

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

DISSERTAÇÃO

**PROPOSTA DE UMA CORRELAÇÃO PARA CÁLCULO DA PERDA DE
CARGA E DIÂMETRO HIDRÁULICO NO ESCOAMENTO DE SUSPENSÕES
E SELAMENTO DE FRATURAS**

MOACYR NOGUEIRA BORGES FILHO

Seropédica, RJ
Setembro de 2018



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

**PROPOSTA DE UMA CORRELAÇÃO PARA CÁLCULO DA PERDA DE
CARGA E DIÂMETRO HIDRÁULICO NO ESCOAMENTO DE SUSPENSÕES
E SELAMENTO DE FRATURAS**

MOACYR NOGUEIRA BORGES FILHO

Sob a Orientação de

Luís Américo Calçada

e Co-orientação de

Cláudia Miriam Scheid

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Química**, no curso de pós-graduação em Engenharia Química, área de concentração em Tecnologia Química.

Seropédica, RJ
Setembro de 2018

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

B733p Borges Filho, Moacyr Nogueira, 1992-
 PROPOSTA DE UMA CORRELAÇÃO PARA O CÁLCULO DA
PERDA DE CARGA E DIÂMETRO HIDRÁULICO NO ESCOAMENTO
DE SUSPENSÕES E SELAMENTO DE FRATURAS / Moacyr
Nogueira Borges Filho. - 2018.
 127 f.: il.

 Orientador: Luis Américo Calçada .
 Coorientadora: Cláudia Miriam Scheid.
 Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Mestrado em Engenharia
Química , 2018.

 1. Modelagem de escoamento em fraturas. 2.
Fluidos não newtonianos. 3. Materiais de Combate a
perda de circulação . 4. Selamento de fraturas. I.
Calçada , Luis Américo , 1966-, orient. II. Scheid,
Cláudia Miriam , 1968-, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Mestrado em
Engenharia Química . IV. Título.

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

MOACYR NOGUEIRA BORGES FILHO

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Química**, no curso de pós-graduação em Engenharia Química, área de concentração em Tecnologia Química.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 14/09/2018

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

Ricardo Pires Peçanha, D.Sc., EQ/UFRRJ

João Paulo Francisco, D.Sc., DE/UFRRJ

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente minha mãe Elina Maria de Freitas, pela dedicação e amor durante toda minha vida. Seu constante incentivo e suporte foram essenciais para que conseguisse concluir mais uma etapa na realização dos meus objetivos. Agradeço a meu padrasto, Joanair Ribeiro de Almeida, pelo pronto suporte sempre que precisei e por ser um exemplo de sempre buscar o aprimoramento profissional.

Obrigado ao meu orientador Luís Américo Calçada, pela oportunidade de trabalho no LEF, por estar sempre disposto a compartilhar seu conhecimento e me ajudar na caminhada da vida acadêmica desde os anos de iniciação científica até a conclusão do mestrado. Sua orientação será sempre lembrada como uma marcante e positiva influência na minha formação profissional.

Agradeço à equipe do LEF, começando pela professora co-orientadora dessa dissertação Cláudia Míriam Scheid que sempre, juntamente com o professor Calçada, esteve pronta a me ajudar nas questões acadêmicas. Obrigado aos engenheiros do LEF Sérgio Magalhães Filho, Eduardo Paraíso e Gabrielle Fontella, e ao técnico em eletrotécnica, senhor Elias Pacheco, por toda a valiosa ajuda durante o projeto de mestrado.

Obrigado aos meus amigos e companheiros que estiveram ao meu lado, sempre me apoiando durante os anos de rural, sempre. Em especial dentre tantos Leonardo Ferreira, Marcello Souza e Matheus Bessa.

RESUMO

Borges Filho, Moacyr Nogueira. **Proposta de uma correlação para cálculo da perda de carga e diâmetro hidráulico no escoamento de suspensões e selamento de fraturas**. 2018. 101p Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2018.

Durante a perfuração de poços de petróleo e gás natural é comum que fraturas sejam encontradas nas paredes do poço que está sendo perfurado. Sejam naturais ou artificiais tais fraturas permitem que o fluido de perfuração escoe para dentro da formação rochosa, num fenômeno chamado de perda de circulação. A perda de fluido para a formação gera prejuízos financeiros para operação, além de por em risco a integridade estrutural do poço de petróleo. Para que esse problema seja combatido, é necessário que o processo de escoamento em fratura seja estudado e que métodos para mitigar a perda de circulação sejam desenvolvidos. Neste trabalho foi realizado um estudo experimental e teórico com o objetivo de propor correlações entre a queda de pressão e a vazão de fluido em fraturas. Um simulador de escoamento foi utilizado para obter dados de queda de pressão e a vazão de fluido não newtonianos em canais fraturados com abertura de 2 mm, 5 mm e 10 mm e comprimento de 1,02 m. Um material selante sólido composto de polímeros e borato (LCM) foi adicionado aos fluidos para que se estudasse o comportamento do selamento de fraturas. Para os materiais empregados nos experimentos foram determinadas a distribuição granulométrica, densidade e comportamento reológico. Os fluidos formulados tiveram comportamento de Herschel-Bulkley, os materiais selantes sólidos apresentam distribuição granulométrica bimodal. Dados oriundos dos testes de caracterização em conjunto com os dados do simulador foram utilizados para propor uma correlação entre a queda de pressão e vazão em fraturas. Esses dados também foram utilizados no desenvolvimento de uma técnica para monitorar o selamento de fraturas pelo cálculo do diâmetro hidráulico no decorrer do tempo. A suspensão selante passou por testes de filtração em alta pressão para avaliar os efeitos do LCM no volume de filtrado e na torta de filtração. A correlação proposta entre a queda de pressão e a vazão de fluido em fraturas foi capaz de descrever o escoamento em fraturas com baixo desvio experimental. A proposta de monitoramento do selamento foi capaz de calcular o diâmetro hidráulico da fratura durante a ação do material selante. Os testes de filtração mostraram que o LCM possui características de um redutor de filtrado.

Palavras chaves: Fluido de perfuração, materiais de combate a perda de circulação, material a base de borato e polímeros, selamento de fraturas.

ABSTRACT

Borges Filho, Moacyr Nogueira. **Proposal of a correlation for calculation of pressure drop and hydraulic diameter in the drainage of suspensions and sealing of fractures**. 2018. 101 p. Thesis (Master of Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2018.

During drilling operations it is usual to find natural or artificial fractures on the wellbore; these fractures allow the drilling fluid to flow into the rock formation. This phenomenon is called loss of circulation and it increases cost of the operation and may threaten the structural integrity of the well. In order to combat this problem it is necessary to understand the flow of fluids through fractures and develop methods to mitigate the loss of circulation. This work proposes a new model for correlation between the pressure drop and the volumetric flow of fluid through fractures. A physical simulator was used to collect experimental fluid flow and pressure drop data in fracture with 2, 5, 10 mm of aperture and 1,02 m long. A LCM made of a mixture of polymers and calcium borax was added to the fluids to study the sealing of fractures. Density, rheological behavior, composition and particle size test were performed to characterize the studied materials. The lost circulation material had bimodal particle size distribution and the formulated fluids had a Herschel-Bulkley rheological behavior. Experimental flow and characterization data were used to propose a correlation between pressure drop - volumetric flow and to develop a new methodology to monitor the sealing of fractures by calculating the decrease of hydraulic diameter throughout their healing. The suspension with lost circulation materials went through filtration tests to observe the effects of sealing particles on the mud cake and filtrate volume. The proposed correlation pressure drop and volumetric flow was able to model the flow of fluids through fractures with low experimental deviation. The methodology to monitor fracture sealing was able to calculate the hydraulic diameter and the filtration tests showed that the lost circulation material particles are filtration control agents.

Keywords: Drilling fluid, lost circulation materials, borate and polymer mixture, fracture sealing.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E UNIDADES

WSM- Materiais de fortalecimento de poço (*wellbore strengthening materials*);

LCM- Materiais de combate a perda de circulação (*lost circulation materials*);

SEF- Simulador de escoamento em fraturas;

GX- Goma Xantana;

CMC- Carboximetilcelulose;

FRX- Fluorescência de raios-X

PB- Material de combate a perda de circulação a base de polímero e borato;

Cf- Carbonato de cálcio laminar fino;

Cm- Carbonato de cálcio laminar médio.

Unidades

m – metro;

lb – libras;

bbl – barril;

Pa – Pascal;

s – segundo;

min – minuto;

kg – quilograma;

L – litro

LISTA DE SÍMBOLOS

Caracteres Latinos

C- Constante utilizada por Witherspoon

D-Diâmetro da tubulação (m)

D₁-Diâmetro externo do anular

D₂-Diâmetro interno do anular

D_H- 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.);

g_c – Fator de conversão massa/força (N/kg).

H- Largura da fratura (m);

h- Metade da largura da fratura (m);

h_e – Abertura equivalente (m);

H_{eff} – Espessura efetiva da fratura (m);

h_{eff}– 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;

Re_H - Número de Reynolds na fratura (adim.);

<v>: Velocidade média de escoamento do fluido (m/s);

w- Espessura da fratura (m);

ΔH- Perda de carga na fratura (m);

Caracteres Gregos

- 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/m^3);
- τ - Tensão de cisalhamento (Pa);
- τ_0 - Tensão crítica (Pa);
- ϕ - Tortuosidade da fratura (adim);

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de circulação do fluido de perfuração, Fonte: Machado 2002.....	3
Figura 2. Perda de circulação, adaptada de gpcpetro	4
Figura 3. Zonas de perda de circulação, A: fraturas naturais, B: Fraturas induzida, C: formações cavernosas. D: formações não consolidadas. FONTE: HOWARD, 1951.....	6
Figura 4. Tipos de LCMs: A- Fibroso; B: Granular C: Flocos; D: Mistura. Fonte: A/D: Tirupatí Enterprises, C/D Alsaba, 2014.	10
Figura 5. Modelos reológicos. Fonte: MONTGOMERY	13
Figura 6. Tipos de Fraturas.....	16
Figura 7. Queda de pressão e vazão em fratura de 10 mm, fonte: Duque Neto (2015).	20
Figura 8. Fenda afunilada para o teste de selamento, Fonte: Kumar (2011).....	23
Figura 9 Tampão formado na fenda por ação do LCM, Fonte: Kumar (2011).	24
Figura 10. Suspensão de partículas de LCM em diferentes fluidos, Fonte: Kulkami (2011).	26
Figura 11. Simulador de escoamento em fratura, fonte: Duque Neto (2015).	26
Figura 12. Ação selante do material de combate a perda de circulação.....	27
Figura 13. Curvas de fluxo das suspensões de Goma Xantana e Soluflake, Fonte: Godoi (2017).	28
Figura 14. Selamento de uma fratura de 2mm em diferentes concentrações de LCM, Fonte: Godoi (2017)	29
Figura 15. Equipamento utilizado para estudar a distribuição granulométrica do LCM.	33
Figura 16 Balança de Fluido Fann, Fonte: Fann (2017).....	34
Figura 17 Reômetro utilizado para o estudo da reologia dos fluidos.	35
Figura 18 Cilindros coaxiais utilizados na reometria.	35
Figura 19 Esquema da unidade experimental.....	36
Figura 20 Tanque de mistura e agitação.....	37
Figura 21 Bomba de deslocamento positivo, Fonte: Autoria Própria.	37
Figura 22 Inversor de frequência, Fonte: Godoi 2017.	38
Figura 23 Simulador de Escoamento em fratura, Fonte: Duque Neto (2015).....	39
Figura 24 Transdutor de pressão, Fonte: Smar 2017.....	40
Figura 25 Balança de piso digitron, Fonte: Godoi (2017).....	42
Figura 26 - Relação entre vazão de água na fratura e rotação da bomba.	43
Figura 27. Unidade utilizada nos testes de filtração em alta pressão; (A)- Cilindro de nitrogênio, (B)- Filtro de alta pressão.....	48
Figura 28 Célula de filtração e equipamentos auxiliares.....	49

Figura 29. Distribuição granulométrica do LCM	50
Figura 30 Curvas de fluxo das suspensões de LCM em diferentes concentrações.	54
Figura 31 Relação entre a queda de pressão e vazão em fratura para água industrial....	54
Figura 32. Relação entre a queda de pressão e vazão em fratura para goma xantana. ...	55
Figura 33. Relação entre a queda de pressão e vazão em fratura para o CMC.	56
Figura 34. Relação entre a queda de pressão e vazão em fratura para suspensão de goma xantana e LCM.	56
Figura 35. Queda de pressão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 4. ...	57
Figura 36. Dados de vazão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 4.	58
Figura 37. Queda de pressão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 5. ...	59
Figura 38. Dados de vazão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 5.	59
Figura 39. Queda de pressão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 6. ...	60
Figura 40. Dados de vazão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 6.	60
Figura 41. Queda de pressão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 7. ...	61
Figura 42. Dados de vazão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 7.	62
Figura 43 Comparação dos dados de queda de pressão para diferentes fluidos durante o selamento da fratura de 10 mm.	64
Figura 44 Comparação dos dados de vazão na fratura para diferentes fluidos durante o selamento da fratura de 10 mm.	64
Figura 45 Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para o fluido 3. 65	65
Figura 46. Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para o fluido 9.	66
Figura 47. Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para o fluido 4.	67
Figura 48 Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para a suspensão de goma xantana e carbonato laminar fino (5 lb/bbl), Fonte: Godoi (2017). 67	67
Figura 49 Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para a suspensão de goma xantana e carbonato laminar fino (15 lb/bbl), Fonte: Godoi (2017).	68
Figura 50. Acompanhamento do selamento em fratura pelo carbonato laminar fino: Dados de vazão de escoamento na fratura de 10 mm, Fonte: Godoi (2017); Diâmetro hidráulico calculado pela equação 41.	70
Figura 51. Acompanhamento do selamento em fratura pelo carbonato laminar médio : Dados de vazão de escoamento na fratura de 10 mm, Fonte: Godoi (2017); Diâmetro hidráulico calculado pela equação 41.	71
Figura 52. Acompanhamento do selamento em fratura pelo carbonato laminar médio: Dados de vazão de escoamento na fratura de 5 mm, Fonte: Godoi (2017); Diâmetro hidráulico calculado pela equação 41.	71

Figura 53. Acompanhamento do selamento em fratura pelo carbonato laminar médio : Dados de vazão de escoamento na fratura de 2 mm, Fonte: Godoi (2017);Diâmetro hidráulico calculado pela equação 41.....	72
Figura 54. Volume de filtrado obtidos na filtração das suspensões de LCM em diferentes concentrações.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Exemplos de LCMs Comerciais, FONTE: DUQUE NETO, 2015	11
Tabela 2. Equações de modelos reológicos	14
Tabela 3. Equações para abertura equivalente de fraturas. Fonte: Sarkar (2014)	17
Tabela 4. Modelos de fator de atrito e vazão. Fonte: Narzidoust (2006), Crandall (2010).	18
Tabela 5. Equações de Reynolds para os diferente modelos reológicos. Fonte: Madlener (2009)	22
Tabela 6. Porcentagem de partículas que se mantiveram suspensas em diferentes fluidos, Fonte: Adaptada de Kulkami (2011).	25
Tabela 7. Variação do tempo de selamento com a concentração. Fonte: Godoi,2017... ..	29
Tabela 8 Fluidos testados no SEF.....	41
Tabela 9 Porcentagens em massa dos elementos obtidos na espectrometria de fluorescência de raios X.	51
Tabela 10 Densidade dos fluidos testados no simulador de escoamento em fratura.....	52
Tabela 11 Parâmetros do modelo reológico de Herschel-Bulkley.	53
Tabela 12 Influência da concentração de LCM no tempo de selamento da fratura de 2 mm.	63
Tabela 13 Desvios experimentais médios (%) para o correlaciona queda de pressão e vazão em fratura	68
Tabela 14 Dados de volume de filtrado e torta de filtração.....	73
Tabela 15. Distribuição granulométrica do LCM.....	82
Tabela 16 Medidas de densidade para o LCM	85
Tabela 17 Tensão cisalhante e taxa de deformação para os fluidos 2-5.....	85
Tabela 18 Tensão cisalhante e taxa de deformação para os fluidos 6-9.....	89
Tabela 19. Dados de vazão e queda de pressão para água industrial	92
Tabela 20. Dados de vazão e queda de pressão goma xantana.....	93
Tabela 21. Dados de vazão e queda de pressão CMC	93
Tabela 22. Dados de vazão e queda de pressão para o fluido 4	94
Tabela 23. Dados de vazão e queda de pressão para a suspensão de calcário laminar fino - 5 lb/bbl. Fonte: Godoi, 2017.	94
Tabela 24. Dados de vazão e queda de pressão para a suspensão de calcário laminar fino - 15 lb/bbl. Fonte: Godoi, 2017	96
Tabela 25. Dados de vazão e queda de pressão de selamento para fluido 4	98
Tabela 26. Dados de vazão e queda de pressão de selamento para fluido 5.	98

Tabela 27 Dados de vazão e queda de pressão de selamento para fluido 6.	99
Tabela 28. Dados de vazão e queda de pressão de selamento para fluido 7.	99
Tabela 29. Dados de vazão e diâmetro hidráulico de fratura para a suspensão de calcário laminar fino - 15 lb/bbl. Fonte: Godoi, 2017.....	100
Tabela 30. Dados de vazão e diâmetro hidráulico de fratura para a suspensão de calcário laminar médio - 5 lb/bbl. Fonte: Godoi, 2017.	101
Tabela 31. Volume de filtrado para os fluidos 3, 4, 6 e 7.....	102

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Fluidos de perfuração	2
2.2 Perda de circulação	3
2.2.1 Causas da perda de circulação	4
2.2.2 Magnitude das perdas de fluido	5
2.2.3 Identificando o tipo de zona de perda de circulação.....	5
2.2.4 Tratamentos para perda de circulação	6
2.2.4.1 Métodos preventivos.....	7
2.2.4.2 Métodos corretivos	8
2.3 Materiais de combate a perda de circulação	8
2.4 Escoamento de fluidos de perfuração	11
2.4.1 Caracterização do regime de escoamento	12
2.4.2 Modelos reológicos para fluidos de perfuração	13
2.5 Estudo do escoamento de fluidos através fraturas	14
2.5.1 Estudo do escoamento de fluidos newtonianos através fraturas.....	14
2.5.1.1 Complemento do estudo escoamento de fluidos newtonianos através fraturas	17
2.5.2 Estudo do escoamento de fluidos não newtonianos através fraturas .	19
2.5.2.1 Complemento do estudo escoamento de fluidos não newtonianos	22
2.6 Estudo das características e eficiência dos materiais de combate a perda de circulação.....	22
3- MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Seleção e caracterização dos materiais testados	31
3.1.1 Seleção dos Materiais	31
3.2 Caracterização do LCM e suspensões testadas no SEF.....	32
3.2.1 Caracterização do material de combate a perda de circulação	32
3.2.1 Caracterização das suspensões testadas no SEF.....	33
3.3 Testes no simulador de escoamento em fratura	35
3.3.1 Descrição da unidade experimental	36
3.3.2 Metodologia experimental dos testes do no Simulador	40
3.3.3 Preparo dos fluidos	40
3.3.4 Testes de escoamento em fratura	42
3.3.5 Testes de selamento da fratura.....	44

3.4 Modelagem dados de escoamento em fratura.....	44
3.5 Proposta do monitoramento do selamento em fratura	47
3.6 Testes de filtração em alta pressão	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1 Seleção e caracterização dos materiais testados	50
4.1.1 Análise Granulométrica	50
4.1.2 Picnometria de sólidos	51
4.1.3 Composição do material de combate a perda de circulação	51
4.1.4 Densidade dos fluidos testados no simulador de escoamento em fratura.....	52
4.1.4 Reologia dos fluidos	52
4.2 Testes no simulador de escoamento em fratura	54
4.2.1 Testes de Escoamento	54
4.2.2 Testes de selamento das suspensões contendo LCM.....	57
4.3 Correlação entre a queda de pressão e vazão em fratura.	65
4.4 Proposta do monitoramento do selamento em fratura	69
4.5 Testes de filtração das suspensões contendo LCM.....	73
5 CONCLUSÕES	75
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXOS	82

1 INTRODUÇÃO

A perfuração de poços de petróleo é um processo de engenharia com diversas variáveis que devem ser controladas para que a operação seja realizada de forma segura e eficiente (BOURGOYNE et al, 1991). O esgotamento das reservas de petróleo ao redor do mundo força indústria petrolífera a explorar reservatórios em regiões cada vez menos usuais. Sendo necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para se adaptar as condições operacionais encontradas nessas regiões.

Durante a operação de perfuração é comum que sejam encontradas fraturas na rocha que compõe as paredes do poço de petróleo. Essas fraturas podem ser naturais ou geradas pelo processo de perfuração, que ocorre em condições não balanceadas de pressão (COOK *et al.* 2012). A presença dessas fraturas na formação rochosa é responsável por um fenômeno denominado perda de circulação. Nesse fenômeno o fluido de perfuração escoar para o interior da formação rochosa através de fraturas presentes na mesma. Isso impede que fluido de perfuração seja bombeado de volta para superfície, causando prejuízos financeiros e problemas estruturais no poço (COOK *et al.* 2012 ; DATWANI, 2012, TETTEH-FIAGBOR, 2011).

Neste trabalho foi proposta uma correlação entre a queda de pressão e a vazão escoamento de diferentes tipos de fluido através de fraturas. Esse tipo de equação ajuda a compreender a natureza da perda de circulação, possibilitando o desenvolvimento de novas técnicas e materiais que sejam capazes de mitigar esse fenômeno. Foi avaliada a eficiência de um material de combate a perda de circulação composto de polímeros e borato Estudou-se as variáveis que afetam a capacidade do mesmo em selar total ou parcialmente fraturas presentes nas formações rochosas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fluidos de perfuração

Durante a perfuração rotativa de poços de petróleo a fricção da broca, situada na extremidade da coluna de perfuração, com a formação rochosa produz cascalho que precisa ser removido continuamente do poço. A remoção desse material é feita pela circulação de fluidos de perfuração. Injetores existentes na broca inserem o fluido de perfuração no poço através de jatos presentes na cabeça de injeção. Esse fluido retorna a superfície pela região anular entre a coluna de perfuração e as paredes do poço. A profundidade do poço aumenta gradativamente conforme o cascalho vai sendo removido (BOURGOYNE et al. 1991; FINGER et al. 2010; THOMAS 2001).

O fluido de perfuração deve desempenhar algumas outras importantes funções durante a perfuração do poço (BOURGOYNE et al. 1999):

- Prevenir que os fluidos da formação rochosa invadam o poço;
- Manter o buraco recém-perfurado do poço aberto até o revestimento de aço possa ser cimentado no poço;
- Lubrificar e resfriar a broca enquanto a mesma está em funcionamento.

Para que o fluido de perfuração seja capaz de realizar as funções citadas acima, o mesmo deve possuir algumas características importantes (THOMAS 2001):

- Não corroer ou causar abrasão à coluna de perfuração;
- Ser bombeável;
- Ser estável quimicamente;
- Manter o cascalho em suspensão.

A Figura 1 ilustra o processo de circulação do fluido de perfuração.

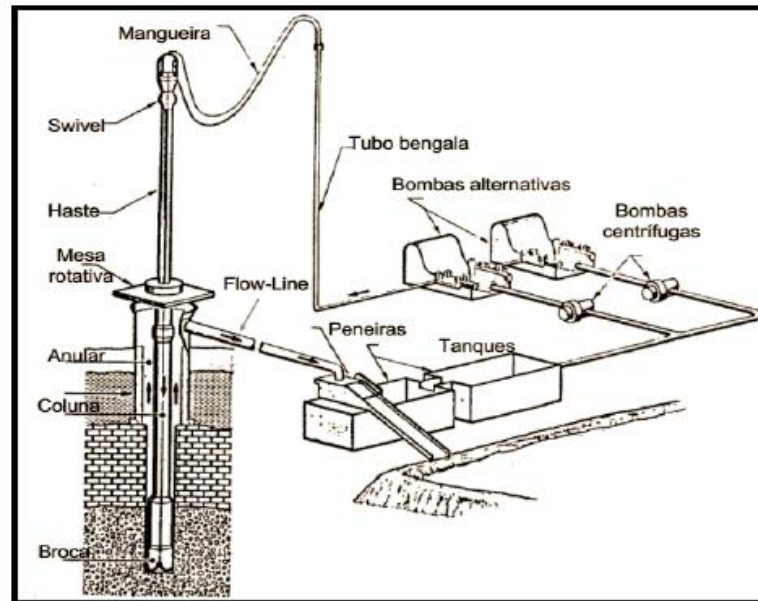


Figura 1. Processo de circulação do fluido de perfuração, Fonte: Machado 2002.

Existem diferentes tipos de fluidos de perfuração classificados de acordo com a sua composição, os principais deles são (THOMAS 2001):

- Fluido de Perfuração à base de água;
- Fluido de Perfuração à base de óleo;
- Fluido de Perfuração à base de ar.

A escolha do tipo de fluido que será utilizado varia com o tipo de poço e com as diferentes condições operacionais que podem estar sendo trabalhadas durante a perfuração

2.2 Perda de circulação

A perda de circulação é o fenômeno no qual o fluido de perfuração circulando no poço flui parcial ou completamente para o interior da rocha através dos poros ou fraturas contidas na mesma, o que impede o fluido de retornar a superfície para ser reaproveitado (COOK et al, 2012).

A perda de circulação contribui para o aumento do tempo não produtivo do poço acarretando um prejuízo financeiro para a empresa perfuradora. Além disso, a perda de fluido para o interior da rocha pode causar consequências graves para o processo de

perfuração (DATWANI, 2012). Com a perda de circulação no interior do poço, diminui-se gradativamente o nível de fluido na região anular. A pressão hidrostática, exercida pelo fluido de perfuração na parede do poço também diminui, permitindo que fluidos do interior da formação rochosa sejam projetados para o poço. Esse fenômeno é chamado de *kick*. Se o nível de fluido diminuir até que não exista mais fluido de perfuração no anular, a drástica queda de pressão hidrostática pode gerar instabilidade no poço, danos a integridade do mesmo e até mesmo a destruição da broca (COOK et al. 2012; DATWANI, 2012; FINGER et al. 2010).

2.2.1 Causas da perda de circulação

Fraturas na parede do poço são a causa usual da perda de fluido para formação rochosa. Esses canais fraturados podem naturais nas paredes do poço ou induzidos durante a perfuração. (COOK et al. 2012 ; DATWANI, 2012, TETTEH-FIAGBOR, 2011). A Figura 2 ilustra a perda de circulação ocorrendo no interior da região anular.

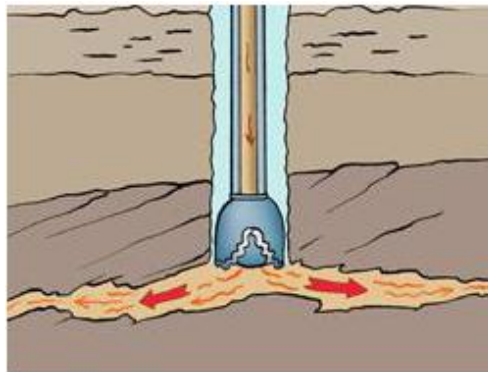


Figura 2. Perda de circulação, adaptada de gpcpetro

Os processos de perfuração são geralmente realizados com desequilíbrio entre a pressão do fluido de perfuração e a pressão nas paredes do poço. Esse desequilíbrio pode prejudicar a integridade estrutural das rochas que estão sendo perfuradas, induzindo fraturas ao longo das paredes do poço. Além disso, o excesso na pressão do fluido de perfuração pode forçar o mesmo através das fraturas presentes naturalmente na rocha, piorando a perda de fluido (COOK et al. 2012). Algumas condições que favorecem a perda de circulação foram listadas por Datwani (2012):

- Os poros da rocha são maiores que as partículas do fluido de perfuração;
- Formações ainda não consolidadas como areias e cascalhos podem ser facilmente fraturadas;
- Presença de formações cavernosas na rocha;
- Presença de fraturas naturais nas paredes do poço;
- Circulação de fluidos de perfuração com alta densidade.

2.2.2 Magnitude das perdas de fluido

Segundo Kumar et al. (2011), a perda de circulação pode gerar prejuízos de mais de um milhão de dólares em uma operação de perfuração. Esse fenômeno pode ser classificado de acordo com a quantidade de fluido perdida para formação rochosa em bbl/h (ALSABA, 2014 apud NAYBERG e PETTY, 1986):

-Perda de circulação por infiltração: Taxa de perda de 1-10 bbl/h, esse tipo de perda pode ocorrer em qualquer espécie de formação;

-Perda de circulação parcial: Taxas de perda entre 10 e 500 bbl/h, ocorre em cascalhos, pequenas fraturas naturais horizontais ou fraturas induzidas verticais ou horizontais;

-Perda de circulação completa: Taxa de perda além de 500 bbl/h.

De acordo com a magnitude da perda de circulação, decide-se qual tipo de procedimento será adotado para mitigar seus efeitos, sendo possível identificar o tipo de fratura que está presente nas paredes do poço (DATWANI, 2012).

2.2.3 Identificando o tipo de zona de perda de circulação

Uma vez que se conheçam as causas e a magnitude da perda de circulação é possível identificar que tipo de formação rochosa é responsável pela perda de fluido e desenvolver um tratamento adequado para o problema (DATWANI, 2012; ALSABA, 2014; KUMAR et al.. 2011). As diferentes formações que levam a perda de fluido segundo HOWARD (1951) são:

-Fraturas naturais: Ocorrem em qualquer tipo de rocha, e drenam o fluido de perfuração lentamente, devem ser seladas para evitar a exposição de mais fraturas ao fluido de perfuração;

-Fraturas induzidas: Aparecem durante o processo de perfuração, geralmente em poços compostos de formações mais frágeis. Fluidos de perfuração com densidade maior que 10,5 lb/gal podem causar a indução de fraturas. A perda de fluido é rápida;

-Formações cavernosas: Ocorrem em calcários, quando a broca perfura uma formação cavernosa sua ponta afunda entre algumas polegadas até alguns pés de profundidade na nova zona. As perdas de fluido nessas zonas são severas;

- Formações não consolidadas: Formações com permeabilidade alta, entre 10 até 100 Darcy. O fluido infiltra na parede do poço e a perda de circulação ocorre. Esse tipo de perda de circulação normalmente ocorre em formações arenosas rasas devido a sua alta permeabilidade.

A Figura 3 ilustra as diferentes zonas de perda de circulação.

