

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA *ON-LINE* PARA
DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FILTRAÇÃO DE FLUIDOS
DE PERFURAÇÃO**

GABRIELA CORRADI AZEVEDO

Dezembro/2021



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA *ON-LINE* PARA
DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FILTRAÇÃO DE FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO**

GABRIELA CORRADI AZEVEDO

Sob a Orientação de

Cláudia Miriam Scheid

e Coorientação de

Luís Américo Calçada

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

Seropédica, RJ

Dezembro/2021

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

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

Azevedo, Gabriela Corradi, 1991-
A994d DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA ON-LINE PARA
DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FILTRAÇÃO DE FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO / Gabriela Corradi Azevedo. /
Seropédica, 2021.
108 f.: il.

Orientadora: Cláudia Miriam Scheid.
Coorientador: Luís Américo Calçada.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química, 2021.

1. Fluido de perfuração. 2. Automação. 3. Filtração I. Scheid, Cláudia Miriam, 1968-, orient. II. Calçada, Luís Américo, 1966-, coorient. III. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

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

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

GABRIELA CORRADI AZEVEDO

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 17/12/2021.

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

Membros da banca:

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

Ricardo de Andrade Medronho. Dr. UFRJ.

Cristiano Agenor Oliveira de Araújo. Dr. UFVJM.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

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

FOLHA DE ASSINATURAS

Emitido em 2021

TERMO Nº 1347/2021 - PPGEQ (12.28.01.00.00.00.42)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 20/12/2021 17:03)

CLAUDIA MIRIAM SCHEID PEREIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEQ (12.28.01.00.00.00.45)
Matrícula: 1154800

(Assinado digitalmente em 20/12/2021 17:01)

RICARDO DE ANDRADE MEDRONHO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 331.948.237-87

(Assinado digitalmente em 20/12/2021 16:35)

CRISTIANO AGENOR OLIVEIRA DE ARAÚJO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 055.510.127-43

Para verificar a autenticidade deste

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número:
1347, ano: **2021**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **20/12/2021** e o código de verificação: **db2a9ae00d**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, em primeiro lugar. Minha fé em Deus sempre serviu de alicerce em cada um de meus passos e foi fundamental para esta conquista.

Agradeço minha mãe, Zólvia, por todo apoio e suporte. Eu sou uma privilegiada por poder me dedicar totalmente aos meus estudos, por ter a sua consideração e preocupação em cada etapa, seu suporte de quem ama e respeita os sonhos e vontades do outro. Isso é amor. E eu serei eternamente grata por ter você. Obrigada, mãe!

Agradeço aos meus irmãos que estão sempre ao meu lado, sempre dispostos a ajudar. Vocês são minha vida! Ao meu pai que sempre me apoiou.

Ao meu amigo Moacyr que foi fundamental para essa conquista, sua retidão, inteligência e generosidade o fazem único. Serei sempre grata!

Agradeço à minha orientadora, Cláudia, que desde as primeiras aulas de Mecânica dos Fluidos serviu de inspiração para mim. Que a senhora continue a inspirar outras alunas com sua carreira brilhante e didática impecável. Agradeço também ao meu co-orientador, professor Calçada, por compartilhar seu conhecimento e sempre ter colocações relevantes que fazem toda a diferença.

Agradeço ao apoio da equipe do LEF, Eduardo, Elias, ao Bruno e à minha amiga Tayna. Vocês tornaram todo o trabalho mais prazeroso. Obrigada!

RESUMO

AZEVEDO, Gabriela Corradi. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema *on-line* para determinação dos parâmetros de filtração de fluidos de perfuração**, 2021. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

A exploração de novos poços de petróleo e gás ainda se faz necessária, pois os combustíveis fósseis ainda são consumidos majoritariamente. À medida que um poço de exploração de petróleo é perfurado, o fluido de perfuração utilizado pode sofrer modificações em sua composição com a incorporação de diferentes materiais ou com mudanças de pressão e temperatura, por exemplo, por isso é importante monitorar tais propriedades em tempo real, para que, se houver necessidade, ações sejam tomadas o mais rápido possível. Ademais a complexidade desses poços vem aumentando, com poços altamente desviados e horizontais, tornando o processo de perfuração mais difícil, demandando um maior controle em cada etapa para uma operação segura e eficiente. A automação surge então como uma aliada nesta busca, seguindo a tendência mundial de transformação da indústria de Petróleo e Gás em uma indústria 4.0. Neste cenário, o presente trabalho propõe a automação de uma célula de filtração desenvolvida no Laboratório de Escoamento de Fluidos – Giulio Massarani, da UFRRJ, buscando com isso aumentar a eficiência na análise das propriedades dos fluidos de perfuração. No caso específico das propriedades de filtração do fluido de perfuração, atualmente, o monitoramento baseia-se em uma análise em bancada na qual uma amostra do fluido é coletada, em tempos predefinidos e analisada utilizando-se uma célula de filtração *HTHP*, fabricada pela *OFITE* e operada manualmente. Tal procedimento, apesar de difundido, é passível de imprecisões e não fornece as informações em tempo real, aumentando com isso o tempo para uma tomada de ação. Dentro deste contexto, a célula de filtração proposta foi automatizada, utilizando-se como referência a operação da célula de bancada. A automação foi realizada utilizando-se a linguagem gráfica do software *LabVIEW* da *National Instruments*. Diversas etapas de validação foram realizadas com fluidos diferentes para se garantir a reprodutibilidade dos dados de filtração na célula automatizada, tendo sido comprovada a capacidade da célula automatizada de reproduzir os resultados. Para mais, alguns dos resultados experimentais obtidos na célula proposta foram utilizados na estimativa de parâmetros do modelo Castro (1981) adaptado para fluidos que seguem o modelo Herschel-Bulkley, apresentando bons ajustes.

Palavras-chave: Filtração, automação, fluidos de perfuração, estimativa de parâmetros.

ABSTRACT

AZEVEDO, Gabriela Corradi. **Development and evaluation of an online system for determining the filtration parameters of drilling fluids.** 2021. 107 p. Thesis (Master of Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

The exploration of new oil and gas wells is still necessary, as fossil fuels are still mostly consumed. As an oil exploration well is drilled, the drilling fluid used may undergo changes in its composition with the incorporation of different materials or with changes in pressure and temperature, for example, so it is important to monitor such properties in real time, so that, if necessary, actions are taken as soon as possible. In addition, the complexity of these wells has been increasing, with highly diverted and horizontal wells, making the drilling process more difficult, demanding greater control at each step for safe and efficient operation. Automation then emerges as an ally in this quest, following the global trend of transformation of the Oil and Gas industry into a 4.0 industry. In this scenario, the present work proposes the automation of a filtration cell developed in the Fluid Flow Laboratory – Giulio Massarani, UFRRJ, seeking to increase efficiency in the analysis of the properties of drilling fluids. In the specific case of the filtration properties of the drilling fluid, monitoring is currently based on a bench top analysis in which a sample of the fluid is collected, at predefined times and analyzed using a HTHP filtration cell, manufactured by OFITE and operated manually. Such a procedure, although widespread, is subject to inaccuracies and does not provide the information in real time, thus increasing the time for an action. Within this context, the proposed filtration cell was automated, using as reference the operation of the bench cell. Automation was performed using the graphical language of the LabVIEW software from NATIONAL Instruments. Several validation steps were performed with different fluids to ensure the reproducibility of the filtration data in the automated cell, and the capacity of the automated cell to reproduce the results was proven. Furthermore, some of the experimental results obtained in the proposed cell were used to estimate parameters of the Castro model (1981) adapted to fluids that follow the Herschel-Bulkley model, presenting good adjustments.

Keywords: Filtration, automation, drilling fluids, parameter estimation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema do processo de perfuração e de filtração. Adaptada de Saboori <i>et al.</i> , (2019).	19
Figura 2. Diferentes tipos de fluidos de perfuração de acordo com o comportamento reológico. Adaptada de Guo e Liu (2011).	22
Figura 3. Esquema exemplificando a filtração estática (a) e a filtração dinâmica (b). Adaptado de Borges (2019).	24
Figura 4. Esquema de filtração plana. Adaptado de Araújo (2010).	27
Figura 5. Célula comercial de baixa pressão da Fann Dresser. Adaptada de Darley e Gray (1988).	33
Figura 6. Esquema do filtro prensa dinâmico. Adaptado de Vaussard et al., (1986).	34
Figura 7. Volume de filtrado x Tempo. Adaptado de Vaussard et al., (1986).	35
Figura 8. (a) Esquema da célula. (b) Célula de filtração HPHT automatizada. Adaptado de Saasen <i>et al.</i> (2009).	38
Figura 9. Comparação da perda de filtrado de diferentes fluidos e meios filtrantes. Adaptado de Saasen et al. (2009).	38
Figura 10. Regressão de floresta aleatória para fluido base óleo. Adaptado de Gul e van Oort (2020).	40
Figura 11. Regressão de floresta aleatória para fluido base água à base de argila e fluido base água KCl/polímero, respectivamente. Adaptado de Gul e van Oort (2020).	40
Figura 12. Esquema da unidade piloto utilizada por Araújo (2010). Adaptada de Araújo (2010).	42
Figura 13. Unidade de bancada, utilizada por Araújo. Adaptado de Araújo (2010).	43
Figura 14. Unidade experimental para filtração plana. Adaptado de Araújo (2010).	43
Figura 15. Resultados típicos da comparação entre os dados de simulação e experimentais da filtração dinâmica. Fonte: Araújo, 2010.	44
Figura 16. Célula de filtração <i>HTHP</i> da <i>OFITE</i> . Adaptada de Martins (2013).	45
Figura 17. Dados de massa de filtrado em função do tempo de filtração para fluidos do estudo	46
Figura 18. Dados de massa de filtrado em função do tempo de filtração para fluidos do estudo	46
Figura 19. Curva de filtração obtida experimentalmente e simulado do fluido WBM1. Adaptado de Calçada et al. (2014).	48

Figura 20. Dados de filtração estática para diferentes fluidos. Adaptado de Ferraz (2014). .	49
Figura 21. Skid experimental. Adaptado de Barbosa (2016).	50
Figura 22. Esquema de célula de filtração automatizada. Adaptado de Barbosa (2016).	50
Figura 23. Ajuste do modelo de filtração aos dados experimentais em diferentes pressões. Adaptado de Borges (2019).....	52
Figura 24. Célula de filtração OFITE HTHP. Adaptado de Manual OFITE (2015).....	53
Figura 25. Esquema da célula 171-01-C da OFITE. Adaptado de Borges (2019).....	54
Figura 26. Desenho da célula proposta para automação. Adaptado de Acervo do Laboratório de Escoamento Giulio Massarani (2019).	54
Figura 27. Foto da célula proposta para automação. Adaptado de Acervo do Laboratório de Escoamento Giulio Massarani (2019).	55
Figura 28. Unidade experimental com célula automatizada instalada.	56
Figura 29. Fluxograma da unidade.	57
Figura 30. Esquema de experimentos nas células utilizadas.....	59
Figura 31. Célula proposta apoiada no suporte para bancada. Adaptado de Acervo do Laboratório de Escoamento Giulio Massarani (2019).....	59
Figura 32. Célula de filtração com abertura manual (a) e com abertura automática (b).	61
Figura 33. Interface do operador do código de controle da célula.	63
Figura 34. Picnômetro.	63
Figura 35. Balança de lama (FANN 140).....	64
Figura 36. Viscosímetro 35 FANN.	64
Figura 37. Ajuste do modelo Herschel-Bulkley à curva média dos pontos experimentais para fluido com 2,5 lb/bbl de GX e 1,15 lb/gal de densidade.	69
Figura 38. Resultados preliminares de volume de filtrado médio por tempo de teste e seus respectivos desvios padrões.....	70
Figura 39. Resultados preliminares de volume de filtrado médio por tempo de teste e seus respectivos desvios padrões.....	72
Figura 40. Ajuste do modelo Herschel-Bulkley à curva média dos pontos experimentais das soluções com concentrações de 1,0 lb/bbl e 1,5 lb/bbl de goma xantana.....	74
Figura 41. Ajuste do modelo Herschel-Bulkley à curva média dos pontos experimentais das soluções com concentrações de 1,0 lb/bbl + 20% v/v e de 1,5 lb/bbl + 20% v/v.	74
Figura 42. Curvas de filtração para suspensão de 1,0 lb/bbl (GX) e 15% v/v (barita) nas duas células.	75

Figura 43. Curvas de filtração para suspensão de 1,0 lb/bbl (GX) e 20% v/v (barita) nas duas células.....	76
Figura 44. Curvas de filtração para suspensão de 1,5 lb/bbl e 15% v/v nas duas células.....	77
Figura 45. Curvas de filtração para suspensão de 1,5 lb/bbl (GX) e 20% v/v (barita) nas duas células.....	79
Figura 46. Análise do efeito da variação da concentração de sólidos e de goma xantana em cada uma das células.....	80
Figura 47. Média do volume de filtrado final em relação aos dois equipamentos empregados e às duas diferentes concentrações de barita e de goma xantana utilizadas, respectivamente.	81
Figura 48. Gráficos de contorno para cada célula e diagrama de Pareto para os efeitos testados.	81
Figura 49. Variação da porosidade com a célula utilizada, a concentração de sólidos e de goma xantana e diagrama de Pareto para avaliar a influência dos fatores estudados na porosidade obtida.	82
Figura 50. Tortas de filtração úmidas e secas, respectivamente, obtidas em ambas as células para o fluido de concentração de 1,0 lb/bbl (GX) e 15% v/v de barita.	83
Figura 51. Variação da viscosidade plástica com a célula utilizada, a concentração de sólidos e de goma xantana e diagrama de Pareto para avaliar a influência dos fatores na viscosidade plástica observada.	84
Figura 52. Variação da densidade com a célula utilizada, a concentração de sólidos e de goma xantana e diagrama de Pareto para avaliar a influência dos fatores estudados na densidade obtida.	85
Figura 53. Resultados preliminares de volume de filtrado médio por tempo de teste e seus respectivos desvios padrões.	86
Figura 54. Ajuste do modelo Herschel-Bulkley à curva média dos pontos experimentais da suspensão denominada como fluido completo.	87
Figura 55. Volume de filtrado médio com uma função do tempo para filtração a 300 psi nas células analisadas.	88
Figura 56. Volume de filtrado médio a 500 psi para as células analisadas.	89
Figura 57. Volume de filtrado médio a 700 psi para as células analisadas.	90
Figura 58. Análise do efeito da variação da pressão de trabalho nos volumes de filtrado obtidos.	90

Figura 59. Gráfico com o volume de filtrado médio experimental para o fluido com 1,0 lb/bbl (GX) e 15% v/v (barita) de acordo com o planejamento experimental e o ajuste ao modelo adotado.	92
Figura 60. Gráfico com o volume de filtrado médio experimental para o fluido com 1,0 lb/bbl (GX) e 20% v/v (barita) de acordo com o planejamento experimental e o ajuste ao modelo adotado.	92
Figura 61. Gráfico com o volume de filtrado médio experimental para o fluido com 1,5 lb/bbl (GX) e 15% v/v (barita) de acordo com o planejamento experimental e o ajuste ao modelo adotado.	94
Figura 62. Gráfico com o volume de filtrado médio experimental para o fluido com 1,5 lb/bbl (GX) e 20% v/v (barita) de acordo com o planejamento experimental e o ajuste ao modelo adotado.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação entre volumes de filtrado obtidos nas células de filtração. Adaptado de Barbosa (2016)	51
Tabela 2. Tabela resumo dos experimentos realizados.	62
Tabela 3. Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para fluido base (água/goma xantana) 2,5 lb/bbl e 1,15 lb/gal.....	70
Tabela 4. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.	71
Tabela 5. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.	73
Tabela 6. Parâmetros reológicos dos fluidos com 1,0 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita) e 1,5 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita).....	75
Tabela 7. Densidade média os fluidos de composição 1,0 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita), 1,5 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita), 1,0 lb/bb (GX) + 20% v/v (barita) e 1,5 lb/bbl (GX) + 20% v/v (barita).	75
Tabela 8. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.	76
Tabela 9. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.	77
Tabela 10. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.	78
Tabela 11. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.	79
Tabela 12. Dados referentes às tortas de filtração obtidas nas células OFITE e automatizada de acordo com o planejamento experimental.	83
Tabela 13. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.	87
Tabela 14. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.	88
Tabela 15. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.	89
Tabela 16. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.	90

Tabela 17. Valores dos parâmetros obtidos para ambas as células para as soluções de 1,0 lb/bbl de GX.....	93
Tabela 18. Valores dos parâmetros obtidos para ambas as células para as soluções de 1,5 lb/bbl (GX).....	95

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Perfuração	19
2.2 Fluidos de perfuração	20
2.2.1 Propriedades do fluido de perfuração	21
2.3 A filtração.....	23
2.3.1 Equacionamento	25
2.3.1.1 Teoria Simplificada da Filtração	25
2.3.2 Parâmetros da torta de filtração	31
2.4 Células de filtração.....	32
2.5 Breve histórico da automação na indústria do petróleo	35
2.6 Trabalhos anteriores de filtração	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 Células de filtração.....	53
3.1.2 Célula de filtração on-line	54
3.1.3 Construção do <i>skid</i>.....	55
3.1.4 Procedimento operacional.....	56
3.1.4.1 Célula de bancada da <i>OFITE</i>	56
3.1.4.2 Célula proposta.....	57
3.2 Validação.....	58
3.3 Automação	62
3.4 Caracterização dos materiais	63
3.4.1 Caracterização dos sólidos	63
3.4.2 Caracterização dos fluidos	64
3.4.2.1 Densidade	64
3.4.2.2 Reologia	64
3.4.3 Porosidade da torta.....	65
3.5 Estimação de parâmetros de filtração	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
4.1 Resultados experimentais	69
4.1.2 Validação da célula proposta instalada no <i>skid</i> operando mecanicamente....	72
4.1.3 Validação da célula instalada no <i>skid</i> com suspensões de goma xantana em diferentes concentrações.....	73

4.1.4	Validação da célula instalada no <i>skid</i> aberturas manual e automática	85
4.1.5	Fluido de perfuração completo.....	87
4.2	Estimação de parâmetros do modelo adaptado de Castro (1981).....	91
5	CONCLUSÕES	96

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Apesar das mudanças climáticas tornarem urgente uma modificação no sistema energético mundial, os combustíveis fósseis continuam sendo utilizados majoritariamente na geração de energia e no setor de transportes. Há sim um crescimento relativamente rápido do uso das energias renováveis, no entanto ele ainda possui pouca expressão globalmente (ZEPPINI e BERGH, 2019). Corroborando com essa tendência, um estudo realizado por Brockway *et al.* (2019) afirma que sob diversos cenários essa predominância irá se manter até pelo menos o ano de 2050.

Ademais, na última década, a indústria de Petróleo e Gás experimentou uma ampliação significativa no número de poços, principalmente de poços horizontais e altamente desviados, o que aumenta a complexidade nos processos relacionados à sua exploração (LOSOYA *et al.*, 2018). De acordo com Agwu e Akpabio (2018), a chave para o sucesso de uma perfuração está na formulação de um fluido de perfuração ideal, porém essa não é uma tarefa simples, visto que as propriedades dos fluidos variam com o tempo, dependem da sinergia entre o conjunto de componentes pelo qual o fluido é formado, além de serem afetadas pelas condições de altas pressões e altas temperaturas a que são expostas nos poços.

Nesse contexto, Jaffal *et al.* (2017) entendem que a plena compreensão dos fenômenos de filtração e de formação da torta na parede do poço torna-se uma ferramenta na busca do sucesso da perfuração. A Filtração que ocorre quando a pressão da região anular do poço é maior que a pressão dos poros da formação rochosa (operação em *overbalance*), fazendo com que o fluido invada a formação e forme um reboco na parede do poço que deve ser fino e de baixa permeabilidade, ajudando, desta forma, a reduzir a invasão de fluido de perfuração e auxiliando na sustentação do poço (EZEAKACHA e HAYATDAVOUDI, 2017).

Para estudar tal fenômeno são utilizados equipamentos denominados células de filtração nas quais é possível simular as condições de temperatura e pressão encontradas no poço produzindo volumes de filtrado e tortas de filtração que podem ser utilizadas para se avaliar o desempenho dos fluidos de perfuração (BAYAT *et al.*, 2018). No entanto, as mesmas são equipamentos de bancada operados manualmente, passíveis a erros de medição e de operação, principalmente quando se trata da aquisição de dados de volume por tempo, uma vez que os dados são obtidos a partir de sucessivas leituras pelo operador do acréscimo de volume de filtrado em um intervalo de tempo pré-determinado, que geralmente é longo (testes com no

mínimo de trinta minutos de duração) tornando tal processo sujeito a atrasos e erros de leitura. Além disso, apenas algumas filtrações são realizadas ao longo do dia, diminuindo ainda mais as informações sobre a composição do fluido de perduração, o que pode retardar uma tomada de ação que porventura seja necessária.

Pensando também no êxito da perfuração, Perween *et al.* (2018) afirmaram que conhecer a composição, assim como as propriedades reológicas e de filtração dos fluidos de perfuração é essencial. Comumente as propriedades como densidade e viscosidade do fluido são medidas em campo e em laboratório com a utilização de equipamentos clássicos como a balança de lama, que mensura a densidade do fluido e o funil de Marsh que dá uma indicação de maneira rápida e confiável da viscosidade do fluido (GOMAA *et al.*, 2020).

No entanto, apesar da existência de protocolos amplamente respeitados e utilizados nas últimas décadas, principalmente aqueles propostos pelas normas API (1993 e 2003), muitas das medidas de testes são agora antiquadas, pois não refletem a real condição dos fluidos nos poços, não levam em consideração a existência das ferramentas e sensores atualmente utilizados nem as técnicas de análise e a aquisição de dados das operações atuais (VAJARGAH e van OORT, 2015).

Desta forma, a automação surge como uma aliada na procura por uma maior exatidão na obtenção dos dados, pois, segundo Saasen *et al.* (2009), a aquisição de dados em tempo real é a principal contribuição de um processo automatizado. Isso porque que possibilita tomadas de decisão baseadas no que está acontecendo no momento, além de uma maior precisão dos dados fornecidos, visto que diminui a interferência humana nas medições. Ainda segundo estes autores, a medição *on-line* permite, a partir do controle das propriedades do fluido, aprimorar sua composição de modo que ele tenha um desempenho ótimo.

A literatura conta com um número expressivo de estudos que têm como tema a filtração em suas diferentes formas (estática e dinâmica), assim como estudos da variação dos parâmetros que influenciam as propriedades dos fluidos de perfuração (reologia, concentração de sólidos, fluido base, a utilização de nanocompostos, entre outras) (PONMANI, NAGARAJAN e SANGWAI, 2016; BALAVI e BOLUK, 2018; AHMAD, KAMAL e AL-HATHI, 2018; MAO *et al.*, 2020). O tema também é foco de estudo do Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF), da UFRRJ, onde este trabalho foi realizado. O LEF vem desenvolvendo ao longo dos anos trabalhos sobre os diversos aspectos da filtração, dos quais podemos citar os autores: Araújo (2010), Martins (2013), Calçada *et al.* (2014), Ferraz (2014) e Barbosa (2016) e Silva (2017).

No caso específico da filtração com automação, o trabalho de Barbosa (2016) realizou a automação de uma célula de filtração, dando origem a um projeto preliminar que possibilitou a identificação de gargalos e a análise de possíveis soluções para a medida da filtração *on-line*, no laboratório em questão. Deste modo, com base nesta experiência anterior e utilizando como referência uma célula comercial amplamente citada na literatura (célula *HTHP*, modelo 171-01-C da *OFITE*), os pesquisadores do LEF projetaram uma nova célula de filtração, sendo esta menor, mais compacta e robusta.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo a automação da nova célula de filtração desenvolvida no LEF, de forma que esta seja capaz de fornecer dados de volume de filtrado ao longo do tempo e as propriedades da torta de filtração de fluidos de perfuração em modo *on-line*, tendo assim a mínima interferência humana. Esse sistema representa um avanço na tendência mundial da automação dos processos presentes não apenas na indústria de Petróleo e Gás, mas como de muitas outras indústrias. Possibilitando a realização de operações mais seguras, feitas com maior eficiência, em menor tempo, representando também uma diminuição de custos.

A seguir serão apresentados os tópicos nos quais este trabalho será dividido:

- Capítulo II: apresenta uma revisão bibliográfica que traz os principais conceitos pertinentes ao atual trabalho, além de um breve levantamento a respeito da automação na indústria de petróleo e como ela está relacionada à pesquisa atual;
- Capítulo III: descreve os materiais e a metodologia aplicados ao trabalho;
- Capítulo IV: traz os resultados obtidos e a discussão dos comportamentos observados;
- Capítulo V: apresenta uma conclusão baseada no que foi proposto e no aquilo que foi de fato alcançado.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

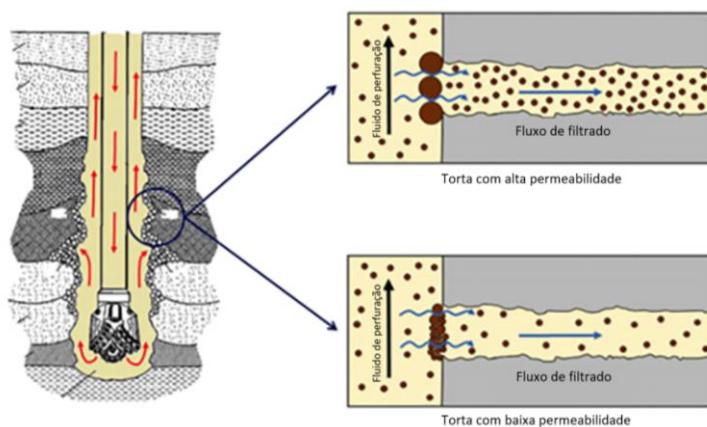
2.1 PERFURAÇÃO

A perfuração convencional teve início por volta de 1900 graças ao uso de três tecnologias combinadas: os motores capazes de realizar o movimento de rotação, as brocas e os fluidos de perfuração (MALLOY *et al.*, 2009). A mesma, por sua vez, consiste na abrasão da formação rochosa através do giro da broca sobre a qual pesa a coluna de perfuração, sendo esse processo auxiliado pela presença do fluido que tem como função carrear os cascalhos, lubrificar e resfriar a broca, diminuir sua temperatura, entre outras funções (BORGES, 2019). Ainda segundo Malloy *et al.* (2009) o fluido é bombeado para o interior da coluna de perfuração, sendo injetado através dos orifícios presentes na cabeça da broca e retornando à superfície pela região anular.

Logo, há alguns aspectos que devem ser levados em consideração, como as pressões de operação e os fluidos de perfuração utilizados. Isto porque, de acordo com Ezeakacha e Hayatdavoudi (2017) quando é aplicado o método convencional de perfuração (*overbalance*) a pressão na região anular é maior que a pressão dos poros da formação e menor que a pressão de fratura, o que faz com que o fluido invada a rocha reservatório gerando uma torta de filtração.

A Figura 1 diz respeito a um esquema que procura ilustrar as operações descritas nos parágrafos anteriores, tendo sido acrescentado ao esquema a diferença entre o volume de filtrado perdido quando a torta formada é de alta permeabilidade (maior volume de filtrado invadindo a rocha) e de quando a torta formada é de baixa permeabilidade (menor volume de filtrado invadindo a formação) (SABOORI *et al.*, 2019).

Figura 1. Esquema do processo de perfuração e de filtração. Adaptada de Saboori *et al.*, (2019).



De acordo com Calabrez (2013), no que se refere às pressões de trabalho em uma perfuração existem ainda dois casos, os quais são utilizados quando a janela operacional é considerada estreita, ou seja, quando a diferença entre a pressão dos poros e a pressão de fratura da rocha é pequena, sendo eles: o *nearbalance* e o *underbalance*. No primeiro caso, as pressões de perfuração e dos poros são próximas, enquanto no segundo caso a pressão de perfuração é inferior à pressão dos poros da formação, possibilitando a ocorrência de *kicks* durante o processo (BARBOSA, 2016).

2.2 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e, algumas vezes, de gases. Podem assumir a forma de suspensões, emulsões ou dispersões coloidais, devendo apresentar algumas características intrínsecas, tais como: ser quimicamente estável, manter os sólidos em suspensão quando em repouso, possuir um baixo grau de corrosão, aceitar qualquer tratamento, seja ele químico ou físico, ser bombeável, entre outras (THOMAS, 2004).

Condizente com Saboori *et al.* (2019), entre os diversos aspectos que devem ser levados em consideração durante uma perfuração, a formulação de um fluido capaz de cumprir todas suas funções com supremacia é de fundamental importância, uma vez que entre elas estão funções como: o resfriamento e a lubrificação da broca, o carreamento de cascalhos para superfície, a manutenção da pressão hidrostática, a formação de um reboco que auxilia na sustentação do poço, o fornecimento de informações sobre as formações geológicas que estão sendo perfuradas, entre outras.

De acordo com Cheraghian *et al.* (2018), em termos de propriedades de lubricidade, os fluidos base óleo são a primeira escolha por apresentarem excelente desempenho, além de auxiliarem na estabilização do poço, no controle da perda de circulação, de produzirem rebocos de qualidade e de, ainda, suportarem altas temperaturas sem que a reologia seja alterada expressivamente. Em contrapartida, ainda segundo o mesmo autor, como desvantagens eles possuem alto custo, podem causar problemas de saúde e de segurança, representam um risco ao meio ambiente e são de difícil descarte.

Segundo Fink (2015), de uma maneira geral, os fluidos base óleo utilizam um hidrocarboneto como componente líquido principal, juntamente com argilas, emulsificantes e polímeros para que se ajuste a viscosidade, além de componentes de ponderação importantes para que se mantenha a pressão hidrostática dentro do poço. Eles podem conter água contando

que não seja em uma quantidade superior a 50% em volume e caso a quantidade seja superior a 5% de água, denomina-se então como emulsão invertida, ou seja, emulsão de água em óleo.

