Tabela 11. Estimativa de efeitos e suas interações com o volume de fluido perdido para o LCM fibroso.

Parâmetros	Efeitos	Desvio Padrão	p-valor
Temperatura (L)	101,2178	1,61146	0,0023
Temperatura (Q)	36,0536	0,02085	0,0231
Concentração (L)	-81,7667	3,74773	0,0043
Concentração (Q)	30,4869	0,08413	0,0359
Pressão (L) e Temperatura (Q)	-47,3158	0,00003	0,0236
Pressão (Q) e Temperatura (L)	-61,8958	0,00001	0,0113
Pressão (Q) e Concentração (L)	-36,6750	0,00001	0,0456
Temperatura (L) e Concentração (L)	-65,8217	0,02564	0,0143

Na Figura 71 está representado o diagrama de Pareto construído a partir da tabela de ANOVA do LCM fibroso. As colunas representam a magnitude dos efeitos dos fatores e das interações que são estatisticamente significativos e marginalmente significativos. A variável

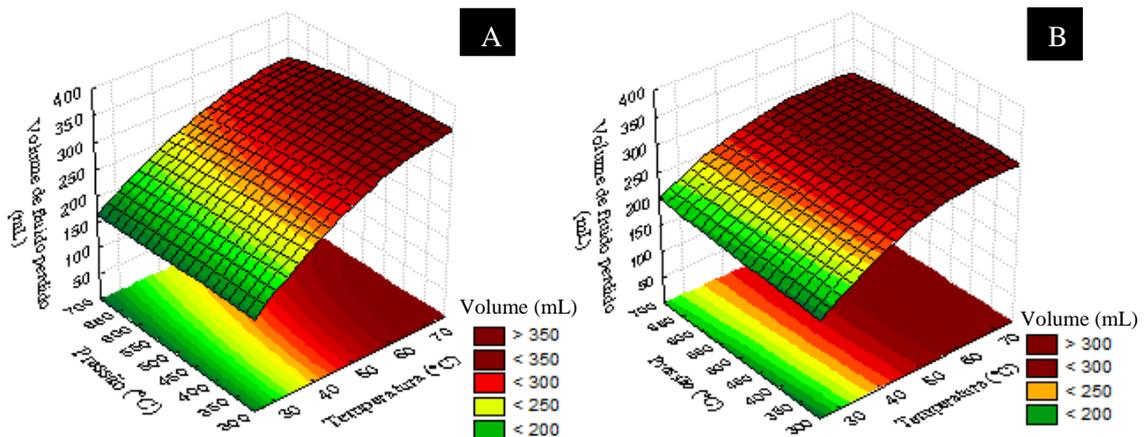
pressão (termo linear e quadrático), não teve influência estatística significativa nos resultados, apenas sua interação com a temperatura e a concentração. Os fatores que mais influenciam o volume de fluido perdido, para o LCM fibroso, são a temperatura e concentração. Quanto maior a temperatura maior o volume de fluido perdido. Com relação a concentração, quanto maior o valor da concentração menor é o valor de fluido perdido.

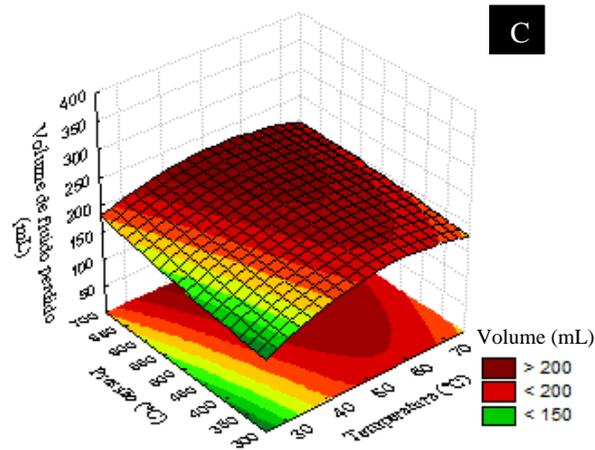
Figura 71. Diagrama de Pareto construído a partir da tabela ANOVA, análise da significância dos fatores e suas interações do LCM fibroso. Nível de significância de 5% e $R^2 = 0,809$.



A Figura 72 apresenta o efeito combinado da temperatura e pressão, nas concentrações de teste (10, 20 e 30 lb/bbl). A superfície de resposta foi criada a partir do modelo preditivo apresentado na Equação (37), utilizando os resultados do teste de selamento de fenda. A superfície de resposta é a representação gráfica do modelo preditivo. Nos pontos de mínimo, em verde, obtém-se os pontos de mínimo valor de volume perdido. Quanto mais avermelhada a cor, maior é a ocorrência da variável volume, a variável de resposta em questão.

Figura 72. Efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para as suspensões contendo LCM fibroso (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.

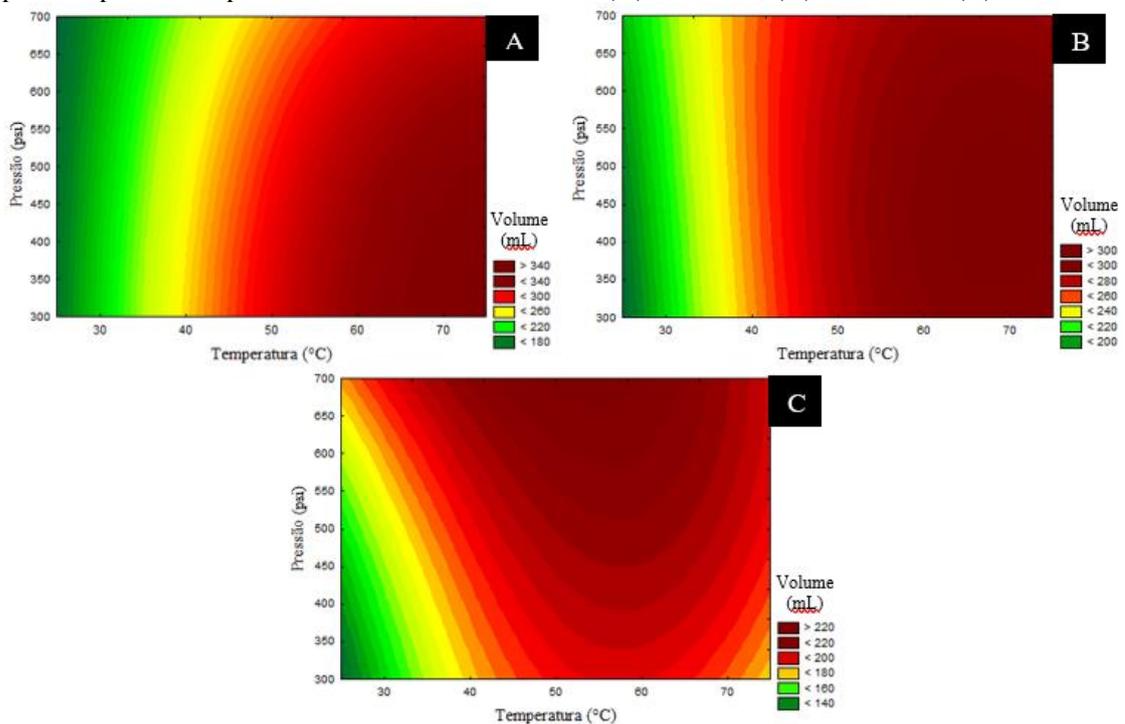




Os melhores desempenhos do LCM fibroso foram a temperaturas menores que 45 °C. Altas temperaturas promovem maiores perdas de fluido. Na Equação (37) temos o modelo preditivo em variáveis originais usado para traçar as superfícies de resposta e os gráficos de contorno. Relaciona os fatores de maior significância estatística, como descrito no capítulo anterior. Os gráficos de contorno para o LCM fibroso estão apresentados na Figura 73. É possível observar que apesar de uma região de operação em melhores pontos, o material gera volumes de fluido elevados.

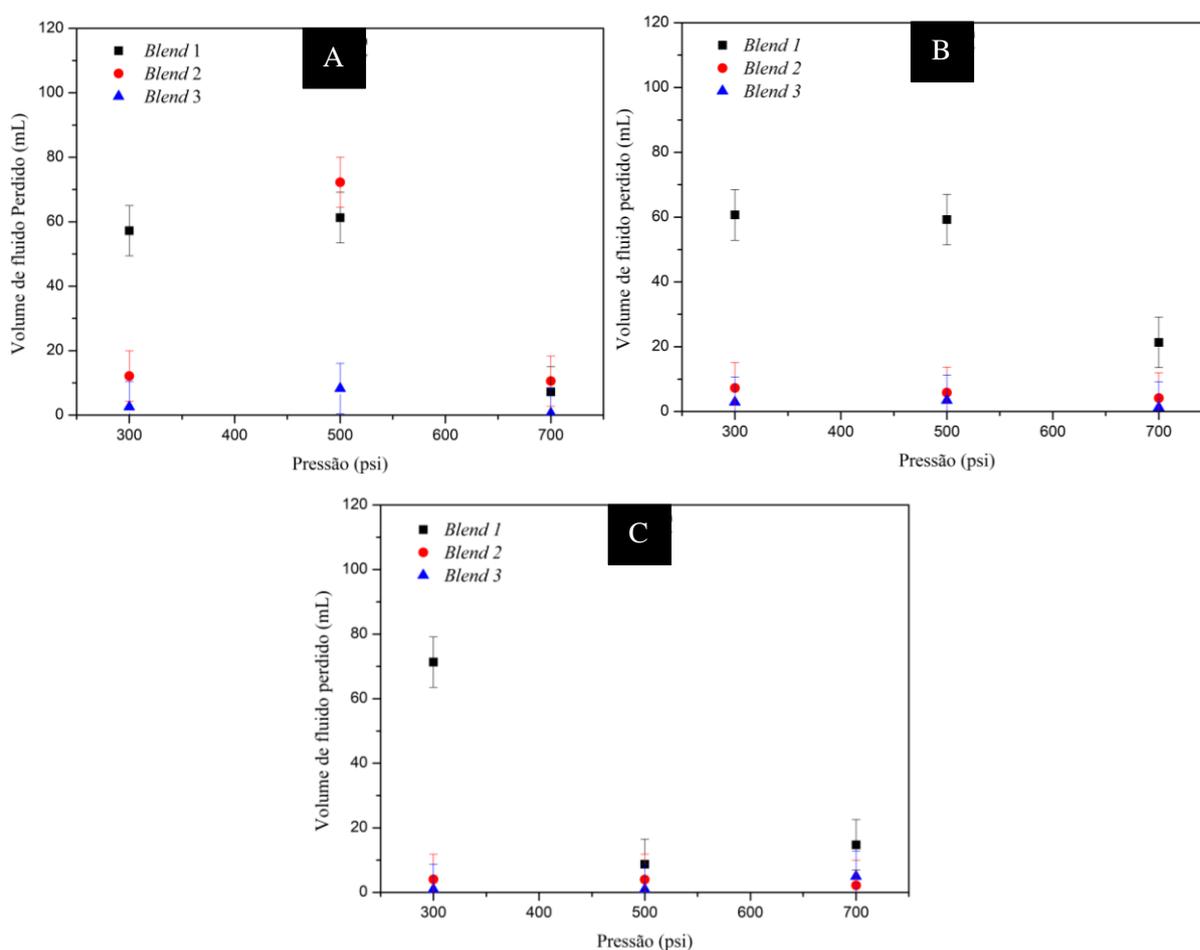
$$Y = -134,331 + 11,723 T - 0,074 T^2 + 12,329 C - 0,299 C^2 - T * C + \varepsilon \quad (37)$$

Figura 73. Gráfico de contorno efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para as suspensões contendo LCM fibroso (A) 10 lb/bbl, (B) 20 lb/bbl e (C) 30 lb/bbl.



A Figura 74 apresenta os dados do efeito do diferencial de pressão e da temperatura no volume final de fluido perdido para as 3 misturas desenvolvidas. Nas temperaturas de 25 °C, 50 °C e 75 °C, como apresentado no planejamento experimental. As composições dos *Blends* usada foram: *Blend 1* (25% LCM granular e 75% LCM fibroso), *Blend 2* (50% LCM granular e 50% LCM fibroso) e *Blend 3* (75% LCM granular e 25% LCM fibroso)

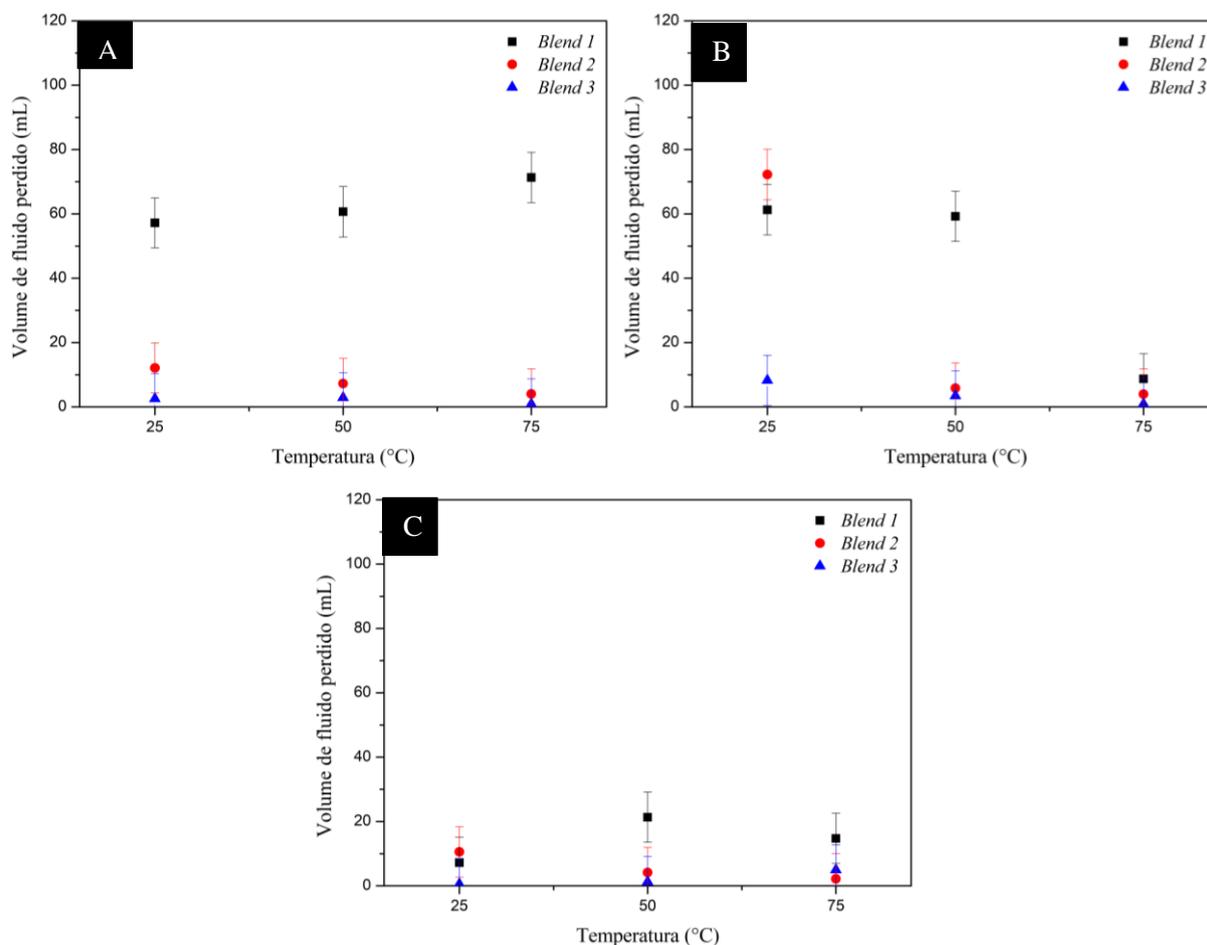
Figura 74. Efeito da variação da pressão e concentração no volume de fluido perdido para fenda dos *blends*, nas temperaturas de (A) 25 °C, (B) 50 °C e (C) 75 °C.



As misturas foram criadas para potencializar os pontos positivos dos LCMs testados. Como visto anteriormente, os dois materiais possuem características distintas. As misturas produzidas resultaram em três materiais eficientes e com potencial para utilização em larga escala. O efeito da variação da temperatura foi pronunciado nos *blends* 1 e 2. Para o *blend* 1 a elevação da temperatura gerou aumento no volume de fluido perdido, como observado para os LCMs fibroso e granular. No entanto, para os *blends* 2 e 3 a resposta foi inversa, a elevação da temperatura culminou em menores valores de volume de fluido perdido. O ocorrido não era esperado, visto os resultados dos materiais separadamente, entretanto o resultado garante que

os *blends* propostos suportam altas variações de temperatura. Na Figura 75, estão apresentados os dados para analisar o efeito da temperatura no volume de fluido perdido.

Figura 75. Efeito da temperatura no volume de fluido perdido para fratura dos *blends*, nas pressões de (A) 300 psi, (B) 500 psi e (C) 700 psi.