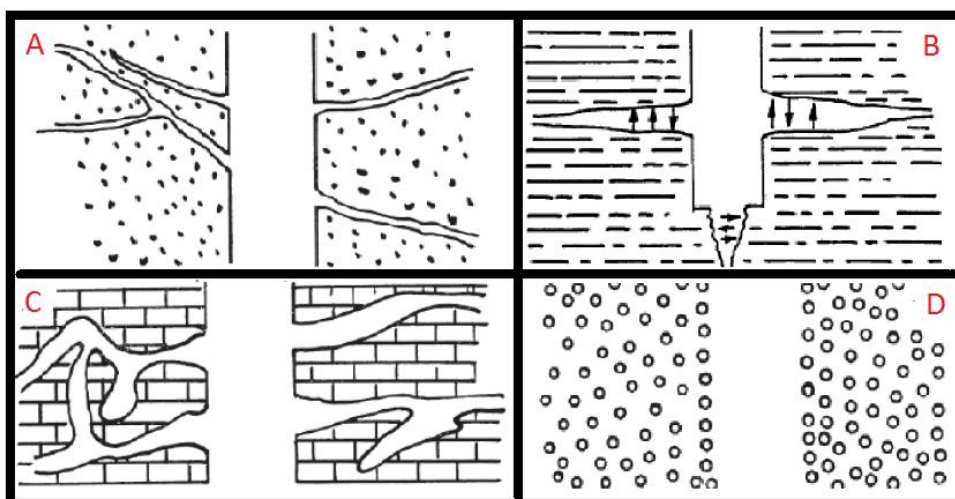


Figura 3. Zonas de perda de circulação, A: fraturas naturais, B: Fraturas induzida, C: formações cavernosas. D: formações não consolidadas. FONTE: HOWARD, 1951.

2.2.4 Tratamentos para perda de circulação

O tratamento da perda de circulação pode ser preventivo ou corretivo (ALSABA, 2014).

2.2.4.1 Métodos preventivos

O método preventivo de tratamento deve ser realizado antes da ocorrência da perda de circulação. O mesmo tem como objetivo fortalecer a estrutura do poço para prevenir futuras perdas de fluido. Segundo Cook (2012) as principais técnicas preventivas são:

-Resistência a propagação de fraturas: Consiste na utilização de materiais selantes para tamponar e isolar a ponta de fraturas já existentes na formação rochosa. Esse tratamento torna mais difícil a propagação de fraturas, aumentando resistência estrutural das paredes do poço e prevenindo a indução de novos canais fraturados.

-Gaiola de Tensão (*Hoop Stress*): Consiste na adição de materiais de fortalecimento de poço (WSMs) ao fluido de perfuração em condições de pressão não balanceadas. Nessas condições, fraturas rasas são induzidas nas paredes do poço, comprimindo a formação e gerando tensões tangenciais. As tensões adicionais empurram o fluido carregado de WSMs para dentro das fraturas induzidas. Esses materiais formam um tampão na entrada das fraturas e impedem perdas adicionais de fluido para formação. O fluido que havia entrado nas fendas começa a invadir o poço, baixando a pressão no interior do anular favorecendo o fechamento das fraturas. O tampão de WSMs na entrada dos canais fraturados não permite o fechamento completo dos mesmos. Sendo assim, a gaiola de tensão fortalece o poço e permite que o operador possa trabalhar em uma janela de pressão maior do que ele antes podia, pois a indução de novas fraturas é mais difícil (COOK et al. 2012; SANDERS *et al.*2008).

-Isolamento das paredes do poço: Tem como alvo formações rochosas permeáveis. O objetivo desse tratamento é criar uma camada de material de fortalecimento de poço cobrindo a zona de alta permeabilidade. Dessa forma a permeabilidade do poço é reduzida, impedindo a perda de circulação do fluido (COOK et al, 2012).

-Tensão de Fechamento de Fratura: Colchões de WSM são adicionados ao fluido de perfuração para que rapidamente as fraturas já existentes sejam seladas. Isso é seguido de um rápido aumento de pressão, chamado de *squeeze*, que força mais

partículas de WSM para o interior das fraturas já seladas, aumentando a espessura do tampão. Uma vez que o aumento de pressão seja removido tem-se o resultado esperado: o poço se torna resistente a indução de novas fraturas, uma vez que as fraturas dilatadas aliviarão qualquer aumento de pressão proveniente do escoamento (COOK et AL, 2012).

2.2.4.2 Métodos corretivos

Os métodos corretivos são aplicados quando a perda de circulação já ocorreu (KUMAR et al, 2011). Eles consistem na adição de materiais de combate a perda de circulação ao fluido de perfuração. Esses materiais podem ser adicionados de forma contínua ou através de colchões (DATWANI, 2012; ALSABA, 2014; KUMAR et al. 2011). Diferentes tipos de métodos corretivos são aplicados dependendo da severidade da perda de circulação. Para perdas por infiltração ou parciais são adicionados ao fluido de perfuração materiais de combate a perda de circulação (LCM). Esses materiais são especialmente desenvolvidos para mitigar a perda de circulação de forma contínua. Já para perdas de circulação completas métodos mais drásticos de tratamento são requeridos, como por exemplo, a utilização de plugs de cimento (ALSABA, 2014). A ação corretiva dos materiais de combate a perda de circulação será abordada na seção a seguir.

2.3 Materiais de combate a perda de circulação

A história dos materiais de combate a perda de circulação sempre esteve diretamente ligada a perfuração de poços. Os primeiros materiais de combate a perda de circulação eram escolhidos devido ao baixo custo e por serem facilmente obtidos nas proximidades dos locais de perfuração. Podem ser citadas como exemplos dos primeiros LCM as cascas de semente de algodão, pó de serraria e cascas de castanhas (SANTIAGO et al. 2014). Atualmente materiais mais avançados e específicos são utilizados como LCM.

Materiais de combate a perda de circulação são adicionados aos fluidos de perfuração para que selem e isolem as fraturas presentes nas formações rochosas, mitigando as perdas de fluido (TETTEH-FIAGBOR,2011). Os LCM são classificados de acordo com suas características físicas e químicas. White (1956) classifica os

materiais de combate a perda de circulação em quatro grupos: fibrosos, flocos, granulares e uma mistura entre os anteriores

-Fibrosos: Geralmente os LCMs classificados como fibrosos possuem origem vegetal, ainda que algumas fibras minerais possam também ser usadas. Esses materiais são alongados e flexíveis, podendo ter variável grau de flexibilidade de um LCM fibroso para outro. Nayberg e Petty (1986) descrevem a ação desse tipo de material: as fibras presentes no mesmo formam uma estrutura semelhante a um tapete sob a superfície porosa, filtrando os sólidos do fluido de perfuração e formando uma torta de filtração que sela a fratura (ALSABA, 2014; NAYBERG e PETTY, 1986). Alguns exemplos de materiais fibrosos são a fibra de carvalho, algodão, fibras de nylon, fibra de vidro e polpa de biscoito.

-Flocos: Segundo o glossário da Schlumberger (Acessado em 2017), os materiais de combate a perda de circulação em flocos “são achatados e com alta área de superfície”. Esses materiais se depositam sob os poros das formações rochosas, impedindo a passagem do fluido de perfuração para o interior da rocha (NAYBERG e PETTY, 1986; WHITE, 1956). Alguns em LCMs em floco são: Mica, casca de sementes de algodão e flocos de carbonato de cálcio laminar (ALSABA, 2014).

-Granulares: Os LCMs granulares são capazes de formar tampões tanto na superfície das paredes do poço quanto no interior da matriz das formações rochosas (NAYBERG e PETTY, 1986). A rigidez desses materiais permite que os mesmos também sejam usados em métodos corretivos ou para o fortalecimento de poços (ALSABA, 2014). Segundo Nayberg e Petty (1986) O tamanho de partícula é o fator mais importante a se considerar para que esses materiais sejam aplicados corretamente. Os autores afirmam que esses materiais são mais efetivos em sistemas com altos teores de sólidos em suspensão. Podem ser citados como materiais granulares: coque, carvão moído, bentonita e asfalto (WHITE, 1956).

-Misturas de um ou mais LCM: Para que a efetividade no combate a perda de carga seja aumentada, misturam-se dois ou mais tipos de LCM ou dois LCM diferentes do mesmo tipo. Essa mistura cria LCM mais versáteis, capazes de atuar em diferentes

formações rochosas e em diferentes larguras de poros ou fraturas. (ALSABA, 2014; NAYBERG e PETTY, 1986; WHITE, 1956).

A Figura 4 mostra exemplos dos quatro tipos de LCMs

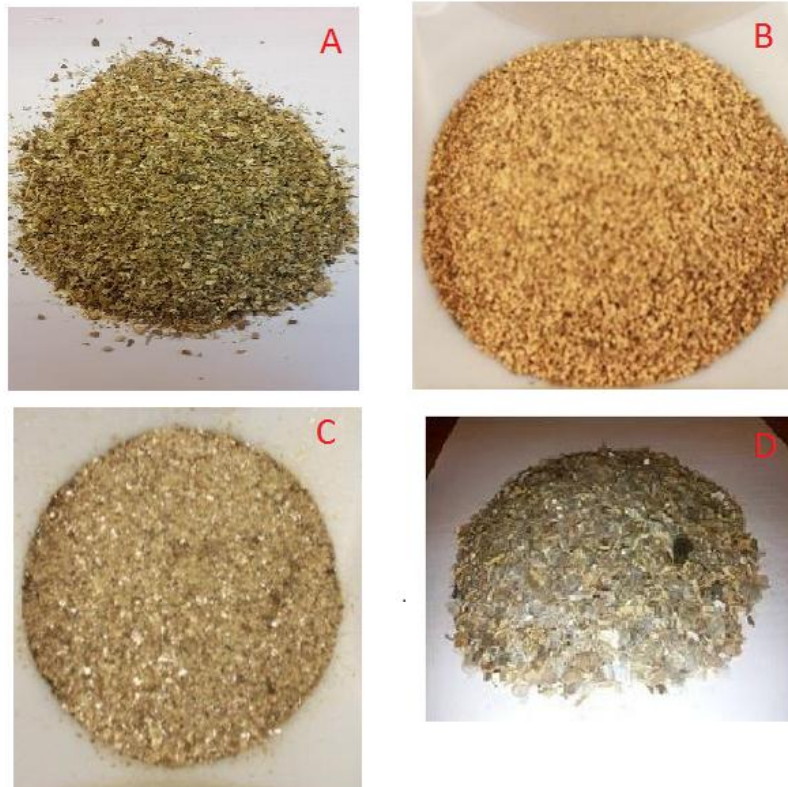


Figura 4. Tipos de LCMs: A- Fibroso; B: Granular C: Flocos; D: Mistura. Fonte: A/D: Tirupatí Enterprises, C/D Alsaba, 2014.

Algumas outras categorias de materiais de combate a perda de circulação foram adicionadas à classificação tradicional proposta por White (1956). Alsaba et al, (2014) propõem outras quatro categorias de LCMs: Solúveis, Hidratáveis, LCMs de uso em *squeeze* com alta perda de fluido e finalmente nanopartículas.

Duque Neto, 2015 separou exemplos de cada tipo de LCMs que são comercializados atualmente, alguns desses exemplos estão presentes na tabela 1.

Tabela 1. Exemplos de LCMs comerciais, FONTE: DUQUE NETO, 2015

Nome do LCM	Tipo de Material	Marca
FIBER SEAL	Fibroso	GEO DRILLING FLUID
CYBER SEAL	Fibroso	NEWPARK
N-SEAL	Fibroso	HALLIBURTON
SOLUFLAKE	Floco	BAKER HUGHES
GLO MICA	Floco	GLOBAL DRILLING
MICA	Floco	GEO DRILLING FLUID
WALNUT HULLS	Granular	GEO DRILLING FLUID
NEW PLUG	Granular	NEWPARK
SURE SEAL	Granular	DRILLING SPECIALTIES
BARO-SEAL	Mistura de LCMs	HALLIBURTON
WELL-SEAL	Mistura de LCMs	DRILLING SPECIALTIES
QUIK-WEDGE	Mistura de LCMs	SHARP-ROCK

2.4 Escoamento de fluidos de perfuração

Condições de operações mal calculadas podem gerar problemas que vão desde o aparecimento de fraturas nas paredes do poço até o colapso total do mesmo. Para que o projeto de perfuração seja operado em de forma segura e eficiente é imperativo entender os processos hidrodinâmicos que ocorrem durante o escoamento de fluidos de perfuração (PODRYABINKIN et al, 2013).

Um entendimento do escoar de fluidos de perfuração, que apresentam comportamento não newtoniano, é essencial também para que os sistemas de bombeamento que compõem o aparato de perfuração sejam projetados. Pois entendendo a natureza do escoamento desses fluidos faz-se a estimativa da perda de carga e do fator de atrito do escoamento (SCHEID et al, 2011).

2.4.1 Caracterização do regime de escoamento e diâmetro hidráulico

Antes de qualquer tipo de correlação para o escoamento de fluidos de perfuração seja equacionada, é preciso que o regime de escoamento seja definido através do cálculo do número de Reynolds. Esse número fornece uma relação entre as forças de inércia e viscosas agindo no escoamento. A equação a seguir descreve o número de Reynolds para fluidos newtonianos (BIRD et al. 2013).

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

Onde:

Re: Número de Reynolds
 $\langle v \rangle$: Velocidade do escoamento do fluido
 D_H : Diâmetro hidráulico
 ρ : Densidade do fluido
 μ : viscosidade do fluido

De acordo com Bird *et al.* (2013), em anulares o escoamento laminar ocorre até valores de Reynolds de cerca de 2000.

A equação 1 só vale para fluidos newtonianos, isto é, aqueles que possuem um valor constante de viscosidade, independente da taxa de cisalhamento que estão submetidos (BIRD *et al.*, 2013). Para o escoamento de fluidos de perfuração, que são notoriamente não newtonianos (PODRYABINKIN *et al.* 2013; SCHEID *et al.* 2011), deve-se utilizar outras equações para o cálculo do número de Reynolds, que serão vistas posteriormente, dependendo de qual for o comportamento reológico do fluido de perfuração.

O valor do diâmetro hidráulico para anulares pode ser dado por diferentes equações. A equação 2 foi desenvolvida por Bourgoyne *et al.* (1991) e considera ao anular como se fosse um *slot*, essa equação é válida quando a razão entre o diâmetro interno (D_1) e o diâmetro externo (D_2) for maior do que 0,3.

$$D_H = 0,816(D_2 - D_1) \quad (2)$$

Outra equação para o cálculo do diâmetro hidráulico em anulares foi desenvolvida de forma empírica por Crittendon (1959), essa equação está descrita na equação 3.

$$D_H = \frac{\sqrt[4]{D_2^4 - D_1^4 - \frac{(D_2^2 - D_1^2)^2}{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}} + \sqrt{(D_2^2 - D_1^2)}}{2} \quad (3)$$

2.4.2 Modelos reológicos para fluidos de perfuração

Dependendo de como se deformam na presença de uma tensão cisalhante, os fluidos podem ser classificados entre newtonianos e não newtonianos (FOX et al., 1998).

Os fluidos newtonianos apresentam uma tensão cisalhante diretamente proporcional a taxa de cisalhamento, sendo a constante linear de proporcionalidade entre as duas grandezas denominada viscosidade (FOX et al., 1998).

Para os fluidos não newtonianos não existe constante de proporcionalidade, a viscosidade dos mesmos varia com a taxa de cisalhamento. Os fluidos não newtonianos não seguem um comportamento uniforme. Com o passar do tempo equações empíricas foram desenvolvidas para modelar a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento de diferentes fluidos não newtonianos (FOX et al, 1998). Entre os modelos reológicos mais comuns para os fluidos não newtonianos estão o modelo de fluido plástico de Bingham, Lei da Potência (Power Law) e Herschel-Bulkley

A figura 5 mostra o comportamento dos modelos reológicos.

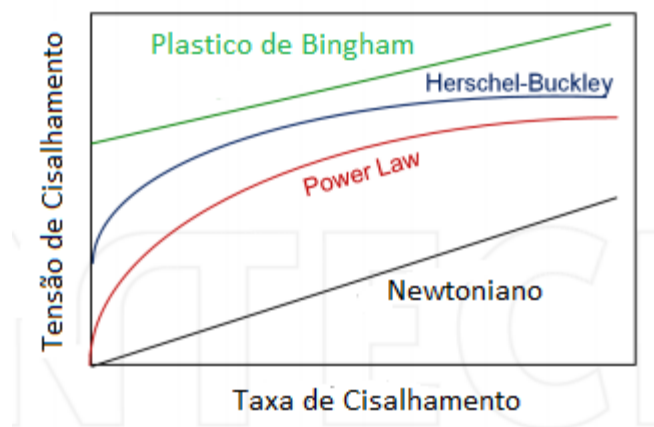


Figura 5. Modelos reológicos. Fonte: MONTGOMERY

Na Tabela 2 estão presentes os modelos reológicos da Figura 5, as equações dos modelos foram retiradas do autor FOX *et al*, 1998.

Tabela 2. Equações de modelos reológicos

Modelo reológico	Equação
Newtoniano	$\tau = \mu \gamma$
Lei da potência	$\tau = k (\gamma)^n$
Plástico do Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_0 \gamma$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + k (\gamma)^n$

Onde:

- τ - tensão de cisalhamento;
- γ - taxa de deformação;
- τ_0 - tensão crítica;
- k - índice de consistência;
- n - índice de comportamento
- η_0 - índice de comportamento.

2.5 Estudo do escoamento de fluidos através fraturas

Entender o comportamento do fluido escoando através de fraturas é muito importante, pois leva a práticas de perfuração mais seguras para evitar perda de circulação. Além disso, compreender o escoamento dos fluidos de perfuração nas fraturas é interessante para que se desenvolvam LCM mais eficientes (COOK et al. 2012).

Diversos autores estudaram o comportamento do escoamento de diferentes fluidos em fraturas, propondo correlações importantes para o entendimento desse tipo de escoamento. Estes autores e suas contribuições serão demonstradas a seguir.

2.5.1 Estudo do escoamento de fluidos newtonianos através fraturas

Huit (1956) estudou o escoamento em fratura de fluidos newtoniano. O escoamento foi estudado utilizando uma unidade experimental que simulava a geometria de uma fratura.

Huitt (1956) propôs que as fraturas fossem consideradas placas paralelas com comprimento, largura e altura bem definidos, mesmo que existam variações da abertura da fratura através de seu comprimento. As mudanças na abertura do canal fraturado deveriam ser encaradas da mesma maneira que a rugosidade presente nos escoamentos entre placas paralelas. Correlações do número de Reynolds e o fator de atrito em fraturas e foram propostas por esse autor. As mesmas estão presentes nas equações 4, 5 e 6.

$$f = \frac{24}{Re}, \quad Re < 1800; \quad (4)$$

$$f = 0,55 \left(\frac{e}{w}\right)^{0,472}, \quad Re > 1800; \quad (5)$$

$$Re = \frac{w \langle v \rangle \rho}{\mu}. \quad (6)$$

A correlação entre a queda de pressão para o escoamento em fraturas segundo Huitt está presente na Equação 7.

$$\Delta P = \frac{L \rho \langle v \rangle^2 f}{g_e w}. \quad (7)$$

Onde:

L – comprimento da fratura

w – espessura da fratura

f – fator de atrito do escoamento

ΔP - queda de pressão na fratura

e – altura da rugosidade na fratura

$\langle v \rangle$ – velocidade média na fratura

g_c – fator de conversão massa/força

O estudo do escoamento de fluidos newtonianos através de fraturas também foi realizado por Whitterspoon *et al.* (1980). Assim como no trabalho de Huitt (1956) o escoamento em fraturas é aproximado pelo escoamento entre placas paralelas. O autor só realizou experimentos com a água em regime laminar, que ocorre nas fraturas em Reynolds menores que 2400. O trabalho Whitterspoon comprovou que a lei cúbica para o escoamento em fraturas era válida, isto é, a relação entre a perda de carga e a vazão na fratura seria:

$$\frac{Q}{\Delta H} = \frac{C(2h)^3}{1+6,0\left(\frac{e}{2h}\right)^{1,5}}; \quad (8)$$

$$C = \frac{W \rho g}{12 \mu L}; \quad (9)$$

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\rho g}. \quad (10)$$

Onde:

Q – vazão na fratura;

C – constante de Whitterspoon;

ΔH – perda de carga;

H – metade da largura da fratura.

No estudo de Sarkar *et al.* (2004) simulações computacionais foram utilizadas para modelar o escoamento de fluidos newtonianos em diferentes tipos de fraturas. Nos modelos propostos por Sarkar, as fraturas foram aproximadas por um sistema de placas paralelas rígidas e lisas. Desprezando assim os efeitos da rugosidade nas equações. Sarkar considerou que abertura das fraturas varia através de seu comprimento, adicionando as equações o termo h_e , que significa abertura equivalente. A equação 11 mostra o modelo proposto para o escoamento em fraturas.

$$Q = \frac{h_e^3 \Delta P}{12 \mu L}. \quad (11)$$

Onde:

h_e - abertura equivalente da fratura.

Alguns dos tipos de fraturas estudados por Sarkar *et al.* (2004) estão presentes na Figura 6

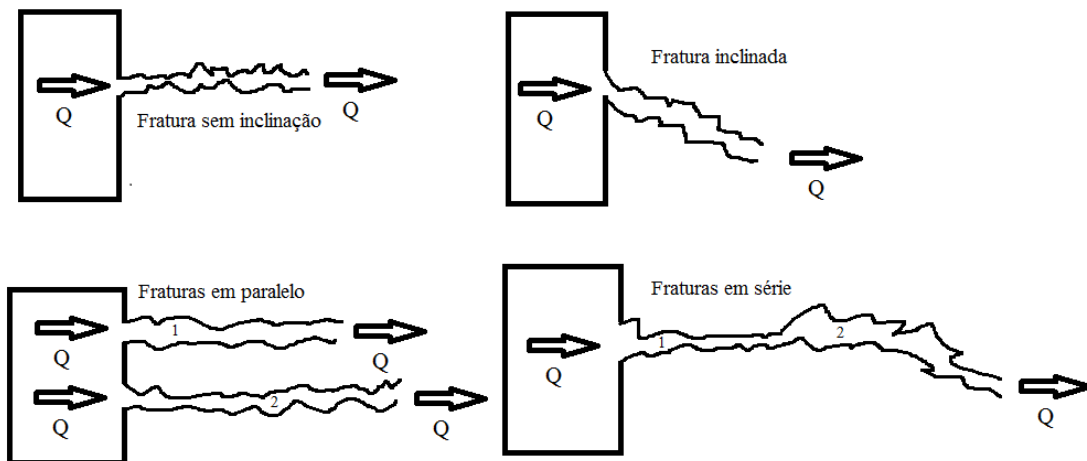


Figura 6. Tipos de Fraturas.

As equações para aberturas equivalentes dos diferentes tipos de fratura estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3. Equações para abertura equivalente de fraturas. Fonte: Sarkar (2014)

Tipo de fratura	Abertura equivalente
Sem inclinação	$h_e = \sqrt[3]{\frac{12Q\mu L}{\Delta P}}$
Inclinada	$h_e = \sqrt[3]{\frac{12Q\mu L}{\Delta P \cos\theta}}$
Fraturas em paralelo	$h_e = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n h_{ei}^3}$
Fraturas em série	$h_e = \frac{1}{\sqrt[3]{\sum_{i=1}^n \frac{L}{L_i} \frac{1}{h_{ei}^3}}}$

Onde:

θ – ângulo de inclinação da fratura

2.5.1.1 Complemento do estudo escoamento de fluidos newtonianos através fraturas

Outros estudos a respeito do escoamento de fluidos newtonianos em fraturas foram realizados e serviram para complementar a revisão bibliográfica dessa dissertação. A razão dos trabalhos apresentados nessa seção servirem apenas como complemento é que as faixas de Reynolds são baixas quando comparadas aos Reynolds de interesse dessa dissertação. No entanto, esses estudos fornecem algumas informações sobre o comportamento do escoamento de fluidos newtonianos em fraturas, além de modelos para a queda de pressão e fator de atrito em fendas na rocha.

Narzidoust (2006) e Crandall (2010) estudaram o escoamento em fraturas para valores de Reynolds menores que 10 e utilizaram métodos computacionais para desenvolver e validar modelos para o fator de atrito em fraturas. Os dois autores utilizaram o conceito de tortuosidade (ϕ) em suas modelagens, isto é, a razão entre o comprimento nominal da fratura e o comprimento real que o fluido “enxerga” durante o escoamento (NARZIDOUST, 2006). A espessura efetiva (H_{eff}) da fratura também foi utilizada pelos dois autores, sendo a mesma, a abertura média da fratura menos o desvio padrão das aberturas presentes na fratura (NARZIDOUST, 2006).

O trabalho de Crandall (2010) expande o estudo feito por Narzidou (2006) e modela o escoamento em fratura assumindo que a rocha pode ser permeável. Os modelos de fator de atrito e vazão proposto pelos dois estão presentes na tabela abaixo.

Tabela 4. Modelos de fator de atrito e vazão. Fonte: Narzidou (2006), Crandall (2010).

	Vazão – Queda de Pressão	Fator de atrito
Narzidou	-	$f = \frac{123}{Re_H} (1 + 0,12Re_H^{0,687})$
Crandall	$Q = \left(\frac{H_{eff}^3}{61,5(1 + \phi)(1 + 0,12Re_H^{0,687})} + kK \right) \frac{\Delta P}{12\mu L}$	$f = \frac{123}{Re_H} \frac{(1 + 0,12Re_H^{0,687})}{1 + 61,5(1 + \phi)(1 + 0,12Re_H^{0,687})Kh/H^3}$

Onde:

H_{eff} – espessura efetiva da fratura;

ϕ – tortuosidade da fratura;

K- permeabilidade da rocha;

Re_H – Reynolds na fratura.

Zimmerman (2004) estudou o escoamento em fraturas para Reynolds variando de 0,1 até 100. Segundo esse autor, a relação entre a queda de pressão para Reynolds baixos obedece a lei de Darcy, isto é, a queda de pressão se relaciona linearmente com a vazão na fratura. Para Reynolds maiores que 10, a relação entre a queda de pressão e a vazão segue um regime de Forchheimer. As equações que descrevem as duas relações estão proposta a seguir.

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu Q}{Tw'}, \quad Re < 10; \quad (12)$$

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu Q}{Tw'} + bQ^2, \quad Re > 10. \quad (13)$$

Onde:

b - constante características do escoamento;

T – transmissividade na fratura;

2.5.2 Estudo do escoamento de fluidos não newtonianos através fraturas

Rossen e Kumar (1992) realizam estudos a respeito do fluxo monofásico e bifásico em fraturas de reservatórios de óleo e gás natural. Os autores propuseram modelos para o escoamento de fluidos não newtonianos em fraturas. Apontando que o comportamento pseudoplástico dos fluidos de perfuração estudados faz as fraturas aparentarem possuir maior abertura do que realmente possuem. Um modelo para o cálculo de abertura efetiva foi proposto levando em conta esse comportamento. Os modelos que relacionam a queda de pressão com a vazão em fratura para fluidos não newtonianos trata as fendas como dutos retangulares. Os parâmetros reológicos dos fluidos em escoamento são utilizados nas equações propostas. Para fluidos power-law o modelo proposto encontra-se na equação 14; para fluidos de bingham o modelo está presente na equação 15. A equação 16 apresenta o cálculo da abertura efetiva de uma fratura em que escoam fluidos não newtonianos.

$$Q = \frac{2w h^{(2+\frac{1}{n})}}{2+\frac{1}{n} k^{\frac{1}{n}}} \nabla P^{\frac{1}{n}} \quad (14)$$

$$Q = \frac{2}{3} \frac{h^3 w}{\mu_0} \nabla P \left(1 - \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\nabla P h} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_0}{\nabla P h} \right)^3 \right) \quad (15)$$

$$h_{eff} = \left(\frac{Q}{\nabla P^{\frac{1}{n}} \frac{2+\frac{1}{n}}{2w} k^{\frac{1}{n}}} \right)^{\frac{1}{2+\frac{1}{n}}} \quad (16)$$

Onde:

∇P – gradiente da queda de pressão.

h_{eff} – Abertura efetiva da fratura;

Cherny e Lapin (2016) modelaram o escoamento de fluidos com comportamento reológico Herschel-Bulkley através de fraturas tridimensionais. O modelo é obtido aproximando o escoamento em fraturas por um escoamento entre placas paralelas e solucionando a equação de Navier-Stokes nessa geometria. Esse modelo pode ser apresentado utilizando a viscosidade aparente do fluido, os autores também propuseram uma equação para o cálculo da viscosidade aparente. Uma segunda forma para apresentar o modelo proposto, é a solução da equação de Navier-Stokes com a substituição do perfil de velocidade para um fluido Herschel-Bulkley. A equação 17

apresenta primeira forma e a equação 18 mostra a equação para o cálculo da viscosidade aparente. A Equação 19 apresenta a segunda forma do modelo.

$$q = -\frac{w^3 \nabla P}{12 \mu_{app}}; \quad (17)$$

$$\mu_{app} = \frac{2K^{\frac{1}{n}}(2n+1)}{6n} (w|\nabla P|)^{\frac{n-1}{n}} + \frac{(4n+2)2^{\frac{1}{n}}\tau_0}{(3n(w|\nabla P|)^{\frac{1}{n}})}; \quad (18)$$

$$q = -\frac{n}{(4n+2)(2k)^{\frac{1}{n}}} w^{(2+\frac{1}{n})} |\nabla P|^{\frac{1}{n}} \left(1 - \frac{2\tau_0|\nabla P|^{-1}}{w}\right)^{1+\frac{1}{n}} \left(1 + \frac{2\tau_0|\nabla P|^{-1}}{w} \frac{n}{n+1}\right). \quad (19)$$

Onde:

q – vetor vazão na fratura;

μ_{app} – viscosidade aparente;

Duque Neto (2015) utilizou um simulador de escoamento em fratura (SEF) para coletar dados de queda de pressão e da velocidade ao quadrado do escoamento de diferentes fluidos não newtonianos. O SEF utilizado por Duque Neto é o mesmo que será utilizado nessa dissertação. O comportamento do escoamento em fratura observado por Duque Neto pode ser visto na Figura 7.