Apesar das limitações, quando se trata de operações com altas temperaturas e altas pressões esse tipo de fluido costumava ser o mais indicado, por razões como: possuir um baixo coeficiente de fricção, uma maior estabilidade térmica e do poço (BLAND *et al.*, 2006; CARBAJAL *et al.*, 2009; TAUGBOL *et al.*, 2005). Entretanto, percebe-se que ao longo dos anos houve um movimento da indústria de perfuração para se desenvolver cada vez mais os fluidos base água, para que eles apresentassem o mesmo desempenho dos fluidos base óleo (FERNANDEZ e YOUNG, 2011; LIU *et al.*, 2019).

Essa busca por fluidos de perfuração base água em detrimento dos fluidos base óleo se deve ao fato dos primeiros serem menos prejudiciais ao meio ambiente. Apesar de haver uma preocupação em se manter a mesma performance dos fluidos base óleo procura-se fazê-lo com o uso de fluidos considerados mais ecológicos (AL-HAMEEDI *et al.*, 2019), que ao mesmo tempo devem manter o desempenho quando comparados aos fluidos base óleo.

Segundo Muhayyidin *et al.* (2019), os fluidos base água normalmente são compostos por viscosificantes, agentes de controle de pH, agentes de ponderação, lubrificantes, emulsificantes, sais, inibidores de corrosão e agentes de controle de perda de fluidos, além de conceitualmente possuírem pelo menos 50% de água em sua composição, podendo também conter óleo desde que a quantidade deste componente não exceda a quantidade de água presente no fluido. Tais aditivos são utilizados para manter ou fortalecer as propriedades reológicas e de filtração, como a densidade, o pH, a viscosidade plástica, o ponto de escoamento, a força gel, o volume de filtrado e a espessura da torta formada (DHIMAN, 2012).

Por fim, existem os fluidos pneumáticos, que são mais utilizados em operações *onshore* por adicionarem uma maior dificuldade no controle da pressão quando utilizados em ambientes marinhos, são mais indicados em formações frágeis ou debilitadas e se apresentam em quatro formas distintas que varia de acordo com o tipo de rocha no qual será aplicado: névoa, espuma, espuma estabilizada e ar/gás seco (GONÇALVES, 2018).

2.2.1 Propriedades do fluido de perfuração

Os fluidos de perfuração possuem propriedades físicas e químicas, que podem ser manipuladas em busca de uma eficiência máxima, sendo chamadas de propriedades de controle. Suas principais representantes medidas em laboratório são: densidade, viscosidade e teor de sólidos, como propriedades físicas e o pH, a alcalinidade e os teores de cloreto e de bentonita,

como propriedades químicas (THOMAS, 2004). A seguir estão apresentadas algumas informações relevantes para este estudo.

▪ Densidade

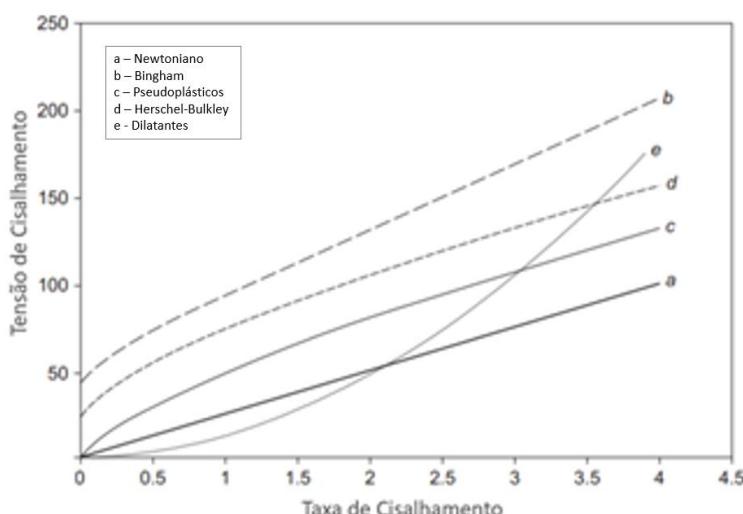
Trata-se de uma propriedade extremamente relevante, pois a pressão hidrostática de um poço é função apenas dela e do peso da coluna de perfuração, sendo independente da geometria da coluna (MOUCHET e MITCHELL, 1989). Por esse motivo é tão importante manter a densidade dentro da faixa de operação, que é determinada pela pressão de poro e de fratura da formação que está sendo perfurada. Geralmente quando se deseja aumentar a densidade de um fluido de perfuração é adicionada baritina (BaSO_4) ao fluido e caso seja um fluido base água, dilui-se o mesmo quando o objetivo é diminuir a densidade (THOMAS, 2004).

▪ Viscosidade

Para se aumentar a viscosidade de um fluido de perfuração é comum a adição de bentonita e/ou de polímeros viscosificantes, como a goma xantana (GX) e a carboximetilcelulose (CMC). Em contrapartida, para diminuir a viscosidade comumente se indica a diluição, no entanto salienta-se que a quantidade necessária de líquido pode afetar as outras propriedades do fluido, sendo indicados então diluentes ou dispersantes, como lignossulfonatos e polifosfatos (AZAR e SAMUEL, 2007).

Segundo Guo e Liu (2011), os fluidos de perfuração são classificados em diferentes categorias de acordo com o comportamento reológico que possuem. Na Figura 2, a seguir, estão demonstradas as cinco categorias mais encontradas na indústria atualmente.

Figura 2. Diferentes tipos de fluidos de perfuração de acordo com o comportamento reológico. Adaptada de Guo e Liu (2011).



Na curva “a”, tem-se a representação do comportamento dos fluidos newtonianos, nos quais a tensão de cisalhamento é proporcional à taxa de cisalhamento aplicada. Tais fluidos são comumente encontrados na natureza, tendo como exemplos a água e o óleo. A curva “b”, por sua vez, apesar de também apresentar uma relação linear entre taxa e tensão de cisalhamento ao longo da curva, em regiões de baixas taxas há a existência da chamada força gel que implica na necessidade de uma tensão de cisalhamento inicial para que se inicie o escoamento, comportamento característico dos chamados fluidos de Bingham.

As curvas “c” e “d” descrevem fluidos de comportamento não linear, neles a viscosidade do fluido diminui à medida que há um aumento da taxa de cisalhamento, sendo chamados de fluidos pseudoplásticos, aqueles encontrados na curva “c” e de fluidos Herschel-Bulkley os presentes na curva “d”, na qual assim como nos fluidos de Bingham, também é necessária uma tensão inicial para que o fluido comece a escoar. Por fim, tem-se a curva “e” que apresenta os fluidos nos quais a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento, sendo conhecidos como fluidos dilatantes.

▪ Teor de sólidos

Segundo Amorim *et al.* (2005), o acompanhamento rigoroso deste parâmetro é prática comum nos campos de perfuração, uma vez que ele influencia nos demais parâmetros do fluido de forma a aumentar todos eles, além de poder ocasionar problemas de manutenção com o desgaste dos equipamentos de circulação, o aprisionamento da coluna, a redução da taxa de filtração, fratura das formações rochosas, entre outros problemas.

Há duas maneiras de se controlar essa variável, de forma preventiva ou de forma corretiva. Na primeira, busca-se evitar a dispersão dos sólidos, seja química ou fisicamente e, no segundo, pode-se fazer o uso de equipamentos extratores de sólidos, como hidrociclones e centrifugadores (THOMAS, 2004).

2.3 A FILTRAÇÃO

A complexidade das operações de perfuração vem aumentando ao longo dos anos com a necessidade da abertura de poços em regiões cada vez mais profundas na modalidade *offshore*, janelas operacionais estreitas e problemas de perdas de circulação e de zonas de areia, fazendo com que o perfeito entendimento do fenômeno da filtração durante esse processo seja essencial para seu sucesso (SALEHI *et al.*, 2016).

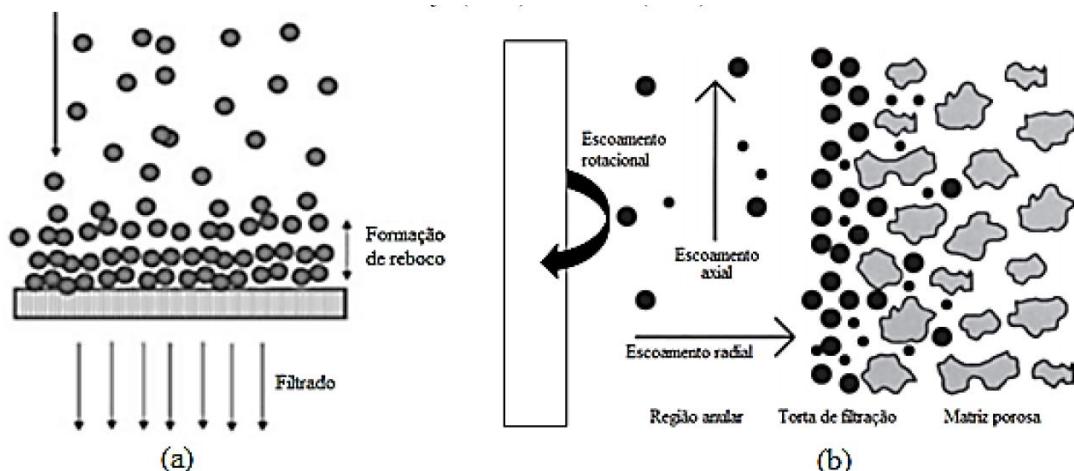
A filtração ocorre durante a perfuração *overbalance*, na qual a pressão da coluna hidrostática é mantida superior à pressão dos poros da rocha fazendo com que fluido invada a

formação rochosa promovendo a filtração do fluido de perfuração na parede do poço e, consequentemente, o aparecimento de uma torta de filtração, através da qual espera-se que após alguns segundos atravesse apenas o fluido base em baixa quantidade. Em contrapartida, de acordo com o mesmo autor, se é formada uma torta com alta permeabilidade, tem-se como resultado uma torta com grande espessura a qual pode provocar problemas operacionais, tais como: o aprisionamento da coluna, a necessidade de um torque excessivo para a rotação da broca, entre outros (DARLEY e GRAY, 1988).

O processo de filtração citado acima ocorre nas seguintes etapas: em um primeiro momento há o chamado “*spurt-loss*” que se trata da invasão do fluido de perfuração na rocha recentemente exposta e ocorre durante poucos segundos, seguido da deposição das partículas sólidas do fluido umas sobre as outras ocasionada pelo *overbalance*, dando origem à torta de filtração, para que só então ocorra a filtração através do reboco também recém-formado (EZEAKACHA *et al.*, 2017).

Sabe-se que há dois tipos de filtração ao decorrer da abertura de um poço de petróleo: a filtração estática que ocorre principalmente quando a broca não está sendo rotacionada, onde o fluido escoa através da rocha na direção radial formando um reboco que cresce com o passar do tempo e a filtração dinâmica que ocorre durante a rotação da coluna e se caracteriza pelo deslocamento axial do fluido em direção à superfície e forma uma torta que é constantemente construída e erodida pela movimentação do fluido (BALAVI e BOLUK, 2018). A Figura 3 exemplifica ambos os processos.

Figura 3. Esquema exemplificando a filtração estática (a) e a filtração dinâmica (b). Adaptado de Borges (2019).



2.3.1 Equacionamento

A formulação a respeito do fenômeno da filtração possui abordagens diferentes na literatura, alguns modelos têm como premissa o comportamento Newtoniano do fluido-base para serem utilizados, enquanto outros modelos procuram formular a filtração de fluidos não-newtonianos.

Como o presente trabalho tem como objetivo além da validação da célula on line proposta, a utilização do aparato para a estimativa de parâmetros da filtração será apresentada a Teoria Simplificada da Filtração que é utilizada para fluidos newtonianos e a teoria proposta por Castro (1981) como uma proposta para filtração de fluidos não newtonianos.

2.3.1.1 Teoria Simplificada da Filtração

A seguir é apresentada a Teoria Simplificada da Filtração desenvolvida por TILLER, (1953, 1955), a qual tem como ponto de partida as equações da Continuidade e do Movimento tanto para a fase fluida, quanto para a fase sólida, descritas nas abaixo:

Fase fluida

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_f \rho_f) + \nabla \cdot [\varepsilon_f \rho_f \tilde{v}_f] = 0 \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_f \rho_f \left[\frac{\partial \tilde{v}_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{v}_f \tilde{v}_f) \right] = -\nabla P_f + \nabla \cdot \bar{\tau} - \tilde{m} + \rho_f \tilde{g} \quad (2.2)$$

Fase sólida

$$\frac{\partial}{\partial t}[\varepsilon_s \rho_s] + \nabla \cdot [\varepsilon_s \rho_s \tilde{v}_s] = 0 \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_s \rho_s \left[\frac{\partial \tilde{v}_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{v}_s \tilde{v}_s) \right] = -\nabla P_s + \tilde{m} - \varepsilon_s (\rho_s - \rho_f) \tilde{g} \quad (2.4)$$

Onde ε_f é a concentração volumétrica da fase fluida, ε_s a concentração volumétrica da fase sólida, ρ_f a massa específica da fase fluida, ρ_s massa específica da fase sólida, \tilde{v}_f velocidade da fase fluida, \tilde{v}_s velocidade da fase sólida, P_f pressão do fluido, P_s pressão nos sólidos, $\bar{\tau}$ tensão extra, \tilde{m} força resistiva de interação entre sólido-fluido e g a aceleração da gravidade.

Abaixo estão listadas as simplificações necessárias para dar continuidade ao equacionamento:

- Escoamento unidirecional, z (Equação da continuidade e do movimento);
- Propriedades físicas constantes (Equação da continuidade e do movimento);

- Os termos de aceleração local e convectiva (Equação do movimento) podem ser negligenciados;
- Os termos associados ao campo gravitacional (Equação do movimento) podem ser desprezados;
- A tensão de sólidos é dada somente pela pressão nos sólidos.

A partir de tais simplificações das equações (2.1) e (2.3), respectivamente, obtém-se:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial q_f}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} - \frac{\partial q_s}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

Da equação (2.2), tem-se:

$$\frac{dP_f}{dz} = m_z \quad (2.7)$$

Sabendo que a soma da pressão no fluido e da pressão nos sólidos está descrita abaixo:

$$\frac{dP_f}{dz} + \frac{dP_s}{dz} = 0 \quad (2.8)$$

E ainda, sabe-se que:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = 0 \quad (2.9)$$

Tem-se que:

$$\frac{\partial q_f}{\partial z} + \frac{\partial q_s}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = -m_z \quad (2.11)$$

As equações abaixo trazem a velocidade superficial do fluido para fase fluida (q_f) e para fase sólida (q_s), respectivamente, além das pressões no fluido e nos sólidos.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{dq_f}{dz} \quad (2.12)$$

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = -\frac{dq_s}{dz} \quad (2.13)$$

$$\frac{dP_f}{dz} = -\frac{dP_s}{dz} = m \quad (2.14)$$

Para descrever a força resistiva foi utilizada a equação constitutiva descrita matematicamente pela primeira vez por Darcy (DARCY, 1856), que descreve o escoamento lento de um fluido newtoniano através de um meio poroso, supondo permeabilidade constante. Nela k é a permeabilidade do meio poroso, μ a viscosidade do fluido, enquanto \tilde{q} trata-se da velocidade superficial que percola o meio poroso.

$$\tilde{m} = \frac{\mu}{k} \tilde{q} \quad (2.15)$$

Combinando-se as equações (2.7) e (2.8), tem-se:

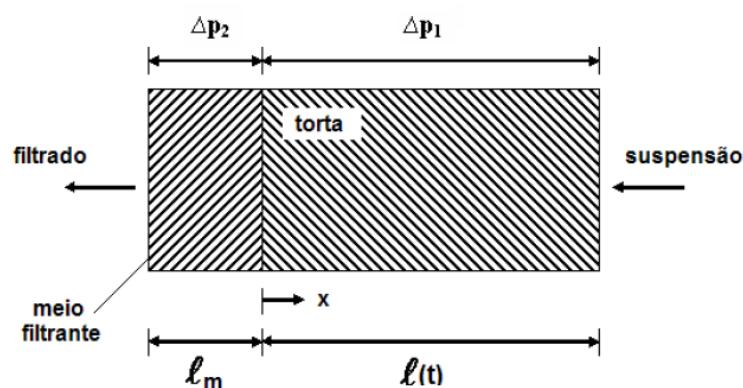
$$\frac{dP_f}{dz} = -\frac{dP_s}{dz} = \frac{\mu}{k} q_z \quad (2.16)$$

Sendo a massa infinitesimal de sólidos (dm) contidos em uma fatia da torta de espessura dz (Figura 4) e a resistividade local da torta (α) descritas, respectivamente, por:

$$dm = (1 - \varepsilon) \rho_s A dz \quad (2.17)$$

$$\alpha = \frac{1}{k(1 - \varepsilon) \rho_s} \quad (2.18)$$

Figura 4. Esquema de filtração plana. Adaptado de Araújo (2010).



Ao se substituir as equações (2.17) e (2.18) na equação (2.16), obtém-se:

$$-dP = \frac{\mu}{A} q_f \alpha dm \quad (2.19)$$

E após a integração da equação (2.19), tem-se a equação (2.20), onde C é concentração que é dada pela massa de sólidos por massa de líquido e V o volume de filtrado:

$$\Delta P_1 = \frac{\bar{\alpha}\mu}{A} q_f \rho_f C V \quad (2.20)$$

Utiliza-se então uma aproximação para descrever a resistividade média da torta, pois a permeabilidade e a porosidade variam ao longo da torta.

$$\bar{\alpha} = \frac{p(l, t) - p(0, t)}{\int_0^{p(l,t)-p(0,t)} \frac{dp_s}{\alpha}} \quad (2.21)$$

A forma integrada da equação do movimento aplicada ao escoamento no meio filtrante é dada pela equação (2.15), onde Rm é a resistividade do meio filtrante, fornece:

$$\Delta P_2 = \mu R_m q_f \quad (2.22)$$

Somando-se as equações (2.14) e (2.15), obtém-se a variação de pressão ao longo da torta e do meio filtrante:

$$\Delta P = \mu \left[\frac{\bar{\alpha}}{A} \rho_f C V + R_m \right] \left(\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \right) \quad (2.23)$$

Após a integração da equação anterior, obtém-se a equação para Teoria Simplificada da Filtração:

$$V = \frac{1}{a} [2at + b^2]^2 - \frac{b}{a} \quad (2.24)$$

Onde:

$$a = \frac{\bar{\alpha}\mu}{\Delta P A^2} \rho_f C \quad (2.25)$$

$$b = \frac{\mu}{\Delta P A} R_m \quad (2.26)$$

Esta teoria apresenta algumas limitações de uso, mas a principal delas é a necessidade de se considerar o caráter Newtoniano para o fluido que percola a torta de filtração. Por esse motivo será descrito a seguir o equacionamento do modelo de Castro (1981) que leva em consideração o comportamento de fluidos não-Newtonianos em filtrações estáticas.

Neste caso, o início do equacionamento é o mesmo já descrito para a Teoria Simplificada da Filtração, levando em consideração as equações da Continuidade e do Movimento para as fases fluida e sólida, assim como as simplificações já adotadas. O ponto de mudança se dá na expressão para a força resistiva, uma vez que ao invés de considerar o

escoamento Darciano como na teoria simplificada, Castro (1981) fez uso da equação proposta por Silva Telles e Massarani (1978) que possibilita a descrição da força resistiva para fluidos não-Newtonianos (equação 2.20).

$$m = \frac{\tau(\dot{\gamma})}{\sqrt{k}q_f} \Omega \left[1 + \frac{c\rho_f q^2}{\Omega\tau(\dot{\gamma})} + \frac{c_1 N_1(\dot{\gamma})}{\tau(\dot{\gamma})} + \frac{c_2 N_2(\dot{\gamma})}{\tau(\dot{\gamma})} \right] q_f \quad (2.27)$$

Onde:

τ : tensão cisalhante

$\dot{\gamma}$: taxa de cisalhamento característica

k : permeabilidade do meio poroso

c : Constante da Equação de *Forchheimer*

Ω , c_1 e c_2 : fatores geométricos

N_1 e N_2 : tensões normais

Analizando a equação anterior, podem-se relacionar os termos entre colchetes com os números adimensionais de Reynolds e de Deborah. Isso permite que a equação de Silva Telles e Massarani contemple tanto os efeitos iniciais do escoamento (Reynolds) quanto aqueles referentes às tensões normais (Deborah).

$$Re = \frac{c\rho_f \|q\|^2}{\Omega \tau(\dot{\gamma})} \quad (2.28)$$

$$De_i = \frac{c_i N_i(\dot{\gamma})}{\tau(\dot{\gamma})} = \frac{c_i \Psi_i(\dot{\gamma}) \dot{\gamma}}{\eta(\dot{\gamma})}, \quad i = 1,2 \quad (2.29)$$

Como, segundo Bird *et al.* (2002), para líquidos poliméricos, os coeficientes de tensão normal, Ψ_i , podem ter uma diminuição na ordem de 10^7 na faixa usual de taxas de cisalhamento, pode-se considerar que De_i assuma valores diminutos e/ou próximos de zero. Adicionalmente, considera-se o escoamento lento através do meio poroso, com $Re \leq 1$. A partir dessas considerações, a equação 2.20 torna-se:

$$\tilde{m} = \frac{\tau(\dot{\gamma})\Omega}{\sqrt{k}} \quad (2.30)$$

Castro (1981) fez uso do modelo Power Law para ajustar os dados experimentais de tensão e taxa cisalhante, modelo no qual K trata-se do índice de consistência e n do índice de comportamento.

$$\tau(\gamma) = K(\dot{\gamma})^n \quad (2.31)$$

Combinando-se então as equações (2.7), (2.23) e (2.24), tem-se:

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{dP_s}{dz} = \frac{K(\dot{\gamma})^n \Omega}{\sqrt{k}} \quad (2.32)$$

Retomando a resistividade local da torta (equação 2.11) e a massa infinitesimal de sólidos contidos em uma fatia da torta de espessura dz (equação 2.10) e fazendo uso da taxa de cisalhamento característica para escoamento de fluidos em meios descrita abaixo (equação 2.33) e substituindo-se na equação 2.34, tem-se:

$$\dot{\gamma} = \frac{\|\tilde{q}\|}{\Omega k^{\frac{1}{2}}} \quad (2.33)$$

$$dP = \frac{K}{A} q^n \Omega^{1-n} \alpha^{\frac{n+1}{2}} [\varepsilon_s \rho_s]^{\frac{n-1}{2}} dm \quad (2.34)$$

Novamente é necessário fazer uso de uma aproximação para descrever a resistividade média da torta, como na equação (2.13) e então a integração da equação (2.35) fornece:

$$\Delta P_1 = \bar{\gamma} \frac{K}{A} q^n \rho_s^{\frac{n-1}{2}} \rho_f C V \quad (2.35)$$

Enquanto a forma integrada da equação do movimento aplicada ao escoamento do filtrado no meio filtrante é dada abaixo, onde k_m trata-se da permeabilidade do meio filtrante e R_m da resistência do meio filtrante.

$$\Delta P_2 = \Omega_m^{1-n} K R_m k_m^{\frac{1-n}{2}} q^n \quad (2.36)$$

A soma das equações (2.35) e (2.36) resulta na equação (2.37), que após integração fornece a equação (2.38):

$$\Delta P = K \left[\frac{\bar{\gamma}}{A} \rho_f \rho_s^{\frac{n-1}{2}} C V + \Omega_m^{1-n} k_m^{\frac{1-n}{2}} R_m \right] \left(\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \right)^n \quad (2.37)$$

$$V = \frac{1}{a} \left[\left(\frac{n+1}{n} \right) at + b^{\frac{n+1}{n}} \right]^{\frac{(n+1)}{n}} - \frac{b}{a} \quad (2.38)$$

Onde:

$$a = \frac{K \bar{\gamma}}{\Delta P A^{n+1}} \rho_f \rho_s^{\frac{n-1}{2}} C \quad (2.39)$$

$$b = \frac{K}{\Delta P A^n} R_m k_m^{\frac{1-n}{2}} \Omega^{1-n} \quad (2.40)$$

Buscando validar a célula proposta para estimação de fluidos com diferentes composições, o modelo adaptado de Castro descrito acima vai ser adotado neste trabalho.

2.3.2 Parâmetros da torta de filtração

Sabe-se que durante o processo de filtração a permeabilidade e porosidade da torta que está sendo formada variam de acordo com a deposição das partículas (CIVAN, 2007). Isso ocorre porque o fluido de perfuração é composto por uma gama diversificada de partículas sólidas com diferentes tamanhos e espera-se que a deposição das mesmas ocorra de modo que o meio filtrante retenha primeiro as maiores partículas, que passam então a reter as partículas de tamanhos menores (JIAO e SHARMA, 1994).

Além disso, pode ocorrer a deposição de partículas sólidas minúsculas que podem penetrar no meio filtrante e alterar a permeabilidade do mesmo, fazendo com que ela diminua (RABBANI *et al.*, 2015). Soma-se a isso o efeito que o escoamento do fluido tem sobre essas partículas, fazendo com que a torta fique mais compactada devido à força de arraste que o fluido promove ao atravessar a torta (TIEN *et al.*, 1997). Logo, as partículas vão se depositando gradualmente sobre a camada mais externa do reboco, fazendo-o crescer até que a permeabilidade do meio poroso tenda a zero interrompendo o fluxo de fluido (CHENEVERT e DEWAN, 2001).

A porosidade pode ser definida como a fração do volume total de uma amostra ocupada por poros ou espaços vazios (ABDOU, 1999). Em relação à porosidade existem dois métodos de se determiná-la, um deles é denominado Método Indireto, o qual é feito através da aplicação de equações clássicas presentes na literatura e que levam em consideração a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido e o outro, denominado Método Direto, realizado através da utilização de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) ou em um Microscópio Óptico (MO) (NUNES, 2011).

De acordo com Shirato *et al.* (1997), Tiller, Hsyung and Cong (1995), Hall *et al.* (2001) e Sedin, Johansson and Theliander (2003), o método indireto mais difundido para se medir a porosidade da torta de filtração sem fazer o uso de métodos complicados e dispendiosos financeiramente é pesar a torta de filtração molhada, ou seja, logo após se finalizar a filtração e, posteriormente, pesá-la novamente após a mesma estar totalmente seca.

Além dessas medidas, a espessura da torta é outro parâmetro importante na avaliação da filtração e é mensurada fazendo-se o uso de um método direto, com a utilização de um

paquímetro ou por um método indireto, utilizando-se um balanço de massa o qual leva em consideração o peso da torta molhada, a porosidade de referência da torta, a densidade do material particulado e a área de filtração utilizada, demonstrado anteriormente (BARBOSA, 2016).

Outro parâmetro das tortas de filtração que deve ser levada em consideração é a compressibilidade, uma vez que diversos autores verificaram a compressão das tortas durante a filtração (AGUIAR; COURY, 1996; CHOI et al., 2004; ENDO et al., 1998). A compressibilidade e a porosidade estão diretamente relacionadas, uma vez que a compressão promove a compactação da torta, diminuindo sua porosidade e fazendo com que haja um aumento da queda de pressão através da torta (KIM et al., 2008).

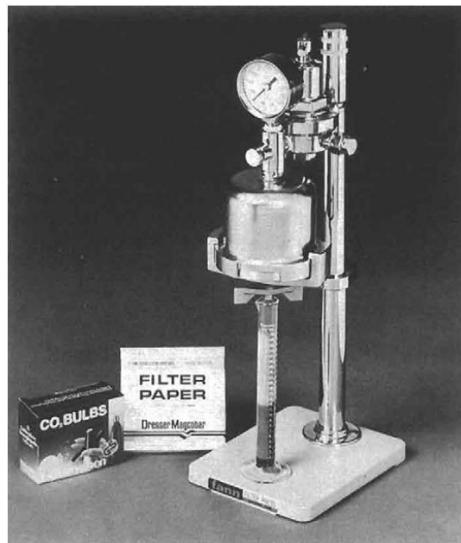
2.4 CÉLULAS DE FILTRAÇÃO

A maioria dos trabalhos presentes na literatura possui como foco o estudo do fenômeno da filtração e as condições que podem afetá-lo. Entretanto, o presente trabalho tem como foco o equipamento onde a filtração é realizada, visto que propõem a automação de uma celula de filtração compacta e robusta projetada e desenvolvida no Laboratório de Escoamento de Fluidos - Giulio Massarani (LEF) capaz de realizar filtrações de maneira automatizada. Deste modo a revisão será focada em artigos que tratam do equipamento de filtração, além disso será abordada a expertise do LEF neste assunto, uma vez que este trabalho é uma sequência da linha de pesquisa. Por fim serão abordados alguns trabalhos de automação na indústria do petróleo para que os temas Filtração e Automação estejam cobertos pela revisão.

As células de filtração são equipamentos que foram desenvolvidos com o intuito de se estudar o fenômeno de filtração nas mais diversas áreas. No caso da indústria de petróleo, busca-se simular as condições existentes no poço, diminuindo deste modo eventuais problemas e aumentando a produtividade da perfuração (VAUSSARD et al., 1986).

Segundo Darley e Gray (1988), esse tipo de aparato foi mencionado pela primeira vez no trabalho de Jones (1937) que o descrevia como uma câmara na qual o fluido era pressurizado contra o meio filtrante pela utilização de ar, fazendo com que se formasse uma torta e houvesse também a formação de um filtrado com o fluido base utilizado. Na Figura 5 é apresentada a célula de baixa pressão da *Fann Dresser*, Modelo 12B, que foi utilizada como referência para criação de células de filtração posteriormente.

Figura 5. Célula comercial de baixa pressão da Fann Dresser. Adaptada de Darley e Gray (1988).