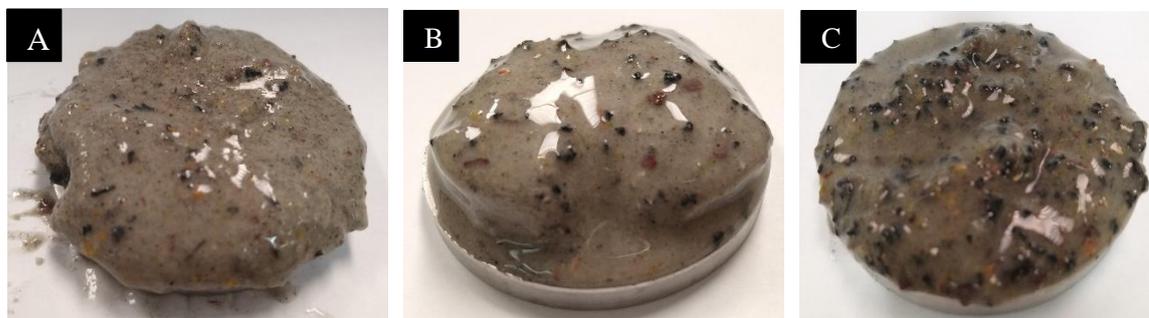


Analisando a pressão, o mesmo comportamento foi encontrado nos três *blends*, diminuição do volume de fluido com o aumento da pressão. Vale ressaltar que, o volume final de fluido perdido para o *blend 3*, praticamente, não sofreu alterações com os efeitos das variações de temperatura e pressão. Em todos os casos de testes para o *blend 3*, os volumes de fluido perdido para fenda foram abaixo de 20 mL. Quando comparados os resultados de volume perdido obtidos para o LCM fibroso com os *blends*, observou-se a redução de até 94% de volume de fluido. A redução para o LCM granular foi de 40-80% de fluido perdido, o resultado corrobora a efetividade e eficiência das misturas desenvolvidas.

Os mecanismos de selamento não foram tão evidentes para as misturas, como nos LCMs separados. Contudo, pode-se observar que os *blends 1* e *2* apresentaram semelhança ao mecanismo de baixa invasão e o *blend 3* com o mecanismo de preenchimento. O comportamento ocorreu devido a composição dos *blends*, o *blend 1* possui o LCM fibroso em

maior concentração e o *blend* 3 o LCM granular. Na Figura 76, constam imagens de três testes de selamento com os *blend* 1, 2 e 3.

Figura 76. Fendas contendo os três *blends* após o teste de selamento de fenda. Condições: 500 psi e 50°C. Onde: (A) *blend* 1, (B) *blend* 2 e (C) *blend* 3.



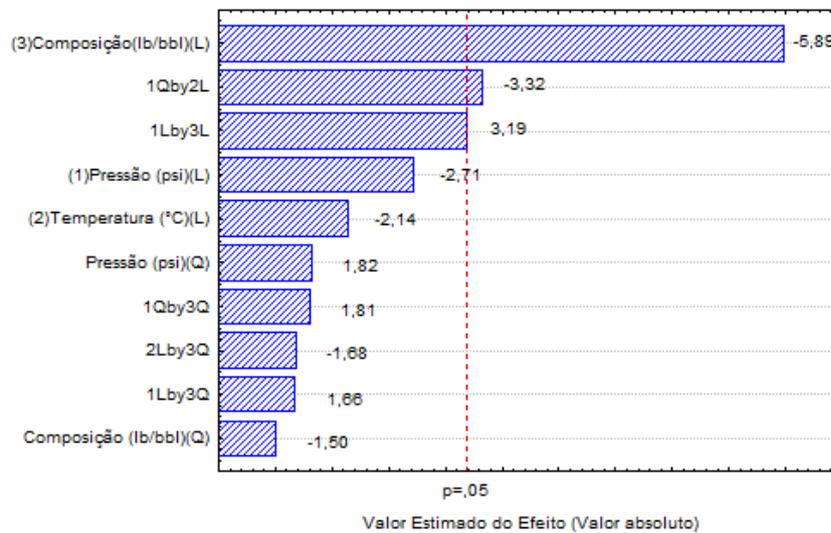
A abordagem estatística, apresentada na seção 3.4, foi utilizada para analisar os dados obtidos experimentalmente. A Tabela 12 apresenta os valores da estimativa de efeito, para todos os fatores. Como citado anteriormente, quanto maior o valor absoluto do efeito maior é a sua influência no volume final. Os sinais de negativo (-) e positivo (+) indicam se a influência do efeito, os negativos diminuem o volume de fluido perdido e os positivos aumentam. Os fatores que mais influenciaram os resultados dos *blends* foram a composição da mistura e o efeito combinado da pressão e da temperatura. Para composição, quanto maior concentração do LCM granular, menor é o volume de fluido perdido. As letras L e Q indicam, respectivamente, o termo linear do fator e o termo quadrático do fator no modelo.

Tabela 12. Estimativa de efeitos e suas interações com o volume de fluido perdido para os *blends*.

Parâmetros	Efeitos	Desvio Padrão	p-valor
Pressão (L)	-16,8933	0,2534	0,0045
Pressão (Q)	9,2800	0,0002	0,0731
Temperatura (L)	-13,3600	0,3011	0,1657
Composição (L)	-37,3356	0,2792	0,1214
Composição (Q)	-7,6533	0,3149	0,0093
Pressão (Q) e Temperatura (L)	-22,0050	0,0000	0,2296
Pressão (L) e Composição (L)	24,3967	0,5344	0,0447
Pressão (L) e Composição (Q)	11,0350	0,8399	0,0494
Pressão (Q) e Composição (Q)	9,1425	0,0007	0,1937
Temperatura (L) e Composição (L)	-11,1575	0,6045	0,1679

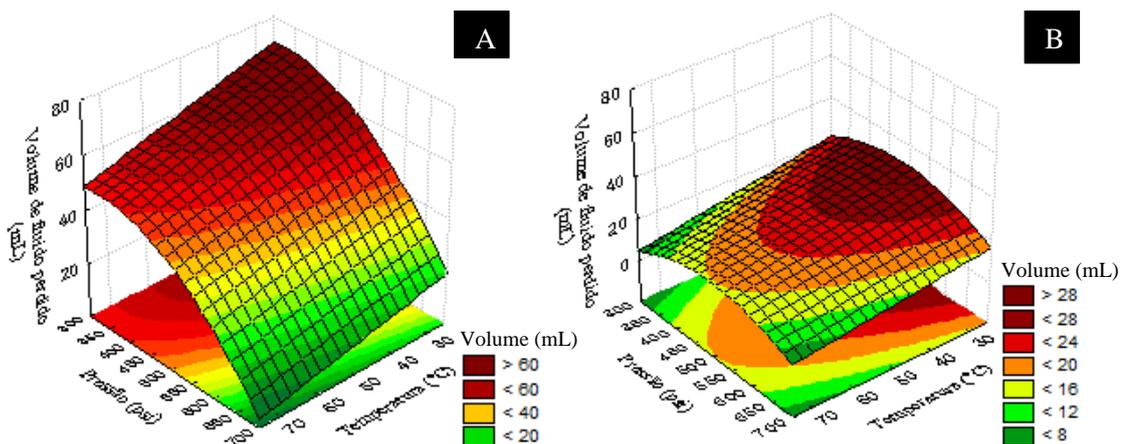
Na Figura 77 está representado o diagrama de Pareto construído a partir da tabela de ANOVA para as composições de *blends*. As colunas representam a magnitude dos efeitos dos fatores e das interações que são estatisticamente significativos e marginalmente significativos. Os fatores mais significativos para os *blends* foram a composição, como visto anteriormente. Os efeitos combinados entre a pressão e a temperatura e os efeitos combinados entre a pressão e a composição foram significativos para construção do modelo.

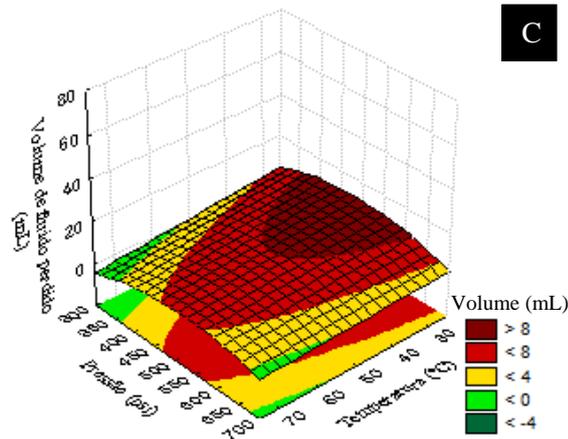
Figura 77. Diagrama de Pareto construído a partir da tabela ANOVA, análise da significância dos fatores e suas interações dos *Blends*. Nível de significância de 5% e $R^2 = 0,879$.



A Figura 78 apresenta o efeito combinado da temperatura e pressão, para o *blend 1*, *blend 2* e *blend 3*. A superfície de resposta foi criada a partir do modelo preditivo apresentado na Equação (38), utilizando os resultados do teste de selamento de fenda. Quanto mais avermelhada (mais quente) a cor, maior é a ocorrência da variável volume de fluido perdido.

Figura 78. Efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para as suspensões contendo os *blends* (A) *Blend 1*, (B) *Blend 2* e (C) *Blend 3*.

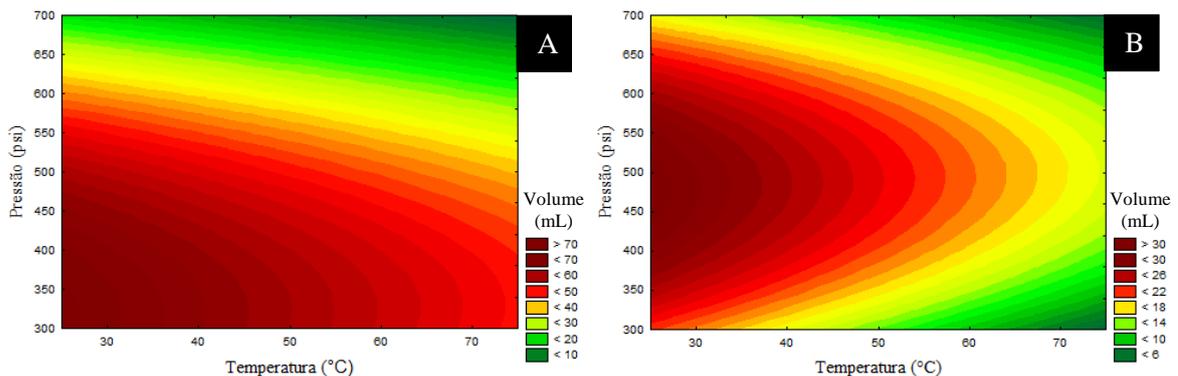


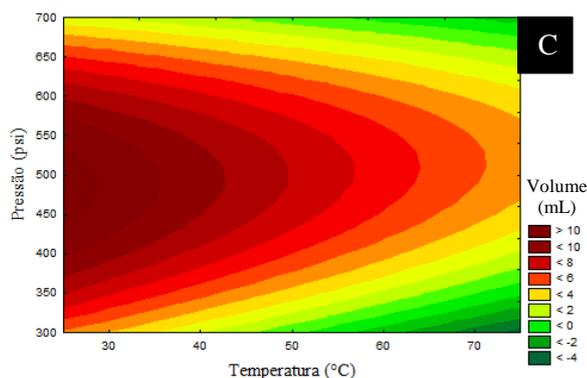


Os melhores desempenhos para os *blends* foram para o *blend 3*, que possui em sua composição alta concentração do LCM granular. Como visto anteriormente o LCM granular possui maior efetividade em redução de perda de fluido, quando comparado ao LCM fibroso. A adição da fibra serviu para reforçar o tampão formado (KUMAR *et al.*, 2011). A mesma configuração foi usada por Kumar *et al.* (2011), foram estudados diversos materiais de combate à perda e a interação ao adicionar fibras a mistura. Para o *Blend 3* não houve alteração no volume de fluido perdido para fratura frente a mudança nas condições, o volume permaneceu abaixo de 20 mL. O *blend 2* apresentou comportamento semelhante ao *blend 3*, entretanto com maior volume de fluido perdido, entre 20 e 40 mL. Na Equação (38) temos o modelo preditivo em variáveis originais usado para traçar as superfícies de resposta e os gráficos de contorno. Os gráficos de contorno para os *blends* estão apresentados na Figura 79. É mais eficiente em condições elevadas de alta temperatura e pressão.

$$Y = 194,313 + 0,014 P - 0,0038 P^2 - 0,484 T - 733,802 C + 580,446 C^2 + 1,127 P * C - P * C^2 + 0,003 P * C^2 + 0,49 T * C^2 + \varepsilon \quad (38)$$

Figura 79. Gráfico de contorno do efeito combinado da temperatura e da pressão no volume de fluido perdido para os *blends*: (A) *Blend 1*, (B) *Blend 2* e (C) *Blend 3*.





Os melhores resultados encontrados nos ensaios de selamento de fenda foram para as concentrações de 30 lb/bbl dos LCMs puros (LCM granular e LCM fibroso). O *blend* que apresentou melhor eficiência foi o *blend* 3, observou-se uma redução de até 90% quando comparado a resultados dos LCMs puros. Portanto, essas concentrações foram as escolhidas para a análise do comportamento do fluido nos Simuladores de Escoamento em Fraturas (SEF).

4.3 EXPERIMENTOS NOS SIMULADORES DE ESCOAMENTO EM FRATURA (SEF)

Nessa seção, serão apresentados os resultados dos ensaios de selamento realizados nos dois Simuladores de Escoamento em Fratura (SEF). Os dois simuladores possuem configurações diferentes o que permitiu analisar o comportamento das suspensões em diferentes condições. As características dos simuladores foram apresentadas anteriormente na seção 3.2.2. Serão apresentados também os resultados do monitoramento do selamento pelo diâmetro hidráulico, utilizando o modelo de Borges Filho (2018).

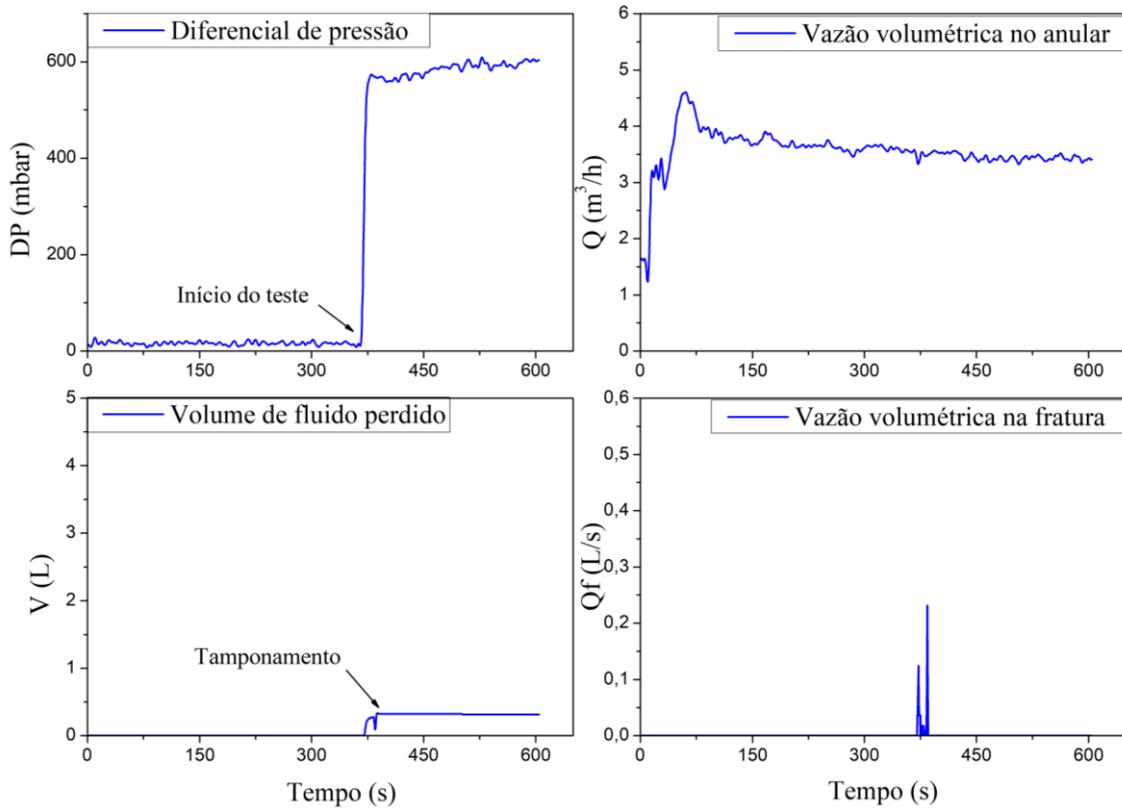
4.3.1 Experimentos de selamento SEF 1.0

O Simulador de Escoamento em Fraturas (versão 1.0), possibilita analisar o escoamento de fluidos a temperatura ambiente e pressão até 90 psi, como dito nas seções anteriores. Para o presente trabalho, foram realizados três testes para cada LCM estudado, um teste por fratura do simulador (2, 5 e 10 mm). Contudo, os testes da fatura de 2 mm não serão apresentados, visto que, observou-se o selamento instantâneo durante a circulação do fluido no simulador. Os três materiais estudados (LCM granular, LCM fibroso e *Blend* 3) foram submetidos às mesmas condições de operação no SEF 1.0 e devido a configuração do equipamento foi possível acompanhar visualmente a mitigação da perda de fluido e formação dos tampões.

4.3.1.1 Teste de escoamento SEF 1.0: LCM granular

O LCM granular foi testado no SEF 1.0 e produziu os resultados presentes nas Figura 80 e Figura 81. As condições operacionais foram de 25°C de temperatura e vazão de retorno ao anular de 3,5 m³/h. A Figura 80 apresenta os resultados referentes a fratura de 5 mm e a Figura 81 os resultados referentes a fratura de 10 mm. O resultado encontrado para o diferencial de pressão na fratura para este teste foi atípico, pois não se observou a redução do diferencial após o selamento da fratura. Tal fenômeno, pode ter sido gerado pelo tamponamento dos sensores de pressão responsáveis pela leitura da variável.

