

**UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
TECNOLOGIA QUÍMICA**

DISSERTAÇÃO

Desenvolvimento de uma célula de filtração com operação automática para monitoramento de dados *on line*

RENAN FRAGA BARBOSA

Agosto, 2016



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

**Desenvolvimento de uma célula de filtração com operação
automática para monitoramento de dados *on line***

RENAN FRAGA BARBOSA

Sob a Orientação de
Luís Américo Calçada

e Co-orientação de
Cláudia Miriam Scheid

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

Seropédica, RJ
Agosto de 2016

622.3382

B238d Barbosa, Renan Fraga, 1989-

T Desenvolvimento de uma célula de
 filtração com operação automática para
 monitoramento de dados *on line* / Renan
 Fraga Barbosa - 2016.

67 f.: il.

Orientador: Luís Américo Calçada.

Dissertação (mestrado) -
Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro, Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Química.

Bibliografia: f. 63-64.

1. Poços de petróleo - Perfuração -
Teses. 2. Engenharia do petróleo -
Teses. 3. Engenharia hidráulica -
Teses. 4. Dinâmica dos fluidos -
Teses. I. Calçada, Luís Américo, 1966-
. II. Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Química. III. Título.

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

RENAN FRAGA BARBOSA

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM __ / __ / _____

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

Prof. João Crisóstomo de Queiroz Neto, D.SC ,DEQ/UFF

Prof. Fernando Cunha Peixoto, D.SC, DEQ/UFF

Dedico esse trabalho aos meus pais: Carlos e Claudeli pelo apoio e incentivo.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por mais uma conquista e por ter me dado forças para chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais Carlos Alberto e Claudeli pelo apoio, por me motivar durante esses anos e estarem sempre ao meu lado.

Agradeço a toda minha família pelo carinho, as orações e por sempre me apoiarem nas decisões ao longo da minha vida.

Agradeço aos meus orientadores Luís Américo Calçada e Cláudia Míriam Scheid pela oportunidade de trabalhar no LEF e pela orientação durante esses anos.

Agradeço ao Sergio e Eduardo pelo suporte e as ideias fornecidas, sem a ajuda de vocês não teria conseguido realizar esse trabalho.

Agradeço aos meus estagiários Daniel, Gabriela e Bruna pela amizade e pela ajuda durante a construção da unidade e realização dos experimentos.

Agradeço aos amigos do LEF, João, Gabi, Rafael, Fred e todos os outros pela amizade, pelo conhecimento compartilhado e por fazer meus dias mais agradáveis.

Agradeço a Petrobras pela bolsa recebida e pelo apoio financeiro concedido ao projeto.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 Perfurações de poços de petróleo	3
2.2 Técnicas de perfuração	4
2.2.1 Perfuração <i>underbalance</i>	5
2.2.2 Perfuração <i>nearbalance</i>	5
2.2.3 Perfuração <i>overbalance</i>	6
2.3 Fluido de perfuração	6
2.4 A filtração e a invasão de filtrado	7
2.5 Escoamento em meios porosos	10
2.6 Teoria e equacionamento da filtração estática	11
2.7 Teoria da filtração de Dewan e Chenevert (2001)	13
2.8 Histórico dos aparatos experimentais de filtração	16
2.9 Trabalhos anteriores de filtração desenvolvidos no LEF	20
2.10 Célula de filtração <i>on line</i> presente na literatura	24
CAPITULO III	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 Unidade para preparação de fluidos	26
3.2 Célula de filtração de bancada	29
3.3 Cálculo da permeabilidade	31
3.4 Experimentos de validação da célula protótipo proposta	31
3.5 Caracterização do fluido	32
3.5.1 Concentração de sólidos	32
3.5.2 Densidade	32
3.5.3 Reologia	33

3.6 A automação da unidade	35
CAPÍTULO IV	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 A unidade de filtração <i>on line</i>	36
4.1.1 O <i>skid</i> de preparação de fluidos	37
4.1.2 O protótipo de filtração <i>on line</i>	40
4.1.2.1 Solução do problema existente na base de filtração	42
4.1.2.2 Instrumentação do protótipo de célula de filtração	44
4.2 Software da unidade	45
4.2.1 O SoftfilONLINE	46
4.2.2 O PIDDesign	50
4.3 Cálculo de permeabilidade	53
4.4 Dados obtidos no protótipo de célula de filtração <i>on line</i>	54
4.4.1 Experimentos realizados com o fluido 1	55
4.4.2 Experimentos realizados com o fluido 2	58
CAPÍTULO V	61
5. CONCLUSÃO	61
CAPÍTULO VI	62
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
CAPÍTULO VII	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXO A- Análise granulométrica da calcita	65
ANEXO B- Picnometria da calcita	66
ANEXO C- Testes reológicos do fluido	67

Lista de figuras

Figura 1. Esquema da perfuração de um poço. Fonte: Adaptado de Wang <i>et al.</i> (2015).	3
Figura 2. Janela operacional de perfuração. Fonte: Omland(2009).....	4
Figura 3. Formação da torta e a invasão de filtrado. Fonte: Peng (1990).	8
Figura 4. Massa de filtrado em pressões (a) 5,7 Bar; (b) 3 Bar;(c) 2 Bar; (d) 1 bar; (e) 0,5 Bar; (f) 0,2 bar ; (g) 0,1 Bar e (h) 0,05 bar . Fonte: Adaptado de Sherwood e Meeten (1997).	8
Figura 5. Filtração dinâmica. Fonte: Araújo (2010).	9
Figura 6. Aparato de Darcy. Fonte: Darcy (1856).	10
Figura 7. Relação entre o volume de filtrado pelo tempo. Fonte: Adaptado de Darley e Gray (1988).	12
Figura 8. Representação da formação de torta. Fonte: Adaptado de Dewan e Chenevert (2001).	13
Figura 9. (a) Volume de filtrado versus raiz quadrada do tempo; (b) <i>Slowness</i> medido e simulado versus tempo. Fonte: Dewan & Chenevert (2001).	16
Figura 10. Célula de filtração estática de Jones. Fonte: Darley e Gray (1988).	17
Figura 11. Representação da célula estática de Jones. Fonte: Darley e Gray (1988).	17
Figura 12. Célula de filtração de Vaussard. Fonte: Vaussard <i>et al.</i> (1986).	18
Figura 13. Efeito da alternância entre filtração estática e dinâmica. Fonte: Vaussard <i>et al.</i> (1986).	19
Figura 14. Célula de filtração de <i>HTHP</i> . Fonte: Adpatdo de Dewan e Chenevert (2001).	20
Figura 15. Unidade filtração dinâmica. Fonte: Araújo (2010).	21
Figura 16. Unidade de bancada para filtração estática. Fonte: Araújo (2010).	21
Figura 17. Unidade de filtração estática. Fonte: Araújo (2010).	22
Figura 18. Célula <i>HTHP</i> OFITE. Fonte: Martins (2013).	23
Figura 19. Representação da célula (a). Célula de filtração automatizada (b). Fonte: Adaptado de Saasen <i>et al.</i> (2009).	25
Figura 20. Projeto do <i>skid</i> da unidade.	27
Figura 21. Representação da célula.	27
Figura 22. Visão do interior da célula.	28
Figura 23. Cilindros da célula de bancada <i>HTHP</i>	29
Figura 24. Representação da célula de bancada. Fonte: Dewan & Chenevert (2001), adaptado de Calabrez (2013).	30
Figura 25. <i>Software</i> de filtração da célula de bancada.	30
Figura 26. <i>Kit</i> Retorta. Fonte: Manual <i>Kit</i> Retorta FANN.	32
Figura 27. Densímetro. (A) Sensor mássico. (B) Display. Fonte: o autor.	33
Figura 28. Balança de lama Fann 140. Fonte: Catálogo Fann.	33
Figura 29. Viscosímetro Fann 35A. Fonte: Catálogo Fann.	34
Figura 30. Fluxograma da unidade de filtração <i>on line</i>	36
Figura 31. <i>Skid</i> de preparação de fluidos.	37
Figura 32. Sensor mássico Metroval modelo RHM 20.	37
Figura 33. Transmissor de temperatura Smar TT 301.	38
Figura 34. Transmissor de pressão Smar LD 291.	38
Figura 35. Quadro elétrico do <i>skid</i>	39

Figura 36. Chassi de placa de aquisição de dados National Instruments.....	39
Figura 37. Placa de aquisição de dados National Instruments modelo 9203.....	40
Figura 38. (A) Vista frontal e (B) vista lateral da célula.....	40
Figura 39. Topo da célula de filtração.....	41
Figura 40. Válvula de injeção de água.....	42
Figura 41. Base da câmara original.....	42
Figura 42. Torta concentrada no centro do disco.....	43
Figura 43. Nova base de fechamento da câmara.....	43
Figura 44. Vista da parte inferior da célula.....	44
Figura 45. A unidade de filtração <i>on line</i>	45
Figura 46. Comunicação entre os programas da interface virtual.....	46
Figura 47. Modo operacional do SoftfilONLINE.....	46
Figura 48. SoftfilONLINE modo tratamento dados.....	47
Figura 49. Pop-up de parametrização do experimento.....	48
Figura 50. Status da célula.....	48
Figura 51. Visão geral do sistema.....	49
Figura 52. Detalhamento da sub-rotina implementada pelo CélulaONLINE.....	49
Figura 53. SoftfilONLINE modo operação.....	50
Figura 54. Interface do PIDDesign.....	51
Figura 55. Distribuição granulométrica da calcita.....	55
Figura 56. Tensão de cisalhamento e viscosidade aparente por taxa de deformação a $T=25^{\circ}\text{C}$ e $P=1\text{ atm}$	55
Figura 57. Tensão de cisalhamento por taxa de deformação do fluido 2 a $T=25^{\circ}\text{C}$ e $P=1\text{ atm}$	59
Figura 58. Distribuição granulométrica da calcita.....	65

Lista de tabelas

Tabela 1. Características do papel de filtro utilizado nas filtrações.	31
Tabela 2. Características do papel de filtro nos experimentos de validação.....	31
Tabela 3. Constantes do viscosímetro FANN 35A.....	34
Tabela 4. Correlações para cálculo dos parâmetros Δ , τ e t_d . Fonte: Sundaresan e Krishnaswamy (1977).....	52
Tabela 5. Correlações para os cálculos dos parâmetros do controlador PI. Fonte: Ziegler e Nichols (1942).	53
Tabela 6. Formulação dos fluidos. Fonte: Ferraz (2014).	53
Tabela 7. Permeabilidade da torta.	54
Tabela 8. Parâmetros reológicos do fluido 1 pelo modelo de Herschel Bulkley a $T=25^\circ\text{C}$ e $P=1$ atm.....	56
Tabela 9. Dados experimentais de filtração do fluido 1 a 500 Psi e 25°C	56
Tabela 10. Dados experimentais de filtração do fluido 1 a 300 Psi e $T=25^\circ\text{C}$	57
Tabela 11. Parâmetros da torta a pressão de 500 Psi a $T=25^\circ\text{C}$	58
Tabela 12. Parâmetros da torta a pressão de 300 Psi a 25°C	58
Tabela 13. Parâmetros reológicos pelo modelo de Herschel Bulkley do fluido 2 a $T=25^\circ\text{C}$ e $P=1$ atm.	59
Tabela 14. Dados experimentais de filtração a 500 Psi com aquisição de massa <i>on line</i> a $T=25^\circ\text{C}$	60
Tabela 15. Parâmetros da torta dos experimentos com aquisição de massa <i>on line</i>	60
Tabela 16. Experimentos de picnometria.	66
Tabela 17. Massa específica da calcita.	66
Tabela 18. Dados reológicos do fluido.	67
Tabela 19- Dados reológicos do fluido 2.	67

NOMENCLATURA

A	Área de filtração;
Bu	Varição dos estados estacionários após uma perturbação;
k	Permeabilidade da torta;
K	Índice de consistência do fluido;
kc	Parâmetro de sintonia do controlador ligado ao ganho geral do controlador;
kmc0	Permeabilidade de referência a um psi;
M	Magnitude da perturbação;
n	Índice de comportamento do fluido;
P	Pressão na câmara de filtração;
P _{mc}	Pressão através da torta;
Q	Vazão volumétrica;
Re	Número de Reynolds.
S	<i>Slowness</i> ;
t	Tempo;
t ₁	Parâmetro de Sundaresan e Krishnaswamy calculado a 35,3% da curva de reação;
t ₂	Parâmetro de Sundaresan e Krishnaswamy calculado a 75,3% da curva de reação;
td	Tempo morto;
T _{mc0}	Espessura da torta;
V _c	Volume da torta;
V _w	Volume de filtrado;
w _w	Massa da torta úmida;
w _d	Massa da torta seca;

Letras gregas

γ	Taxa de deformação do fluido;
Δ	Ganho do sistema;
Θ	Ângulo de deflexão;
μ	Viscosidade;
τ	Tensão de cisalhamento;
τ_i	Parâmetro de sintonia do controlador ligado à ação integral do controlador;
ρ_f	Densidade do fluido;
ρ_s	Densidade do sólido;
ϕ_{mc0}	Porosidade de referência a um psi;
v	Índice de compressibilidade;

RESUMO

BARBOSA, Renan Fraga. **Desenvolvimento de uma célula de filtração com operação automática para monitoramento de dados *on line*** 2016. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

A filtração e a invasão do fluido de perfuração são fenômenos provocados pelo diferencial de pressão entre a região anular e a formação rochosa durante a perfuração de um poço de petróleo e gás sob condições *overbalance*. A invasão de fluidos e sólidos presentes no fluido de perfuração podem causar danos irreversíveis ao poço, portanto formulam-se os fluidos de modo que seja formado um reboco de baixa permeabilidade e espessura controlada, minimizando a filtração e a invasão. Na indústria e na academia, para estudar o crescimento da torta na formação rochosa e avaliar o volume de filtrado, utilizam-se aparatos experimentais, denominados células de filtração, entretanto estes dispositivos são aparatos de bancada necessitam de um operador especializado. O objetivo desse trabalho foi otimizar, automatizar e validar um protótipo de filtração estática que coleta dados em linha e em tempo real. Para alimentar o fluido no protótipo de filtração, foi construída uma unidade de preparação de fluidos composta por uma bomba de deslocamento positivo, tanques de mistura e sensores para monitorar as propriedades do fluido. A unidade de preparo e o protótipo de filtração constituem a denominada unidade de filtração. No protótipo de filtração, foram instaladas válvulas e sensores para operação remota. Para gerenciar a unidade de filtração, foi desenvolvida uma interface virtual que monitora os dados fornecidos pelos sensores e opera os equipamentos (bomba, agitadores e as válvulas automáticas, inclusive as da célula de filtração). Para validar o protótipo, foram realizados experimentos comparativos com uma célula de filtração *HTHP* de bancada em condições de operação semelhantes. Como resultado das filtrações na célula de bancada e com o protótipo, foi observado que o volume de filtrado e propriedades calculadas nos experimentos de filtração (porosidade e permeabilidade da torta) apresentaram valores similares indicando que a célula *on line* opera de forma adequada, reproduzindo os dados da célula de bancada que foi usada como modelo na proposta deste trabalho.

Palavras-chave: Filtração estática, fluido de perfuração, perda de circulação, aquisição de dados em tempo real.

ABSTRACT

BARBOSA, Renan Fraga. **Developments of a filtration cell with automatic operation that monitoring experimental data in real time.** 2016. 67 p. Thesis (Master in Science, Chemical Engineering). Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

The filtration loss is a phenomenon caused by the gradient pressure between the annular region and the rock formation during the drilling of an oil and gas well under overbalanced conditions. The invasion of fluids may provoke irreversible damages to the integrity of the well due to the solids present in their composition. Therefore, drilling fluids must be formulated in such a way that a low permeability mudcake with controlled thickness is formed in order to mitigate the filtration and invasion. Filtration cells are experimental apparatus used in the industry and at universities to study the mudcake growth in the rock formation and to measure the filtrate volume. Such devices operate off line and require a specialized operator. The objective of this work was to optimize, automate and validate a static filtration prototype cell that collected experimental data in real time. An experimental unit was built to prepare the fluids and to feed them into the filtration prototype. This unit is composed of a positive displacement pump, mixing tanks and sensors to monitor the properties of the fluid. The unit and the prototype compose the on line filtration unit. In the filtration prototype, valves and sensors were installed to operate remotely. A virtual interface was developed in order to manage the filtration unit. This interface is capable of monitoring the data provided by the sensors as well as operating the equipments (pump, agitators and automatic valves, including the ones in the filtration cell). Comparative experiments were performed in a HTHP off line filtration cell using similar operational conditions to validate the prototype. As results, the filtrate volume and the filtration properties (porosity and permeability of the mudcake) values obtained for both cells shown to be similar. The on line filtration unit was capable of reproducing the data provided by the off line filtration cell used as a model in this work. Thus, one can conclude that the on line filtration cell operates appropriately.

Keywords: Static filtration, drilling fluids, fluid loss, real-time data acquisition.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Nas operações de perfuração convencional, o controle da pressão do poço é realizado pela manipulação da densidade do fluido de perfuração. O fluido de perfuração é geralmente formulado de forma que exerça uma pressão maior do que a dos fluidos da formação, o que evita o influxo de fluidos da formação para o poço, nas operações *overbalance*. Entretanto, o diferencial de pressão entre o poço e a formação provoca invasão do fluido de perfuração para a rocha. Esta invasão pode gerar complicações como a obstrução dos poros da rocha reservatório por partículas sólidas e polímeros, a diminuição da taxa de recuperação do óleo, e o inchaço das formações argilosas, por fluidos a base de água.

O diferencial de pressão entre o fluido e a rocha permeável provoca a formação de um reboco, denominado torta de filtração, causado pela filtração do fluido de perfuração na parede do poço. Durante a perfuração, a filtração pode ocorrer de duas formas: estática e dinâmica. A filtração dinâmica ocorre quando há circulação de fluido no poço. Nela a taxa de filtração é controlada pelo equilíbrio entre a taxa de deposição de partículas e a erosão da torta provocada pelo escoamento axial do fluido de perfuração. A filtração estática ocorre quando não há bombeamento de fluido para o poço, e neste caso a taxa de filtração é controlada pela espessura da torta que cresce continuamente com o tempo.

O reboco deve ser de baixa permeabilidade, atenuando a invasão de fluido para o reservatório. Neste caso, o fluido deve ser formulado de modo que viabilize a produção de uma torta que minimize a invasão de fluidos e os danos à formação rochosa.

Para estudar a formação do reboco e formular novos fluidos com propriedades adequadas a cada cenário específico, são utilizados aparatos experimentais para quantificar o volume de filtrado gerado pela filtração de um determinado fluido, segundo as normas API (*American Petroleum Institute*). Esses equipamentos são denominados células de filtração. Entretanto, esses dispositivos operam de forma *off line*, onde é necessário a retirada de uma amostra de fluido do processo por um operador para realização da análise em bancada.

Tendo como base o desenvolvimento de sensores que operam de forma *on line*, buscando monitorar e controlar a qualidade de determinado fluido de perfuração, o Laboratório de Escoamento de Fluidos da UFRRJ vem desenvolvendo inúmeros projetos. No cenário deste trabalho, foram feitas modificações, a instrumentação e a automação em um protótipo de célula de filtração para que esse opere de forma remota e com menor interferência humana na análise da filtração de fluidos de perfuração. A célula *on line* foi adequada de forma a garantir que os dados de volume de filtrado sejam equivalentes aos obtidos em uma célula de bancada tradicionalmente utilizada pela indústria de petróleo. Para controlar, monitorar e obter dados remotamente, foi desenvolvida uma interface virtual para a unidade, programada em linguagem *LabVIEW*.

Ainda como contribuição neste trabalho, com relação à obtenção e tratamento dos dados experimentais, foi testada uma correlação simples baseada no volume de filtrado e na espessura da torta para estimar a permeabilidade da torta de filtração. O equacionamento mais simples possibilitou a obtenção de valores de permeabilidade com a mesma ordem de grandeza obtida com a célula de bancada empregando um equacionamento mais completo.

Na análise dos resultados, a célula *on line* e a célula *HHP* tradicional forneceram valores similares de volume de filtrado nos experimentos realizados sob as mesmas condições de temperatura e pressão. Estes dados serviram para validar a proposta deste trabalho de uma célula de filtração que opera em linha com monitoramento de dados em tempo real. É importante ressaltar que este trabalho resultou no depósito de uma patente para o sistema desenvolvido.

CAPITULO II

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Perfurações de poços de petróleo

A perfuração de um poço de petróleo é proveniente da ação rotativa e do peso da coluna de perfuração sobre a broca que age sobre a rocha obturando-a. Os cascalhos produzidos pela broca são removidos pelo fluido de perfuração que é injetado no interior da coluna de perfuração e que ao passar pela broca retorna a superfície pela região anular formada entre a coluna de perfuração e a parede do poço. Após perfurar determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e um tubo de revestimento de aço de menor diâmetro que a broca é inserido no poço. A região anular entre o tubo de revestimento e a parede do poço é cimentada para isolar a formação rochosa. Após a cimentação, uma nova broca de menor diâmetro continua a perfuração e esse ciclo é mantido, utilizando-se várias brocas até a conclusão da perfuração do poço (THOMAS, 2001). A Figura 1 ilustra o processo e os equipamentos utilizados na perfuração de um poço.

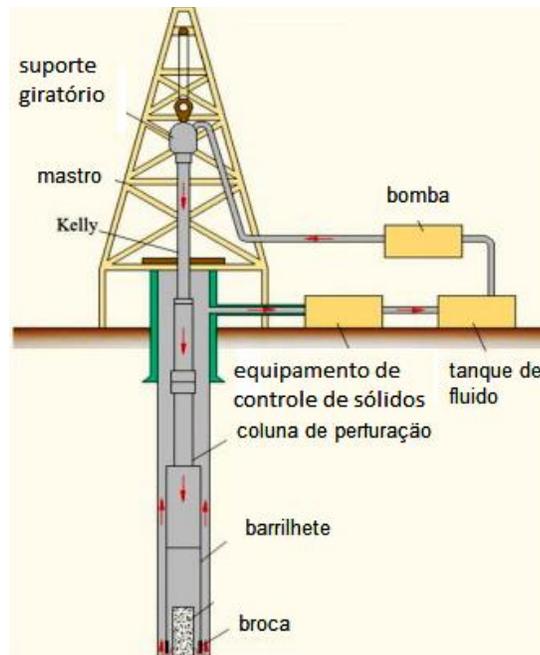


Figura 1. Esquema da perfuração de um poço. Fonte: Adaptado de Wang *et al.*(2015).