Na célula ilustrada na imagem acima é possível realizar o teste API, denominado desta maneira por seguir as normas da *American Petroleum Institute*, caracterizado por ser realizado durante 30 minutos, com a utilização de papel de filtro, pressão de trabalho de 100 psi e em temperatura ambiente. No entanto quando há a necessidade de se trabalhar em situações mais extremas para que as condições existentes no poço sejam simuladas, são utilizadas as células *HTHP* (*High Temperature and High Pressure*). A pressão de trabalho utilizada passa então a ser a diferencial no valor de 500 psi e a temperatura um valor entre 135 °C e 163 °C (IADC, 2000).

Os dois testes mencionados acima são realizados nos campos e laboratórios da empresa brasileira Petrobras, sendo descritos na norma internacional API 13B-1 (*Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids*), a qual traz recomendações práticas de como os testes utilizando fluidos base água devem ser realizados. Tais recomendações serão utilizadas como base para a realização de testes no presente trabalho.

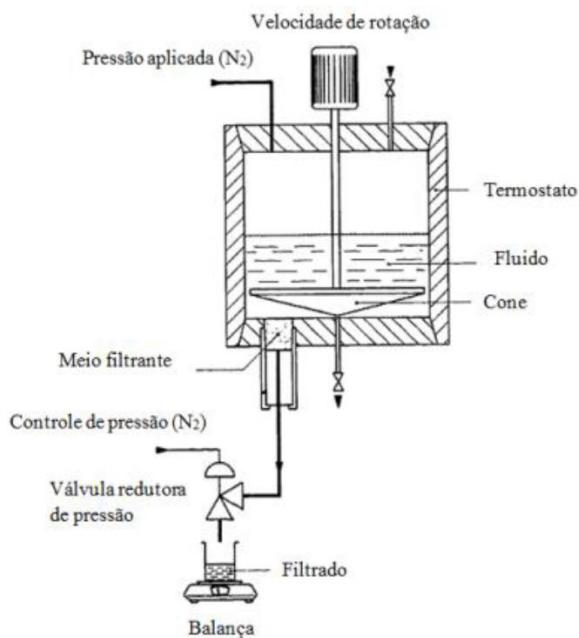
Vaussard *et al.* (1986) foram responsáveis por realizar testes comparativos entre a filtração dinâmica e a filtração estática, para isso utilizaram um filtro prensa dinâmico, em condições de *HTHP*, esquematizado na Figura 6 . O qual era composto por uma câmara em formato cilíndrico na qual o fluido era inserido, sendo a filtração dinâmica simulada por meio da ação rotativa de um conjunto cone-placa posicionado no eixo central da câmara e ligado a um controlador manual da velocidade de rotação.

A pressurização do sistema, por sua vez, era feita através da injeção de gás nitrogênio e controlada pela utilização de uma válvula redutora de pressão, o meio filtrante era posicionado

na parte inferior da célula e uma balança era utilizada para que se pudesse obter os dados do volume de filtrado por tempo. A partir de seus experimentos, os autores puderam concluir que:

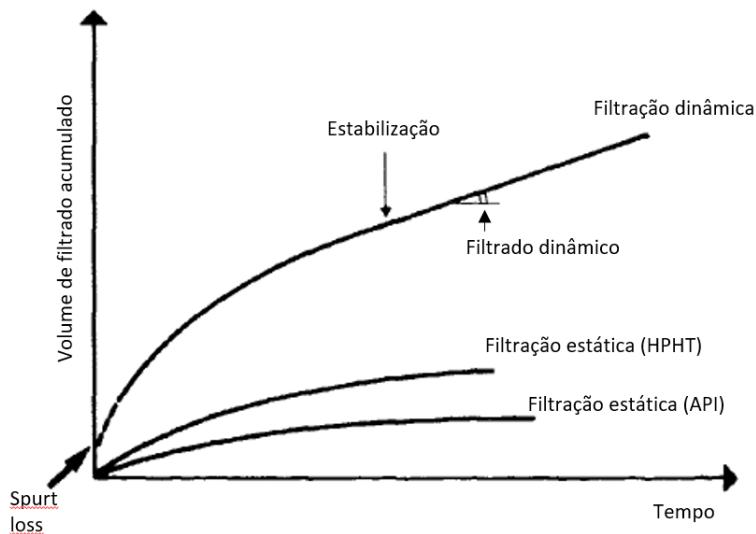
- Não houve correlação entre os dois tipos de filtração ao se simular as condições de poço, embora os valores de filtrado tendessem para a mesma direção;
- A formação da torta durante a filtração dinâmica e a própria filtração dependem de dois fenômenos antagonistas: deposição de partículas e erosão da estrutura formada pela taxa de cisalhamento imposta pela rotação da broca.

Figura 6. Esquema do filtro prensa dinâmico. Adaptado de Vaussard *et al.*, (1986).



Ainda sobre os resultados encontrados por Vaussard *et al.* (1986), na Figura 7 pode ser observado um resultado entre a comparação dos volumes de filtrado encontrados utilizando os diferentes tipos de filtração por eles testados. A partir de sua análise, nota-se que a filtração estática produz um menor volume de filtrado, tanto em condições normais, quanto em condições de *HTHP* quando comparada ao volume de filtrado produzido na filtração dinâmica. Além disso, de acordo com os autores a estabilização do volume de filtrado na filtração dinâmica ocorre apenas após pelo menos de quatro a seis horas de filtração.

Figura 7. Volume de filtrado x Tempo. Adaptado de Vaussard *et al.*, (1986).



Dewan e Chenevert (1993) utilizaram uma célula baseada nas anteriores, mas que sofreu otimizações, como por exemplo a utilização de água para se fazer a pressurização do fluido e de uma balança digital para obtenção dos dados de volume de filtrado. Eles compararam os dados obtidos por ela com os resultados teóricos encontrados através da aplicação de uma teoria que desenvolveram para explicar o crescimento de tortas, tanto na filtração dinâmica, como na estática.

O modelo numérico desenvolvido por eles é capaz de determinar a taxa de invasão versus o tempo de qualquer sequência de operação de perfuração na qual a taxa de circulação e a janela de operação de pressão *overbalance* são alteradas periodicamente. Sendo a taxa de invasão um *input* em simuladores que buscam determinar as pressões e a distribuição dos fluidos na formação durante a invasão.

2.5 BREVE HISTÓRICO DA AUTOMAÇÃO NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Por se tratar de um trabalho que tem como objetivo a automação de um fenômeno amplamente discutido na literatura e já discutido anteriormente, nesse tópico buscou-se contextualizar o cenário da automação em um breve período histórico, além de mostrar as últimas tendências mundiais nessa área.

De acordo com Ambrus *et al.* (2015), houve um crescimento do interesse na automação da perfuração na recente década, atribuído a uma preocupação em aumentar a eficiência da construção dos poços, melhorar a segurança e atender aos requisitos de qualidade dos poços. Nesse sentido, diversos processos relacionados à perfuração foram automatizados com sucesso,

além de ter ocorrido a implementação satisfatória de tecnologias pilotos que começam a revolucionar essa área, porém trata-se de avanços ainda muito incipientes quando comparados à necessidade dessa indústria.

Segundo o mesmo autor, tal retardamento se deve a três fatores: o primeiro refere-se ao fato de cada poço possuir características próprias e a tecnologia desenvolvida para um, não servir prontamente para ser aplicada em outro. Nesse caso, o conceito de se desenvolver um algoritmo que englobe diferentes cenários cai por terra na maioria dos casos. Segundo a automação plena dos processos exige a troca e o compartilhamento de informação entre profissionais de diferentes áreas e com níveis distintos de conhecimento, o que na prática é difícil de ocorrer. Por fim, o autor enumera como dificuldade o fato da necessidade do completo entendimento de cada etapa da automação, quando geralmente os algoritmos utilizados são apresentados como blocos fechados e não fica claro como se pode agir caso a automação venha a falhar.

Apesar das dificuldades citadas, abaixo estão listados alguns trabalhos que descrevem avanços que ocorreram neste campo ao longo dos anos.

- Os autores Jansen *et al.* (1992; 1995) desenvolveram uma metodologia de controle das vibrações das colunas de perfuração por meio do controle do torque do motor e de sua velocidade.
- Santos *et al.* (2003) apresentaram o chamado Sistema de Controle de Micro-fluxo, que era capaz de detectar a formação de influxos através do monitoramento da taxa de retorno de fluxo e automaticamente manipular uma válvula choke para que as alterações fossem sanadas.
- van Riet *et al.* (2003) descreveram um sistema de Controle Dinâmico de Pressão anular, no qual por meio da abertura de uma válvula choke e do controle de uma bomba de fluxo conseguiam manter constante a pressão no fundo do poço.
- Kyllingstad e Nessjoen (2009) criaram um sistema que também controlava as vibrações das colunas de perfuração, mas apenas com a entrada de dados de velocidade. Tal sistema foi testado em campo e encontra-se disponível comercialmente.
- Vishnumolakala *et al.* (2015) criaram um simulador utilizando a linguagem gráfica do software *LabVIEW* de programação para testar a automação do controle

de pressão do poço e determinar qual a melhor metodologia de controle a ser aplicada.

- Mahmoodi *et al.* (2018) fizeram uso da ferramenta de processamento de imagens do *software LabVIEW* para observar e caracterizar de forma automatizada os mecanismos de transporte de fluido em um dispositivo microfluídico.
- Pinheiro *et al.* (2019) preocupados em diminuir os custos da perfuração criaram um sistema operacional online capaz de fornecer os parâmetros (taxa de perfuração e energia mecânica mínima) ótimos de perfuração a partir dos dados com os quais é alimentado, proporcionando economia de tempo.
- Buscando também otimizar a perfuração, Okoro *et al.* (2019) desenvolveram um algoritmo capaz de indicar o uso de um fluido para determinado cenário com uma precisão entre 95-99%, dentro de uma faixa de tamanho de diâmetro de poço e de profundidade.

Os estudos citados acima mostram que esforços estão sendo tomados para se aumentar o alcance da automação na indústria da perfuração, no entanto a seguir será dado um enfoque maior a trabalhos que tiveram como tema os fluidos de perfuração, com a previsão da perda de fluido através de técnicas de *machine* e *deep learning*, na medição em tempo real de suas propriedades reológicas com a automação de uma célula de filtração (tema do atual trabalho).

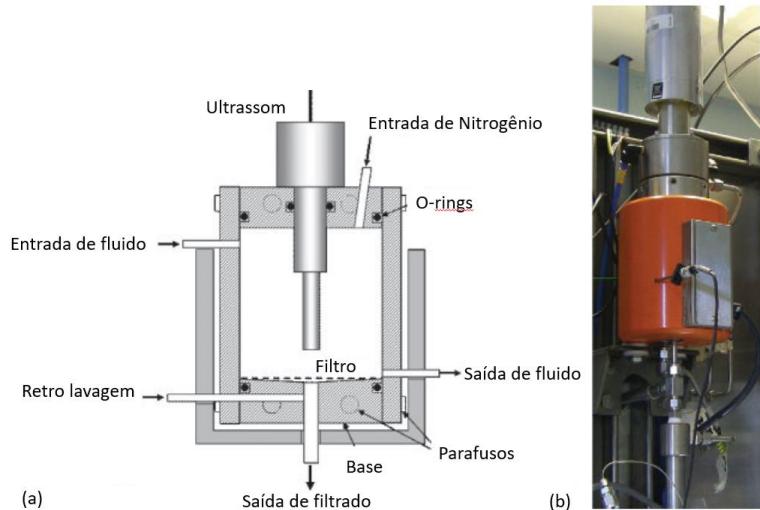
Essa abordagem tem como objetivo relatar o que de mais atual está sendo feito e apresentar um trabalho que dialoga diretamente com o atual reforçando sua importância, ao demonstrar a existência de uma certa escassez de trabalhos que relacionem diretamente o fenômeno da filtração e automação.

O primeiro trabalho a ser analisado é o de Saasen *et al.* (2009) que inovou ao montar um sistema de medição de diversas propriedades do fluido em tempo real, entre elas: viscosidade, densidade, estabilidade elétrica, concentração de sólidos, análise de conteúdo de cascalho, tamanho e caracterização de partículas, pH e volume de filtrado. Para as medições de volume de filtrado *online* os autores fizeram uso de uma célula de filtração *HPHT* automatizada (Figura 8), sob 120°C de temperatura e a 500 psi de pressão.

Após realizar a filtração, foi utilizado um sensor óptico capaz de perceber a interface entre o líquido e o recipiente para que a aquisição dos dados de volume de filtrado fosse obtida. Além disso, uma inovação em relação aos outros equipamentos de filtração, é que neste caso o meio filtrante consistia em uma superfície porosa feita de metal, possibilitando a retro lavagem

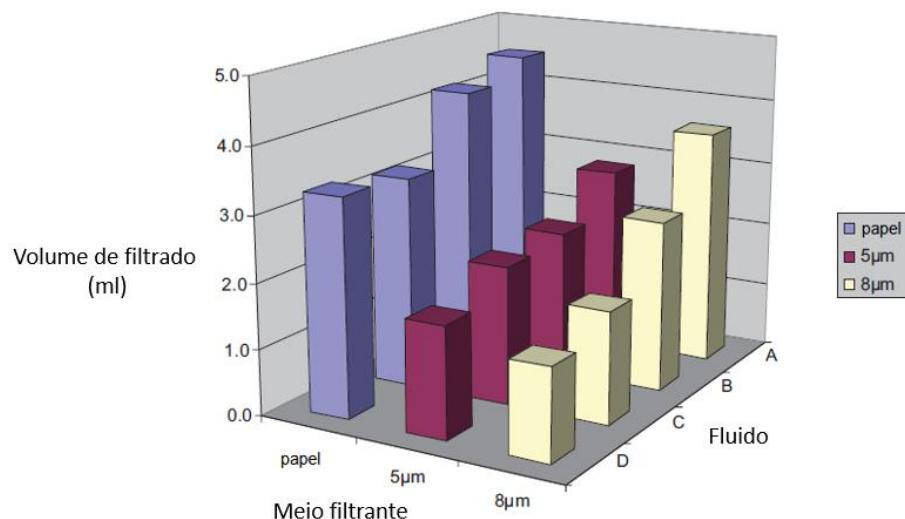
e o uso de ultrassom para levantar e dispersar a torta formada, deixando o equipamento pronto para ser utilizado novamente em outra filtração sem a necessidade de desmontar a célula.

Figura 8. (a) Esquema da célula. (b) Célula de filtração HPHT automatizada. Adaptado de Saasen *et al.* (2009).



Para validar seus resultados, os autores compararam os volumes de filtrado que obtiveram com a célula automatizada com os volumes obtidos em uma célula de bancada *HTHP* nas mesmas condições de pressão e temperatura (citadas anteriormente), esses dados estão ilustrados na Figura 9. As medidas indicadas pela legenda como “papel” correspondem aos volumes de filtrado obtidos na célula de bancada, enquanto os dois outros itens correspondem às ranhuras presentes nos meios filtrantes de metal (de 5 e 8 μm , respectivamente) utilizados na célula automatizada. De acordo com os autores tais resultados indicam boa correspondência entre os valores de volume de filtrado encontrados com as duas células.

Figura 9. Comparação da perda de filtrado de diferentes fluidos e meios filtrantes. Adaptado de Saasen *et al.* (2009).



Apesar de ser capaz de aquisitar dados de volume de filtrado em tempo real, os autores fornecem como resultados apenas o volume final de filtrado obtido após a filtração, como pode ser visto no gráfico acima, assim como apresentam uma tabela na qual estão disponíveis os volumes de filtrado final após a adição de agentes de diminuição de perda. No entanto, seria mais interessante se os autores tivessem fornecido toda a curva de filtração, plotando cada valor de volume de filtrado em relação ao tempo de filtração, fornecendo a possibilidade da obtenção de parâmetros da filtração, tornando o trabalho mais completa, sendo que o atual trabalho tem esse como um de seus objetivos.

Uma das motivações do atual trabalho é a escassez na literatura de trabalhos que relacionem diretamente os temas automação e filtração de fluidos de perfuração, tendo sido o trabalho de Barbosa (2016) um precursor nesse sentido. Por isso este trabalho tem como objetivo realizar testes de filtração API de forma on line, visando medidas rápidas e precisas das propriedades do fluido de perfuração, uma vez que atualmente essas medidas ainda são realizadas em bancada, comprovar a reprodutibilidade dos experimentos de filtração em uma célula de filtração automatizada, aquisitando dados de volume de filtração de forma *on-line*, além da utilização do equipamento para a estimação de parâmetros de filtração.

O próximo trabalho a ser relacionado é o de Gul e van Oort (2020) que se preocupou em avaliar se a automação da medição da perda de fluido durante a perfuração era de fato necessária ou se as medidas quantitativas fornecidas em campo já seriam o suficiente pra determinar a eficiência desta etapa. Para isso, eles utilizaram técnicas de *machine learning* para predizer o comportamento de fluidos base água e fluidos base óleo em relação à perda de fluido em condições *API* e de *HTHP*.

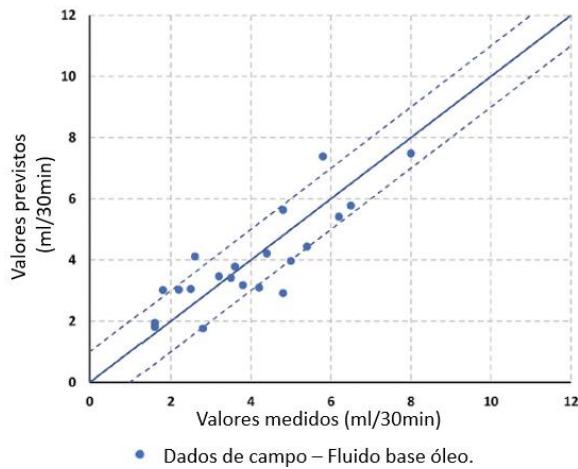
Para os fluidos base água os autores utilizaram as medidas de reologia, densidade e temperatura obtidas em tempo real por meio de sensores, enquanto para os fluidos base óleo além dessas informações também foram consideradas a estabilidade elétrica e o teor de água presente em óleo. Esses valores foram obtidos em bancos de dados de campo e foram utilizados nos diferentes modelos de regressão para a construção do algoritmo utilizado para predizer as perdas de fluido.

Segundo os autores o modelo que apresentou um melhor desempenho entre aqueles que foram aplicados foi o modelo conhecido como regressão de florestas aleatórias. Trata-se de algoritmos preditivos, geralmente utilizados em problemas de classificação ou estimação, que consiste em árvores de decisão, ou seja, há a implementação de um mecanismo de tomada de

decisão em forma de árvore que culmina em uma classificação ou em um valor estimado (BORGES *et al.*, 2016).

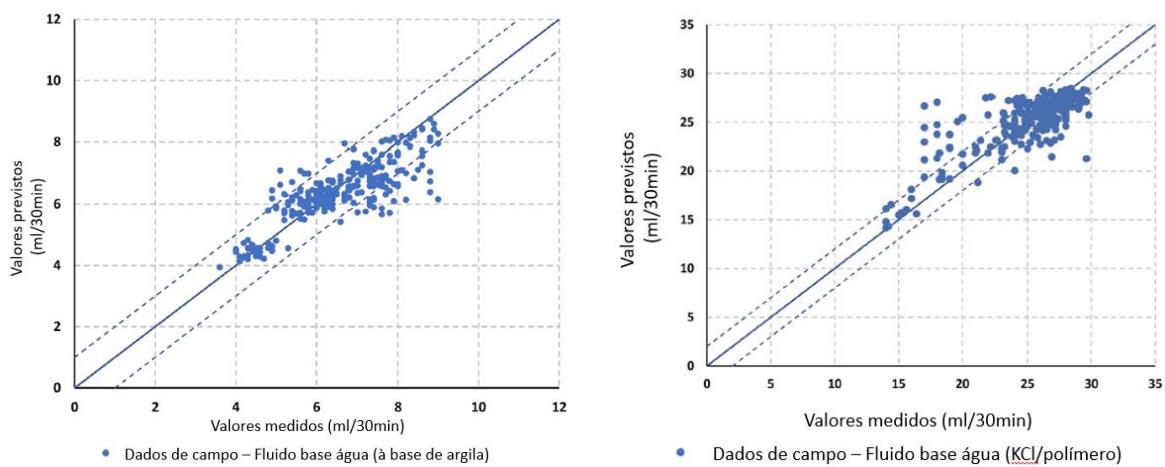
A seguir estão apresentados os gráficos que correlacionam os valores preditivos *versus* os valores medidos de perda de fluido (obtidos em campo) em relação aos diferentes tipos de fluidos testados e diferentes condições de testes. Na Figura 10 estão apresentados os dados referentes a um fluido com base óleo em condições *HTHP* de teste.

Figura 10. Regressão de floresta aleatória para fluido base óleo. Adaptado de Gul e van Oort (2020).



Enquanto na Figura 11 são apresentados os dados referentes ao fluido base água adicionado de argila e ao fluido KCl/polímero em condições de *HTHP*. De acordo com os autores, o menor erro encontrado foi para o fluido KCl/polímero em condições de alta temperatura e alta pressão, com o valor de 3,154% de média de erro, tendo 5,373% de média o fluido base água com adição de argila, enquanto o fluido base óleo apresentou a maior média de erro com o valor de 17,778%.

Figura 11. Regressão de floresta aleatória para fluido base água à base de argila e fluido base água KCl/polímero, respectivamente. Adaptado de Gul e van Oort (2020).



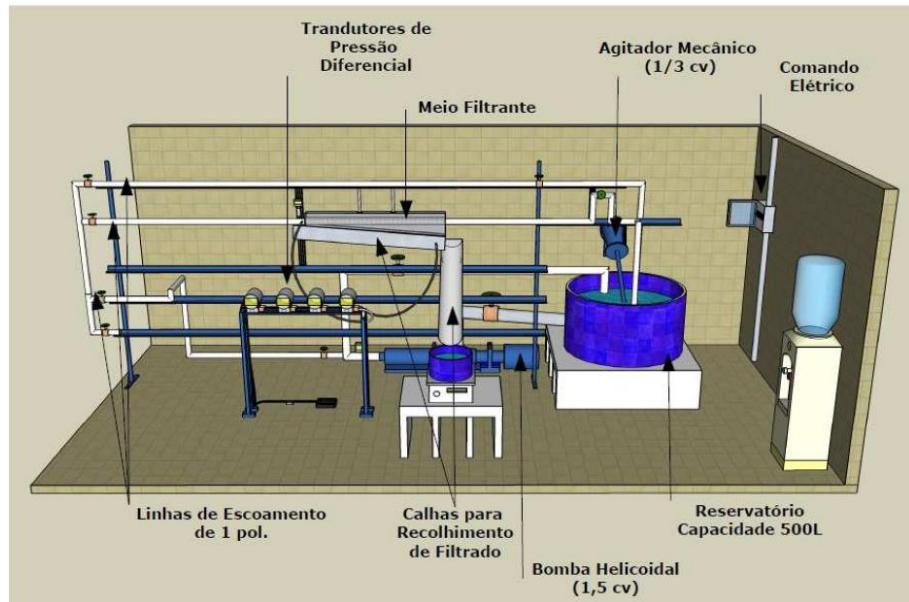
Segundo os autores é mais vantajoso aliar os dados coletados em tempo real a um algoritmo criado por meio de regressões para predizer os valores de perda de fluido do que realizar os testes de forma automatizada. No entanto com essa abordagem eles desconsideram que na realidade não há a realização de testes, ou seja, não há a medição direta e real da perda de fluido em condições de API ou *HTHP*, além de desconsiderarem a possível ocorrência de contaminações do fluido as quais invalidariam o sistema por eles criado. Ademais para a aplicação do algoritmo se faz necessária a existência de um banco de dados referentes às variáveis consideradas e tais dados variam de acordo com o poço perfurado, podendo alterar muito a média dos erros obtidos dependendo da região na qual os dados forem medidos e o algoritmo for aplicado.

2.6 TRABALHOS ANTERIORES DE FILTRAÇÃO REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE ESCOAMENTO DE FLUIDOS GIULIO MASSARANI

A seguir será feito um breve levantamento a respeito dos trabalhos relacionados à filtração e à automação no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF), da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, apresentados em ordem cronológica, a fim de enriquecer o presente trabalho, além de servir como base.

Com o objetivo de conhecer e comparar os mecanismos que controlam a filtração, Araújo (2010) avaliou as filtrações dinâmica e estática de suspensões de carbonato de cálcio fazendo uso de três unidades de filtração distintas, uma para filtração cruzada e outras duas para filtração estática: filtro folha e filtro sob pressão. Desta forma, utilizando o modelo proposto por Ferreira e Massarani (2005) determinou os parâmetros da filtração como resistividade média da torta, resistência do meio filtrante e porosidade a partir de dados de tempo de filtração e volume de filtrado obtidos. Abaixo é apresentado um esquema que ilustra a unidade de filtração cruzada (Figura 12).

Figura 12. Esquema da unidade piloto utilizada por Araújo (2010). Adaptada de Araújo (2010).



A unidade piloto para filtragem cruzada era formada por um reservatório de suspensão com capacidade de 500 litros dotado de um agitador, ao reservatório estava ligada uma bomba de deslocamento positivo, utilizada para alimentar a linha contendo o filtro e uma corrente by-pass, o filtrado e a descarga do by-pass foram direcionados ao reservatório.

O controle de pressão de filtragem de trabalho era feito pela manipulação da vazão de suspensão na corrente by-pass, por meio da abertura ou fechamento de uma válvula e da leitura de pressão em um manômetro de Bourdon instalado imediatamente antes da entrada do filtro. Já a queda de pressão foi mensurada por transdutores de pressão calibrados nas faixas de 0-36 mmHg, 0-350 mmHg e 0-1800 mmHg

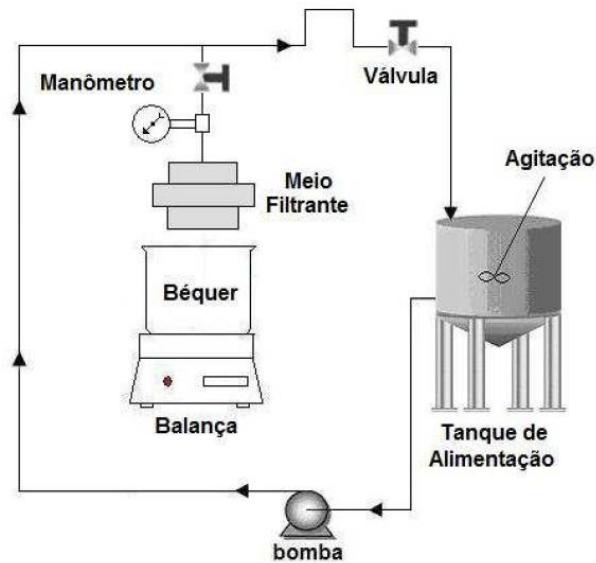
Já para os experimentos no filtro folha, foi utilizada uma unidade em bancada (Figura 13), composta de um reservatório de suspensão com 2 litros de capacidade, uma bomba de vácuo e um agitador magnético, além de um septo filtrante no qual utilizou-se um tecido de filtragem. Para quantificar o volume de filtrado de acordo com o tempo de filtragem foi utilizada uma proveta graduada de 0 a 1000 mililitros.

Figura 13. Unidade de bancada, utilizada por Araújo. Adaptado de Araújo (2010).



Por fim, Araújo (2010) também fez experimentos de filtração plana sob pressão em uma unidade experimental que foi adaptada a partir de outra unidade utilizada para filtração cruzada (Figura 14). Utilizou-se um tanque agitado, uma bomba, válvulas, um meio filtrante, um manômetro, um bêquer e uma balança.

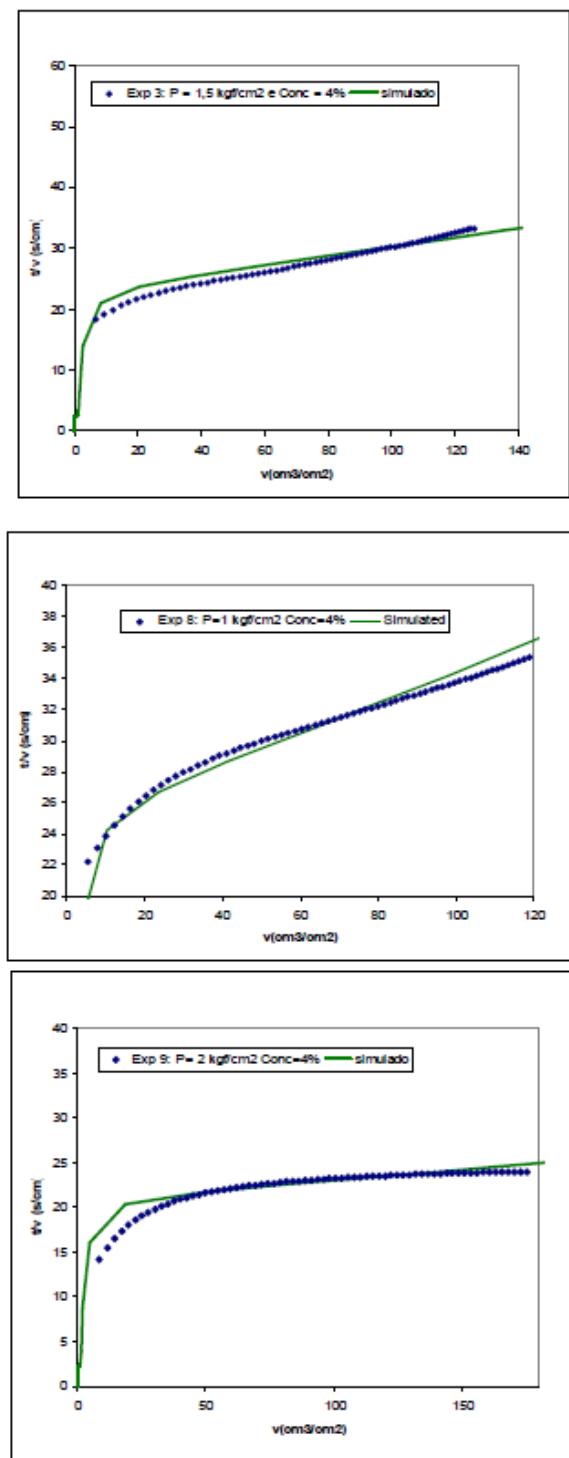
Figura 14. Unidade experimental para filtração plana. Adaptado de Araújo (2010).