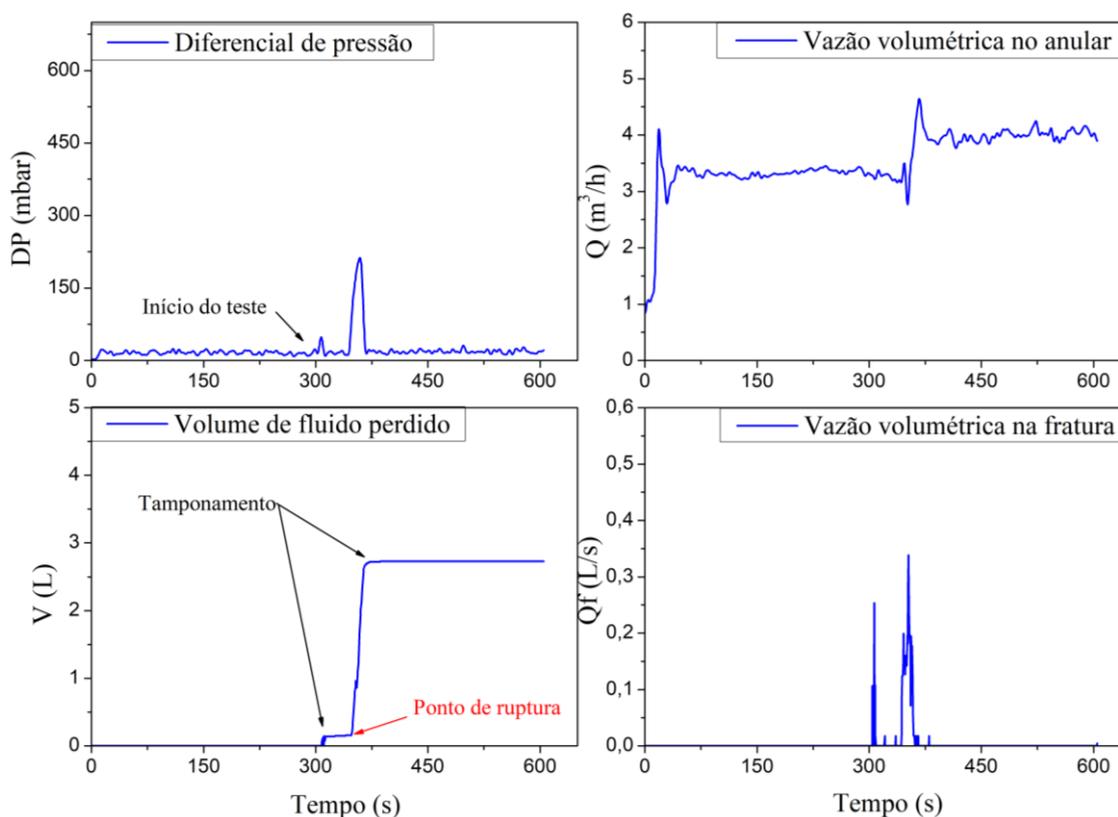
Figura 80. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o LCM granular (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 5 mm. Diferencial de pressão, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.



A Figura 80 apresenta os resultados obtidos no SEF 1.0, o primeiro quadrante representa os dados experimentais do diferencial de pressão na fratura, o segundo quadrante a vazão volumétrica na fratura, o terceiro quadrante o volume de fluido perdido e o quarto quadrante a vazão volumétrica na fratura durante o teste de selamento. A leitura dos dados obtidos mostra que ocorreu o processo de selamento em ambos os casos. Devido a constância no volume de fluido perdido com o tempo e comprovação visual, pode-se afirmar que houve o processo de formação de plugues nas fraturas de 5 e 10 mm. Foi possível acompanhar a vazão na fratura e

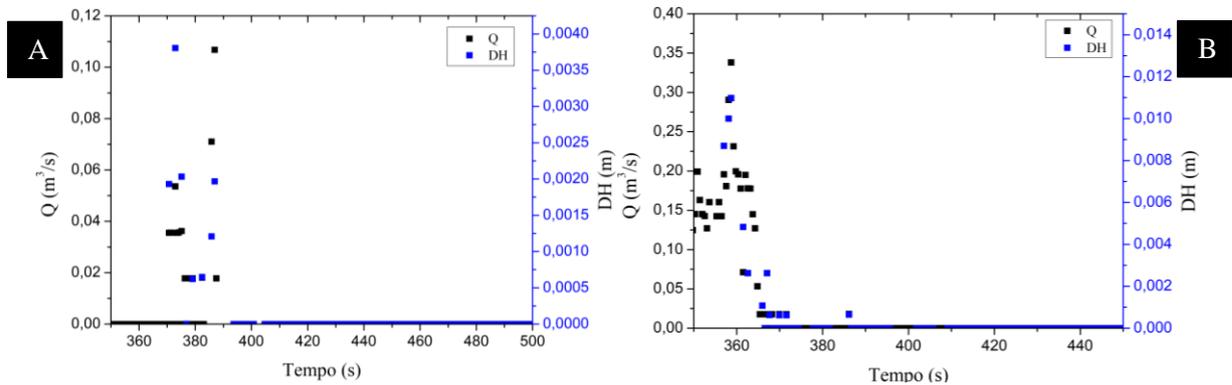
o diferencial de pressão gerado. O tempo de tamponamento para a fratura de 5 mm foi de 16 segundos e para fratura de 10 mm foi de 78 segundos. O material foi 100% efetivo para selar as faturas testadas. O volume final observado para fratura de 5 mm foi de 0,31 L e para fratura de 10 mm foi de 2,73 litros.

Figura 81. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o LCM granular (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 10 mm. Diferencial de pressão na fratura, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.



O modelo de Borges Filho (2018), Equações de (27) a (30), foi usado para monitorar o selamento da fratura calculando o diâmetro hidráulico. A Figura 82 apresenta os resultados obtidos, a curva preta representa os dados experimentais de vazão volumétrica na fratura e a curva azul os dados do diâmetro hidráulico calculado. O eixo y principal estão apresentados os dados de vazão na fratura. No eixo y secundário estão apresentados os valores de diâmetro hidráulico calculado através da Equação (30). Ao abrir a válvula V3 e iniciar o teste de escoamento em fratura, a vazão volumétrica na fratura aumenta até alcançar atingir ápice, momento do selamento da fratura e interrupção da perda de fluido. Ao atingir o selamento, observa-se o decaimento da vazão na fratura e, conseqüentemente, a diminuição do diâmetro hidráulico da fratura. Foi possível prever o comportamento esperado para o diâmetro hidráulico durante o selamento.

Figura 82. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o LCM granular no SEF 1.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.



4.3.1.2 Teste de escoamento SEF 1.0: LCM fibroso

O LCM fibroso foi testado no SEF 1.0 e produziu os resultados presentes nas Figura 83 e Figura 84. As condições operacionais foram de 25°C de temperatura e vazão de retorno ao anular 3 m³/h. A Figura 83 apresenta os resultados referentes a fratura de 5 mm e a Figura 84 os resultados referentes a fratura de 10 mm.

Figura 83. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o LCM fibroso (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 5 mm. Diferencial de pressão na fratura, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.

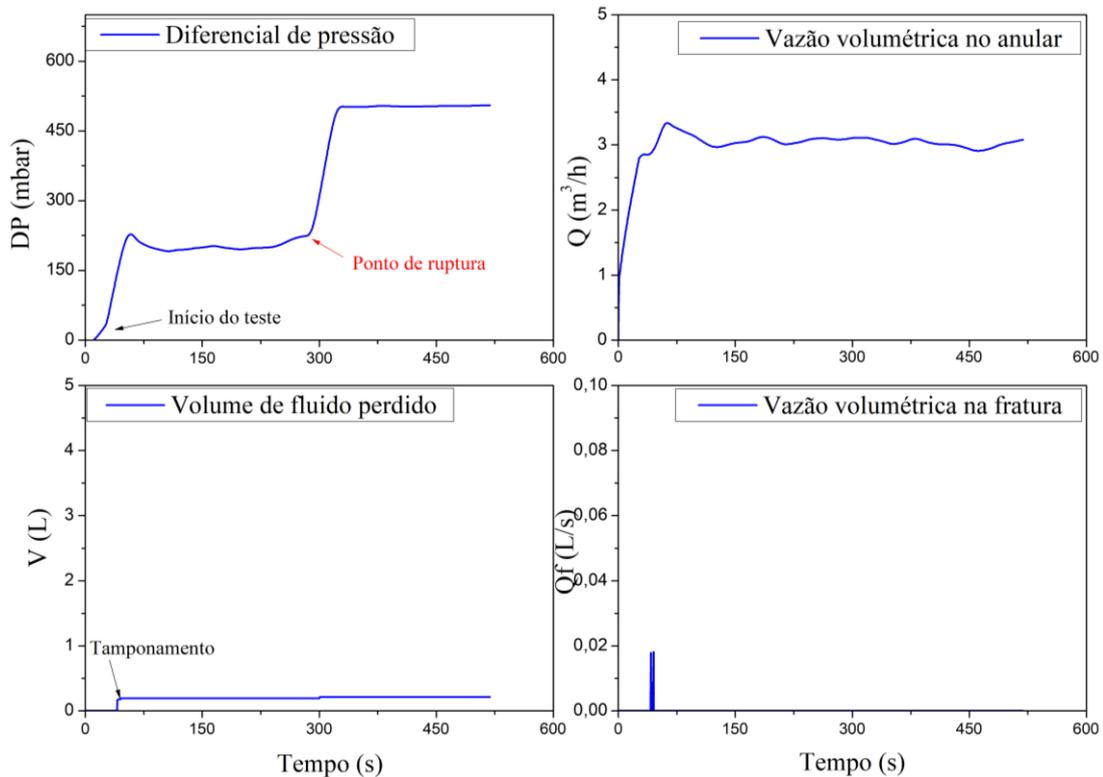
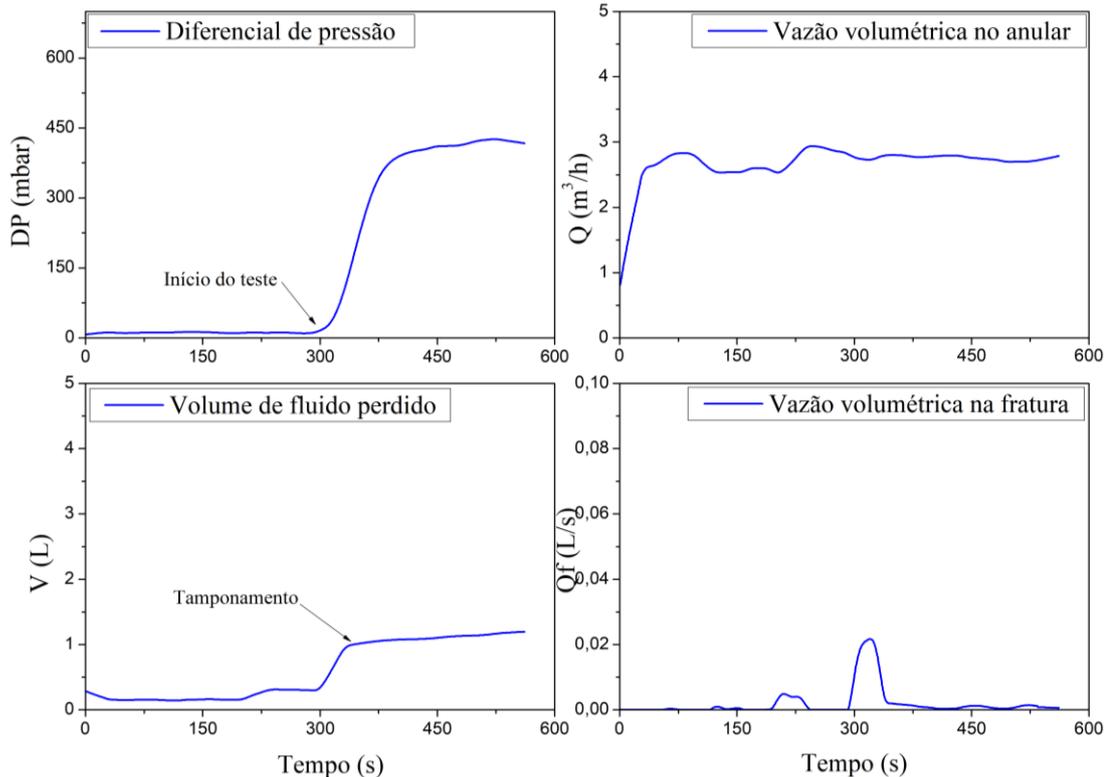


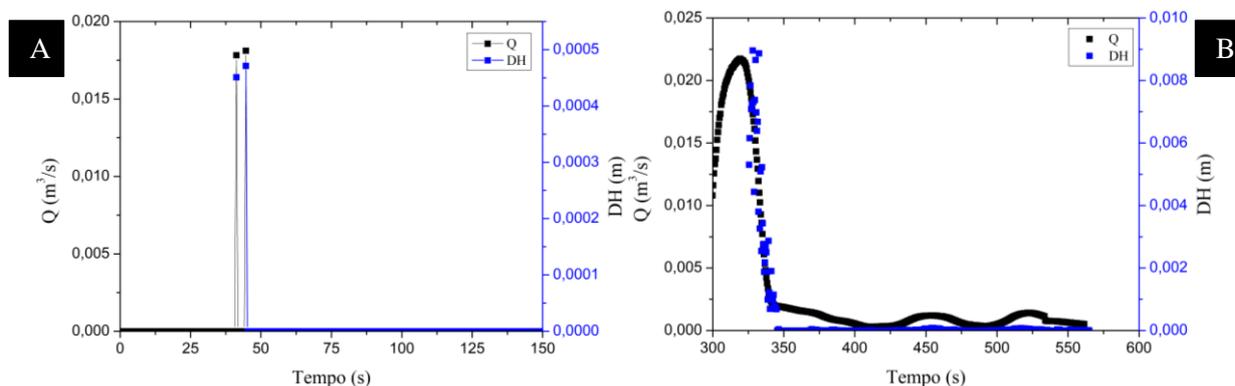
Figura 84. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o LCM fibroso (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 10 mm. Diferencial de pressão, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.



A leitura dos dados mostra que para o LCM fibroso também houve processo de selamento em ambos os casos. No SEF 1.0 houve volume de fluido perdido semelhante para os LCM granular e LCM fibroso. Devido à baixa pressão, o efeito de colmatção não foi pronunciado para esses materiais. Segundo Alsaba *et al.* (2014.a), os materiais fibrosos têm o melhor desempenho dentre todos os LCMs convencionais devido a ampla distribuição granulométrica, as propriedades das partículas e principalmente o grau de deformidade que eles possuem. Os resultados encontrados no SEF 1.0 comprovam a teoria dos autores, o LCM fibroso apresentou ótimo desempenho. Observou-se o volume de 0,21 L na fatura de 5 mm e tempo de tamponamento de 7 segundos. Para fratura de 10 mm, o volume perdido foi de 1,19 L e tempo de selamento de 56 segundos, corroborando os resultados obtidos na bancada, segundo os quais as temperatura e pressões menores o LCM fibroso possui um comportamento eficiente.

Na Figura 85 estão apresentados os resultados do modelo do Borges Filho (2018) para monitorar o selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico. Como observado, o modelo (Equação (30)) foi eficaz em prever o ponto de obstrução da fratura e início do selamento. Tornou possível acompanhar a diminuição do diâmetro hidráulico até quase zero.

Figura 85. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o LCM fibroso no SEF 1.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.



4.3.1.3 Teste de selamento SEF 1.0: *Blend 3*

O *Blend 3* foi testado dinamicamente no SEF 1.0, sob as mesmas condições que os materiais puros. As condições operacionais foram de 25°C de temperatura e vazão de retorno ao anular 3 m³/h. Os testes do *Blend* objetivaram analisar a qualidade e efetividade do material proposto, as Figura 86 e Figura 87 explicitam os resultados obtidos para fratura de 5 mm e 10 mm.

Figura 86. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o *Blend 3* (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 5 mm. Diferencial de pressão, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.

