

**UFRRJ**

**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA QUÍMICA**

**PROCESSOS QUÍMICOS**

**DISSERTAÇÃO**

**Filtração e Invasão de Fluidos de Perfuração:  
Estudo Comparativo, Caracterização da Torta e  
Modelagem**

**Núbya Dalvi Calabrez**

2013



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

**FILTRAÇÃO E INVASÃO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO: ESTUDO  
COMPARATIVO, CARACTERIZAÇÃO DA TORTA E MODELAGEM**

**NÚBYA DALVI CALABREZ**

*Sob a Orientação do Professor:*  
**Luís Américo Calçada**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Área de Concentração em Processos Químicos

Seropédica, RJ  
Agosto de 2013

622.3381

C141f Calabrez, Núbya Dalvi, 1986-

T Filtração e invasão de fluidos de perfuração: estudo comparativo, caracterização da torta e modelagem / Núbya Dalvi Calabrez - 2013.

86 f. : il.

Orientador: Luís Américo Calçada.

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

Bibliografia: f. 62-63.

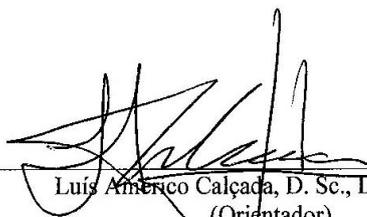
1. Poços de petróleo - Perfuração - Teses. 2. Filtros e filtração - Teses. 3. Separação (Tecnologia) - Teses. 4. Engenharia química - Teses. I. Calçada, Luís Américo, 1966-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

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

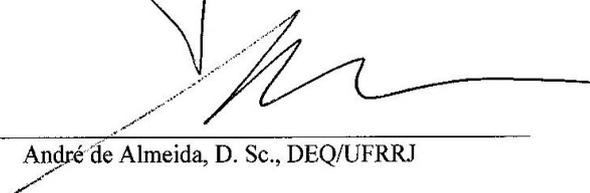
**NÚBYA DALVI CALABREZ**

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 23/08/2013



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



André de Almeida, D. Sc., DEQ/UFRRJ



Mônica Lopes Aguiar, D. Sc., DEQ/UFSCar

Dedico esta dissertação aos meus pais, Vânea e Josemar, que sempre fizeram o possível para que eu tivesse a oportunidade de estudar. Saibam que essa foi a maior herança que vocês poderiam me deixar. Obrigada!

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar saúde, força, inteligência e todas as condições necessárias para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço muito aos meus amados pais, Vânea e Josemar, por sempre me apoiarem e incentivarem em minhas decisões e por me darem todo suporte que eu sempre precisei.

Agradeço aos meus queridos irmãos, Eduardo e Mylena, que sempre foram uma felicidade para mim e para eles eu quero ser sempre um bom exemplo de irmã mais velha.

Agradeço minhas queridas avós, Rosa e Ausília, pelas orações, por sempre se preocuparem comigo e pelo incentivo que sempre me deram.

Agradeço ao meu querido namorado Alex, que sempre esteve ao meu lado me apoiando e me incentivando e por sempre tentar fazer algo para que eu me sentisse melhor.

Agradeço aos meus orientadores Luís Américo Calçada e Cláudia Mirian Scheid, pela oportunidade de trabalhar no LEF, pelo conhecimento que me passaram por toda ajuda e apoio durante meu trabalho. Eu sempre me lembrarei de vocês com muito carinho, pois o trabalho não foi fácil, mas ter ao meu lado professores como vocês fez toda diferença.

Agradeço a professora Márcia e ao professor Lindoval pelas contribuições dadas nos Seminários e a todos os professores do DEQ que me transmitiram seus conhecimentos e contribuíram para a minha formação.

Agradeço aos amigos que fiz no LEF, Deividson, Carol, Felipe, Luís, Vitor, Leandro, Olívio, Euan, Andréia, João Pedro, Thaisy e Wanderson, pela companhia sempre muito agradável e pela ajuda que me deram sempre que foi necessário.

Agradeço especialmente ao meu amigo Marcos, por toda ajuda com os experimentos, mas principalmente pelas caronas que sempre me deu (rsrs).

Agradeço a uma amiga que o Mestrado me deu a oportunidade de conviver, Beatriz. Agradeço pela companhia e amizade de sempre.

Agradeço aos funcionários do LEF, Sérgio, Elias e Eduardo, pelas dicas e por toda ajuda que sempre me deram.