Para comparar os parâmetros da filtração encontrados nas três unidades experimentais descritas acima foi utilizado o *Filter Press HTHP 175 ml* da *Fann Instruments*. A pressurização do sistema foi realizada utilizando-se o gás nitrogênio e as pressões de trabalho adotadas foram de 1, 1,5 e 2 kgf/cm², enquanto as concentrações nas suspensões de carbonato de cálcio foram

de 2, 4 e 6%. Abaixo são apresentados resultados típicos da comparação entre os dados de simulação, utilizando o modelo proposto por Ferreira e Massarani (2005) e experimentais da filtração dinâmica. Observa-se que o modelo é capaz de prever o momento no qual se dá início à formação da torta, pois o fluxo de permeado aumenta de forma não linear, assim como o modelo também descreve bem o período linear da curva de fluxo (Figura 15).

Figura 15. Resultados típicos da comparação entre os dados de simulação e experimentais da filtração dinâmica.
Fonte: Araújo, 2010.

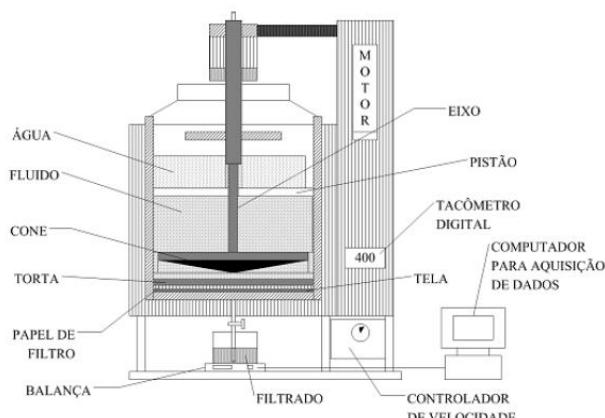


Em resumo, Araújo (2010) baseado em seus experimentos afirma que:

- Em relação às diferentes pressões de trabalho utilizadas, observou-se que para cada concentração, o aumento de pressão provocou, conforme esperado, um aumento no volume de filtrado obtido;
- Enquanto o aumento da concentração para cada uma das pressões utilizadas, promoveu uma diminuição dos volumes de filtrado;
- Em relação aos valores de resistividade da torta houve uma variação de acordo com o tipo de filtração utilizado, indicando que não é possível prever valores deste parâmetro para filtração dinâmica a partir de dados obtidos em uma filtração estática, pois o processo de formação da torta é influenciado pelo tipo de filtração;
- Para as simulações os resultados indicam que o modelo utilizado apresenta boa concordância com os resultados experimentais.

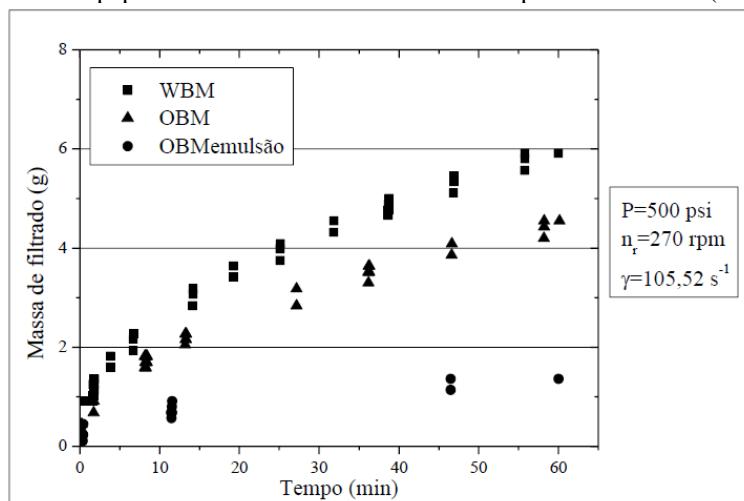
Buscando analisar os parâmetros da filtração e as propriedades das tortas formadas, Martins (2013) realizou experimentos com três diferentes tipos de fluidos (base água, base óleo sem emulsão e base óleo com emulsão), variou também o meio filtrante utilizando papel de filtro e rochas reservatório (de arenito com média e alta permeabilidade e de carbonato), além de coletar dados em condições estáticas e dinâmicas (aplicando rotações de 270 rpm e de 1200 rpm, respectivamente). Para isso, Martins (2013) fez uso da célula *HTHP* da *OFITE*, que precisou ser adaptada para atender ao escopo do projeto. A hélice presente no equipamento original foi substituída por um cone para que o cisalhamento sobre a torta fosse mais homogêneo e foi projetado no próprio laboratório um cilindro sobressalente com capacidade de 900 cm³ para ser utilizado em filtrações de emulsões. A Figura 16 representa um esquema da célula após modificações.

Figura 16. Célula de filtração *HTHP* da *OFITE*. Adaptada de Martins (2013).



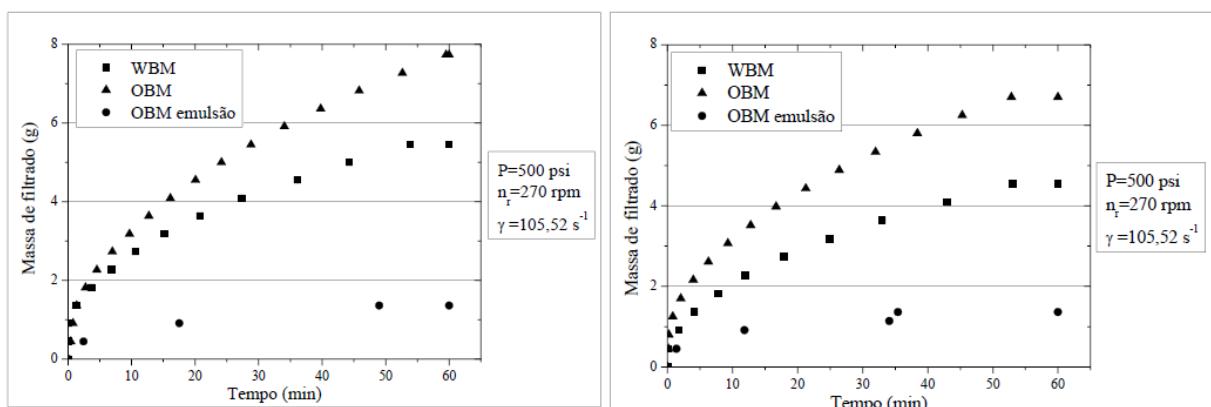
O planejamento experimental de Martins (2013) foi dividido em dois blocos principais: a avaliação dos tipos de fluidos e meios filtrantes utilizados e a determinação dos parâmetros de filtração. O primeiro subgrupo de experimentos avaliou a filtração dos três diferentes tipos de fluidos estudados sob uma pressão de 500 psi, uma rotação de 270 rpm e tendo como meio filtrante o papel de filtro de 2 ½ in de diâmetro e com retenção de partículas maiores que 2,7 μm e abaixo é apresentado um gráfico com os resultados deste subgrupo (Figura 17).

Figura 17. Dados de massa de filtrado em função do tempo de filtração para fluidos do estudo de caso I e papel de filtro como meio filtrante. Adaptado de Martins (2013).



Para a análise do segundo subgrupo foram utilizados os mesmos fluidos, no entanto o papel de filtro foi substituído por amostras de rochas de arenito e carbonato com diâmetro de 2 ½ in e espessura de ¼ in. A mesma pressão de operação foi adotada, assim como a rotação de 270 rpm também foi utilizada, entretanto também foram feitos experimentos com a rotação de 1200 rpm (Figura 18).

Figura 18. Dados de massa de filtrado em função do tempo de filtração para fluidos do estudo de caso I e arenito como meio filtrante de alta e média permeabilidade, respectivamente.



Por fim, para o segundo grupo de experimentos, que teve como objetivo a determinação de parâmetros de filtração, foram utilizados apenas um fluido base água e outro base óleo com emulsão, ambos fornecidos pelo Centro de Pesquisa da Petrobras (Cenpes). Neste caso, além da variação dos fluidos utilizados, houve a variação da pressão utilizada na filtração (200, 300 e 1000 psi), da rotação imposta ao cone no interior da câmara (0, 320 e 580 rpm) e do tempo de filtração (30 e 60 min).

Martins (2013) concluiu que:

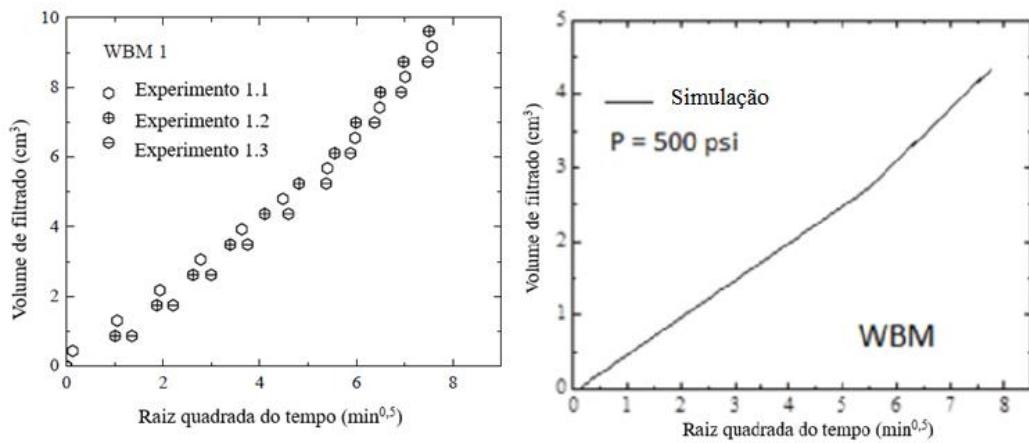
- Os experimentos nos quais utilizou-se o papel de filtro como meio filtrante e variou-se os fluidos de perfuração, pode-se concluir que o fluido base água foi aquele que produziu o maior volume de filtrado;
- Já nos experimentos em que se usou as rochas reservatório como meio filtrante, afirma-se que o maior volume de filtrado foi produzido pela utilização do arenito de alta permeabilidade;
- Quando se trata da emulsão, a mesma proporcionou o menor volume de filtrado para todos os meios filtrantes utilizados, além de formar um reboco mais fino;
- Em relação às taxas de cisalhamento, observou-se que devido à erosão causada na torta pela alta taxa de cisalhamento, produziu-se um volume de filtrado maior do que quando utilizada a baixa taxa;
- No mais, conclui-se que a torta formada pela utilização do fluido base água é mais permeável e compressível.
- Por fim, houve a erosão da torta nos dois tipos de experimentos realizados (sem e com rotação).

Utilizando o mesmo equipamento descrito no trabalho de Martins (2013), Calçada *et al.* (2014) também se dedicaram a analisar as propriedades da torta de filtração, buscando caracterizá-la através dos seguintes parâmetros: porosidade, permeabilidade, compressibilidade, resistência ao cisalhamento e fator de fricção. Para tal, fizeram uso das condições estática e dinâmica em seus experimentos e ainda utilizaram os dados coletados para a modelagem da filtração buscando prever alguns dos parâmetros da torta.

Para a determinação dos parâmetros de filtração adotaram-se condições estáticas, ou seja, as filtrações ocorreram a uma velocidade de rotação de 0 rpm durante todos os testes. Sendo

que nos primeiros 30 minutos a pressão de operação foi de 500 psi, a qual foi dobrada nos 30 minutos finais. Já em condições dinâmicas, apesar de terem sido utilizadas as mesmas pressões de operação e o mesmo tempo de filtração, as velocidades de rotação impostas ao cone no interior da câmara foram de 320 e 580 rpm. Na Figura 19 segue um resultado típico obtido por Calçada *et al.* (2014) trazendo resultados experimentais e a simulação.

Figura 19. Curva de filtração obtida experimentalmente e simulado do fluido WBM1. Adaptado de Calçada *et al.* (2014).



Com base em seus resultados, concluíram que, quando comparado o volume de filtrado produzido na utilização dos dois tipos de fluidos, o fluido base água deu origem a um volume de filtrado maior, pois a torta formada apresentou uma maior permeabilidade e porosidade, enquanto a torta construída pela filtração do fluido base óleo possuía uma espessura três vezes maior. E por fim, os resultados da modelagem foram capazes de prever o comportamento das curvas de volume de filtrado, *slowness* e espessura da torta em função do tempo.

Dando prosseguimento aos estudos realizados no laboratório e fazendo uso da mesma célula de filtração descrita acima, Ferraz (2014) avaliou a influência do tamanho das partículas de adensantes (carbonato de cálcio e esferas de vidro) nas propriedades das tortas formadas após o processo de filtração. Além de avaliar o efeito de diferentes concentrações dos agentes viscosificantes: goma xantana (GX) e carboximetilcelulose (CMC).

Foram formulados fluidos newtonianos e não-newtonianos, as filtrações foram realizadas em condições estáticas durante uma hora de experimento, sendo que nos primeiros 30 minutos foi utilizada uma pressão de trabalho de 500 psi, a qual foi duplicada no tempo restante do teste. O meio filtrante utilizado foi o papel de filtro e a seguir é apresentado uma Figura 20 trazendo alguns resultados de filtração estática obtidos por Ferraz (2014).

Figura 20. Dados de filtração estática para diferentes fluidos. Adaptado de Ferraz (2014).

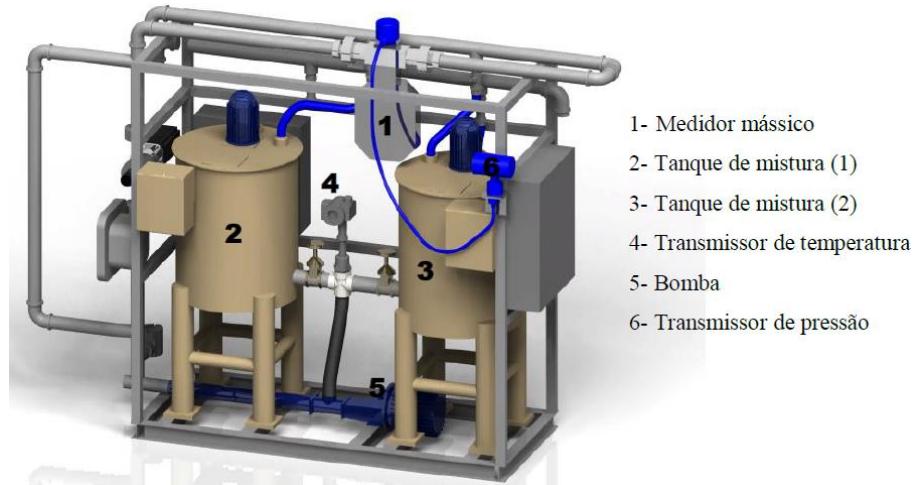
Composição	Volume de filtrado (mL)
CMC + CaCO ₃ (0 < D _p < 53 µm)	12.71 ± 0.02
CMC + CaCO ₃ (0 < D _p < 106 µm)	14.80 ± 0.02
CMC + CaCO ₃ (0 < D _p < 150 µm)	16.34 ± 0.01
XG + CaCO ₃ (0 < D _p < 53 µm)	16.80 ± 0.03
XG + CaCO ₃ (0 < D _p < 106 µm)	11.80 ± 0.02
XG + CaCO ₃ (0 < D _p < 150 µm)	9.99 ± 0.02

A conclusões de Ferraz (2014) estão listadas abaixo:

- Os fluidos produzidos utilizando CMC apresentaram uma tensão de cisalhamento maior que aqueles produzidos com GX;
- Além disso, os fluidos com GX produziram uma torta mais compressível e com menor permeabilidade, uma vez que um menor volume de filtrado foi coletado;
- Para todos os fluidos, houve uma diminuição da porosidade e permeabilidade com o aumento da pressão;
- A utilização de diferentes faixas de distribuição do tamanho de partículas no caso das esferas de vidro, não afetou substancialmente a reologia em nenhum dos fluidos utilizados;

Um estudo que uniu o processo de filtração com a automação no laboratório é o de Barbosa (2016), ele construiu um *skid* de preparação de fluido (Figura 21), com dois tanques de 150 litros de capacidade, uma bomba de deslocamento positivo, transmissores de pressão e temperatura, além de um medidor mássico que fornece dados de densidade e vazão mássica do fluido circulante.

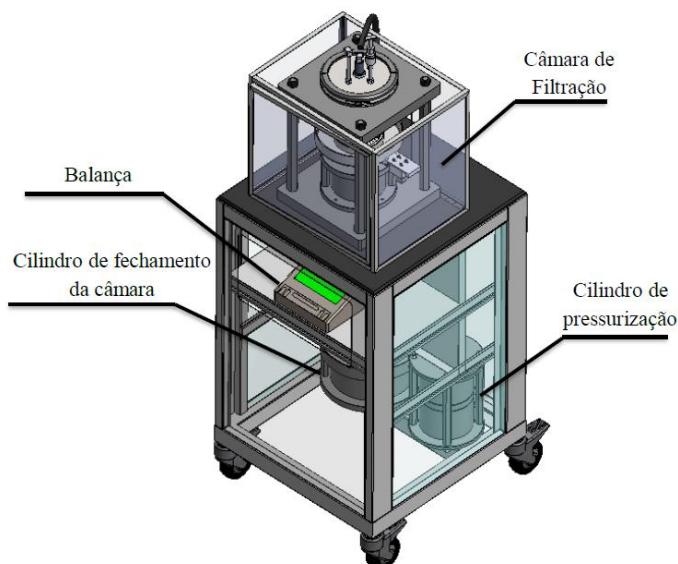
Figura 21. Skid experimental. Adaptado de Barbosa (2016).



Ligado a esse sistema há uma célula de filtração automatizada (esquematizada na Figura 22) nela pode ser vista a câmara de filtração, o cilindro utilizado para sua pressurização, assim como o cilindro utilizado para o fechamento da câmara e a balança que aquisitava dados de volume de filtrado em tempo real.

Para que o processo ocorresse de maneira automatizada, além da instrumentação citada acima, foram instaladas quatro válvulas ON/OFF, sendo uma utilizada para a admissão de fluido na câmara, outra para a saída de fluido, uma outra para controlar a abertura e o fechamento da válvula de óleo que controla o pistão de fechamento da câmara e, por fim, uma válvula para dar início da filtração.

Figura 22. Esquema de célula de filtração automatizada. Adaptado de Barbosa (2016).



A automação de fato da unidade foi implementada através de um chassi da *National Instruments*, onde foram instaladas placas de aquisição de dados que recebem e enviam sinais de corrente elétrica, os quais são interpretados pela programação feita previamente no *software LabVIEW*.

Além de aquisitar dados de volume em tempo real, o programa de Barbosa (2016) era capaz de calcular automaticamente a permeabilidade e a porosidade geradas durante a filtração, além de ser possível o operador controlar, através de uma interface no computador, o funcionamento da bomba, a agitação dos tanques, a inicialização do ciclo de limpeza, assim como a abertura e fechamento da câmara e das válvulas.

Para validar seu projeto, o autor fez testes na célula de bancada da *OFITE* utilizando os dados das tortas formadas para calcular a permeabilidade e porosidade e compará-los aos dados obtidos pela célula *on-line*. Obteve medidas de porosidade com desvios inferiores a 7% e, em se tratando da permeabilidade obteve a mesma ordem de grandeza dos dados aquisitados nos dois aparelhos (Tabela 1). Os resultados obtidos e os conhecimentos desenvolvidos na automação da célula de Barbosa (2016) permitiram o projeto e a construção de uma nova célula de filtração, que foi utilizada neste trabalho, mais compacta e robusta para ser utilizada em sonda de perfuração.

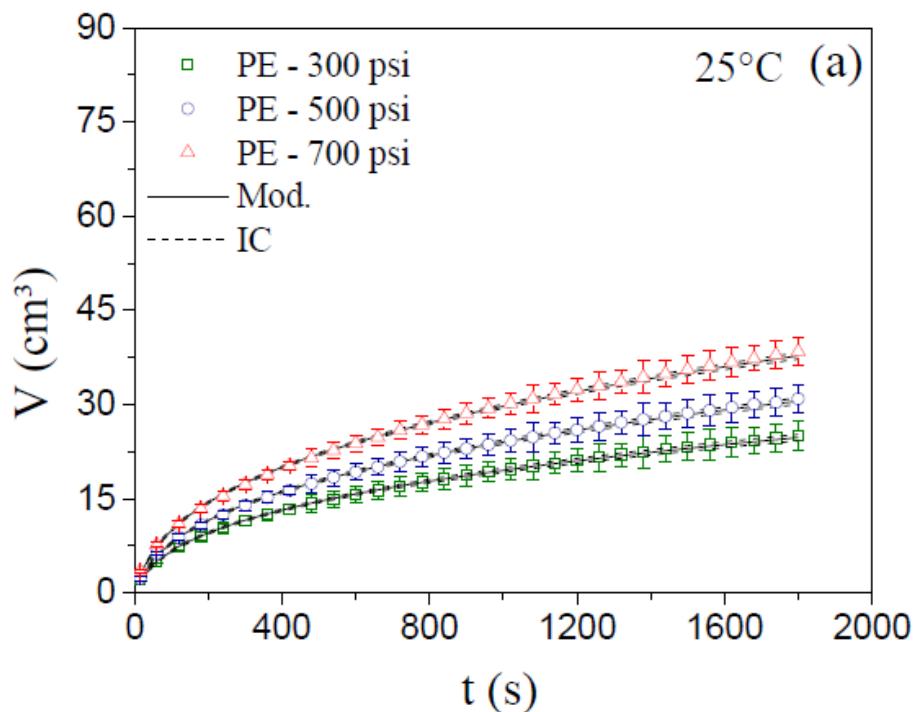
Tabela 1. Comparação entre volumes de filtrado obtidos nas células de filtração. Adaptado de Barbosa (2016).

Experimento	Área de filtração (cm ²)	Volume de filtrado (ml)	Volume de filtrado por área (cm)
Online 1	99,58	17,74	0,18
Online 2	99,58	21,05	0,21
Online 3	99,58	16,72	0,17
Média online	99,58	18,50	0,19
Desvio padrão	-	2,264	0,02
Bancada 1	109,73	15,5	0,14

Por fim, o trabalho mais recente conduzido no laboratório em questão é o de Borges (2019), que se preocupou com a ausência na literatura de procedimentos de cálculo e estimativa de parâmetros relacionados à permeabilidade e à porosidade das tortas adequados, além de, segundo ele, as medidas experimentais serem muitas vezes obtidas sem o devido critério. Para poder estimar esses parâmetros com cuidado e levando em consideração os erros de medidas, ele utilizou a mesma célula de filtração *HHTP* já mencionada e analisou os efeitos da temperatura, da pressão e da concentração de sólidos nesses parâmetros.

Para seu estudo, Borges (2019) utilizou fluidos base água viscosificados com CMC, as pressões de trabalho foram de 300, 500 e 700 psi, com temperaturas de 25, 45 e 65 °C e com concentrações de sólidos 10, 20 e 30% v/v. A seguir um resultado típico obtido por ele (Figura 23).

Figura 23. Ajuste do modelo de filtração aos dados experimentais em diferentes pressões. Adaptado de Borges (2019).



Borges (2019), concluiu que:

- O volume de filtrado tem grande dependência dos três parâmetros analisados;
- Os dados experimentais de porosidade indicam que a compactação das tortas sofre influência do diferencial de pressão e da concentração de sólidos utilizados;
- A estimativa de parâmetros aplicada possibilitou a obtenção de parâmetros ótimos que ficaram no interior das regiões de confiança;

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho tem como objetivo principal a automação de uma célula de filtração projetada pelo Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF), assim como sua validação através da execução de uma malha experimental de testes, além da utilização do equipamento para a estimação de parâmetros da filtração a partir dos dados obtidos de forma *on-line*.

Primeiramente serão descritas as células utilizadas, seguido da descrição da unidade experimental (*skid*) na qual a célula foi instalada para ser automatizada e o procedimento operacional utilizado em cada célula. Então será apresentada a sequência de experimentos utilizada objetivando-se a validação da célula automatizada. Em seguida será descrito o processo de automação utilizado, assim como a caracterização dos materiais utilizados.

3.1 CÉLULAS DE FILTRAÇÃO

Para realização deste trabalho foram utilizadas duas células de filtração, uma comercial de bancada e outra on line proposta pelo LEF, que serão descritas a seguir.

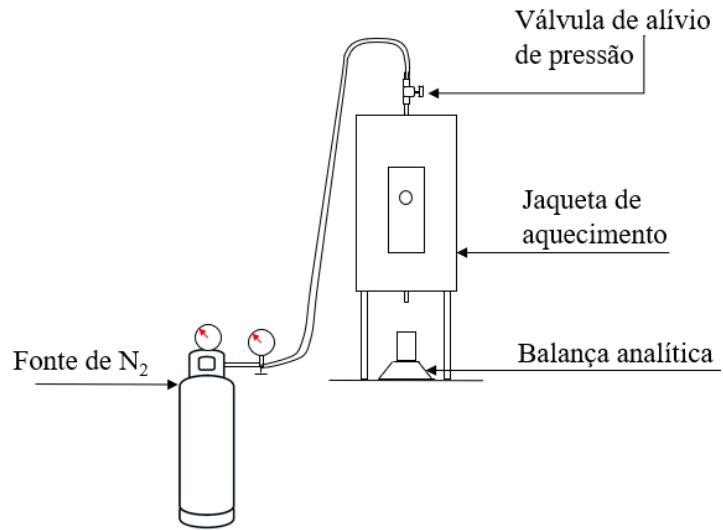
3.1.1 Célula de bancada

A célula de bancada foi utilizada como referência para o projeto da nova célula proposta pelo laboratório, tendo sido os resultados obtidos em ambas as células comparados, buscando a validação da célula on line. O modelo escolhido para a bancada foi a célula de filtração da OFITE 171-01-C (Figura 24), de 500 mL de capacidade, equipada com uma jaqueta de aquecimento, que permite a utilização de diferentes temperaturas de trabalho e com um cilindro de nitrogênio para pressurização do sistema (Figura 25). Este equipamento é amplamente utilizado da indústria do petróleo para avaliação de propriedades de filtração de fluidos de perfuração.

Figura 24. Célula de filtração OFITE HTHP. Adaptado de Manual OFITE (2015).



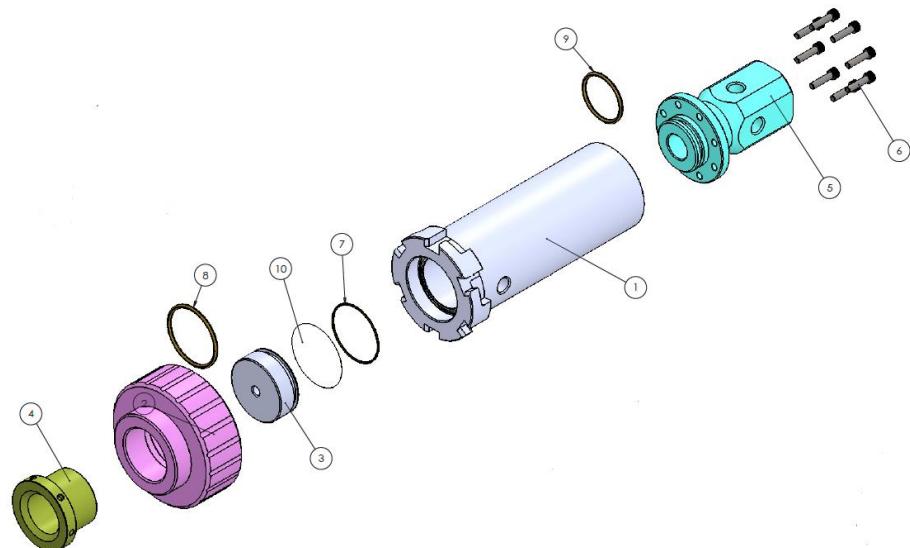
Figura 25. Esquema da célula 171-01-C da OFITE. Adaptado de Borges (2019).



3.1.2 Célula de filtração on-line

A célula de filtração proposta, representada de forma esquemática na Figura 26, por sua vez é composta por um cilindro central (1) com capacidade de aproximadamente 405 ml, um sistema de engate rápido com uma porca baioneta (2), uma base para o meio filtrante (3), uma contra porca de pressão roscada (4), uma cabeça para admissão de fluidos e instrumentação (5), parafusos (6) e anéis de vedação (7,8,9). O sistema de pressurização é o mesmo utilizado na célula da *OFITE*. O seu funcionamento será descrito posteriormente no procedimento operacional.

Figura 26. Desenho da célula proposta para automação. Adaptado de Acervo do Laboratório de Escoamento Giulio Massarani (2019).



Nota-se que a célula proposta pelo LEF (Figura 27) possui muitas semelhanças com a célula de referência, ambas têm capacidade próximas, são pressurizadas superiormente, podem trabalhar com altas pressões, tendo como diferença um sistema de engate rápido com a porca baioneta e a contra porca rosada, buscando-se facilitar a abertura/fechamento da célula a ser automatizada. Essa célula foi projetada tendo como referência a célula da *OFITE*, tendo como base também os conhecimentos adquiridos durante a realização da automação proposta por Barbosa (2016).

Figura 27. Foto da célula proposta para automação. Adaptado de Acervo do Laboratório de Escoamento Giulio Massarani (2019).