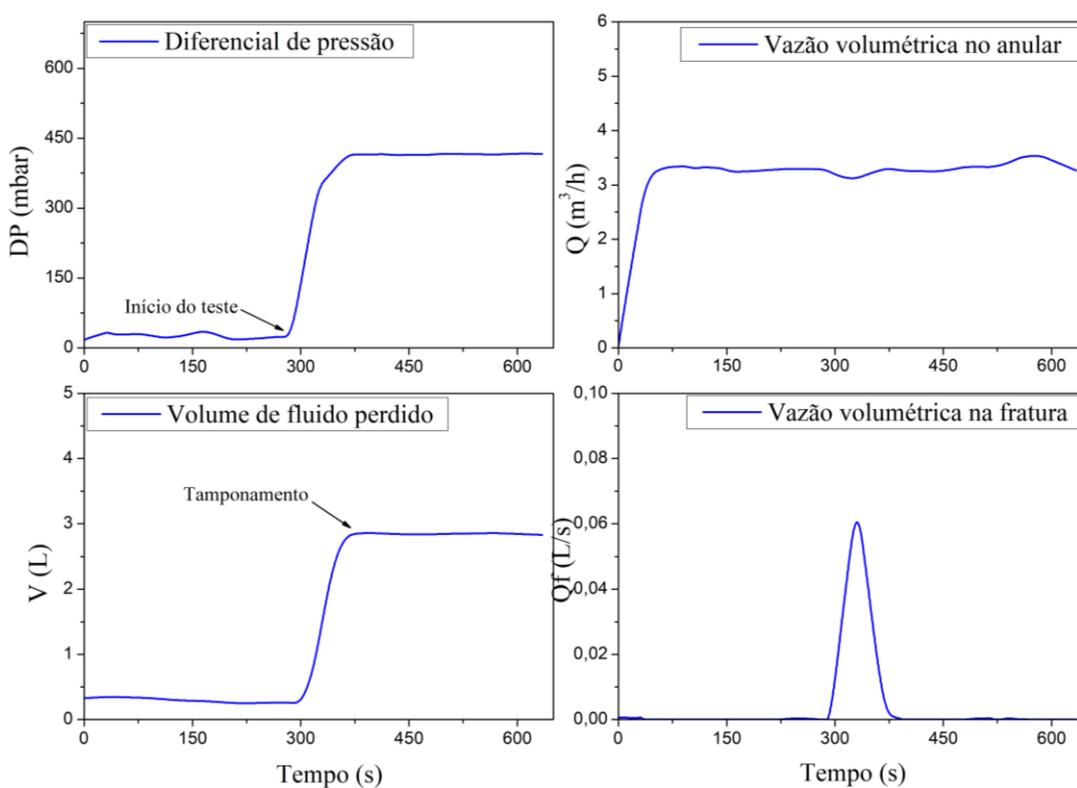
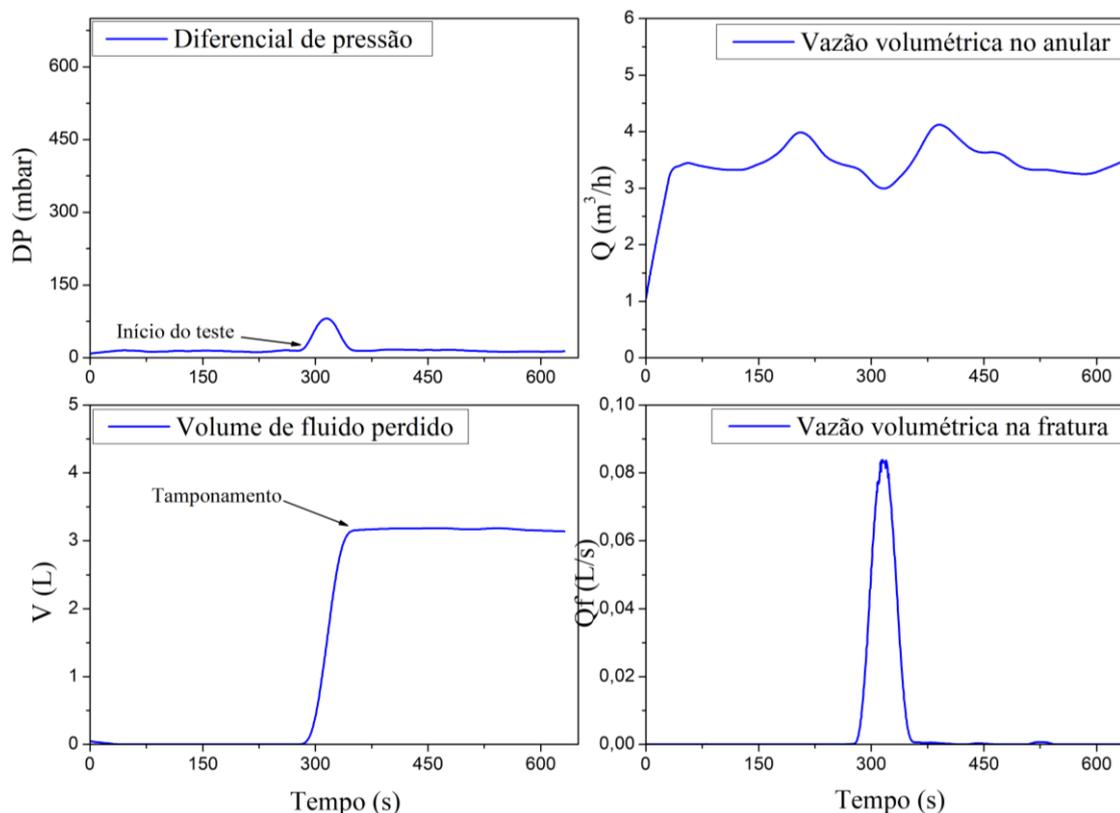


Figura 87. Aquisição de dados em tempo real no SEF 1.0 do teste de selamento usando o *Blend 3* (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25°C na fratura de 10 mm. Diferencial de pressão na fratura, vazão volumétrica no anular de 8 ½”, volume de fluido e vazão volumétrica na fratura.

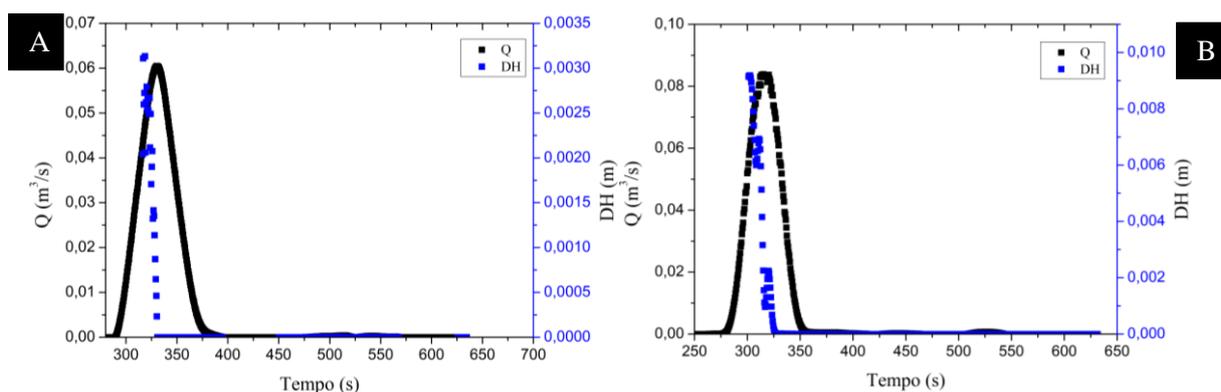


A leitura dos dados obtidos mostra que houve selamento para as fraturas de 5 mm e 10 mm. A constância no volume de fluido perdido com o tempo e visualmente, fora possível detectar a formação dos plugs nas fraturas contidas na unidade experimental. O tempo de tamponamento para a fratura de 5 mm foi de 73 segundos e gerou um volume de fluido de 2,82 litros. No entanto, para fratura de 10 mm observou-se o tempo de selamento igual a 86 segundos gerando o volume de 3,13 litros. O material foi eficaz para o selamento da fratura nos dois casos apresentados.

Analisando os dados de tempo de tamponamento encontrados no presente trabalho e os dados apresentados por Magalhães *et al.* (2019), observou-se que os tempos de tamponamento foram semelhantes aos encontrados pelos autores. Portanto, foram considerados efetivos os materiais que tamponaram com tempo menor que 120 segundos. No SEF 1.0, os materiais puros apresentaram melhores resultados que o *Blend 3*. Como visto nos resultados de bancada, a mistura desenvolvida tem melhor desempenho a altas pressões. Como o SEF 1.0 opera a pressões baixas gerou o resultado observado. Entretanto, durante a análise visual da formação dos tampões o *Blend 3* foi o material que apresentou a formação mais rápida e resistente.

Na Figura 88 estão apresentados os resultados obtidos para o acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico. Com o modelo foi possível prever o comportamento característico da diminuição do diâmetro hidráulico com o selamento da fratura. A curva preta apresentada são os dados experimentais de vazão na fratura para o *Blend 3* e a curva azul corresponde ao diâmetro hidráulico calculado, considerando a reologia do fluido.

Figura 88. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o *Blend 3* no SEF 1.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.



4.3.2 Experimentos de selamento SEF 2.0

O Simulador de Escoamento em Fraturas (versão 2.0) possibilitou analisar o escoamento do fluido sob condições semelhantes às encontradas no poço de perfuração. Devido a instrumentação instalada, citada na seção 3.2.2, o equipamento suporta temperaturas de até 120°C e pressões até 1000 psi. Ganho em performance se comparado ao SEF 1.0, entretanto o simulador não permite a visualização da formação dos tampões, somente após a realização do teste e abertura das fraturas.

Os três materiais foram submetidos as mesmas condições operacionais, fixou-se o diferencial de pressão de 100 psi e as temperatura de 25 °C e 50°C para os testes de temperatura elevada. Foram realizados três testes para cada material escolhido, na fratura de 10 mm em temperatura ambiente (25 °C) e na fratura de 5 mm nas temperaturas de 25 e 50 °C.

4.3.2.1 Teste de selamento SEF 2.0: LCM granular

O LCM granular foi testado no SEF 2.0 e produziu os resultados presentes nas figuras a seguir, onde, as Figuras 89 e 90 mostram os resultados obtidos para fratura de 5 mm e de 10 mm, respectivamente, diferencial de pressão de aproximadamente 100 psi e temperatura de 25°C, os resultados de vazão de retorno do anular e volume de fluido perdido.

Figura 89. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM granular (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 5 mm.

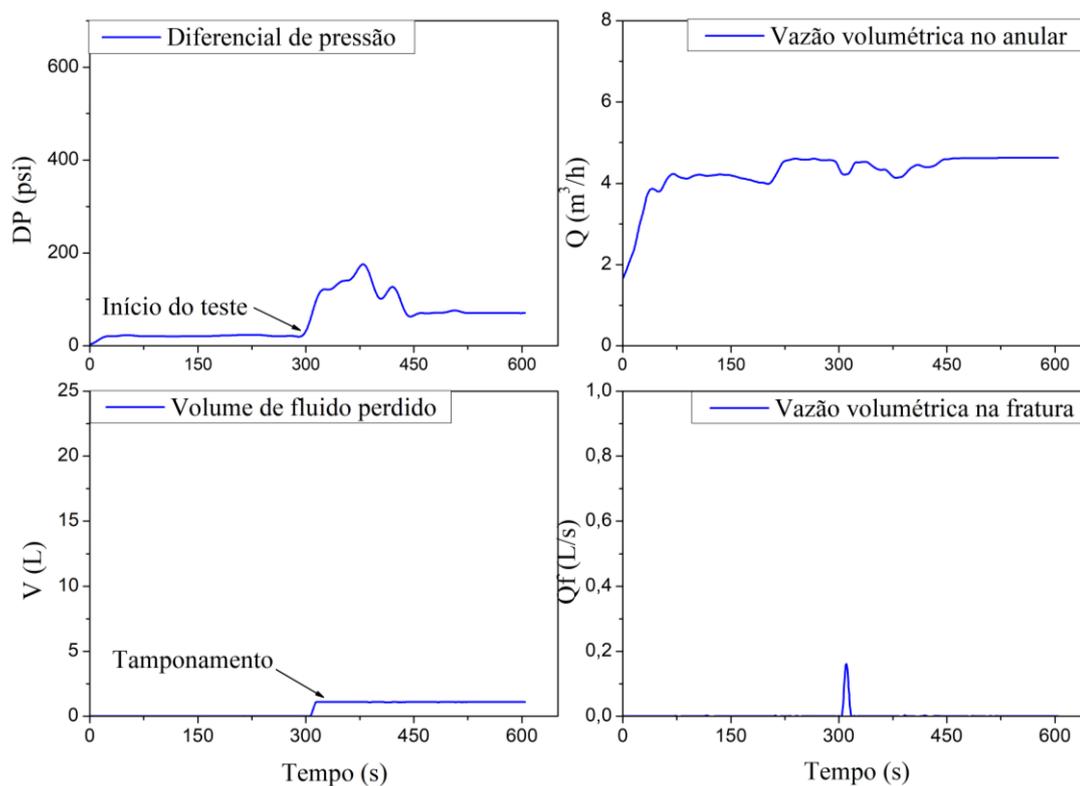
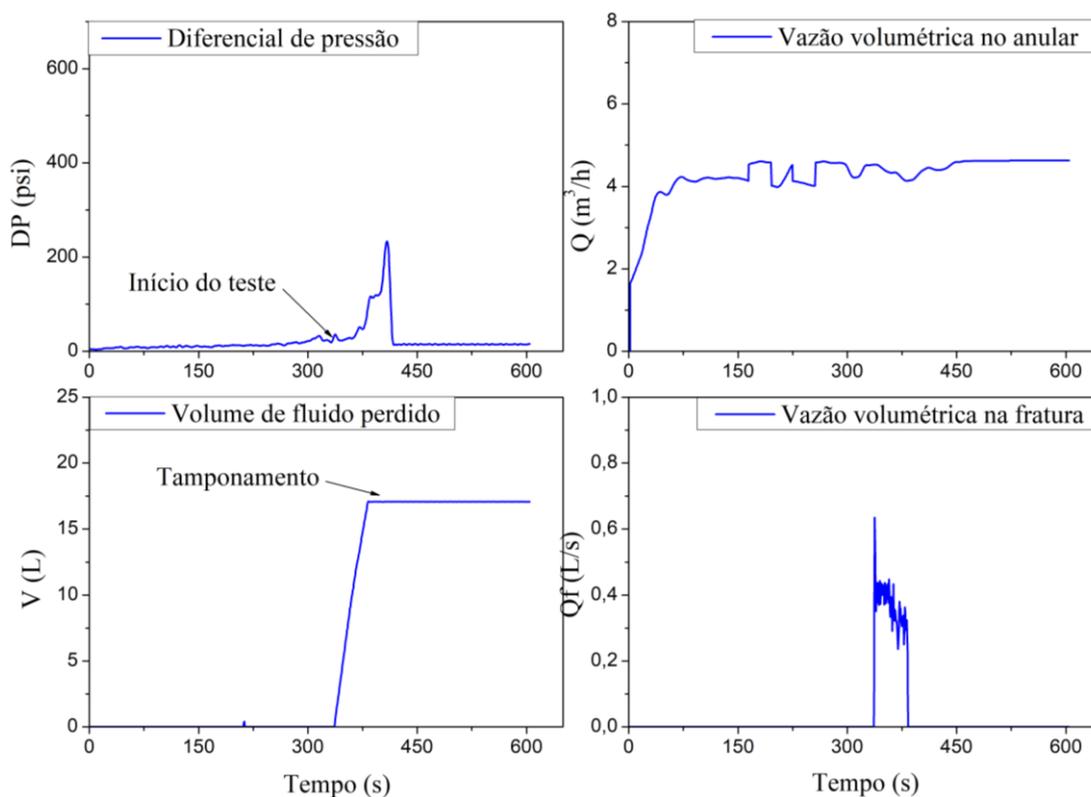


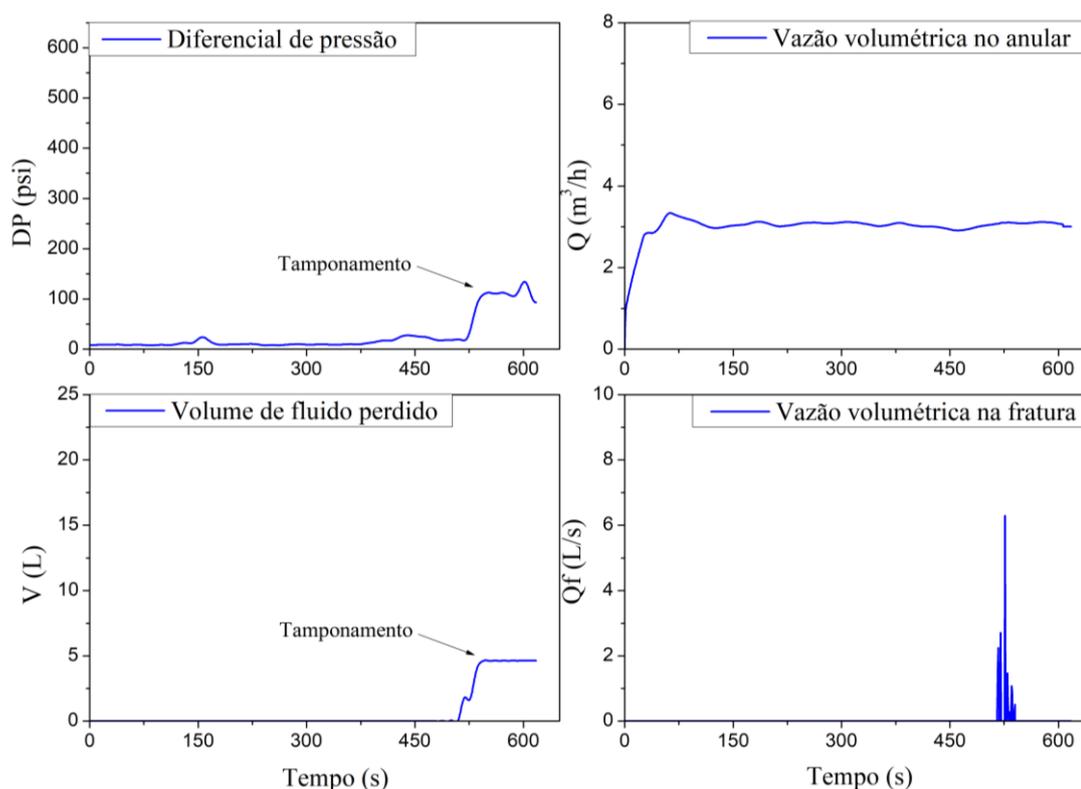
Figura 90. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM granular (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 10 mm.



A leitura dos resultados obtidos mostra que houve selamento para as fraturas de 5 mm e 10 mm. A constância no volume de fluido perdido com o tempo e queda na vazão na fratura são traduzidos pelo selamento da fratura. O tempo de tamponamento para a fratura de 5 mm foi de 7 segundos e gerou um volume de fluido de 1,10 litros. No entanto, para fratura de 10 mm o tempo de selamento igual a 47 segundos gerando o volume de 17,07 litros. O material foi eficaz para o selamento da fratura nos dois casos apresentados. As condições de processo no SEF 2.0 foram superiores as utilizadas no SEF 1.0, observou-se elevação do volume de fluido perdido e diminuição do tempo de tamponamento. O fenômeno ocorreu devido ao maior efeito de colmatação gerado pelo diferencial de pressão aplicado durante o teste. O equipamento tornou possível a análise da efetividade dos materiais a elevadas temperaturas, na Figura 91 estão apresentados os resultados para o teste de selamento do LCM granular a temperatura de 50 °C.