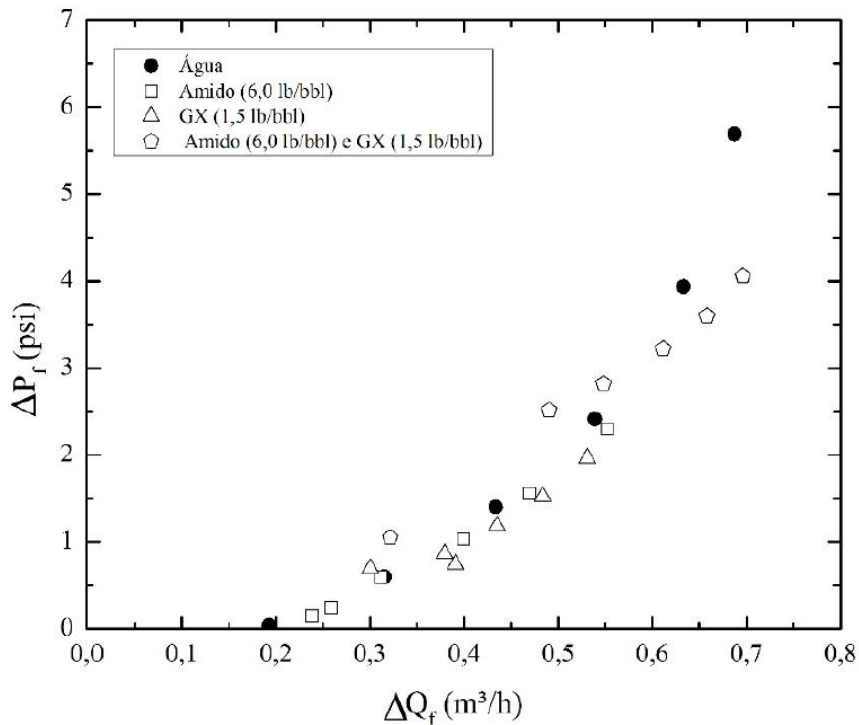


Figura 7. Queda de pressão e vazão em fratura de 10 mm, fonte: Duque Neto (2015).

Godoi (2017) estudou o escoamento de suspensões de materiais de combate a perda de circulação através de fraturas utilizando o mesmo SEF que Duque Neto (2015). O trabalho do autor em questão teve dois objetivos, o primeiro foi avaliar a eficiência de um LCM composto de calcário laminar em selar fraturas. Essa parte do trabalho do autor será apresentada na seção 2.6 dessa dissertação. O segundo objetivo foi propor um modelo que correlacionasse a queda de pressão na fratura com a vazão de fluido escoando pela mesma. Dois modelos distintos para vazão em fratura foram propostos. O primeiro consiste em utilizar a solução da equação de Navier-Stokes para placas paralelas em conjunto com a equação do perfil de velocidade para um fluido Herchel Bulkley. Como resultado o autor obteve um modelo de escoamento em função da queda de pressão e dos parâmetros reológicos presente na equação 20

$$Q = \frac{2Lkwn}{\Delta P(1+n\Delta)} \frac{\left(\frac{\Delta Ph}{Lk} - \frac{\tau_0}{k}\right)^{\frac{1+2n}{n}}}{\frac{\Delta P1+2n}{Lk} \frac{1}{n}} - h \left(\frac{\Delta Ph}{Lk} - \frac{\tau_0}{k}\right)^{\frac{1+n}{n}}. \quad (20)$$

O segundo modelo utiliza uma metodologia semelhante a proposta por Cherny e Lapin (2016) , resolvendo a equação de Navier-Stokes para um fluido newtoniano e calculando a viscosidade aparente do fluido em uma dada vazão. A diferença entre os dois modelos é que Godoi calcula a viscosidade aparente do fluido pela sua taxa de cisalhamento. Primeiro calcula-se a taxa de cisalhamento e depois a viscosidade aparente pela equação do modelo reológico do fluido em questão. Para que seja possível calcular a taxa de cisalhamento associada ao escoamento o autor utiliza-a a correlação proposta por Massarani (1999) que está apresentada na equação 21.

$$\gamma = \frac{\delta \langle v \rangle}{D_H} \quad (21)$$

Onde:

δ – parâmetro para o cálculo da taxa de cisalhamento em tubos;

γ – taxa de cisalhamento

Com a taxa de cisalhamento é possível estimar a viscosidade aparente do fluido pela equação 22.

$$\mu_{app} = \frac{(\tau_0 + k\gamma^n)}{\gamma}. \quad (22)$$

Finalmente insere-se a viscosidade aparente do fluido na equação 23, que é a equação final do modelo.

$$Q = \frac{2}{3} \frac{h^3 \Delta PW}{L \mu_{app}}. \quad (23)$$

2.5.2.1 Complemento do estudo escoamento de fluidos não newtonianos

Apesar de não tratar do escoamento em fraturas a pesquisa de Madlener et al. (2009) compilam equações implícitas para o cálculo do número de Reynolds em vários modelos reológicos. Esse trabalho foi realizado para o escoamento em tubos circulares e as equações do número de Reynolds foram deduzidas a partir do fator de atrito. As equações na tabela a seguir mostram as equações para os números de Reynolds deduzidos para os diferentes modelos reológicos e o gradiente local de tensão cisalhante (m).

Tabela 5. Equações de Reynolds para os diferentes modelos reológicos.
Fonte: Madlener et al. (2009)

Modelo Reológico	Reynolds	Equação para m
Power-Law	$Re = \frac{\rho u^{2-n} D^n}{k \left(\frac{3m+1}{4m}\right)^n 8^{n-1}}$	$m = n$
Fluido de Bingham	$Re = \frac{\rho u D}{\left(\frac{\tau_0}{8}\right) \left(\frac{D}{u}\right) + \frac{\eta_0(3m+1)}{4m}}$	$m = \frac{\eta_0 \left(\frac{8u}{D}\right)}{\tau_0 + \eta_0 \left(\frac{8u}{D}\right)}$
Herschel-Bulkley	$Re = \frac{\rho u^{2-n} D^n}{\left(\frac{\tau_0}{8}\right) \left(\frac{D}{u}\right)^n + k \left(\frac{3m+1}{4m}\right)^n 8^{n-1}}$	$m = \frac{nk \left(\frac{8u}{D}\right)^n}{\tau_0 + Kk \left(\frac{8u}{D}\right)^n}$

2.6 Estudo das características e eficiência dos materiais de combate a perda de circulação

Kumar et al. (2011) estudaram a eficiência da combinação de LCM em selar fraturas. Esses autores combinaram fibras, carbono grafite resistente e mármore, variando as concentrações dos componentes com o objetivo criar LCM mais eficientes. Para avaliar a eficiência dos materiais, foi confeccionada uma fenda metálica afunilada.

Essa fenda possui geometria similar as fraturas encontrada nos poços de perfuração, a figura 8 mostra o esquema conceitual da fenda utilizada.

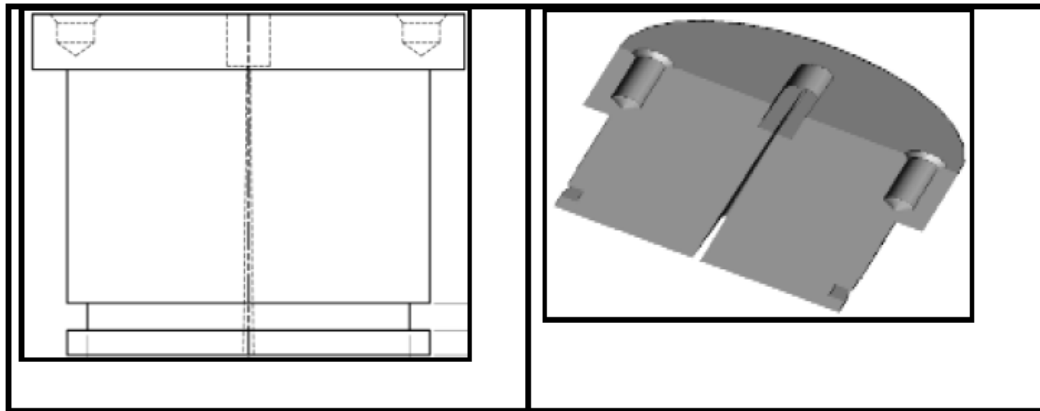


Figura 8. Fenda afunilada para o teste de selamento, Fonte: Kumar et al. (2011).

O teste em fratura foi realizado escoando através da fenda fluidos de perfuração aditivados com LCM (composto de uma combinação de fibras, carbono grafite resistente e mármore). Kumar et al. (2011) prepararam fluidos de perfuração similares aos utilizados nos poços de perfuração comerciais. Os fluidos continham na sua composição: barita, cloreto de sódio, viscosificante, hidróxido de sódio, material para controle de filtrado e estabilizante de cascalho. Os testes de selamento demonstraram a eficiência do fluido de perfuração aditivado com LCM em tamponar fraturas, pois uma vez que o fluido foi escoado pela fenda, rapidamente um tampão se formou e entupiu a mesma selando e impedindo a passagem de fluido. A Figura 9 apresenta o tampão formado pela ação do LCM.

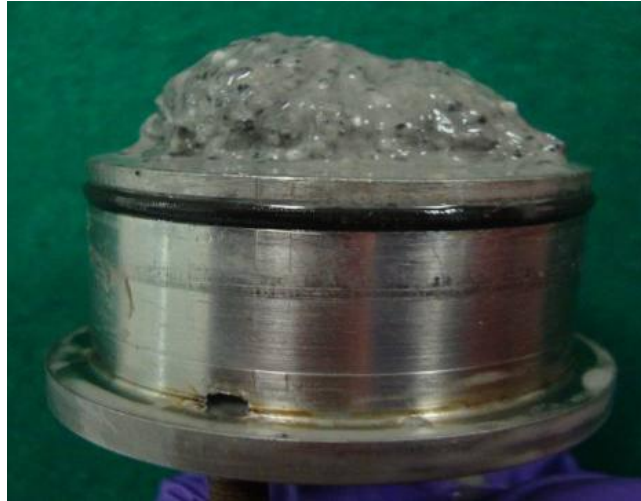


Figura 9. Tampão formado na fenda por ação do LCM, Fonte: Kumar et al. (2011).

Fibras mais longas são mais eficientes em selar fraturas quando atuando em conjunto com carbono grafite resistente e mármore do que fibras mais curtas, pois requerem uma menor concentração no fluido de perfuração para serem efetivas. Ressalta-se porém, que deve-se tomar cuidado na adição de fibras ao fluido de perfuração, uma vez que, em uma concentração excessivamente alta as fibras podem afetar negativamente a viscosidade e a estabilidade do fluido (KUMAR,2011).

Kulkami et al, (2011) estudaram a capacidade de suspensão de partículas de LCM em fluidos de perfuração, isto é, a resistência a decantação que as partículas de LCM possuem. Foram feitos experimentos utilizando LCMs compostos de cascas de castanhas em três diferentes granulometrias. Esses materiais foram adicionados a diferentes fluidos compostos de salmoura, viscosificantes e aditivos não identificados pelo autor. Os fatores que influenciam a capacidade de manter suspensas as partículas de LCM são o diâmetro médio das partículas de LCM, a tensão limite de escoamento do fluido, a densidade do material, densidade do fluido e a forma das partículas (KULKAMI, 2011). A Tabela a seguir mostra a porcentagem de partículas que se mantiveram suspensas em diferentes granulometrias para diferentes fluidos.

Tabela 6. Porcentagem de partículas que se mantiveram suspensas em diferentes fluidos, Fonte: Adaptada de Kulkami (2011).

Granulometria do LCM →			
	1180-1400 μm	850-1000 μm	500-600 μm
Características do Fluido ↓			
Fluido A (LSYP = 3, densidade = 9.0 ppg)	0%	0%	4%
Fluido B (LSYP = 4, densidade = 9.0 ppg)	1.3%	17.2%	40.3%
Fluido C (LSYP = 6, densidade = 9.0 ppg)	31.3%	45.6%	48 %
Fluido D (LSYP = 8, densidade = 10.0 ppg)	47.6	50.8%	51 %

Na Tabela 6 LSYP se refere a tensão limite de escoamento do fluido. Kulkami et al, (2011) demonstram que a capacidade de suspensão é maior para LCM com tamanho de partícula menor. Fluidos com maior tensão limite de escoamento são mais eficientes em manter suspensas as partículas de LCM. A Figura 10 mostra as partículas de LCM suspensas em fluidos com tensões limite de escoamento diferentes. LCM^T e LCM^B significam, respectivamente, a quantidade de LCM na metade superior e inferior do experimento.

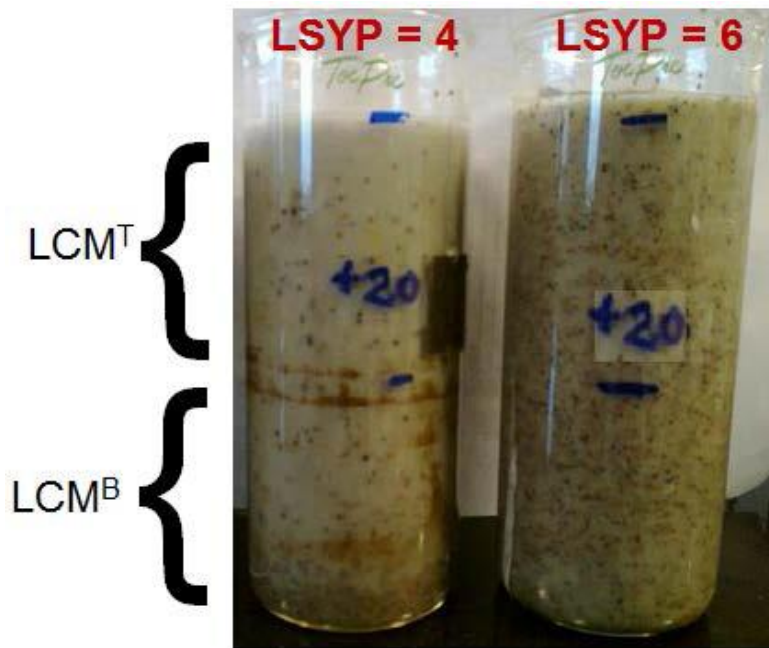


Figura 10. Suspensão de partículas de LCM em diferentes fluidos, Fonte: Kulkami (2011).

Duque Neto et al. (2015) estudaram as características e eficiência de suspensões de LCM, compostos de calcário laminar em selar fraturas presentes em um simulador de escoamento em fraturas. O SEF possuía fraturas de 2, 5 e 10 mm, que são as fraturas comumente encontradas nos poços, a Figura 11 apresenta o simulador de escoamento em fraturas.



Figura 11. Simulador de escoamento em fratura, fonte: Duque Neto (2015).

Foram preparadas suspensões de calcário laminar com duas distribuições granulométricas diferentes que foram escoadas pelo simulador, avaliando o tempo de selamento e o comportamento da vazão na fratura. Testes reológicos e de distribuição granulométrica do LCM foram realizados. A figura 12 mostra, a partir de 3 minutos, uma perda de circulação para uma fratura de 10 mm e a ação selante de uma suspensão do LCM composto de calcário laminar e goma xantana.

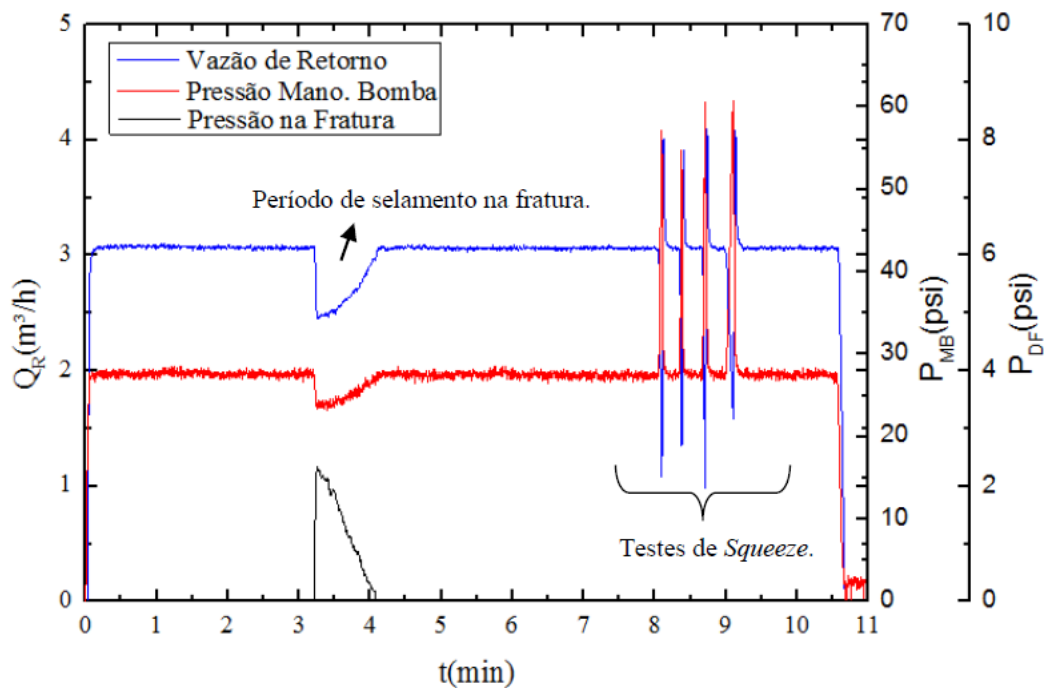


Figura 12. Ação selante do material de combate a perda de circulação.

Duque Neto et al. (2015) constataram a eficácia do LCM, pois a vazão de retorno, isto é, a vazão de que não está sendo perdida para fratura aumenta até que retorna ao seu patamar original comprovando que a fratura está selada. Resultados adicionais dos autores: a constatação que as suspensões de LCM e goma xantana possuem comportamento reológico de um fluido Herchel-Bulkley e que a granulometria do material de combate a perda de circulação segue uma distribuição bimodal.

Godoi (2017) deu prosseguimento ao trabalho de Duque Neto et al, (2015) em estudar a eficiência de suspensões de LCM compostos de calcário laminar e goma xantana no selamento de fraturas em um SEF. A contribuição de Godoi foi a análise da influência da concentração de LCM presente em suspensão no tempo de selamento. O autor também realizou testes reológicos para estudar a influência da concentração na reologia das suspensões. Godoi ainda avaliou os efeitos do diâmetro médio das partículas do LCM na eficiência do mesmo. A Figura 13 apresenta o comportamento

reológico das suspensões em diferentes concentrações de LCM através de suas curvas de fluxo.

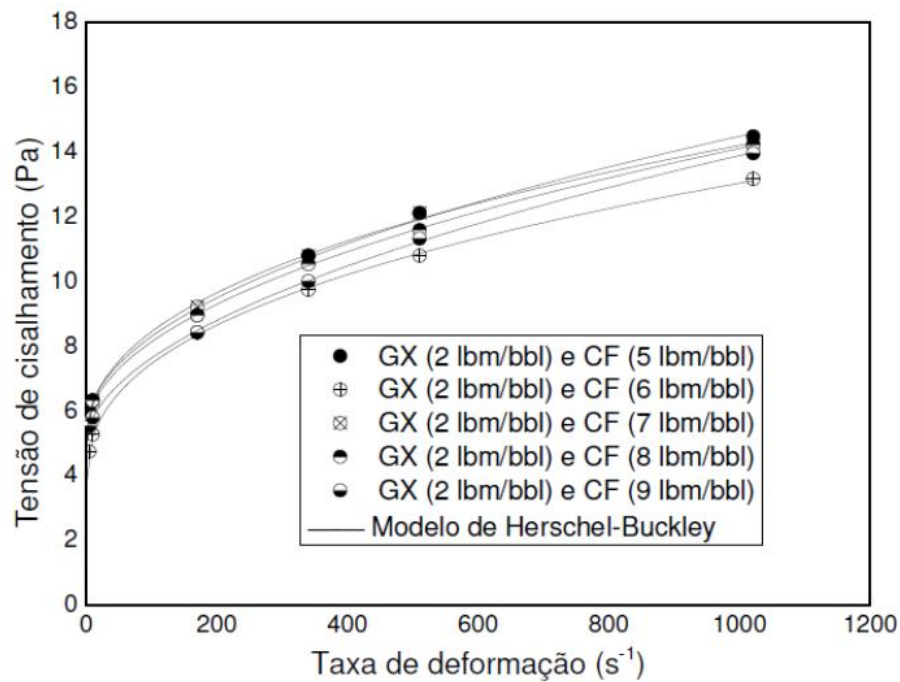


Figura 13. Curvas de fluxo das suspensões de Goma Xantana e Soluflake, Fonte: Godoi (2017).

Na Figura 10 C.F significa calcário laminar fino e GX significa goma xantana. O estudo de Godoi (2017) corrobora Calçada et al, (2015) em apontar que suspensões de LCM ,compostos por calcário laminar, e goma xantana possuem comportamento reológico de um fluido Herchel-Bulkley. Os resultados obtidos pelo autor para o selamento de uma fratura de 2 mm por suspensões de LCM e goma xantana para diferentes concentrações podem ser encontrados na Figura 14.

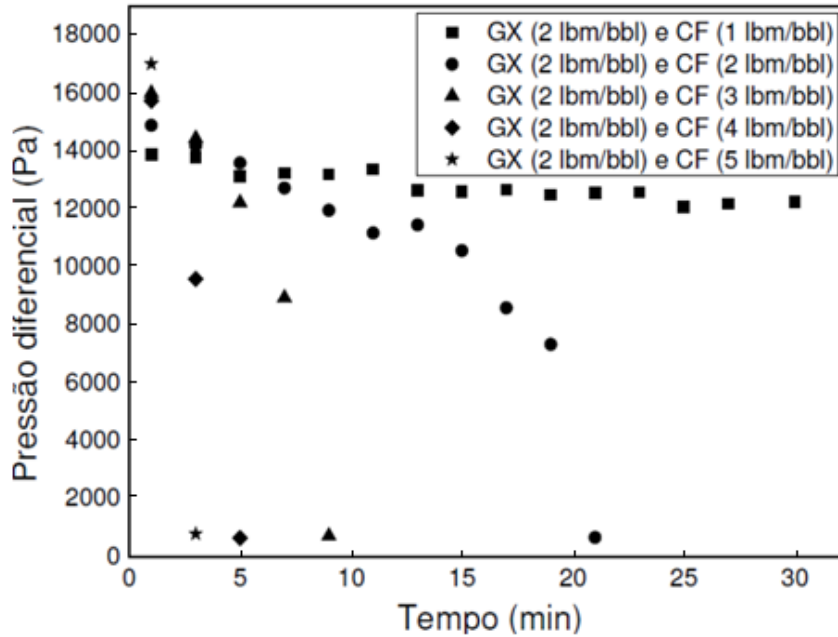


Figura 14. Selamento de uma fratura de 2mm em diferentes concentrações de LCM, Fonte: Godoi (2017)

A tabela 7 contém o tempo que cada LCM levou para selar uma fratura de 2 mm presente no simulador físico de escoamento em fratura.

Tabela 7. Variação do tempo de selamento com a concentração. Fonte: Godoi,2017.

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

Godoi (2017) apontou que o tempo de selamento cai conforme a concentração de LCM aumenta na suspensão, evidenciando que quanto maior a concentração de materiais selantes mais eficiente foi o selamento das fraturas no simulador.

Quando comparados os LCMs com diferentes distribuições granulométricas Godoi (2017) ressalta que o LCM com maior diâmetro médio, isto é, com partículas maiores foi significativamente mais eficiente em fechar fraturas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho desenvolvido teve como objetivo estudar o escoamento de suspensões materiais de combate a perda de circulação e fluidos não newtonianos em fraturas. Uma correlação entre a queda de pressão e a vazão em fraturas foi proposta. Estudou-se a ação selante de materiais de combate a perda de circulação, composto de borato e polímero. A metodologia utilizada será descrita nessa seção.

A metodologia desenvolvida foi dividida em quatro partes:

- Seleção e caracterização dos materiais testados;
- Testes no Simulador de Escoamento em Fraturas;
- Proposta da correlação para o escoamento em fratura;
- Testes de filtração em alta pressão.

As quatro partes serão descritas detalhadamente no decorrer dessa seção.

3.1 Seleção e caracterização dos materiais testados

3.1.1 Seleção dos Materiais

Nos trabalhos anteriores de Godoi (2017) e Duque Neto (2015) foi estudada a ação selante de LCMs granulares a base de calcário laminar. Neste trabalho foi utilizado um material de combate a perda de circulação composto de uma mistura de polímero e borato (PB). Esse material foi escolhido por possuir grande versatilidade em tamponar fraturas de diversos tamanhos, zonas de alta permeabilidade, e até mesmo, zonas cavernosas durante a perfuração de poços.

PB é uma mistura de borato e polímeros que tem como objetivo mitigar a perda de circulação durante operações de perfuração. Esse produto é fabricado pela empresa TNC-BRINADD sob o nome comercial de PBS PLUG 2000. O material possui cor branca e aspecto granular, sendo possível perceber que em sua composição existem partículas de diferentes tamanhos.

Para a realização dos testes de selamento, suspensões contendo PB foram preparadas para serem escoadas no SEF. As suspensões continham além do material de combate a perda de circulação, um polímero viscosificante. O polímero que foi selecionado para viscosificar a suspensão foi goma xantana. Esse material já foi utilizado por Duque Neto (2015) e Godoi (2017) para testes de selamento no SEF. O polímero foi capaz de atribuir aos fluidos um comportamento reológico semelhante aos fluidos de perfuração utilizados na indústria do petróleo. Um fluido foi preparado sem goma xantana e com amido para avaliar o efeito de um polímero diferente na eficiência do selamento em fratura. A goma xantana foi fornecida pela empresa System Mud e o amido pela Companhia Lorenz.

Para os testes de escoamento suspensões dos polímeros acima foram preparados, sem adição do material de combate a perda de circulação, e foram escoadas pelas fraturas do SEF.

3.2 Caracterização do LCM e suspensões testadas no SEF.

Testes para medir a densidade, composição e distribuição granulométrica do material de combate a perda de circulação foram realizados. Para os fluidos preparados foram realizados testes reológicos e de densidade. Os métodos para a realização de todos os testes citados serão descritos nas seções a seguir.

3.2.1 Caracterização do material de combate a perda de circulação

O teste de densidade de sólidos foi realizado através de picnometria a gás. Esse ensaio permite a determinação do volume ocupado por uma determinada massa de material através do volume de gás deslocado pela amostra. Uma vez munido do volume da amostra de material pôde-se calcular a densidade do mesmo.

A composição do material foi feita por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). As amostras de material foram preparadas por fusão à 1050 °C na máquina VULCAN, na diluição 1:6 - (1 g de amostra seca à 105°C e 6g de fundente), utilizando como fundente mistura de metaborato de lítio e tetraborato de lítio (64% Li_2BO_4 e LiBO_2 36%).

A análise granulométrica foi feita no equipamento Hydro 2000 Mu da marca Malvern, esse analisador de partícula usa a técnica de difração laser, isto é, o laser

emitido pelo equipamento passa pelas partículas suspensas no solvente, água nesse caso, e sofre um desvio. Esse desvio é medido pelos sensores do equipamento e o diâmetro de partícula é calculado de acordo com a intensidade do desvio sofrido. A Figura 15 mostra o equipamento Hydro 2000 Mu.



Figura 15. Equipamento utilizado para estudar a distribuição granulométrica do LCM.

3.2.1 Caracterização das suspensões testadas no SEF

O teste para medição da densidade dos fluidos utilizados nos testes de escoamento e selamento foi realizado com uma balança de lama (*mud balance*) modelo 140 da marca Fann. A densidade foi aferida por meio do preenchimento do recipiente contido no material até o transbordo do mesmo. A balança de lama foi apoiada em seu suporte e moveu-se a posição do contrapeso do equipamento até que houvesse equilíbrio entre o contrapeso e o copo preenchido com material. A Figura 16 mostra a balança de fluido.



Figura 16 Balança de Fluido Fann, Fonte: Fann (2017).

O comportamento reológico do material foi apurado com o reômetro Rheostress 1 da empresa Haake. Esse equipamento é capaz de submeter fluidos a uma varredura de taxas de cisalhamento e medir a tensão cisalhante que o material está submetido a cada taxa. A geometria utilizada nesse trabalho para a medição das curvas de fluxo foi a de cilindros coaxiais. A reologia foi medida através da retirada de uma alíquota dos fluidos utilizados nos testes de selamento ou escoamento contendo 11,5 mL. A alíquota foi adicionada na região entre os cilindros coaxiais do equipamento e foi dado o comando ao software do reômetro para realização da curva de fluxo. Um software fornecido pelo fabricante do equipamento foi utilizado para determinar o modelo que melhor descrevesse o comportamento reológico do fluido. A Figura 17 apresenta o reômetro utilizado e a figura 18 mostra a geometria de cilindros coaxiais.



Figura 17 Reômetro utilizado para o estudo da reologia dos fluidos.



Figura 18 Cilindros coaxiais utilizados na reometria.

3.3 Testes no simulador de escoamento em fratura

Para estudar a ação dos materiais de combate a perda de circulação no selamento de fraturas e propor uma correlação entre a vazão e a queda de pressão em fendas foram realizados testes em uma unidade experimental contendo um simulador de escoamento em fraturas. Godoi (2017) e Duque Neto (2015) também utilizaram o simulador de escoamento em fratura para coleta de dados de escoamento e selamento. A descrição completa da unidade experimental, dos fluidos testados e da metodologia dos testes será demonstrada nas seções a seguir.

3.3.1 Descrição da unidade experimental

A unidade experimental que foi montada para realização de escoamento em fratura é composta por um tanque de mistura e armazenamento, tubos de ferro galvanizado, mangueiras industriais, uma bomba de deslocamento positivo, o simulador de escoamento em fratura e um transdutor diferencial de pressão. A figura 19 mostra um esquema simplificado da unidade experimental.

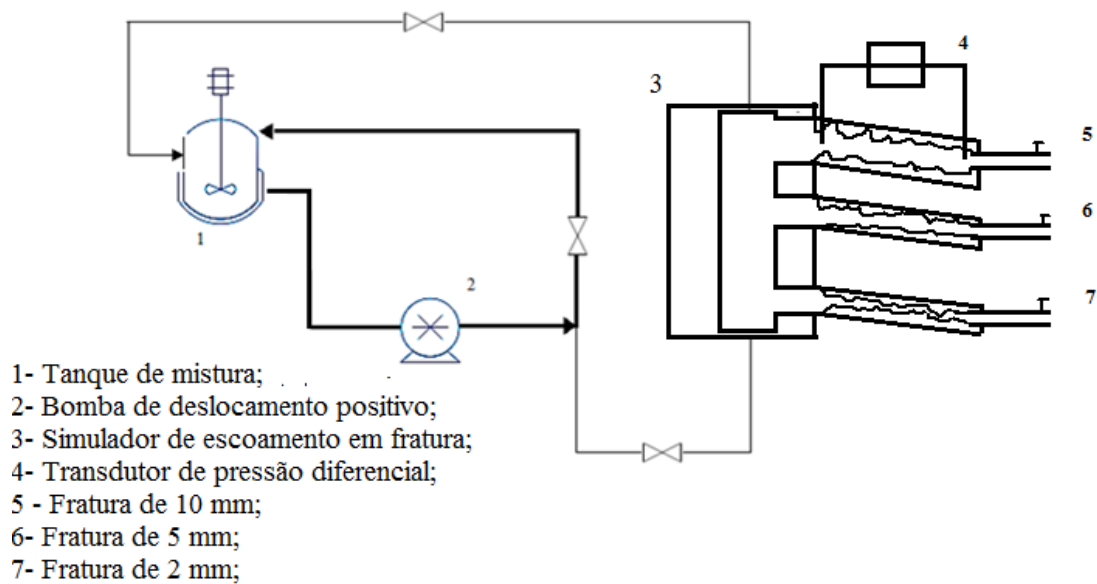


Figura 19 Esquema da unidade experimental.