3.1.3 Construção do *skid*

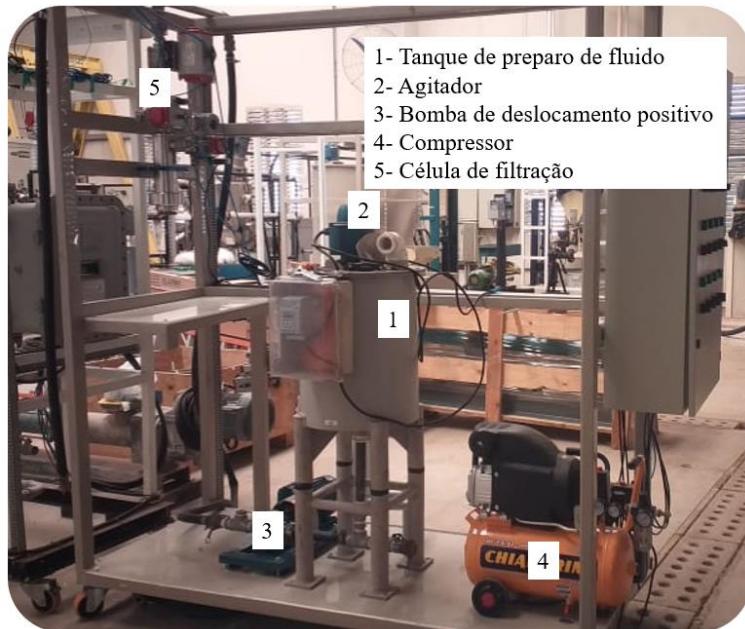
De forma a agilizar e estruturar o sistema de testes da célula de filtração on line, foi montado um *skid* agrupando todos os elementos necessários para seu funcionamento (Figura 28). Para sua construção foi utilizado um tanque com um agitador, uma bomba de deslocamento positivo, um transdutor de pressão, um compressor e um sistema de pressurização.

O tanque utilizado tem a capacidade de 50 litros e nele está instalado um agitador que permite a produção do fluido de perfuração na própria unidade, enquanto a bomba permite a circulação do fluido na linha e o transdutor de pressão instalado na cabeça da célula possibilita a leitura em tempo real da pressão no equipamento.

O compressor empregado tem como função fornecer o ar comprimido responsável por realizar o acionamento pneumático das válvulas automatizadas, válvulas do tipo ON/OFF na

configuração totalmente abertas quando desligadas. Por sua vez, o sistema de pressurização é composto por um cilindro de nitrogênio com 20 litros e de uma pressão máxima de 2000 psi, além de um sistema de válvulas manuais e manômetros que permitem a leitura e o controle da saída de gás até que se atinja a pressão desejada.

Figura 28. Unidade experimental com célula automatizada instalada.



3.1.4 Procedimento operacional

Abaixo serão descritos os procedimentos experimentais utilizados em cada uma das células.

3.1.4.1 Célula de bancada da *OFITE*

O procedimento experimental para executar as filtrações na célula da *OFITE* segue os seguintes passos:

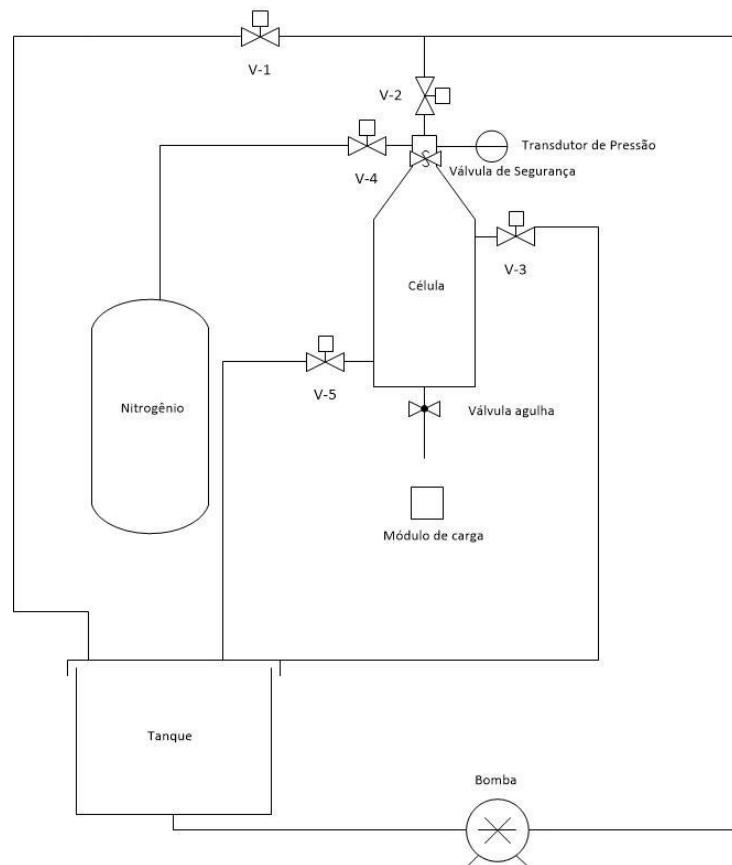
- Inserção da suspensão na célula de filtração;
- Posicionamento dos o-rings de vedação e papel de filtro para o selamento da célula;
- Travamento célula na estrutura suporte;
- Conexão da fonte de nitrogênio com o topo da célula;
- Liberação do gás e pressurização da linha;
- Abertura da válvula superior da célula e pressurização da câmara;
- Abertura da válvula inferior da célula dando início à filtração;

- Coleta de dados de volume de filtrado por tempo de filtração durante 30 minutos;
- Fechamento da válvula inferior da célula e abertura da válvula de alívio;
- Retirada do suporte, descarte da suspensão não filtrada e retirada da torta;
- Registro de dados de massa úmida espessura da torta formada;
- Registro de dados de massa seca.

3.1.4.2 Célula proposta

No esquema da Figura 29 estão representadas as válvulas ON/OFF que são responsáveis, respectivamente, por permitir a circulação de fluido na unidade (V-1), pela admissão de fluido na célula de filtração (V-2) e (V-3), pela pressurização da célula (V-4) e pela despressurização da mesma (V-3). Ademais estão representadas as válvulas de segurança e agulha (responsável por iniciar a filtração), o transdutor de pressão, o módulo de carga, o cilindro de nitrogênio, o compressor, o tanque e a bomba utilizados.

Figura 29. Fluxograma da unidade.



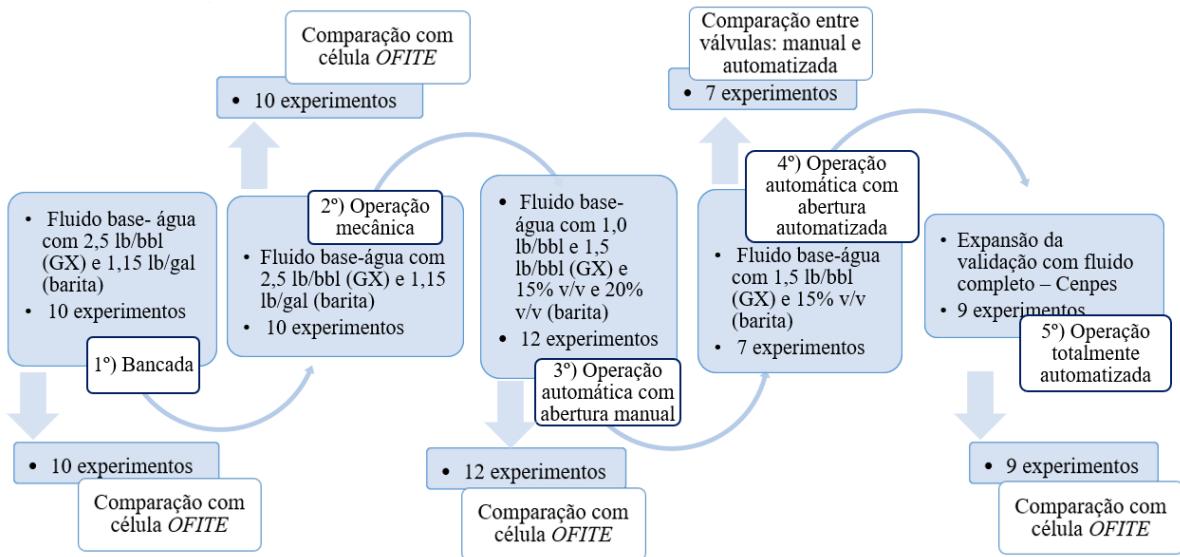
Neste caso, o procedimento experimental adotado está descrito a seguir:

- Posicionamento do o-ring de vedação e papel de filtro para selamento da célula de filtração;
- Travamento da porca-rosca para fechamento da célula;
- Abertura das válvulas V-2 e V-3;
- Inserção de suspensão na célula;
- Fechamento das válvulas V-2 e V-3;
- Abertura da válvula V-4 para pressurização da câmara;
- Abertura da válvula agulha manualmente, dando início à filtração;
- Coleta de dados de volume de filtrado x tempo de filtração durante 30 minutos;
- Fechamento das válvulas V-5 e V-4 e abertura da válvula V-3 para despressurização do sistema;
- Abertura da célula e retirada da torta;
- Registro de dados de massa úmida e espessura da torta formada;
- Registro de dados de massa seca.

3.2 VALIDAÇÃO

Com o objetivo de validar a célula de filtração on line, foram realizados uma série de experimentos. Visando facilitar o entendimento a respeito da maneira como os experimentos foram realizados, segue abaixo um fluxograma (Figura 30). A primeira etapa tinha como objetivo a validação da célula proposta operando em bancada. Estes testes foram necessários para verificar se a célula projetada era capaz de realizar testes de filtração com resultados comparáveis aos da célula *OFITE*. Vencida esta etapa, a célula proposta foi instalada no *skid* onde foram realizados três tipos de testes. Primeiro foram realizados testes de validação com operação mecânica da célula. Finalizada esta etapa, iniciou-se a automação da célula, sendo esta com duas condições de acionamento da válvula que dá início a filtração, primeiro operou-se de forma mecânica e depois automática. Desta maneira, os desafios da automação da célula foram sendo resolvidos em etapas. Em todas elas, os resultados obtidos na célula proposta foram comparados com os resultados obtidos na célula de referência e cada uma delas será detalhada adiante.

Figura 30. Esquema de experimentos nas células utilizadas.



Como mencionado, a primeira etapa consistiu na validação em bancada da célula proposta, buscando-se comprovar a reproduzibilidade em experimentos de filtração da célula projetada, dificuldade encontrada por Barbosa (2016) durante o desenvolvimento de seu trabalho. Para isso, foram realizados dez experimentos em cada uma das células sob as mesmas condições de temperatura e pressão (30°C e 300 psi), comparando-se ao final o volume de filtrado obtido em cada uma delas. Foi utilizado um fluido base água, adicionou-se goma xantana em quantidade suficiente para alcançar 2,5 lb/bbl de concentração e barita em quantidade suficiente para alcançar uma densidade de 1,15 lb/gal. Abaixo (Figura 31) encontram-se as fotos da célula proposta apoiada no suporte para bancada ilustrando a montagem da célula nesta etapa.

Figura 31. Célula proposta apoiada no suporte para bancada. Adaptado de Acervo do Laboratório de Escoamento Giulio Massaran (2019).



Após a realização dos experimentos de validação em bancada, a célula proposta foi instalada na unidade experimental e foi necessária então realizar a validação mecânica do sistema proposto, como forma de garantir o funcionamento dos experimentos de filtração na configuração proposta. Para isso, a instalação elétrica foi pensada de forma a possibilitar que duas formas de energização dos componentes elétricos fossem utilizadas: **modo manual** e **modo automático**.

Dessa forma, primeiro foi feita a validação mecânica do sistema, utilizando-se o **modo manual**, neste caso a energização da bomba instalada no *skid*, assim como do compressor e agitador eram feitas de forma manual, por meio do acionamento de botões. As válvulas ON/OFF também era acionadas manualmente seguindo o procedimento experimental descrito anteriormente. Para essa etapa foram utilizadas as mesmas condições da validação em bancada da célula proposta, assim como o mesmo número de experimentos.

Para a fase de validação no **modo automático** foi utilizado um planejamento experimental fatorial completo de dois fatores em dois níveis com triplicata em todos os pontos, onde foram utilizadas concentrações do viscosificante goma xantana de 1,0 lb/bbl e 1,5 lb/bbl, além das concentrações do adensante barita de 15% e 20% v/v. Novamente foi utilizada uma pressão de trabalho de 300 psi e temperatura de 30°C, finalizadas as filtrações foram comparados os volumes de filtrado obtidos em cada uma das células.

Na fase de testes da célula no **modo completamente automático**, comparou-se o volume de filtrado obtido em filtrações com duas forma de acionamento da válvula de saída que dá início a filtração: abertura da válvula agulha manualmente (Figura 32 a) e abertura automática após a instalação de uma válvula ON/OFF (Figura 32 b). Nessa configuração, a filtração se inicia após a abertura da válvula automática, fazendo com que todo o experimento de filtração ocorra de maneira automática. Havia uma preocupação que nesta configuração ocorresse o acúmulo de fluido de perfuração no interior da válvula ON/OFF, uma vez que ela foi instalada após a válvula agulha, permitindo que ocorresse a passagem de fluido de perfuração, após a pressurização do sistema.

Foram realizados ao todo quatorze experimentos, sete com cada tipo de abertura na célula proposta, com um fluido base água com 1,5 lb/bbl de goma xantana e 15% v/v de barita. A pressão de trabalho foi de 300 psi e a uma temperatura de 30 °C.

Figura 32. Célula de filtração com abertura manual (a) e com abertura automática (b).



Após a validação da célula proposta com fluidos simples a base de água, viscosificante e agente adensante foram realizados testes de validação com fluido real de perfuração fornecido pelo Cenpes. Neste caso, foi executado um planejamento de três níveis em triplicata na célula proposta totalmente automatizada (Figura 32b) e na célula da *OFITE*, variando-se apenas as pressões de trabalho, tendo sido feitas filtrações com 300, 500 e 700 psi finalizando, desta forma, todas as etapas de validação da célula proposta.

Segue abaixo a Tabela 2 resumindo todas as condições operacionais adotadas durante os experimentos.

Tabela 2. Tabela resumo dos experimentos realizados.

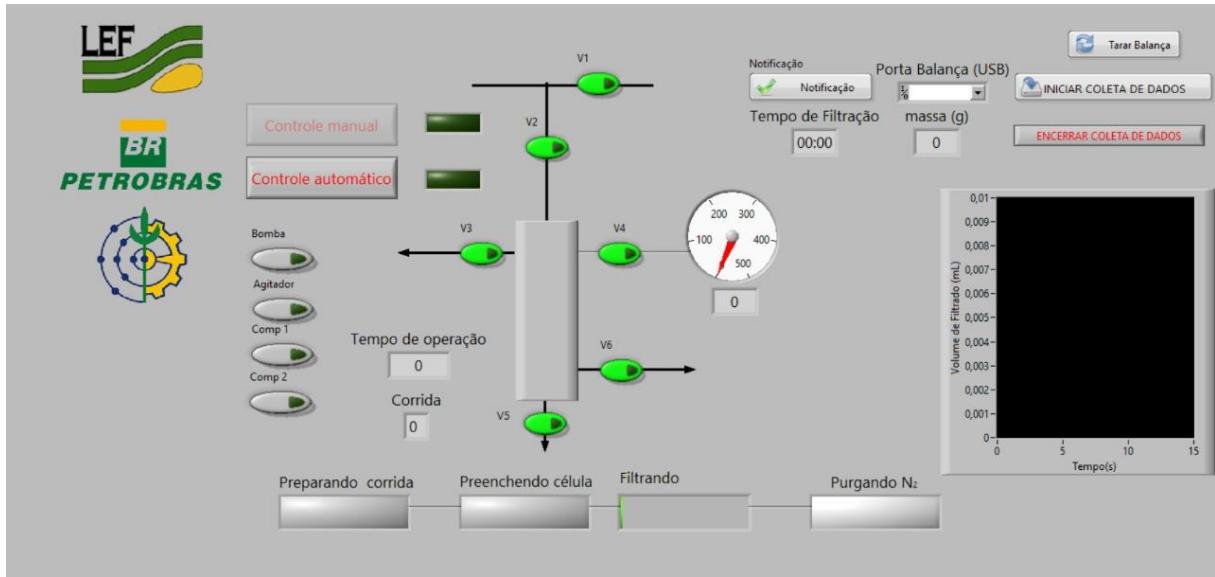
Etapa da validação	Equipamento	Fluido	Pressão (psi)	Experimentos
Bancada	Célula proposta	2,5 lb/bbl (goma xantana) e 1,15 lb/gal (barita)	300	10
	Célula de referência			
Mecânica	Célula proposta	2,5 lb/bbl (goma xantana) e 1,15 lb/gal (barita)	300	10
	Célula de referência			
On line (com abertura manual)	Célula proposta	1,0 lb/bbl e 1,5 lb/bbl (goma xantana) e 15% v/v e 20% v/v (barita)	300	2^2 com triplicata em todos os pontos
	Célula de referência			
On line (com abertura automatizada)	Célula proposta	1,5 lb/bbl (goma xantana) e 15% v/v (barita)	300	7
Fluido completo	Célula proposta		300, 500 e 700	Três níveis em triplicata para cada equipamento
	Célula de referência	BR-CARB		

3.3 AUTOMAÇÃO

A automação da célula de filtração foi possível por meio do uso de placas de aquisição de dados conectadas a um chassi capaz de converter os sinais elétricos em um sistema de comunicação digital e enviá-las à placa mãe de qualquer computador via cabo USB, fazendo dessa forma a comunicação entre os equipamentos/instrumentos com o computador/linguagem de programação.

Para programação foi utilizada a linguagem gráfica o *software LabVIEW* da *National Instruments*. A partir do código criado era possível fazer o acionamento da bomba, do agitador e do compressor utilizados, assim como o acionamento, seguindo a ordem descrita acima, de cada uma das válvulas *ON/OFF* instaladas na unidade, além de ser possível mensurar a pressão em tempo real dentro da câmara. Na Figura 33 é apresentada uma imagem da interface de controle desenvolvida.

Figura 33. Interface do operador do código de controle da célula.



O programa era responsável também por aquisitar os dados de volume de filtrado em tempo real durante os experimentos e exibi-los em um gráfico de volume de filtrado por tempo.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir será descrita a caracterização dos materiais utilizados.

3.4.1 Caracterização dos sólidos

Foi utilizado como agente adensante a barita e foi determinada sua densidade por meio da técnica de picnometria, em quadriplicata, com a utilização de um picnômetro (Figura 34).

Figura 34. Picnômetro.



3.4.2 Caracterização dos fluidos

Para caracterizar os fluidos utilizados no presente trabalhos, alguns testes laboratoriais foram realizados e a descrição deles está apresentada a seguir.

3.4.2.1 Densidade

Para a determinação da densidade foi utilizada a balança de lama da FANN 140 representada na Figura 35. Neste ensaio é retirada uma amostra de fluido de perfuração, a qual é inserida no copo da balança de lama, o mesmo é fechado e garante-se que todo o copo está preenchido com o fluido e que não há ar dentro dele. Então a balança é posicionada no local indicado, garante-se que está nivelada e então é feita a leitura da densidade do fluido.

Figura 35. Balança de lama (FANN 140).



3.4.2.2 Reologia

Para a obtenção dos parâmetros reológicos do fluido foi utilizado o viscosímetro FANN 35A (Figura 36), trata-se de um viscosímetro de cilindros coaxiais, onde o cilindro interno fica estático, enquanto o cilindro externo gira com uma velocidade constante. O arraste do fluido criado pela rotação do cilindro externo, faz com que o cilindro interno se desloque ocasionando um ângulo de deflexão que, por sua vez, pode ser lido em um visor na parte superior do equipamento.

Figura 36. Viscosímetro 35 FANN.



O instrumento possui até dez velocidades de rotação (0,9, 1,8, 3, 6, 30, 60, 100, 200, 300 e 600), produzindo dez diferentes ângulos de deflexão que são aplicados nas Equações (3.3, 3.4, 3.5) abaixo, encontradas no manual do equipamento, para que se determine de acordo com eles, a tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade do fluido.

$$\mu_{ap} = \frac{k_1 \times k_2}{k_3} \times \frac{\theta}{N} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\tau = k_1 \times k_2 \times \theta \quad (3.2)$$

$$\gamma = k_3 \times N \quad (3.3)$$

Onde μ_{ap} representa a viscosidade aparente do fluido, θ o ângulo de deflexão, N a velocidade de rotação, τ a tensão cisalhante, γ a taxa de deformação e, por fim, k_1 , k_2 e k_3 constantes também encontradas no manual do equipamento.

3.4.3 Porosidade da torta

A obtenção da porosidade média neste trabalho foi feita por meio de gravimetria, ou seja, foram realizadas medidas de massas das tortas logo após a filtração (torta úmida), elas foram levadas a uma estufa a 90°C até que secassem completamente, para então serem pesadas novamente. Em posse dessas medidas, foi calculada então para porosidade média descrita a seguir.

$$m = m_{úmida} - m_{seca} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{m_{úmida}}{m_{seca}} - 1}{\frac{m_{úmida}}{m_{seca}} - 1 + \frac{\rho_f}{\rho_s}} \quad (3.5)$$

3.5 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE FILTRAÇÃO

Após a validação da célula de filtração proposta, a mesma foi utilizada para a estimação de parâmetros de filtração, como a resistividade média da torta e a resistividade do meio filtrante. Para isso foi utilizado como base o modelo de Castro (1981) para fluidos não-Newtonianos, geralmente aplicado em suspensões com elevada viscosidade.

No entanto o modelo de ajuste aos dados experimentais proposto por Castro (1981) considera o modelo Power Law para descrever a relação entre a tensão e taxa cisalhantes, e no

caso dos fluidos utilizados por este trabalho, o comportamento se deu mais como fluidos de Herschel-Bulkley, por esse motivo foi feita a troca dos modelos reológicos durante o equacionamento.

Vale reforçar que esta foi a única modificação na dedução do modelo, as premissas consideradas pelo modelo de Castro foram mantidas e descritas no Capítulo 2, logo o modelo de Castro adaptado está apresentado abaixo, assim como o modelo de Herschel-Bulkley.

Modelo de Herschel-Bulkley, onde τ_0 trata-se da tensão inicial de cisalhamento, n o índice de consistência do fluido e K o índice de comportamento.

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (3.6)$$

Combinando-se então as equações (2.7), (2.23) e (2.24), tem-se:

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{dP_s}{dz} = \frac{(\tau_0 + K\dot{\gamma}^n)\Omega}{\sqrt{k}} \quad (3.7)$$

Retomando a resistividade local da torta (equação 2.11) e a massa infinitesimal de sólidos contidos em uma fatia da torta de espessura dz (equação 2.10) e a taxa de cisalhamento característica para escoamento de fluidos em meios (equação 2.26) e substituindo-se na equação 3.7, tem-se:

$$-dP = \left[\frac{\Omega\tau_0}{\sqrt{k}(1-\varepsilon)\rho_s A} + \frac{K\Omega}{\sqrt{k_c(1-\varepsilon)\rho_s A}} \times \frac{q^n}{\Omega^n k_c^{n/2}} \right] dm \quad (3.8)$$

Novamente é necessário fazer uso de uma aproximação para descrever a resistividade média da torta, como na equação (2.13) e então a integração da equação (3.8) fornece:

$$\Delta P_1 = \left[\frac{\Omega\tau_0}{A} \bar{\alpha}^{1/2} (1-\varepsilon)^{1/2} \rho_s^{1/2} + \frac{K\Omega^{1-n} q^n}{A} \bar{\alpha}^{(n+1)/2} (1-\varepsilon)^{(n-1)/2} \rho_s^{(n-1)/2} \right] C_s V \quad (3.9)$$

Enquanto a forma integrada da equação do movimento aplicada ao escoamento do filtrado no meio filtrante é dada abaixo, onde k_m trata-se da permeabilidade do meio filtrante e R_m da resistência do meio filtrante.

$$\Delta P_2 = \tau_0 \Omega R_m k_m^{1/2} + K \Omega^{1-n} q^n R_m k_m^{(1-n)/2} \quad (3.10)$$

A soma das equações (3.9) e (3.10) resulta na equação (3.11):

$$\Delta p = \frac{\Omega \tau_0}{A} (\bar{\alpha} \varepsilon_s \rho_s)^{1/2} + \tau_0 \Omega R_m k_m^{1/2} + \left[\frac{K \Omega^{1-n}}{A} \alpha^{\frac{n+1}{2}} (\varepsilon_s \rho_s)^{(n-1)/2} C_s V + K \Omega^{1-n} R_m k_m^{(1-n)/2} \right] \left(\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \right)^n \quad (3.11)$$

Com a integração, obtém-se a equação que relaciona o volume de filtrado com o tempo para suspensões de fluidos não-Newtonianos:

$$V = \frac{1}{b} \left[b \left(\frac{n}{n+1} \right) A^{\frac{n+1}{n}} \left(\Delta P - \frac{q}{A} \right)^{1/n} t \right]^{\frac{n}{n+1}} - \frac{c}{b} \quad (3.12)$$

Onde:

$$a = \Omega \tau_0 \left[(\bar{\alpha} \varepsilon_s \rho_s)^{1/2} + R_m k_m^{1/2} A \right] \quad (3.13)$$

$$b = K \Omega^{1-n} \alpha^{\frac{n+1}{2}} (\varepsilon_s \rho_s)^{\frac{n-1}{2}} C \quad (3.14)$$

$$c = A K \Omega^{1-n} R_m k_m^{1-n/2} \quad (3.15)$$

Como forma de retomar a identificação de cada variável, segue abaixo:

Ω : fator geométrico

τ_0 : tensão de cisalhamento inicial

$\bar{\alpha}$: resistividade média da torta

ε_s : porosidade da torta

ρ_s : massa específica da fase sólida

R_m : resistividade do meio filtrante

k_m : permeabilidade do meio filtrante

A : área de filtração

C : concentração de sólidos na suspensão

K : índice de consistência

n : índice de comportamento

ΔP : diferencial de pressão

Para os experimentos de estimação de parâmetros foram utilizados os dados dos fluidos de perfuração preparados no laboratório de acordo com a malha experimental de dois fatores em dois níveis, com uma pressão de 300 psi e temperatura de 30°C, os mesmos fluidos utilizados na validação da automação da célula proposta.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados da caracterização reológica dos fluidos utilizados, assim como os dados obtidos na validação da célula proposta, além do resultado da estimativa dos parâmetros de filtração com o modelo proposto.

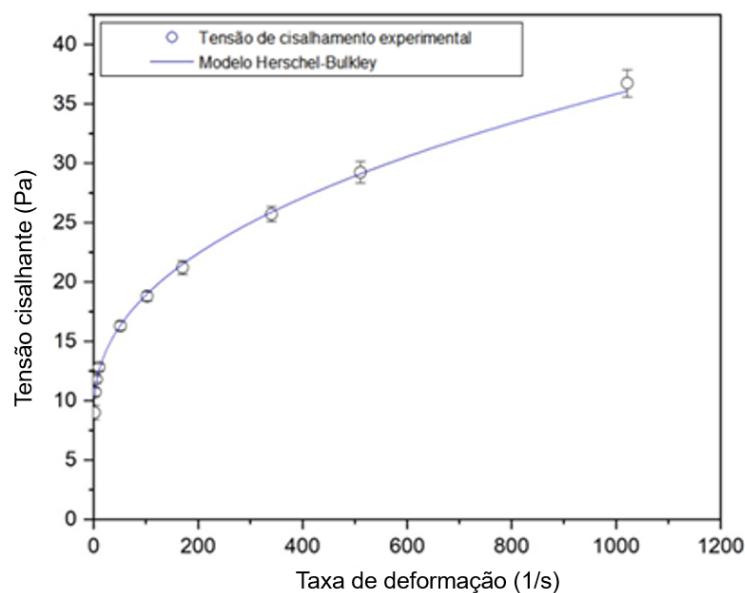
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para cada validação realizada será primeiro apresentado o comportamento reológico do fluido testado e, em seguida, o resultado da comparação entre o volume de filtrado obtido em nas células de filtração utilizadas, percorrendo cada uma das etapas propostas para validação da célula projetada.

4.1.1 Teste de validação em bancada

A Figura 37 apresenta os dados experimentais de tensão de cisalhamento para o fluido base (água/goma xantana) com 2,5 lb/bbl e densidade de 1,15 lb/gal, utilizado na primeira etapa de validação da célula proposta (bancada) e na etapa de validação mecânica da unidade experimental montada.

Figura 37. Ajuste do modelo Herschel-Bulkley à curva média dos pontos experimentais para fluido com 2,5 lb/bbl de GX e 1,15 lb/gal de densidade.



Observa-se que o fluido em questão apresenta comportamento não-Newtoniano seguindo o modelo proposto por Herschel-Bulkley (1926), modelo que de acordo com os dados da literatura tem sido muito utilizado (SARAMITO, 2008). O valor para tensão de cisalhamento

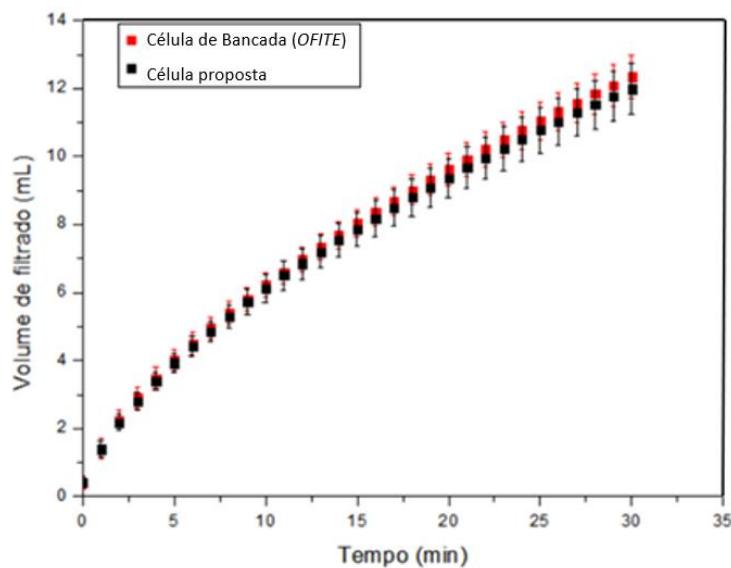
inicial encontrado foi de 8,54 Pa, sendo 1,49 para o índice de consistência e 0,42 índice de comportamento, com um coeficiente de determinação igual a 0,9945 (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para fluido base (água/goma xantana) 2,5 lb/bbl e 1,15 lb/gal.