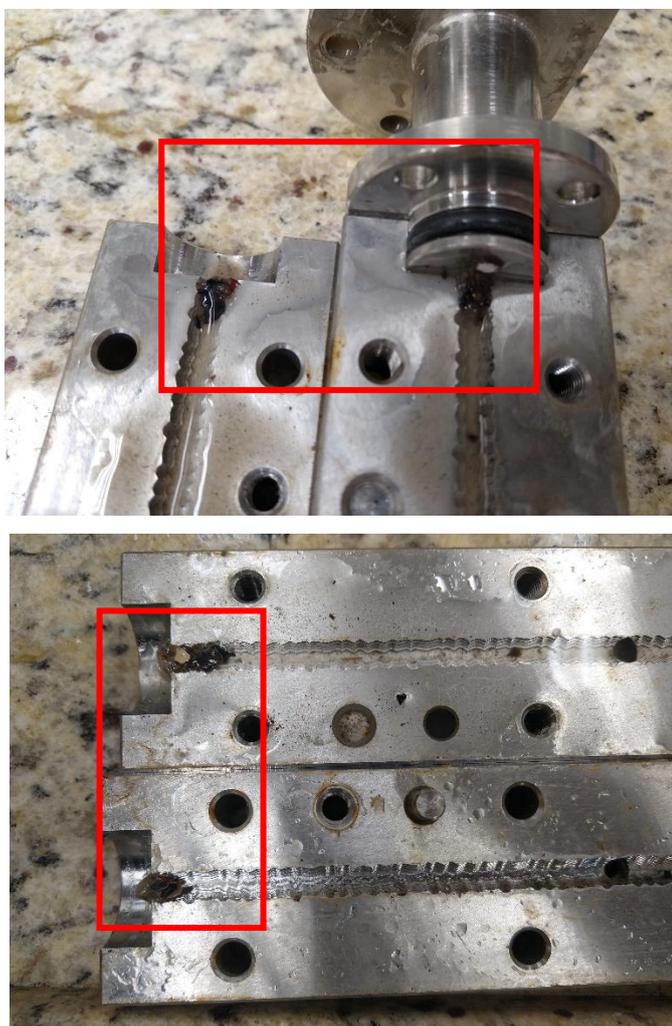
A Figura 91 apresenta os resultados obtidos para a fratura de 5 mm a temperatura de 50°C. Os resultados no simulador corroboram os resultados da bancada, o efeito da temperatura foi pronunciado no SEF 2.0 gerando assim, maior volume de fluido perdido para fratura. O volume de fluido encontrado foi de 4,62 L de fluido para fratura de 5 mm, maior que o encontrado para o teste a 25 °C.

Figura 91. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM granular (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 50 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 5 mm.



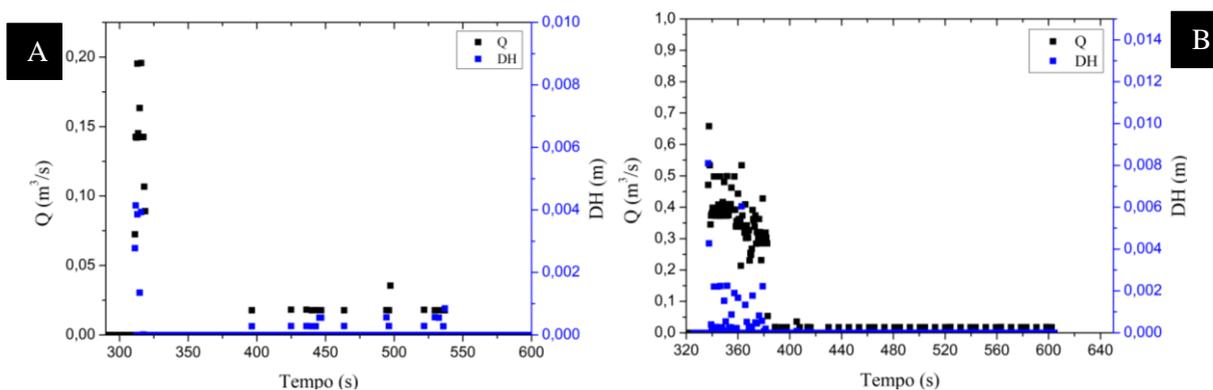
Na Figura 92 temos uma foto do interior da fratura de 5 mm após o teste de selamento do LCM granular. Ao observar a imagem, estão destacados os tampões formados pelo LCM. Analisando e comparando com os resultados encontrados em bancada, o LCM seguiu mecanismo por preenchimento observado também em bancada.

Figura 92. Fratura de 5 mm do SEF 2.0 após o teste de selamento do LCM granular.



A Figura 93 mostra que a Equação (30) foi capaz de calcular o diâmetro hidráulico da fratura no decorrer do teste de selamento, entretanto com maiores desvios. Como dito anteriormente, os diâmetros hidráulicos calculados estão representados pelos pontos azuis e os resultados experimentais da vazão na fratura estão representados pelos pontos pretos. O comportamento alcançado era o esperado, visto que, como observado por Borges Filho (2018) as partículas do LCM se depositam na região superior e inferior das fraturas. Reduzindo assim, gradativamente o diâmetro hidráulico.

Figura 93. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o LCM granular no SEF 2.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.



4.3.2.2 Teste de selamento SEF 2.0: LCM fibroso

O LCM fibroso foi testado no SEF 2.0 e produziu os resultados presentes nas figuras a seguir. As Figura 94 e Figura 95 mostram os resultados obtidos para fratura de 5 mm e de 10 mm, respectivamente, diferencial de pressão de aproximadamente 100 psi e temperatura de 25°C, os resultados de vazão de retorno do anular e volume de fluido perdido. As constâncias observadas no volume de fluido perdido foram traduzidas como selamento da fratura. O tempo de tamponamento para a fratura de 5 mm foi de 92 segundos e gerou o volume igual a 0,80 L de fluido. Para a fratura de 10 mm o tempo de tamponamento foi de 50 segundos e gerou o volume de fluido perdido de 36,8 litros. O material foi eficaz para o selamento da fratura nos dois casos.

Comparando os resultados obtidos para o LCM fibroso no SEF 2.0 aos resultados do SEF 1.0, foi observado aumento no volume de fluido perdido e aumento no tempo de tamponamento. Analisando os resultados anteriores para esse material viu-se que nos resultados de bancada, o LCM fibroso apresentou melhor desempenho nas menores pressões. Suas melhores faixas de operação são a pressões menores e suportam elevada variação de temperatura. Ao elevar o diferencial de pressão aplicado, o material apresentou agravamento no volume de fluido perdido, resultando diminuição do desempenho. Pelo mecanismo de selamento o material funciona como um meio filtrante a altas pressões, retendo a maioria das partículas ao aumentar a pressão esse meio filtrante permite a passagem de mais fluido.

Figura 94. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM fibroso (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 5 mm.

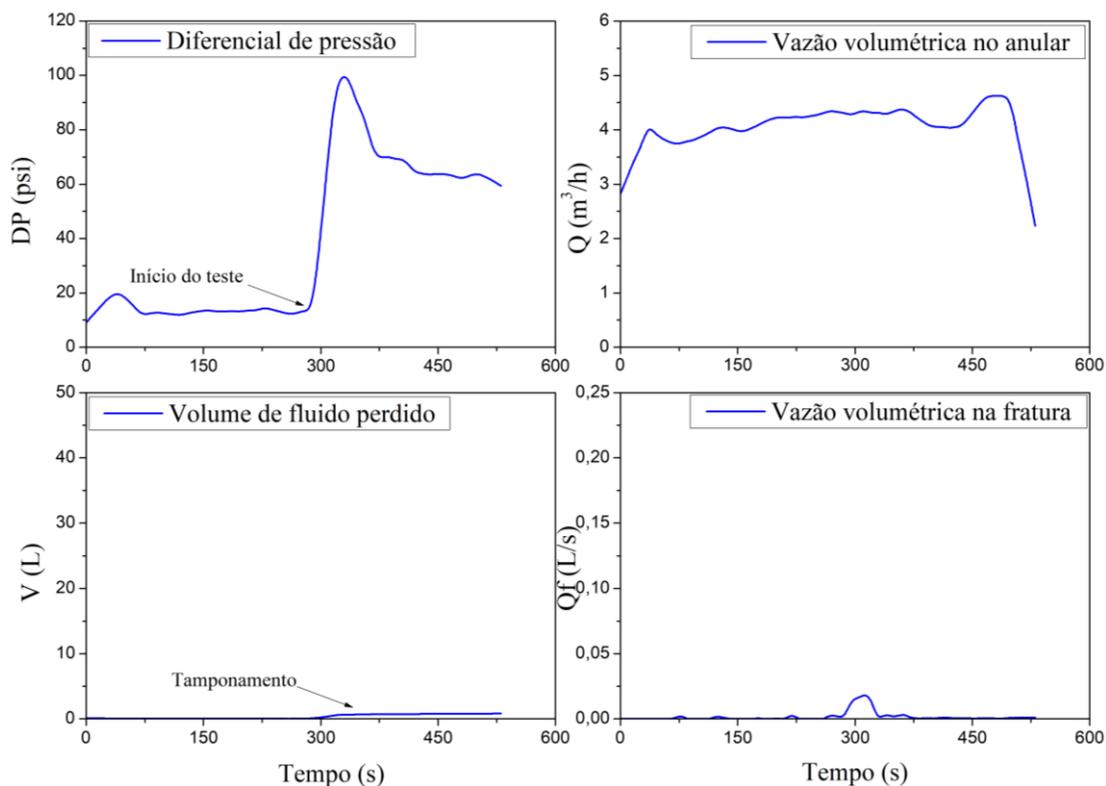
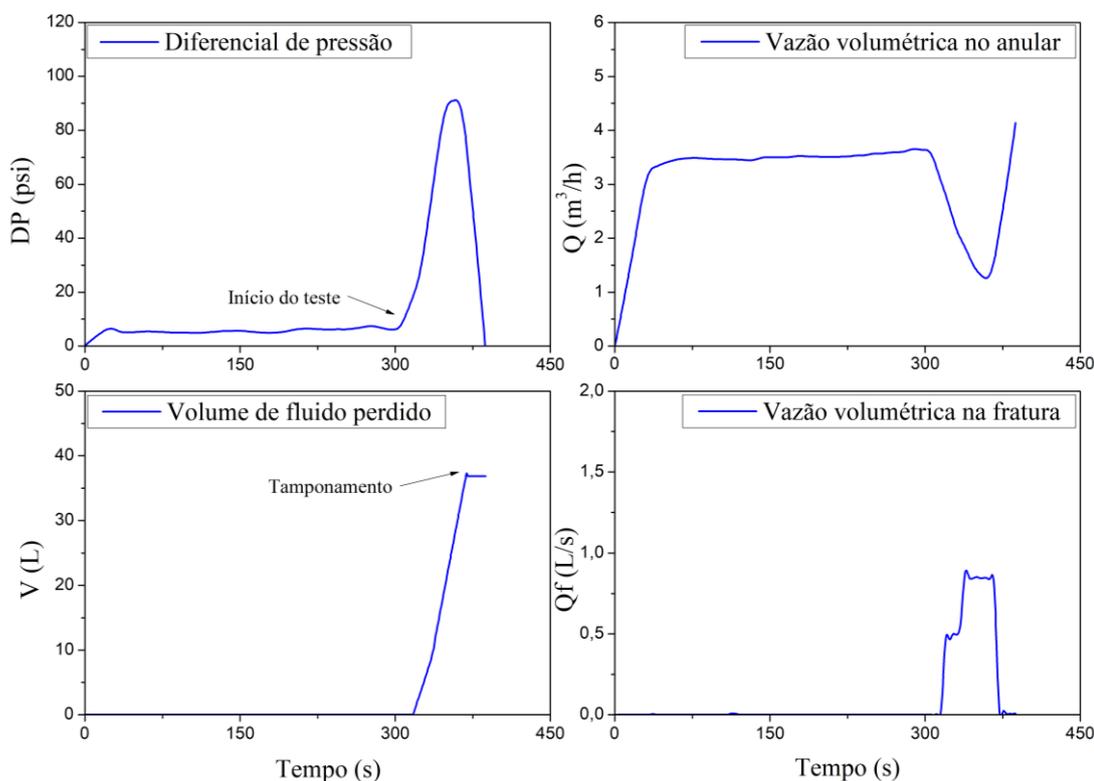
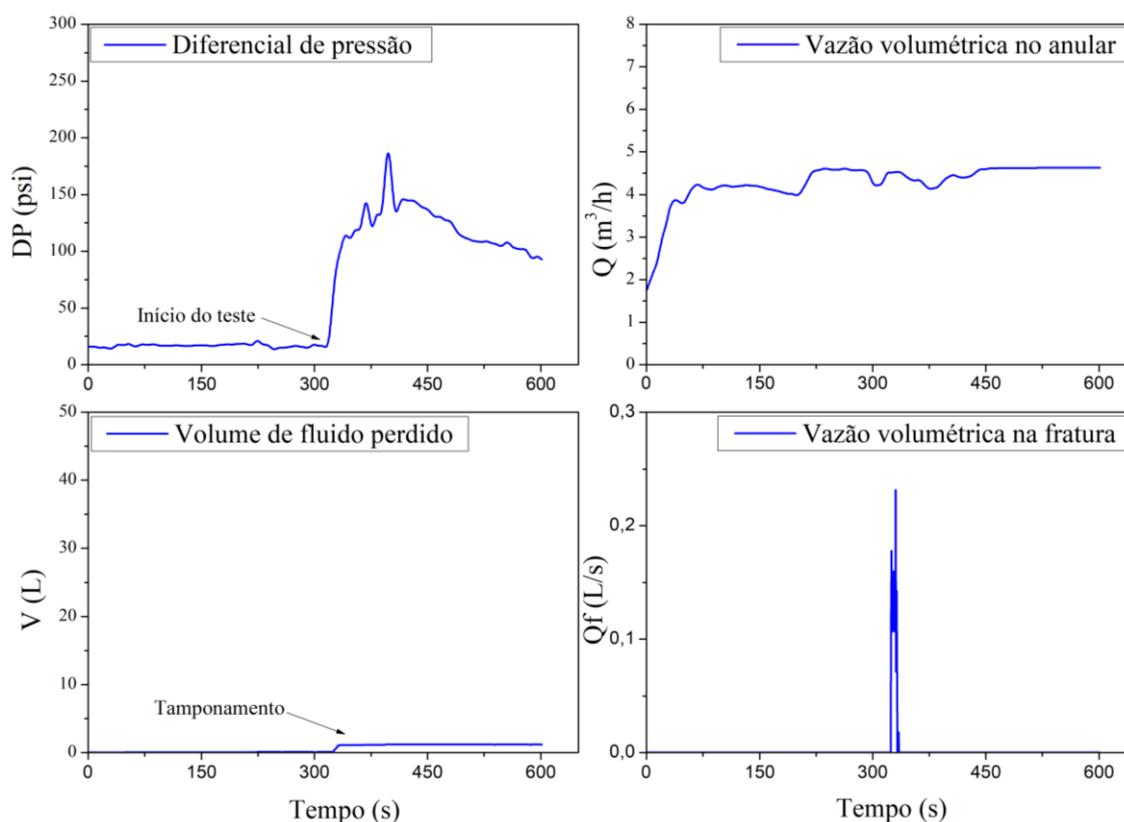


Figura 95. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM fibroso (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 10 mm.



Analisou-se o efeito do aumento da temperatura na efetividade do LCM fibroso, os resultados estão apresentados na Figura 96. O efeito da temperatura foi pronunciado para esse material, com o aumento da temperatura o volume de perdido encontrado foi de 1,19 litros. Mais que o dobro do valor encontrado para o teste a 25 °C. Entretanto, o material foi efetivo no selamento da fratura.

Figura 96. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o LCM fibroso (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 50 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 5 mm.



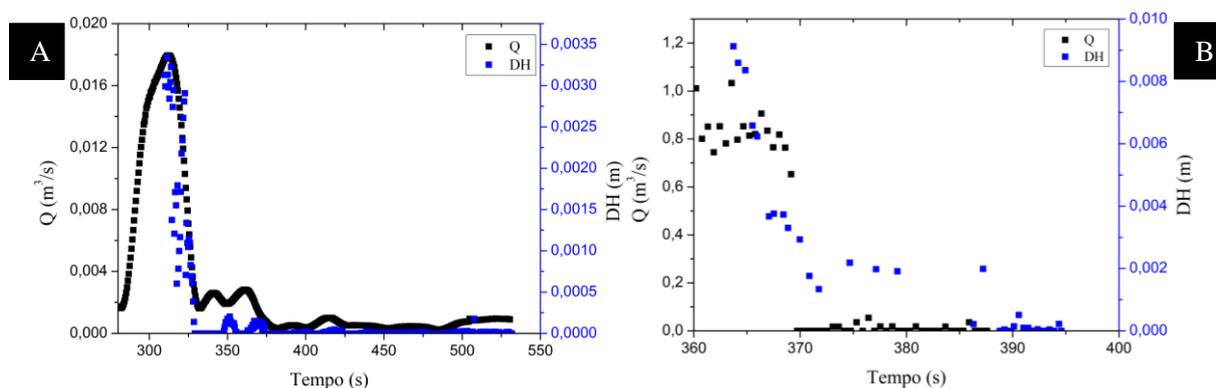
Na Figura 97 temos uma foto do interior da fratura de 5 mm após o teste de selamento do LCM fibroso. Ao observar a imagem, estão destacados os tampões formados pelo LCM. Analisando e comparando com os resultados encontrados em bancada, o LCM seguiu mecanismo por baixa invasão observado também em bancada. Os resultados encontrados para o LCM fibroso usado do presente trabalho, corroboram o encontrado na literatura, o material sela parcialmente as fraturas. Forma um meio filtrante que permite que as partículas menores passem para a formação e retém as partículas maiores até o selamento total das fraturas.