2.2 Técnicas de perfuração

Na perfuração de poços de petróleo e gás, utiliza-se uma ou a combinação de três técnicas de perfuração baseadas na densidade do fluido de perfuração e na pressão de poros da rocha, denominadas: Perfuração *overbalance*, Perfuração *underbalance* e perfuração *nearbalance* (*managed pressure drilling*) (ABIMBOLA; KHAN; KHAKZAD, 2014).

A seleção da técnica de perfuração é determinada por escolhas técnicas, baseadas nas pressões de poro e de fratura da formação, na estabilidade da formação e da região de perfuração (*onshore* ou *offshore*) e na viabilidade econômica. As perfurações *underbalance* e a *nearbalance* requerem um número maior de equipamentos de controle e isto gera um alto custo de operação. Entretanto, essas técnicas diminuem os custos com problemas de perfuração observados numa perfuração *overbalance* como perda de fluido e o maior desgaste das brocas. O aumento da produtividade do poço e da taxa de perfuração também deve ser analisado na formulação econômica do projeto (ABIMBOLA; KHAN; KHAKZAD, 2014; OSTROOT *et al.*, 2007).

Na Figura 2 é apresentado um esquema com as pressões de poro e de fratura que são típicas na análise de técnicas de perfuração. Nesta figura, a pressão é apresentada em densidade equivalente, ou seja, é a pressão gerada por uma coluna estática de fluido. Na perfuração *overbalance* a pressão de perfuração é superior a pressão de poros e inferior a pressão de fratura, para que a rocha não seja fraturada. Na *nearbalance*, a pressão de perfuração é próxima à pressão de poros e na *underbalance* a pressão de perfuração é inferior a de poros, com operação gerando leves *kicks* ao longo do processo. O diferencial entre a pressão de poros e de fratura é usada como janela operacional na análise da perfuração de poços de petróleo e gás natural.

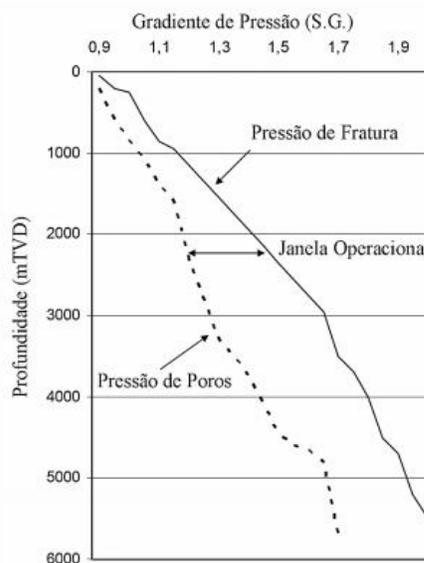


Figura 2. Janela operacional de perfuração. Fonte: Omland(2009).

2.2.1 Perfuração *underbalance*

A perfuração *underbalance* é caracterizada por utilizar uma pressão de operação no poço menor que a pressão de poro da rocha pelo uso de fluidos de perfuração de baixa densidade. Dentre eles, podem-se citar os fluidos a base de: ar, névoa, espuma e lamas aeradas. Esta técnica é aplicada em regiões que apresentam dificuldade de perfurar devido à baixa pressão de fratura da rocha ou é utilizada em formações com baixa taxa de recuperação ao óleo, devido esta técnica preservar os poros da rocha reservatório o que garante uma maior produção do poço. (FATTAH; EL-KATATNEY; DAHAB, 2011; OSTROOT *et al.*, 2007).

Ostroot *et al.*(2009) destacam os benefícios da perfuração *underbalance* sendo eles:

- O aumento da produtividade do poço é de até quatro vezes maior em relação à perfuração *overbalance*;
- Não há possibilidade de aprisionamento da broca de perfuração;
- Não há nenhuma perda de fluido para formação;
- Taxa de perfuração elevadas;
- Permite melhor determinação das propriedades do poço durante a perfuração.

Entretanto, o uso dessa técnica aumenta a instabilidade do poço, o que demanda um maior número de equipamentos para o controle da pressão do poço e requer uma equipe altamente qualificada a fim de se garantir a segurança do processo, resultando em um alto custo operacional. Além disso, podem-se citar outras desvantagens como limitações para perfuração *offshore* e seu uso não é indicado para regiões instáveis (ABIMBOLA; KHAN; KHAKZAD, 2014; OSTROOT *et al.*, 2007).

2.2.2 Perfuração *nearbalance*

Na perfuração *nearbalance* a pressão do poço é mantida levemente acima da pressão de poro. Esta técnica mitiga os problemas relacionados com a perfuração, porém não é tão eficiente na redução ao dano às camadas permeáveis, onde estes são apenas atenuados em relação à perfuração tradicional (OSTROOT *et al.*, 2007).

Ostroot *et al.* (2007) mencionam os benefícios dessa técnica em relação a perfuração convencional e a *underbalance* sendo eles:

- Maior estabilidade de operação;
- Redução de custos com fluido de perfuração;
- Aumento da produtividade do poço em duas vezes em relação à perfuração *overbalance*;
- Aumento na taxa de perfuração em 50% em relação à perfuração *overbalance*;

- Menor custo de operação em relação à perfuração *underbalance*, devido à redução de equipamentos utilizados.

2.2.3 Perfuração *overbalance*

Na perfuração *overbalance* a pressão hidrostática do fluido de perfuração é maior que a pressão dos fluidos da formação. Nesta técnica trabalha-se com a pressão de operação entre a pressão de poro e a pressão de fratura, esse intervalo é conhecido como janela operacional.

A perfuração *overbalance* é a mais empregada pela indústria devido a sua baixa complexidade de controle da operação. Ela requer menor número de equipamentos proporcionando um baixo custo em relação às outras técnicas de perfuração. Entretanto, esta técnica não pode ser aplicada em formações rochosas com janela operacional estreita, ou seja, regiões onde a pressão de poro é próxima a de fratura. Na perfuração *overbalance* podem ocorrer problemas operacionais como: decréscimo na taxa de perfuração devido à alta densidade do fluido, perda de circulação, aprisionamento da broca e o dano às formações rochosas (ABIMBOLA; KHAN; KHAKZAD, 2014).

2.3 Fluido de perfuração

A escolha do fluido é de extrema importância no processo de perfuração, uma vez que suas propriedades influenciam diretamente o mesmo. O desempenho do fluido de perfuração depende: dos parâmetros reológicos, da densidade, do teor de sólidos, do controle de filtrado e da formação de reboco (THOMAS, 2001).

Segundo Darley e Gray (1988), as principais funções do fluido de perfuração são:

- Carrear os cascalhos produzidos pela broca da região anular até a superfície;
- Limpar e resfriar a broca;
- Reduzir o atrito entre a coluna de perfuração e a parede do poço;
- Manter a estabilidade das regiões não revestidas;
- Prevenir o influxo de fluidos das formações permeáveis;
- Formar uma torta de filtração fina e de baixa permeabilidade.

A classificação dos fluidos de perfuração é feita em função da sua composição sendo caracterizados pela sua fase contínua ou dispersante. Dessa forma os fluidos são classificados em: fluido base água, fluido base óleo e fluido base ar, entre outros (THOMAS, 2001).

O fluido base água é composto majoritariamente pela fase dispersante (água), argilas e coloidais orgânicos como os agentes viscosificantes e minerais para atuar como adensantes. A principal função da água é promover a dispersão das partículas coloidais que controlam a viscosidade, força gel e o volume de filtrado. Já os sólidos podem ser divididos em três

grupos de acordo com o tamanho de partícula, entre elas: as partículas coloidais (0,005 a 1 microm) que controlam a viscosidade do fluido, as partículas de sólidos inertes que atuam como adensantes (1 a 50 microns) e as partículas que são utilizadas para colmatar os poros da rocha (50 a 420 microns) (DARLEY; GRAY, 1988; THOMAS, 2001).

No fluido base óleo, hidrocarbonetos líquidos formam a fase contínua. Esse tipo de fluido foi desenvolvido para suprir as deficiências do fluido base água como: a dissolução de sal da formação, o inchaço das formações argilosas, o aprisionamento da broca de perfuração. Este fluido apresenta outras vantagens como: ser menos agressivo às formações permeáveis e sua taxa de perda de fluido é menor. No entanto, o uso desse tipo de fluido possui desvantagens como: alto custo, alta solubilidade para gases, o que dificulta a predição de *kicks* e é agressivo ao meio ambiente, sendo esta a sua maior desvantagem. Para amenizar a agressão ao meio ambiente, submetem-se os cascalhos carregados pelo fluido a tratamento de purificação o que agrega um custo maior ao uso desse fluido (ADAMS *et al.*, 1989; CAENN; CHILLINGAR, 1996).

Fluidos base ar ou aerados são utilizados quando a pressão de fratura da rocha é menor que a pressão estática de uma coluna de água, portanto injeta-se ar no fluido a fim de reduzir sua densidade. Entre os fluidos base ar destaca-se a espuma por possuir propriedades como: baixa densidade, excelente transporte de cascalhos e possui uma viscosidade inerente que inibe a perda de fluido (FATTAH; EL-KATATNEY; DAHAB, 2011).

2.4 A filtração e a invasão de filtrado

Na perfuração *overbalance* a pressão hidrostática no poço é maior do que a pressão da formação rochosa, o que provoca a compressão do fluido contra os poros da rocha. No início da filtração, tanto as partículas sólidas quanto o fluido base invadem a formação porosa, fenômeno conhecido como o *spurt loss* (invasão inicial da lama na rocha, antes da formação do reboco). Após o *spurt loss*, partículas sólidas presentes no fluido e que são da dimensão dos poros da rocha colmatam a rocha resultando na produção do reboco interno e externo, conforme observado na Figura 3. Depois de formadas as primeiras camadas da torta, as partículas sólidas são retidas e apenas o fluido base permeia a torta, sendo este denominado como filtrado.

A formação de uma torta resistente e de baixa permeabilidade é fundamental para preservar as propriedades do reservatório, pois ela impede a invasão de partículas e reduz o volume de filtrado. Para um fluido bem formulado, só há invasão de partículas durante o *spurt loss* e uma vez que a torta é formada há apenas invasão de filtrado (FERGUSON; KLOTZ, 1954; JIAO; SHARMA, 1992).

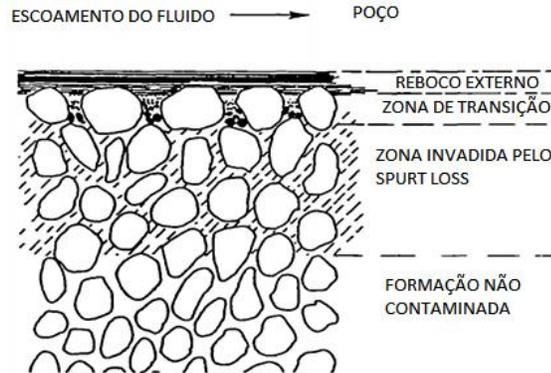


Figura 3. Formação da torta e a invasão de filtrado. Fonte: Peng (1990).

A invasão descontrolada do fluido de perfuração provoca danos ao reservatório, diminuindo a permeabilidade ao óleo durante a etapa de produção. A obstrução dos poros pode ocorrer de forma física, decorrente da obstrução dos poros pela invasão de partículas sólidas e de polímeros, ou quimicamente em razão de reações entre o filtrado e os componentes da matriz rochosa que podem resultar na precipitação de sais (JILANI *et al.*, 2002).

O volume de filtrado, assim como a formação da torta, também depende da pressão de operação. Na Figura 4 são apresentadas curvas de massa de filtrado por tempo, nela pode ser observado que a massa de filtrado aumenta com o acréscimo da pressão. Já a taxa de filtração tem um acréscimo instantâneo com o aumento da pressão, observado pelo aumento da inclinação da curva de massa de filtração pela raiz quadrada do tempo seguido pela interrupção da perda de fluido devido à compactação da torta que diminui a permeabilidade da mesma (SHERWOOD; MEETEN, 1997).

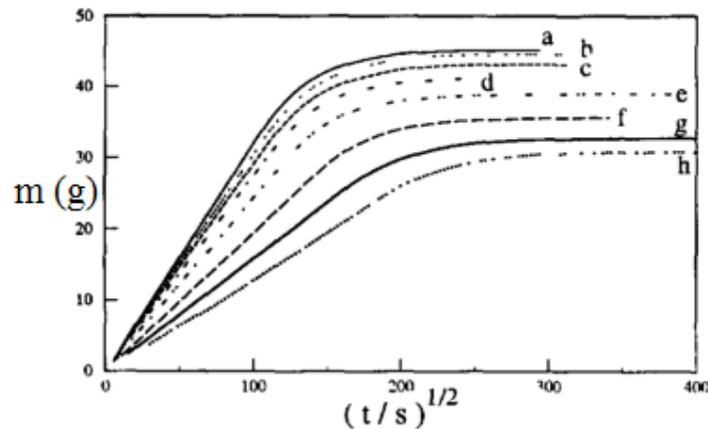


Figura 4. Massa de filtrado em pressões (a) 5,7 Bar; (b) 3 Bar; (c) 2 Bar; (d) 1 bar; (e) 0,5 Bar; (f) 0,2 bar ; (g) 0,1 Bar e (h) 0,05 bar . Fonte: Adaptado de Sherwood e Meeten (1997).

Segundo Ferguson e Klotz (1954), o processo de filtração pode ser dividido em três etapas: a filtração estática, a filtração dinâmica e a filtração dinâmica abaixo da broca.

- A filtração estática

A filtração estática ocorre quando não há circulação de fluido de perfuração no poço e a taxa de filtração é controlada apenas pela espessura do reboco (torta). O aumento contínuo da espessura da torta com o tempo provoca o decréscimo da taxa de filtração e da permeabilidade da torta.

- A filtração dinâmica

A filtração dinâmica ocorre devido à circulação do fluido de perfuração nas paredes do poço (Figura 5). Nela, a taxa de filtração depende da formação da torta que está relacionada a dois parâmetros: a deposição de sólidos e a erosão contínua da torta em função do cisalhamento da mesma, gerado pela circulação do fluido de perfuração (VAUSSARD *et al.*, 1986).

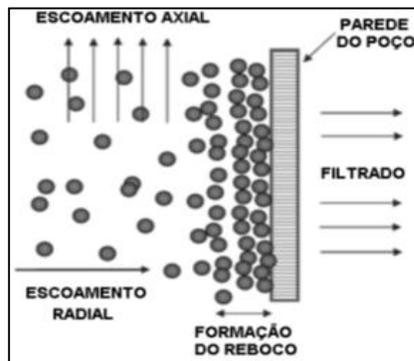


Figura 5. Filtração dinâmica. Fonte: Araújo (2010).

A erosão da torta na filtração dinâmica está ligada às propriedades tanto do escoamento quanto da própria torta. Vaussard *et al.*(1986) afirmam que tortas menos compressíveis são mais propensas a sofrer a erosão das camadas mais externas, uma vez que quanto mais distante do meio filtrante, maior é a porosidade do filme.

- Filtração dinâmica abaixo da broca de perfuração

Neste caso, o fluxo de filtrado é controlado pela taxa de perfuração, pelas propriedades do fluido de perfuração e da formação rochosa. Não há formação de reboco uma vez que a broca remove continuamente as partículas depositadas sobre a rocha (FERGUSON; KLOTZ, 1954).

2.5 Escoamento em meios porosos.

Henry Darcy foi o pioneiro no estudo do escoamento em meios porosos. Através de pesquisas realizadas durante a construção de reservatórios de água, ele investigou fenômenos relacionados com a hidrodinâmica, como a perda de carga em um meio poroso. Para auxiliar suas pesquisas, ele desenvolveu o aparato apresentado na Figura 6.

Darcy publicou uma correlação para a vazão de permeado em filtros de areia (DARCY, 1856). Esta correlação é conhecida como a lei de Darcy, válida para escoamento laminar ($Re < 2100$).

$$Q = Ak \frac{\Delta P}{\mu L}, \quad (1)$$

onde Q é a vazão volumétrica de fluido, A é a área transversal ao escoamento, k é a permeabilidade, ΔP é o diferencial de pressão, μ é a viscosidade do fluido e L o comprimento do leito poroso.

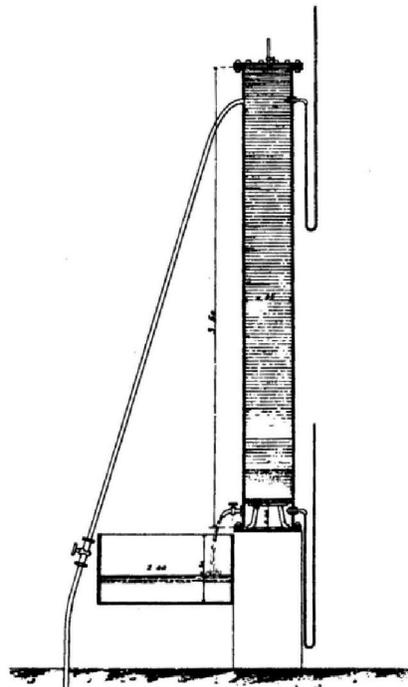


Figura 6. Aparato de Darcy. Fonte: Darcy (1856).

2.6 Teoria e equacionamento da filtração estática

Darley e Gray (1988) deduziram uma equação que descreve o volume de filtrado a partir de um balanço de massa e da lei de Darcy para escoamento laminar, já que o escoamento do fluido através da torta ocorre lentamente. Se uma unidade de volume de suspensão de sólidos for filtrada sobre um meio permeável e x for uma fração de volume de filtrado (V_w) gerado, então a fração de volume de sólido (V_c) depositado será $1-x$ conforme a equação 2:

$$\frac{V_c}{V_w} = \frac{1-x}{x}, \quad (2)$$

Sabendo que:

$$V_c = T_{mc} \cdot A, \quad (3)$$

onde T_{mc} é a espessura da torta e A é a área de filtração. Combinando as equações 2 e 3, e expressando a espessura da torta em função das demais variáveis obtém-se que:

$$T_{mc} = \frac{1-x}{x} \cdot \frac{V_w}{A}, \quad (4)$$

Aplicando a lei de Darcy no processo de filtração em função da variação do volume de filtrado com o tempo:

$$\frac{dV_w}{dt} = \frac{k \cdot \Delta P \cdot A}{\mu \cdot T_{mc}}, \quad (5)$$

onde ΔP é o diferencial de pressão, k é a permeabilidade, μ é a viscosidade do fluido base e T_{mc} é a espessura do meio poroso. Substituindo a equação 4 na equação 5:

$$\frac{dV_w}{dt} = \frac{k \cdot \Delta P \cdot A}{\mu} * \frac{1}{\frac{1-x}{x} \cdot \frac{V_w}{A}}, \quad (6)$$

Reorganizando a equação 6 e isolando o volume de filtrado:

$$V_w dV_w = \frac{k * \Delta P * A^2}{\mu} \left(\frac{x}{1-x} \right) dt, \quad (7)$$

Larsen (1938) *apud* Darley e Gray (1988) observou que quando o fluido for filtrado, à pressão e temperatura constantes, o volume de filtrado é proporcional a \sqrt{t} e a razão entre o volume de filtrado e da torta (V_w/V_c) é constante com o tempo. A Figura 7 exibe uma curva típica de filtração de volume de filtrado por t . Nota-se que a relação entre essas duas variáveis é linear, com exceção dos pontos iniciais da filtração onde ocorre o *spurt loss*.

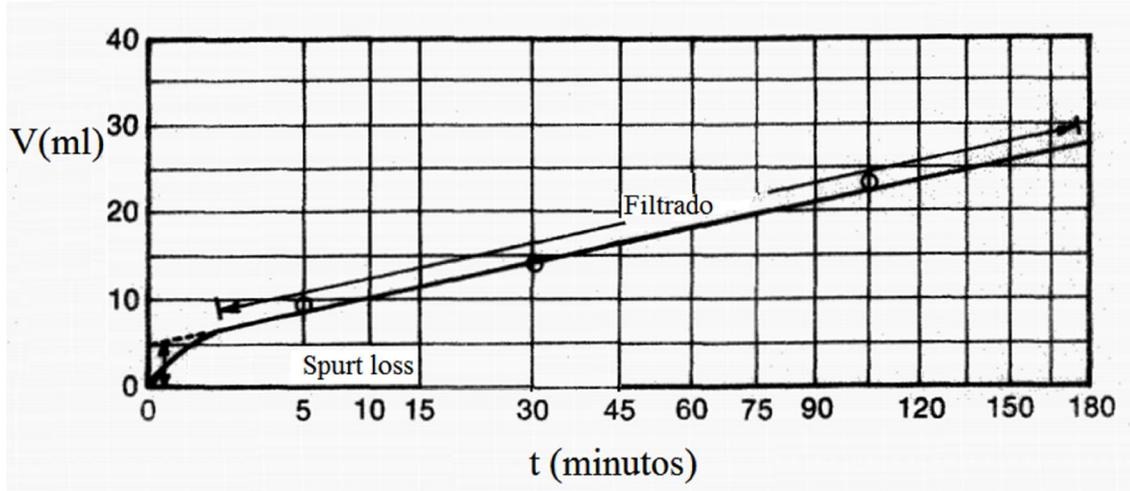


Figura 7. Relação entre o volume de filtrado pelo tempo. Fonte: Adaptado de Darley e Gray (1988).

Integrando a equação 7:

$$V_w^2 = \frac{2 \cdot k \cdot \Delta P \cdot A^2}{\mu} \cdot \left(\frac{x}{1-x} \right) \cdot t, \quad (8)$$

Substituindo a equação 2 na equação 8 obtém-se equação governante da filtração estática:

$$V_w^2 = \frac{2 \cdot k \cdot \Delta P \cdot A^2}{\mu} \cdot \frac{V_w}{V_c} \cdot t, \quad (9)$$

Substituindo a equação 3 na equação 9 e isolando a permeabilidade obtemos a equação de Engelhardt e Schindewolf (1952).

Permeabilidade da torta:

$$k = V_w \cdot T_{mc} \cdot \frac{\mu}{2 \cdot t \cdot \Delta P \cdot A}, \quad (10)$$

onde V_w é o volume de filtrado em cm^3 , T_{mc} é a espessura da torta em cm, t é o tempo em segundos, P é a pressão em atm, A é a área de filtração em cm^2 e μ é a viscosidade do filtrado em centipoise. A permeabilidade nessa equação é dada em Darcy.