Parâmetros	
T₀ (Pa)	8,54 ± 0,61
K (Pa.sⁿ)	1,49 ± 0,34
n	0,42 ± 0,03
R²	0,9945

O gráfico da Figura 38 traz a comparação entre os volumes de filtrado obtidos tanto com a célula de referência (*OFITE*), quanto com a célula proposta quando operando na bancada, de acordo com a primeira etapa de validação proposta. Os pontos experimentais em preto representam os volumes médios de filtrado executados usando-se a célula de filtração projetada, enquanto os pontos experimentais em vermelho representam os resultados obtidos na célula de filtração de bancada da *OFITE*, considerados como referência.

Figura 38. Resultados preliminares de volume de filtrado médio por tempo de teste e seus respectivos desvios padrões para fluido base água com 2,5 lb/bbl de GX e 1,15 lb/gal de densidade.



Cada ponto experimental representa a média de dez réplicas, tanto na célula projetada como na célula comercial de bancada. É possível observar nos dados demonstrados no gráfico acima que no início da filtração a célula projetada apresentou volumes de filtrado muito próximos aos volumes da célula de referência, uma vez que os pontos se sobrepõem. Após aproximadamente 10 minutos a célula comercial apresentou valores um pouco maiores de

volume de filtrado que a célula proposta. Observando a magnitude dos desvios experimentais em cada ponto, os resultados foram considerados satisfatórios, concluindo-se que ambas as células executaram ensaios de filtração similares.

Para comprovar a semelhança estatística entre os volumes de filtrado obtidos em cada uma das células, aplicou-se o teste t com um nível de confiança de 95% no último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as duas células (Tabela 4), após verificar a normalidade das amostras. Nesse tipo de teste, se estabelece que a hipótese nula é a de que não há diferença estatística entre os grupos comparados, enquanto a hipótese alternativa considera uma diferença estatística (FERREIRA e PATINO, 2015).

Ainda segundo os mesmos autores, calcula-se então a estatística de teste como sendo uma medida numérica padronizada da diferença entre os grupos e, em seguida, obtém-se o valor-p que é, por sua vez, definido como sendo a probabilidade de se observar um valor da estatística de teste maior ou igual ao encontrado. No caso dos experimentos em questão é possível afirmar que as duas células produziram um volume de filtrado final médio estatisticamente igual, uma vez que o valor p é igual a 0,262, ou seja, a probabilidade de se encontrar um valor maior ou igual ao valor da estatística do teste é de 26,2%. Dessa forma, aceita-se a hipótese nula, ou seja, considera-se que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias dos volumes de filtrado testadas, com um nível de significância de 5%.

A variância em relação ao volume de filtrado apresentada pela célula proposta foi maior que a variância do volume de filtrado obtido pela célula de referência, indicando que a célula de referência produz uma menor variabilidade de volume de filtrado.

Tabela 4. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.

Grandezas	Proposta	Bancada
Média	12,00	12,35
Variância	0,55	0,39
Réplicas	10	10
Graus de liberdade	18	
Valor p	0,262	

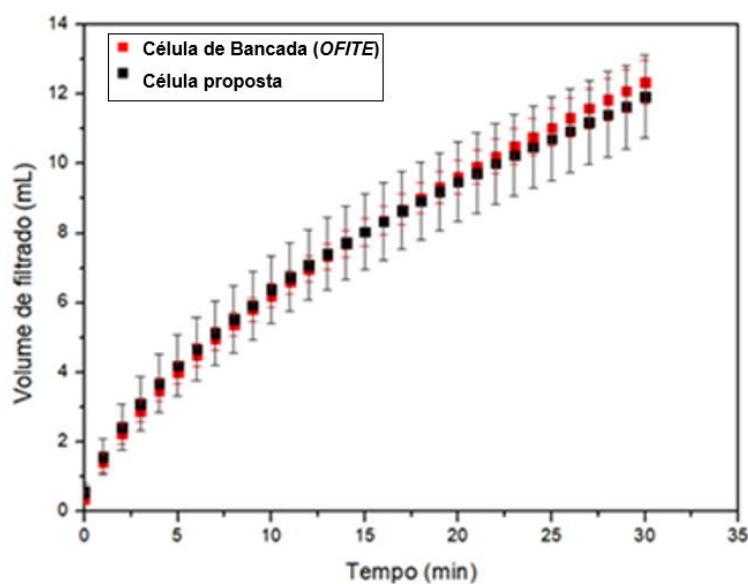
4.1.2 Validação da célula proposta instalada no *skid* operando mecanicamente

Para validação mecânica, foram comparados os resultados de volume de filtrado produzidos na célula de bancada (referência) com os volumes obtidos na célula instalada na unidade experimental (*skid*), com o intuito de validar a montagem da unidade e procedimento experimental antes mesmo de se realizar a automação da célula. Foi utilizado um fluido com a mesma composição da validação em bancada, ou seja, 2,5 lb/bbl de GX e de densidade de 1,15lb/gal, com 300 psi de pressão, temperatura de 30°C e densidade média de 1,36 c/cm³.

Novamente, o gráfico (Figura 39) traz o valor médio do volume de filtrado de dez experimentos, obtidos nas células de filtração. Neste caso, os valores de volume médio para a célula proposta instalada na unidade experimental estão representados novamente pelos pontos experimentais em preto, enquanto os pontos em vermelho representam os pontos experimentais obtidos na célula de referência.

Assim como na validação em bancada, os pontos experimentais sobrepõem-se durante a filtração, se distanciando apenas nos dez minutos finais do teste, mas mantendo as barras de desvios sobrepostas, indicando que estatisticamente os volumes de filtrado podem ser considerados semelhantes. Nesta bateria de experimentos, a célula proposta novamente apresentou uma variância maior que a célula de referência.

Figura 39. Resultados preliminares de volume de filtrado médio por tempo de teste e seus respectivos desvios padrões.



Como forma de comparar os volumes de filtrado obtidos foi aplicado novamente o teste t (Tabela 5), após verificação da distribuição normal dos dados, tendo como resultado um valor p igual a 0,432, ou seja, maior que o nível de significância (5%), tornando possível afirmar que os volumes produzidos nas duas células são estatisticamente semelhantes, validando a montagem da unidade experimental e a célula proposta nela inserida.

Tabela 5. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.

Grandezas	Proposta	Bancada
Média	12,04	12,35
Variância	0,82	0,39
Réplicas	5	10
Graus de liberdade	14	
Valor p	0,432	

4.1.3 Validação da célula instalada no skid com suspensões de goma xantana em diferentes concentrações

Para a segunda etapa de validação, na qual são utilizadas diferentes composições para as suspensões testadas, o comportamento do fluido base para as soluções de 1,0 e 1,5 lb/bbl de GX está descrito nas

Figura 40 e

Figura 41. Novamente é possível descrever o comportamento do fluido utilizando o modelo de Herschel-Bulkley.

O comportamento observado anteriormente é mantido e como esperado, o fluido com uma maior concentração apresenta também maiores tensões de cisalhamento sob uma mesma taxa de cisalhamento. O mesmo fluido é utilizado também na validação da abertura automatizada.

Figura 40. Ajuste do modelo Herschel-Bulkley à curva média dos pontos experimentais das soluções com concentrações de 1,0 lb/bbl e 1,5 lb/bbl de goma xantana.

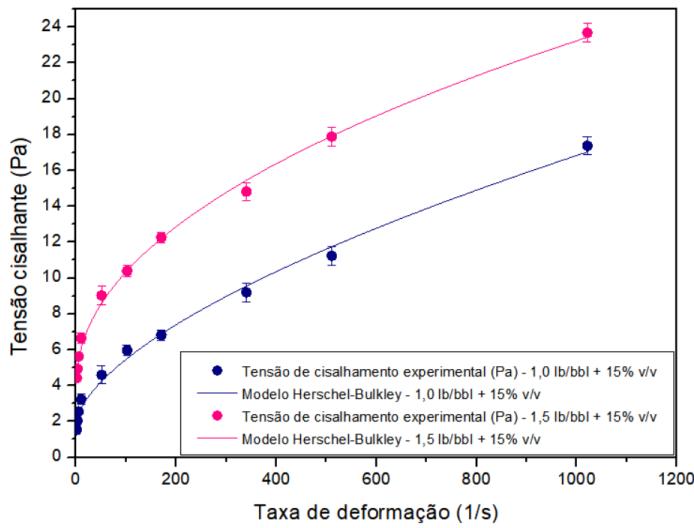
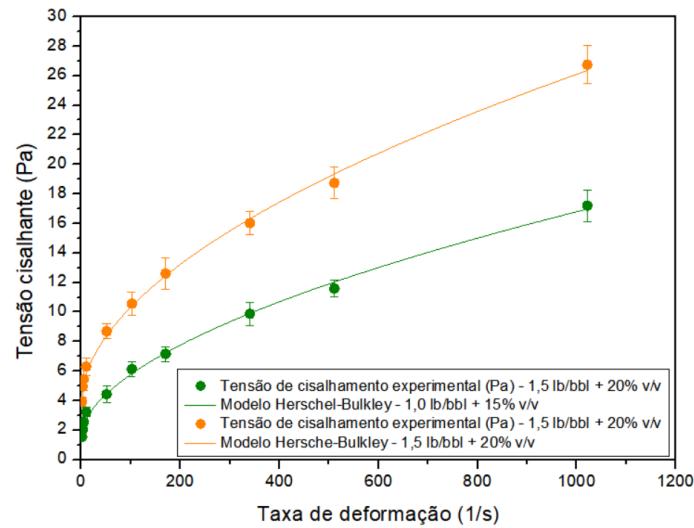


Figura 41. Ajuste do modelo Herschel-Bulkley à curva média dos pontos experimentais das soluções com concentrações de 1,0 lb/bbl + 20% v/v e de 1,5 lb/bbl + 20% v/v.



Abaixo são apresentados os parâmetros reológicos encontrados para cada composição dos fluidos testados (Tabela 6), assim como o valor médio das densidades dos fluidos (Tabela 7).

Tabela 6. Parâmetros reológicos dos fluidos com 1,0 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita) e 1,5 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita).

Parâmetros	Composição			
	1,0 lb/bbl + 15% v/v	1,5 lb/bbl + 15% v/v	1,0 lb/bbl + 20% v/v	1,5 lb/bbl + 20% v/v
T₀ (Pa)	1,86 ± 0,32	4,00 ± 0,38	1,59 ± 0,27	4,00 ± 0,37
K (Pa.sⁿ)	0,21 ± 0,07	0,69 ± 0,15	0,32 ± 0,07	0,52 ± 0,11
n	0,62 ± 0,05	0,48 ± 0,03	0,56 ± 0,03	0,54 ± 0,03
R²	0,9913	0,9957	0,9952	0,9959

Tabela 7. Densidade média os fluidos de composição 1,0 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita), 1,5 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita), 1,0 lb/bbl (GX) + 20% v/v (barita) e 1,5 lb/bbl (GX) + 20% v/v (barita).

Densidade	Composição			
	1,0 lb/bbl + 15% v/v	1,5 lb/bbl + 15% v/v	1,0 lb/bbl + 20% v/v	1,5 lb/bbl + 20% v/v
média (g/cm³)	1,35	1,36	1,45	1,44

A seguir serão analisadas as curvas de filtração para cada comparação descrita acima. Na Figura 42 estão apresentadas as curvas de filtração obtidas em cada equipamento testado, com uma suspensão de 1,0 lb/bbl (GX) e 15% v/v (barita). Observa-se que a célula de bancada (*OFITE*) produziu volumes de filtrado ligeiramente superiores aos volumes produzidos pela célula automatizada e desvios maiores também. A Tabela 8 traz os resultados do teste t aplicado no último ponto experimental dos volumes de filtrado obtidos em cada célula, buscando avaliar se os volumes finais podem ser considerados estatisticamente iguais.

Figura 42. Curvas de filtração para suspensão de 1,0 lb/bbl (GX) e 15% v/v (barita) nas duas células.

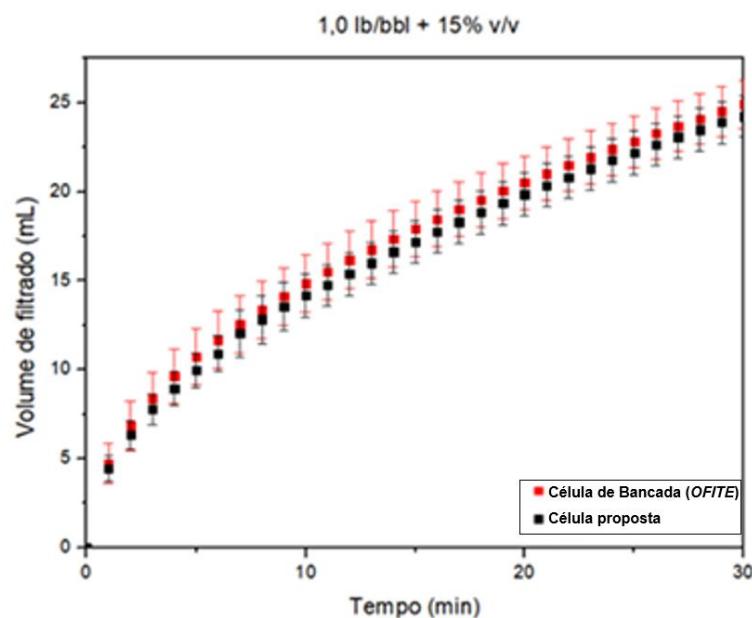


Tabela 8. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.

Grandezas	Proposta	Bancada
Média	24,23	24,91
Variância	1,37	1,84
Réplicas	3	3
Graus de liberdade	4	
Valor p	0,551	

Nestas condições, o valor p (0,551) é também maior que o nível de significância, tornando possível afirmar que as médias obtidas em cada célula podem ser consideradas estatisticamente semelhantes, além disso, nota-se que as variâncias se mostraram próximas, indicando que os dois equipamentos reproduzem uma variabilidade semelhante nos experimentos de filtração.

Ao se comparar os volumes de filtrado obtidos nas duas células com uma suspensão de 1,0 lb/bbl e 20% v/v o comportamento observado anteriormente se altera, pois neste caso a célula automatizada produz um volume de filtrado maior que a célula de bancada a partir dos 8 minutos após ter sido iniciada a filtração (Figura 43).

Figura 43. Curvas de filtração para suspensão de 1,0 lb/bbl (GX) e 20% v/v (barita) nas duas células.

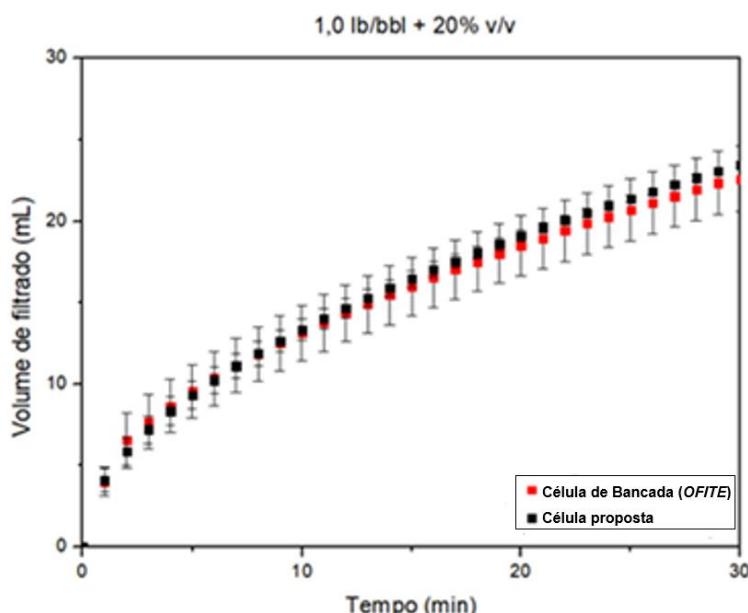


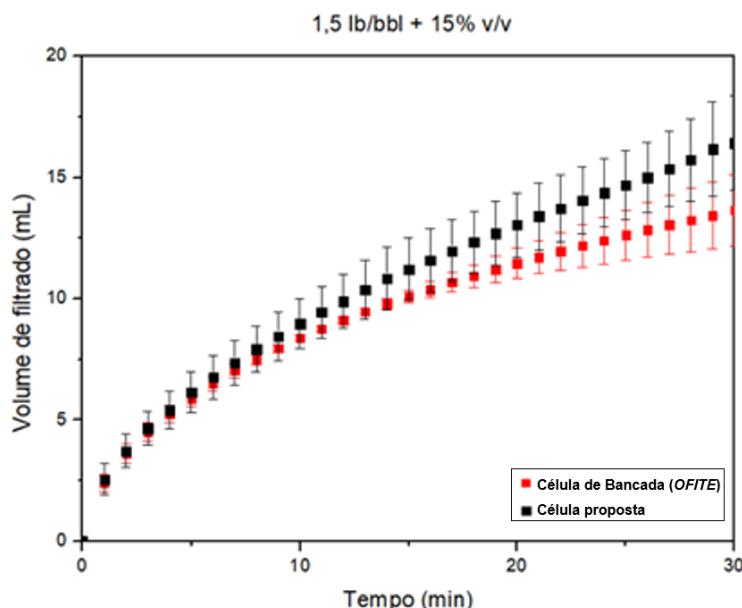
Tabela 9. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.

Grandezas	Proposta	Bancada
Média	23,45	22,58
Variância	4,08	0,02
Réplicas	3	3
Graus de liberdade	4	
Valor p	0,500	

A Tabela 9 traz os resultados do teste t aplicado no último ponto experimental dos volumes de filtrado obtidos em cada célula e, novamente, os volumes de filtrado podem ser considerados semelhantes.

Quando se trata da suspensão de 1,5 lb/bbl (GX) e 15% v/v (barita) os volumes de filtrado finais mostraram-se mais distantes quando comparados com os outros volumes de filtrado nas outras condições do planejamento experimental, tendência observada logo no início da filtração (Figura 44).

Figura 44. Curvas de filtração para suspensão de 1,5 lb/bbl e 15% v/v nas duas células.



Apesar disso, as médias passaram no teste t (Tabela 10), uma vez que o valor p (0,118) encontrado foi maior que 5% (nível de significância). Esse ponto do planejamento experimental

foi refeito buscando-se corrigir alguma variação no procedimento experimental, no entanto o mesmo comportamento foi encontrado. Além da diferença em relação aos volumes de filtrado encontrados nestas condições, a variância também se mostrou a maior entre as variâncias obtidas em todos os casos. O aumento do desvio da célula proposta pode ser atribuído à passagem de fluido de perfuração na unidade experimental.

Tabela 10. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.

Grandezas	Proposta	Bancada
Média	16,43	13,64
Variância	3,75	2,18
Réplicas	3	3
Graus de liberdade	4	
Valor p		0,118

Finalizando a malha experimental, a suspensão de 1,5 lb/bbl (GX) e 20% v/v (barita) foi aquela que produziu a média dos volumes de filtrado mais próximos durante toda a filtração, sendo que nos últimos 5 minutos finais de filtração os pontos experimentais se sobrepuiseram e as médias dos volumes finais foram quase idênticas, diferindo apenas na segunda casa decimal (Tabela 11). Neste caso, os desvios padrão da célula proposta se mostraram significativamente menores que os desvios da célula de referência (Figura 45).

Figura 45. Curvas de filtração para suspensão de 1,5 lb/bbl (GX) e 20% v/v (barita) nas duas células.

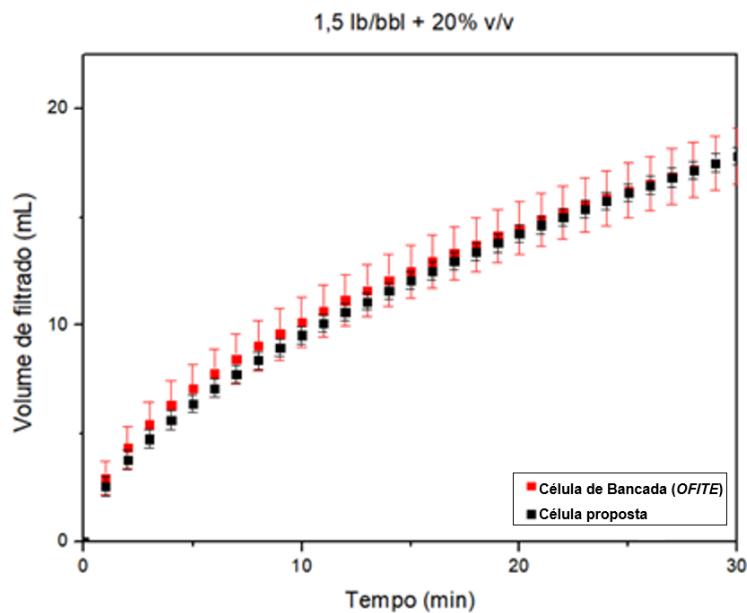
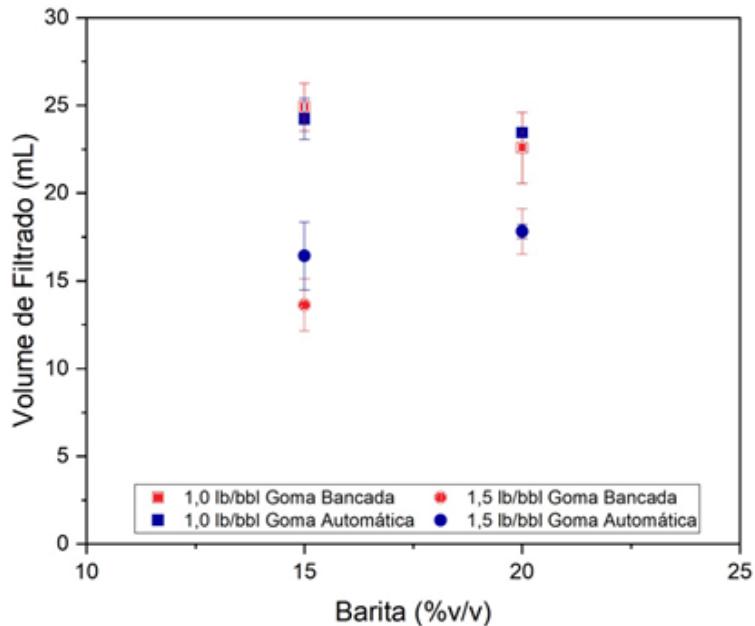


Tabela 11. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.

Grandezas	Proposta	Bancada
Média	17,83	17,81
Variância	0,17	1,69
Réplicas	3	3
Graus de liberdade	4	
Valor p	0,978	

A Figura 46 traz um resumo dos volumes de filtrado finais obtidos a partir do planejamento experimental proposto (triplicatas em todos os pontos com 1,0 e 1,5 lb/bbl de concentração de goma xantana e 15% e 20% v/v de barita) para as duas células analisadas. Para a célula proposta, denominada de “automática” os pontos experimentais estão representados pela cor azul, um quadrado para a concentração de 1,0 lb/bbl (GX) e um círculo para a concentração de 1,5 lb/bbl (GX). Enquanto para a célula de referência (bancada), é utilizado, respectivamente, um quadrado sem preenchimento de borda na cor vermelha para concentração de 1,0 lb/bbl (GX) e um círculo com as mesmas características para a concentração de 1,5 lb/bbl (GX).

Figura 46. Análise do efeito da variação da concentração de sólidos e de goma xantana em cada uma das células.



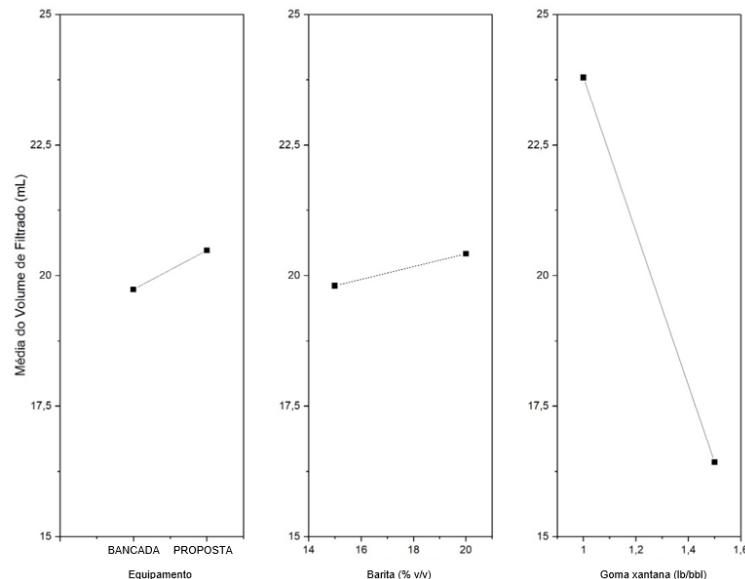
Para a combinação de 1,0 lb/bbl (GX) e 15% v/v (barita) observa-se um volume de filtrado próximo de 25 mL nas duas células utilizadas, mas ao se aumentar a concentração de goma xantana do fluido testado para 1,5 lb/bbl (GX), mantendo-se a concentração de sólidos, há uma diminuição do volume de filtrado obtido, como era esperado, sendo os valores encontrados neste caso em torno de 15 mL. Tal observação evidencia que um aumento na concentração de viscosificante, diminui o volume de filtrado produzido, conforme descrito por Amorim *et al.* (2014).

Quando se trata de suspensões com 20% v/v de concentração de sólidos é possível observar o mesmo comportamento descrito acima, no entanto os volumes de filtrado encontrados estão mais próximos que no caso anterior. Neste caso a concentração de sólidos maior contribuiu para a formação de um volume de filtrado menor.

Como forma de avaliar a variação do volume de filtrado em relação aos fatores trabalhados a partir do planejamento experimental, os gráficos da Figura 47 foram propostos. No primeiro deles é avaliado o volume de filtrado final obtido em cada célula testada, por meio da média dos volumes de filtrado encontrados independentemente das composições das suspensões testadas, ou seja, são comparados todos os volumes de filtrado obtidos na célula proposta (nomeada como Proposta no gráfico) com todos os volumes de filtrado obtidos após execução do planejamento experimental para a célula de referência (Bancada).

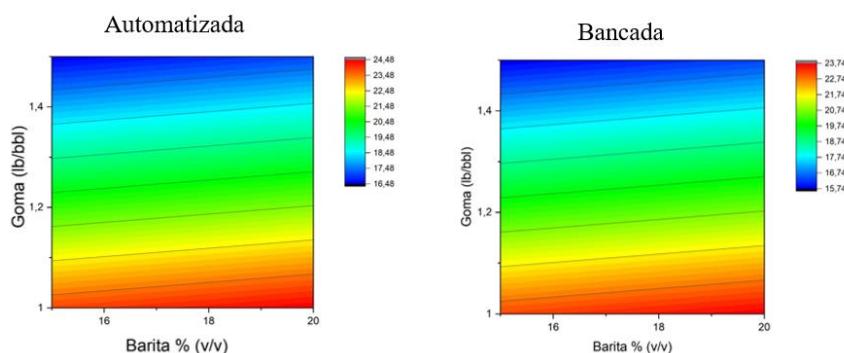
O volume de filtrado da célula proposta mostrou-se ligeiramente superior ao volume de filtrado da célula da Bancada, reafirmando o comportamento observado ao longo das comparações entre os volumes de filtrado de acordo com as condições do planejamento experimental.

Figura 47. Média do volume de filtrado final em relação aos dois equipamentos empregados e às duas diferentes concentrações de barita e de goma xantana utilizadas, respectivamente.



Os gráficos de contorno abaixo (Figura 48) reafirmam o comportamento descrito acima, uma vez que são muito semelhantes entre si, indicando que as duas células se comportaram de forma semelhante diante do planejamento experimental. Foram produzidos volumes de filtrado menores em concentrações maiores de goma xantana, indicado pela cor azul, assim como os maiores volumes de filtrado foram produzidos com menores concentrações do viscosificante, faixa vermelha no gráfico.

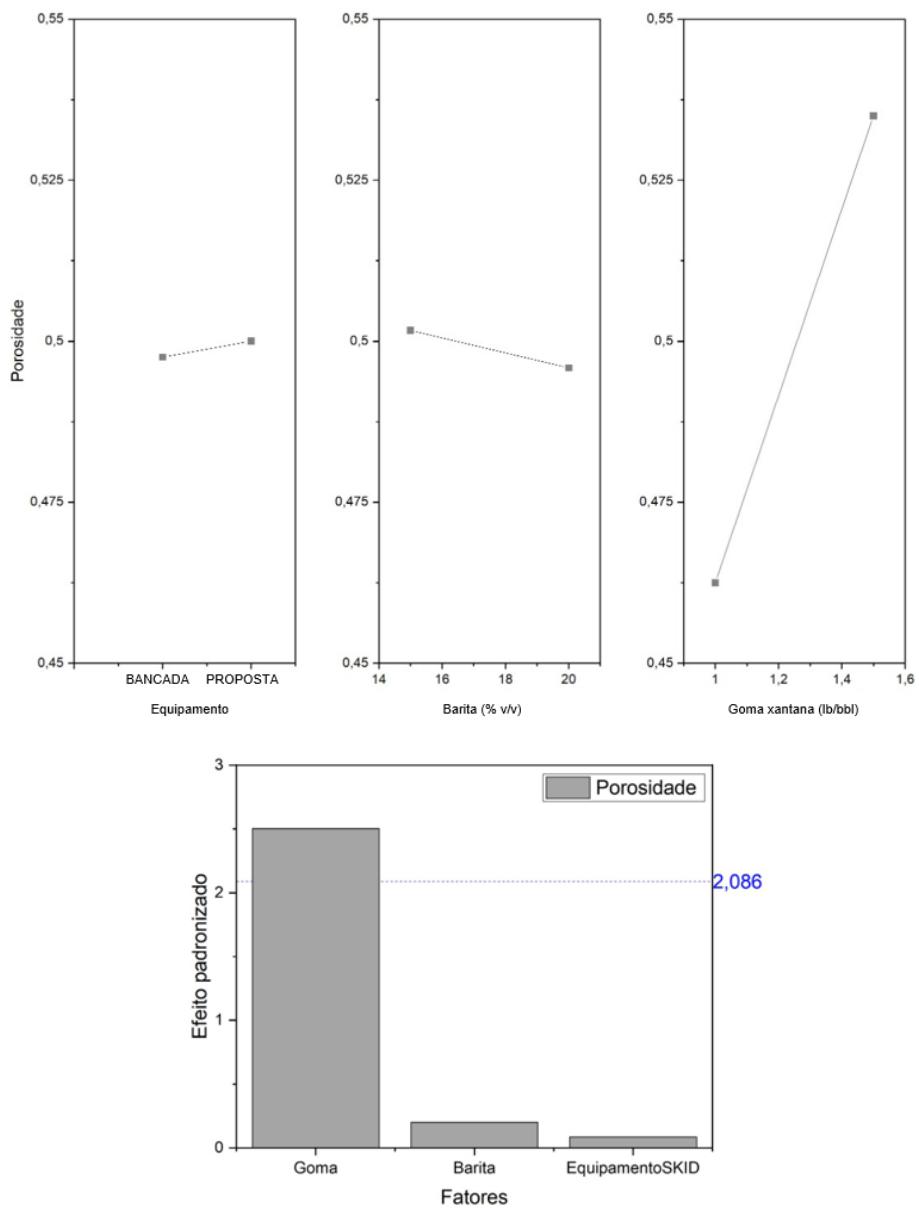
Figura 48. Gráficos de contorno para cada célula e diagrama de Pareto para os efeitos testados.