O tanque de mistura e armazenamento é da marca Noxford e possui capacidade de 200 L, construído em aço inox. Esse tanque possui controle de agitação chegando até 10000 rpm além de possuir controle de temperatura. A função do tanque é preparar e armazenar as suspensões que serão circuladas por toda a unidade experimental, a figura 20 mostra o tanque de mistura e armazenamento.



Figura 20 Tanque de mistura e agitação.

A bomba de deslocamento positivo helicoidal é fabricada pela empresa WEATHERFORD e possui potência de 25 HP. Essa bomba circula o fluido de perfuração do tanque de mistura e armazenamento para o sistema com vazões de até 20 m³/h e pressões de recalque da ordem de 12 kgf/cm². Na Figura 21 pode-se observar a bomba conectada ao tanque.



Figura 21 Bomba de deslocamento positivo, Fonte: Autoria Própria.

A bomba é ligada ao tanque por uma tubulação vertical de 2” conecta-se a uma tubulação horizontal de 1”, que se divide em duas linhas. A primeira linha corresponde

a uma tubulação de 2” que retorna o fluido para o tanque de alimentação. A outra linha consiste em uma tubulação que sofre uma redução de 1” para um tubo de 5,5 cm de comprimento. Esse tubo conecta-se através de um engate rápido a uma mangueira industrial de 3 m de comprimento, que alcança a parte inferior da região anular do SEF. Após percorrer o simulador de escoamento em fratura o fluido o fluido passa por uma mangueira industrial de 9 m de comprimento presente na parte superior do SEF. Posteriormente, o fluido segue para uma tubulação de 2,25 m e uma mangueira de 2,72 m de comprimento até retornar ao tanque.

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

O controle da rotação da bomba foi feito utilizando o inversor de frequência presente no painel de controle e apresentado na Figura 22, controlando a rotação pode-se aumentar ou diminuir a vazão de escoamento do fluido.



Figura 22 Inversor de frequência, Fonte: Godoi 2017.

O simulador de escoamento em fratura é conectado a unidade experimental por mangueiras industriais de 1300 psi em sua entrada e saída. Esse simulador tem a função de reproduzir a circulação de fluidos pela região anular de poços de perfuração. Esse

equipamento permite estudar o escoamento de fluidos por fraturas de diferentes aberturas. A Figura 23 mostra uma imagem do simulador de escoamento em fratura.

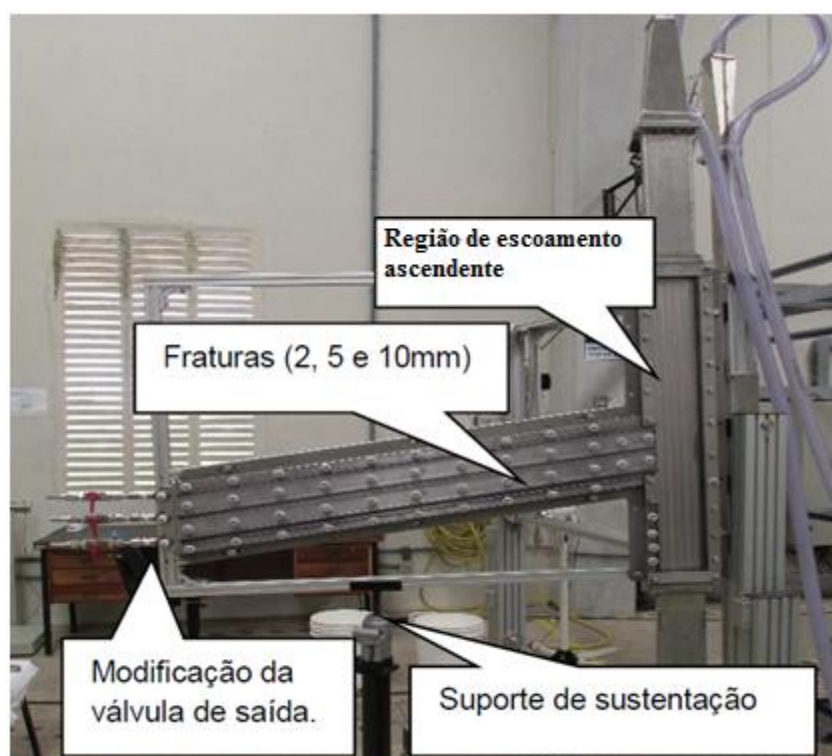


Figura 23 Simulador de Escoamento em fratura, Fonte: Duque Neto (2015)

O equipamento possui duas regiões: a região de escoamento ascendente e as fraturas.

A região de escoamento ascendente do equipamento possui uma geometria retangular com 9,21 cm de largura e 1 cm de profundidade. Essa região reproduz o escoamento de fluidos por um anular comercial de 12 ¹/₄ ” de diâmetro (31,115 cm). Na região de escoamento ascendente do simulador estão presentes três saídas laterais com inclinação de 8,92 ° em relação ao escoamento ascendente. Essas saídas possuem aberturas de 10, 5 e 2 mm, todas possuem comprimento de 1,02 m e 1 cm de profundidade. As saídas laterais reproduzem possíveis fraturas presentes na rocha sedimentar durante o escoamento. As saídas laterais do equipamento foram construídas com base em imagens de raio- X e ultrassom de fraturas reais, de forma possuírem dimensões, rugosidades e tortuosidades similares as fraturas comumente encontradas durante a perfuração de poços comerciais. No final de cada fratura existem válvulas que permitem que fluido escoe ou não pelas fraturas, permitindo que o operador do

equipamento escolha se vai estudar o escoamento por uma duas ou três fraturas ao mesmo tempo. Na abertura e no final das fraturas foram instalados pontos para coleta da pressão, permitindo que se afira a queda de pressão ocorrida. O equipamento responsável pela medição da pressão na fratura foi um transdutor de pressão diferencial da marca SMAR, modelo LD 301D, a figura 24 mostra o transdutor de pressão.



Figura 24 Transdutor de pressão, Fonte: Smar 2017.

O equipamento é constituído de aço inox com frente em acrílico para a visualização do escoamento, no entanto o acrílico limita a pressão máxima suportada pelo equipamento para 150 psi.

3.3.2 Metodologia experimental dos testes do no Simulador

3.3.3 Preparo dos fluidos

No SEF foram realizados testes de escoamento para fluidos não selantes e testes de selamento para fluidos selantes. Os fluidos testados no simulador de escoamento em fraturas são a base de água. A Tabela 8 apresenta as composições de cada fluido.

Tabela 8. Fluidos testados no SEF

Fluido	Conc. Amido(lb/bbl)	Conc. Goma Xantana (lb/bbl)	Conc. LCM (lb/bbl)
Fluido 1	0,0	0,0	0,0
Fluido 2	6,0	0,0	15
Fluido 3	0,0	2,0	0,0
Fluido 4	0,0	2,0	5,0
Fluido 5	0,0	2,0	10,0
Fluido 6	0,0	2,0	15,0
Fluido 7	0,0	2,0	25,0
Fluido 8	0,0	2,0	50
Fluido 9	0,0	0,0	0,0

O fluido 1 é apenas água industrial, que foi utilizado para testar a unidade e avaliar a compatibilidade dos valores medidos de queda de pressão e vazão do escoamento com o valores encontrados na literatura. Os fluidos 3 e 9 foram utilizados para os testes de escoamento, isto é, os mesmos não possuem propriedades selantes. Já os fluidos 2, 4-8 contém LCM, o que lhes conferem capacidade de atuar no selamento de fraturas.

O fluido 2 continha um suspensão de amido na concentração de 6,0 lb/bbl (17,1 kg/m³). Essa concentração foi previamente utilizada por Duque Neto (2015). Nos poços de petróleo o amido é utilizado para controlar o volume de filtrado gerado na perfuração. Esse material foi preparado pela adição gradativa de amido ao tanque de mistura contendo água. A adição foi realizada sob agitação de 5000 rpm e, após todo o amido ter sido adicionado, o material passou por mais 45 minutos de agitação na mesma velocidade. Após a dissolução do amido o LCM foi adicionado ao tanque de mistura sob agitação de 5000 rpm. Uma vez concluída a adição de LCM, submeteu-se a suspensão final a mais 45 minutos de agitação na mesma velocidade.

O fluido 3 era uma suspensão de Goma Xantana na concentração de 2 lb/bbl (5,71 kg/m³). Esse valor foi escolhido baseado na concentração utilizada nas operações de perfuração para viscosificar o fluido injetado no poço que está sendo perfurado (DUQUE NETO, 2015; GODOI 2017). O fluido 3 foi preparado pela adição massa de goma xantana necessária ao tanque de mistura sob a agitação de 5000 rpm. Após a adição do polímero o fluido foi agitado por mais 45 minutos sob o mesmo número de

rpm. O fluido ficou em repouso por 24 h para que a goma xantana completasse seu processo de hidratação.

O preparo dos fluidos 4-8 ocorreu com a adição de LCM ao fluido 3. O material de combate a perda de circulação foi adicionado sob agitação de 5000 rpm por 45 minutos. As concentrações finais de LCM nas suspensões 4, 5, 6, 7 e 8 foram respectivamente 5, 10, 15, 25, 50 lb/bbl.

Foram realizados experimentos de escoamento com um fluido a base de água e carboximetilcelulose com concentração de 2,0 lb/bbl ($5,71 \text{ g/cm}^3$), chamado de fluido 9 e preparado da mesma forma que o fluido 3.

3.3.4 Testes de escoamento em fratura

Os testes de escoamento foram realizados de no SEF para os fluidos 1, 3, 4 e 9. O objetivo foi estudar o escoamento de fluidos em fratura, coletando dados de queda de pressão e vazão na fratura para que posteriormente uma correlação entre os mesmos fosse proposta.

Os dados de queda de pressão foram coletados pelo transdutor de pressão diferencial previamente descrito na seção 3.3.1, a vazão mássica foi medida através da coleta de todo o fluido que escoava pela fratura em um dado tempo, a massa coletada foi pesada em uma balança móvel de piso digitron, ilustrada na Figura 25.



Figura 25 Balança de piso digitron, Fonte: Godoi (2017)

O processo do teste de escoamento iniciava-se com o preparo do fluido que iria ser escoado. Uma vez pronto o fluido, válvulas de entrada e saída do anular do SEF eram abertas e a bomba de deslocamento acionada. O fluido circulava através do SEF por 3 minutos. A vazão do fluido na fratura era controlada pela rotação da bomba. A relação entre a rotação da bomba e a vazão na fratura para a água está presente na Figura 26.

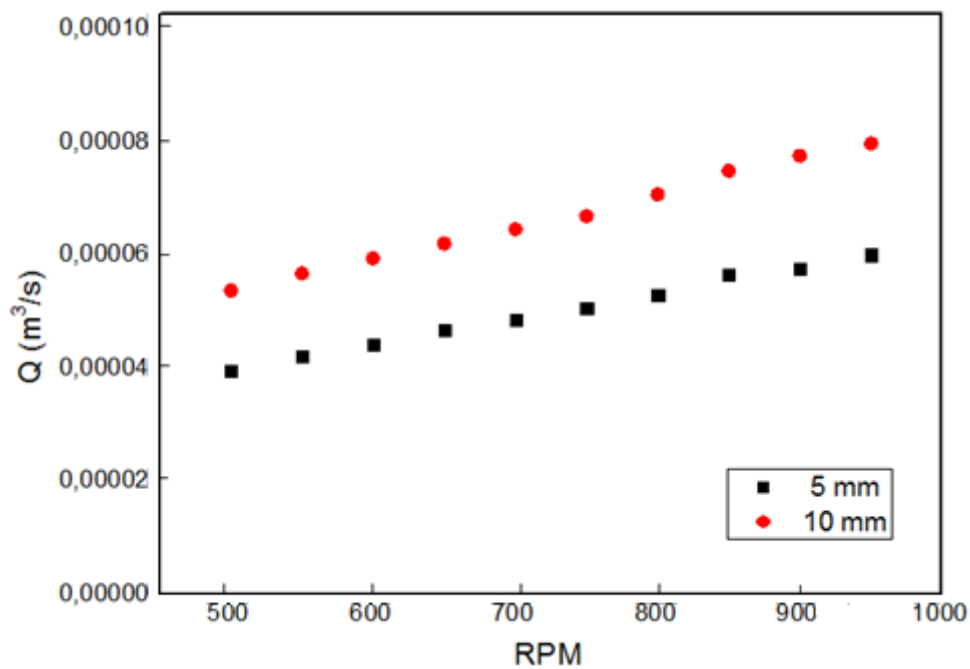


Figura 26 - Relação entre vazão de água na fratura e rotação da bomba.

Após três minutos circulando através na região anular as válvulas das fraturas eram abertas, permitindo que os fluidos escoassem pelas fraturas do equipamento. Os dados de queda de pressão e vazão eram medidos no período de 1 minuto para cada valor de rpm da bomba. As rotações utilizadas nos testes de escoamento foram de 500 até 950 rpm. Uma vez que os dados de queda de pressão e vazão para as três fraturas foram adquiridos para todas as rotações o teste era dado por encerrado. Cada teste dado de vazão e queda de pressão foi coletado em duplicata.

3.3.5 Testes de selamento da fratura

Os testes de selamento realizados com os fluidos 2, 4-8 tiveram como objetivo avaliar a eficiência das suspensões contendo materiais de combate a perda de circulação em selar as fraturas presentes no SEF. Durante toda a duração do teste dados de queda de pressão na fratura e vazão foram adquiridos.

O processo experimental do teste era iniciado com o preparo do fluido. Uma vez preparado o fluido a válvulas de entrada e saída do anular do SEF eram abertas e a bomba de deslocamento positivo era acionada. O fluido era circulado através do SEF por 1 minuto. Após esse procedimento inicial, a válvula da fratura que se queria estudar o selamento era aberta para que o fluido pudesse escoar livremente pela mesma, o teste continuava com o fluido escoando pela fratura até que a mesma fosse selada ou que a duração máxima de 10 minutos fosse alcançada, durante toda a duração do experimento dados de queda de pressão e vazão eram coletados manualmente.

3.4 Modelagem dados de escoamento em fratura

Para modelar o escoamento em fraturas horizontais utilizou-se a equação de Darcy-Weisbach, (BIRD *et al*, 2013) em sua forma quadrática como ponto de partida, equação (24). Essa equação é utilizada, para correlacionar a queda de pressão em um dado comprimento de tubo com a velocidade média do fluido que escoar pelo mesmo.

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{v^2}{2g}. \quad (24)$$

Essa equação foi desenvolvida para o escoamento em tubos. O conceito de diâmetro hidráulico D_H foi então utilizado para possibilitar que a equação 24 seja válida para o escoamento em fraturas. O diâmetro hidráulico de uma fratura pode ser calculado pela equação 25, utilizada previamente por Godoi (2017).

$$D_H = 2 \cdot \left(\frac{w \cdot H}{w + H} \right). \quad (25)$$

A equação modificada com o diâmetro hidráulico está presente abaixo.

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = f \left(\frac{L}{D_H} \right) \frac{\langle v \rangle^2}{2g}. \quad (26)$$

O fator de atrito de Darcy para o regime laminar é descrito na equação 27 (*BIRD et al.*)

$$f = \frac{a}{Re} \quad (27)$$

Onde Re é o número de Reynolds e a é a constante do fator de atrito de Darcy, que varia com a geometria do escoamento. Nesse trabalho o valor utilizado para constante a é o mesmo que para o escoamento em tubos: 64. A equação 1 foi então substituída na equação 27, obtendo-se a equação 28

$$f = \frac{a\mu}{\rho D_H \langle v \rangle}. \quad (28)$$

A velocidade pode ser escrita em termos de vazão e área de escoamento, como pode ser observado na equação 29.

$$\langle v \rangle = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \left(\frac{D_H}{2} \right)^2}. \quad (29)$$

Substituindo as equações 29 e 28 na equação 26 chega-se na equação 30, que correlaciona a vazão com a queda de pressão na fratura.

$$\Delta P = \frac{2QLa\mu}{\pi(D_H)^4} \quad (30)$$

A equação 30 é válida apenas para fluidos newtonianos, mas acompanhando Godoi (2017) e Cherny e Lapin (2017) utilizou-se o conceito de viscosidade aparente para descrever a viscosidade do fluido em dada taxa de cisalhamento. A equação 30 foi modificada para utilizar a viscosidade aparente do fluido. Onde μ_{app} é a viscosidade aparente do fluido não newtoniano

$$\Delta P = \frac{2QLa\mu_{app}}{\pi(D_H)^4} \quad (31)$$

A viscosidade aparente pode ser calculada se soubermos o comportamento reológico do fluido e a taxa de cisalhamento pela qual ele está sendo submetido (CHERNY & LAPIN, 2017; GODOI, 2017).

A taxa de cisalhamento pode ser calculada a partir da velocidade média de escoamento e do diâmetro hidráulico (MASSARANI, 1999). A equação abaixo mostra o cálculo da taxa de cisalhamento do fluido. Onde γ é a taxa de cisalhamento e δ é um parâmetro com valor de 6,4 para tubos.

$$\gamma = \frac{\delta \langle v \rangle}{D_H} \quad (32)$$

Com o cálculo da taxa de cisalhamento na fratura e assumindo um modelo reológico de Herchel-Bulkley, pode-se calcular a viscosidade do fluido a dada taxa de cisalhamento (viscosidade aparente). Uma vez que a viscosidade é a razão entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento (BIRD et al.), substitui-se as equações 22 e 32 na equação 31, como pode ser visto a abaixo.

$$\Delta P = \frac{\tau_0 aL}{2\delta D_H} + \frac{KaL\delta^{n-1}}{2^{n+2} \pi^n} Q^n \left(\frac{2}{D_H} \right)^{3n+1} \quad (33)$$

É obtida então uma correlação entre a queda de pressão e a vazão em fraturas que leva em conta os parâmetros reológicos do fluido e o diâmetro da fratura.

Para simplificar a equação as seguintes relações foram propostas:

$$\alpha = \frac{\tau_0 aL}{2\delta}; \quad (34)$$

$$\beta = \frac{KaL\delta^{n-1}}{2^{n+2} \pi^n}. \quad (35)$$

A equação final para a correlação entre queda de pressão e vazão em fraturas horizontais para fluidos não newtonianos escoando em regime laminar está presente na equação 36.

$$\Delta P = \frac{\alpha}{D_H} + \beta Q^n \left(\frac{2}{D_H} \right)^{3n+1} \quad (36)$$

Caso a fratura possua inclinação desnível entre a altura inicial e final deverá ser considerado, resultando na equação 37.

$$\Delta P^* = \frac{\alpha}{D_H} + \beta Q^n \left(\frac{2}{D_H} \right)^{3n+1} \quad (37)$$

Onde

$$\Delta P^* = \Delta P - \text{sen}(\theta) g L \rho \quad \text{Se o escoamento for ascendente;}$$

$$\Delta P^* = \Delta P + \text{sen}(\theta) g L \rho \quad \text{Se o escoamento for descendente;}$$

Perceber que o termo $\frac{\alpha}{D_H}$ impede que a queda de pressão seja zero quando a vazão é zero, que é o que normalmente ocorre nas correlações da literatura. Isso acontece pela presença da tensão limite de escoamento, sendo assim o termo $\frac{\alpha}{D_H}$, pode ser considerada a pressão mínima necessária para vencer a tensão mínima de cisalhamento do fluido na geometria apresentada na fratura.

Se o fluido possuir comportamento de Power Law, isto é, com a tensão limite de escoamento $\tau_0 = 0$, a equação 36 fica reduzida a equação 38 a seguir.

$$\Delta P = \beta Q^n \left(\frac{2}{D_H} \right)^{3n+1} . \quad (38)$$

3.5 Proposta do monitoramento do selamento em fratura

Foi proposta uma técnica que monitorou o selamento de fraturas com dados de diminuição do diâmetro da fratura com o tempo. O equacionamento a seguir será feito para um fluido do tipo Power Law, para simplificar o equacionamento. Explicitando o diâmetro hidráulico na equação 37, temos como resultado a equação 38.

$$D_H = 2 \left(\frac{\beta}{\Delta P} \right)^{\frac{1}{3n+1}} Q^{\frac{n}{3n+1}} . \quad (39)$$

Essa equação permitiu o cálculo do diâmetro hidráulico dado um par de valores de queda de pressão e de vazão na fratura. Para que se monitore a variação desse diâmetro no tempo foi calculada a derivada total no tempo da equação 38, a sequência abaixo culmina na equação 42.

$$\frac{d(D_H)}{dt} = \frac{\partial D_H}{\partial Q} \left(\frac{dQ}{dt} \right) + \frac{\partial D_H}{\partial \Delta P} \left(\frac{d\Delta P}{dt} \right); \quad (40)$$

$$\frac{d(D_H)}{dt} = \frac{2(\beta)^{\frac{1}{3n+1}}}{3n+1} \left[\frac{nQ^{1-2n}}{3n+1} \left(\frac{dQ}{dt} \right) - \frac{\Delta P^{-(3n+2)}}{3n+1} \left(\frac{d\Delta P}{dt} \right) \right]; \quad (41)$$

$$\frac{d(D_H)}{dt} = \frac{2(\beta)^{\frac{1}{3n+1}}}{3n+1} \left[\frac{nQ^{1-2n}}{3n+1} \left(\frac{Q(\Delta t+t) - Q(t)}{\Delta t} \right) - \frac{\Delta P^{-(3n+2)}}{3n+1} \left(\frac{\Delta P(\Delta t+t) - \Delta P(t)}{\Delta t} \right) \right]. \quad (42)$$

A equação 42 é a proposta para monitorar a variação do diâmetro hidráulico e poderá ser utilizada para avaliar a progressão do selamento.

3.6 Testes de filtração em alta pressão

Foram realizados experimentos de filtração em pressão de 300 psi para avaliar como uma suspensão contendo LCM se comportaria frente a um meio filtrante, essa pressão foi escolhida para simular as altas pressões que os fluidos de perfuração estão submetidos. As características da torta formada durante essa filtração com diferentes concentrações de LCM também foram medidas. O teste de filtração utilizou um aparato contendo um filtro de alta pressão e um cilindro de nitrogênio utilizado para pressurização desse filtro. A Figura 27 apresenta o filtro e o cilindro de nitrogênio. Como a filtração é um processo que ocorre durante o selamento de fraturas nos poços de petróleo (COOK, 2012), é importante entender o efeito das partículas de LCM no volume de filtrado e as características da torta formada durante a filtração do fluido selante.



Figura 27. Unidade utilizada nos testes de filtração em alta pressão; (A)- Cilindro de nitrogênio, (B)- Filtro de alta pressão.

A Figura 28 apresenta a célula de filtração em aço inox em que o fluido fica contido durante o processo de filtração.



Figura 28 Célula de filtração e equipamentos auxiliares.

O teste de filtração foi realizado na pressão de 300 psi, teve duração de 30 minutos e um papel de filtro foi utilizado como meio filtrante. O fluido filtrado foi coletado em um béquer e o volume coletado era medido a cada 10 segundos. Após 30 minutos o teste foi encerrado e a célula foi despressurizada para a coleta da massa de torta e espessura da mesma.

Os fluidos 3, 4, 6 e 7 foram testados filtrados na célula, a torta resultante dessa filtração foi pesada e sua espessura medida com um paquímetro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Seleção e caracterização dos materiais testados

Os testes de caracterização do material selante consistiram na de análise granulométrica, picnometria de sólidos e composição do material. Nos fluidos foram realizados testes de comportamento reológico e de densidade.

4.1.1 Análise Granulométrica

A Figura 29 apresenta a distribuição granulométrica do material de combate a perda de circulação a base de polímeros e borato. O eixo vertical mostra a porcentagem em massa correspondente a cada diâmetro e o eixo horizontal corresponde ao diâmetro de partícula.

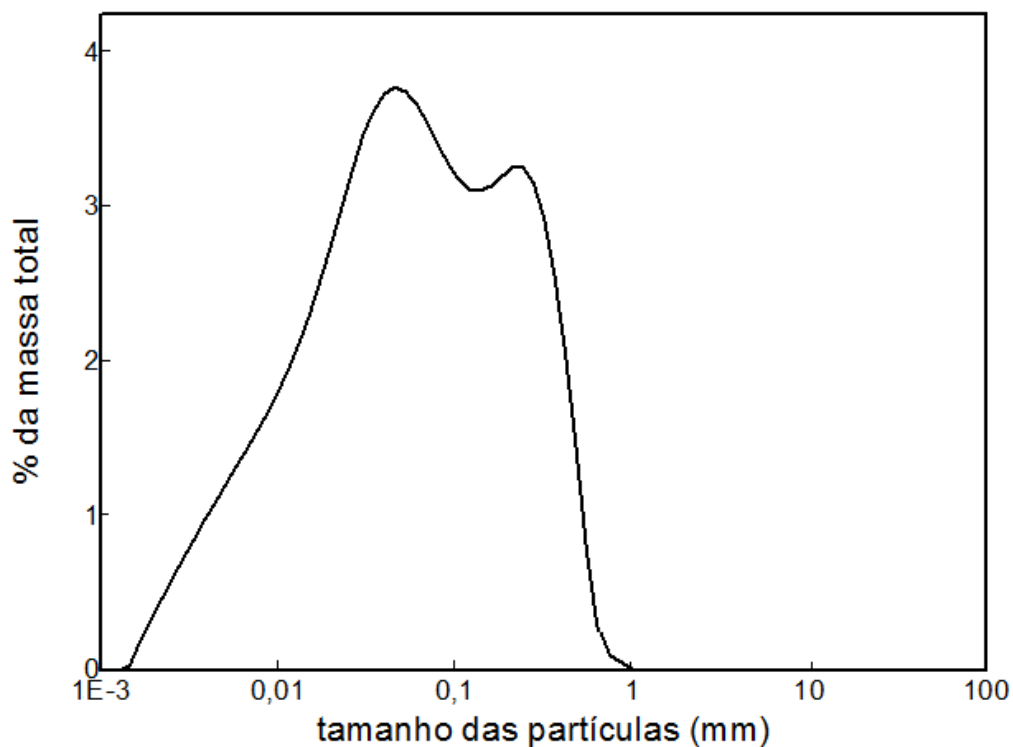


Figura 29. Distribuição granulométrica do LCM

A distribuição granulométrica é bimodal, isto é, existem dois picos definidos de porcentagem de tamanho de partícula no gráfico de granulometria. O diâmetro médio é de 108,38 μm (0,10838 mm) e o material possui 80 % de suas partículas com tamanho entre 10 e 400 μm .

4.1.2 Picnometria de sólidos

Para aferir a densidade do LCM estudado foi realizado um teste de picnometria de sólidos a gás. O teste foi realizado em quintuplicata, a média dos valores de densidade é 2,1257 g/cm^3 e o desvio padrão é de 0,001 g/cm^3 .

O valor de densidade encontrado para o LCM composto de polímero e borato é baixo o suficiente para não alterar significativamente a densidade dos fluidos de perfuração nas concentrações que serão utilizadas nessa dissertação. A densidade dos fluidos contendo esse material será mostrada a na próxima seção.

4.1.3 Composição do material de combate a perda de circulação

O resultado dos testes de espectrometria de fluorescência de raios-X está apresentado na Tabela 9 que contém a porcentagem de cada elemento na massa total da amostra, onde PPC significa a massa perdida por calcinação.

Tabela 9 Porcentagens em massa dos elementos obtidos na espectrometria de fluorescência de raios X.

Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	MgO	SrO	PPC
8,7	0,20	4,9	0,15	<0,1	39,8	4,2	1,0	40,6

A alta porcentagem de CaO na análise indicou que o elemento cálcio está presente em alta quantidade no material de combate a perda de circulação. A perda por calcinação (PPC) também mostrou que o LCM é composto de uma porcentagem significativa de materiais voláteis. Essas duas informações aliadas as especificações do fabricante permitem afirmar que o material é composto em sua grande maioria de borato de cálcio e compostos orgânicos poliméricos. A porcentagem de K₂O, Na₂O e SiO₂ totalizam 13,6 % da massa da análise, indicando que o material possui em sua composição materiais solúveis em água.

4.1.4 Densidade dos fluidos testados no simulador de escoamento em fratura

A densidade de fluidos foi medida utilizando uma balança de fluido, a Tabela 10 apresenta a densidade dos fluidos testados e as temperaturas em que as alíquotas foram coletadas no tanque.

Tabela 10 Densidade dos fluidos testados no simulador de escoamento em fratura.

Fluido	Descrição	Densidade (g/cm ³) ±		Temperatura (°C)
		0,01		± 0,5
1	Água	1,00		25,5
2	Amido + LCM (15,0 lb/bbl)	1,03		26,6
3	Goma Xantana	0,99		26,6
4	Goma Xantana LCM (5,0 lb/bbl)	1,00		25,9
5	Goma Xantana LCM (10,0 lb/bbl)	1,01		25,5
6	Goma Xantana LCM (15,0 lb/bbl)	1,02		25,3
7	Goma Xantana LCM (25,0 lb/bbl)	1,03		25,5
8	Goma Xantana LCM (50,0 lb/bbl)	1,04		26,3
9	CMC	0,99		25,2

A presença de sólidos nos fluidos 2, 4, 5, 6, 7, 8, causa um aumento na densidade final da suspensão, além disso, uma observação da densidade nos fluidos 4-8 aponta que a densidade do fluido aumenta com um aumento na concentração de LCM.

4.1.4 Reologia dos fluidos

Foram realizadas curvas relacionando a tensão de cisalhamento do fluido com a taxa de cisalhamento aplicada nos mesmos (curvas de fluxo). Os dados de tensão e taxa de cisalhamento mostraram que os fluidos apresentavam comportamento pseudoplástico com tensão limite de escoamento. Esses dados foram ajustados pelo modelo reológico Herschel-Bulkley. A Tabela 11 apresenta os parâmetros tensão limite de escoamento (τ_0), índice de consistência e índice (k) de comportamento (n) do modelo reológico.