Expressões para calcular a porosidade e a espessura da torta podem ser definidas a partir de balanços de massa. O valor da porosidade é obtido por meio de uma relação entre o peso da torta úmida e da torta seca, conforme a equação 11, denominada porosidade de referência que é calculada a um psi.

$$\phi_{mco} = \frac{\frac{w_w}{w_d} - 1}{\frac{w_w}{w_d} - 1 + \frac{\rho_f}{\rho_s}} \quad (11)$$

onde, w_w é o peso da torta úmida e w_d é o peso da torta seca e ρ_f e ρ_s as densidades do fluido e do sólido, respectivamente.

Para a espessura da torta, um balanço de massa permite que T_{mc} seja escrito como:

$$T_{mc} = \frac{w_w}{A(1 - \phi_{mco})\rho_s}, \quad (12)$$

sendo, w_w é o peso da torta molhada, ϕ_{mco} é a porosidade de referência da torta, ρ_s a densidade do sólido e A é a área de filtração.

2.7 Teoria da filtração de Dewan e Chenevert (2001)

Dewan e Chenevert (2001) apresentaram uma teoria para prever o crescimento da torta de filtração e da invasão de filtrado, que possibilita ainda a obtenção de parâmetros como a permeabilidade e a compressibilidade da torta. O equacionamento apresentado pelos autores baseia-se na lei de Darcy e em outras correlações propostas na literatura. Basicamente, o modelo baseia-se na hipótese de que o escoamento de um fluido que contém sólidos permeia uma matriz porosa. Este escoamento é provocado por um diferencial de pressão entre o poço e a formação. Conforme o fluido é pressionado contra o meio poroso, ele é filtrado e as partículas sólidas presentes no fluido são retidas na parede do meio poroso, dando origem à torta de filtração, conforme a Figura 8.

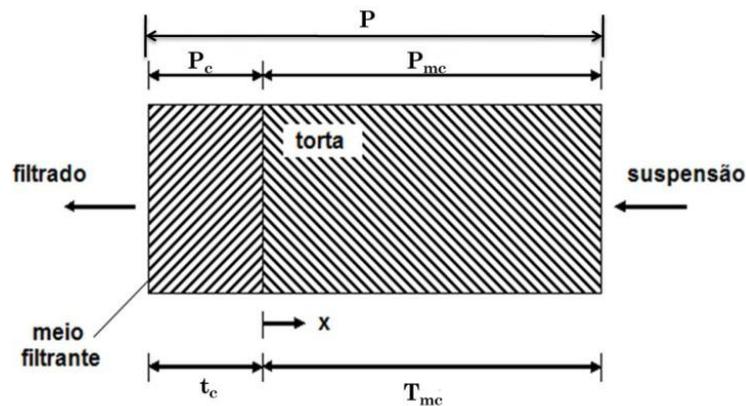


Figura 8. Representação da formação de torta. Fonte: Adaptado de Dewan e Chenevert (2001).

O fluxo de filtrado em meios porosos pode ser descrito pela equação de Darcy (1856):

$$q(t) = \frac{(P - P_{mc})k_c}{14700 \cdot \mu \cdot t_c}, \quad (13)$$

sendo, $q(t)$ é a taxa de filtração, P é a pressão sobre o fluido, P_{mc} (psi) a pressão através da torta, k_c (mD) a permeabilidade do meio filtrante, μ (cP) a viscosidade do filtrado e t_c (cm) a espessura do meio filtrante.

Inicialmente, ou seja, quando o tempo é igual a zero, não há torta formada e toda a pressão é aplicada ao meio filtrante, sendo $q(t)$ máximo. Com o crescimento da torta, há um aumento na pressão da torta (P_{mc}). Isso reduz o gradiente de pressão através do meio filtrante, logo $q(t)$ diminui. A equação de Darcy (1856) para a queda de pressão através da torta pode ser representada por:

$$P_{mc}(t) = 14700 \cdot \frac{q(t) \cdot T_{mc}(t) \cdot \mu}{k(t)}, \quad (14)$$

sendo, k a permeabilidade da torta, μ (cP) a viscosidade do filtrado, $q(t)$ é a taxa de filtração e T_{mc} (cm) a espessura da torta de filtração.

Dewan e Chernevert (2001) correlacionam a permeabilidade da torta compressível à pressão aplicada sobre a mesma:

$$k(t) = \frac{k_{mc0}}{P_{mc}^v(t)}, \quad (15)$$

onde, k_{mc0} é a permeabilidade de referência definida para uma pressão diferencial de 1 psi e v é o índice de compressibilidade. Se o valor do índice de compressibilidade for zero, a torta é incompressível. Se v atingir a unidade tem-se uma torta tão compressível que a sua permeabilidade é inversamente proporcional ao diferencial de pressão através dela.

Para obter-se permeabilidade de referência utiliza-se a equação 16, deduzida por Dewan e Chernevert (2001):

$$k_{mc0} = 14700 \cdot \frac{m\mu s}{P^{(1-v)} \left(1 - s - \frac{\phi_{mc0}}{P^{\delta v}}\right)}, \quad (16)$$

onde, m (cm²/s) um parâmetro, s a fração volumétrica de sólidos no fluido, calculados pelas equações 17 e 18, respectivamente e ϕ_{mc0} a porosidade de referência definida para uma pressão diferencial de 1 psi .

Sendo,

$$m = \frac{2t_1}{S_1^2}, \quad (17)$$

$$S = \frac{V_s}{V_t}, \quad (18)$$

onde (t_i, S_i) é o par de coordenadas do início da mudança de pressão, V_s (cm³) é o volume de sólidos no fluido e V_t (cm³) é o volume do fluido.

Para calcular a porosidade de uma torta compressível, foi utilizada uma equação baseada na correlação de Tiller (1953). A porosidade pode ser expressa como uma função da pressão, conforme:

$$\phi_{mc}(t) = \frac{\phi_{mc0}}{P_{mc}^{\delta v}(t)}, \quad (19)$$

sendo δ um multiplicador na faixa de 0,1 a 0,2. Neste trabalho, utilizaremos δ 0,1. A porosidade de referência é definida como:

$$\phi_{mco} = \frac{\alpha}{\alpha + \frac{\rho_f}{\rho_s}}, \quad (20)$$

sendo ρ_f e ρ_s as densidades do fluido e do sólido, respectivamente. O parâmetro α é definido como:

$$\alpha = \frac{w_w}{w_d} - 1, \quad (21)$$

onde, w_w peso da torta molhada e w_d peso da torta seca.

A espessura da torta pode ser verificada de duas formas: através de uma medição experimental por meio de uma régua de microescala ou calculada a partir de um balanço de massa:

$$T_{mco} = \frac{w_w}{A(1 - \phi_{mco})\rho_s}, \quad (22)$$

sendo, w_w é o peso da torta molhada, ϕ_{mco} a porosidade de referência da torta, a densidade do material particulado, ρ_s (g/cm³) e a área de filtração, A (cm²).

Dewan e Chenevert (2001) realizaram experimentos em uma célula de filtração de bancada, com um fluido base água. Os autores definiram a variável *slowness* (s/cm) como o inverso do fluxo. Esta definição permite uma melhor visualização dos efeitos de pressão quando comparado às curvas de filtração de volume de filtrado em função do tempo ou da raiz quadrada do tempo. Inicialmente, o valor de *slowness* tende a zero enquanto que a taxa de filtrado aproxima-se de infinito.

$$S = \frac{1}{f} = \frac{A}{\frac{\Delta V}{\Delta t}} = \frac{\Delta t}{\Delta V} A, \quad (23)$$

sendo A (cm^2) a área de filtração, ΔV (cm^3) a variação do volume de filtrado entre dois pontos da curva de filtração e Δt (s) a variação de tempo entre os mesmos pontos.

Os gráficos de *slowness* em função do tempo permitem visualizar melhor a influência da mudança de pressão quando comparado com a curva de volume de filtrado pela raiz quadrada do tempo, ilustrada na Figura 9 (a). A mudança de pressão gera uma queda brusca no valor de *slowness*, conforme ilustra a Figura 9 (b).

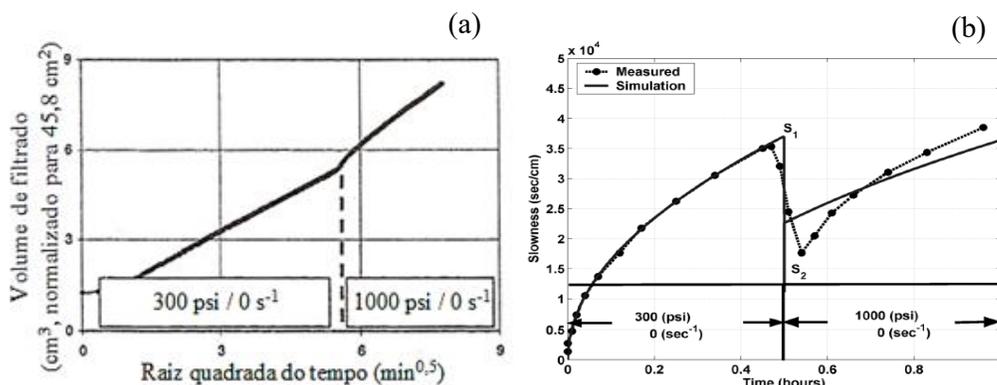


Figura 9. (a) Volume de filtrado versus raiz quadrada do tempo; (b) *Slowness* medido e simulado versus tempo. Fonte: Dewan & Chenevert (2001).

Nos experimentos de filtração estática, é possível obter S_1 e S_2 , exibidos na figura 9 (b), necessários para o cálculo do índice de compressibilidade através da equação 24.

$$v = 1 - \frac{\log S_1/S_2}{\log P_1/P_2}, \quad (24)$$

onde S_1 e S_2 são os pontos de *slowness* na mudança de pressão de P_1 para P_2 .

2.8 Histórico dos aparatos experimentais de filtração.

Já com os primeiros poços exploratórios observou-se que a invasão do fluido de perfuração provocava danos à parede do poço, pois este invadia as formações permeáveis. Verificou-se que este fenômeno era atenuado conforme se produzia uma torta oriunda da filtração do fluido de perfuração na formação porosa.

Uma das primeiras células de filtração na área de petróleo e gás natural foi apresentada nos trabalhos de Jones (1937) *apud* Darley e Gray (1988). O autor desenvolveu uma célula de filtração estática representada na Figura 10. Este aparato consiste em uma câmara pressurizada a ar que pressiona o fluido contra um meio filtrante, conforme

observado na Figura 11. O padrão apresentado pelo autor é utilizado até hoje e é adotado pelas normas API (*American Institute of Petroleum*).

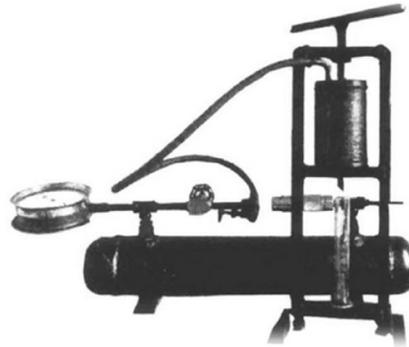


Figura 10. Célula de filtração estática de Jones. Fonte: Darley e Gray (1988).

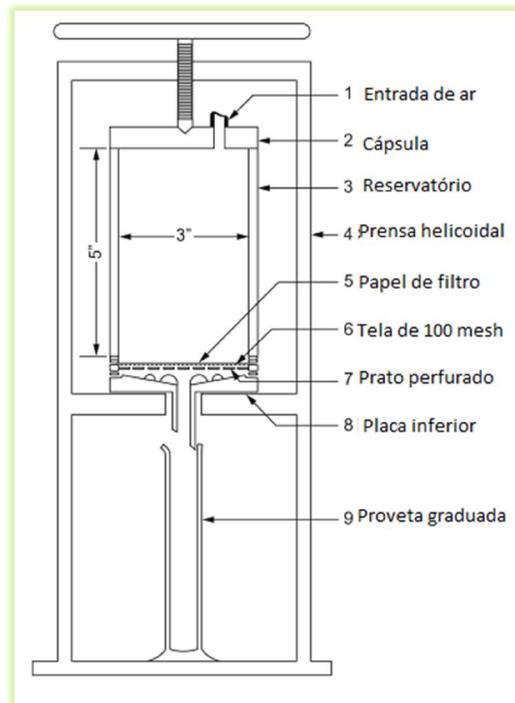


Figura 11. Representação da célula estática de Jones. Fonte: Darley e Gray (1988).

Células API vêm sendo utilizadas por décadas para determinar as propriedades da torta de filtração e o volume de filtrado. Visando estudar a filtração dinâmica, pela primeira vez Vaussard *et al.* (1986) utilizaram uma célula de filtração que simulava a ação do fluido em escoamento tangencial que reproduz a erosão da torta por meio de um sistema de cisalhamento composto por um motor conectado a um cone posicionado acima do meio filtrante conforme ilustrado na Figura 12.

Os autores realizaram experimentos comparativos entre a filtração estática e a dinâmica e observaram que a filtração dinâmica é governada por dois processos: a deposição de partículas e a erosão da torta pela ação cisalhante do fluido que escoava perpendicularmente à parede rochosa. A espessura da torta é definida pelo equilíbrio entre esses dois fenômenos, enquanto o crescimento da torta estática está apenas relacionado à deposição de partículas com o tempo.

Os autores estudaram o efeito da alternância entre a filtração dinâmica e a estática no volume de filtrado. Eles observaram que a filtração estática consolida a torta reduzindo o volume de filtrado, uma vez que na filtração estática a torta é melhor compactada e se torna mais resistente ao cisalhamento. A redução da vazão de filtrado é mantida mesmo após o regime dinâmico. A Figura 13 ilustra o efeito da alternância entre filtração estática e dinâmica. Nela observa-se a redução da vazão de filtrado com a compactação da torta no período de filtração estática. A redução da taxa de filtrado é observada até que se atinja o regime turbulento e a torta comece a se erodir.

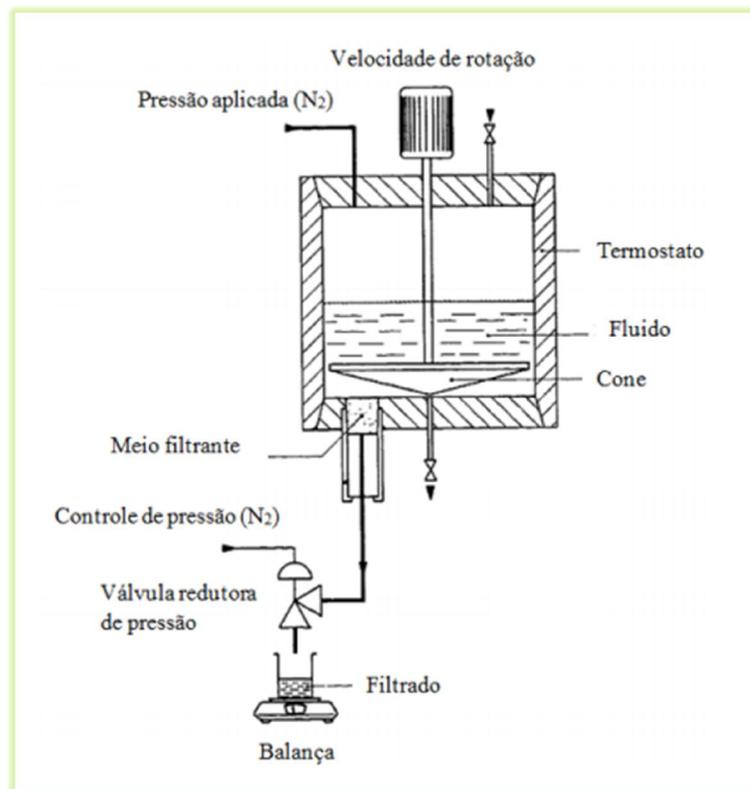


Figura 12. Célula de filtração de Vaussard. Fonte: Vaussard *et al.*(1986).

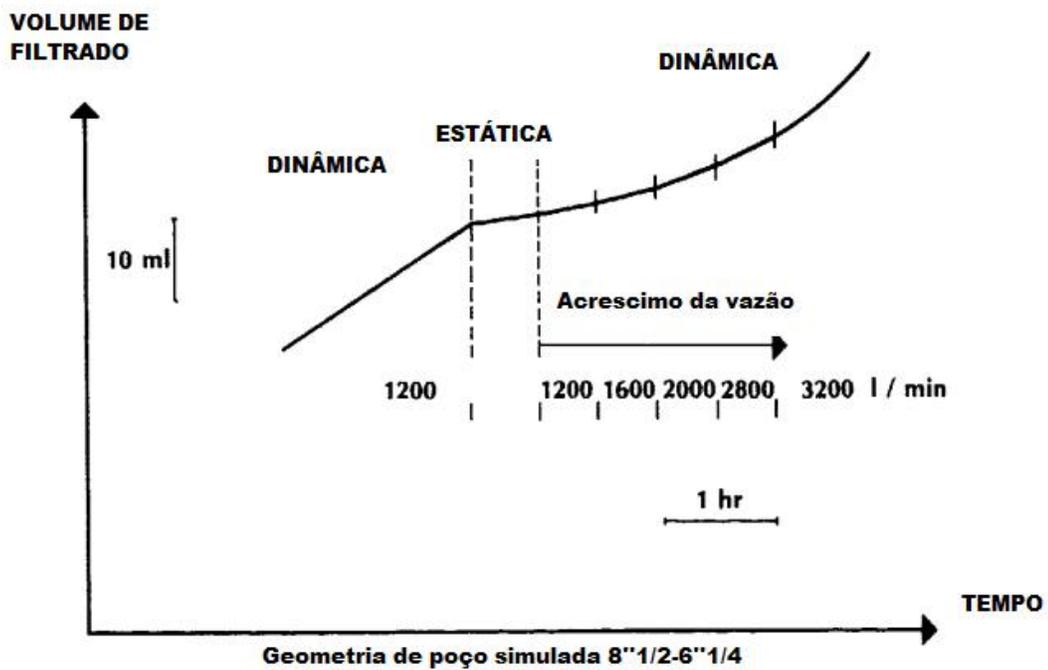


Figura 13. Efeito da alternância entre filtração estática e dinâmica. Fonte: Vaussard *et al.*(1986).

Dewan e Chenevert (2001) desenvolveram uma teoria capaz de descrever o crescimento da torta estática e dinâmica. Os autores confrontaram resultados teóricos e dados experimentais obtidos em uma célula *HTHP* (*High temperature, high pressure*) representada na Figura 14. Esta célula apresenta melhorias comparada àquela utilizada por Vaussard *et al.*(1986), como o sistema de pressurização a água, controlado por uma válvula manual, que por meio de um pistão pressiona o fluido de perfuração presente na câmara contra o meio filtrante. E um sistema de aquisição de massa de filtrado utilizando uma balança digital conectada a um computador, sendo este o principal aperfeiçoamento dessa célula.

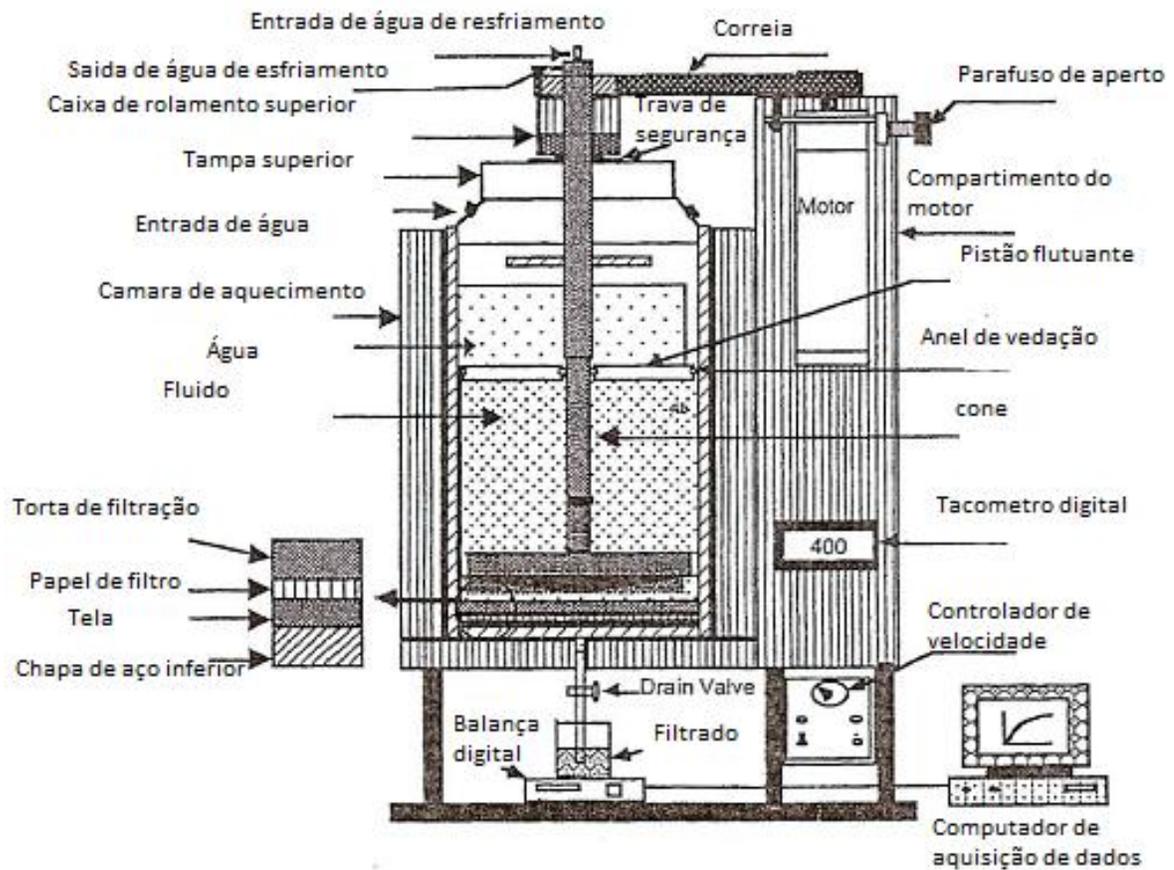


Figura 14. Célula de filtração de *HTHP*. Fonte: Adpatdo de Dewan e Chenevert (2001).

2.9 Trabalhos anteriores de filtração desenvolvidos no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF)

Araújo (2010) iniciou os estudos de filtração no LEF, tendo realizado experimentos de filtração estática e dinâmica utilizando suspensões de carbonato de cálcio. Para isso, o autor construiu uma unidade de filtração dinâmica (Figura 15) e duas unidades de filtração estática: uma de bancada (Figura 16) e uma unidade de linha através de uma modificação na unidade de filtração dinâmica (Figura 17).