Figura 97. Fratura de 5 mm do SEF 2.0 após o teste de selamento do LCM fibroso.



Na Figura 98 estão apresentados os resultados do modelo do Borges Filho (2018) para monitorar o selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico. Para o LCM fibroso, observou-se o mesmo comportamento, a Equação (30) foi eficiente para acompanhar o selamento da fratura pelo cálculo do diâmetro hidráulico. Como observado, o modelo foi eficaz em prever o ponto de obstrução da fratura e início do selamento. Tornou possível acompanhar a diminuição do diâmetro hidráulico até próximo de zero na fratura de 5 mm e na fratura de 10 mm.

Figura 98. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o LCM fibroso no SEF 2.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.



4.3.2.3 Teste de selamento SEF 2.0: Blend 3

O Blend 3 foi testado dinamicamente no SEF 2.0, sob as mesmas condições dos materiais puros. As condições operacionais foram de 25 °C e 50 °C de temperatura e pressão diferencial do sistema de aproximadamente 100 psi. Os testes do Blend objetivaram analisar a qualidade, a efetividade do material proposto e a dinâmica em escoamento. As Figura 99 e Figura 100 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos para as fraturas de 5 e 10 mm. Os resultados de pressão diferencial, vazão volumétrica no anular, volume de fluido perdido e

vazão volumétrica na fratura. Analisando as Figura 99 e Figura 100 , as constâncias observadas no volume de fluido perdido foram traduzidas como selamento da fratura. O tempo de tamponamento para a fratura de 5 mm foi de 90 segundos e gerou o volume igual a 0,34 L de fluido. Para a fratura de 10 mm o tempo de tamponamento foi de 19 segundos e gerou o volume de fluido perdido de 7,63 litros.

Comparando com os resultados obtidos para os fluidos puros, o material apresentou melhor desempenho, no tempo de tamponamento e no volume perdido. O material foi mais eficiente para o selamento da fratura nos dois casos. O efeito do aumento da pressão contribuiu para o resultado obtido desse material.

Figura 99. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o *Blend 3* (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 5 mm.

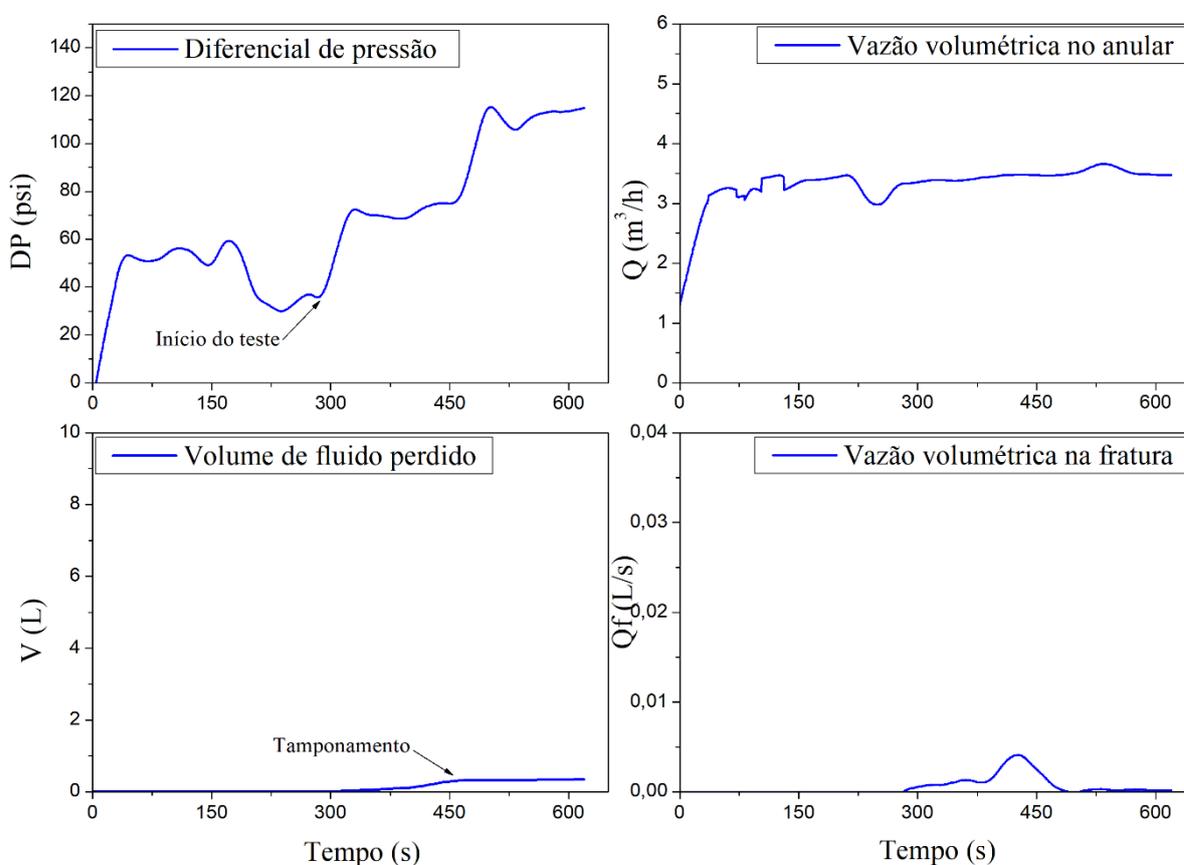
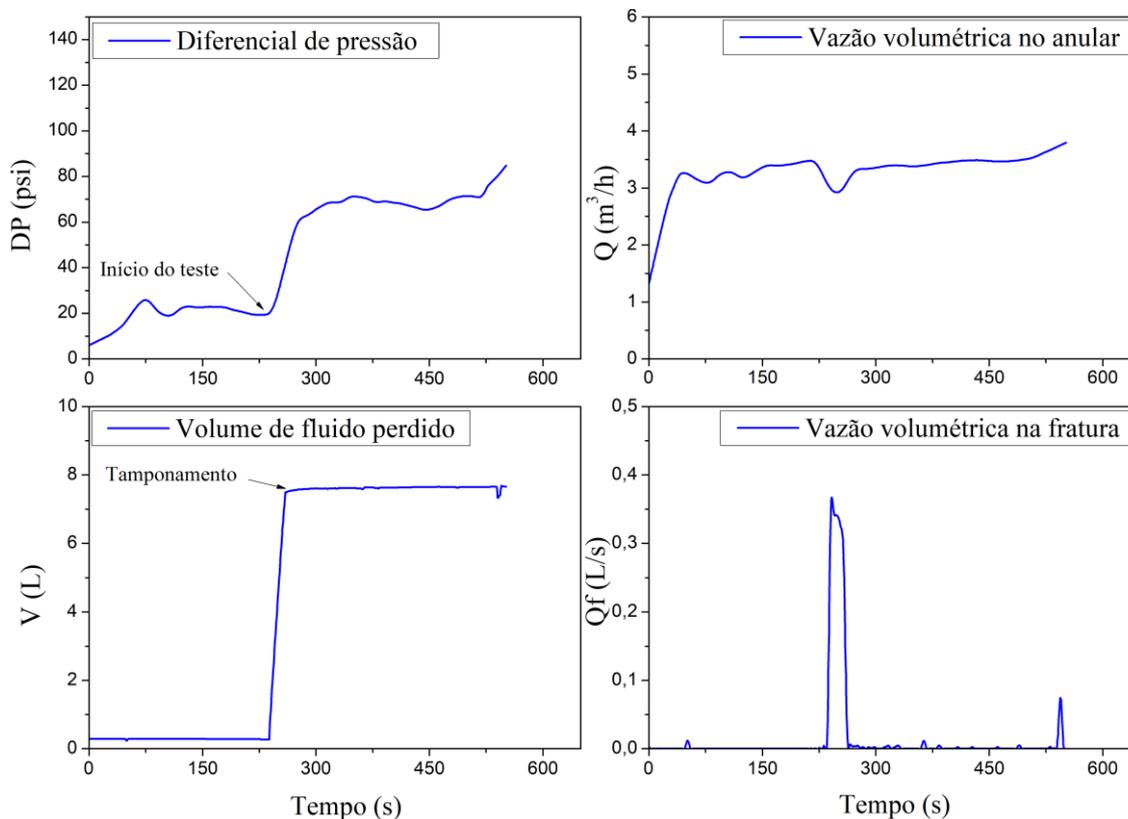


Figura 100. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o *Blend 3* (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 10 mm. Diferencial de pressão, vazão volumétrica no anular, volume de fluido perdido e vazão volumétrica na fratura.

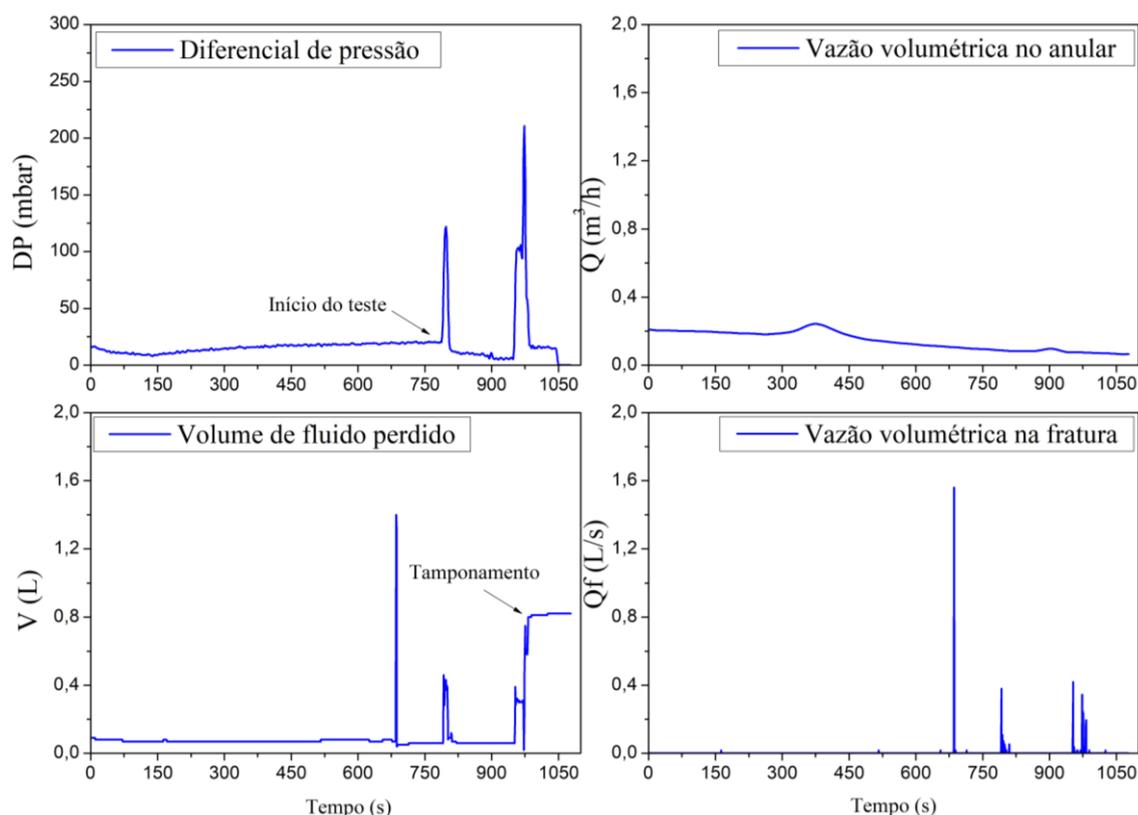


Assim como para os materiais puros, foram executados testes de escoamento do *Blend 3* a elevada temperatura. Os resultados de diferencial de pressão, vazão volumétrica no anular, volume de fluido perdido e vazão volumétrica na fratura estão apresentados na Figura 101. Ao aumentarmos a temperatura para 50 °C o resultado de volume de fluido perdido foi 0,82 litro. Os resultados no simulador corroboram os resultados da bancada, o efeito da temperatura foi pronunciado no SEF 2.0 gerando assim, maior volume de fluido perdido para fratura.

Apesar dos números serem pequenos, houve alteração do valor com o aumento da temperatura do sistema. Dessa forma, a temperatura e a pressão foram fatores significativos no volume de fluido perdido, assim como observados nos testes de bancada. Mesmo dinamicamente os efeitos foram pronunciados e tornou possível analisar os materiais e os equipamentos de formas distintas.

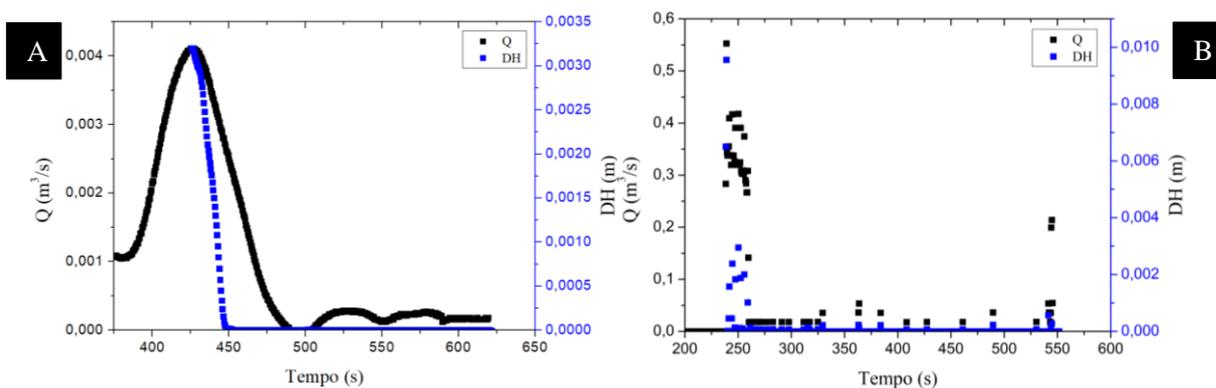
De maneira geral, o *Blend 3* apresentou o melhor desempenho na efetividade do selamento do material. Mesmo comparando aos valores encontrados para os materiais puros e no SEF 1.0. A mistura proposta, assim como na bancada, teve melhor maior eficiência no selamento das fraturas.

Figura 101. Aquisição de dados em tempo real no SEF 2.0 do teste de selamento usando o *Blend 3* (30 lb/bbl), fluido base goma xantana (2 lb/bbl), temperatura de 25 °C e diferencial de pressão de 100 psi na fratura de 10 mm.



Na Figura 102 estão apresentados os resultados obtidos para o acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico. Como dito anteriormente, utilizou-se a Equação (30) para o cálculo do diâmetro hidráulico. O modelo tornou possível prever o comportamento característico da diminuição do diâmetro hidráulico com o selamento da fratura. A curva preta representa os dados experimentais de vazão na fratura para o *Blend 3* e a curva azul corresponde ao diâmetro hidráulico calculado, considerando a reologia do fluido.

Figura 102. Acompanhamento do selamento da fratura pelo diâmetro hidráulico para o *Blend 3* no SEF 2.0. (A) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 5 mm. (B) Dados de diâmetro hidráulico e de vazão na fratura de 10 mm.



4.3.3 Comparação dos resultados dos Simuladores

Com base nos resultados obtidos, construiu-se a Tabela 13 que consta o comparativo dos resultados dos dois simuladores (SEF 1.0 e SEF 2.0). Os resultados fornecidos são do tipo de equipamento, tipo do material testado, fratura utilizada, volume perdido para fratura, se houve selamento e tempo de tamponamento. Viu-se a necessidade de comparar os resultados para facilitar o entendimento.

Os resultados foram usados nas seções anteriores para comparar o comportamento dos dois simuladores. Pode-se observar que os tempos de tamponamento foram superiores no SEF 1.0, devido a falta do efeito de colmatação gerado pelo aumento da pressão no sistema. Os resultados do volume foram menores para o SEF 1.0 que os volumes gerados pelo SEF 2.0. Esse fenômeno é explicado pela diferença de pressão nos dois equipamentos. Contudo, todos os materiais foram efetivos no processo de selamento das fraturas.

Tabela 13. Comparação dos resultados obtidos nos Simuladores de Escoamento em Fratura, versões 1.0 e 2.0 à temperatura ambiente.

Equipamento	Tipo	Fratura (mm)	Volume perdido (L)	Houve selamento?	Tempo de tamponamento (s)
SEF 1.0	LCM granular	5 mm	0,31	Sim	16
		10 mm	2,73		78
	LCM fibroso	5 mm	0,21	Sim	7
		10 mm	1,19		56
	<i>Blend 3 (75% LCM granular e 25% LCM fibroso)</i>	5 mm	2,82	Sim	73
		10 mm	3,13		86
SEF 2.0	LCM granular	5 mm	1,10	Sim	7
		10 mm	17,07		47
	LCM fibroso	5 mm	0,80	Sim	92
		10 mm	36,86		50
	<i>Blend 3 (75% LCM granular e 25% LCM fibroso)</i>	5 mm	0,34	Sim	90
		10 mm	7,63		19

Na Tabela 14 estão apresentados os resultados do efeito da temperatura no volume de fluido perdido no Simulador de Escoamento em Fraturas 2.0. Como citado anteriormente, a temperatura teve influência no volume de fluido perdido na bancada e no simulador. Como visto na tabela, mantendo as condições de processo e fratura, variando-se apenas a temperatura de teste, observou-se o aumento no volume de fluido perdido. Explicado pela diminuição da viscosidade e quebra das interações entre o fluido base e os LCM utilizados.