Tabela 11 Parâmetros do modelo reológico de Herschel-Bulkley.

Fluido	Descrição	τ_0 (Pa)	k Pa.s ⁿ	n
1	Água	1,00	0,001	1,00
2	Amido (6,0 lbm/bbl) + LCM (15 lbm/bbl)	1,00	0,73	0,49
3	G.X (2,0 lbm/bbl)	3,48	0,28	0,50
4	G.X(2,0 lbm/bbl) + LCM (5 lbm/bbl)	4,10	0,48	0,46
5	G.X(2,0 lbm/bbl) + LCM (10 lbm/bbl)	3,94	0,69	0,44
6	G.X(2,0 lbm/bbl) + LCM (15 lbm/bbl)	1,00	1,44	0,35
7	G.X(2,0 lbm/bbl) + LCM (25 lbm/bbl)	4,49	0,62	0,46
8	G.X(2,0 lbm/bbl) + LCM (50 lbm/bbl)	4,48	1,03	0,44
9	CMC (2,0 lbm/bbl)	0,20	1,09	0,47

Todos os fluidos excetuando-se a água pura são não newtonianos e apresentaram coeficientes de correlação entre 0,999 e 0,97, o que indica que o modelo Herschel-Bulkley foi capaz de ajustar satisfatoriamente os dados experimentais. A Figura 30 apresenta a comparação das curvas reológicas dos fluidos 3, 4, 5,6 e 7. O eixo horizontal é a taxa de cisalhamento imposta pelo reômetro e o eixo vertical a resposta medida em tensão cisalhante.

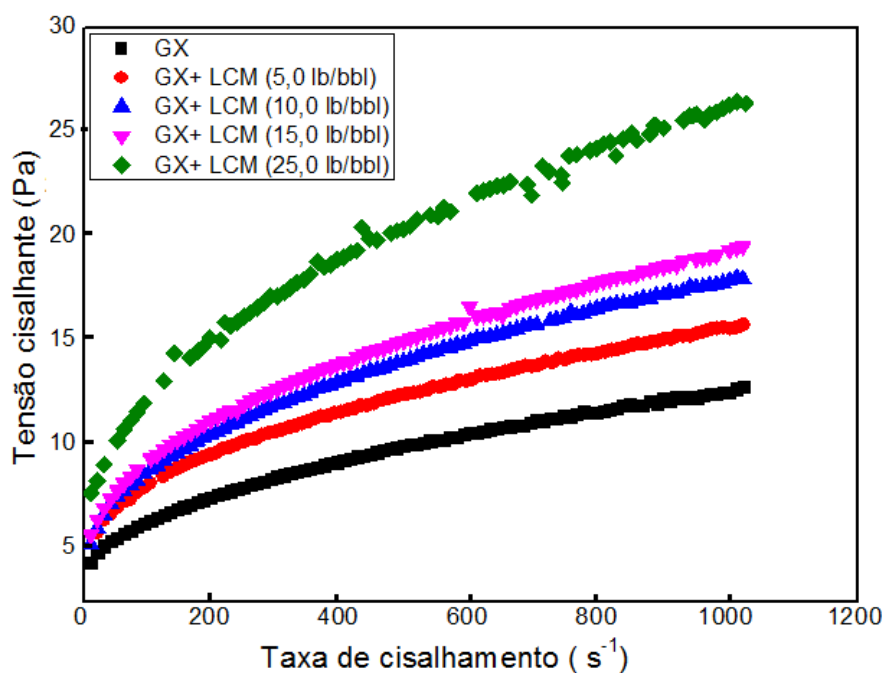


Figura 30 Curvas de fluxo das suspensões de LCM em diferentes concentrações.

A tensão cisalhante do fluido aumenta com o aumento na concentração do material de combate a perda de circulação. O que indica que o fluido se torna mais viscoso a medida que aumenta-se a quantidade de partículas de LCM.

4.2 Testes no simulador de escoamento em fratura

Os dados de vazão e queda de pressão coletados nos testes de escoamento e selamento no simulador de fratura serão apresentados nessa seção. Ao final dessa seção a ação dos fluidos preparados nesse trabalho será comparada com a dos fluidos preparados por Godoi (2017).

4.2.1 Testes de Escoamento

Testes de escoamento com a água industrial foram realizados para atestar se o equipamento estava funcionando corretamente e para avaliar o comportamento do escoamento em fraturas. A Figura 31 apresenta os dados de queda de pressão em função da vazão volumétrica nas fraturas de 10, 5 e 2 mm. O eixo vertical mostra a queda de pressão associada ao comprimento da fratura e o eixo horizontal é a vazão volumétrica de fluido que escoou pela fratura.

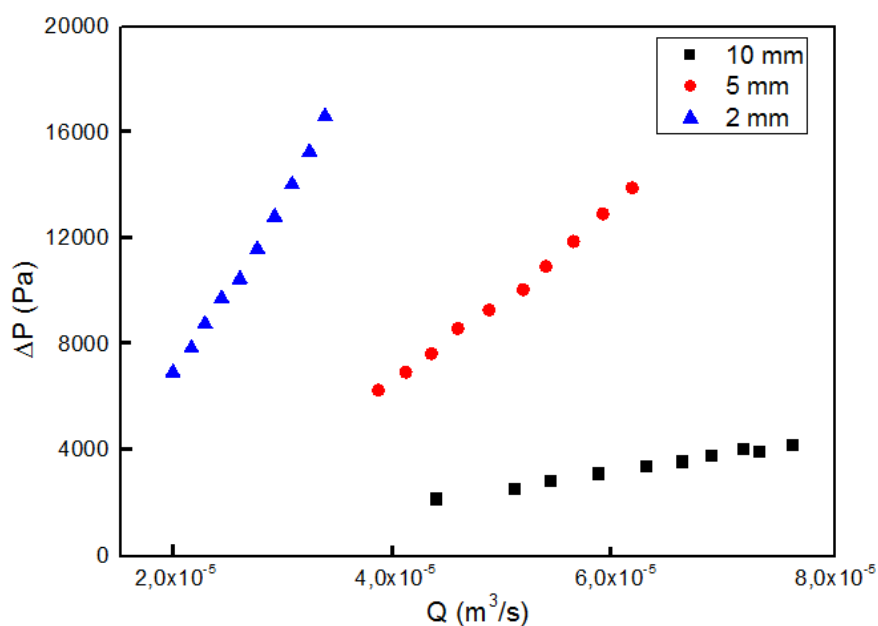


Figura 31 Relação entra a queda de pressão e vazão em fratura para água industrial.

O aumento da vazão de escoamento causou um acréscimo na queda de pressão na fratura. A diminuição do tamanho da fratura causou um aumento na queda de pressão na fratura. Concluiu-se que o equipamento foi capaz de simular o escoamento em fraturas e coletar os dados de vazão e queda de pressão.

Fluidos não newtonianos foram escoados pelo equipamento: um fluido contendo goma xantana (2,0 lb/bbl), um contendo CMC (2,0 lb/bbl) e um fluido contendo goma xantana na mesma concentração e material de combate a perda de circulação (5,0 lb/bbl). Os dados de queda de pressão e vazão para esses fluidos estão presentes nas Figuras 32, 33 e 34 respectivamente para a goma xantana, CMC e para a suspensão de goma xantana com selante. Nas Figuras a seguir o eixo vertical mostra a queda de pressão associada ao comprimento da fratura e o eixo horizontal é a vazão volumétrica de fluido que escoou pela fratura. O mesmo número de pontos não pôde ser coletado para todos os fluidos, pois o equipamento começou a apresentar problemas de rachaduras que inviabilizaram a coleta de certos pontos.

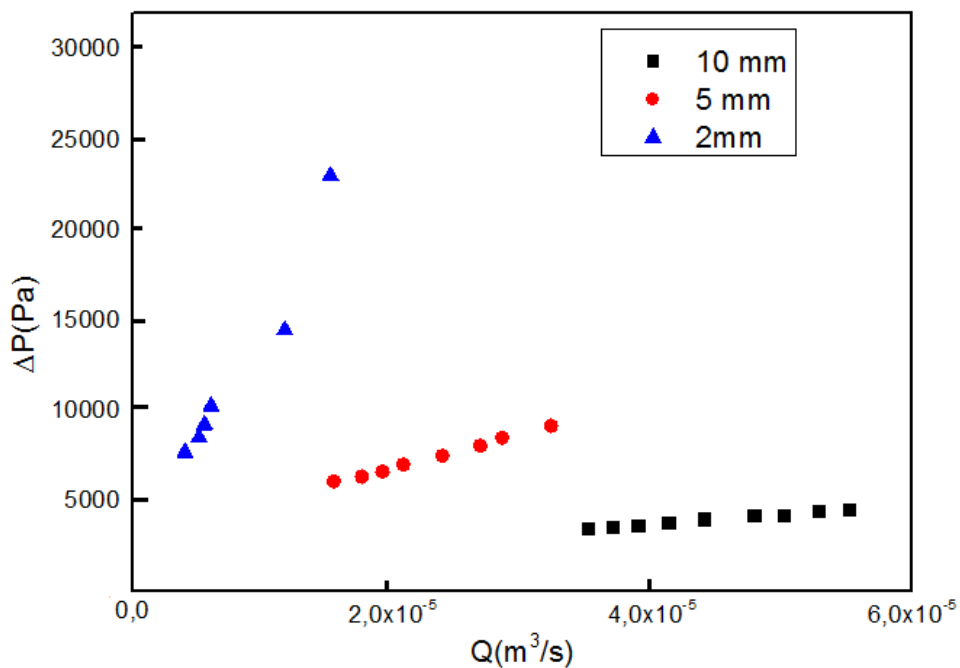


Figura 32. Relação entre a queda de pressão e vazão em fratura para goma xantana.

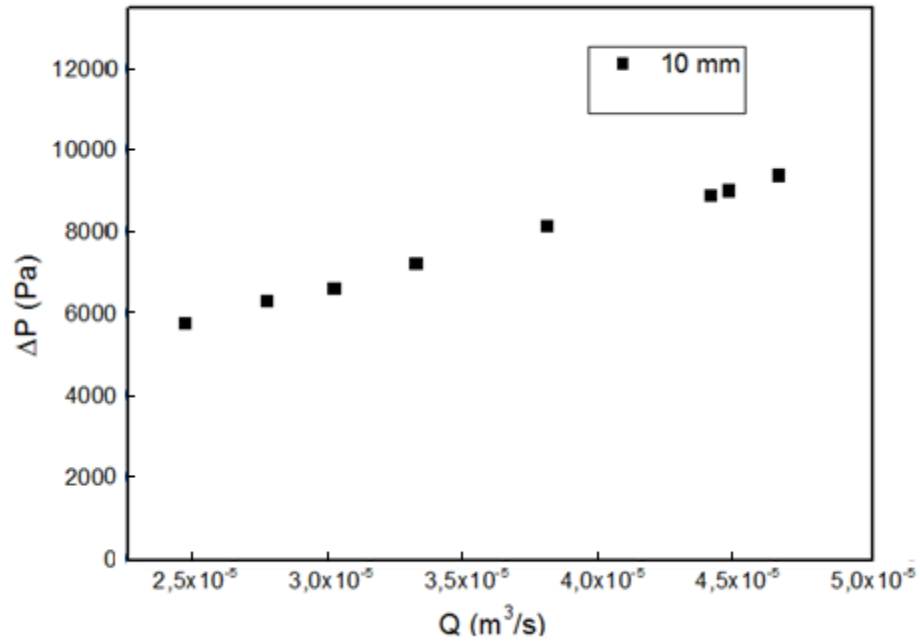


Figura 33. Relação entra a queda de pressão e vazão em fratura para o CMC.

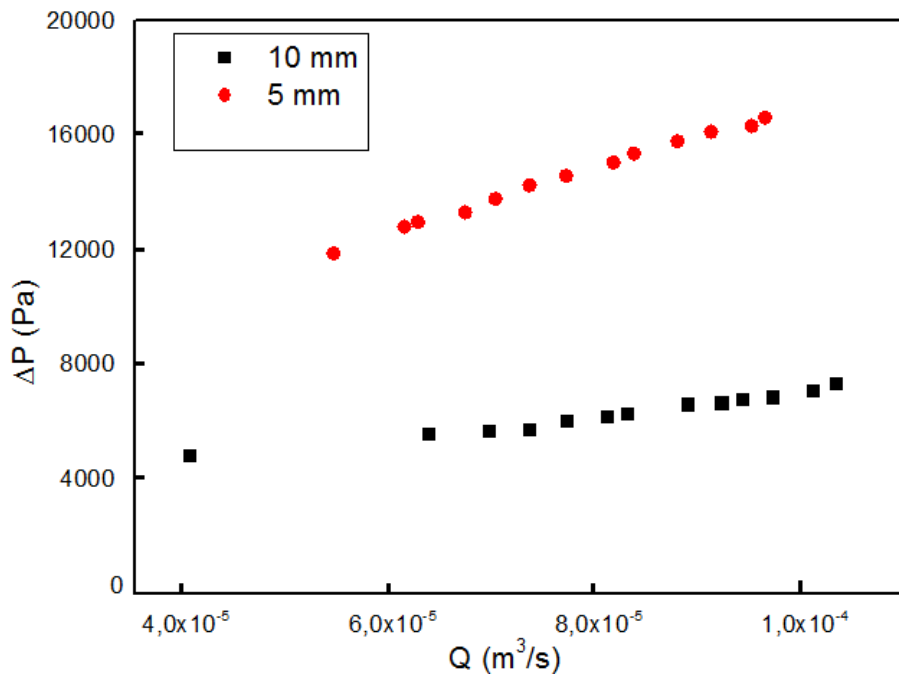


Figura 34. Relação entra a queda de pressão e vazão em fratura para suspensão de goma xantana e LCM.

As Figuras 31, 32, 33 e 34 mostram que existe comportamento semelhante do escoamento dos fluidos não newtonianos com o escoamento da água. Pode-se perceber que os fluidos não newtonianos apresentaram queda de pressão maior do que os fluidos newtonianos quando submetidos a uma mesma vazão na fratura. As faixas de número Reynolds dos escoamentos dos fluidos não newtonianos testados no simulador serão apresentados na seção de anexos parte 9.

4.2.2 Testes de selamento das suspensões contendo LCM

O teste de selamento no simulador de escoamento em fratura foi realizado de acordo com metodologia proposta no item 3.3.5. Os dados de queda de pressão e vazão na fratura coletado no teste de selamento do fluido 4 estão presentes nas figura 37 e 38.

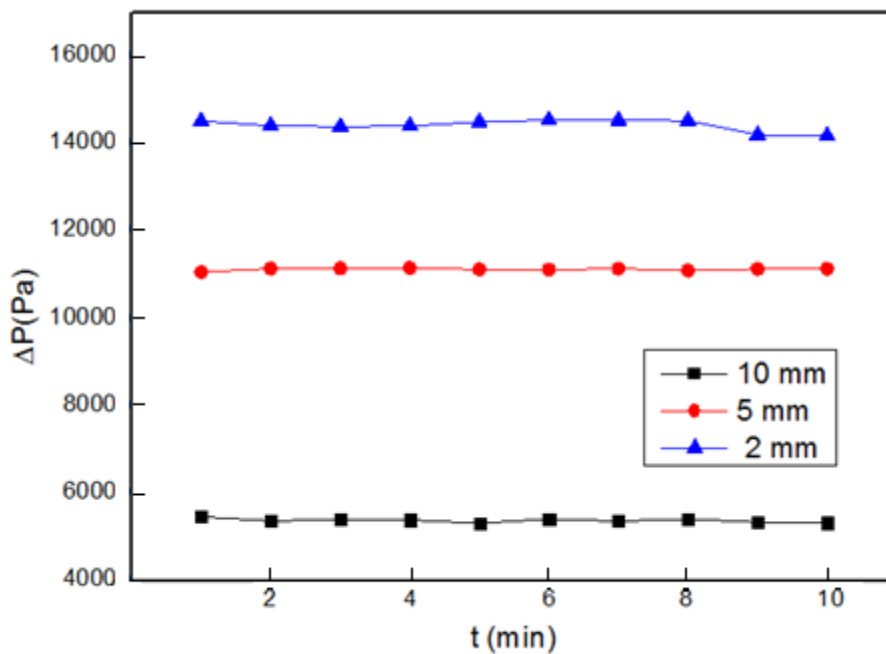


Figura 35. Queda de pressão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 4.

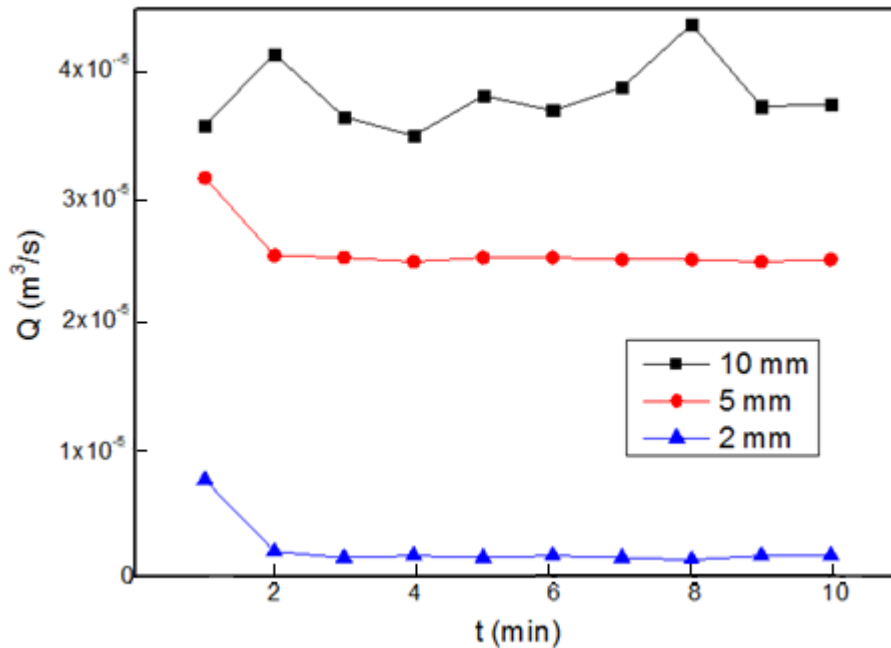


Figura 36. Dados de vazão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 4.

Na concentração de LCM de 5 lb/bbl ($11,4 \text{ kg/m}^3$), pode-se perceber pelas figuras 35 e 36 que não houve contínua redução na queda de pressão e na vazão na fratura com o passar do tempo. Isso indica que não está ocorrendo selamento na fratura, pois a concentração de material de combate a perda de circulação não é suficiente para selar nenhuma das três fraturas do simulador de escoamento.

As Figuras 37 e 38 apresentam os dados de queda de pressão e vazão na fratura coletado no teste de selamento do fluido 5 que possui concentração de LCM de 10 lb/bbl, que é o dobro do que o fluido do teste anterior.

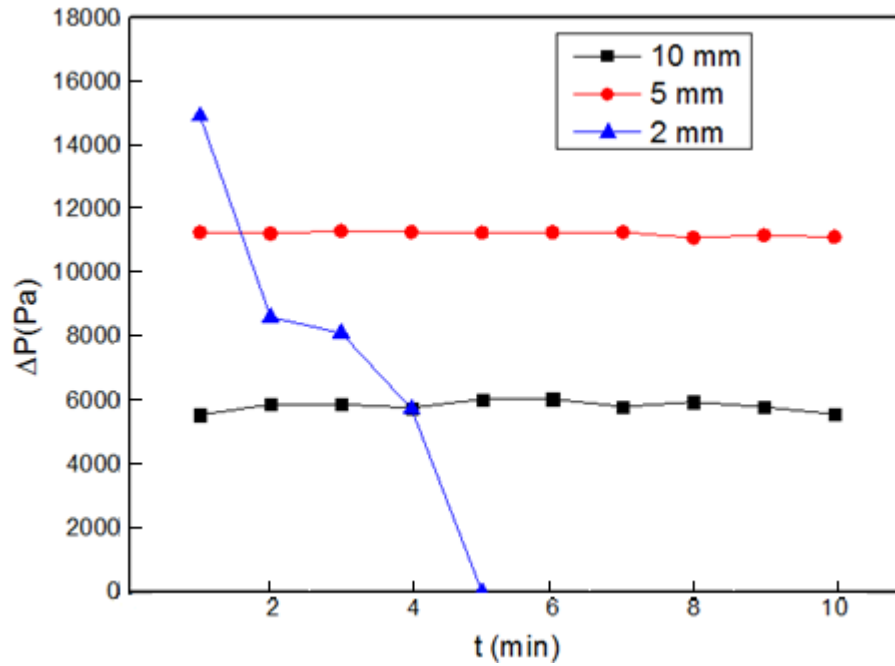


Figura 37. Queda de pressão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 5.

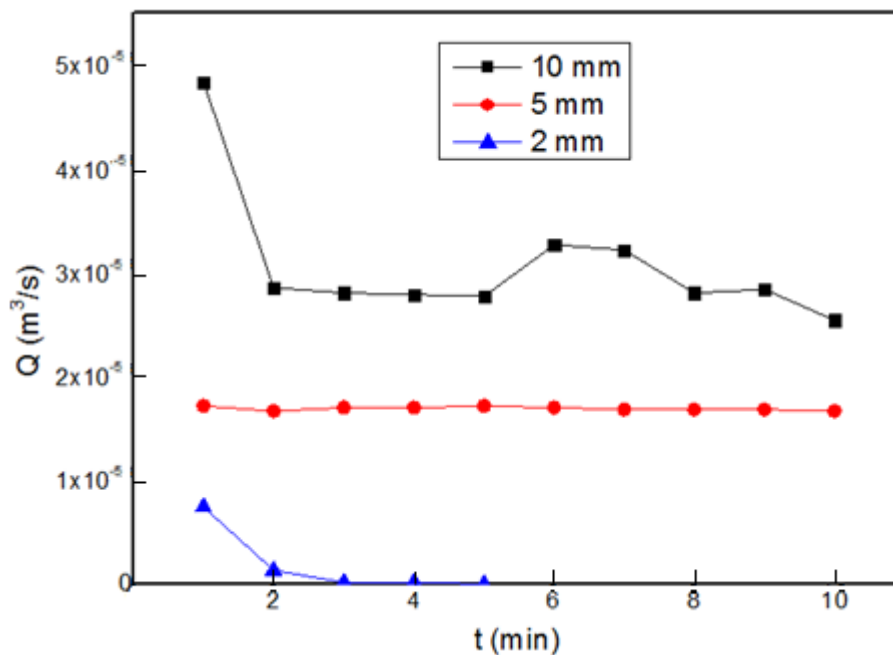


Figura 38. Dados de vazão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 5.

Na concentração de LCM de 10 lb/bbl no fluido 5 para as fraturas de 5 e 10 mm os resultados de queda de pressão e vazão são semelhantes ao teste do fluido 4, onde fluido não capaz de selar as fratura em questão. O fluido 5 foi capaz de selar a fratura de 2 mm. O selamento da fratura de 2 mm pode ser acompanhado a partir de 1 minuto de teste, evidenciado pela redução da vazão e da queda de pressão. Em 4 minutos a vazão

chega a zero indicando que a perda de circulação está completamente superada com o tamponamento da fratura.

As figuras 39 e 40 mostram os dados de queda de pressão e vazão na fratura coletado no teste de selamento do fluido 6 que possui concentração de LCM de 15 lb/bbl.

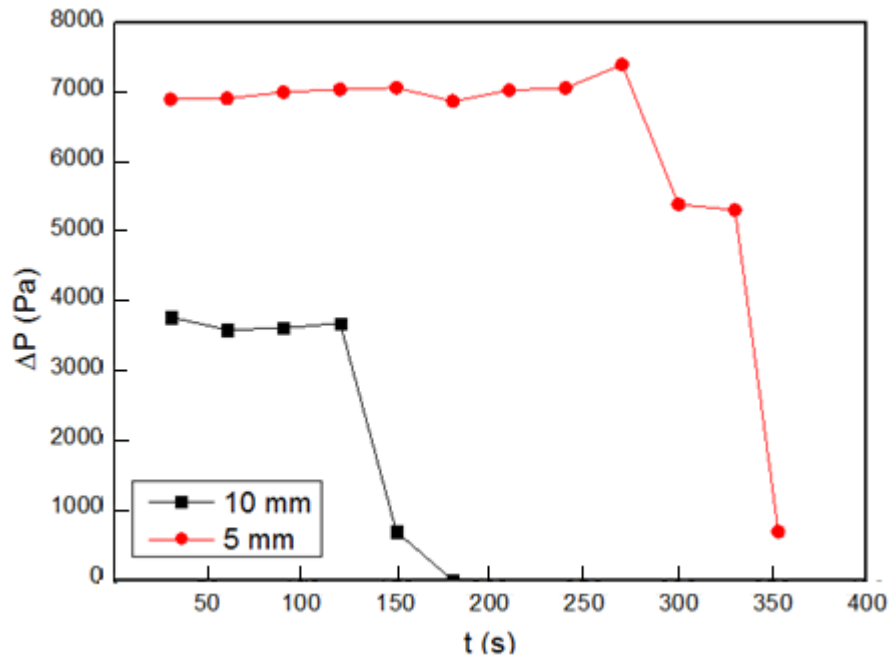


Figura 39. Queda de pressão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 6.

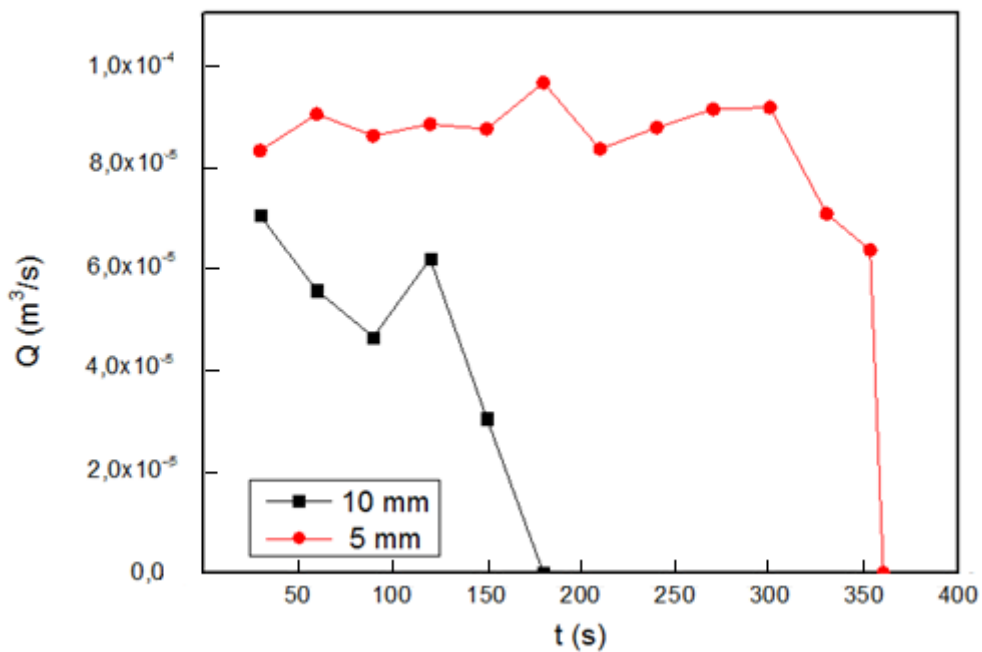


Figura 40. Dados de vazão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 6.

O fluido 6 foi capaz de selar as três fraturas do simulador de escoamento. O selamento das fraturas de 10 e 5 mm ocorreu em momentos diferentes do teste. A fratura de 10 mm começou a selar com 30 segundos de teste e seu selamento terminou próximo de 200 s de teste. A fratura de 5 mm manteve sua vazão e queda de pressão constantes até quase 6 minutos de teste. Após 6 minutos ocorreu um decréscimo das duas grandezas até o selamento completo da fratura em 357 s. Os dados para o selamento da fratura de 2 mm não estão presentes nas figuras 39 e 40, pois o selamento ocorreu muito rapidamente, antes que qualquer medida de vazão ou pressão pudesse ser coletada.

As Figuras 41 e 42 apresentam os dados de queda de pressão e vazão na fratura coletado no teste de selamento do fluido 7 que possui concentração de LCM de 25 lb/bbl.

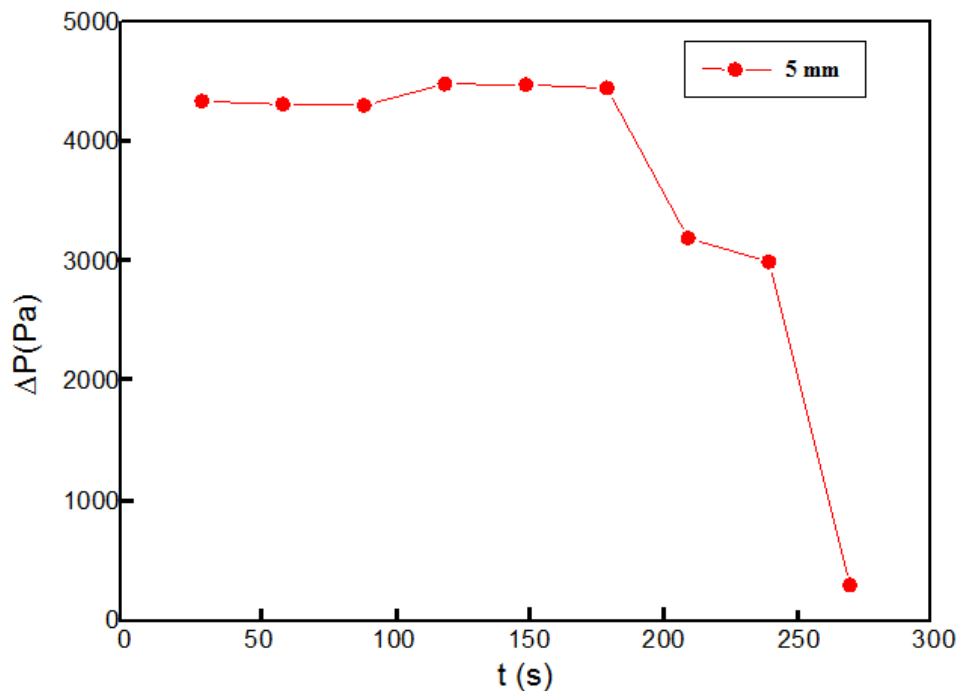


Figura 41. Queda de pressão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 7.