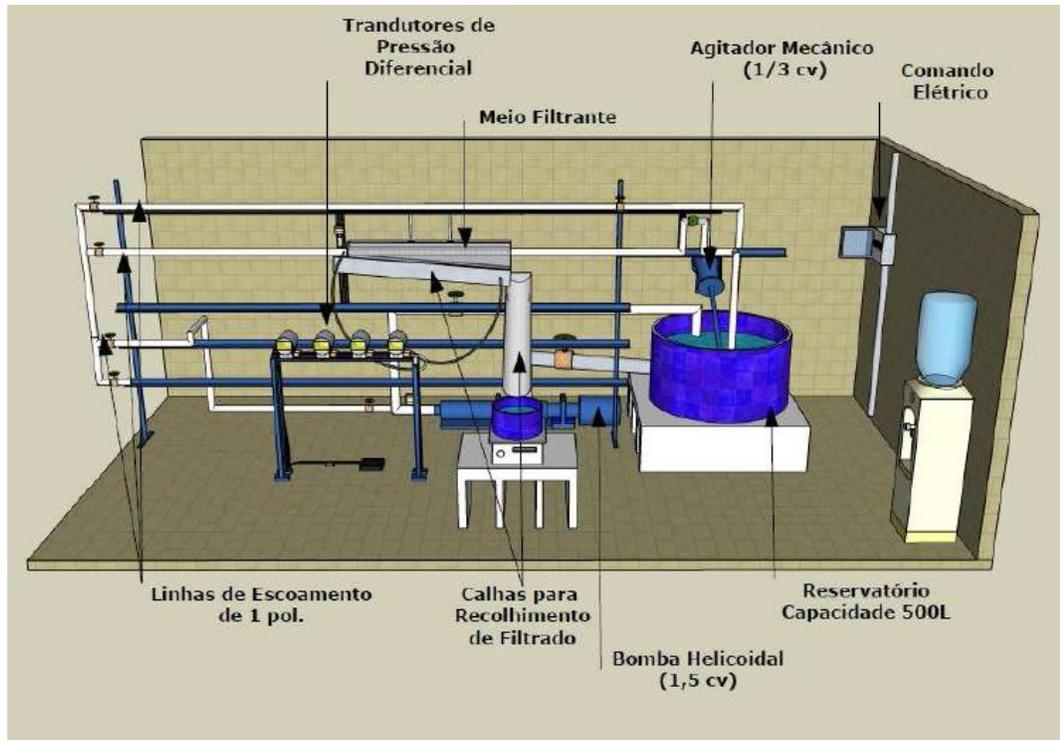


Figura 15. Unidade filtração dinâmica. Fonte: Araújo (2010).

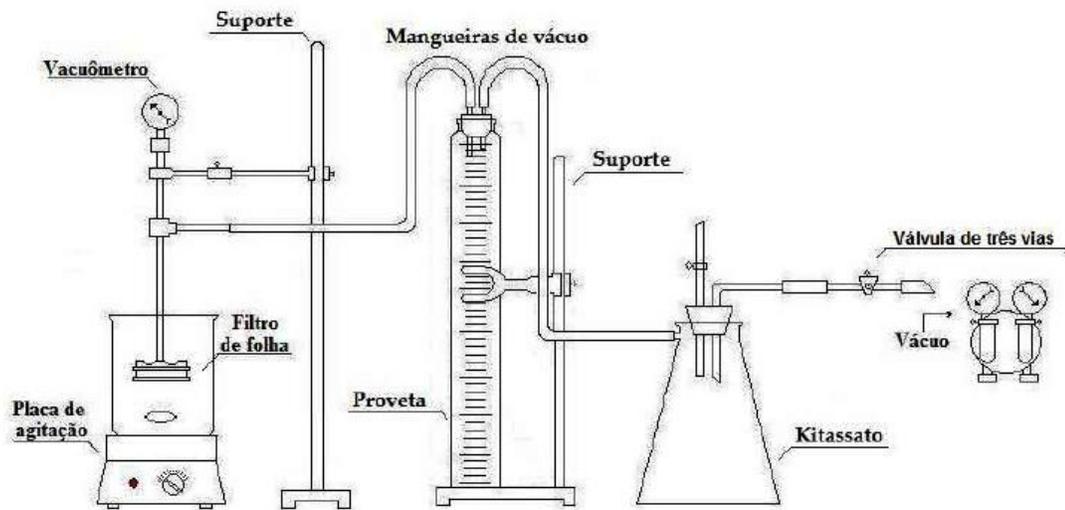


Figura 16. Unidade de bancada para filtração estática. Fonte: Araújo (2010).

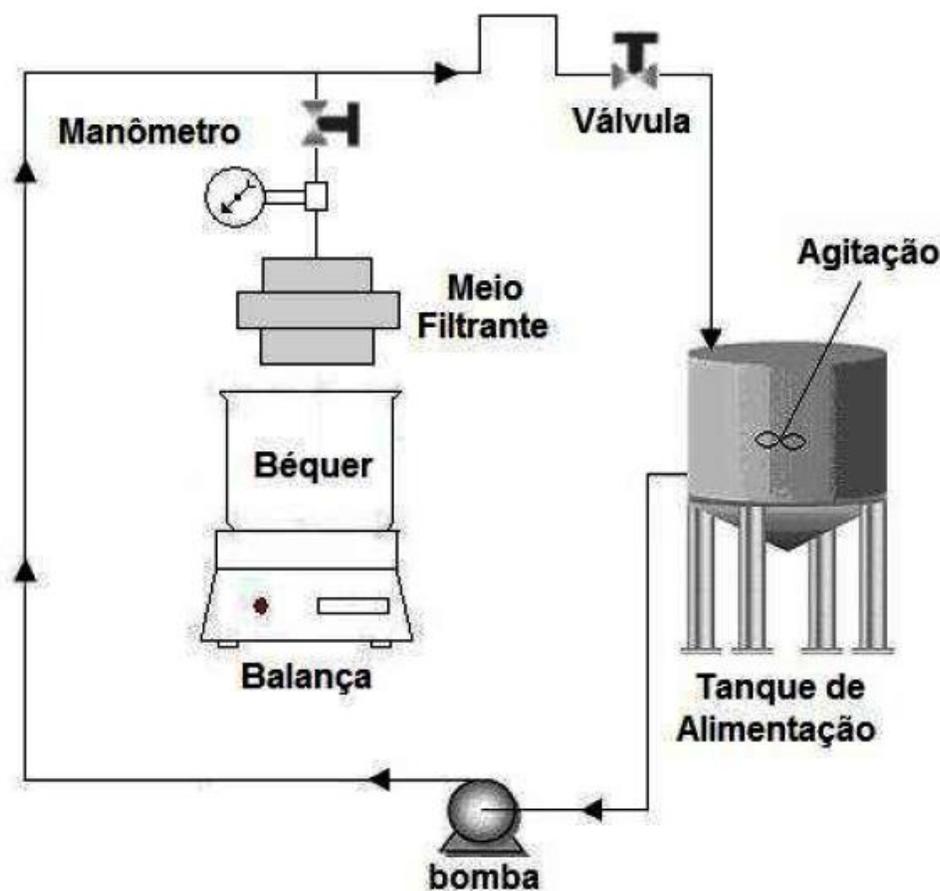


Figura 17. Unidade de filtração estática. Fonte: Araújo (2010).

Os dados experimentais foram confrontados com a simulação empregando o modelo de filtração cruzada de Ferreira e Massarani (2005). Foram calculados os parâmetros da filtração: resistividade média da torta, resistência do meio filtrante e a porosidade da torta.

Araújo (2010) concluiu que o acréscimo na pressão para uma suspensão de mesma concentração gera um maior volume de filtrado. Assim como uma maior concentração de sólidos para uma mesma pressão resulta em um volume inferior de filtrado. Ele também concluiu que não é possível determinar a resistividade da torta dinâmica através de dados de filtração estática.

Martins (2013) foi responsável pela montagem da célula de filtração *HTHP* produzida pela OFITE ilustrada na Figura 18. Esta célula é similar a aquela usada por Dewan e Chenevert (2001), porém com uma modificação, foi fabricado um cilindro reservatório adicional de 900 cm³ que substitui o cilindro original da célula quando se realiza experimentos com fluido base óleo, já que para se ter um volume de filtrado significativo, é necessária uma maior área de filtração. Com essa modificação, foi possível realizar experimentos com fluidos base água e base óleo, neste tipo de célula.



Figura 18. Célula *HTHP* OFITE. Fonte: Martins (2013).

Martins (2013) estudou a filtração estática e dinâmica em fluidos base água, base óleo sem emulsão e base óleo com emulsão, empregando como meio filtrante papel de filtro e amostras de rocha de diferentes permeabilidades. Ela observou que o fluido base óleo com emulsão foi o que produziu a menor quantidade de filtrado tanto para experimentos com o papel de filtro quanto para os experimentos empregando amostras de rocha, devido à obstrução dos poros pelas gotículas de água presentes na emulsão, que neste caso se comportam como partículas sólidas. Ela também concluiu que o acréscimo da taxa de cisalhamento provoca o aumento do volume de filtrado em função da erosão da torta de filtração.

Calabrez (2013) continuou o estudo da filtração utilizando a célula *HTHP*. Ela investigou os parâmetros da torta de filtração e a invasão de filtrado sob condições estáticas e dinâmicas. A autora realizou testes comparativos entre fluidos base água e base óleo e verificou que o fluido base água proporciona maior volume de filtrado devido à formação de uma torta mais porosa e permeável.

Foi observado que o fator de fricção está relacionado a propriedades do fluido com a concentração de sólidos e a reologia do mesmo. Entretanto, a autora ressaltou que o parâmetro que mais influencia o fator de fricção é a compressibilidade da torta.

Realizou-se ainda a modelagem da filtração estática de um fluido base água e comparou com os dados experimentais. Foi previsto o comportamento das curvas de volume de filtrado por tempo e do crescimento da torta em função do tempo de filtração. As curvas

modeladas foram semelhantes as observadas experimentalmente, com isso concluiu que o modelo foi reprodutivo.

Ferraz (2014) analisou o efeito da distribuição granulométrica na formação da torta sob condições estáticas na célula de filtração *HTHP*. Foi utilizado como agente adensante esferas de vidro e carbonado de cálcio de diferentes faixas granulométricas.

Para realizar seus experimentos formulou fluidos base água Newtonianos (glicerina) e não-newtonianos. Como viscosificante foi utilizado goma xantana (GX) ou carboximetilcelulose (CMC) e foi avaliado o efeito da adição de sólidos na reologia do fluido e no volume final de filtrado.

Para os fluidos formulados com esferas de vidro não foi observado alterações nas suas propriedades reológicas com a variação da faixa granulométrica, isso tanto para os fluidos Newtonianos como dos fluidos não-Newtonianos. Já nos experimentos de filtração estática foi observado um volume de filtrado elevado para todas as faixas granulométricas.

Nos fluidos preparados com carbonato de cálcio, foi observado que a tensão cisalhante se eleva com o aumento do tamanho de partícula nos fluidos formulados com ambos viscosificantes (CMC e GX). Nos experimentos de filtração estática observaram que o polímero utilizado com agente viscosificante muda o perfil da filtração. Os fluidos compostos por CMC geram um maior volume de filtrado na maior faixa granulométrica de carbonato de cálcio. Nos fluidos que possuem GX em sua composição foi observado que o maior volume de filtrado foi obtido com a menor faixa granulométrica de carbonato de cálcio.

2.10 Célula de filtração *on line*.

Saasen *et al.* (2009) desenvolveram uma unidade para monitorar parâmetros do fluido de perfuração de forma automática. A unidade realiza medições de densidade, viscosidade, estabilidade elétrica, volume de filtrado e propriedades físico-químicas como pH. Para medir o volume de fluido, Saasen *et al.* (2009) utilizaram um célula de filtração *HTHP* automatizada que opera a temperatura de 120°C e pressão de 500 Psi.

A Figura 19 exibe a representação da célula de filtração automatizada. Este equipamento opera sem interferência humana em função de possuir uma base metálica porosa como meio filtrante, ao contrário da maioria dos aparatos que utiliza papel de filtro ou discos de filtração. Isso permite que o meio poroso possa ser reutilizado depois de realizado os ciclos de limpeza compostos de retro lavagem e ultrassom para a remoção da torta e dos sólidos presentes nos poros da base.

Neste aparato o volume de filtrado é medido de forma óptica por meio de um sensor que identifica a interface entre o recipiente e o líquido.

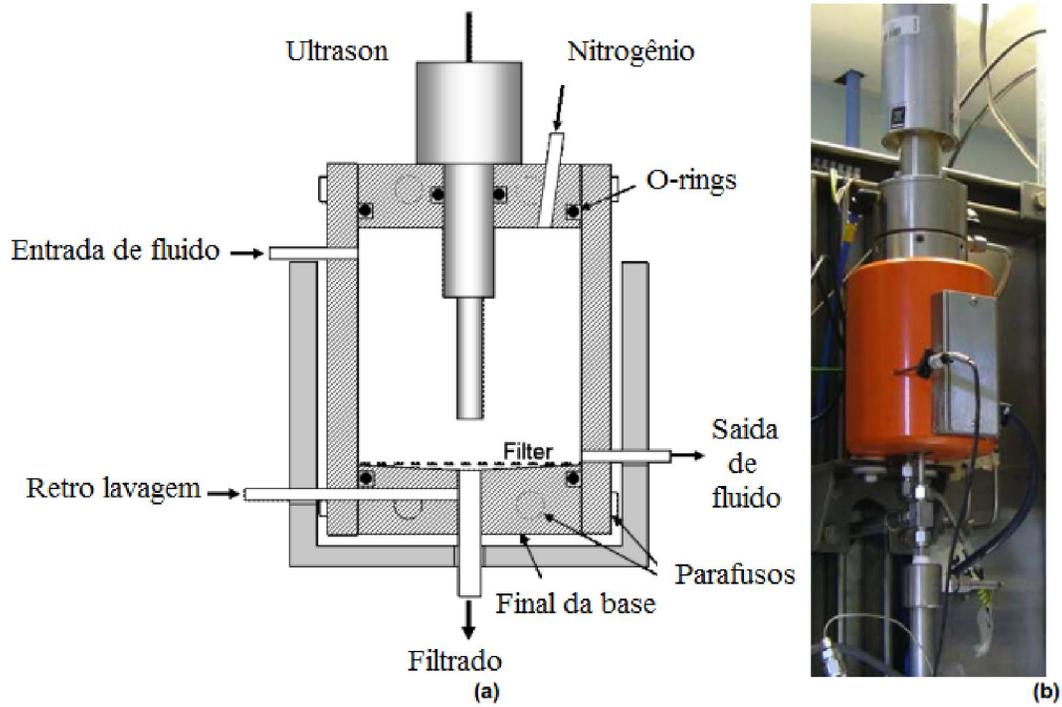


Figura 19. Representação da célula (a). Célula de filtração automatizada (b). Fonte: Adaptado de Saasen *et al.* (2009).

CAPITULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo desse trabalho foi a construção, instrumentação e validação de uma unidade de filtração *on line*. Para isso, foi modificado um protótipo de filtração *on line* projetado e construído pelo LEF, baseado em uma célula de bancada utilizada por Martins (2013), Calabrez (2013) e Ferraz (2014). A unidade protótipo foi instrumentada para realizar as seguintes atividades:

- Abrir e fechar a câmara de filtração de forma remota;
- Admitir fluido da linha automaticamente;
- Controlar a abertura e o fechamento das válvulas *ON-OFF*;
- Pressurizar e manter constante a pressão no interior da câmara;
- Monitorar os dados de pressão e de temperatura do fluido;

A construção da unidade online foi dividida em 3 etapas:

- Construção do *skid* para a preparação de fluidos e alimentação da célula;
- Modificação do protótipo de filtração, para atender as especificações de projeto;
- Instalação da rede elétrica e implementação da automação da unidade.

Para validação dos dados obtidos nesse trabalho, foram realizados testes comparativos com a célula de bancada que é utilizada como padrão para testes API.

3.1 Unidade para preparação de fluidos.

Foi construído um *skid* (exibido na Figura 20) para organizar de forma compacta a unidade de preparação e alimentação de fluido na célula. Todos os equipamentos e sensores do *skid* são operados e monitorados um uma interface virtual.

A unidade é composta por:

- Dois tanques de 150 L, ambos com agitadores, um para o preparo e armazenamento de fluido e outro para a lavagem da unidade;
- Uma bomba de deslocamento positivo 1,5 CV;
- Um transmissor de pressão;
- Um transmissor de temperatura;
- Um medidor mássico, que informa dados de vazão e densidade da lama de perfuração.

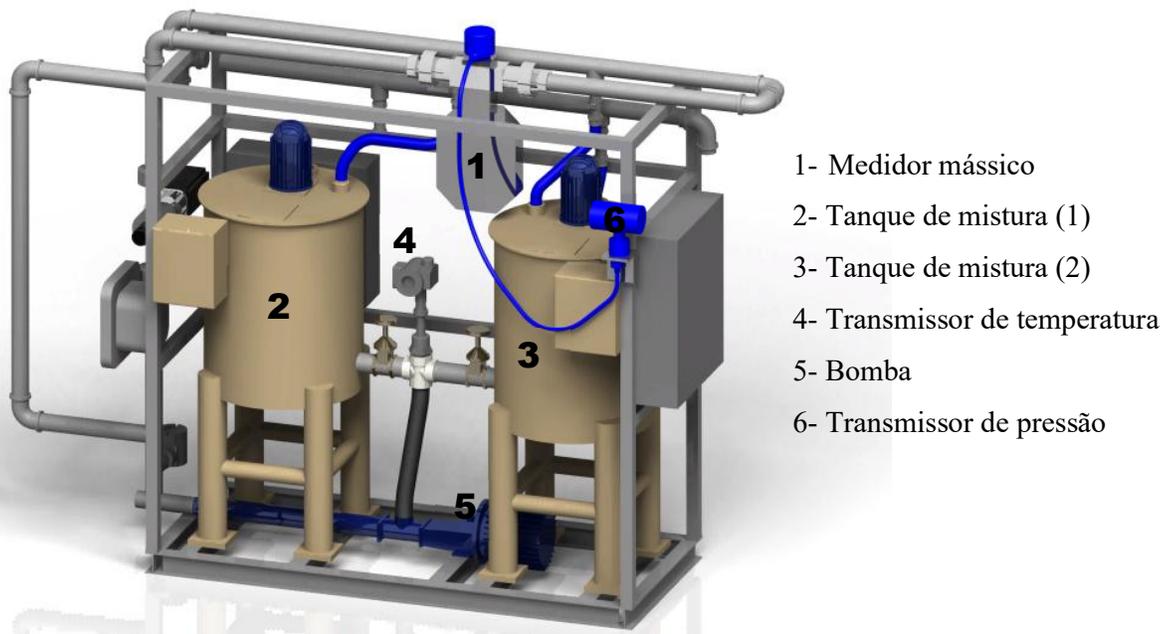


Figura 20. Projeto do *skid* da unidade.

O objetivo desse trabalho foi modificar um protótipo de célula de filtração *on line* projetado e construído pelo LEF, ilustrado na Figura 21. Esta célula possui sistema hidráulico composto por dois cilindros de óleo. Este sistema é responsável pela elevação do pistão para o fechamento da câmara e também pela pressurização da célula.

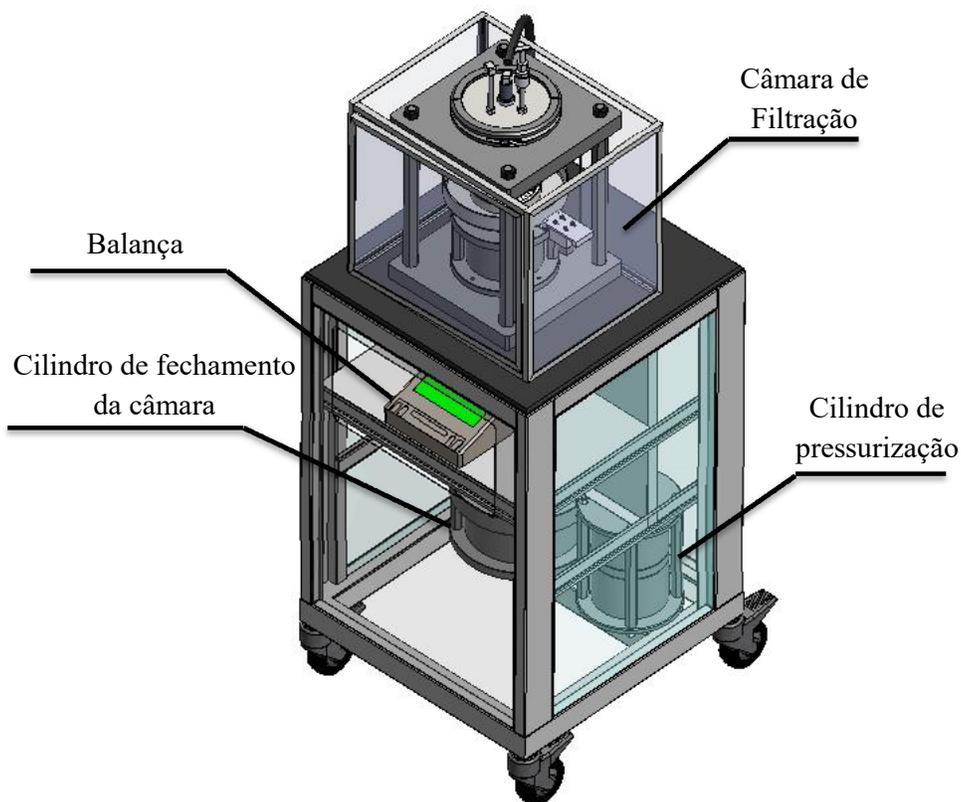


Figura 21. Representação da célula.

Para fechar a câmara de pressurização da célula, injeta-se ar comprimido no cilindro de menor diâmetro (ilustrado na Figura 21). O ar comprimido desloca óleo do cilindro para elevar o pistão e, conseqüentemente, a base de fechamento da câmara, observado na Figura 22. Esta base, além de realizar o fechamento da câmara, também atua como suporte para o meio filtrante, nesse caso papel de filtro. Após o pistão estar elevado fecha-se a válvula de óleo para manter o pistão suspenso durante a pressurização da câmara.