Agradeço a Petrobras e a Capes pelo apoio financeiro dado a esta pesquisa. Agradeço também, aos funcionários do Cenpes/Petrobras, pela ajuda que sempre ofereceram para o desenvolvimento deste trabalho.

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

## RESUMO

A filtração e a invasão de fluidos de perfuração são fenômenos que ocorrem durante o processo de perfuração de poços de petróleo. É necessário conhecer como se comporta a torta de filtração formada a fim de evitar invasões indesejadas do filtrado, o que pode causar danos muitas vezes irreversíveis a rocha reservatório, tornando o poço inviável para a produção do óleo. Os objetivos desse trabalho foram: estudar os fenômenos de filtração e invasão de fluidos de perfuração base água e emulsão, sob condições estáticas e dinâmicas, caracterizar a torta formada, obter resultados comparativos entre diferentes fluidos (base água e emulsão) e modelar a filtração estática. Para isso, foram conduzidos experimentos em uma célula de filtração *high temperature/high pressure*, utilizando papel de filtro como meio filtrante. A torta formada, a partir da filtração desses fluidos, foi caracterizada de acordo com parâmetros como: porosidade, permeabilidade, compressibilidade, espessura, resistência ao cisalhamento e fator de fricção. Na comparação entre os resultados experimentais para diferentes fluidos, observou-se que o fluido a base água, por formar uma torta mais permeável e mais porosa, permitiu que mais filtrado passasse pelo meio filtrante, quando comparado ao fluido base óleo (emulsão). Foram estudados os fatores relevantes na estimação do fator de fricção da torta de filtração e concluiu-se que a compressibilidade da torta foi um fator que teve grande influência na estimação desse parâmetro. A modelagem da filtração estática possibilitou a previsão do comportamento das curvas de filtração, de *slowness* e da espessura da torta em função do tempo.

**Palavras-chave:** Filtração estática, Perfuração, Formação de torta.

## ABSTRACT

Filtration and invasion of drilling fluids are phenomena that occur during the process of drilling oil wells. It is necessary to know the filter cake behavior, which is formed in order to prevent unwanted invasion of filtrate, which can cause irreversible damage for the reservoir rock, making impossible the well to produce oil. The goals of this work were: to study filtration and invasion of drilling fluids, under static and dynamic conditions, characterize the mudcake, obtain comparative results between different fluids (water base mud and emulsion) and model static filtration. For this, experiments were conducted in a high temperature/high pressure cell filtration, using filter paper as filter medium. The cake formed from the filtration of these fluids was characterized according to parameters such as porosity, permeability, compressibility, thickness, shear strength and friction factor. In a comparison between different fluids, it was observed that the water-based mud provided a mudcake more permeable and more porous than emulsion mudcake. Thus, water-based mud allowed more filtrate passed through the filter medium. The factors relevant to the estimation of the friction factor were determined. It was concluded that the compressibility index of the filter cake was a factor which had great influence on the estimation of this parameter. The model allowed the prediction of static filtration, slowness and mudcake thickness curves as a function of time.