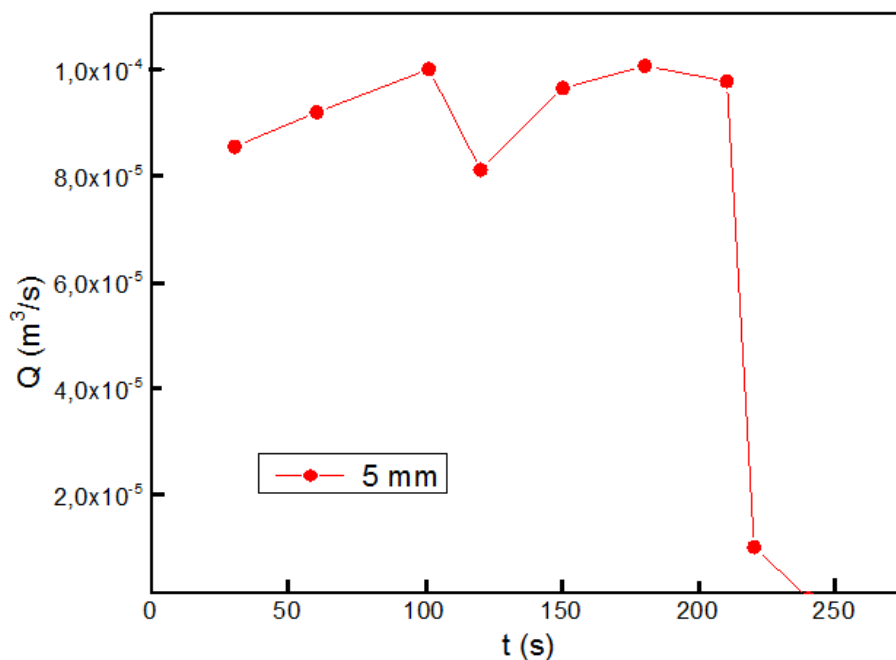


Figura 42. Dados de vazão na fratura durante o teste de selamento para o fluido 7.

O fluido 7 foi capaz de selar as três fraturas do simulador de escoamento em fraturas, com as fraturas de 10 e 2 mm selando rapidamente, os dados do selamento das mesmas não puderam ser incluídos nas Figuras 41 e 42. Para a fratura de 5 mm a vazão começou a diminuir após 180 s de teste e completou o selamento em 250 s .

O fluido 8 selou todas as fraturas do simulador quase que instantaneamente, impedindo que qualquer dado fosse coletado, sendo assim o resultado do fluido 8 não será representado graficamente.

A tabela 8 apresenta uma comparação do tempo de selamento e da quantidade total perdida de fluido durante a perda de circulação para os fluidos 4-8.

Tabela 12 Influência da concentração de LCM no tempo de selamento da fratura de 2 mm.

Concentração (lb/bbl)	Tempo de selamento (s)	Volume de fluido perdido (L)
5	Não houve selamento dentro do limite do teste.	1,33
10	240	0,54
15	18	0,13
25	3	0,06
50	0	0,00

O aumento da concentração de material de combate a perda de circulação no fluido aumentou a eficiência da suspensão selar as fraturas. O selamento ocorreu mais rapidamente e menos fluido foi perdido até que a fratura fosse selada.

Será feita uma comparação entre a ação selante dos fluidos 2 e 6 para a fratura de 10 mm, com os dados das suspensões de calcário laminar fornecidos por Godoi (2017). Essas suspensões são compostas por goma xantana (GX) e LCM a base de calcário laminar em duas granulometrias: fino (Cf) e grosso (Cm). A Figura 43 mostra os dados de queda de pressão na fratura durante o teste de selamento do fluido 2, fluido 6 e dos dois fluidos estudados por Godoi, 2017. A Figura 46 apresenta a vazão na fratura durante o selamento dos fluidos citados anteriormente. Os fluidos 2 e 6 foram escolhidos por possuir a mesma concentração de LCM, mas formulações de fluido de perfuração diferentes.

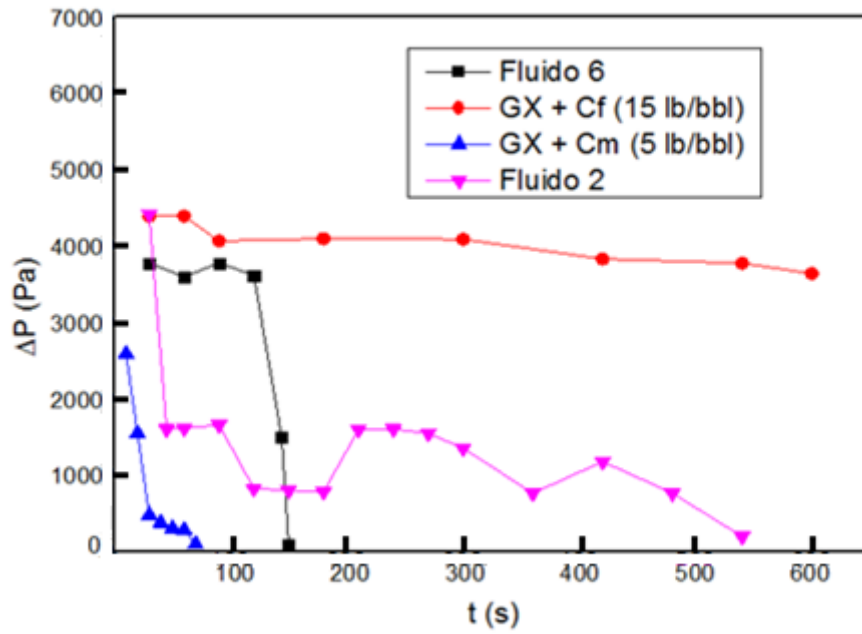


Figura 43 Comparação dos dados de queda de pressão para diferentes fluidos durante o selamento da fratura de 10 mm.

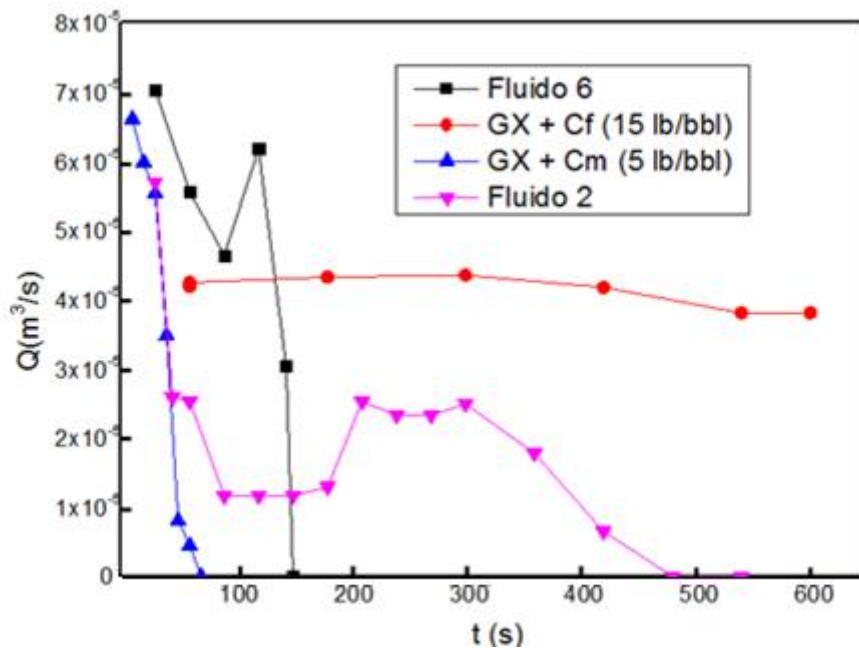


Figura 44 Comparação dos dados de vazão na fratura para diferentes fluidos durante o selamento da fratura de 10 mm.

O fluido contendo goma xantana e calcário laminar grosso selou a fratura mais rapidamente, seguido do fluido 6 e do fluido 2, que também conseguiu selar a fratura porém levou uma quantidade considerável a mais de tempo. O fluido que não foi capaz de selar a fratura de 10 mm foi que continha goma xantana e calcário laminar fino em sua composição.

4.3 Correlação entre a queda de pressão e vazão em fratura.

Os dados obtidos nos testes de escoamento dos fluidos 3, 4 e 9 serão utilizados na validação da correlação proposta entre os dados de vazão e queda de pressão em fraturas apresentada na equação 37. Além disso, dados de escoamento obtido por Godoi (2017) para suspensões de goma xantana e calcário laminar fino, nas concentrações de 5 e 15 lb/, também serão utilizados. As Figuras 45 e 46 apresentam os dados de escoamento para os fluidos 3 e 9 respectivamente. Os dados de 5 e 2 mm não puderam ser coletados para o fluido 9, devido a rachaduras no equipamento, e por isso não serão apresentados na figura 48. O desvio entre os valores de queda de pressão calculados pelo modelo e os dados experimentais do modelo foi calculado pela equação 43.

$$desvio (\%) = \frac{|valores\ do\ modelo - valores\ experimentais|}{valores\ experimentais} \quad (43)$$

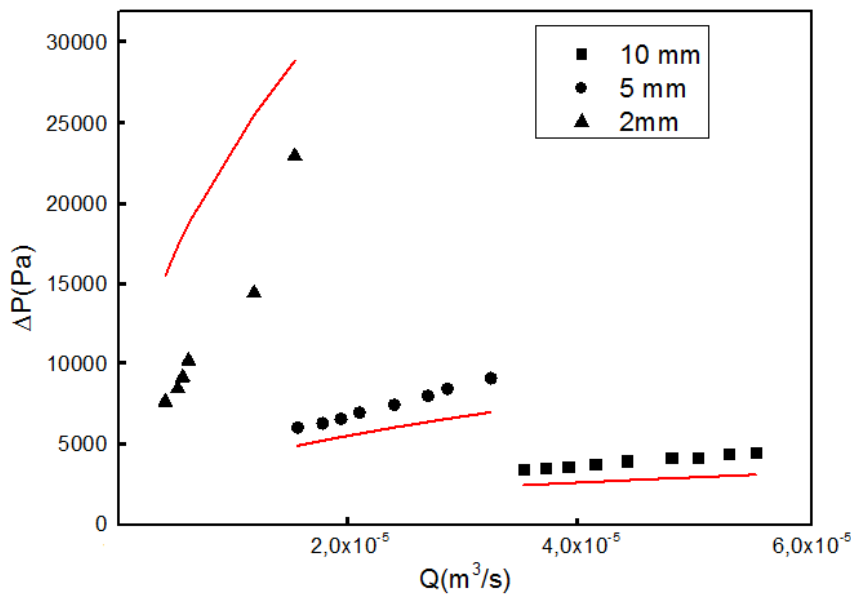


Figura 45 Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para o fluido 3

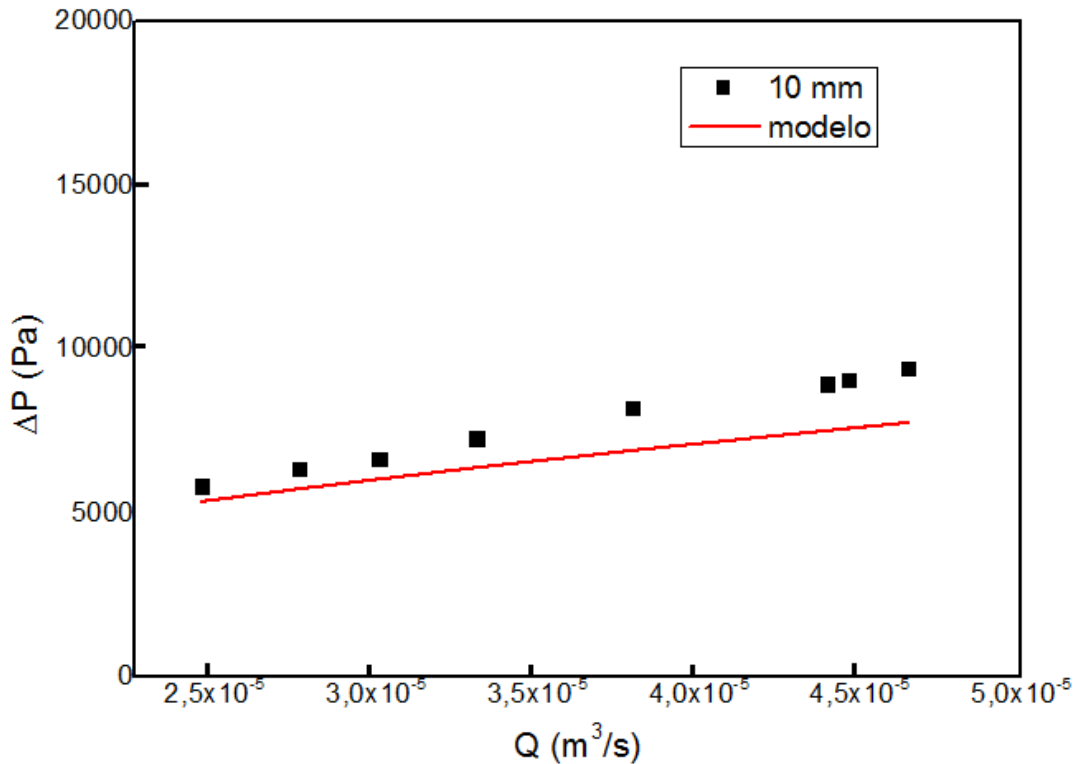


Figura 46. Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para o fluido 9.

Para as fraturas de 10 e 5 mm a correlação possuiu erro experimental de médio de 29 e 18 % no fluido 3 (goma xantana), para a fratura de 2 mm o erro experimental se torna maior que 50 % . Isso ocorreu, pois a razão entre o tamanho das ranhuras presentes na fratura e a abertura da mesma se torna muito alta. Sendo assim, a correlação proposta não foi capaz de ajustar-se aos dados experimentais para fendas pequenas. Para o fluido 9 (CMC) o modelo teve erro experimental médio de 12 %, indicando que a correlação foi capaz de se ajustar aos dados experimentais. Como não foram coletados dados de escoamento para as fraturas de 5 e 2 mm no o fluido 9, não foi possível avaliar se a correlação se ajusta aos dados nessas fraturas.

A seguir serão apresentados os resultados da correlação entre a queda de pressão e vazão na fratura para as suspensões contendo materiais de combate a perda de circulação. Não foram realizados testes para as fraturas de 2 mm para evitar a possibilidade de selamento da fratura.

A Figura 47 apresenta o resultado da correlação proposta aplicada aos dados de escoamento para o fluido 4. Nas figuras 48 e 49 estão presentes os dados de escoamento

para as suspensões de carbonato laminar fino e grosso respectivamente. Os dados dessas suspensões foram coletados por Godoi (2017).

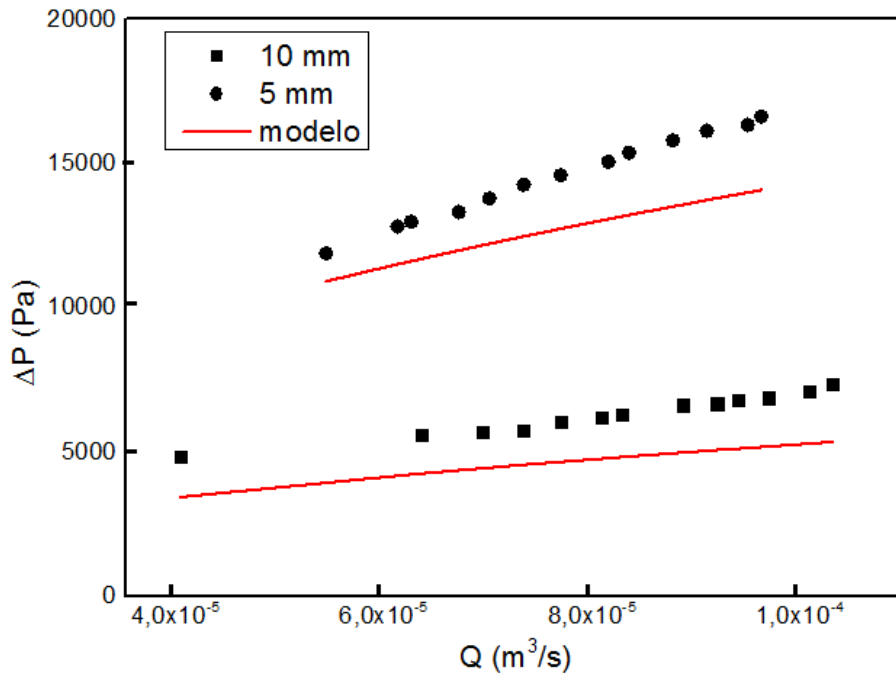


Figura 47. Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para o fluido 4.

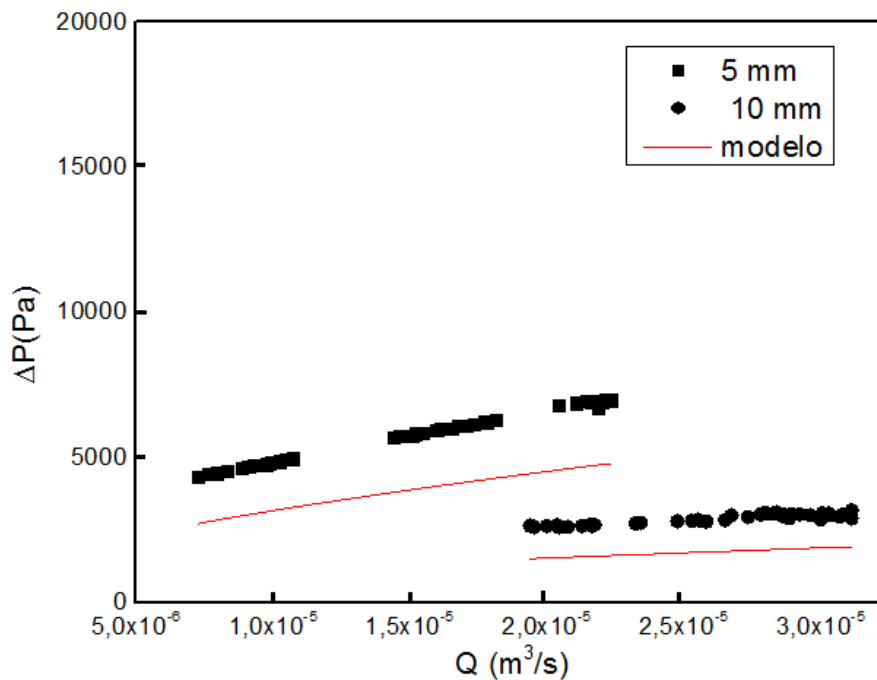


Figura 48 Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para a suspensão de goma xantana e carbonato laminar fino (5 lb/bbl), Fonte: Godoi (2017).

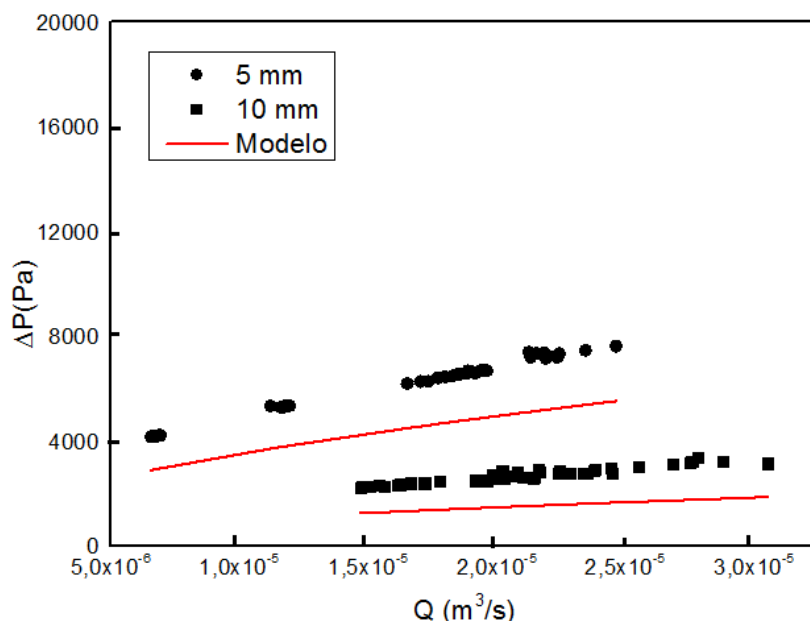


Figura 49 Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para a suspensão de goma xantana e carbonato laminar fino (15 lb/bbl), Fonte: Godoi (2017).

A Tabela 9 apresenta os desvios experimentais médios para a modelagem do escoamento em fratura dos fluidos presentes nas Figuras 47, 48 e 49.

Tabela 13 Desvios experimentais médios (%) para o correlaciona queda de pressão e vazão em fratura

Material	10 mm	5 mm
Fluido 4	24	12
Goma Xantana (2,0 lb/bbl)+ Carbonato laminar fino (5 lb/bbl)	46	30
Goma Xantana (2,0 lb/bbl)+ Carbonato laminar fino (15 lb/bbl)	38	37

As Figuras 47 - 49 e a Tabela 13 mostram que o modelo também apresentou valores de desvios experimentais médios altos para as suspensões testadas. Para que a correlação melhor se ajuste aos valores experimentais o parâmetro δ (delta) foi reajustado pelo método dos mínimos quadrados. O novo valor do parâmetro delta para o escoamento em fraturas encontrado foi de 4,2. A tabela 14 apresenta os valores dos desvios experimentais médios da correlação com o novo valor de delta.

Tabela 14. Desvios experimentais médios (%) para a correlação entre a queda de pressão e vazão em fratura após o ajuste do parâmetro delta na correlação.

Material	10 mm	5 mm
Fluido 3	3	9
Fluido 4	2	9
Fluido 9	-	8
Goma Xantana (2,0 lb/bbl)+ Carbonato laminar fino (5 lb/bbl)	4	7
Goma Xantana (2,0 lb/bbl)+ Carbonato laminar fino (15 lb/bbl)	6	5

A Tabela 14 mostra que após o parâmetro delta ser reajustado a correlação apresentou valores de desvio experimental médio menores que 10 %, indicando que a mesma é capaz de ajustar-se aos dados de escoamento em fratura para fluidos não newtonianos. Os gráficos do modelo com o parâmetro delta reajustado estão presentes na seção de anexos dessa dissertação.

4.4 Proposta do monitoramento do selamento em fratura

A equação 42 foi utilizada para calcular os valores do diâmetro hidráulico no decorrer do tempo do teste de selamento, acompanhando assim do material de combate a perda de circulação. Os dados de selamento coletados por Godoi (2017) foram submetidos a essa metodologia.

A Figura 50 apresenta os dados de selamento em fratura para uma suspensão de carbonato laminar fino com concentração de 15 lb/bbl. No eixo principal da figura estão os dados de vazão na fratura de 10 mm em função do tempo. No eixo secundário se encontra o diâmetro hidráulico calculado pela equação 42 em função do tempo.

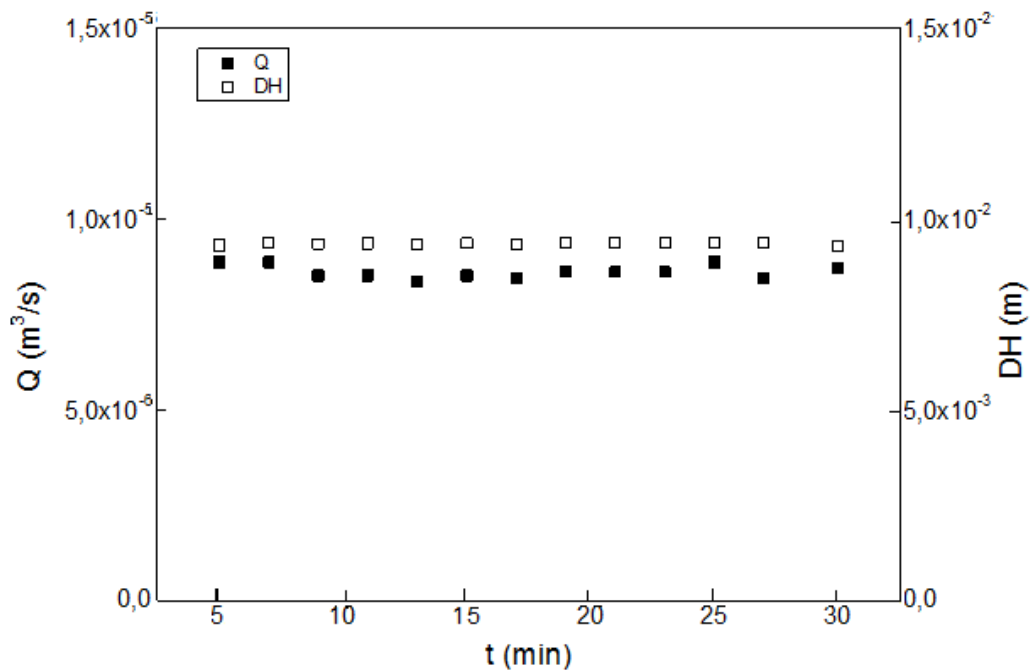


Figura 50. Acompanhamento do selamento em fratura pelo carbonato laminar fino: Dados de vazão de escoamento na fratura de 10 mm, Fonte: Godoi (2017); Diâmetro hidráulico calculado pela equação 41.

Na figura 50 que existe pouca variação da vazão na fratura durante o teste de selamento, pois a suspensão de calcário laminar não foi capaz de selar a fratura de 10 mm. A equação 42 foi capaz de prever o comportamento esperado do diâmetro hidráulico da fratura. O diâmetro hidráulico não sofre variação com o decorrer do teste de selamento. Sendo assim pode-se dizer que nos casos em que não houve selamento a equação 41 foi capaz de calcular um diâmetro hidráulico com comportamento esperado.

As Figuras 51-53 irão apresentar a ação de um suspensão de calcário laminar grosso com concentração de 5 lb/bbl selando as fraturas de 10, 5 e 2 mm respectivamente, no eixo principal da figura estão os dados de vazão na fratura em função do tempo e no eixo secundário se encontra o diâmetro hidráulico calculado.

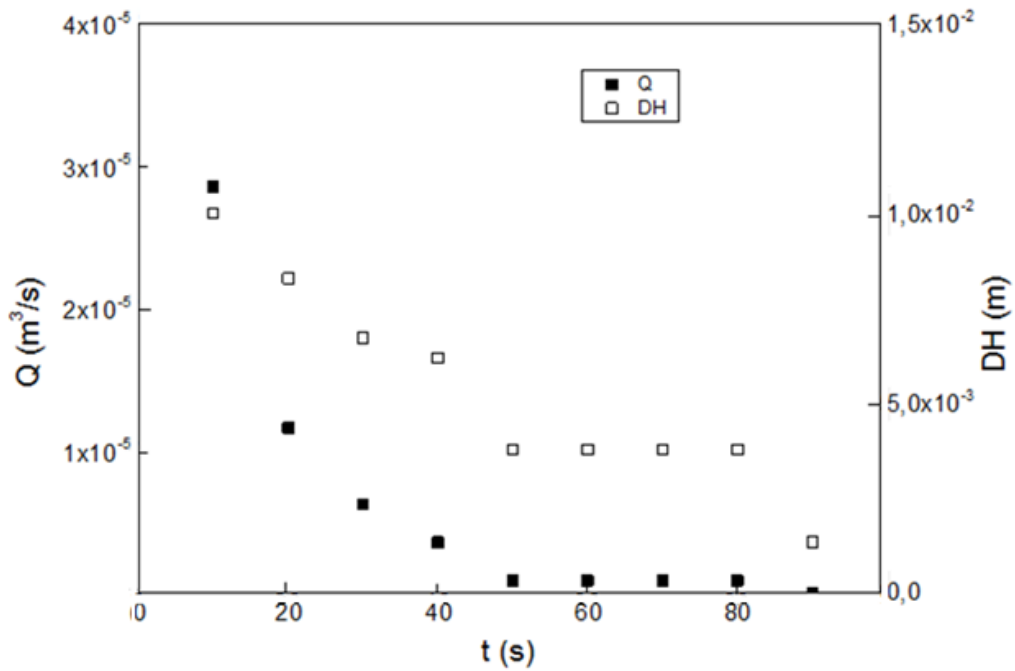


Figura 51. Acompanhamento do selamento em fratura pelo carbonato laminar médio : Dados de vazão de escoamento na fratura de 10 mm, Fonte: Godoi (2017); Diâmetro hidráulico calculado pela equação 41.

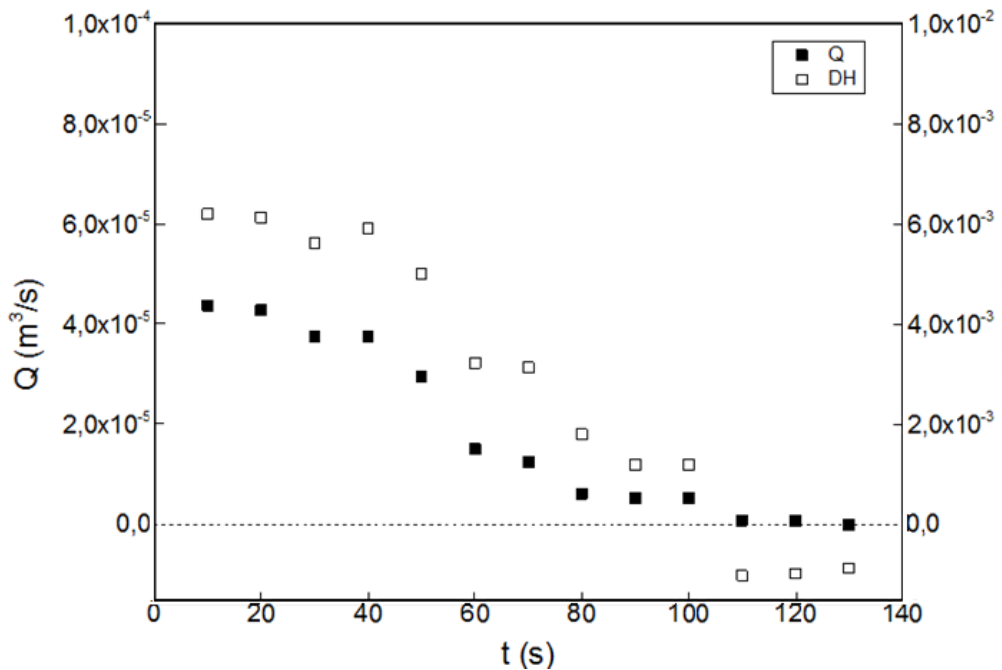


Figura 52. Acompanhamento do selamento em fratura pelo carbonato laminar médio: Dados de vazão de escoamento na fratura de 5 mm, Fonte: Godoi (2017); Diâmetro hidráulico calculado pela equação 41.