Para atingir a pressão de trabalho, alimenta-se o cilindro de maior diâmetro (ilustrado na Figura 21) com ar comprimido proveniente de um compressor. Neste cilindro há um multiplicador de pressão que injeta óleo para preencher uma bexiga dentro da câmara que comprime o fluido dentro da célula.

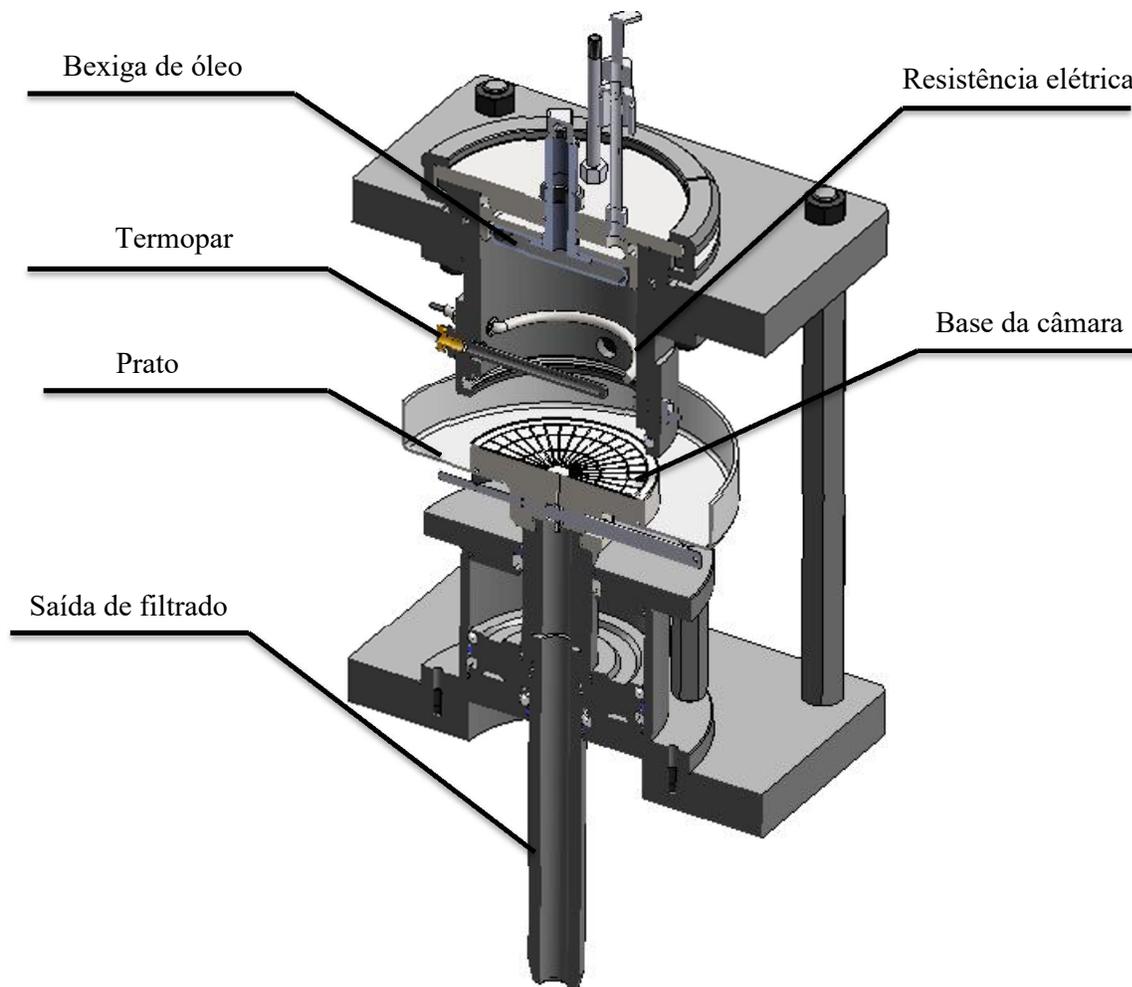


Figura 22. Visão do interior da célula.

3.2 Célula de filtração de bancada.

Para validar o protótipo de célula de filtração *on line*, foram realizados experimentos de filtração. Os resultados foram comparados com dados obtidos nas mesmas condições de operação e com o mesmo fluido, em uma célula de bancada e no protótipo *on line*. A célula de filtração de bancada que foi utilizada é uma célula de alta temperatura e alta pressão (*HHP*) produzida pela OFI, *Testing Equipments* (OFITE - 11302 Steeplecrest Dr. - Houston, TX – 77065) e modificada no Laboratório de Escoamentos de Fluidos (LEF-UFRRJ). Neste aparato, é possível realizar filtrações em condições estáticas ou dinâmicas em pressões até 2000 Psi e temperaturas até 200°F. Esta célula possui duas opções de cilindro de diferente volume para filtração de fluidos base água (cilindro de área menor) e base óleo (cilindro de área maior), conforme ilustrado na Figura 23.



Figura 23. Cilindros da célula de bancada *HHP*.

Para viabilizar os experimentos de filtração dinâmica, foi instalado um sistema cônico que mantém a taxa de cisalhamento constante sobre a superfície do meio filtrante, simulando a erosão da torta provocada pela circulação do fluido de perfuração na parede do poço. O sistema cônico impõe uma tensão constante sobre a torta dependendo da posição radial.

Esta célula funciona por compressão a água, que pressuriza o fluido através de um pistão. Este divide o cilindro da célula em câmara em duas: a superior com água e a inferior com o fluido, exibido na Figura 24. Na câmara superior, injeta-se água através de uma bomba para se exercer a pressão desejada. O controle da pressão é feito por meio de uma válvula que direciona a água para a câmara ou para o *by-pass*. Na câmara inferior, é inserido o fluido de perfuração. O cone de cisalhamento é utilizado apenas para experimentos de filtração dinâmica. Abaixo do cone, é inserido o meio filtrante, podendo ser papel de filtro ou uma amostra de rocha.

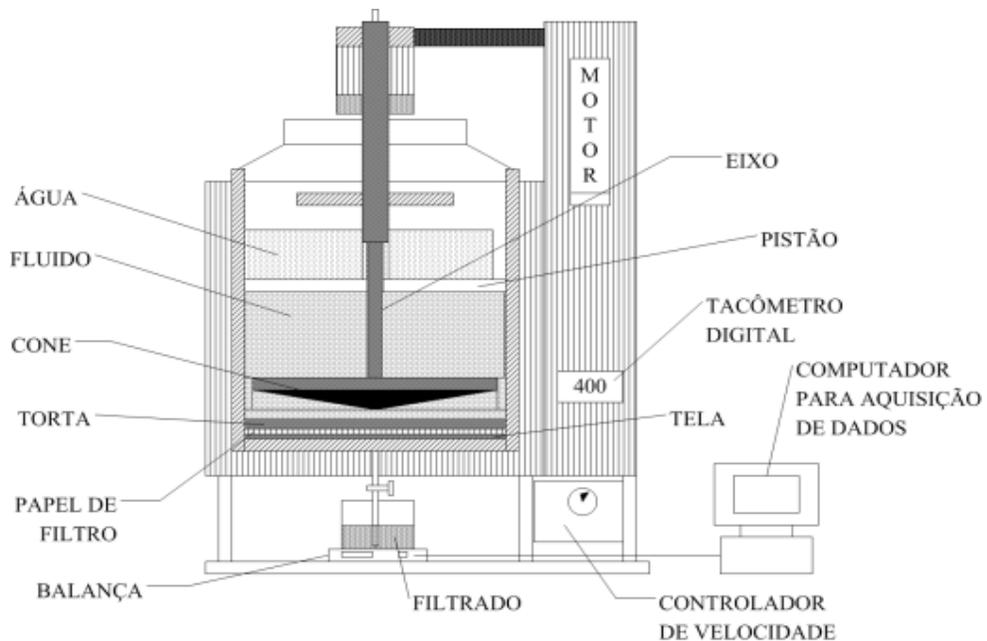


Figura 24. Representação da célula de bancada. Fonte: Dewan & Chenevert (2001), adaptado de Calabrez (2013).

Para iniciar a filtração, abre-se a válvula abaixo da célula, o fluido pressionado pelo pistão contra o meio poroso é filtrado e recolhido em um becker sob módulo de carga que fornece dados de massa por tempo a um *software* em linguagem *LabVIEW* (ilustrado na Figura 25).

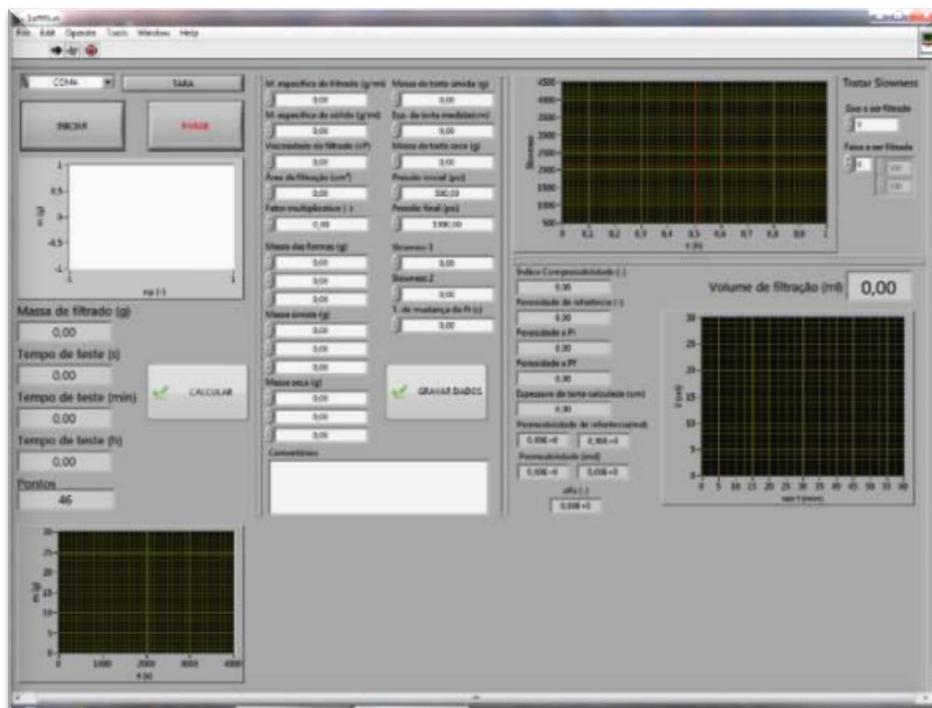


Figura 25. *Software* de filtração da célula de bancada.

3.3 Cálculo da permeabilidade

Para o cálculo da permeabilidade, foi proposto o uso de apenas uma equação simplificada para obter valores de permeabilidade, a equação de Engelhardt e Schindewolf (1952) *apud* Darley e Gray (1988). Esta equação permite calcular a permeabilidade de uma forma mais simples, dependendo apenas do volume de filtrado e da espessura da torta, uma vez que a viscosidade, pressão, a área e o tempo do experimento são conhecidos. Já o equacionamento mais recente, desenvolvido por Dewan e Chenevert (2001), é mais complexo e possui seis equações para o cálculo da permeabilidade da torta.

Para verificar resultados fornecidos pela equação de Engelhardt e Schindewolf (1952) foram realizados experimentos de filtração. Calculou-se a permeabilidade por essa equação e comparou com valores de permeabilidade calculados pelo equacionamento de Dewan e Chenevert (2001), obtidos no trabalho de Ferraz (2014).

Para realizar os experimentos de filtração foram preparados nove fluidos, com a mesma formulação ensaiada por Ferraz (2014), contendo carbonato de cálcio de diferentes granulometrias e goma xantana (GX) ou carboximetilcelulose (CMC) como agente viscosificante. Os experimentos de filtração estática, utilizando a célula de bancada tiveram duração de 30 minutos sob pressão de 500 Psi. Como meio filtrante destes experimentos foi utilizado o papel de filtro da marca FANN. As características do papel de filtro estão detalhadas na Tabela 1. Os resultados de permeabilidade obtidos foram confrontados com valores encontrados por Ferraz (2014).

Tabela 1. Características do papel de filtro utilizado nas filtrações.

Características do papel de filtro				
Marca	Diâmetro (cm)	Área de filtração (cm ²)	Gramatura (g/m ²)	Retenção de partícula (µm)
Fann	6,30	22,70	92	2,7-5,0

3.4 Experimentos de validação da célula protótipo proposta

Para verificar o desempenho da célula *on line* realizou-se experimentos comparativos entre a célula *on line* e a célula de bancada, para isso foram preparados fluidos base água no *skid* da unidade e com estes foram realizados experimentos de filtração, com duração de 30 minutos em ambas as células. Para garantir iguais condições operacionais, foi utilizado na célula de bancada o cilindro de maior volume, pois esse tem a área de filtração similar à célula *on line*. Como meio filtrante, foi utilizado nos experimentos de validação, o papel de filtro da marca Whatmann. As características do papel de filtro estão detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características do papel de filtro nos experimentos de validação.

Características do papel de filtro				
Marca	Diâmetro (cm)	Área de filtração (cm ²)	Gramatura (g/m ²)	Retenção de partícula (µm)
Whatmann	12,50	122,72	96	2,7

Foram comparados dados de volume de filtrado em ambos os aparatos, assim como a porosidade e a permeabilidade das tortas obtidas na célula de bancada e no protótipo de filtração *on line*.

3.5 Caracterização do fluido

Para a realização dos experimentos foi preparado um fluido base água similar aos fluidos empregados na perfuração de poços. A sua concentração de sólidos foi ajustada conforme as características do meio filtrante utilizado, permitindo a filtração.

3.5.1 Concentração de sólidos

Para obter a concentração de sólidos foi utilizado o *kit* Retorta, Figura 26. Para realizar a análise, são necessários 10 mL do fluido de perfuração para alimentar a câmara. Após montado o equipamento, submete-se a amostra a aquecimento sob 30 minutos para vaporizar toda fração líquida do fluido, que passa por um condensador e conduz a fase liquefeita para uma proveta. Já os sólidos permanecem na câmara do equipamento, uma vez conhecendo a massa da câmara, massa de sólidos após o teste e saturação da salmoura utilizada obtém-se a concentração de sólidos de forma gravimétrica.



Figura 26. *Kit* Retorta. Fonte: Manual *Kit* Retorta FANN.

3.5.2 Densidade

A densidade foi monitorada em tempo real por meio de um medidor mássico, apresentado na Figura 27. Este equipamento é um densímetro que utiliza as forças de Coriolis para monitorar de forma *on line* a densidade e a vazão do fluido de perfuração.



Figura 27. Densímetro. (A) Sensor mássico. (B) Display. Fonte: o autor.

Os valores de densidade fornecidos pelo densímetro foram comparados a medições manuais aferidas manualmente em uma balança de lama FANN 140 representada na Figura 28.

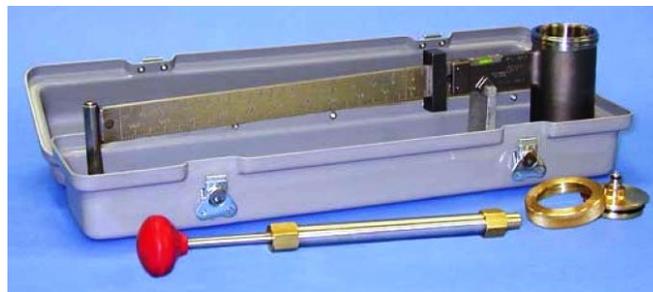


Figura 28. Balança de lama Fann 140. Fonte: Catálogo Fann.

3.5.3 Reologia

Os parâmetros reológicos dos fluidos foram obtidos pelo viscosímetro FANN 35 A, representado pela Figura 29. Este é um viscosímetro de cilindros coaxiais. O cilindro externo tem rotação e gira com uma velocidade constante enquanto o cilindro interno (bob) fica estático. O bob é deslocado pelo arraste do fluido criando um ângulo de deflexão. Esse instrumento possui seis velocidades de rotação (3, 6, 100, 200, 300, 600 RPM). A partir da velocidade e do ângulo de deflexão, calcula-se a viscosidade, a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação de acordo com as equações 25,26 e 27.



Figura 29. Viscosímetro Fann 35A. Fonte: Catálogo Fann.

$$\mu = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_3} \cdot \frac{\theta}{N} \cdot 100, \quad (25)$$

$$\tau = k_1 \cdot k_2 \cdot \theta, \quad (26)$$

$$\gamma = k_3 \cdot N, \quad (27)$$

sendo, μ a viscosidade do fluidos (cP), τ a tensão de cisalhamento (dina/cm^2), γ a taxa de deformação (s^{-1}), θ o ângulo de deflexão lido no equipamento, N a velocidade de rotação imposta ao sistema e k_1 , k_2 e k_3 constantes do equipamento. As constantes do equipamento, informadas na Tabela 3, foram obtidas no manual do viscosímetro.

Tabela 3. Constantes do viscosímetro FANN 35A.

Constante	Valor	Unidade
k_1	386	(dina.cm)/ θ
k_2	0,0132	$1/\text{cm}^3$
k_3	1,7023	1/s.rpm

Com os dados de tensão de cisalhamento e taxa de deformação foram obtidos os parâmetros reológicos por ajustes no modelo de Herschel-Bulkley exibido na equação 28.

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (28)$$

onde, τ é a tensão cisalhante, τ_0 é o limite de escoamento, k é o índice de consistência, γ é a taxa de deformação e n é o índice de comportamento do fluido.

3.6 A Automação da unidade

Para operar a unidade de forma remota, foi instalado no quadro elétrico um chassi de placa de aquisição de dados. Através dele, equipamentos e sensores foram controlados e monitorados por um *software*, que permite as seguintes ações:

- Manipular as válvulas automáticas;
- Agitar os tanques do *skid*;
- Monitorar a vazão da bomba;
- Monitorar a pressão no interior da célula e na tubulação;
- Monitorar a temperatura no interior da célula e na tubulação;
- Armazenar automaticamente os dados experimentais;

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo descreve a unidade experimental construída e as modificações na célula de filtração *on line* realizadas neste trabalho. Também foi descrita a interface virtual que controla a unidade. Para realizar a validação do protótipo de célula *on line*, foram preparados fluidos base água típicos compostos por CMC, carbonato de cálcio, redutor de filtrado e bactericida. Os fluidos formulados têm as mesmas características e propriedades dos fluidos utilizados na perfuração de poços. Esses fluidos foram caracterizados e submetidos a experimentos de filtração nas células *on line* e de bancada, sob as mesmas condições operacionais e os resultados obtidos em cada aparato foram confrontados.

4.1 A unidade de filtração *on line*

A unidade foi construída em duas partes: o *skid* de preparação e alimentação de fluidos na célula e a célula de filtração *on line*. A Figura 30 ilustra o fluxograma da unidade. Nele podem ser observados sensores instalados para monitorar a temperatura, a pressão e a densidade do fluido e as válvulas automáticas instaladas na célula *on line*, para automatizar a alimentação de fluido na câmara de filtração.

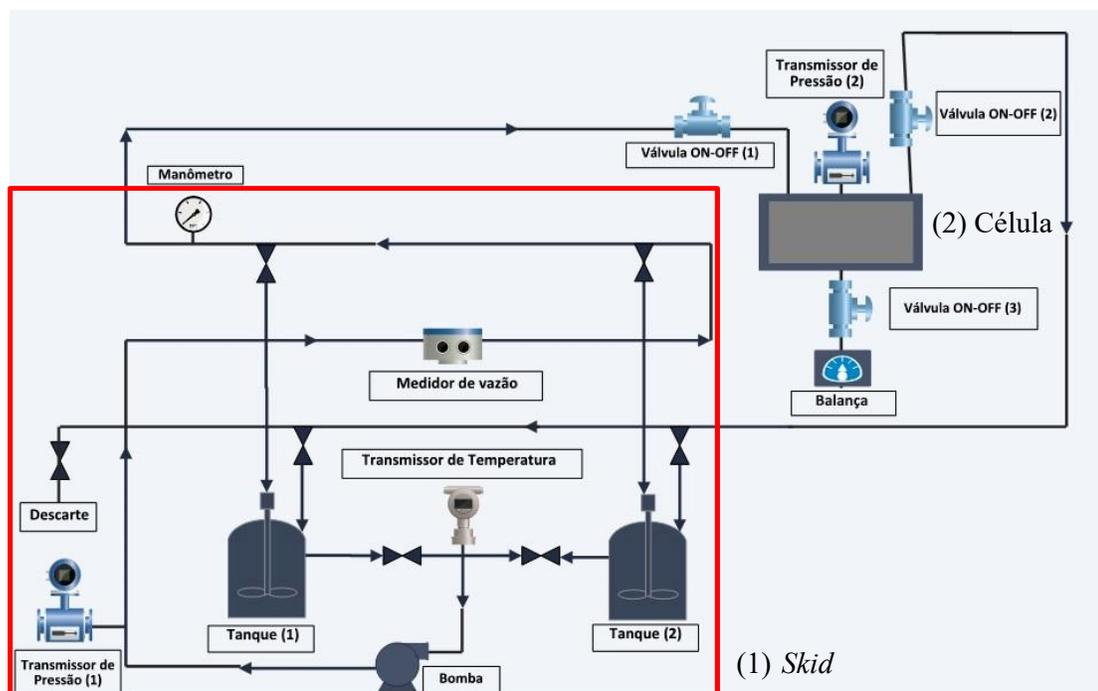


Figura 30. Fluxograma da unidade de filtração *on line*.

4.1.1 O *skid* de preparação de fluidos

Para alimentar o protótipo de célula de filtração, foi construída neste trabalho uma unidade de preparo de fluidos, de forma compacta, em formato de *Skid* (Figura 31). O *skid* é composto por 2 tanques de 150 L, ambos com agitadores, uma bomba de deslocamento positivo, um transmissor de temperatura (Figura 33), um transmissor de pressão (Figura 34) e um sensor mássico (Figura 32) que informa dados de vazão e densidade do fluido.



Figura 31. *Skid* de preparação de fluidos.



Figura 32. Sensor mássico Metroval modelo RHM 20.



Figura 33. Transmissor de temperatura Smar TT 301.



Figura 34. Transmissor de pressão Smar LD 291.