Tabela 14. Efeito da temperatura nos testes de escoamento no SEF 2.0. Pressão diferencial de 100 psi na fratura de 5 mm.

Equipamento	Tipo	Fratura (mm)	Temperatura (°C)	Volume perdido (L)	Houve selamento?
SEF 2.0	LCM granular	5 mm	25	1,10	Sim
		5 mm	50	4,62	
	LCM fibroso	5 mm	25	0,80	Sim
		5 mm	50	1,19	
	<i>Blend 3 (75% LCM granular e 25% LCM fibroso)</i>	5 mm	25	0,34	Sim
		5 mm	50	0,82	

5 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, utilizou-se quatro metodologias para categorizar e avaliar materiais de combate à perda de circulação fibroso e granular. Duas delas foram desenvolvidas estaticamente, teste de selamento de fenda e teste de filtração. As outras duas foram desenvolvidas dinamicamente nos simuladores físicos de escoamento em fratura. As quatro metodologias foram eficientes para testar os materiais de combate à perda e as misturas propostas e traçar uma caracterização robusta dos materiais selecionados e das misturas propostas.

Propôs-se a avaliação dos efeitos da temperatura, pressão e concentração no volume de filtrado e no volume de fluido perdido em função do tempo para os LCMs escolhidos. As concentrações foram selecionadas por apresentarem semelhança as concentrações encontradas no processo real. As composições dos *Blends* foram traçadas fixando a concentração de 30 lb/bbl, por ser uma concentração usada na literatura para fluidos com materiais de combate à perda de circulação. Observou-se que os volumes estudados, volume de filtrado e volume de fluido perdido, possuem dependência com os fatores analisados.

Uma abordagem estatística foi usada para caracterizar os materiais pelos efeitos e identificar as combinações que mais influenciam no volume de fluido perdido. Tornou possível a construção de um modelo preditivo para identificação dos pontos de máxima perda de fluido e de mínima perda de fluido. A partir dos resultados obtidos, conclui-se a visualização dos melhores pontos de operação dos materiais e a influência de cada efeito único ou combinado, no volume de fluido perdido para fenda. Nos testes de filtração observou-se a influência dos fatores do volume de filtrado e a capacidade de redução do volume de filtração.

Por meio de experimentos nas unidades piloto, foi possível avaliar a efetividade dos materiais de combate à perda de circulação e das misturas em diferentes condições de processo. Possibilitou então, traçar um comportamento característico para cada material e analisar as mudanças nas características do material com as variações de processo. Foram obtidos dados do fluido contendo os LCMs dinamicamente no SEF 2.0 a elevada temperatura de teste.

Referente à proposta de misturas dos materiais de estudo, observou-se que foram eficientes no selamento de fraturas e na redução de volume filtrado. Adicionalmente, os *Blends* apresentaram melhor desempenho mediante as variações elevadas de temperatura e pressão nas quatro metodologias. Com o uso do modelo de Borges Filho (2018), o monitoramento do

selamento da fratura com o diâmetro hidráulico, usando uma derivada temporal, foi calculado e acompanhado com os dados experimentais de vazão na fratura. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que a correlação foi válida e resulta no bom acompanhamento do selamento.

Avaliou-se também os mecanismos de selamento dos materiais nos simuladores e no teste de selamento e foi possível categorizar os materiais e as misturas propostas. De forma geral, observou-se que a temperatura teve grande influência no efeito no volume de fluido perdido e no volume de filtrado. Quanto maior a temperatura do sistema, maiores são as respostas de volume perdido. Sobre o efeito da pressão, observou-se que foi significativo principalmente nos dados dos simuladores, uma vez que gera selamentos com menor tempo de selamento. O *Blend 3* (75% LCM granular e 25% LCM fibroso) foi o material que menos sofreu influência do efeito da temperatura e pressão, mantendo o volume de fluido quase constante frente as variações das condições de processo. A pesquisa provou a eficiência da mistura e das metodologias usadas para caracterização dos materiais de combate à perda de circulação.

REFERÊNCIAS

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) 2004.

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., SAASEN, A., NES, O.-M. **Laboratory evaluation of sealing wide fractures using conventional lost circulation materials.** In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 27-29 October., 2014a.

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, 2014b.

APALEKE, A. S., AL-MAJED, A., HOSSAIN, M. E., **Drilling fluid: State of the art and future trend,** Society of Petroleum Engineers, Cairo, Egito, 2012.

API RP 13B-1, **Recommended practice for field testing water-based drilling fluids.** API recommended practice 13B-1, ANSI/API 13B-1/ISO 10414-1, Third Edition, Dezembro, 2003.

BAGERI, B. S., ADEBAYO, A. R. **Effect of perlite particles on the filtration properties of high-density barite weighted water-based drilling fluid.** Powder Technology, Saudi Arabia, v. 360, n. 1, p. 1157-1166, 2019.

BARNES, H. A., **A handbook of elementar rheology,** University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Department of Mathematics, University of Wales Aberystwyth, 2000.

BAO, D., QIU, Z., ZHAO, X., ZHONG, H., CHEN, J., LIU, J.. **Experimental investigation of sealing ability of lost circulation materials using the test apparatus with long fracture slot.** J. Petrol. Sci. Eng. 183, 106396, 2019.

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

BORGES, R. F. O. **Análise e estimação das propriedades de tortas de filtração de fluidos de perfuração não-newtonianos**. 2019. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Concentração em Tecnologia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2019.

BORGES FILHO, M. N. **Proposta de uma correlação para cálculo de perda de carga e diâmetro hidráulico no escoamento de suspensões e selamento de fraturas**. 2018. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Concentração em Tecnologia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2018.

BRANTLY, J. E. **History of oil well drilling, Houston**. Gulf Publishing Co, pp 38-39. Ibid., pp. 41-47. 1971.

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

CAENN, R., DARLEY, H. CH., GRAY, G. R. **Introdução aos fluidos de perfuração. Composição e propriedades dos fluidos de perfuração e completção**. pp 1-34. 2017.

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 operations**. Journal of Petroleum Science and Engineering 131 (2015) 1 – 10, 2015.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica**. 1. ed., Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003, 260p.

CAMPOS, A. F. **A Reestruturação da Indústria de Petróleo Sul Americana nos anos 90**. Tese de Doutorado, COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CHELLAPPAH, K., KUMAR, A., ASTON, M. **Drilling depleted sands: challenges associated with wellbore strengthening fluids**. 2015 SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2015.

CHERNY S.G; LAPIN V.N. **3D model of hydraulic fracture with Herschel-Bulkley compressible fluid pumping**. Procedia Structural Integrity Volume 2, p 2479-2486. 2016

CLASEN, C.; KULICKE, W. M. **Viscosimetry of Polymers and Polyelectrolytes**. Springer: Hamburgo, 2004.120p

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.

CONTRERAS, O., HARELAND, G., HUSEIN, M., NYGAARD, R., ALSABA, M. **Wellbore strengthening in sandstones by means of nonoparticles-based drilling fluids**. A paper presented at the SPE Deepwater drilling and completions conference, Galvestone, Texas, USA, 10–11 September, 2014.

DATWANI, A. **Review of lost circulation mechanisms with the focus on loss to natural and drilling induced fractures**. 2012. 80 f. Master of Engineering, Department Of Process Engineering And Applied Sciences, Dalhousie University, Nova Scotia, 2012.

DUARTE, S. B. J.; MENEZES, C.; FARROCO V.; SOBREIRA A.; CAFARO M.; LEITE R. A.; DE LIMA, L.; MELLO, S, GOMES F.; SÁ, M.; OLIVEIRA BERTO C. H.; BACKHEUSER, F. M.; LOUREIRO Y.; ANDRADE S.; WALDMANN, A. T.; FIORITI Lenita De Souza. **Uso de inteligência artificial para prever perdas severas de fluidos em carbonatos do pré-sal**. Artigo apresentado no SPWLA 59th Annual Logging Symposium, London, UK, June 2018.

DUQUE NETO, O. A. **Estudo do escoamento de suspensões e da perda de carga em fraturas**. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Concentração em Tecnologia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2015.

FANCHI, J. R., **Integrated reservoir asses management: principles and best practices**. Elsevier Inc., 2010.

FINGER, J.; BLANKENSHIP, D. **Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling** by Sandia National Laboratories. P.O. Box 5800 Albuquerque, New Mexico 87185, 2010.

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

GALEY, R. L., GRANT, L. S., SCHEIBAL, J. R., WIESENECK, J.B., HALE, A.H., EGAN, M. E., JAPAR, N. J., VAN DER HAAK, A. L. M. **Increasing formation strength through the use of temperature and temperature coupled particulate to increase near borehole hoop stress and fracture gradients**. Applicant: Shell oil company, Houston, TX (US). US9580967B2. Date of Patent: feb, 2017.

GOMAA, I., ELKATATNY, S., ABDULRAHEEM, A. **Real-time determination of rheological properties of high over-balanced drilling fluid used for drilling ultra-deep gas wells using artificial neural network.** Journal of Natural Gas Science and Engineering. Department of petroleum Engineering, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, 2020.

GODOI, F., SCHEID, C., BERNARDO, L., DE OLIVEIRA, B., BORGES FILHO, M., CALÇADA, L.. **Study of the pressure drop and the flow of loss circulation material suspensions in a physical simulator of fractures.** J. Petrol. Sci. Eng. 168, 48–58, 2018.

GUILHERME, I. R., MARANA, A. N., PAPA, J. P., CHIANHIA, G, AFONSO, L. CS., MIURA, K, FERREIRA, M. VD, TORRES, F. **Petroleum well drilling monitoring through cutting image analysis and artificial intelligence techniques.** Engineering Applications of Artificial Intelligence. Oxford: Pergamon-Elsevier B.V. Ltd, v. 24, n. 1, p. 201-207, 2011.

GPCPETRON, 2011. **Global petroleum Consulting & trading limited.** Disponível em: <http://gpcpetro.com/>. Acesso em: fevereiro, 2020.

HALLIBURTON, 2014. **Products Data Sheet.** Disponível em: <http://www.halliburton.com/en-US/ps/baroid/default.page?node-id=hg4zbf6>. Acesso em: janeiro. 2020.

HUITT, J.L. **Fluid flow in simulated fractures** AIChE Journal. Junho 1956.

HOWARD, G.C.; SCOTT, P.P. **An Analysis of the Control of Lost Circulation.** SPE-951171-G. Journal of Petroleum Technology, v. 3, No. 6, p. 171-182, 1951.

HOWSTUFFWORKS, 2011. **How Oil Drilling Works.** Disponível em: <https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/oil-drilling4>. Acesso em: fevereiro, 2021.

IVANOV, A.; SLAVICH, V.; KHARITONOV, A.; LISCHUK, V.; GNATIV, V.; MUKHAMETZYANOV, I. **Engineered Solution Helps Cure Total Losses in Bashkortostan, Russia.** Society of Petroleum Engineers, p. 1–5, 2016.

JAFFAL, H. A., EL MOHTAR, C. S., GRAY, K. E., **Modeling of filtration and mudcake buildup: An experimental investigation.** Journal of Natural Gas Science and Engineering, v.38, p.1-11, 2017.

KAAGESON-LOE, N., SANDERS, M.W., GROWCOCK, F., TAUGBOL, K., HORSRUD, SINGELSTAD, A.V. AND OMLAND, T.HI. **Particulate Secrets of Fracture Sealing Revealed!** SPE 112595, IADC/SPE Drilling Conference, Orlando, Florida, 2008.

KLIMCZAK, C., SCHULTZ, R.A., PARASHAR, R. *et al.* **Cubic law with aperture-length correlation: implications for network scale fluid flow.** Hydrogeology Journal. v.18, p. 851-862, 2010.

KUMAR, A.; SAVARI S; DALE E. JAMISON, AND DONALD L. Whitfill, Halliburton **Application of Fiber Laden Pill for Controlling Lost Circulation in Natural Fractures.** AADE-11-NTCE-19, AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 2011.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos: Ênfase na indústria de petróleo.** Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2002.

MACOSKO, C. W., **Rheology: Principles, measurements and applications,** Wiley-VCH, Inc., USA, 1993.

MAGALHÃES, S., CALÇADA, L. A., SCHEID, C. M., VALIM, E., ARAGÃO, A., WALDMANN, A., LEIBSOHN, A. **Development of qualitative and quantitative techniques for the evaluation of agents obtained without combating the loss of circulation in oil wells.** Current state of the art and horizons. In: ENAHPE 2019, Serra Negra, São Paulo 005, 2019.

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

MCCABE, W.L., SMITH, J.C., HARRIOT, P., **Unit operations of Chemical Engineering,** fifth edition, McGraw-Hill, U.S., 1993.

MELLOT, J., **Technical Improvements in Wells Drilled with a Pneumatic Fluid,** SPE paper 99162, SPE/IDAC Drilling Conference, Miami, Florida, USA, 21-23, 2008.

M-I SWACO. **Fracture Studies Joint Industry Project (JIP),** 2004-2006.

MILLER, M. L.; SCORSONE, J. T.; WHITFILL, D. L. **Development of Unique Equipment and Materials with Field Applications to Stop Severe Lost Circulation.** In: AADE-13-FTCE-17, AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 2013.

MURCHISON, W.J. **Lost Circulation for the Man on the Rig**. Murchison Drilling Schools, Inc. 2006.

MUSAED N.J. A., FATTAH K.A. A. **Superior fracture seal material using crushed dates palm seeds for oil and gas well drilling operations**. In: Received in Nov. 20, 2016, Published in J. of King Saud Univ., Eng. Sci., Volume #31, p. 97-103, 2019.

NASIRI, A.; GHAFFARKHAH, A.; DIJVEJIN, Z. A.; MOSTOFI, M.; MORAVEJI, M. K. **Bridging performance of new eco-friendly lost circulation materials**. Petroleum exploration and development, v. 48, p. 1154-1165, 2018.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Placas de aquisição e controle**. Disponível em: www.ni.com/pt-br.html. Acesso em: 16 de setembro de 2021.

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, 1986.

NYGAARD, G.; NÆVDAL, G., **Nonlinear model predictive control scheme for stabilizing annulus pressure during oil well drilling**, Journal of Process Control, v.16, p.719-732, 2006.

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

OLIVEIRA, B. R., LEAL, B. C., FILHO, L. P., BORGES, R. F. O, PARAÍSO, E. C. H., MAGALHÃES, S. C., ROCHA, J. M., CALÇADA, L. A., SCHEID, C. M., 2021. **A model to calculate the pressure loss of Newtonian and non-Newtonian fluids flow in coiled tubing operations**. Journal of Petroleum Science and Engineering 204, 108640.

OLSON, J. E. **Sublinear scaling of fracture aperture versus length: an exception or the rule?** Journal of geophysical research. V.108(B9), p.2413, 2003.

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.

RAVEN K.G., GALE J. E. **Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size**. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v.22 (4) p. 251–261, 1985.

ROCHA, L. A. S.; AZUAGA, D; ANDRADE, R.; VIEIRA, J. L. B.; SANTOS, O. L. A. **Perfuração direcional**. Rio de Janeiro: Editora Interciência: PETROBAS: IBP, 2011.

ROSSEN W.R; KUMAR A.T.A. **Single and Two-Phase Flow in Natural Fractures**. 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. Washington, DC. Outubro, 1992.

SERRA, A. C. S. **A influência de aditivos de lama de perfuração sobre as propriedades geoquímicas de óleos**. 2003. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), COPPE/UFRJ, 2003.

THOMAS, J. E. **Fundamentos da Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

WALDMANN, A.T.A.; LIMA, V. A. R. M. P.; SOUZA, E. A.; D'ALMEIDA, A. R.; TEIXEIRA, G. T.; SCHEID, C. M.; CALÇADA, L. A.; GERACI, A. C. M.; DUQUE NETO, O. A. e MAGALHÃES, S. **Efforts to Control Fluid Losses in Offshore Drilling**. In: AADE-14-FTCE-26. **AADE National Technical Conference**, Houston, USA, 2014.

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.