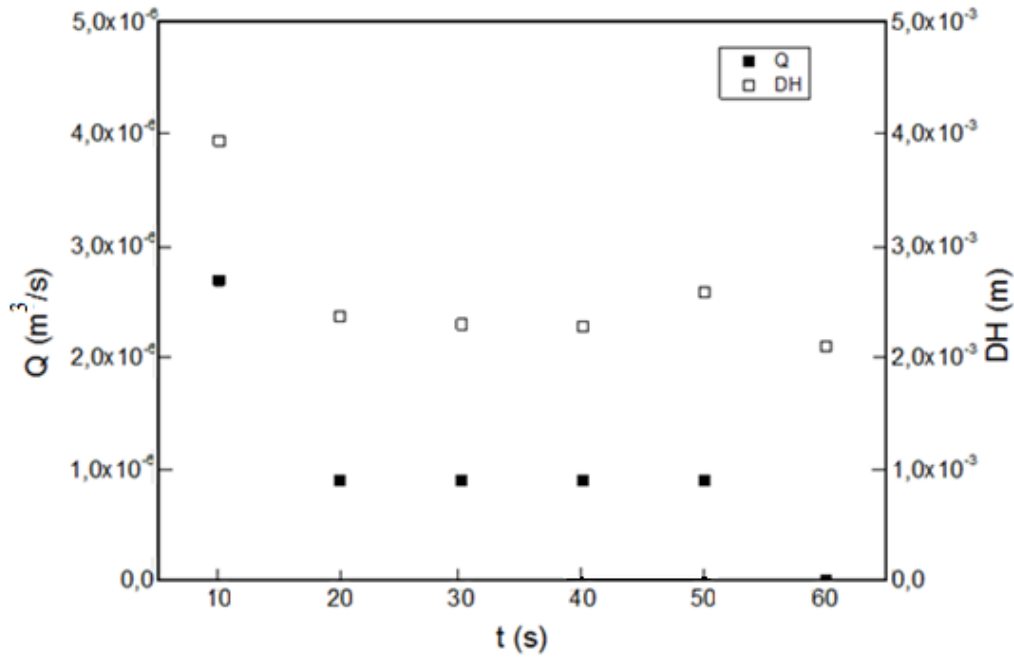


Figura 53. Acompanhamento do selamento em fratura pelo carbonato laminar médio : Dados de vazão de escoamento na fratura de 2 mm, Fonte: Godoi (2017); Diâmetro hidráulico calculado pela equação 41.

Os resultados apresentados nas Figuras 51-53 mostram que a equação 41 foi capaz de calcular o diâmetro hidráulico no decorrer do teste de selamento. O comportamento do diâmetro hidráulico calculado foi condizente com o esperado para o selamento de uma fratura pela ação de um LCM. As partículas de LCM se depositam no fundo e no topo da fratura formando um tampão e reduzindo gradativamente o diâmetro hidráulico. Isso diminui a vazão de fluido na fratura até que a mesma chega até zero, indicando que a fratura está selada. Era esperado que diâmetro hidráulico calculado chegasse a zero junto com a vazão, porém apesar de alcançar valores próximos do zero, o diâmetro hidráulico não chega ao valor final esperado. Algumas vezes o valor do diâmetro se torna negativo ao final do teste de selamento. Esse comportamento do diâmetro hidráulico calculado indica que a equação 42 ainda precisa de pequenos ajustes para acompanhar de forma mais coerente diâmetro hidráulico durante o selamento de fraturas.

4.5 Testes de filtração das suspensões contendo LCM

Essa seção apresenta o resultado da filtração em 300 psi para os fluidos 3, 4, 6 e 7. A Tabela 15 apresenta os dados de volume de filtrado, espessura da torta e massa da torta formada no período de filtração.

Tabela 15 Dados de volume de filtrado e torta de filtração.

Fluido	Volume de Filtrado (L)	Massa da Torta(g)	Espessura da Torta (mm)
Fluido 3	0,080	-	-
Fluido 4	0,010	4,11	0,005
Fluido 6	0,008	4,31	0,010
Fluido 7	0,007	5,08	0,028

Quando comparados os fluido 3 e 4, pode-se perceber uma redução do volume de filtrado obtido ao final do teste. Isso ocorre, pois o fluido 3 é apenas uma solução de goma xantana. O fluido 4 também possui partículas de material de combate a perda de circulação. Isso evidencia que o LCM além de agir como selante de fraturas, também atuou como redutor de volume de filtrado. Do fluido 4 para o 7 com o aumento na concentração de LCM houve redução do volume de filtrado e aumento na massa e espessura da torta. O efeito redutor da concentração de LCM no volume de filtrado pode ser observado na Figura 54 que mostra o volume de filtrado de cada fluido em função do tempo, que vai até 30 minutos (1800 s).

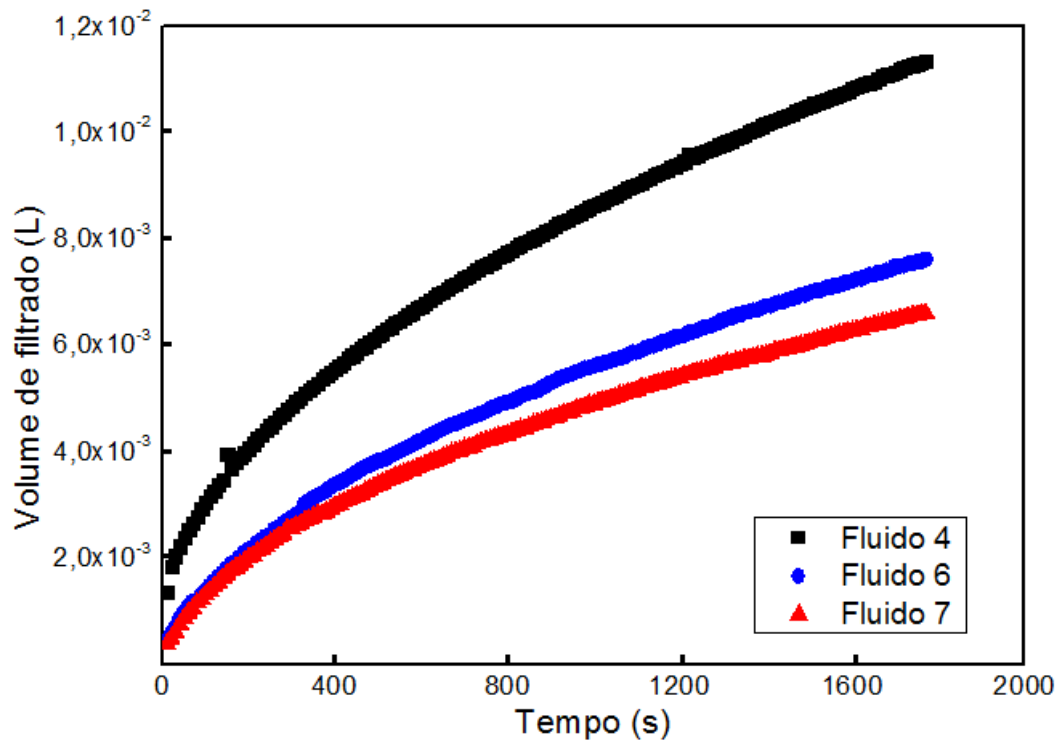


Figura 54. Volume de filtrado obtidos na filtração das suspensões de LCM em diferentes concentrações.

5 CONCLUSÕES

Testes de FRX em conjunto com as informações do fabricante mostraram que o material é composto majoritariamente de borato de cálcio e materiais orgânicos, com pouco mais de 10% de substâncias solúveis em água.

A granulometria do material de combate a perda de circulação estudado possui dois picos em sua distribuição granulométrica. Isto é, a mesma possui comportamento bimodal.

Os dados de tensão cisalhante versus taxa de deformação dos fluidos formulados ajustaram-se ao modelo de Herschel-Bulkley, o aumento na concentração de sólidos na formulação dos fluidos produziu suspensões mais densas e com maior viscosidade.

Os fluidos contendo o material de combate a perda de circulação a base de polímeros e borato foram capazes de selar as três fraturas do simulador de escoamento em fratura. Um aumento da concentração de LCM na suspensão selante produz fluidos que tamponam fraturas mais rapidamente e com menor magnitude na perda de circulação.

A proposta de correlação entre a queda de pressão e vazão de fluidos não Newtonianos em fraturas apresentou baixos erros (menor que 10 % em média) experimentais após o parâmetro delta ser reajustado. O que indica que a mesma é capaz de descrever o comportamento do escoamento em fraturas de fluidos não newtonianos.

O diâmetro hidráulico pôde ser calculado durante o teste de selamento. Isso mostra que é possível monitorar o selamento da fratura usando a derivada temporal do diâmetro hidráulico explicitado na correlação proposta

Os testes de filtração mostraram que o LCM também possui características de um redutor de filtrado podendo ser adicionado aos fluidos de perfuração que teriam dupla ação, atuando no controle de filtrado e possivelmente na cura de fraturas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de mais testes de escoamento em fratura para fluidos não newtonianos, com o objetivo de confirmar a eficiência da correlação proposta;
- Avaliar os efeitos de outros polímeros, LCMs e aditivos na reologia das suspensões formadas e no selamento de fraturas;
- Realizar novos testes de selamento em fratura de forma a aperfeiçoar a metodologia proposta para monitorar o diâmetro hidráulico no tamponamento de fraturas.

6.1 TRABALHOS PUBLICADOS COM PARTICIPAÇÃO DO AUTOR.

Evaluation of suspension flow and particulate materials for control of fluid losses in drilling operation.

<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.04.007>

Study of the pressure drop and the flow of loss circulation material suspensions in a physical simulator of fractures.

doi.org/10.1016/j.petrol.2018.04.031

Interaction of blockers on drilling fluids rheology and its effects on sealing of fractures and prevention of filtrate invasion.

doi.org/10.1016/j.petrol.2018.07.053

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSABA, M.; NYGAARD, R. **Review of Lost Circulation Materials and Treatments with an Updated Classification.** In: AADE-14-FTCE-25, AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 2014.

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

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

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

CRANDALL D; Goodarz Ahmadi; Duane H. Smith **Computational Modeling of Fluid Flow through a Fracture in Permeable Rock.** Transport in Porous Media., Volume 84, Issue 2, p 493–510. Setembro 2010

CRITTENDON, B. C. The mechanics of design and interpretation of hydraulic fracture treatments. Journal of Petroleum Technology, v. 11, p. 21-29, 1959

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

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

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.

DUQUE NETO; Calçada, L.A; O.A.; Magalhães, S.C.; Scheid, C.M.; Borges Filho, M.N.; Waldmann, A.T.A. **Evaluation of suspension flow and particulate materials for control of fluid losses in drilling operation**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 131(2015), p 1–10.

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

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

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

GODOI, P. A. F **estudo da perda de carga e do escoamento de suspensões de materiais utilizados no combate à perda de circulação em fraturas**. 2017. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Concentração em Tecnologia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2017

GPCPETRO, disponível em <<http://www.gpcpetro.com/index.html>> em 2017-08.

HOWARD, G.C. and P. P. Scott, **An Analysis and the Control of Lost Circulation**, 1951.

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

KULKARNIN S. D; Kushabhau T; Savari S; Dale E. Jamison; Donald L. Whitfill, Halliburton. **Modelling Suspension of Lost Circulation Materials in a Drilling Fluid.** AADE-14-FTCE-24. Houston, USA,. Abril 2014

KUMAR, A.; Savari, S. Lost Circulation Control and Wellbore Strengthening: Looking Beyond Particle Size Distribution. In: AADE-11-NTCE-21, **AADE National Technical Conference and Exhibition**, Houston, USA. Abril 2011

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. Abril 2011

MACHADO, J. C. V. **Reologia e Escoamento de Fluidos - Ênfase na Indústria de Petróleo**; 2º Edição. 2002.

MADLENER K; B. Frey and H. K. Ciezki **Generalized reynolds number for non-newtonian fluids Eucass**, Progress in Propulsion Physics, volume 1 p 237-250. 2009

MONTGOMERY, C. **Fracturing Fluids, Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing**, Dr. Rob Jeffrey (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/56192. (2013). Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/effective-and-sustainable-hydraulic-fracturing/fracturing-fluids>

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

NAZRIDOUST K; Goodarz Ahmadi; Duane H. Smith. **A new friction factor correlation for laminar, single-phase flows through rock fractures.** Journal of Hydrology. 329, p 315– 328. 2006

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

PODRYABINKIN, E; Rudyak V; Andrey G; Roland M. **Detailed Modeling of Drilling Fluid Flow in a Wellbore Annulus While Drilling.** Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2013.

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.

SANTIAGO, P.B.A; CLIFF, F; GARAND, F; MEYER, A. **“Sealing Fractures: Advances in Lost Circulation Control Treatments”** Oilfield Review Outono 2014; 26 n° 3 Copyright Schlumberger.

SANDERS, M. W.; YOUNG, S.; FRIEDHEIM, J. Development and Testing of Novel Additives for Improved Wellbore Stability and Reduced Losses. In: AADE-08-DF-HO-19, **AADE Fluids Conference and Exhibition**, USA, p. 8-9, April 2008, Houston.

SARKAR. S;M. Nafi Toksöz,; Daniel R. B. **Fluid Flow Modeling in Fractures Earth Resources Laboratory** Dept. of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139. 2004

SCHEID, C. M.; Calçada, L. A. ;Braga, E. R. ;Paraiso, E. C. H. ;Martins, A. L. **Hydraulic study of drilling fluid flow in circular and annular tubes** BRAZILIAN JOURNAL OF PETROLEUM AND GAS | v. 5 n. 4 | p. 239-253 | 2011 |

SCHLUMBERGER. 2014. Oil Field Glossary, disponível em <http://www.glossary.oilfield.slb.com> (Acesso em Setembro de 2017).

SMAR. **Manual de instruções, operação e manutenção “Transmissor inteligente de pressão com controle PID incorporado”** - modelo LD 301, Jan./2008, 6ª versão – Disponível em: <www.smar.com/brasil>. Acesso em: 06 Julho 2018

TETTEH-FIAGBOR, H. **Practical approaches for solving lost circulation Problems while drilling**. 2011. 67 f. Dissertação (Mestrado)- Curso de Master of Science, African University of Science and Technology

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

TIRUPATÍ ENTERPRISES, Disponível em <<http://www.tirupatient.com/loss-circulation-materials.html>> Acesso em Setembro de 2017

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

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, pages 1016-1024, Dezembro 1980.

ZIMMERMAN Robert W; Azzan Al-Yaarubi; Chris C. Pain; Carlos A. Grattoni **non-linear regimes of fluid flow in rock fractures** Paper 1A 27 — SINOROCK2004 Symposium Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 41, No. 3, 2004 Elsevier Ltd.1

ANEXOS

Anexo 1. Dados obtidos no Hydro 2000 para distribuição granulométrica do LCM

Tabela 16. Distribuição granulométrica do LCM

Diâmetro (μ m)	% do volume total
0,011	0
0,013	0
0,015	0
0,017	0
0,02	0
0,023	0
0,026	0
0,03	0
0,04	0
0,046	0
0,052	0
0,06	0
0,069	0
0,079	0
0,091	0
0,12	0
0,138	0
0,158	0
0,182	0
0,209	0
0,24	0
0,275	0
0,316	0
0,363	0
0,417	0
0,479	0
0,55	0

Continuação da Tabela 16.

Diâmetro (μ m)	% do volume total
0,631	0
0,724	0
0,832	0
0,955	0
1,259	0
1,445	0,03
1,66	0,19
1,905	0,33
2,188	0,46
2,512	0,59
2,884	0,72
3,311	0,84
3,802	0,97
4,365	1,08
5,012	1,2
5,754	1,32
6,607	1,43
7,586	1,55
8,71	1,67
10	1,81
11,482	1,96
13,183	2,13
15,136	2,32
17,378	2,54
19,963	2,77
22,909	3,01
26,303	3,25
30,2	3,48
34,674	3,63
39,811	3,74
45,709	3,78

Continuação da Tabela 16.

Diâmetro (μ m)	Diâmetro (μ m)
52,418	3,75
60,256	3,67
69,183	3,55
79,433	3,41
91,201	3,28
104,713	3,18
120,226	3,12
138,038	3,11
158,489	3,14
181,97	3,2
208,93	3,26
239,883	3,26
275,423	3,16
316,228	2,93
363,078	2,55
416,889	2,06
478,63	1,45
549,541	0,77
630,957	0,28
724,436	0,1
1000	0
10000	0

Anexo 2. Medidas de densidade para o LCM

Tabela 17 Medidas de densidade para o LCM

Medida	1	2	3	4	5	Média ± 0,001
ρ (g/cm ³)	2,1241	2,1248	2,1257	2,1269	2,127	2,1257

Anexo 3. Dados de tensão cisalhante e taxas de deformação nas suspensões.

Tabela 18 Tensão cisalhante e taxa de deformação para os fluidos 2-5

Taxa (s ⁻¹)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)
	Fluido 2	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 5
10,36	3,548	4,371	5,82	5,238
20,63	4,488	4,85	6,446	6,01
30,94	5,226	5,175	6,72	6,634
41,23	5,865	5,398	7,008	7,173
51,56	6,385	5,566	7,308	7,51
61,88	6,89	5,735	7,427	7,79
72,17	7,246	5,904	7,763	8,1
82,49	7,728	6,078	7,971	8,289
92,82	8,026	6,223	8,203	8,621
103,1	8,648	6,38	8,203	8,824
113,5	8,784	6,513	8,518	9,007
123,8	9,061	6,65	8,709	9,262
134,1	9,338	6,784	8,876	9,455
144,4	9,595	6,918	9,026	9,613
154,7	9,874	7,044	9,188	9,818
165	10,13	7,163	9,315	9,99
175,3	10,39	7,277	9,434	10,2
185,6	10,61	7,384	9,536	10,36
195,9	10,87	7,498	9,648	10,53

Continuação da Tabela 18

Taxa (s ⁻¹)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)
	Fluido 2	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 5
206,3	11,14	7,612	9,829	10,64
216,6	11,32	7,711	9,901	10,82
226,9	11,56	7,794	10,03	11,01
237,2	11,8	7,915	10,16	11,08
247,5	12,04	7,984	10,28	11,3
257,8	12,2	8,109	10,33	11,4
268,1	12,44	8,197	10,5	11,54
278,5	12,62	8,263	10,6	11,72
288,8	12,79	8,38	10,66	11,86
299,1	13,04	8,488	10,75	11,94
309,4	13,25	8,561	10,85	12,03
319,7	13,45	8,649	10,94	12,15
330	13,64	8,746	11,05	12,29
340,3	13,81	8,827	11,15	12,41
350,7	13,94	8,886	11,29	12,55
361	14,1	8,959	11,4	12,7
371,2	14,33	9,044	11,41	12,82
381,6	14,54	9,142	11,55	12,85
391,9	14,62	9,175	11,61	13,04
402,2	14,91	9,294	11,71	13,1
412,5	14,95	9,325	11,77	13,26
422,8	15,27	9,454	11,93	13,31
433,1	15,41	9,486	11,92	13,46
443,5	15,49	9,545	12,02	13,58
453,8	15,73	9,659	12,16	13,63
464,1	15,94	9,744	12,25	13,73
474,4	16,19	9,82	12,33	13,84
484,7	16,3	9,88	12,43	13,94
495	16,45	9,961	12,48	14,03
505,4	16,63	10,04	12,53	14,13

Continuação da Tabela 18

Taxa (s ⁻¹)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)
	Fluido 2	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 5
515,7	16,74	10,05	12,57	14,22
526	16,79	10,09	12,65	14,4
536,2	17,07	10,21	12,82	14,45
546,6	17,26	10,27	12,8	14,5
556,9	17,31	10,28	12,92	14,68
567,2	17,61	10,4	12,94	14,69
577,5	17,64	10,4	13,12	14,83
587,9	17,89	10,52	13,1	14,87
598,1	18,1	10,61	13,19	15
608,4	18,08	10,59	13,35	15,13
618,9	18,24	10,66	13,37	15,16
629,2	18,52	10,77	13,41	15,23
639,5	18,71	10,81	13,46	15,31
649,8	18,88	10,9	13,54	15,39
660,2	18,99	10,92	13,63	15,48
670,5	19,11	10,94	13,73	15,57
680,7	19,21	10,97	13,83	15,7
690,8	19,47	11,09	13,8	15,78
701,3	19,66	11,2	13,88	15,79
711,7	19,65	11,15	14,02	
721,8	19,87	11,31	13,98	15,97
732,4	19,89	11,28	14,16	16,05
742,5	20,12	11,41	14,12	16,11
752,8	19,99	11,37	14,26	16,4
763,3	20,21	11,5	14,33	16,23
773,4	20,43	11,6	14,34	16,32
783,6	20,49	11,59	14,36	16,47
794	20,66	11,59	14,43	16,56
804,5	20,79	11,61	14,49	16,66
814,5	20,92	11,72	14,58	16,73

Continuação da Tabela 18

Taxa (s ⁻¹)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)
	Fluido 2	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 5
824,9	21,05	11,8	14,61	16,81
835,2	21,24	11,91	14,7	16,82
845,6	21,43	11,95	14,8	16,8
856,2	21,45	11,94	14,9	16,94
866,4	21,58	11,93	14,86	17,07
876,4	21,89	12,13	14,96	17,04
887,1	21,75	12,01	15	17,21
897	22,04	12,24	15,12	17,2
907,7	21,98	12,1	15,11	17,36
918,1	22,24	12,29	15,27	17,27
927,9	22,36	12,33	15,25	17,41
938,4	22,37	12,28	15,26	17,61
949	22,48	12,3	15,39	17,57
959,4	22,63	12,39	15,46	17,61
969,8	22,86	12,47	15,57	17,66
980,1	22,85	12,48	15,63	17,73
990,4	23	12,53	15,67	17,79
1000	23,09	12,53	15,61	17,91
1010	23,25	12,71	15,67	18,04
1021	23,62	12,83	15,8	17,97

Tabela 19 Tensão cisalhante e taxa de deformação para os fluidos 6-9

Taxa (s ⁻¹)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)
	Fluido 6	Fluido 7	Fluido 8	Fluido 9
10,36	4,5504	5,686	7,68	0,000
20,63	5,493257	6,433	8,308	2,158
30,94	6,16769	6,988	9,057	3,554
41,23	6,708635	7,43	9,057	4,717
51,56	7,170351	7,836	10,23	5,708
61,88	7,575662	8,17	10,77	6,521
72,17	7,938692	8,496	11,17	7,205
82,49	8,270851	8,834	11,59	7,901
92,82	8,577652	8,834	12,01	8,487
103,1	8,861968	9,349	12,05	9,089
113,5	9,131689	9,539	12,08	9,581
123,8	9,383642	9,801	13,07	10,11
134,1	9,62251	10,02	13,17	10,61
144,4	9,849906	10,21	14,39	11,05
154,7	10,06714	10,41	14,27	11,47
165	10,27531	10,58	14,21	11,88
175,3	10,47532	10,79	14,51	12,27
185,6	10,66793	10,99	14,76	12,67
195,9	10,85383	11,17	15,15	13,06
206,3	11,03528	11,34	15,05	13,42
216,6	11,20931	11,49	15,9	13,72
226,9	11,37812	11,66	15,75	14,05
237,2	11,54209	11,64	15,9	14,42
247,5	11,70157	11,94	16,18	14,66
257,8	11,85685	12,12	16,37	15,04
268,1	12,00822	12,28	16,58	15,27
278,5	12,15732	12,43	16,86	15,61
288,8	12,30151	12,56	17,15	15,92

Continuação da Tabela 19

Taxa (s ⁻¹)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)
	Fluido 6	Fluido 7	Fluido 8	Fluido 9
299,1	12,44245	12,69	17,14	16,15
309,4	12,58032	12,84	17,34	16,38
319,7	12,71528	12,98	17,56	16,65
330	12,84749	13,09	17,82	16,93
340,3	12,97708	13,23	17,94	17,18
350,7	13,1054	13,36	18,21	17,4
361	13,23012	13,51	18,81	17,68
371,2	13,35139	13,69	18,54	17,98
381,6	13,47287	13,72	18,65	18,21
391,9	13,59111	13,87	18,92	18,36
402,2	13,70738	13,98	18,99	18,69
412,5	13,82176	14,01	19,23	18,86
422,8	13,93432	14,21	19,34	19,14
433,1	14,04514	14,35	20,45	19,27
443,5	14,15534	14,5	19,9	19,57
453,8	14,26286	14,54	19,82	19,77
464,1	14,36884	14,65	20,01	19,93
474,4	14,47331	14,78	20,17	20,12
484,7	14,57635	14,9	20,28	20,34
495	14,67799	14,99	20,36	20,57
505,4	14,77925	15,1	20,51	20,76
515,7	14,87824	15,19	20,83	20,91
526	14,97597	15,35	20,96	21,14
536,2	15,07155	15,42	21,04	21,42
546,6	15,16781	15,53	21	21,59
556,9	15,262	15,66	21,42	21,68
567,2	15,35508	15,71	21,2	21,99
577,5	15,44708	15,88	21,5	22,08
587,9	15,53892	15,9	21,6	22,36
598,1	15,62799	16,65	21,7	22,41

Continuação da Tabela 19

Taxa (s ⁻¹)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)
	Fluido 6	Fluido 7	Fluido 8	Fluido 9
608,4	15,71695	16,16	22,1	22,68
618,9	15,80665	16,23	22,18	22,91
629,2	15,8937	16,28	22,3	23,02
639,5	15,97984	16,37	22,43	23,15
649,8	16,0651	16,23	22,48	23,28
660,2	16,15032	16,58	22,65	23,46
670,5	16,23387	16,68	22,55	23,62
680,7	16,3158	16,81	22,53	23,85
690,8	16,39617	16,93	21,99	24,09
701,3	16,47892	16,95	22,099	24,21
711,7	16,5601	17,07	23,38	24,28
721,8	16,63822	17,17	23,12	24,56
732,4	16,71946	17,21	22,97	24,65
742,5	16,79617	17,31	22,6	24,8
752,8	16,87371	17,4	23,89	24,96
763,3	16,95206	17,44	23,93	25,22
773,4	17,02678	17,55	24,05	25,21
783,6	17,10161	17,69	24,13	25,4
794	17,17727	17,78	24,22	25,59
804,5	17,25301	17,87	24,45	25,81
814,5	17,32456	17,95	24,56	25,97
824,9	17,39838	18,04	23,88	26,1
835,2	17,47091	18,11	24,68	26,24
845,6	17,54356	18,13	24,97	26,32
856,2	17,61702	18,19	24,63	26,4
866,4	17,68716	18,34	25,33	26,51
876,4	17,75541	18,4	24,93	26,83
887,1	17,8279	18,49	25,32	26,8
897	17,89446	18,56	25,21	27,01
907,7	17,96588	18,67	25,8	27,14

Taxa (s ⁻¹)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)	Tensão (Pa)
	Fluido 6	Fluido 7	Fluido 8	Fluido 9
918,1	18,03479	18,63	25,8	27,32
927,9	18,09926	18,82	25,57	27,33
938,4	18,16785	18,82	25,81	27,54
949	18,2366	18,93	25,87	27,79
959,4	18,30358	18,97	25,61	27,88
969,8	18,3701	19,02	25,86	27,86
980,1	18,43553	19,1	25,99	27,98
990,4	18,50051	19,21	26,17	28,1
1000	18,5607	19,35	26,33	28,3
1010	18,623	19,46	26,48	28,56
1021	18,69107	19,53	26,38	28,7

Anexo 4. Dados de vazão e queda de pressão em fratura nos teste de escoamento

Tabela 20. Dados de vazão e queda de pressão para água industrial

Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
4,37E-05	2196	3,84E-05	6278	1,98E-05	6951
5,08E-05	2580,5	4,09E-05	6962,5	2,14E-05	7871,5
5,40E-05	2859,5	4,33E-05	7660,5	2,27E-05	8786
5,83E-05	3148	4,57E-05	8614,5	2,42E-05	9746
6,28E-05	3416,5	4,85E-05	9307,5	2,58E-05	10483,5
6,60E-05	3599	5,16E-05	10090	2,74E-05	11617
6,87E-05	3823	5,37E-05	10960	2,90E-05	12839
7,16E-05	4064	5,62E-05	11902	3,06E-05	14059
7,30E-05	3986	5,88E-05	12956,5	3,22E-05	15292,5
7,60E-05	4244	6,15E-05	13936,5	3,36E-05	16640

Tabela 21. Dados de vazão e queda de pressão goma xantana

Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm		Fratura de 2 mm	
Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
3,50E-05	3511,5	1,55E-05	6074	4,01E-06	7688
3,69E-05	3592	1,76E-05	6341,5	5,10E-06	8501
3,89E-05	3672,5	1,92E-05	6613,5	5,51E-06	9214
4,12E-05	3810	2,08E-05	7013	6,02E-06	10255,5
4,40E-05	4002,5	2,38E-05	7499,5	1,17E-05	14461
4,78E-05	4180,5	2,67E-05	8064,5	1,52E-05	23010
5,01E-05	4235,5	2,84E-05	8496,5		
5,27E-05	4421	3,22E-05	9153,5		
5,51E-05	4536				

Tabela 22. Dados de vazão e queda de pressão CMC

Fratura de 10 mm	
Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
2,46E-05	5817
2,76E-05	6343
3,01E-05	6650
3,31E-05	7279
3,79E-05	8199
4,40E-05	8930
4,65E-05	9426
4,46E-05	9056

Tabela 23. Dados de vazão e queda de pressão para o fluido 4

Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
4,02E-05	4851	5,42E-05	11883,7
6,34E-05	5590	6,11E-05	1,28E+04
6,93E-05	5714	6,24E-05	12987,7
7,32E-05	5743	6,70E-05	13318,7
7,68E-05	6059	6,99E-05	13787,7
8,07E-05	6192	7,32E-05	14262,7
8,27E-05	6314	7,68E-05	14596,2
8,86E-05	6631	8,14E-05	15067,2
9,18E-05	6676	8,34E-05	15378,2
9,38E-05	6801	8,76E-05	15795,7
9,67E-05	6878	9,08E-05	16134,2
1,01E-04	7088	9,48E-05	16334,2
1,03E-04	7377	9,61E-05	16634,2

Tabela 24. Dados de vazão e queda de pressão para a suspensão de calcário laminar fino - 5 lb/bbl. Fonte: Godoi, 2017.

Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
1,94E-05	2654	7,27E-06	4362
1,95E-05	2613	7,65E-06	4424
2,00E-05	2648	7,95E-06	4464
2,04E-05	2679	8,33E-06	4546
2,05E-05	2599	8,86E-06	4652
2,17E-05	2655	9,09E-06	4675
2,17E-05	2687	9,32E-06	4735
2,13E-05	2648	9,62E-06	4748
2,08E-05	2610	9,77E-06	4768

Continuação da Tabela 24

Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
2,16E-05	2686	9,85E-06	4800
2,33E-05	2732	9,92E-06	4842
2,33E-05	2735	1,01E-05	4851
2,34E-05	2754	1,02E-05	4864
2,56E-05	2814	1,05E-05	4953
2,58E-05	2801	1,07E-05	4968
2,55E-05	2861	1,44E-05	5712
2,48E-05	2808	1,46E-05	5734
2,53E-05	2824	1,49E-05	5743
2,65E-05	2847	1,51E-05	5763
2,67E-05	3014	1,52E-05	5829
2,73E-05	2955	1,55E-05	5867
2,79E-05	3069	1,60E-05	5953
2,78E-05	3036	1,61E-05	6005
2,80E-05	3091	1,65E-05	6023
2,83E-05	3067	1,67E-05	6099
2,86E-05	3053	1,70E-05	6106
2,84E-05	3114	1,73E-05	6159
2,88E-05	3003	1,77E-05	6222
3,00E-05	2869	1,78E-05	6224
3,11E-05	2909	1,81E-05	6313
3,10E-05	3017	2,05E-05	6806
3,07E-05	2973	2,14E-05	6952
3,08E-05	3048	2,20E-05	6927
3,11E-05	3187	2,23E-05	6984
3,03E-05	3065	2,17E-05	6943,75
2,92E-05	3046	2,21E-05	7022
2,89E-05	3046	2,19E-05	6727
2,86E-05	2975	2,11E-05	6883
2,89E-05	2915	2,17E-05	6904

Continuação da Tabela 24			
Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
2,89E-05	2925	2,18E-05	6933
2,96E-05	3018	2,16E-05	6913
3,01E-05	3085	2,17E-05	6947
3,04E-05	3025	2,17E-05	6925

Tabela 25. Dados de vazão e queda de pressão para a suspensão de calcário laminar fino - 15 lb/bbl. Fonte: Godoi, 2017

Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
1,47E-05	2243	6,56E-06	4172
1,47E-05	2228	6,64E-06	4211
1,50E-05	2275	6,71E-06	4186
1,54E-05	2345	6,71E-06	4205
1,56E-05	2297	6,74E-06	4188
1,62E-05	2323	6,78E-06	4200
1,62E-05	2377	6,78E-06	4201
1,62E-05	2343	6,86E-06	4232
1,66E-05	2396	6,93E-06	4226
1,67E-05	2406	1,12E-05	5351
1,72E-05	2410	1,16E-05	5301
1,78E-05	2475	1,17E-05	5301
1,92E-05	2504	1,17E-05	5306
1,96E-05	2534	1,17E-05	5311
1,96E-05	2466	1,18E-05	5350
1,98E-05	2565	1,19E-05	5363
1,98E-05	2737	1,19E-05	5358
2,01E-05	2604	1,65E-05	6200
2,02E-05	2896	1,70E-05	6279
2,03E-05	2595	1,73E-05	6285

Continuação da Tabela 25

Fratura de 10 mm		Fratura de 5 mm	
Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
2,06E-05	2662	1,77E-05	6423
2,08E-05	2852	1,80E-05	6460
2,10E-05	2624	1,83E-05	6500
2,14E-05	2594	1,84E-05	6535
2,14E-05	2642	1,86E-05	6554
2,16E-05	2900	1,88E-05	6587
2,17E-05	2843	1,89E-05	6687
2,24E-05	2790	1,90E-05	6665
2,24E-05	2855	1,92E-05	6600
2,29E-05	2795	1,94E-05	6695
2,34E-05	2797	1,95E-05	6730
2,35E-05	2791	1,96E-05	6691
2,37E-05	2892	2,12E-05	7401
2,38E-05	2913	2,13E-05	7209
2,44E-05	2972	2,15E-05	7350
2,45E-05	2765	2,18E-05	7374
2,55E-05	3013	2,18E-05	7304
2,68E-05	3130	2,19E-05	7171
2,75E-05	3194	2,20E-05	7275
2,76E-05	3250	2,23E-05	7202
2,78E-05	3368	2,24E-05	7346
2,88E-05	3228	2,35E-05	7464
3,05E-05	3157	2,46E-05	7637

Anexo 5. Dados de vazão e queda de pressão em fratura nos teste de selamento

Tabela 26. Dados de vazão e queda de pressão de selamento para fluido 4

Tempo (min)	Fratura 10 mm		Fratura 5 mm		Fratura 2 mm	
	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
1	3,58E-05	5471	3,17E-05	11071	7,67E-06	14532
2	4,15E-05	5379	2,55E-05	11155	2,00E-06	14421
3	3,65E-05	5412	2,53E-05	11160	1,50E-06	14404
4	3,50E-05	5400	2,50E-05	11167	1,67E-06	14420
5	3,82E-05	5323	2,53E-05	11133	1,50E-06	14508
6	3,70E-05	5424	2,53E-05	11129	1,67E-06	14553
7	3,88E-05	5375	2,52E-05	11151	1,50E-06	14547
8	4,38E-05	5422	2,52E-05	11108	1,33E-06	14539
9	3,73E-05	5347	2,50E-05	11145	1,67E-06	14215
10	3,75E-05	5337	2,52E-05	11150	1,67E-06	14194

Tabela 27. Dados de vazão e queda de pressão de selamento para fluido 5.

Tempo (min)	Fratura 10 mm		Fratura 5 mm		Fratura 2 mm	
	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
1	4,83E-05	5557	1,72E-05	5557	7,43E-06	14920
2	2,85E-05	5890	1,67E-05	5890	1,32E-06	8623
3	2,81E-05	5891	1,70E-05	5891	1,65E-07	8124
4	2,79E-05	5779	1,70E-05	5779	1,65E-07	5750
5	2,77E-05	6050	1,72E-05	6050	0	7
6	3,27E-05	6056	1,70E-05	6056	-	-
7	3,22E-05	5814	1,68E-05	5814	-	-
8	2,81E-05	5968	1,68E-05	5968	-	-
9	2,84E-05	5803	1,68E-05	5803	-	-
10	2,54E-05	5585	1,67E-05	5585	-	-

Tabela 28 Dados de vazão e queda de pressão de selamento para fluido 6.

Tempo (s)	Fratura 10 mm		Fratura 5 mm	
	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
30	7,03E-05	3780	8,30E-05	6908
60	5,56E-05	3600	9,02E-05	6920
90	4,64E-05	3620	8,59E-05	7010
120	6,18E-05	3695,5	8,82E-05	7052
150	3,04E-05	700	8,73E-05	7074
180	0	-	9,64E-05	6880
210	-	-	8,33E-05	7038
240	-	-	8,76E-05	7070
270	-	-	9,12E-05	7406
300	-	-	9,15E-05	5398
330	-	-	7,06E-05	5318
353	-	-	6,35E-05	700
360	-	-	-	0

Tabela 29. Dados de vazão e queda de pressão de selamento para fluido 7.

Tempo (s)	Fratura 5 mm	
	Q(m ³ /s)	ΔP (Pa)
30	8,51E-05	4340
60	9,16E-05	4315
101	9,97E-05	4305
120	8,07E-05	4485
150	9,61E-05	4478
180	1,00E-04	4450
210	9,74E-05	3197
220	9,71E-06	3000
240	0	300

Anexo 6. Dados de vazão e diâmetro hidráulico da metodologia de monitoramento

Tabela 30. Dados de vazão e diâmetro hidráulico de fratura para a suspensão de calcário laminar fino - 15 lb/bbl. Fonte: Godoi, 2017

Tempo (min)	Fratura 10 mm	
	Q(m ³ /s)	D _H (m)
1	3,58E-05	5471
5	8,86E-06	9,30E-03
7	8,86E-06	9,36E-03
9	8,51E-06	9,34E-03
11	8,51E-06	9,34E-03
13	8,33E-06	9,31E-03
15	8,51E-06	9,35E-03
17	8,42E-06	9,32E-03
19	8,60E-06	9,36E-03
21	8,60E-06	9,36E-03
23	8,60E-06	9,38E-03
25	8,86E-06	0,00937
27	8,42E-06	0,00937
30	8,68E-06	0,00929

Tabela 31. Dados de vazão e diâmetro hidráulico de fratura para a suspensão de calcário laminar médio - 5 lb/bbl. Fonte: Godoi, 2017.

Tempo (min)	Fratura 10 mm		Fratura 5 mm		Fratura 2 mm	
	Q(m ³ /s)	D _H (m)	Q(m ³ /s)	D _H (m)	Q(m ³ /s)	D _H (m)
10	2,86E-05	1,00E-02	4,38E-05	6,21E-03	2,68E-06	0,00393
20	1,16E-05	8,29E-03	4,29E-05	6,13E-03	8,93E-07	0,00236
30	6,25E-06	6,71E-03	3,75E-05	5,63E-03	8,93E-07	0,00229
40	3,57E-06	6,19E-03	3,75E-05	5,92E-03	8,93E-07	0,00226
50	8,93E-07	3,78E-03	2,95E-05	5,02E-03	8,93E-07	0,00257
60	8,93E-07	3,78E-03	1,52E-05	3,23E-03	0	0,00209
70	8,93E-07	3,78E-03	1,25E-05	3,14E-03	0	
80	8,93E-07	3,78E-03	6,25E-06	1,80E-03		
90	0,00E+00	1,34E-03	5,36E-06	0,0012		
100	-	-	5,36E-06	0,0012		
110			8,93E-07	-0,00102		
120			8,93E-07	-9,70E-04		
130			0	-8,65E-04		

Anexo 7. Dados de filtração.

Tabela 32. Volume de filtrado para os fluidos 3, 4, 6 e 7.

Tempo (s)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)
	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 6	Fluido 7
10	0,03483	0,00138	0,00046	0,00039
20	0,04338	0,00186	0,00058	0,0005
30	0,04773	0,00205	0,00071	0,00062
40	0,049	0,00223	0,00087	0,00076
50	0,05072	0,00239	0,00099	0,00088
60	0,05199	0,00254	0,0011	0,00098
70	0,05325	0,00267	0,0012	0,00106
80	0,0542	0,0028	0,0012	0,00117
90	0,05506	0,00293	0,00132	0,00124
100	0,0558	0,00305	0,0014	0,00132
110	0,05647	0,00317	0,0015	0,0014
120	0,05705	0,00328	0,00158	0,00148
130	0,05759	0,00338	0,00167	0,00156
140	0,0581	0,00349	0,00174	0,00164
150	0,05857	0,00396	0,00182	0,00171
160	0,059	0,00369	0,0019	0,00178
170	0,05941	0,0038	0,00195	0,00183
180	0,05979	0,0039	0,00204	0,00189
190	0,06017	0,00398	0,00211	0,00195
200	0,06051	0,00407	0,00217	0,00202
210	0,06085	0,00416	0,00221	0,00206
220	0,06117	0,00425	0,0023	0,00214
230	0,06147	0,00433	0,00236	0,00218
240	0,06176	0,00442	0,00242	0,00224
250	0,06205	0,00449	0,00246	0,0023
260	0,06232	0,00457	0,00255	0,00236
270	0,06258	0,00465	0,00259	0,00242
280	0,06283	0,00472	0,00266	0,00246

Continuação da Tabela 32

Tempo (s)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)
	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 6	Fluido 7
290	0,06309	0,00481	0,00272	0,00257
300	0,06333	0,00487	0,00278	0,00257
310	0,06357	0,00497	0,00283	0,00262
320	0,0638	0,00503	0,00288	0,00265
330	0,06401	0,0051	0,00303	0,00271
340	0,06423	0,00518	0,00308	0,00274
350	0,06464	0,00524	0,00314	0,00279
360	0,06485	0,0053	0,00319	0,00284
370	0,06504	0,00539	0,00323	0,00284
380	0,06523	0,00543	0,00328	0,00288
390	0,06542	0,0055	0,00334	0,00293
400	0,0656	0,00557	0,00339	0,00299
410	0,06579	0,00563	0,00343	0,00302
420	0,06596	0,00569	0,00347	0,00307
430	0,06613	0,00577	0,00352	0,00311
440	0,06629	0,00582	0,00357	0,00315
450	0,06647	0,00588	0,00362	0,00318
460	0,06664	0,00595	0,00368	0,00321
470	0,0668	0,006	0,00372	0,00327
480	0,06695	0,00608	0,00376	0,0033
490	0,0671	0,00612	0,0038	0,00334
500	0,06726	0,00619	0,00384	0,00339
510	0,0674	0,00624	0,00386	0,00343
520	0,06755	0,00631	0,00389	0,00347
530	0,0677	0,00636	0,00394	0,00351
540	0,06785	0,00643	0,00398	0,00354
550	0,06799	0,00647	0,00402	0,00358
560	0,06813	0,00652	0,00406	0,00361
570	0,06827	0,00659	0,0041	0,00364
580	0,0684	0,00663	0,00414	0,00366

Continuação da Tabela 32

Tempo (s)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)
	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 6	Fluido 7
590	0,06854	0,0067	0,00419	0,00371
600	0,06867	0,00675	0,00423	0,00374
610	0,06879	0,00681	0,00427	0,00377
620	0,06892	0,00686	0,00431	0,00382
630	0,06905	0,00691	0,00435	0,00384
640	0,06917	0,00697	0,0044	0,00386
650	0,0693	0,00701	0,00444	0,00391
660	0,06941	0,00707	0,00448	0,00394
670	0,06954	0,00713	0,00452	0,00399
680	0,06965	0,00717	0,00454	0,00402
690	0,06977	0,00723	0,00457	0,00403
700	0,06988	0,00729	0,00461	0,00408
710	0,07	0,00732	0,00464	0,00409
720	0,07011	0,00737	0,00467	0,00411
730	0,07022	0,00743	0,0047	0,00416
740	0,07034	0,00748	0,00473	0,00419
750	0,07045	0,00751	0,00477	0,00422
760	0,07057	0,00756	0,00482	0,00424
770	0,07068	0,0076	0,00485	0,00427
780	0,07079	0,00767	0,00489	0,0043
790	0,07091	0,00771	0,00492	0,00432
800	0,07103	0,00775	0,00494	0,00433
810	0,07113	0,00779	0,00496	0,00437
820	0,07125	0,00785	0,005	0,00441
830	0,07135	0,0079	0,00505	0,00444
840	0,07146	0,00794	0,00509	0,00444
850	0,07157	0,00798	0,00511	0,00449
860	0,07169	0,00802	0,00513	0,00453
870	0,07178	0,00806	0,00516	0,00456
880	0,07189	0,0081	0,00521	0,00457

Continuação da Tabela 32

Tempo (s)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)
	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 6	Fluido 7
890	0,07199	0,00815	0,00525	0,00461
900	0,07209	0,0082	0,00531	0,00464
910	0,07219	0,00825	0,00534	0,00465
920	0,07229	0,0083	0,00539	0,00469
930	0,07239	0,00833	0,00542	0,00473
940	0,07249	0,00838	0,00545	0,00473
950	0,07259	0,00842	0,00548	0,00477
960	0,07269	0,00846	0,00551	0,00482
970	0,07278	0,0085	0,00554	0,00482
980	0,07287	0,00855	0,00558	0,00486
990	0,07298	0,00859	0,00559	0,0049
1000	0,07303	0,00864	0,00562	0,0049
1010	0,07316	0,00867	0,00566	0,00494
1020	0,07325	0,00871	0,00566	0,00496
1030	0,07334	0,00875	0,0057	0,00498
1040	0,07343	0,00879	0,00572	0,00502
1050	0,07352	0,00883	0,00575	0,00504
1060	0,0736	0,00888	0,00577	0,00508
1070	0,0737	0,00892	0,00579	0,00509
1080	0,07379	0,00896	0,00584	0,00512
1090	0,07387	0,009	0,00588	0,00513
1100	0,07396	0,00903	0,00588	0,00517
1110	0,07404	0,00907	0,00591	0,00522
1120	0,07413	0,00911	0,00596	0,00522
1130	0,07421	0,00915	0,00599	0,00525
1140	0,0743	0,0092	0,006	0,00528
1150	0,07437	0,00924	0,00604	0,00529
1160	0,07446	0,00927	0,00609	0,00533
1170	0,07453	0,00931	0,00609	0,00534
1180	0,07461	0,00936	0,00613	0,00538

Continuação da Tabela 32

Tempo (s)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)
	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 6	Fluido 7
1190	0,07469	0,00938	0,00617	0,0054
1200	0,07478	0,00943	0,00618	0,00541
1210	0,07486	0,00947	0,0062	0,00546
1220	0,07493	0,00961	0,00625	0,00546
1230	0,07501	0,00955	0,00627	0,0055
1240	0,07508	0,00959	0,00629	0,00552
1250	0,07517	0,00963	0,00633	0,00554
1260	0,07526	0,00966	0,00636	0,00556
1270	0,07533	0,0097	0,00637	0,00557
1280	0,0754	0,00973	0,00641	0,0056
1290	0,07548	0,00977	0,00644	0,00564
1300	0,07555	0,0098	0,00649	0,00564
1310	0,07563	0,00983	0,00651	0,00568
1320	0,0757	0,00986	0,00653	0,00568
1330	0,07577	0,0099	0,00658	0,00572
1340	0,07584	0,00993	0,00658	0,00572
1350	0,07593	0,00997	0,00663	0,00576
1360	0,076	0,01002	0,00664	0,00577
1370	0,07607	0,01005	0,00667	0,00579
1380	0,07614	0,01009	0,00668	0,00581
1390	0,07621	0,01013	0,00671	0,00581
1400	0,07628	0,01017	0,00675	0,00584
1410	0,07635	0,0102	0,00675	0,00586
1420	0,07644	0,01024	0,00679	0,00591
1430	0,0765	0,01027	0,00682	0,00591
1440	0,07656	0,01029	0,00683	0,00594
1450	0,07676	0,01033	0,00687	0,00595
1460	0,07683	0,01037	0,00689	0,00598
1470	0,07688	0,01041	0,00691	0,00599
1480	0,07695	0,01045	0,00696	0,00602

Continuação da Tabela 32

Tempo (s)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)	Volume (L)
	Fluido 3	Fluido 4	Fluido 6	Fluido 7
1490	0,07701	0,01049	0,00696	0,00603
1500	0,07708	0,01052	0,007	0,00606
1510	0,07714	0,01055	0,00703	0,00609
1520	0,07722	0,01058	0,00704	0,00611
1530	0,07728	0,0106	0,00706	0,00614
1540	0,07734	0,01063	0,0071	0,00615
1550	0,07741	0,01067	0,0071	0,00618
1560	0,07748	0,0107	0,00714	0,00619
1570	0,07756	0,01072	0,00714	0,00622
1580	0,07759	0,01075	0,00718	0,00624
1590	0,07765	0,01079	0,0072	0,00627
1600	0,07771	0,01083	0,00722	0,00628
1610	0,07777	0,01087	0,00726	0,0063
1620	0,07784	0,0109	0,00726	0,00631
1630	0,07791	0,01092	0,0073	0,00636
1640	0,07796	0,01095	0,00733	0,00636
1650	0,07803	0,01096	0,00734	0,00639
1660	0,07809	0,01102	0,00738	0,0064
1670	0,07815	0,01107	0,00738	0,00644
1680	0,0782	0,01111	0,00742	0,00644
1690	0,07826	0,01112	0,00743	0,00647
1700	0,07833	0,01115	0,0075	0,00648
1710	0,07837	0,01119	0,0075	0,00652
1720	0,07841	0,01123	0,00751	0,00652
1730	0,07849	0,01127	0,00755	0,00655
1740	0,07853	0,01128	0,00755	0,00657
1750	0,0786	0,01131	0,00759	0,00658
1760	0,07865	0,01132	0,00759	0,0066
1770	0,07873	0,01136	0,00763	0,00661

Anexo 8. Gráficos da comparação entre os valores experimentais e teóricos da correlação entre vazão e queda de pressão em fraturas após o reajuste do parâmetro delta.

Fluido 3.

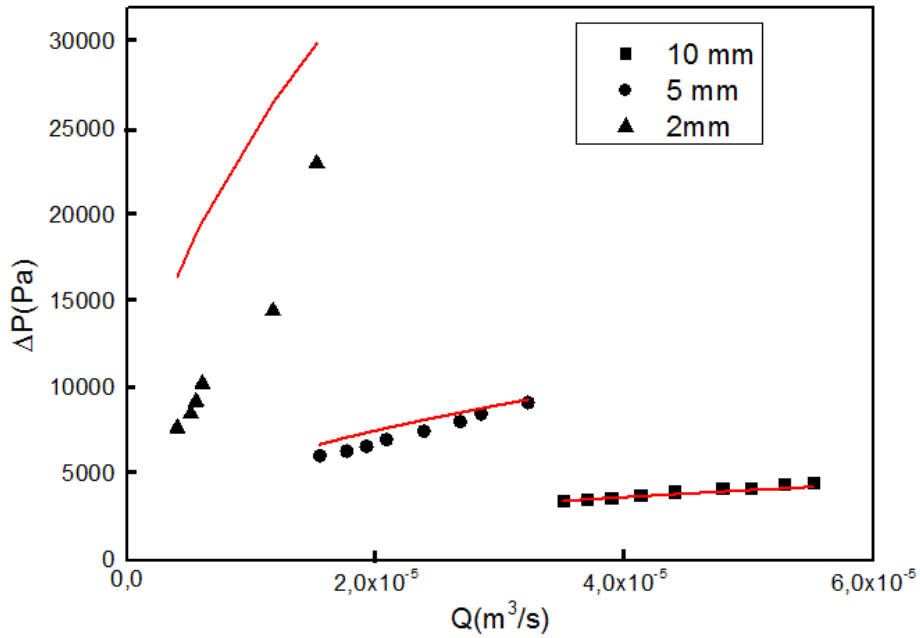


Figura 55. Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para a solução de goma xantana, após o ajuste do parâmetro delta.

Fluido 9

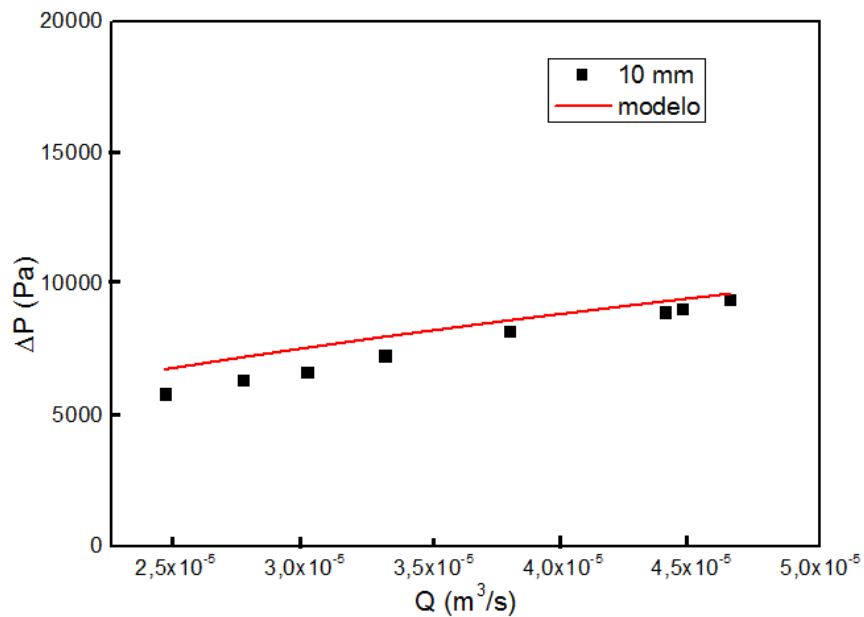


Figura 56. Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para a solução de CMC após o ajuste do parâmetro delta.

Fluido 4.

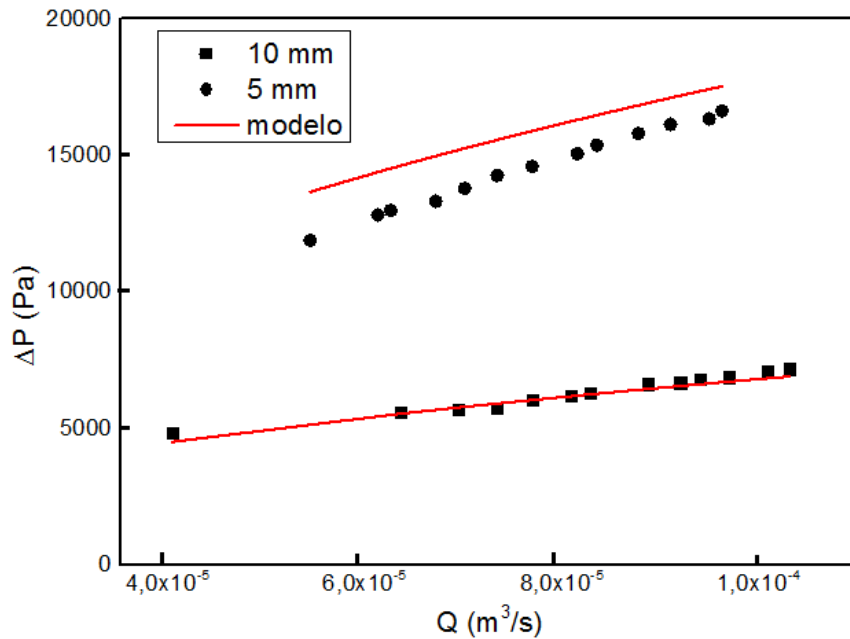


Figura 57. Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para a suspensão de goma xantana e LCM (5 lb/bbl), após o ajuste do parâmetro delta

Goma Xantana (2,0 lb/bbl)+ Carbonato laminar fino (5 lb/bbl).

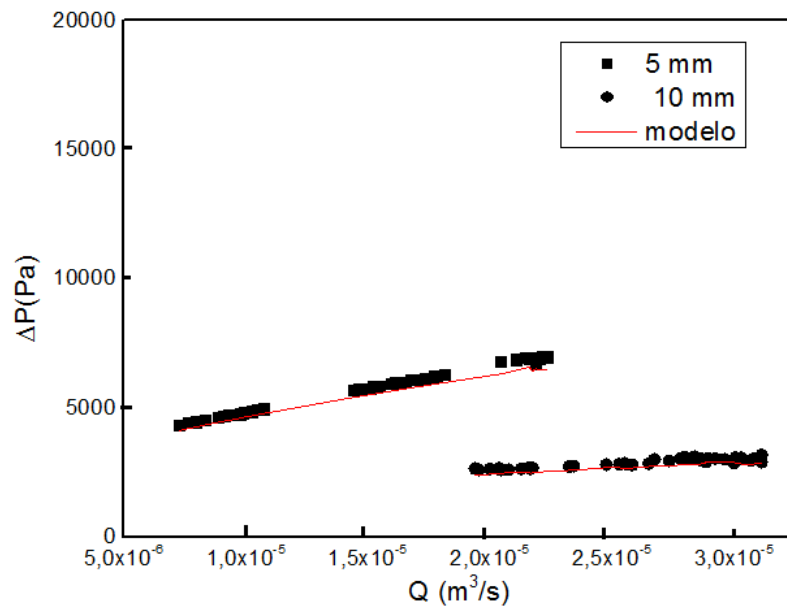


Figura 58. Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para a suspensão de goma xantana e carbonato laminar fino (5 lb/bbl), após o ajuste do parâmetro delta

Goma Xantana (2,0 lb/bbl)+ Carbonato laminar fino (15 lb/bbl).

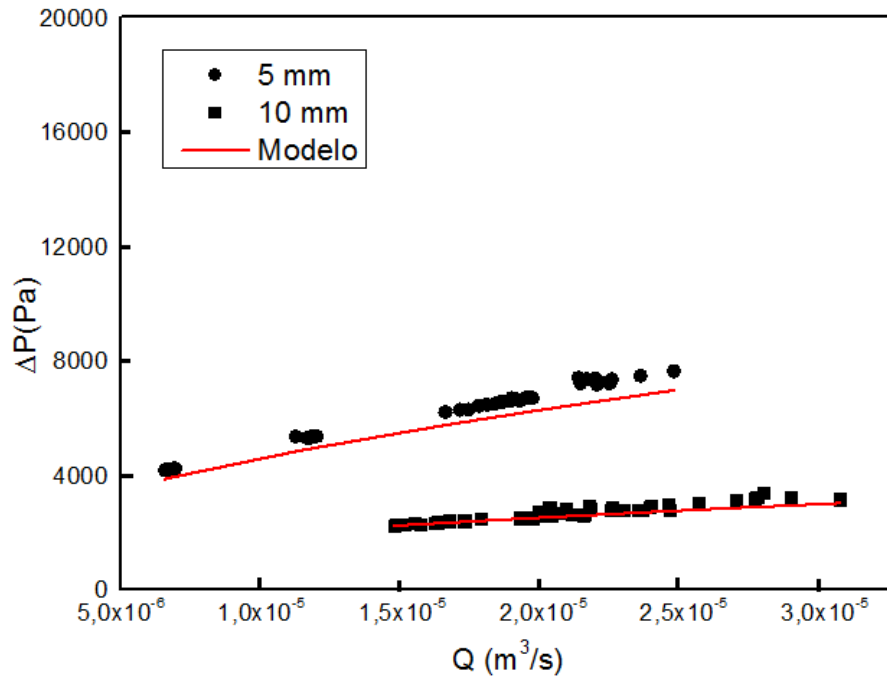


Figura 59. Modelo que correlaciona queda de pressão e vazão em fratura para a suspensão de goma xantana e carbonato laminar fino (15 lb/bbl), após o ajuste do parâmetro delta.

Anexo 9. Valores do número de Reynolds para os escoamentos de fluidos no simulador.

As faixas do número de Reynolds do escoamento foram calculadas utilizando a equação a seguir.

$$Re = \frac{\rho D_H \langle v \rangle}{\mu_{app}}$$

A tabela 32 apresenta as faixas de Reynolds para os testes de escoamento para os fluidos 3, 4 e 9, além disso, a tabela também apresenta as faixas de Reynolds do escoamento das suspensões de calcário laminar testadas por Godoi (2017).

Fluido escoado	Faixa de Reynolds na fratura
Fluido 3	110-570
Fluido 4	112-1131
Fluido 9	37-92
Goma Xanta + Calcário Laminar fino (5 lb/bbl)	26-200
Goma Xanta + Calcário Laminar fino (15 lb/bbl)	22 - 180