**Keywords:** Static filtration, Drilling, Mudcake buildup.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Processo de perfuração rotativa (Adaptado de Bourgoyne <i>et al.</i> , 1991).....	1
<b>Figura 2.</b> Representação da janela operacional de pressão (Adaptada de Omland, 2009). .....	3
<b>Figura 3.</b> Profundidade da invasão de filtrado para diferentes tipos de fluidos de perfuração (Adaptado de Simpson, 1974). .....	4
<b>Figura 4.</b> Aparato experimental utilizado por Vaussard <i>et al.</i> (1986).....	6
<b>Figura 5.</b> Curvas de filtração estática e dinâmica. HTHP – <i>high temperature/high pressure</i> ; API – <i>American Petroleum Institute</i> . (Adaptado de Vaussard <i>et al.</i> , 1986).....	7
<b>Figura 6.</b> Aparato experimental utilizado por Jiao e Sharma (1992). .....	7
<b>Figura 7.</b> Pressão de <i>overbalance</i> mínima requerida para formação da torta na filtração de um fluido base água <i>versus</i> velocidade anular média (Adaptado de Jiao e Sharma, 1993a). .....	9
<b>Figura 8.</b> Permeabilidade crítica para formação da torta de filtração de um fluido base água <i>versus</i> velocidade anular média (Adaptado de Jiao e Sharma, 1993a).....	9
<b>Figura 9.</b> Comparação entre filtração estática API e filtração dinâmica (Adaptado de Jiao e Sharma, 1993b).....	10
<b>Figura 10.</b> Efeito da concentração de sólidos no <i>spurt loss</i> ( <i>rev. dust</i> - mistura de caulinita e quartz) (Adaptado de Jiao e Sharma, 1993b). .....	11
<b>Figura 11.</b> Efeito do FLCA na filtração dinâmica de um fluido base óleo (Adaptado de Jiao e Sharma, 1993b).....	11
<b>Figura 12.</b> Esquema de filtração. ....	12
<b>Figura 13.</b> (a) Curva de filtração; (b) Curva de <i>slowness</i> - medido e simulado (Adaptado de Dewan e Chenevert, 2001). .....	14
<b>Figura 14.</b> Balança de lama. ....	22
<b>Figura 15.</b> Viscosímetro FANN 35A. ....	22
<b>Figura 16.</b> Viscosímetro FANN 35A em detalhes.....	23
<b>Figura 17.</b> Balão volumétrico de 10 ml. ....	25
<b>Figura 18.</b> Formas de alumínio com fluido de perfuração base água depois de seco (Triplicata). ....	27
<b>Figura 19.</b> (a) Célula HTHP; (b) Sistema de pressurização; (c) Células de filtração de 900 cm <sup>3</sup> e de 250 cm <sup>3</sup> , respectivamente. ....	27
<b>Figura 20.</b> Desenho esquemático da célula de filtração. ....	29
<b>Figura 21.</b> Tensão <i>versus</i> taxa de deformação dos fluidos.....	32
<b>Figura 22.</b> Curvas de filtração estática – Triplicata WBM 1.....	36
<b>Figura 23.</b> Curvas de <i>slowness</i> – Triplicata WBM 1.....	37
<b>Figura 24.</b> Curvas de filtração estática – Triplicata WBM 2.....	37
<b>Figura 25.</b> Curvas de <i>slowness</i> – WBM 2. ....	38
<b>Figura 26.</b> Curvas de filtração estática – Triplicata WBM 3.....	38
<b>Figura 27.</b> Curvas de <i>slowness</i> – WBM 3. ....	39
<b>Figura 28.</b> Curvas de filtração estática – Triplicata WBM 4.....	39
<b>Figura 29.</b> Curvas de <i>slowness</i> – WBM 4. ....	40
<b>Figura 30.</b> Curvas de filtração estática – OBM (emulsão). ....	41
<b>Figura 31.</b> Curvas de <i>slowness</i> – OBM (emulsão). ....	41
<b>Figura 32.</b> Curvas de filtração dinâmica - WBM 1. ....	44

<b>Figura 33.</b> Curvas de filtração dinâmica - WBM 2. ....	44
<b>Figura 34.</b> Curvas de filtração dinâmica - WBM 3. ....	45
<b>Figura 35.</b> Curvas de filtração dinâmica - WBM 4. ....	45
<b>Figura 36.</b> Curvas de filtração dinâmica - OBM (emulsão). ....	46
<b>Figura 37.</b> Comparação entre volume de filtrado para WBM 1 e OBM (emulsão) – Experimento 1.1. ....	48
<b>Figura 38.</b> Torta de filtração formada pelo (a) WBM 1 e (b) OBM (emulsão).....	49
<b>Figura 39.</b> Régua em micro escala utilizada para medir a espessura da torta de filtração. ....	49
<b>Figura 40.</b> Comparação entre volume de filtrado para a filtração dinâmica do WBM 1 e OBM (emulsão) – Condição operacional: 1000 psi e 580 rpm. ....	50
<b>Figura 41.</b> Variação da permeabilidade da torta em função da pressão do sistema. ....	51
<b>Figura 42.</b> Variação da porosidade da torta em função da pressão do sistema. ....	52
<b>Figura 43.</b> Porosidade dos materiais em função da pressão (Adaptado de Tiller e Cooper, 1962).....	52
<b>Figura 44.</b> Variação da resistência da torta ao cisalhamento em função da espessura da torta de filtração - WBM 1.....	53
<b>Figura 45.</b> Variação da resistência da torta ao cisalhamento em função da espessura da torta de filtração - OBM (emulsão).....	54
<b>Figura 46.</b> Volume de filtrado simulado – WBM 3.....	57
<b>Figura 47.</b> <i>Slowness</i> simulado – WBM 3. ....	58
<b>Figura 48.</b> Espessura da torta simulada para diferentes pressões – WBM 3.....	58
<b>Figura 49.</b> Fluxo da invasão de filtrado – WBM 1.....	69
<b>Figura 50.</b> Fluxo da invasão de filtrado – WBM 2.....	70
<b>Figura 51.</b> Fluxo da invasão de filtrado – WBM 3.....	70
<b>Figura 52.</b> Fluxo da invasão de filtrado – WBM 4.....	71
<b>Figura 53.</b> Fluxo da invasão de filtrado – OBM (emulsão).....	71