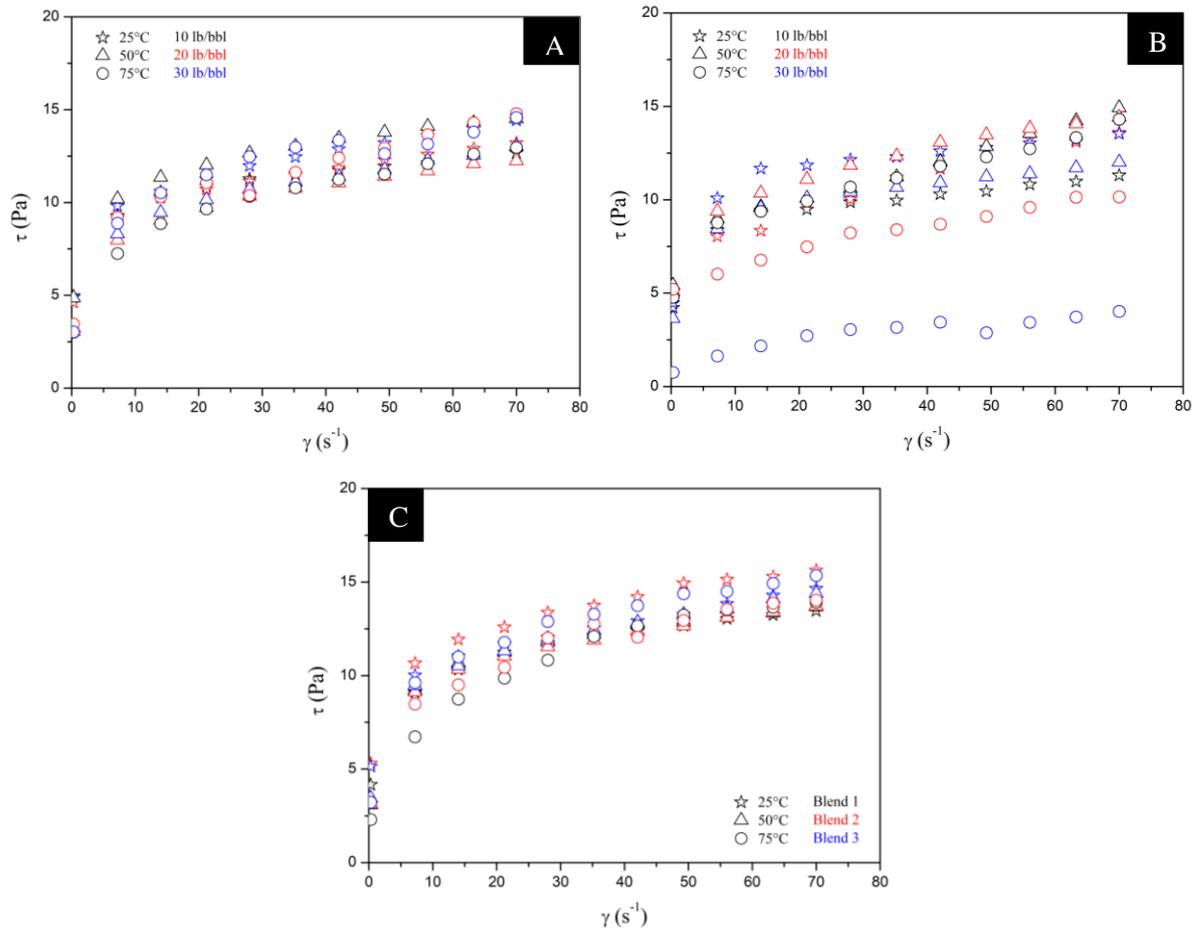
WANG, H. M. **Is it really possible to efficiently form a strong seal inside subterranean openings without knowing their shape and size?** American Association of Drilling Engineers. Houston, Texas, USA.12-14, 2011.

WATANABE, N., HIRANO, N., TSUCHIA, N. **Determination of aperture structure and fluid flow in a rock fracture by high-resolution numerical modeling on the basis of a flow-through experiment under confining pressure**. water resources research, v. 44, 06412, 2008.

WITHERSPOON P. A.; J. S. Y; WANG, K. IWAI; J. E. GALE **Validity of Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture**. water resources research, vol. 16, no. 6, p. 1016-1024, 1980.

APÊNDICE A - CURVAS DE ESCOAMENTO PARA TODOS OS FLUIDOS TESTADOS

Figura 103. Curvas de escoamento das suspensões dos LCM em diferentes concentrações e temperatura. Onde: (A) LCM granular, (B) LCM fibroso e (C) blends.



APÊNDICE B - CURVAS DE ESCOAMENTO PARA TODOS OS FLUIDOS TESTADOS E AJUSTE PELO MODELO DA POTÊNCIA

Figura 104. Curvas de escoamento para diferentes concentrações e temperatura do LCM granular a (A) 25°C, (B) 50°C e (C) 75°C (dados experimentais e ajuste do Modelo *Power-Law*).

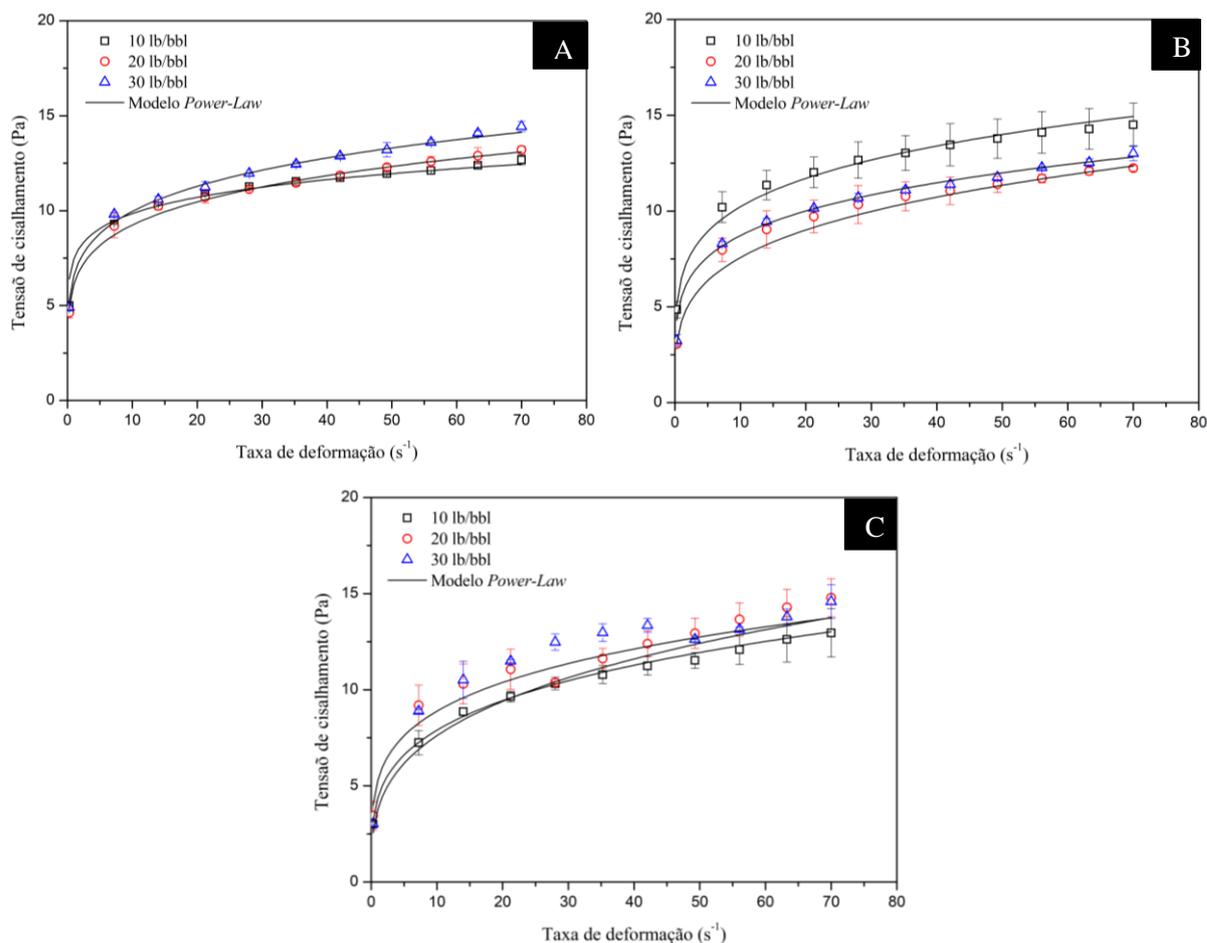
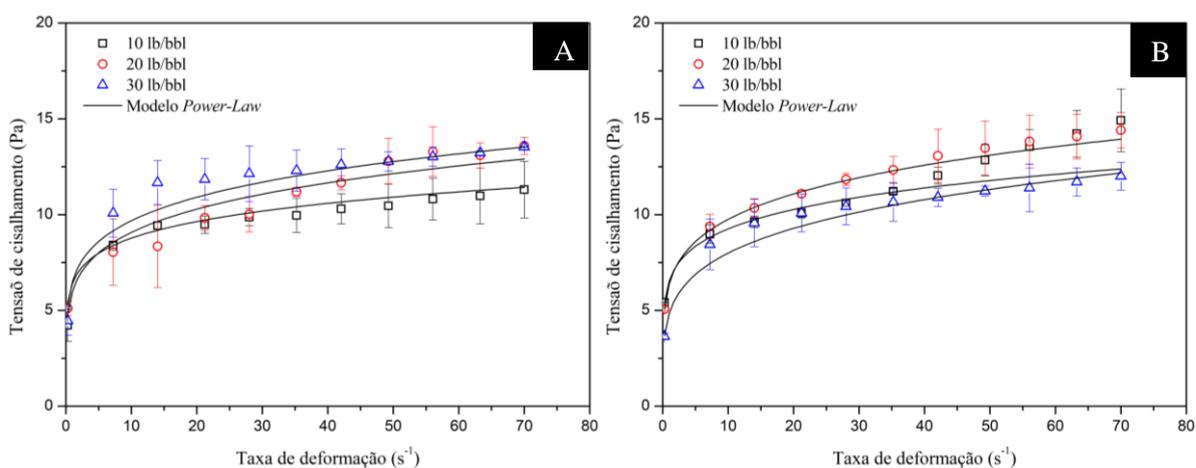


Figura 105. Curvas de escoamento para diferentes concentrações e temperatura do LCM fibroso a (A) 25°C, (B) 50°C e (C) 75°C (dados experimentais e ajuste do Modelo *Power-Law*).



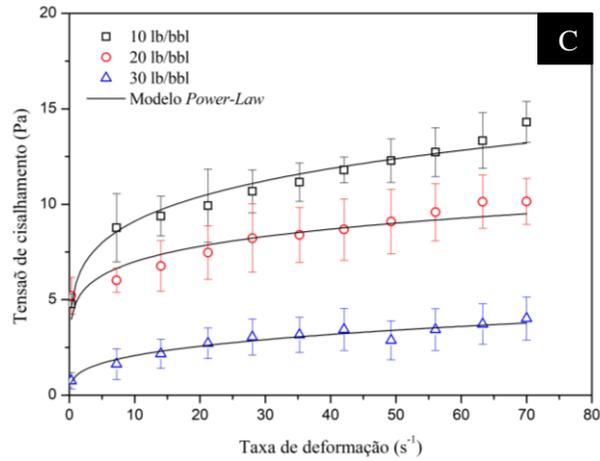
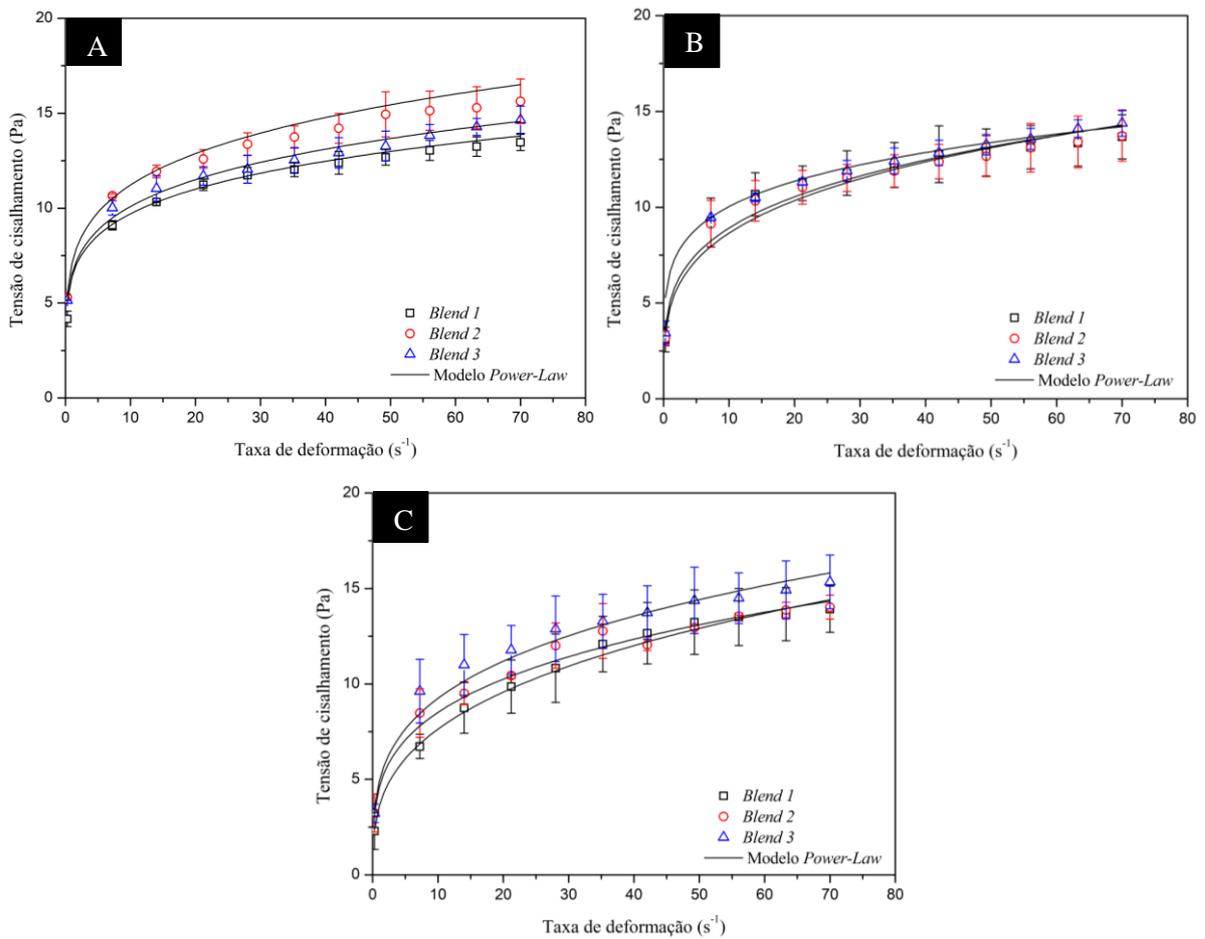


Figura 106. Curvas de escoamento para diferentes composições e temperatura dos *Blends* a (A) 25°C, (B) 50°C e (C) 75°C (dados experimentais e ajuste do Modelo *Power-Law*).



APÊNDICE C - RESULTADOS DE VOLUME FINAL DE FILTRADO DOS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

Tabela 15. Volumes de filtrado encontrados nos ensaios de filtração.

Tipo	Concentração (lb/bbl)	Pressão (psi)	Volume (mL)		
			Temperatura (°C)		
			25	50	75
LCM Granular	10	300	12,10	13,87	23,04
	20		10,53	12,35	18,77
	30		13,45	15,37	19,90
	10	500	18,71	16,99	23,37
	20		13,34	9,95	22,38
	30		12,03	18,74	20,31
	10	700	15,27	17,06	21,33
	20		15,43	20,13	22,15
	30		18,18	23,05	25,96
	20	500	20,27		
			19,76		
			17,87		
LCM Fibroso	10	300	58,87	72,09	77,19
	20		41,10	49,02	48,55
	30		35,23	40,78	37,76
	10	500	56,86	87,91	139,45
	20		54,58	59,49	54,34
	30		14,25	41,99	69,36
	10	700	78,55	64,62	309,48
	20		51,83	55,17	108,31
	30		30,57	50,24	59,63
	20	500	46,42		
			43,39		
			44,21		
Blends	<i>Blend 1</i>	300	13,28	9,69	20,49
	<i>Blend 2</i>		13,76	15,76	19,11
	<i>Blend 3</i>		12,22	19,05	15,12
	<i>Blend 1</i>	500	12,56	15,32	19,70
	<i>Blend 2</i>		14,96	16,01	19,03
	<i>Blend 3</i>		14,59	17,91	22,84
	<i>Blend 1</i>	700	13,81	17,42	20,48
	<i>Blend 2</i>		14,70	20,12	15,31
	<i>Blend 3</i>		14,69	16,33	20,41
	<i>Blend 2</i>	500	17,21		
			16,31		
			18,06		

APÊNDICE D - RESULTADOS DE VOLUME DE FLUIDO PERDIDO NOS ENSAIOS DE SELAMENTO DE FENDA

Tabela 16. Volumes de fluido perdido encontrados nos ensaios de selamento de fenda.

Tipo	Concentração (lb/bbl)	Pressão (psi)	Volume (mL)		
			Temperatura (°C)		
			25	50	75
LCM Granular	10	300	26,94	48,67	127,97
	20		19,95	26,17	79,92
	30		11,84	17,04	43,92
	10	500	11,72	36,56	60,70
	20		5,98	10,59	16,09
	30		3,44	8,94	11,05
	10	700	9,97	29,23	46,20
	20		8,20	12,05	49,50
	30		0,42	7,90	45,01
	20	500	37,75		
			26,65		
			22,66		
LCM Fibroso	10	300	134,99	307,79	342,74
	20		185,47	268,20	279,31
	30		41,13	254,75	240,91
	10	500	222,48	311,36	339,47
	20		221,78	307,28	291,41
	30		202,98	205,90	72,43
	10	700	140,78	241,36	351,56
	20		191,90	268,15	263,28
	30		210,89	145,39	282,25
	20	500	293,12		
			260,21		
			307,28		
Blends	<i>Blend 1</i>	300	57,22	60,68	71,34
	<i>Blend 2</i>		12,14	7,29	4,02
	<i>Blend 3</i>		2,57	2,89	0,90
	<i>Blend 1</i>	500	61,30	59,26	8,74
	<i>Blend 2</i>		72,25	5,86	4,01
	<i>Blend 3</i>		8,24	3,48	0,94
	<i>Blend 1</i>	700	7,24	21,33	14,73
	<i>Blend 2</i>		10,55	4,16	2,20
	<i>Blend 3</i>		0,56	1,29	4,95
	<i>Blend 2</i>	500	37,75		
			26,65		
			22,66		