Para a automação da unidade, foi instalado um quadro elétrico (Figura 35) composto por disjuntores, contadoras e um chassi de placa de aquisição de dados (Figura 36). No chassi foram instalados três tipos de placas de aquisição, sendo elas: placas de entrada analógica que recebem sinal de corrente elétrica, placas de saída analógica que enviam sinal de corrente elétrica, para sintonizar comandos de proporcionalidade, por exemplo, regular a rotação da bomba. E placas para acionar equipamentos elétricos. A Figura 37 apresenta uma placa de aquisição de dados de entrada analógica. Por meio de uma interface virtual, o sinal de corrente elétrica recebido dos sensores é interpretado e repassado para o operador como informação do processo. A interface também transforma o comando dado pelo operador em sinal de corrente para acionar os equipamentos.

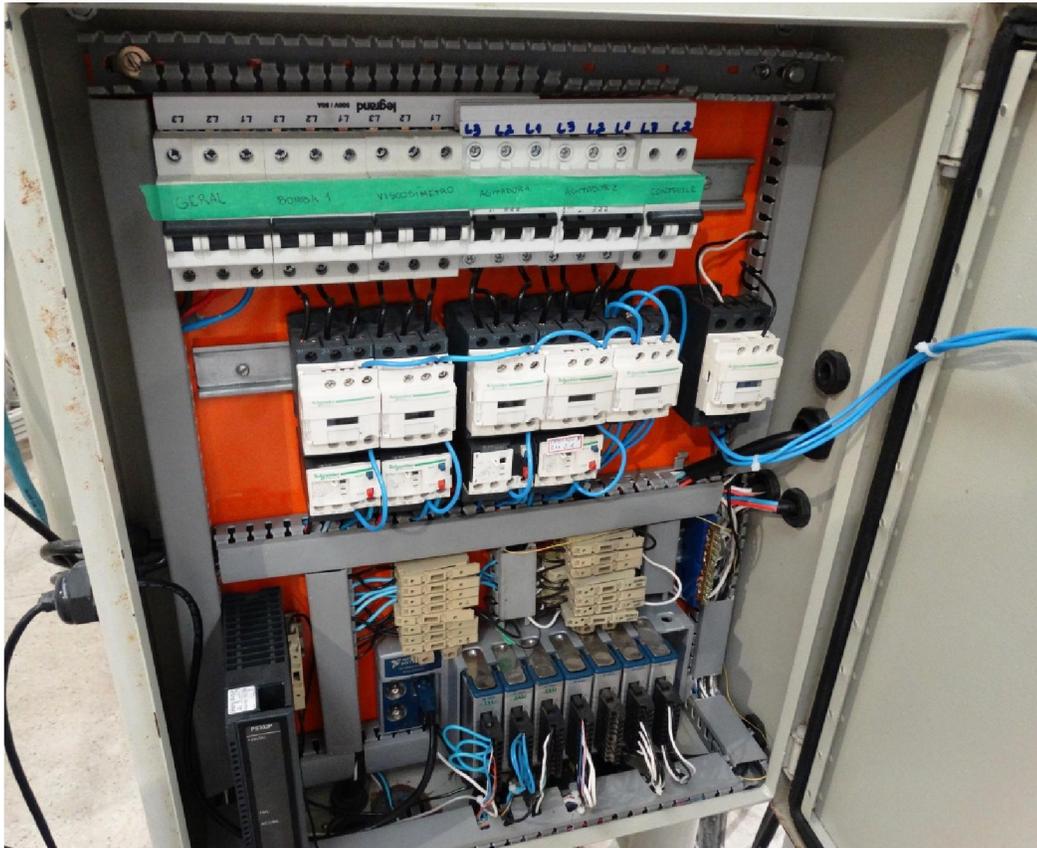


Figura 35. Quadro elétrico do *skid*.



Figura 36. Chassi de placa de aquisição de dados National Instruments.



Figura 37. Placa de aquisição de dados National Instruments modelo 9203.

4.1.2 O protótipo de filtração *on line*.

O protótipo de célula de filtração *on line* foi modificado fisicamente para otimizar a filtração na câmara, uma vez que nas condições de projeto original, a célula não funcionava corretamente, não reproduzindo ou mesmo executando a filtração. Foi observado que a geometria da base de filtração interferia de forma direta no desempenho do equipamento, portanto neste trabalho foram realizadas modificações na base de filtração para que a célula operasse de forma adequada. Outra modificação física deste projeto foi a substituição de um mecanismo semelhante a uma válvula, composto por um solenoide ligado a uma haste, localizada no canal abaixo da base de filtração apresentada na Figura 41. Esta haste quando puxada pelo solenoide permitia o fluxo de filtrado iniciando a filtração. Devido ao mau funcionamento deste mecanismo presente no projeto original da célula, esta haste foi substituída por uma válvula *ON OFF* abaixo do prato para comandar o início da filtração.

Para que a célula fosse operada de forma remota, foram instalados sensores e válvulas *ON OFF* para automatizar: a entrada e saída de fluido na célula e a abertura e o fechamento da válvula de óleo que mantém elevado o pistão de fechamento da câmara de filtração. A Figura 38 ilustra o protótipo após as modificações implementadas.

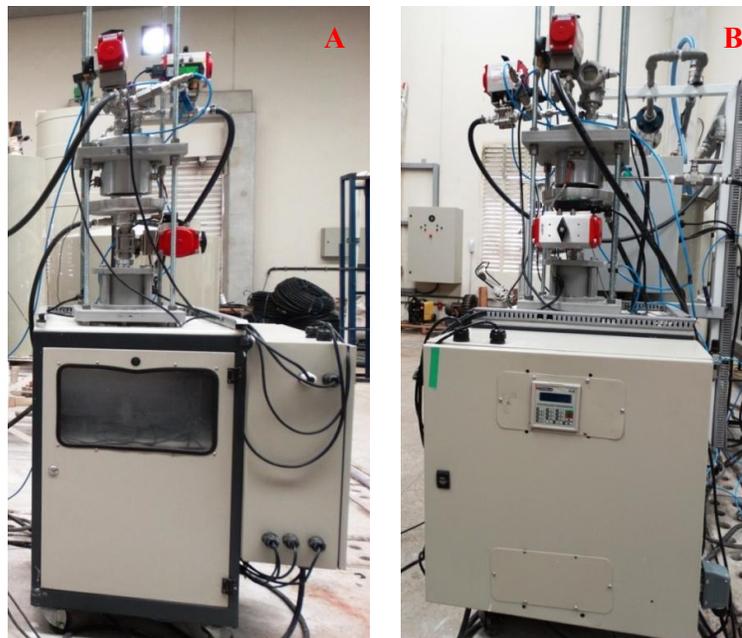


Figura 38. (A) Vista frontal e (B) vista lateral da célula.

A Figura 39 exibe as válvulas *ON OFF* no topo da célula para a entrada (A) e saída (B) de fluido na célula. A válvula representada pela letra C é responsável pelo início da filtração. No topo da célula está localizado o transmissor de pressão (F). Foram instaladas duas válvulas manuais para realizar a purga do fluido que não foi filtrado e permaneceu na câmara. O sistema de purga é composto pelas válvulas representadas pela letra D e E. A válvula D quando aberta injeta ar comprimido na câmara para auxiliar a saída do fluido pela válvula de purga (E).



Figura 39. Topo da célula de filtração.

Para realizar a limpeza do interior da câmara, foi instalada no topo da célula uma válvula para a lavagem da célula (apresentada na Figura 40). Ao final de cada experimento foram realizados ciclos de limpeza que consistiram no preenchimento da câmara com água, seguido de uma pressurização com ar comprimido para remover o fluido e partículas sólidas residuais no tubo de filtração. Os ciclos de limpeza são importantes uma vez que o filtrado escoava por trechos de diâmetro de 1/8 de polegada e estes são suscetíveis a obstruções por sólidos contidos no fluido.

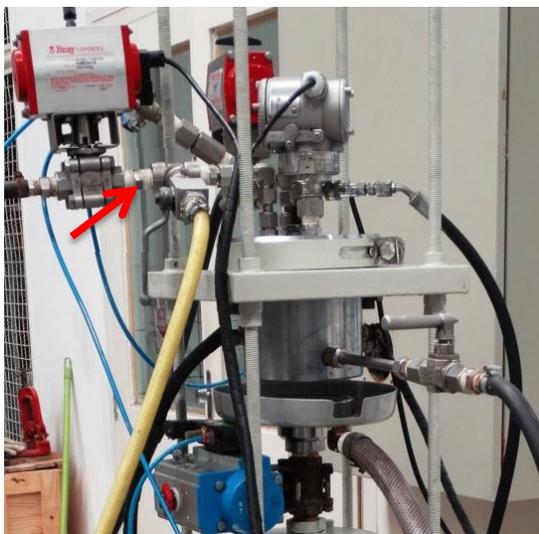


Figura 40. Válvula de injeção de água.

4.1.2.1 Solução do problema existente na base de filtração

Durante a fase de testes, foi observado que a base da câmara de filtração possuía uma geometria inadequada para a filtração, o que provocava o mau funcionamento da célula. O projeto inicial da base era um disco com ranhuras, adequado para rochas. No centro do disco havia um desvio cônico para o escoamento do filtrado conforme exibido na Figura 41. Entretanto, esse desnível no centro do disco provocava a deposição de partículas somente no centro do disco, gerando uma torta em formato de meia esfera e bem compactada (exibida na Figura 42) ao ponto de cessar o fluxo de filtrado em poucos instantes. Pelo formato da torta obtida, notou-se que a área de filtração foi reduzida à seção cônica no centro da base.

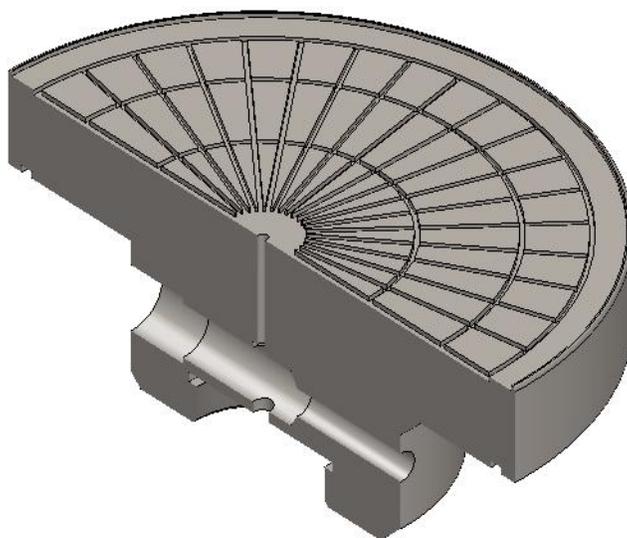


Figura 41. Base da câmara original.



Figura 42. Torta concentrada no centro do disco.

Durante a fase de testes foram realizados experimentos de filtração que atestaram a necessidade de modificar a base de filtração, para isso a sua geometria foi estudada e remodelada. Após algumas tentativas, foi observado que a melhor geometria para a base de filtração consiste em um disco totalmente plano, revestido com uma tela de aço inox para evitar que o papel de filtro, quando pressionado pelo fluido, obstruísse o tubo de escoamento de filtrado, conforme ilustrado na Figura 43. Após a instalação da nova base, a torta passou a ser formada em toda área útil do papel.

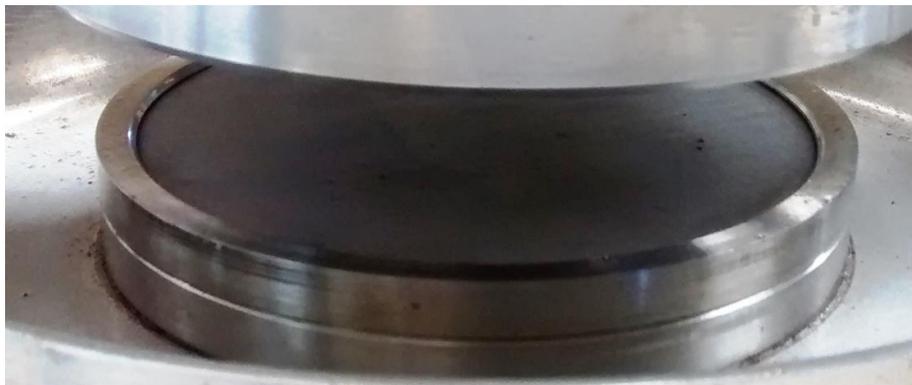


Figura 43. Nova base de fechamento da câmara.

4.1.2.2 Instrumentação do protótipo de célula de filtração

Na parte inferior da célula *on line* foi instalado, um quadro pneumático (exibido na Figura 44) composto por uma válvula solenoide 5/2 vias e uma válvula proporcional. Através desse quadro foi possível controlar a injeção de ar comprimido nos cilindros de forma remota. A válvula solenoide possui quatro conectores elétricos, uma entrada de ar comprimido, uma saída de ar comprimido e uma purga no lado direito da válvula e uma saída e uma purga do lado esquerdo da válvula. Quando energizado um dos conectores, o ar comprimido é direcionado para o lado do conector. Por exemplo, se um dos conectores do lado direito for energizado, o ar comprimido é direcionado para o lado direito da válvula. Os cilindros hidráulicos da unidade possuem duas entradas de ar comprimido cada, sendo que uma entrada tem efeito oposto a outra. A exemplo do cilindro de pressurização da câmara, quando injetado ar comprimido em uma entrada a câmara é pressurizada, entretanto, se o ar for injetado na segunda entrada do cilindro a câmara é despressurizada.

Desta forma, foi possível automatizar o fechamento da câmara e a pressurização dentro da célula, direcionando o ar comprimido para o lado direito da válvula solenoide e despressurizar a câmara e abaixar o pistão quando o ar for direcionado para o lado esquerdo da válvula solenoide.

A pressurização da câmara é gerenciada por um controlador inserido na interface virtual. Através dele, o controle de pressão é realizado na abertura da válvula proporcional. Com abertura gradativa da válvula, um maior fluxo de ar comprimido entra no cilindro multiplicador, o que aumenta a pressão no interior da célula. O monitoramento da pressão na câmara é feito por um transmissor de pressão localizado no topo da célula.



Figura 44. Vista da parte inferior da célula.

A Figura 45 apresenta a unidade de filtração *on line* após todas as modificações. É possível notar que o *skid* de preparação de fluidos é conectado a célula *on line* apenas por mangueiras e cabos elétricos. Isto foi feito para dar mobilidade à célula *on line* e para que ela possa ser acoplada a outra unidade, se necessário.



Figura 45. A unidade de filtração *on line*.

4.2 Software da unidade

Para operar a unidade, foi desenvolvida pela equipe deste projeto uma interface virtual em linguagem *LabVIEW*. Esta interface é composta por três programas: o programa principal (*SoftfilONLINE*) que atua como supervisor, o programa de operação (*CélulaONLINE*) - responsável por receber os sinais de comando do programa principal e executar ações na parte física da planta como abrir uma válvula ou ligar a bomba por exemplo- e o programa de controle (*PIDDesign*). Esses três programas comunicam entre si em tempo real conforme a Figura 46.

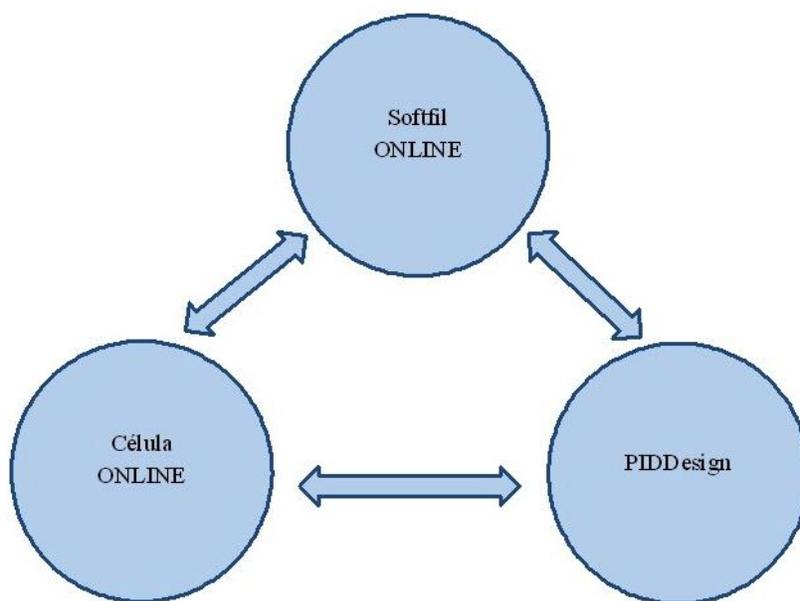


Figura 46. Comunicação entre os programas da interface virtual.

4.2.1 O SoftfilONLINE

O programa principal da unidade pode atuar de duas formas: no modo operação ou no modo tratamento de dados. A escolha do modo a ser utilizado é feita pelo operador quando o programa é aberto, de acordo com a Figura 47.

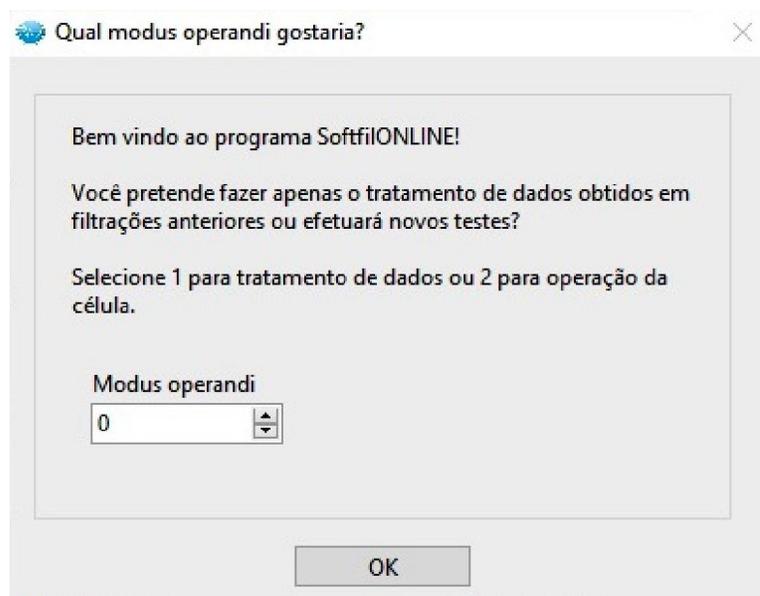


Figura 47. Modo operacional do SoftfilONLINE.

No modo tratamento de dados o operador insere os dados experimentais e carrega os pontos de massa em função do tempo armazenados nos bancos de dados do supervisor. Esses dados são tratados pelas equações fenomenológicas para gerar as curvas de volume de filtrado por tempo e as propriedades da torta como porosidade e permeabilidade. A Figura 48 apresenta o *layout* do SoftfilONLINE no modo tratamento de dados.

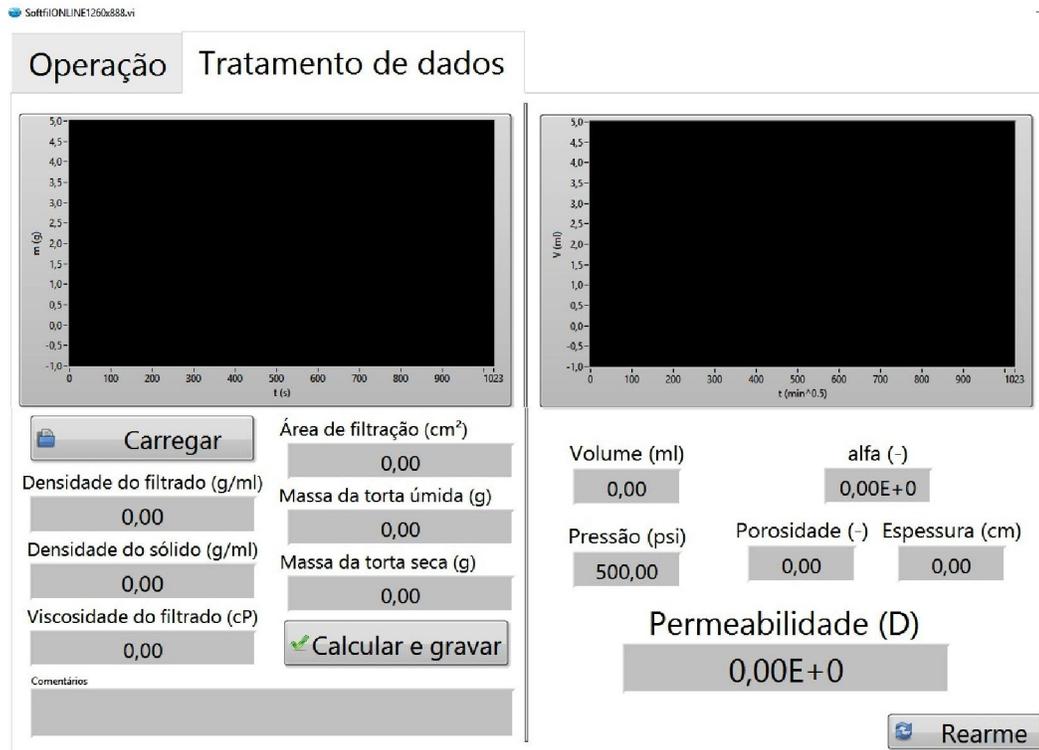


Figura 48. SoftfilONLINE modo tratamento dados.

O modo operação da célula habilita ao operador acionar a agitação dos tanques, abrir e fechar a câmara assim como a válvula de filtração para efetuar o ciclo de limpeza e realizar os experimentos de filtração. Uma vez acionado o modo de operação o SoftfilONLINE carrega os programas CélulaONLINE e o PIDDesign conforme ilustrado na Figura 51. Quando o operador aciona um comando, por exemplo, acionar a agitação do tanque, o programa supervisor (SoftfilONLINE) informa o comando do operador ao CélulaONLINE que atua no equipamento selecionado.

Para iniciar a filtração o usuário deve clicar no botão “fluido pronto” e em seguida preencher o tempo e a pressão de filtração no *pop-up* que abrirá na tela (Figura 49). Uma vez realizada essas etapas o software acionará uma sub-rotina realizada pelo CélulaONLINE para iniciar o experimento. Esta sub-rotina pode ser acompanhada no *software*, conforme exibido no retângulo vermelho destacado na Figura 50.