Como forma de explorar as interações entre as variáveis analisadas os gráficos abaixo foram propostos. O primeiro deles traz a variação da porosidade com a célula utilizada, com a

concentração de sólidos e com a variação de goma xantana (Figura 49). Neste gráfico percebe-se que não houve uma variação em relação à porosidade obtida a partir das tortas formadas em cada célula, assim como também não houve um impacto expressivo sobre a porosidade causado pela adição de barita. Mas nota-se que houve um incremento no valor da porosidade como aumento da concentração de goma xantana, explicado pelo aumento das ligações entre as cadeias poliméricas. O gráfico de Pareto confirma a afirmação anterior, uma vez que apenas a barra representando a concentração de goma xantana ultrapassa a linha de referência de valor de 2,086, a qual indica qual parâmetro tem relevância estatística na variável analisada.

Figura 49. Variação da porosidade com a célula utilizada, a concentração de sólidos e de goma xantana e diagrama de Pareto para avaliar a influência dos fatores estudados na porosidade obtida.



Abaixo são apresentadas (Figura 50), a título de exemplo, as tortas de filtração formadas nas duas células de filtração com a suspensão de 1,0 lb/bbl (GX) e 15% v/v (barita), nota-se que as tortas formadas eram semelhantes.

Figura 50. Tortas de filtração úmidas e secas, respectivamente, obtidas em ambas as células para o fluido de concentração de 1,0 lb/bbl (GX) e 15% v/v de barita.



Utilizando-se a técnica de gravimetria, a porosidade das tortas obtidas a partir das filtrações definidas pelo planejamento experimental foram calculadas e seus valores estão presentes na Tabela 12. Neste caso, também foi aplicado o teste t para comparar as médias obtidas e o p valor encontrado foi de 0,165, maior que o nível de significância de 5%, concluindo-se que as porosidades encontradas podem ser consideradas semelhantes estatisticamente.

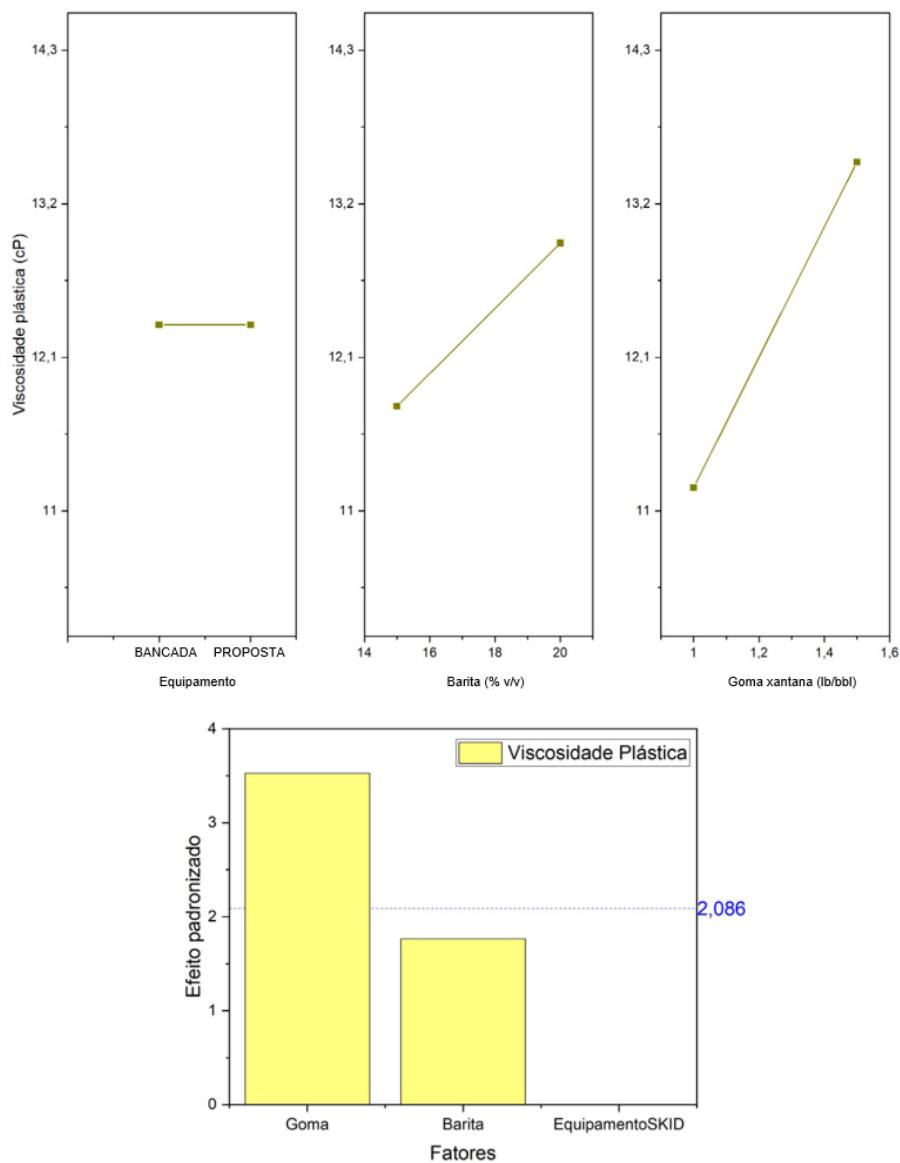
Tabela 12. Dados referentes às tortas de filtração obtidas nas células OFITE e automatizada de acordo com o planejamento experimental.

Célula	Porosidade média	Desvio	Incerteza
Referência	0,53	0,02	0,05
Proposta	0,56	0,05	0,11

O segundo gráfico (Figura 51) analisa os efeitos das variáveis sobre a viscosidade plástica e neste caso não houve influência sobre ela em relação ao equipamento utilizado, como era de se esperar, uma vez que foram utilizados os mesmos fluidos nos equipamentos. O

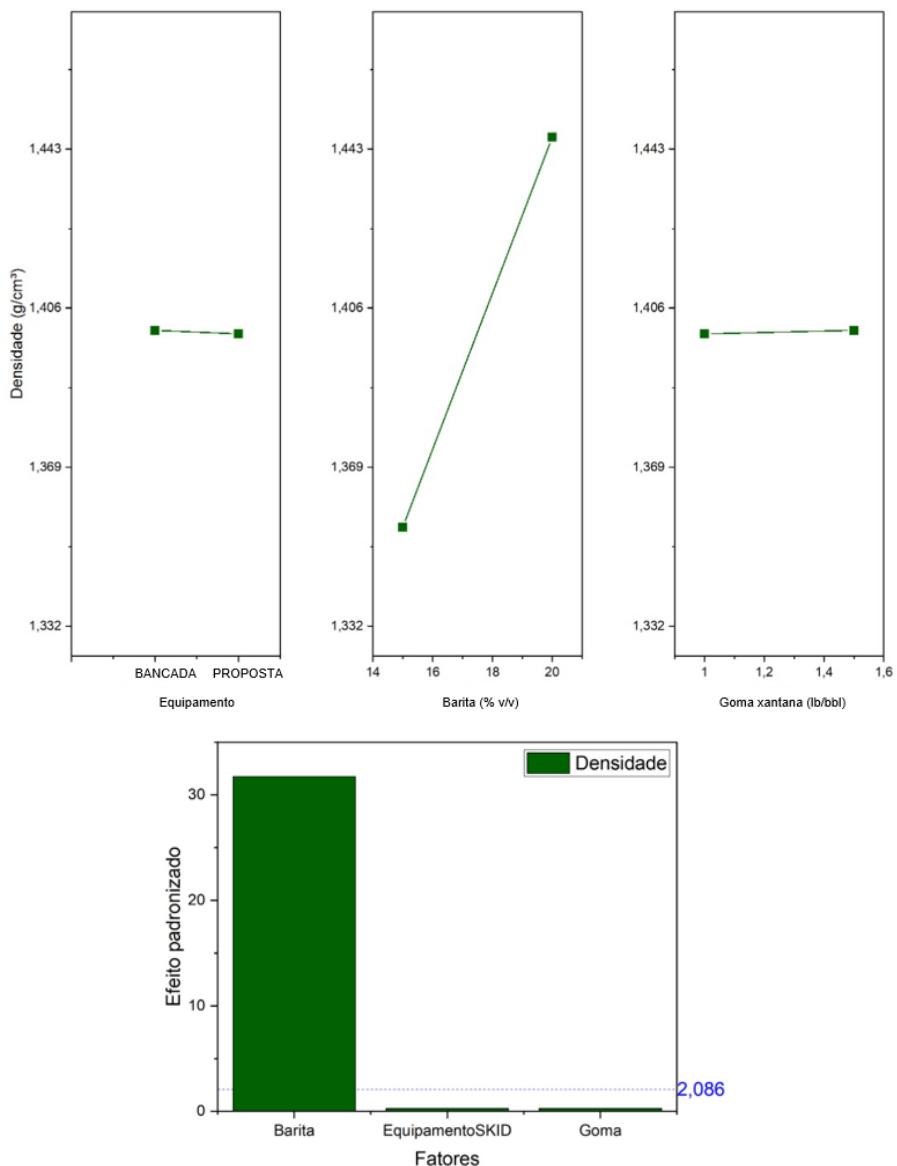
diagrama de Pareto indica que apenas a goma xantana teve influência na viscosidade plástica analisada, comportamento esperado já que a viscosidade plástica mede a resistência interna exercida por um fluido para fluir, logo ao se aumentar a dosagem do agente viscosificante espera-se que haja um aumento na viscosidade plástica medida (DEHGHANPOUR; KURU, 2011).

Figura 51. Variação da viscosidade plástica com a célula utilizada, a concentração de sólidos e de goma xantana e diagrama de Pareto para avaliar a influência dos fatores na viscosidade plástica observada.



Por fim, a mesma análise foi feita a respeito da densidade (Figura 52) e conclui-se que apenas a barita teve influencia sobre a densidade, como era esperado, pois a barita age como um agente adensante nos fluidos de perfuração além de auxiliar no processo de controle de pressão no interior do poço (AMORIM *et al.*, 2005)

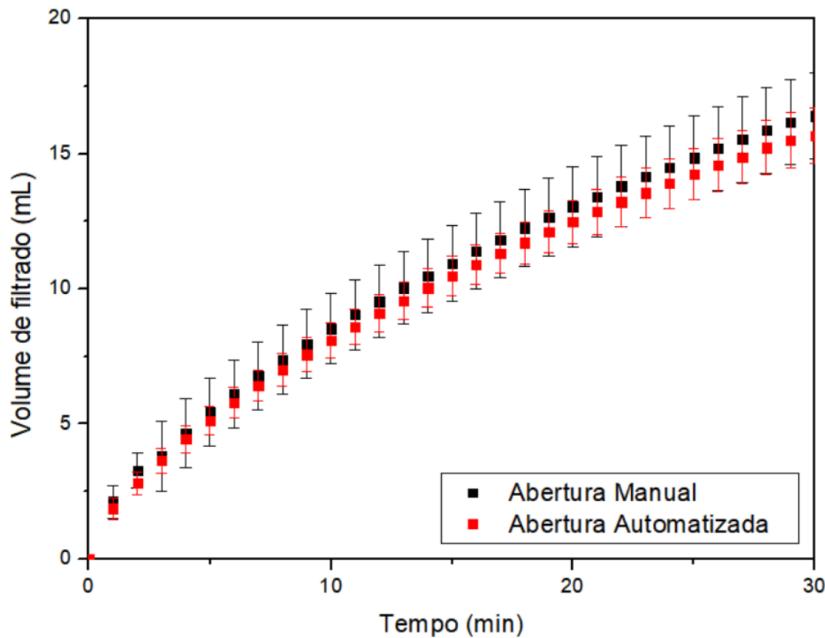
Figura 52. Variação da densidade com a célula utilizada, a concentração de sólidos e de goma xantana e diagrama de Pareto para avaliar a influência dos fatores estudados na densidade obtida.



4.1.4 Validação da célula instalada no *skid* aberturas manual e automática

Após a validação da operação on line da célula proposta, foram realizadas algumas corridas experimentais buscando validar a troca da abertura manual da célula de filtração, pela abertura automatizada. Os volumes de filtrado obtidos na célula proposta com os dois tipos de válvula de abertura testados estão presentes no gráfico abaixo (Figura 53). O fluido utilizado nesta etapa foi o mesmo utilizado na etapa anterior com 1,5 lb/bbl (goma xantana) e 15% v/v (barita), o qual já teve seu comportamento reológico apresentado.

Figura 53. Resultados preliminares de volume de filtrado médio por tempo de teste e seus respectivos desvios padrões.



Havia uma preocupação em relação a um possível acúmulo na célula automatizada, que poderia afetar o valor dos volumes de filtrado obtidos, uma vez que na instalação da válvula automática, conforme a proposta do trabalho, utilizava a válvula manual como suporte, sendo a mesma mantida aberta. Preocupava-se que desta forma a filtração já fosse iniciada logo após a pressurização do sistema, formando um *spurt-loss* antes mesmo de se dar início à filtração com a abertura da válvula automática, produzindo desta forma um volume de filtrado maior.

Entretanto pelos resultados obtidos, assim como pelo teste t é possível afirmar que os volumes de filtrado finais produzidos podem ser considerados iguais estatisticamente validando a abertura automatizada da célula de filtração. Pode-se observar também que a abertura manual produz maiores desvios quando comparada à abertura automatizada, além de valores médios de volume de filtrado superiores (Tabela 13).

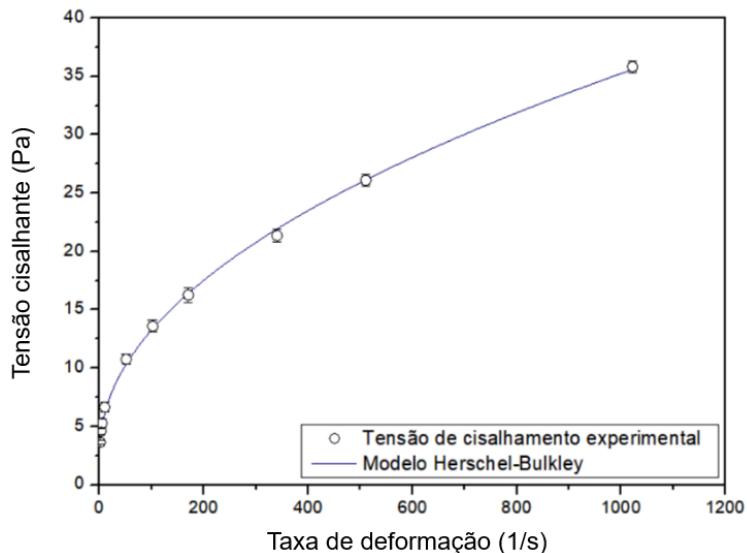
Tabela 13. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.

Grandezas	Automatizada	Manual
Média	15,67	16,41
Variância	1,05	2,45
Réplicas	7	7
Graus de liberdade	12	
Valor p		0,318

4.1.5 Fluido de perfuração completo

Para completar a fase de testes de validação da célula de filtração, foram executados ensaios com um fluido de perfuração completo cedido pelo Cenpes. A Figura 54 abaixo apresenta a curva reológica do fluido que apresenta o comportamento de um fluido Herschel-Bulkley.

Figura 54. Ajuste do modelo Herschel-Bulkley à curva média dos pontos experimentais da suspensão denominada como fluido completo.



Para a pressão de 300 psi, o volume de filtrado durante toda a filtração na célula proposta foi superior ao volume de filtrado obtido na célula de referência (Figura 55), mas o teste t aplicado (Tabela 14) permite afirmar que as duas células produziram um volume de filtrado

final estatisticamente semelhante, uma vez que o valor-p permite considerar a hipótese nula como verdadeira. A variância produzida por cada célula possui o mesmo valor de 0,02.

Figura 55. Volume de filtrado médio com uma função do tempo para filtração a 300 psi nas células analisadas.

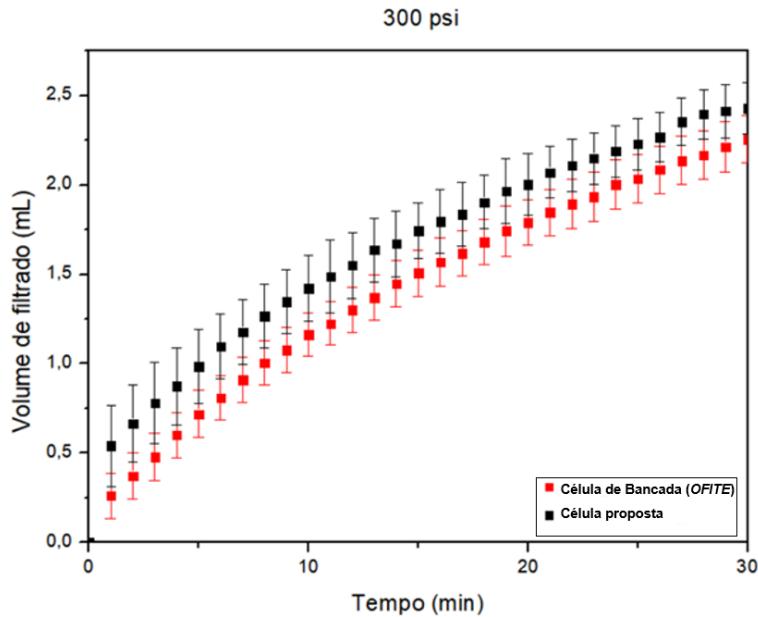
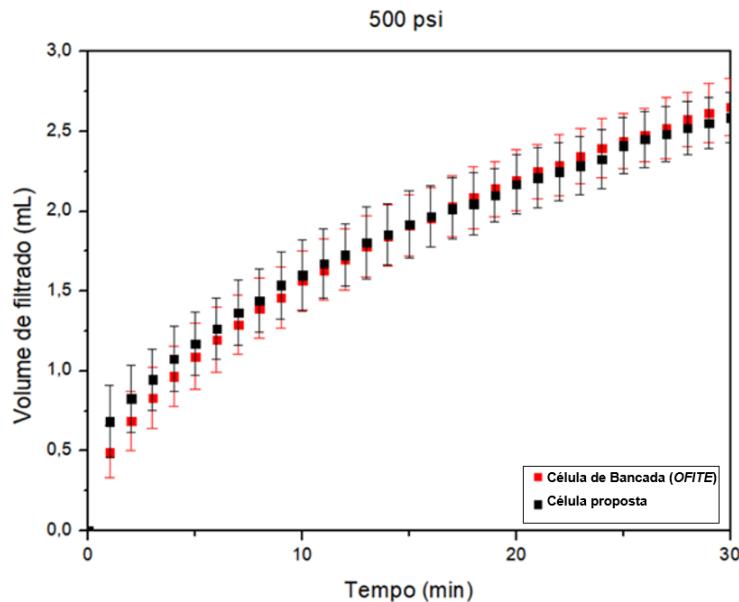


Tabela 14. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.

Grandezas	Proposta	Bancada
Média	2,43	2,26
Variância	0,02	0,02
Réplicas	3	3
Graus de liberdade	4	
p-valor	0,199	

As curvas de filtração a 500 psi estão apresentadas abaixo (Figura 56), neste caso há uma inversão das curvas de filtração, no início da filtração a célula automatizada produziu um volume médio de filtração superior aos volumes produzidos pela célula da *OFITE*, mas a partir dos dez minutos de filtração os volumes se tornam mais próximos, para no final da filtração ocorrer a inversão desse comportamento.

Figura 56. Volume de filtrado médio a 500 psi para as células analisadas.



Como já era de se esperar pelo comportamento demonstrado no gráfico acima, as médias dos volumes de filtrado finais das duas células podem ser consideradas estatisticamente iguais (Tabela 15), uma vez que o valor *p* encontrado é maior que o nível de significância (5%). Novamente as variâncias de cada célula são muito semelhantes entre si.

Tabela 15. Resultado do teste *t* aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.

Grandezas	Proposta	Bancada
Média	2,59	2,65
Variância	0,02	0,03
Réplicas	3	3
Graus de liberdade	4	
p-valor	0,652	

Por fim, a seguir estão apresentadas as curvas para 700 psi (Figura 57) e, neste caso o comportamento observado das curvas de filtração se assemelha ao comportamento presente nas filtrações de 300 psi. Além das médias dos volumes de filtrado do último ponto experimental também poderem ser consideradas estatisticamente iguais (Tabela 16).

Figura 57. Volume de filtrado médio a 700 psi para as células analisadas.

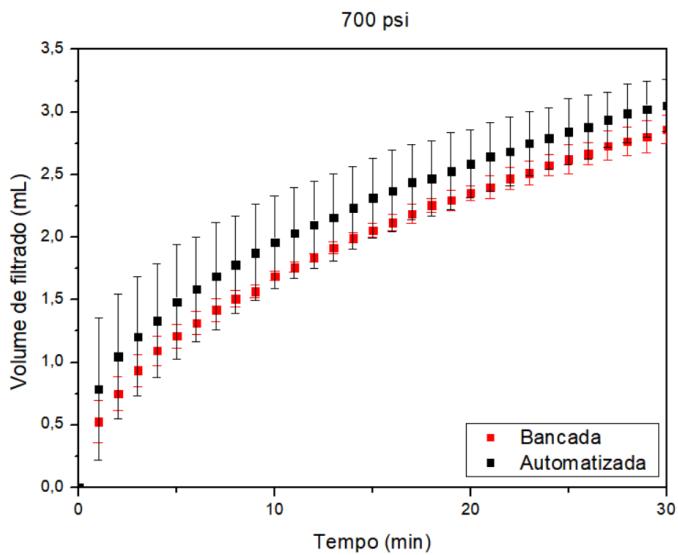
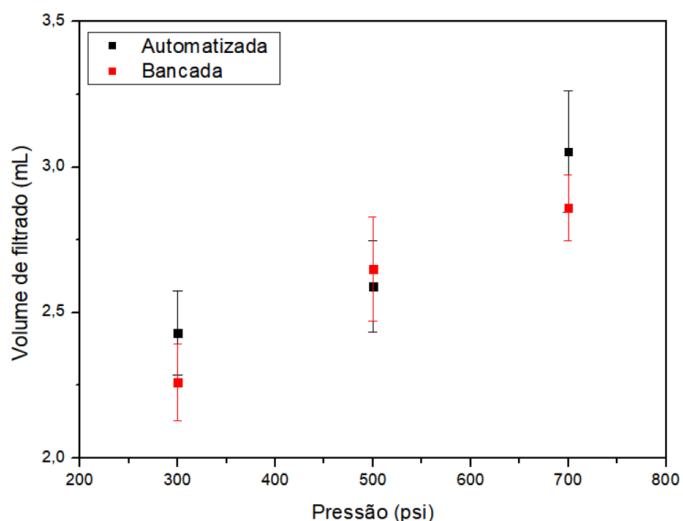


Tabela 16. Resultado do teste t aplicado ao último ponto experimental de volume de filtrado, considerando as réplicas para as duas células.

Grandezas	Automatizada	Bancada
Média	3,05	2,86
Variância	0,21	0,01
Réplicas	3	3
Graus de liberdade	4	
p-valor	0,230	

Figura 58. Análise do efeito da variação da pressão de trabalho nos volumes de filtrado obtidos.



Nota-se que em todas as pressões de trabalho foram produzidos volumes de filtrado os quais os desvios padrão, representados pela barra de erros, se sobrepujaram indicando que tais volumes médios podem ser considerados iguais. Percebe-se também que à medida que a pressão de trabalho aumenta, há um aumento no volume de filtrado obtido pelas duas células.

4.2 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DO MODELO ADAPTADO DE CASTRO (1981)

Com o objetivo de complementar os resultados gerados na automação da célula de filtração, tem-se a proposta de acoplar a saída de dados a um ajuste de modelo do comportamento utilizando o modelo de Castro adaptado para o fluido com comportamento Herschel-Bulkley.

A seguir serão apresentados os resultados da estimação de parâmetros do modelo adaptado de Castro (1981), ou seja, o modelo que segue a mesma proposta de dedução do modelo originalmente enunciado por Castro, mas que considera fluidos com comportamento descritos pelo modelo de Herschel-Bulkley, ao invés de fluidos com comportamento descrito pelo modelo Power Law. O planejamento experimental deu origem às combinações: 1,0 lb/bbl (GX) e 15% v/v (barita), 1,0 lb/bbl (GX) e 20% (barita), 1,5 lb/bbl (GX) e 15% (barita) e 1,5 lb/bbl (GX) e 20% v/v (barita) nas duas células utilizadas. Utilizou-se essas combinações para a estimação com o intuito de comprovar a possibilidade de se utilizar a célula de filtração automatizada também para a estimação de parâmetros de filtração, comparando-se mais uma vez os resultados obtidos nela com os resultados da célula de bancada.

Primeiro serão apresentados os gráficos das estimativas de 1,0 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita), seguidos dos gráficos da estimação dos parâmetros de filtração com o fluido de composição 1,0 lb/bbl (GX) + 20% v/v (barita).

Figura 59. Gráfico com o volume de filtrado médio experimental para o fluido com 1,0 lb/bbl (GX) e 15% v/v (barita) de acordo com o planejamento experimental e o ajuste ao modelo adotado.

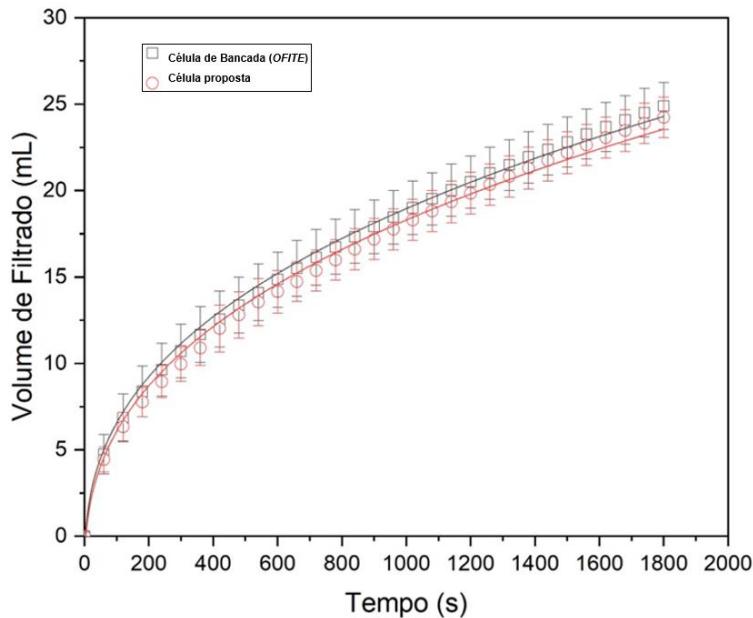
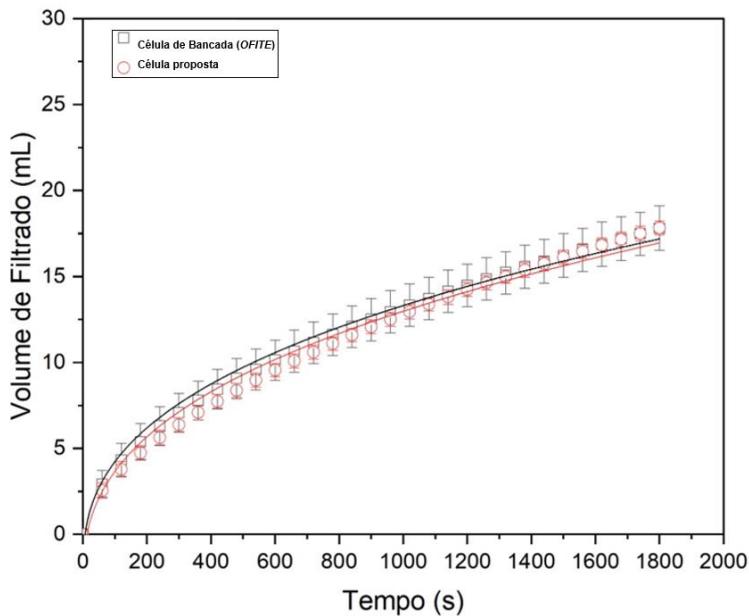


Figura 60. Gráfico com o volume de filtrado médio experimental para o fluido com 1,0 lb/bbl (GX) e 20% v/v (barita) de acordo com o planejamento experimental e o ajuste ao modelo adotado.



Nota-se pelos gráficos (Figura 59 e Figura 60) que os modelos de uma forma geral ajustam de maneira satisfatória os dados experimentais de cada filtração.