A inicialização do experimento realizada pelo programa CélulaONLINE consiste em implementar a seguintes etapas:

1. Fechar a câmara de filtração;
2. Abrir as válvulas no topo da célula;
3. Iniciar o bombeio de fluido para a célula.
4. Aumentar a rotação da bomba gradualmente, para remover o ar presente na câmara;
5. Ao atingir a pressão de 30 Psi no interior da câmara, fecha-se a válvula de saída de fluido. A essa pressão foi observado que a célula está completamente cheia.
6. Para otimizar o uso da bexiga de óleo, continua-se aumentando a rotação da bomba para comprimir o fluido na câmara;
7. Ao atingir a pressão de 100 Psi fecha-se a válvula de entrada de fluido na câmara e desliga-se a bomba;
8. O PIDDesign começa a pressurizar a câmara até a pressão de trabalho determinada pelo operador;
9. Estabilizada a pressão o CélulaONLINE abre a válvula de filtração e o experimento é iniciado;

Uma vez iniciado o experimento, a filtração irá ocorrer até o tempo estipulado pelo operador. Finalizada a filtração a câmara será despressurizada e posteriormente aberta. Os dados obtidos nos experimentos são salvos em um banco de dados. Todo o processo de automação do experimento realizado pelo *software* é ilustrado na Figura 52.

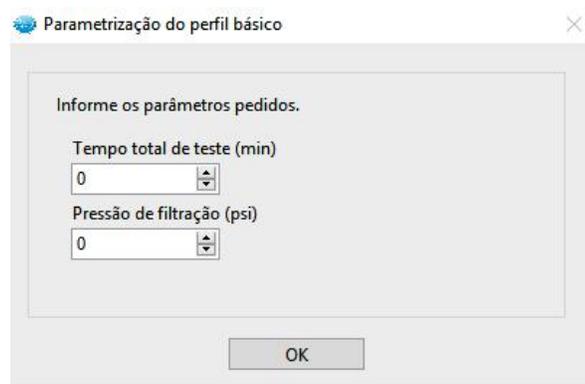


Figura 49. Pop-up de parametrização do experimento.

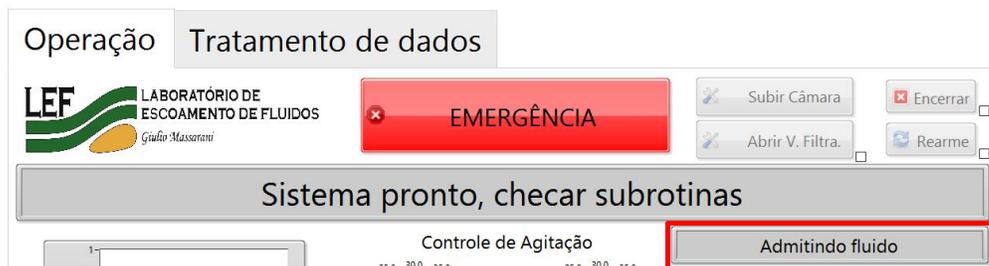


Figura 50. Status da célula.

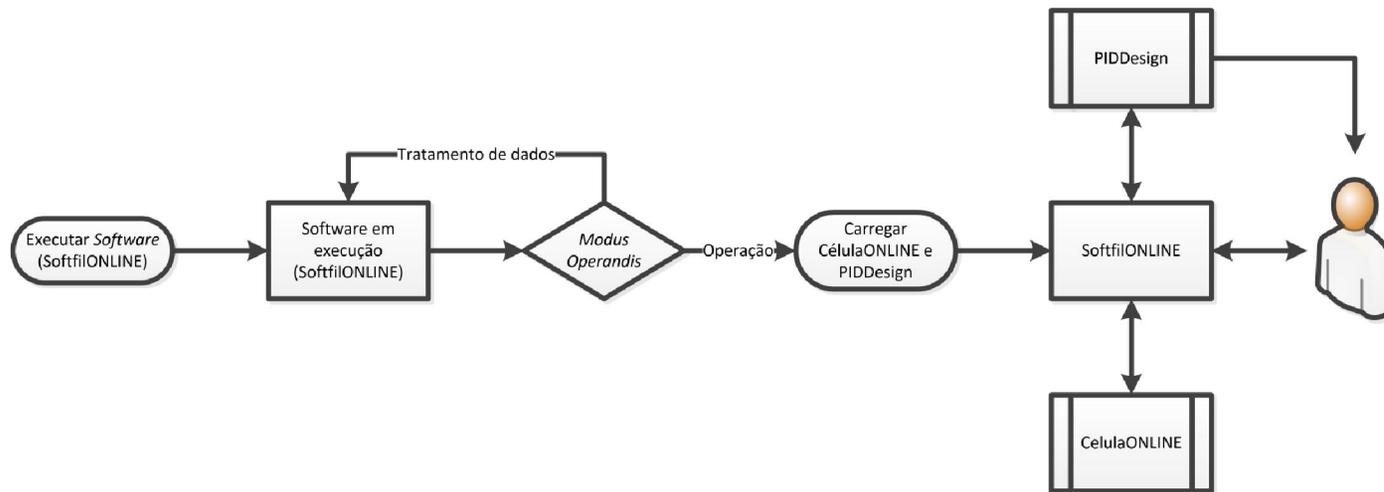


Figura 51. Visão geral do sistema.

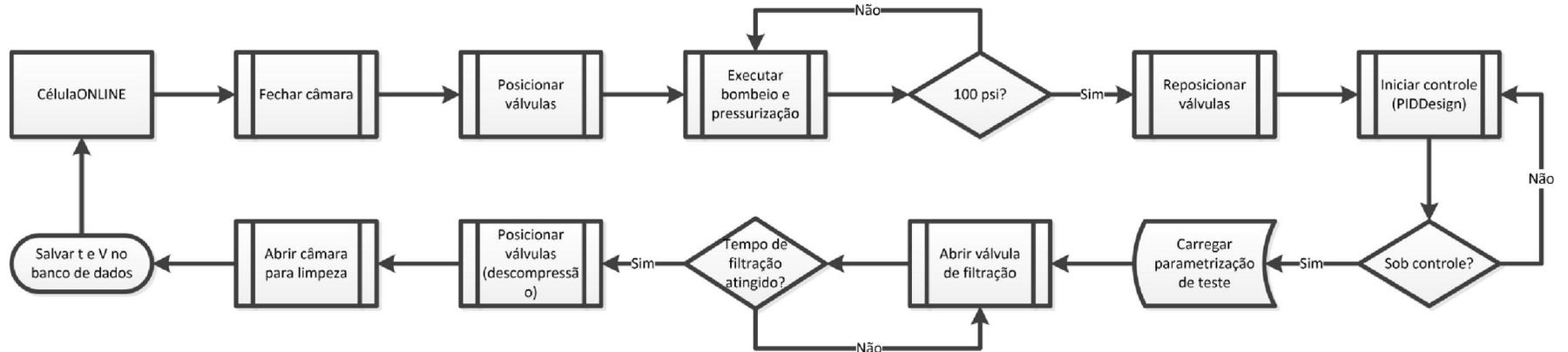


Figura 52. Detalhamento da sub-rotina implementada pelo CélulaONLINE.

Uma vez iniciada a filtração, o volume de filtrado é exibido em tempo real no gráfico do SoftfilONLINE (indicado pela seta vermelha na Figura 53). A aquisição do volume de filtrado é realizada por um condutivímetro comercial. O sensor do condutivímetro foi projetado para soluções de baixa condutividade, logo, este é capaz de detectar um acréscimo mínimo na concentração de sal da solução. A fim de adquirir a massa de filtrado por tempo, inseriu-se o sensor do condutivímetro em um becker com um litro de água deionizada. Conforme as gotas de filtrado caiam no becker a condutividade aumenta e o programa converte o acréscimo da condutividade em massa.



Figura 53. SoftfilONLINE modo operação.

4.2.2 O PIDDesign

O programa de controle utilizado nesse trabalho foi o mesmo desenvolvido por Magalhães (2015). O PIDDesign tem a função de manter constante a pressão da célula durante a filtração. Para isso, tanto o PIDDesign quanto o CélulaONLINE rodam em paralelo com o SoftfilONLINE, quando selecionado no modo de operação. Deste modo, o *software* principal informa os dados de pressão e estes são repassados ao PIDDesign que, por sua vez, envia ao CélulaONLINE a abertura da válvula proporcional correspondente para atingir o *setpoint* desejado. A Figura 54 ilustra a interface do PIDDesign.

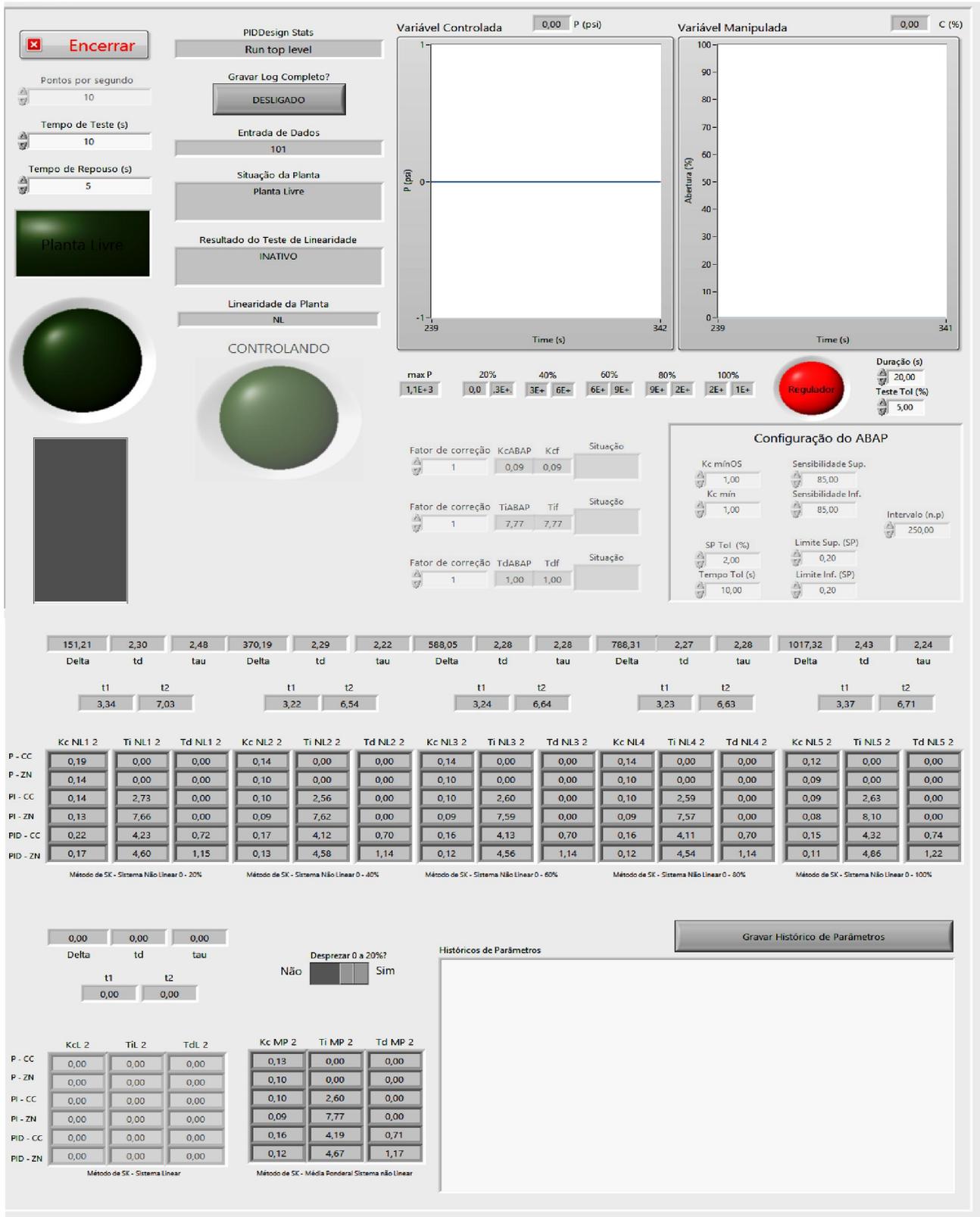


Figura 54. Interface do PIDDesign.

Na primeira operação do programa é exigida uma sintonização dos parâmetros do controlador. Para isso, é realizada uma série de testes em malha aberta, baseado no algoritmo de Sundaresan e Krishnaswamy (1977), S & K, o qual é usado para determinar a linearidade do sistema. Este teste é importante para determinar o número de parâmetros necessários para controlar a planta. Se ela for linear basta apenas um trio de parâmetros no controlador. Já plantas não lineares necessitam de diferentes trios de parâmetros para diferentes faixas da variável controlada. Se a planta for detectada linear, usa-se mais uma vez o algoritmo de S & K levantando apenas uma curva de reação e o software calcula os parâmetros da planta Δ (magnitude observada na variação da variável controlada em relação a variável manipulada), τ (constante do tempo) e t_d (tempo morto). Neste processo o parâmetro Δ representa a variação da pressão obtida com a variação da abertura da válvula proporcional, o parâmetro τ representa fisicamente o tempo necessário para se atingir um novo estado estacionário da variável controlada, neste caso a pressão de filtração, quando se manipula a abertura da válvula proporcional (variável manipulada) e t_d é o tempo necessário para se observa a variação da pressão quando se manipula a abertura da válvula proporcional. Entretanto se a planta for detectada não linear o programa realiza cinco curvas de reação gerando um trio de parâmetros da para cada curva de reação.

O teste de linearidade consiste em gerar degraus positivos e negativos na abertura da válvula proporcional para pressurizar o fluido dentro da câmara através da bexiga de óleo. Portanto, a variável manipulada nesse teste é abertura da válvula e a variável controlada é a pressão. O teste é iniciado com degraus positivos de mesma magnitude até a abertura máxima permitida, posteriormente são aplicados degraus negativos até o fechamento completo da válvula. Se a planta for linear espera-se a mesma magnitude com margem de erro de $\pm 10\%$ na variável manipulada e na variável controlada. Para esse teste, observou-se que a planta é não linear. Portanto, foi necessário dividir a planta em cinco partes, e obter as cinco curvas de reação cada uma com seu trio de parâmetros. Estes parâmetros (Δ , τ e t_d) foram calculados através de parâmetros empíricos primários t_1 e t_2 . O primeiro é calculado sobre a curva de reação quando a variável controlada está 35,3% do seu valor final, já t_2 é obtido quando a curva de reação está a 85,3%. Conhecendo t_1 e t_2 utiliza-se as correlações de S&K apresentadas na Tabela 4 para calcular Δ , τ e t_d .

Tabela 4. Correlações para cálculo dos parâmetros Δ , τ e t_d . Fonte: Sundaresan e Krishnaswamy (1977).

Parâmetro	Correlação empírica
t_d	$t_d = 1,3t_1 - 0,29t_2$
τ	$\tau = 0,67(t_1 - t_2)$
Δ	$\Delta = Bu/M$

Sendo Bu a variação dos estados estacionários após uma perturbação e M a magnitude da perturbação.

O PIDDesign calcula os parâmetros para as cinco curvas de reação e faz uma média ponderal para controlar a planta não linear com apenas um trio de parâmetros. Uma vez calculados os parâmetros do sistema, foram calculados os parâmetros do controlador utilizando o método empírico de Ziegler e Nichols (1942), conforme observado na Tabela 5. No controle da pressão da unidade foi implementado o controlador PI (proporcional integral), devido ser um sistema desconhecido e apresentar ruídos de processo.

Tabela 5. Correlações para os cálculos dos parâmetros do controlador PI. Fonte: Ziegler e Nichols (1942).

Parâmetro	Correlação empírica
K_c	$\frac{0,9 * \tau}{\Delta * td}$
τ_i	$0,33 * td$

Uma vez calculados os parâmetros e sincronizado o controlador, estes dados ficam salvos em um banco de dados e na próxima vez que o programa for aberto estes parâmetros são carregados, dispensando uma nova sintonia do controlador.

4.3 Cálculo de permeabilidade da torta na célula de bancada *off line*.

Inicialmente foi feito um estudo e avaliação de correlações empregadas no cálculo da permeabilidade da torta. Estudaram-se duas metodologias de equacionamento; uma mais simples e outra que já vem sendo utilizado no LEF nos trabalhos de Martins (2013), Calabrez (2013) e Ferraz (2014). Para este fim, foram preparados nove fluidos com a mesma formulação empregada por Ferraz (2014), utilizando partículas de carbonato de cálcio de diferentes granulometrias e goma xantana (GX) ou carboximetilcelulose (CMC) como agente viscosificante, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Formulação dos fluidos. Fonte: Ferraz (2014).

Fluido	Água (L)	GX (g)	CMC (g)	CaCO ₃ (0-53µm) (g)	CaCO ₃ (53-106µm) (g)	CaCO ₃ (106-150µm) (g)
Fluido 1	0,5	-	2,85	137,25	-	-
Fluido 2	0,5	-	2,85	-	137,25	-
Fluido 3	0,5	-	2,85	-	-	137,25
Fluido 4	0,5	2,85	-	137,25	-	-
Fluido 5	0,5	2,85	-	-	137,25	-
Fluido 6	0,5	2,85	-	-	-	137,25
Fluido 7	0,5	1,42	-	137,25	-	-
Fluido 8	0,5	1,42	-	-	137,25	-
Fluido 9	0,5	1,42	-	-	-	137,25

Foram realizados experimentos de filtração para os nove fluidos, a pressão de 500 Psi durante 30 minutos. A partir dos dados experimentais coletados, calculou-se a permeabilidade pela equação 10 e comparou-se com a permeabilidade obtida por Ferraz (2014), utilizando o equacionamento de Dewan e Chenevert (2001), nas mesmas condições operacionais desse trabalho. Na Tabela 7, encontram-se a permeabilidade calculada pela equação 10 e a permeabilidade calculada por Ferraz (2014). Observa-se que apesar da equação de Engelhardt e Schindewolf (1952) ser mais simples que o equacionamento de Dewan e Chenevert (2001), ela fornece valores de permeabilidade com a mesma ordem de grandeza que a permeabilidade calculada por Ferraz (2014). O que é satisfatório visto que essa equação demanda um menor número de procedimentos e operações experimentais. Desta forma, observa-se que esta equação é uma opção para se obter a permeabilidade de tortas de filtração.

Tabela 7. Permeabilidade da torta.

Fluido	Granulometria (µm)	Viscosificante	Permeabilidade calculada (mD)	Permeabilidade de Ferraz (2014) (mD)
1	0-53		$2,12.10^{-3}$	$3,34.10^{-3}$
2	53-106	CMC	$1,79.10^{-3}$	$2,06.10^{-3}$
3	106-150	(2 lb/bbl)	$1,92.10^{-3}$	$3,68.10^{-3}$
4	0-53		$1,22.10^{-3}$	$7,13.10^{-3}$
5	53-106	GX	$1,23.10^{-3}$	$3,46.10^{-3}$
6	106-150	(2 lb/bbl)	$1,05.10^{-3}$	$3,15.10^{-3}$
7	0-53		$0,82.10^{-3}$	$3,15.10^{-3}$
8	53-106	GX	$1,14.10^{-3}$	$1,07.10^{-3}$
9	106-150	(1 lb/bbl)	$0,86.10^{-3}$	$1,72.10^{-3}$

4.4 Avaliação do protótipo de célula de filtração *on line*.

Para a validação do protótipo *on line*, foram realizados experimentos comparativos utilizando as células *on line* e *off line*. Os dados de volume de filtrado em 30 minutos de experimentos em uma dada condição operacional foi a variável utilizada na avaliação. É importante ressaltar que o volume de filtrado é um dado avaliado no campo.

Para realizar os experimentos de validação do protótipo, prepararam-se dois fluidos base água com características e propriedades semelhantes aos fluidos utilizados na perfuração de poços. Estes fluidos foram caracterizados antes das filtrações através de experimentos no *Kit* Retorta, para aferir a concentração de sólidos, e no viscosímetro FANN 35 A, para ensaios de reologia. Utilizando os dados experimentais foram calculadas as propriedades da filtração e comparado o desempenho da célula *on line* frente ao aparato de bancada *off line*.

Foi realizada a análise granulométrica da calcita usada como adensante no preparo de fluidos, a Figura 55 ilustra a curva de distribuição granulométrica do material. Também foram realizados ensaios de picnometria para a determinação da densidade da calcita utilizada, cuja media foi de 2,60g/L. Maiores detalhes estão disponíveis nos anexos.

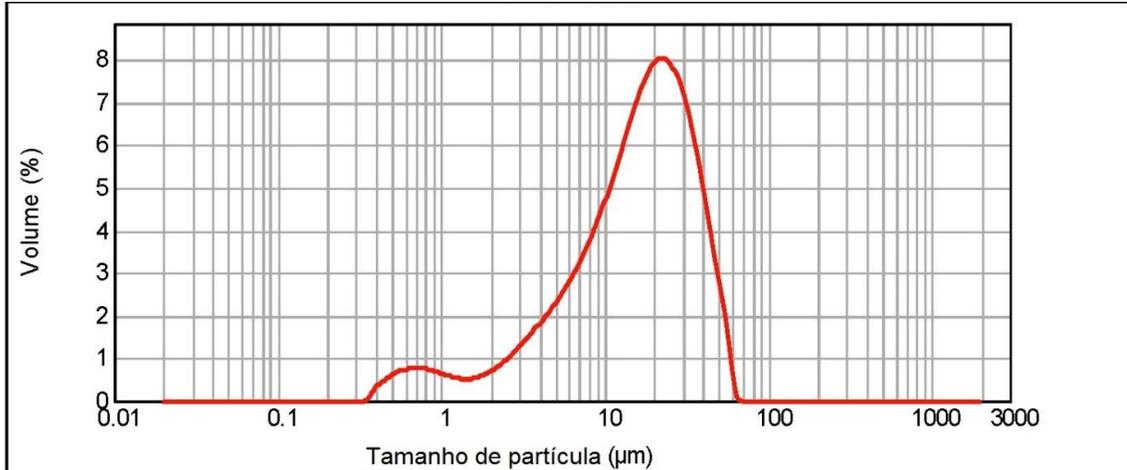


Figura 55. Distribuição granulométrica da calcita.

4.1 Experimentos realizados com o fluido 1.

A concentração de sólidos e os parâmetros reológicos foram aferidos antes dos experimentos. A concentração de sólidos foi determinada pelo *Kit* Retorta e obteve-se o valor de 102 g/L. A Figura 56 apresenta a curva reológica do fluido 1 e a Tabela 8 apresenta os parâmetros reológicos obtidos através do viscosímetro.

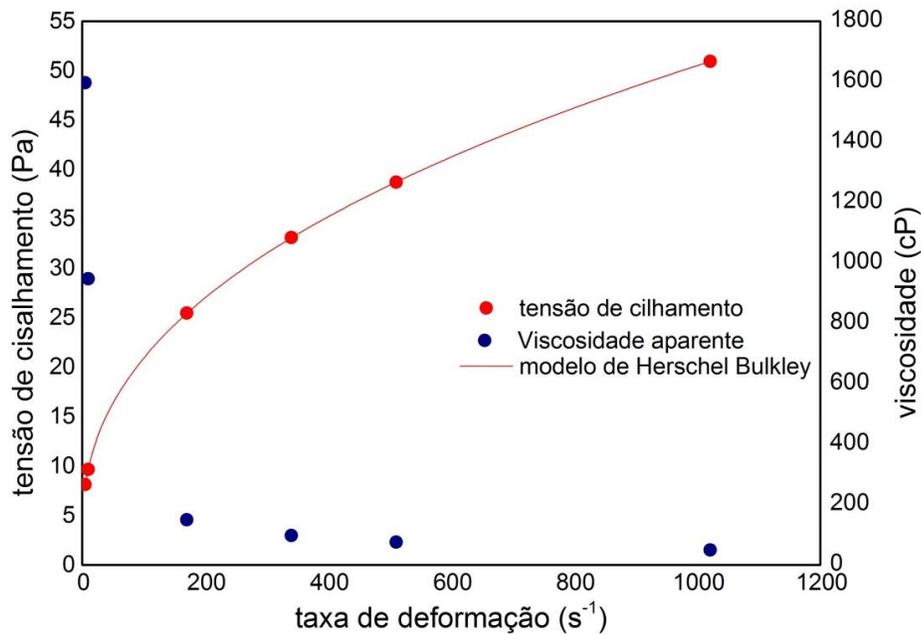


Figura 56. Tensão de cisalhamento e viscosidade aparente por taxa de deformação a T=25°C e P=1 atm.

Tabela 8. Parâmetros reológicos do fluido 1 pelo modelo de Herschel Bulkley a T=25°C e P=1 atm.

τ_0	K	n
2,962	2,556	0,423

A Tabela 9 apresenta os dados experimentais das filtrações na célula de bancada e na célula *on line* a 500 Psi. A Tabela 10 apresenta os resultados das filtrações a 300 Psi. Nota-se que os volumes de filtrado foram semelhantes em ambos os aparatos, demonstrando que o processo de filtração foi reproduzido de forma similar na célula de bancada e no protótipo *on line*, uma vez que este é principal parâmetro avaliado nos experimentos de filtração. Desta foram, concluiu-se que os problemas inerentes à base e coleta de filtrado foram resolvidos.

Foi observado na Tabela 9 e na Tabela 10 que a massa da torta é menor na célula de bancada. Isso provavelmente ocorre devido ao processo de remoção da torta ser feita com sua face para baixo na célula de provocando o escoamento das camadas menos compactadas, enquanto a remoção da torta na célula *on line* é feita com a face para cima preservando melhor a mesma.

Tabela 9. Dados experimentais de filtração do fluido 1 a 500 Psi e 25°C.

Experimento	Massa da torta úmida (g)	Massa da torta seca (g)	Área de filtração (cm ²)	Volume de filtrado (ml)	Volume de filtrado por área (cm)
Online 1	28,1813	12,2875	99,58	17,74	0,18
Online 2	25,4136	10,2983	99,58	21,05	0,21
Online 3	31,941	13,6917	99,58	16,72	0,17
Média online	28,512	12,0925	99,58	18,50	0,19
Desvio padrão	3,276	1,705	-	2,264	0,02
Bancada 1	14,928	6,9709	109,73	15,5	0,14

Tabela 10. Dados experimentais de filtração do fluido 1 a 300 Psi e T=25°C.

Experimento	Massa da torta úmida (g)	Massa da torta seca (g)	Área de filtração (cm ²)	Volume de filtrado (ml)	Volume de filtrado por área (cm)
Online 4	28,247	12,0396	99,58	13,23	0,13
Online 5	28,0983	10,2586	99,58	15,08	0,15
Online 6	27,0076	12,7731	99,58	15,29	0,15
Média online	27,784	11,690	99,58	14,53	0,15
Desvio padrão	0,677	1,293	-	1,134	0,01
Bancada 2	16,9374	8,2432	109,73	14,09	0,13

Utilizando os dados da Tabela 9 e da Tabela 10, calculou-se a permeabilidade da torta utilizando a equação 10, a porosidade da torta (equação 6) e espessura da torta pela equação 7. Observa-se na Tabela 11 e na Tabela 12 que o valor da massa da torta úmida obtida na célula *HTHP* é aproximadamente a metade do valor da massa da torta úmida formada na célula *on line* e essa mesma proporção é observada na espessura e na permeabilidade das tortas calculadas na Tabela 11 e na Tabela 12. É possível constatar, apesar da diferença entre as massas das tortas das células de bancada e a *on line*, que não houve diferença significativa no valor da porosidade. Entretanto, o cálculo da permeabilidade é diretamente influenciado pela espessura da torta de filtração, já que esta é uma das variáveis usadas para calcular essa propriedade, sendo possível observar que a permeabilidade da torta de filtração obtida na célula *on line* é aproximadamente o dobro da permeabilidade da torta formada na célula *HTHP*, desta forma nota-se que o erro de leitura da espessura é propagado para os valores de permeabilidade. Deve-se ressaltar que os valores obtidos de permeabilidade para a célula *on line* e para a célula de bancada são satisfatórios, pois a mesma ordem de grandeza foi obtida. A diferença entre as massas das tortas das células *on line* e de bancada só interferiu de forma significativa no valor da espessura da torta. Entretanto, deve-se ressaltar que a espessura da torta é um parâmetro de difícil medida.

Tabela 11. Parâmetros da torta a pressão de 500 Psi a T=25°C.

Experimento	Porosidade	Permeabilidade (mD)	Espessura da torta (cm)
Online 1	0,771	$6,91 \cdot 10^{-4}$	0,48
Online 2	0,792	$8,16 \cdot 10^{-4}$	0,47
Online 3	0,776	$7,55 \cdot 10^{-4}$	0,55
Média online	0,780	$7,54 \cdot 10^{-4}$	0,50
Desvio padrão	0,011	$0,625 \cdot 10^{-4}$	0,04
Bancada 1	0,748	$2,39 \cdot 10^{-4}$	0,21

Tabela 12. Parâmetros da torta a pressão de 300 Psi a 25°C.

Experimento	Porosidade	Permeabilidade (mD)	Espessura da torta (cm)
Online 4	0,778	$8,88 \cdot 10^{-4}$	0,49
Online 5	0,819	$12,3 \cdot 10^{-4}$	0,60
Online 6	0,743	$8,49 \cdot 10^{-4}$	0,41
Média online	0,78	$9,89 \cdot 10^{-4}$	0,50
Desvio padrão	0,038	$2,09 \cdot 10^{-4}$	0,10
Bancada 2	0,733	$3,88 \cdot 10^{-4}$	0,22

4.4.2 Experimentos realizados com o fluido 2.

Para avaliar a reprodutibilidade dos experimentos executados na célula *on line*, formulou-se um segundo fluido com os mesmos componentes do fluido utilizado anteriormente. Deve-se ressaltar que este fluido tem um comportamento reológico diferente do fluido utilizado na primeira fase, conforme observado na Figura 57. Para este fluido, foram

calculados os parâmetros reológicos e apresentados na Tabela 13. Empregou-se a mesma concentração de sólidos do fluido anterior, entretanto, alterou-se a reologia do mesmo.

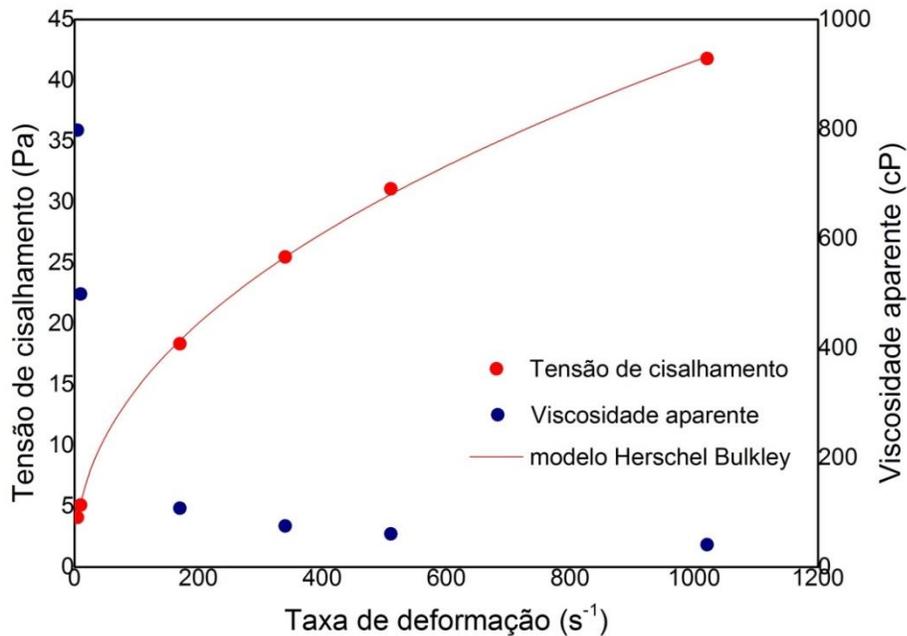


Figura 57. Tensão de cisalhamento por taxa de deformação do fluido 2 a T=25°C e P=1 atm.

Tabela 13. Parâmetros reológicos pelo modelo de Herschel Bulkley do fluido 2 a T=25°C e P=1atm.

τ_0	K	n
0,138	1,776	0,4560

Foram realizados experimentos a pressão de 500 Psi nas células de filtração de bancada e *on line* e comparou com os dados experimentais do fluido 1. Devido à diferença das propriedades reológicas do fluido entre os fluidos observou-se que o fluido 2 gera um maior volume de filtrado e conseqüentemente tortas de filtração com maior massa, podendo ser observados nos dados da Tabela 9 e da Tabela 14. Este resultado era esperado visto que o decréscimo da viscosidade do fluido aumenta a taxa de filtração, pois a resistência de escoamento pela torta diminui. Conseqüentemente, é necessária uma maior quantidade de sólidos compactados para cessar a filtração do fluido.

Tabela 14. Dados experimentais de filtração a 500 Psi com aquisição de massa *on line* a T=25°C.

Experimento	Massa da torta úmida (g)	Massa da torta seca (g)	Área de filtração (cm ²)	Volume de filtrado (ml)	Volume de filtrado por área (cm)
Online 7	35,4878	18,9149	99,58	38,89	0,39
Online 8	40,9703	20,2981	99,58	40,32	0,41
Online 9	36,5826	18,758	99,58	39,97	0,40
Média online	37,680	19,324	99,58	39,73	0,40
Desvio padrão	2,901	0,848	-	0,745	0,01
Bancada 3	22,5407	12,105	109,73	46,37	0,42

Comparando a Tabela 11 com a Tabela 15 observa-se que os resultados são coerentes, pois o fluido 2 tem uma viscosidade aparente menor, o que provocou um maior volume de filtrado e isso se reflete nas propriedades da torta, uma vez que um maior volume de filtrado indica uma torta mais permeável.

Tabela 15. Parâmetros da torta dos experimentos com aquisição de massa *on line*.

Experimento	Porosidade	Permeabilidade (mD)	Espessura da torta (cm)
Online 7	0,695	$1,43 \cdot 10^{-3}$	0,45
Online 8	0,726	$1,91 \cdot 10^{-3}$	0,58
Online 9	0,712	$1,61 \cdot 10^{-3}$	0,49
Média online	0,711	$1,65 \cdot 10^{-3}$	0,51
Desvio padrão	0,016	$0,24 \cdot 10^{-4}$	0,07
Bancada 3	0,692	$0,884 \cdot 10^{-3}$	0,26

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi construído um dispositivo que opera automaticamente e obtém dados de filtração *on line*, uma proposta inovadora para a indústria de petróleo.

Inicialmente, tinha-se uma célula de filtração que deveria operar *on line*, mas que ainda necessitava de instrumentação, controle e validação. Foram instalados sensores de temperatura, pressão e densidade.

Para controlar de forma remota e operar os instrumentos, foi desenvolvida uma interface virtual programada em linguagem LabVIEW para a unidade de filtração. Através dela foi possível automatizar a sequência operacional dos experimentos, controlar a pressão de operação e calcular os parâmetros da filtração.

Com o objetivo de validar o equipamento proposto, foram realizados testes de filtração observando não só o volume de filtrado, mas ainda, foram avaliados parâmetros como a forma e a textura da torta de filtração. Estes experimentos atestaram a necessidade de modificar a base original da célula que suporta o papel de filtro, devido à má formação do reboco. Este problema foi corrigido remodelando a geometria da base de filtração.

Após a construção da unidade experimental, foram analisadas técnicas para a determinação da permeabilidade com base nos dados experimentais fornecidos pelo equipamento. Com relação à permeabilidade, foram comparadas duas metodologias de cálculo; uma tradicional aplicada no LEF/DEQ/UFRRJ desde 2010 e uma outra utilizando um equacionamento mais simples. Através dos experimentos foi possível comprovar que é possível obter valores precisos de permeabilidade utilizando apenas uma equação simplificada.

O protótipo de célula *on line* foi validado com base em dados de filtração obtidos em uma célula de filtração de bancada, padrão API. Os resultados obtidos nos dois aparatos experimentais foram próximos. Observaram-se desvios inferiores a 7% no cálculo da porosidade das tortas produzidas pela célula *on line* e a célula de bancada. Já a permeabilidade calculada para as tortas de filtração de ambos os aparatos apresentaram a mesma ordem de grandeza. Este resultado é satisfatório, visto que a ordem de grandeza é o dado mais relevante da permeabilidade para os projetos de perfuração. Também foram observados nos experimentos volumes de filtrado similares nas filtrações executadas nas células de bancada e *on line*. Sendo o volume de filtrado o parâmetro mais importante para experimentos de filtração segundo a API, atestou-se que a célula *on line* opera de forma satisfatória. Logo esta nova célula que opera em linha pode ser utilizada para obter dados de filtração.

CAPÍTULO VI

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar os parâmetros da filtração utilizando fluidos base água e fluidos base óleo;
- Instalar um sensor óptico para detectar as gotas de filtrado em tempo real e aumentar precisão da aquisição da massa de filtrado por tempo;
- Instalar uma base de aço sintetizado na célula de filtração para substituir o uso do papel de filtro, visando automatizar a remoção da torta e limpeza do sistema.
- Instalar um sistema de lavagem automatizado na célula.
- Avaliar métodos mais eficientes para determinar a espessura da torta de filtração.

CAPÍTULO VII

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMBOLA, M.; KHAN, F.; KHAKZAD, N. Dynamic safety risk analysis of offshore drilling. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 30, p. 74–85, 2014.

ADAMS, J. *et al.* advances in log interpretation in oil base mud, 1989.

ARAÚJO, C. A. O. Estudo da Filtração Cruzada em Geometria Cílica. Dissertação de Mestrado. Instituto de tecnologia. Departamento de Engenharia química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2010.

CAENN, R.; CHILLINGAR, G. V. Drilling fluids: State of the art. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1996.

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 (UFRRJ). Seropédica, 2013.

DARCY, H. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon* Paris, 1856.

DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Fifth Edit ed. Butterworth-Heinermann, 1988.

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

FATTAH, K. A.; EL-KATATNEY, S. M.; DAHAB, A. A. Potential implementation of underbalanced drilling technique in Egyptian oil fields. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, v. 23, n. 1, p. 49–66, 2011.

FERGUSON, C. K.; KLOTZ, J. A. Filtration From Mud During Drilling. *Journal of Petroleum Technology*, v. 6, n. 2, 1954.

FERRAZ, A. S. F. S. Efeito da distribuição granulométrica de partículas sólidas e de polímeros aniônicos 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 (UFRRJ). Seropédica, 2014.

JIAO, D.; SHARMA, M. M. Formation damage due to static and dynamic filtration of water-based muds. *SPE Formation Damage Control Symposium*, 1992.

JILANI, S. Z. *et al.* Effect of overbalance pressured on formation damage. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 36, n. 1-2, p. 97–109, 2002.

MAGALHÃES, S. DA C. UMPC – Unidade Móvel de Pesquisa Científica : um sistema desenvolvido para aferições em tempo real das propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração. Dissertação de Mestrado. Instituto de tecnologia. Departamento de Engenharia química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2015.

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 (UFRRJ). Seropédica, 2013.

OMLAND, T. H. Particle Settling in non-Newtonian Drilling Fluids. Tese de Doutorado. Faculty of Science and Technology Department of Petroleum Engineering, 2009

OSTROOT, K. *et al.* Comparison of Under-balanced and Managed-Pressure Drilling Techniques. American Association Of Drilling Engineers - AADE, n. AADE - 07 - NTCE - 39, 2007.

PENG, S. J. Filtration properties of water based drilling fluids. Tese de Doutorado. HERIOT-WATT UNIVERSITY, 1990.

SAASEN, A. *et al.* Automatic Measurement of Drilling Fluid and Drill Cuttings Properties. SPE Drilling and Completion, v. IADC/SPE D, p. 611–625, 2009.

SHERWOOD, J. D.; MEETEN, G. H. The filtration properties of compressible mud filtercakes. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 18, n. 1-2, p. 73–81, 1997.

SUNDARESAN, K. R.; KRISHNASWAMY, P. R.; Estimation of Time Delay. Time constant Parameters in Time, Frequency and Laplace Domains. Cam. J. Chem. Eng., 56, paginas 257-262. 1977.

TILLER, F. M.; Numerical Methods for Constant Rate and Constant Pressure Filtration Based on Kozeny's Law. Chemical Engineering Progress, 1953.

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

VAUSSARD, A. *et al.* SPE 15412 An Experimental Study of Drilling Fluids Dynamic Filtration. 1986.

WANG, J. *et al.* Comparison and analysis of subglacial bedrock core drilling technology in Polar Regions. Polar Science, v. 9, n. 2, p. 208–220, jun. 2015.

ZIEGLER, J. B.; NICHOLS, N. B. Optimum Setting for Automatic Controllers. ASME Transactions, volume 64, página 759-768. 1942.

ANEXO A

Análise granulométrica da calcita

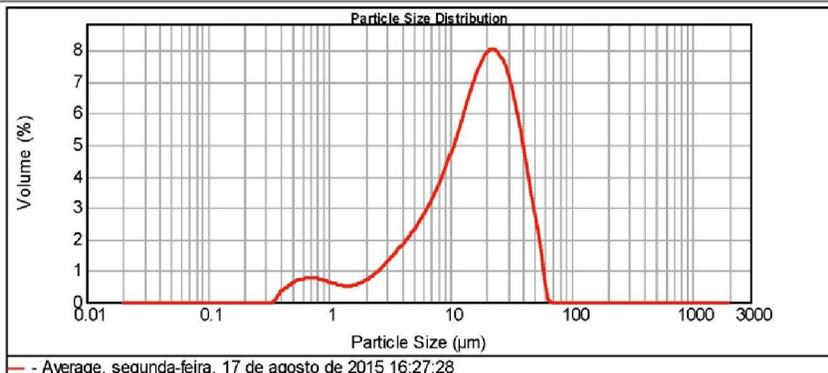


Result Analysis Report

Sample Name: - Average
Sample Source & type:
Sample bulk lot ref:
SOP Name:
Measured by: Guest
Result Source: Averaged
Measured: segunda-feira, 17 de agosto de 2015 16:27:28
Analysed: segunda-feira, 17 de agosto de 2015 16:27:29

Particle Name: CaCO3 (calcite)
Particle RI: 1.572
Dispersant Name: Water
Accessory Name: Hydro 2000MU (A)
Absorption: 0.1
Dispersant RI: 1.330
Analysis model: General purpose
Size range: 0.020 to 2000.000 um
Weighted Residual: 3.618 %
Sensitivity: Normal
Obscuration: 12.54 %
Result Emulation: Off
Concentration: 0.0121 %Vol
Span : 2.091
Uniformity: 0.641
Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.997 m²/g
Surface Weighted Mean D[3,2]: 6.018 um
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 18.795 um

d(0.1): 3.255 um d(0.5): 16.524 um d(0.9): 37.805 um



Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.098	0.51	11.482	5.20	120.228	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.47	13.163	5.89	139.039	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.47	15.136	6.51	158.489	0.00	1659.597	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.48	17.378	6.99	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.54	19.953	7.24	209.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.65	22.909	7.18	239.863	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.98	26.303	6.79	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.028	0.00	0.275	0.00	2.884	1.19	30.200	6.06	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.01	3.311	1.43	34.674	5.07	363.078	0.00	3801.194	0.00
0.033	0.00	0.363	0.25	3.802	1.88	39.811	3.90	418.889	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.43	4.365	1.95	45.709	2.88	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.048	0.00	0.479	0.57	5.012	2.24	52.481	1.55	549.541	0.00	5754.389	0.00
0.052	0.00	0.550	0.67	5.754	2.57	60.256	0.10	630.957	0.00	6608.034	0.00
0.060	0.00	0.631	0.70	6.607	2.95	69.183	0.00	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.69	7.586	3.40	79.433	0.00	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.68	8.710	3.83	91.201	0.00	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.64	10.000	4.54	104.713	0.00	1086.478	0.00		
0.105	0.00	1.098	0.58	11.482	4.54	120.228	0.00	1258.925	0.00		

Operator notes:

Figura 58. Distribuição granulométrica da calcita.

ANEXO B

Picnometria da calcita

Tabela 16. Experimentos de picnometria.

Massa (g)	picnometro	pic+ calcita	pic+calcita+ água	pic+ água	Densidade da calcita (g/L)
Experimento 1	23,9461	37,0041	60,7420	52,6953	2,61
Experimento 2	30,1756	46,1279	68,1621	58,3883	2,58
Experimento 3	14,4216	20,1685	29,0577	25,5212	2,60

Tabela 17. Massa específica da calcita.

Experimento	Densidade (g/L)
1	2,6057
2	2,5819
3	2,600
Média	2,600
Desvio padrão	0,012

ANEXO C

Testes reológicos do fluido

Tabela 18. Dados reológicos do fluido.

Tensão de cisalhamento (Pa)	Taxa de deformação (s^{-1})
8,15232	5,1069
9,68088	10,2138
25,476	170,23
33,1188	340,46
38,72352	510,69
50,952	1021,38

Tabela 19- Dados reológicos do fluido 2.

Tensão de cisalhamento (Pa)	Taxa de deformação (s^{-1})
4,07616	5,1069
5,0952	10,2138
18,34272	170,23
25,476	340,46
31,08072	510,69
41,78064	1021,38