Na Tabela 17 estão apresentados os resultados para a estimação dos parâmetros de resistividade média da torta de filtração ($\bar{\alpha}$) e para a resistividade do meio filtrante (R_m), para as soluções de 1,0 lb/bbl (GX) com 15 e 20% v/v (barita). Para realizar a estimação foi utilizado o *software* Origin 8.5 e abaixo estão apresentadas os gráficos trazendo os dados experimentais e modelo de Castro adaptado.

Tabela 17. Valores dos parâmetros obtidos para ambas as células para as soluções de 1,0 lb/bbl de GX.

	1,0 lb/bbl (GX)+ 15% v/v (barita)	1,0 lb/bbl (GX) + 20% v/v (barita)		
Parâmetro	Referência	Proposta	Referência	Proposta
$\alpha \cdot 10^{-12}$ (cm/g)	4,67	4,81	4,80	4,57
$\alpha_{IC} \cdot 10^{-12}$ (cm/g)	4,52 – 4,82	4,63 – 4,99	4,58 – 5,02	4,29 – 4,85
$R_m \cdot 10^{-10}$ (1/cm)	1,54	1,87	2,45	3,16
$R_{m_{IC}} \cdot 10^{-10}$ (1/cm)	1,34 – 1,74	1,63 – 2,11	2,16 – 2,74	2,80 – 3,52

α_{IC} : Valores do intervalo de confiança de “ α ”; $R_{m_{IC}}$: Valores do intervalo de confiança de “ R_m ”;

Nota-se que para a combinação de 1,0 lb/bbl e 15% v/v os valores da resistividade média da torta nas duas células foram bem próximos, com desvios com a mesma ordem de grandeza. Em relação à resistividade do meio, apesar dos valores dos desvios encontrados serem próximos, houve um maior distanciamento entre os valores obtidos para este parâmetro nesta combinação.

Para a combinação seguinte, ou seja, de 1,0 lb/bbl (GX) e 20% v/v(bancada), não houve um aumento expressivo nos valores de resistividade média da torta com o aumento da concentração de sólidos, o mesmo comportamento em relação à ordem de grandeza anteriormente observado, se mantém. Já em relação à resistividade do meio, houve um aumento em relação ao seu valor, principalmente em relação à adição de sólidos, comportamento que não deveria ocorrer, uma vez que o meio filtrante utilizado foi o mesmo.

A seguir são apresentados os gráficos produzidos a partir da filtração dos fluidos de 1,5 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita) (Figura 61) e de 1,5 lb/bbl (GX) + 20% v/v (barita) (Figura 62). Observa-se, novamente, que o modelo se ajusta bem aos dados experimentais e que os parâmetros estimados possuem significância estatística em relação aos fluidos testados. A seguir são apresentados os gráficos que trazem o volume de filtrado médio experimental e a curva do modelo de Castro adaptado.

Figura 61. Gráfico com o volume de filtrado médio experimental para o fluido com 1,5 lb/bbl (GX) e 15% v/v (barita) de acordo com o planejamento experimental e o ajuste ao modelo adotado.

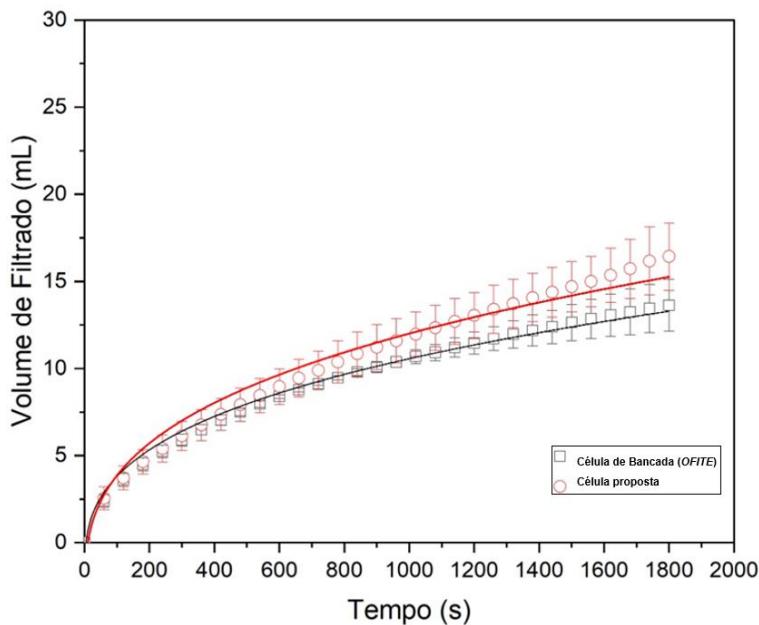
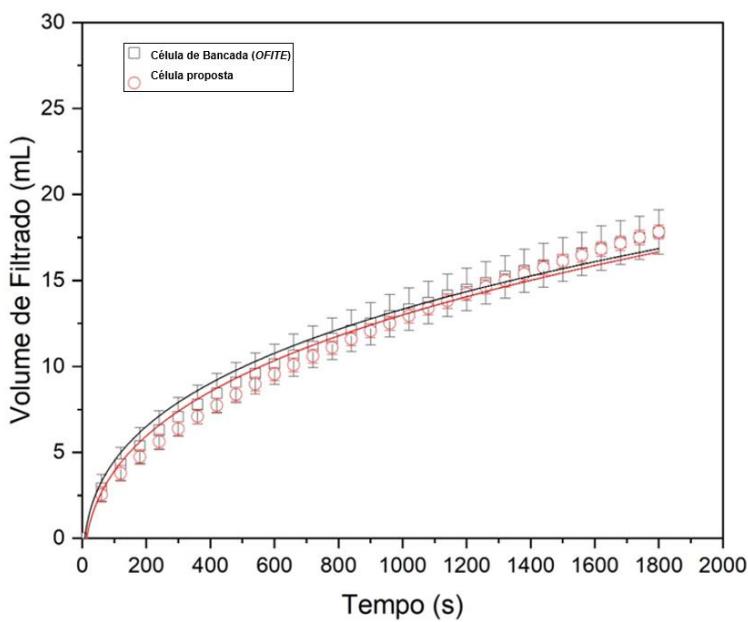


Figura 62. Gráfico com o volume de filtrado médio experimental para o fluido com 1,5 lb/bbl (GX) e 20% v/v (barita) de acordo com o planejamento experimental e o ajuste ao modelo adotado.



Na Tabela 18 a seguir são indicados os parâmetros obtidos na estimativa mencionada acima, podendo afirmar-se que os valores da resistividade média da torta para os fluidos com 15% v/v de concentração de sólidos foi diferente quando comparadas as duas células, apesar de possuírem desvios com a mesma ordem de grandeza. Já para os fluidos com 20% v/v os valores encontrados de resistividade média da torta foram mais próximos do que o comportamento observado com os fluidos de 15% v/v de concentração de sólidos.

Enquanto a resistividade do meio filtrante apresentou valores mais próximos com as duas composições testadas, assim como as células utilizadas.

Tabela 18. Valores dos parâmetros obtidos para ambas as células para as soluções de 1,5 lb/bbl (GX).

	1,5 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita)	1,5 lb/bbl (GX) + 20% v/v (barita)		
Parâmetro	Referência	Proposta	Referência	Proposta
$\alpha \cdot 10^{-12}$ (cm/g)	17,1	13,8	3,69	4,21
$\alpha_{IC} \cdot 10^{-12}$ (cm/g)	16,2 – 17,98	12,76 – 14,84	3,43 – 3,95	3,88 – 4,54
$R_m \cdot 10^{-9}$ (1/cm)	8,93	9,34	8,30	11,2
$R_{m_{IC}} \cdot 10^{-9}$ (1/cm)	7,79 – 10,07	8,14 – 10,54	7,03 – 9,37	9,85 – 12,55

α_{IC} : Valores do intervalo de confiança de “ α ”; $R_{m_{IC}}$: Valores do intervalo de confiança de “ R_m ”;

Baseado nos resultados, nota-se que os parâmetros obtidos nas duas células são semelhantes, permitindo assim que a célula proposta seja utilizada não apenas para a obtenção de dados de volume final de filtrado, mas como também dados de curvas de filtração e de propriedades da torta de filtração.

5 CONCLUSÕES

As principais conclusões a respeito da validação da célula on-line proposta, em cada uma de suas etapas, assim como o estudo de estimativa de parâmetros utilizando um modelo para filtração adaptado são apresentadas neste capítulo. Adicionalmente, são apresentadas as propostas para continuidade da pesquisa na área.

A primeira etapa do trabalho consistiu na validação em bancada da célula proposta, comparando os volumes de filtrados obtidos nela com os volumes obtidos em uma célula de referência da *OFITE*, modelo 171-01-C, amplamente utilizada na literatura. Para isso, utilizou-se um fluido com uma composição que buscava representar um fluido de perfuração real em filtrações nas duas células. Observou-se que os volumes podem ser considerados estatisticamente semelhantes, validando dessa forma o projeto da célula a ser automatizada.

A etapa seguinte consistiu na validação do sistema da unidade experimental, chamada de validação mecânica. Neste caso, objetivava-se verificar se a proposta de montagem do skid era funcional antes mesmo de se executar a automação da célula. Novamente foi utilizada a célula de referência para comparação. Os resultados experimentais de volume de filtrado permitiram a continuidade do trabalho para a etapa seguinte.

Para a automação da célula de filtração on line foi escrito um programa utilizando a linguagem gráfica *LabVIEW*, que permitiu controlar o funcionamento dos equipamentos instalados na unidade experimental, assim como controlar a abertura e fechamento das válvulas automáticas, permitindo a admissão de fluido de perfuração na célula, a pressurização do sistema, assim como a aquisição dos dados de volume de filtrado em tempo real. Nesta etapa a válvula que dava início ao processo de filtração ainda era manual, sendo a etapa seguinte sua substituição por uma válvula automática. Novamente os volumes de filtrados da célula proposta e célula de referência puderam ser considerados semelhantes estatisticamente.

Para completar a automação da célula proposta, foi substituída a válvula manual que inicializava a filtração por uma válvula automática pneumática, do tipo ON-OFF e os resultados experimentais comprovaram que a célula proposta on line produz volume de filtrado que podem ser considerados equivalentes à célula de comparação.

Buscando-se ampliar a validação da célula com outras suspensões, utilizou-se os dados de filtração obtidos com os fluidos de composição 1,0 lb/bbl (GX)+ 15% v/v (barita), 1,0 lb/bbl (GX) + 20% v/v (barita), 1,5 lb/bbl (GX) + 15% v/v (barita) e 1,5 lb/bbl (GX) + 20% v/v (barita). Além disso, os dados de volume de filtrado por tempo foram utilizados para a

estimação de parâmetros de filtração com o modelo de Castro adaptado. Os resultados da estimação comprovaram que a célula proposta pode ser utilizada de forma satisfatória para estimação de parâmetros.

Após a finalização de todas as etapas propostas, foi utilizado um fluido de perfuração completo, fornecido pelo Cenpes com o qual aplicou-se um planejamento experimental no qual foram utilizadas as pressões de 300, 500 e 700 psi, objetivando comprovar a reprodutibilidade dos experimentos na célula automatizada para um fluido real. Os volumes de filtrado obtidos podem, novamente, ser considerados estatisticamente semelhantes comparando-se as duas células.

Pode-se afirmar que a célula proposta possui reprodutibilidade nos experimentos de filtração, pois ela foi validada em cada uma das propostas de validação, além de ser possível a sua utilização para estimação de parâmetros.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se que seja projetado um meio filtrante sinterizado, possibilitando que diversas filtrações sejam realizadas, sem que haja a necessidade de abertura da célula de filtração para realização de limpeza e troca do meio filtrante. Além disso, a própria limpeza poderia ser também uma etapa automatizada.

A utilização da célula proposta para filtrações utilizando-se fluidos base óleo e a variação de temperatura podem ser também temas de novos trabalhos com a célula automatizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOU, M., **Formation damage caused by oil-well drilling fluids.** Tese de doutorado. The Faculty Of Science Al-Azhar University, Cairo, Egito, 1999.

AGUIAR, M. L., COURY, J. R., **Cake formation in fabric filtration of gases.** Ind. Eng. Chem. Res., v. 35, n. 10, p. 3673-3679, 1996.

AGWU, O. E, AKPABIO, J. U., **Using agro-waste materials as possible filter loss control agents in drilling muds: A review.** Journal of Petroleum Science and Engineering 163, p-185–198, 2018.

AHMAD, H. M., KAMAL, M. S., AL-HARTHI, M. A., **High molecular weight copolymers as rheology modifier and fluid loss additive for water-based drilling fluids.** Journal Molecular Liquids, 252, p. 133-143, 2018.

AL-HAMEEDI, A. T. T., ALKINANI, H. H., DUNN-NORMAN, S., ALKHAMIS, M. M., FELIZ, J. D., **Full-set Measurements Dataset for a Water-based Drilling Fluid Utilizing Biodegradable Environmentally Friendly Drilling Fluid Additives Generated from Waste.** Data in brief 28, 104945, 2020.

AMBRUS, A., POURNAZARI, P., ASHOK, P., SHOR, R. e van OORT, E., **Overcoming Barriers to Adoption of Drilling Automation: Moving Towards Automated Well Manufacturing.** Apresentado na SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Londres, Inglaterra, UK, 17-19, 2015.

AMORIM, L. V., GOMES, C. M., SILVA, F. L. H., LIRA, H. L. e FERREIRA, H. C., **Estudo reológico de fluidos de perfuração à base água: influência do teor de sólidos, velocidade e tempo de agitação.** Águas Subterrâneas, v. 19, n 1, p. 75-85, 2005.

AMORIM, L. V.; FARIAS, K. V.; BARBOSA, M. I. R.; PEREIRA, E. K. B.; FRANÇA, L.; FERREIRA, H. C. **Fluidos de perfuração a base de água. Parte I: Efeitos de aditivação poliméricas nas propriedades reológicas.** Revista Cerâmica, São Paulo, 2005.

AMORIM, L. V., LIRA, H. L., LUCENA, D. V., **Efeitos de aditivos poliméricos nas propriedades reológicas e de filtração de fluidos de perfuração.** Tecnol. Metal, Mater, Miner, v. 11, p. 66-73, 2014.

API SPECIFICATION 13A, Specification for Drilling-Fluid Materials. API recommended practice 13A, Fifteenth Edition, Maio, 1993

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

ASME, Shale Shaker Committee of the American Society of Mechanical Engineer Drilling Fluids Processing Handbook. Estados Unidos: Elsevier, 2005.

ARAÚJO, G. A. O., **Estudo da Filtração Cruzada em Geometria Cilíndrica.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2010.

AZAR, J. J. e SAMUEL, G. R., **Drilling Engineering.** PennWell Books, 49, 2007.

BALAVI, H., BOLUK, Y., **Dynamic filtration of drilling fuids and fuid loss under axially rotating crossflow filtration.** J Petrol Sci Eng 163, p. 611–615, 2018.

BARBOSA, R. F., **Desenvolvimento de uma célula de filtração com operação automática para monitoramento de dados online.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2016.

BAYAT, A. E., JALALAT, M. P., PIROOZIAN, A., RAFATI, R., **Experimental investigation of rheological and filtration properties of water-based drilling fluids in presence of various nanoparticles,** Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp 555, p. 256-263, 2018.

BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N., **Transport Phenomena**, Segunda Edição, John Wiley & Sons, Inc. 2002.

BLAND, R.G., MULLEN, G.A., GONZALEZ, Y.N., HARVEY, F.E., PLESS, M.L., **HPHT Drilling Fluid Challenges**, in: IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2006.

BORGES, P. R. S., SILVEIRA, I. F., CASTRO, L. N., **Reconhecimento de dígitos manuscritos em vídeos educacionais utilizando florestas aleatórias**, V Congresso Brasileiro de Informática na Educação, Anais dos Workshops do V Congresso Brasileiro de Informática na Educação, 2016.

BORGES, R.F.O, **Análise e estimação das propriedades de tortas de filtração de fluidos de perfuração não-newtonianos**. Dissertação de mestrado, Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2019.

BROCKWAY, P. E., OWEN, A., BRAND-CORREA, L. I., HARDT, L., **Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources**. Nature Energy, 4(7), 612–621, 2019.

CALABREZ, N. D., **Filtração e invasão de fluidos de perfuração: Estudo comparativo, caracterização da torta e modelagem**, Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2013.

CALÇADA, L. A., SCHEID, C. M., CALABREZ, N. D., WALDMAN, A. T. A., MARTINS, A. L., **A simplified methodology for dynamic fluid filtration estimation considering mudcake compressibility**, SPE 168208, 26-28, 2014.

CARBAJAL, D.L., BURRESS, C.N., SHUMWAY, W., ZHANG, Y., **Combining Proven Anti-Sag Technologies for HPHT North Sea Applications: Clay-Free Oil-Based Fluid and**

Synthetic, Sub-Micron Weight Material, in: SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2009.

CASTRO, L. M. N. C., **Filtração de suspensões sólido-fluido não-Newtoniano**. RBT, v 11, p. 187, 1981.

CHERAGHIAN, G. Q., WU, M., MOSTOFI, M. C., LI, M., AFRAND, SANGWAI, J. S. **Effect of a novel clay/silica nanocomposite on water-based drilling fluids: Improvements in rheological and filtration properties**, Colloids Surf. A 555, 339–350, 2018.

CHOI, J. H. HA, J. S., JANG, H. J., **Compression properties of dust cake of fine fly ashes from a fluidized bed coal combustor on a ceramic filter**. Powder Technology, v. 140, p. 106-115, 2004.

CIVAN, F., **Reservoir Formation Damage**, second ed. Gulf Publishing Company, pp. 780 - 782, 2007.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de dijon**. Paris, Dalmont, 1856.

DARLEY, H. C. H., GRAY, G. R., **Composition and properties of drilling and completion fluids**, 7th Ed. Gulf. Houston, Texas, 1988.

DEHGHANPOUR, H.; KURU, E. **Effect of viscoelasticity on the filtration loss characteristics of aqueous polymer solutions**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 76, p. 12–20, 2011.

DEWAN, J. T., CHENEVERT, M. E., **Mudcake buildup and invasion in low permeability formations**; Application to permeability determination by measurement while drilling, SPWLA 34th Annual Logging Symposium, Junho, 1993.

DEWAN, J. T.; CHENEVERT, M. E., **A Model for Filtration of Water-Base Mud During Drilling: Determination of Mudcake Parameters**, 2001.

DHIMAN, A.S., **Rheological properties & corrosion characteristics of drilling mud additives**. Dalhousie University, 2012.

ENDO, Y., CHEN, D. R., PUI, D. Y. H., **Effect of particle polydispersity and shape factor during dust cake loading and air filters**. Powder Technology, v. 98, p. 241, 1998.

EZEAKACHA, C., SALEHI, S., HAYATDAVOUDI, A., **Experimental study of drilling fluid's filtration and mud cake evolution in sandstone formations**. J. Energy Resour. Technol. 139 (2), 022912, 2017.

FERNANDEZ, J., YOUNG, S., **Environmentally Acceptable Water Based Fluids For HTHP Applications**. Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, 23-25 March, Ravenna, Italy, 2011.

FERRAZ, A. S. F. S. **Efeito da distribuição granulométrica de partículas sólidas e de polímeros aniónicos na formação da torta de filtração e no volume de filtrado**, Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2014.

FERREIRA, A. S., MASSARANI, G.; **Phisico-mathematical modeling of crossflow filtration**, Chemical Engineering Journal, 111, p. 199-204, 2005.

FERREIRA, J. C., PATINO, C. M., **O que realmente significa o valor-p?** Jornal Brasileiro de Pneumologia, 41, p. 485-485, 2015.

FINK, J., **Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids**. 2nd Gulf Professional Publishing. Waltham, MA, USA, 2015.

GOMAA, I., ELKATATNY, S., ABDULRAHEEM, A., **Real-time determination of rheological properties of high over-balanced drilling fluid used for drilling ultra-deep gas wells using artificial neural network.** Journal of Natural Gas Science and Engineering, 77, 103224, 2020.

GONÇALVES, T. S. S., **Desenvolvimento de fluidos de perfuração poliméricos a base de microemulsões e avaliação de suas propriedades.** Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

GUL, S., van OORT, E., **A machine learning approach to filtrate loss determination and test automation for drilling and completion fluids.** Journal of Natural Gas Science and Engineering, 186, 106727, 2020.

GUO, B., LIU, G., **Applied Drilling Circulation Systems,** Elsevier, Oxford, p. 145-150, 2011.

HALL, L.D., AMIN, M. H. G., EVANS, S., NOTT, K. P., SUN, L., **Magnetic resonance imaging for industrial process tomography.** J. Electr. Imag. 10 (3), 601–607, 2001.

HERSCHEL, W. H., e BULKLEY, T., **Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions.** Am. Soc. Test Proc., 26(2):621–633, 1926.

IADC, International Association of Drilling Contractors, **Drilling Manual**, v. 11, 2000.

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

JANSEN, J. D. e van den Steen, L., **Active damping of self-excited torsional vibrations in oil well drillstrings.** Journal of sound and vibration, 179(4), 647-668, 1995.

JANSEN, J. D., STULEMEIJER, I. P., van WALSTIJN, B. G. e WORRALL, R. N., **U. S. Patent No. 5,117,926.** Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1992.

JIAO, D., SHARMA, M.M., **Mechanism of cake buildup in crossflow filtration of colloidal suspensions.** J. Colloid Interface Sci. 162 (2), 454e462, 1994.

KIM, J. H., LIANG, Y., SAKONG, K. M., CHOI, J. H., BAK, Y. C., **Temperature effect on the pressure drop across the cake of coal gasification ash formed on a ceramic filter.** Powder Technology, v. 181, p. 67-73, 2008.

KYLLINGSTAD, A. e NESSJOEN, P. J., **A New Stick-Slip Prevention System.** Society of Petroleum Engineers, 2009.

LIU, X., GAO, Y., HOU, W., MA, Y., ZHANG, Y., **Non-Toxic High Temperature Polymer Drilling Fluid Significantly Improving Marine Environmental Acceptability and Reducing Cost for Offshore Drilling,** in: International Petroleum Technology Conference. International Petroleum Technology Conference, 2019.

LOSOYA, E.Z., GILDIN, E., NOYNAERT, S.F., **Real-time rate of penetration optimization of an autonomous lab-scale rig using a scheduled-gain PID controller and mechanical specific energy.** IFAC-PapersOnLine, 51-8, p. 56-61, 2018.

MAHMOODI, M., JAMES, L.A. e JOHANSEN, T., **Automated advanced image processing for micromodel flow experiments; an application using LabVIEW,** Journal of Petroleum Science and Engineering”, vol.167, pp. 829-843, 2018.

MALLOY, K.P., STONE, C. R., MEDLEY, G. H., HANNEGAN, D., COKER, O., DON REITSMA, C., SANTOS, H., KINDER, J., ECK-OLSEN, J., MCCASKILL, J., MAY, J., SMITH, K. e SONNEMAN, P., **Managed-Pressure Drilling: What It Is and What It Is Not.** IADC/SPE, San Antonio, Texas, 122281, 2009.

MAO, H., YANG, Y., ZHANG, H., ZHENG, J., ZHONG, Y., **Conceptual design and methodology for rheological control of water-based drilling fluids in ultra-high temperature and ultra-high pressure drilling applications.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 188, 106884, 2020.

MARTINS, L. F., **Estudo da formação e estabilidade de tortas de filtração na perfuração de poços de petróleo.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2013.

MASSARANI, G., SILVA TELLES, A., **An extended capillary model for flows in porous media.** *Journal of Porous Media*, v.4, I.4, p.297-307, 2001.

MOUCHET, J. P., MITCHELL, A., **Abnormal Pressures while Drilling: Origins, Prediction, Detection, Evaluation,** Editions TECHNIP, p. 9, 1989.

MUHAYYIDIN, A. H. M., ABU BAKAR, N. F., SAUKI, A., GHAZALI, N. A., JAN, B. M., IBRAHIM, W. A., NAIMI, F. M., **Rheological and Filtration Performances of Rhizophora mucronate Tannin Water-Based Drilling Fluid.** Materials Today: Proceedings 17, P. 768–777, 2019.

NUNES, D. M., **Construção de um sistema de filtração de gases para o estudo da formação e remoção de tortas de filtração.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

OKORO, E. E., ALABA, A. O., SANNI, S. E., EKEINDE, E. B. e DOSUNMU, A., **Development of an automated drilling fluid selection tool using integral geometric parameters for effective drilling operations.** *Heliyon*, 5, 2019.

PERWEEN, S., THAKURB, N. K., BEGB, M., SHARMAB, S., RANJANA, A., **Enhancing the properties of water-based drilling fluid using bismuth ferrite nanoparticles.** *Colloids and Surfaces A*, 561, p. 165-177, 2019.

PINHEIRO, Y.S., VIEIRA, L.C., NASCIMENTO, A., SANTOS, F. A. S., MATHIAS, M.H., THONHAUSER, G., ELMGERBI, A. e HUNT, J., **Conception of a Web Operation System for Processing Petroleum Related Drilling Data: A Focus on Pre-Salt Real-Time Automation and Optimization.** *Journal of Software Engineering and Applications*, 12, 61-71, 2019.

PONMANI, S., NAGARAJAN, R., SANGWAI, J., **Effect of nanofluids of CuO and ZnO in polyethylene glycol and polyvinylpyrrolidone on the thermal, electrical, and filtration-loss properties of water-based drilling fluids.** SPE Journal, April, p. 405 – 415, 2016.

RABBANI, A., GHAZANFARI, M.H., AMANI, M., **Asphaltene formation damage stimulation by ultrasound: an analytical approach using bundle of tubes modeling.** J. Petrol. Eng., 2015.

SAASEN, A, OMLAND, T. H., EKRENE, S., BRÉVIÈRE, J., VILLARD, E., KAAGSON-LOE, N., TEHRANI, A., CAMERON, J., FREEMAN, M. A., GROWCOK, F., PATRICK, A., STOCK, T., JØRGENSEN, T., REINHOLT, F., AMUNDSEN, H. E. F., STEELE, A., MEETEN, G., **Automatic measurement of drilling fluid and drill-cuttings properties.** Society of Petroleum Engineers, SPE Drilling & Completion, v.24, I.04, 2009.

SABOORI, R., SABBAGHI, S., KALANTARIASL, A., **Improvement of rheological, filtration and thermal conductivity of bentonite drilling fluid using copper oxide/polyacrylamide nanocomposite.** Powder Technology, 2019.

SANTOS, H, LEUCHTENBERG, C. e SHAYEGI, S., **Micro-Flux Control: The Next Generation in Drilling Process.** Society of Petroleum Engineers, 2003.

SALEHI, S., MADANI, S.A., KIRAN, R., **Characterization of drilling fluids filtration through integrated laboratory experiments and CFD modeling.** J. Nat. Gas. Sci. Eng. 29, p. 462–468, 2016.

SARAMITO, P., **A new elastoviscoplastic model based on the Herschel-Bulkley viscoplastic model,** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Elsevier, 158 (1-3), pp.154-161, 2009.

SEDIN, P., JOHANSSON, C., THELIANDER, H., **On the measurement and evaluation of pressure and solidosity in filtration.** Chem. Eng. Res. Design 81 (10), 1393–1405, 2003.

SHIRATO, M., ARAGAKI, T., ICHIMURA, K., OOTSUJI, N., **Porosity variation in filter cake under constant-pressure filtration.** J. Chem. Eng. Jpn. 4 (2), 172–177, 1997.

SILVA, B. R. A., **Avaliação da filtração de fluidos de perfuração não Newtonianos utilizando a teoria simplificada da filtração.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2017.

TAUGBOL, K., GUNNAR, F., PREBENSEN, O., KAARE, S., OMLAND, T.H., SVELA, P., BREIVIK, D., **Development and Field Testing of a Unique High-Temperature/High-Pressure (HTHP) Oil-Based Drilling Fluid With Minimum Rheology and Maximum Sag Stability,** in: Proceedings of Offshore Europe. Society of Petroleum Engineers, 2005.

THOMAS, J.E. **Fundamentos de engenharia de petróleo.** 2.ed. Rio de Janeiro. Interciênciac, 2004. 272 p.

TIEN, C., BAI, R., RAMARAO, B.V., **Analysis of cake growth in cake filtration: effect of fine particle retention.** AIChE J. 43 (1), 33 - 44, 1997.

TILLER, F. M., **The role of porosity in filtration I. Numerical methods for constant rate and constant pressure filtration based on Kozeny's Law,** Chemical Engineering Progress, v.49 (9), p.467-479, 1953.

TILLER, F. M., **The role of porosity in filtration II. Analytical equations for constant rate filtration,** Chemical Engineering Progress, v.51 (6), p.282-290, 1955.

TILLER, F.M., HSYUNG, N.B., CONG, D.Z., **Role of porosity in filtration: XII. Filtration with sedimentation.** AIChE J. 41 (5), 1153–1164, 1995.

van RIET, E. J., REITSMA, D. e VANDECRAEN, B., **Development and Testing of a Fully Automated System to Accurately Control Downhole Pressure During Drilling Operations.** Society of Petroleum Engineers, 2003.

VAJARGAH, A. K., van OORT, E., **Determination of drilling fluid rheology under downhole conditions by using real-time distributed pressure data.** Journal of Natural Gas Science and Engineering, v. 24, p. 400 – 411, 2015.

VAUSSARD, A., MARTIN, M., KONIRSCHI, O., PATRONI, J. M., **An Experimental Study of Drilling Fluids Dynamic Filtration.** 1986.

VISHNUMOLAKALA, N., GILDIN, E., and NOYNAERT, S., **A simulation environment for automatic managed pressure drilling control.** 48, 128–133, 2015.

von ENGELHARDT, W., SCHINDEWOLF, E., **The filtration of clay suspensions.** Kolloid Z 127, 150–164, 1952.

ZEPPINI, P., van den BERGH, J. C. J. M., **Global competition dynamics of fossil fuels and renewable energy under climate policies and peak oil: A behavioural model.** Energy Policy, 136, 2020.