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Resultados experimentais de Elkatatny <i>et al.</i> (2012).....	17
<b>Tabela 2.</b> Predição da permeabilidade e da espessura da torta por diferentes modelos (Elkakatny <i>et al.</i> , 2012). .....	17
<b>Tabela 3.</b> Diferentes equações mostradas por Ba geri <i>et al.</i> (2013) para o cálculo da permeabilidade da torta de filtração. ....	19
<b>Tabela 4.</b> Fluidos de perfuração utilizados e objetivos. ....	20
<b>Tabela 5.</b> Características do papel de filtro utilizado para a filtração de cada fluido.....	20
<b>Tabela 6.</b> Formulação do fluido BR-CARB. Utilizada para preparar WBM 2, WBM 3 e WBM 4 (Fornecida pelo Laboratório de Fluidos de Perfuração do Cenpes/Petrobras).....	21
<b>Tabela 7.</b> Constantes do viscosímetro FANN 35A.....	24
<b>Tabela 8.</b> Procedimento experimental para obtenção da força gel. ....	24
<b>Tabela 9.</b> Equações utilizadas para obter propriedades reológicas do fluido. ....	25
<b>Tabela 10.</b> Condições operacionais dos experimentos para determinação dos parâmetros da torta de filtração – Filtração estática.....	30
<b>Tabela 11.</b> Parâmetros a serem determinados e equações utilizadas – Filtração estática.....	30
<b>Tabela 12.</b> Condições operacionais dos experimentos para estimação dos parâmetros da torta de filtração – Filtração dinâmica. ....	31
<b>Tabela 13.</b> Parâmetros a serem determinados e equações utilizadas – Filtração dinâmica. ....	31
<b>Tabela 14.</b> Dados reológicos obtidos para o ajuste dos dados experimentais ao modelo <i>Power Law</i> . ....	33
<b>Tabela 15.</b> Dados reológicos de força gel.....	33
<b>Tabela 16.</b> Densidade e pH dos fluidos. ....	34
<b>Tabela 17.</b> Concentração de sólidos e fração volumétrica de sólidos nos fluidos.....	34
<b>Tabela 18.</b> Propriedades utilizadas na determinação dos parâmetros de filtração. ....	35
<b>Tabela 19.</b> Parâmetros da torta resultante da filtração estática – Triplicata WBM 1. ....	42
<b>Tabela 20.</b> Parâmetros da torta resultante da filtração estática – Triplicata WBM 2. ....	42
<b>Tabela 21.</b> Parâmetros da torta resultante da filtração estática – Triplicata WBM 3. ....	42
<b>Tabela 22.</b> Parâmetros da torta resultante da filtração estática – Triplicata WBM 4. ....	42
<b>Tabela 23.</b> Parâmetros da torta resultante da filtração estática – Triplicata OBM (emulsão). ....	43
<b>Tabela 24.</b> Parâmetros calculados e utilizados na estimação de $\tau_{mc0}$ e $f_e$ (Continua). ....	46
<b>Tabela 25.</b> Parâmetros estimados. ....	47
<b>Tabela 26.</b> Comparação entre os valores médios dos parâmetros obtidos para WBM 1 e OBM (emulsão). ....	49
<b>Tabela 27.</b> Comparação entre os valores médios dos parâmetros estimados para WBM 1 e OBM (emulsão). ....	50
<b>Tabela 28.</b> Características gerais das tortas formadas pela filtração dos fluidos WBM 2, WBM 3 e WBM 4 – Verificação da influência na estimação do fator de fricção da torta.....	55
<b>Tabela 29.</b> Valores para fatores de fricção encontrados na literatura. ....	55
<b>Tabela 30.</b> Fator de crescimento estimado para cada fluido.....	56
<b>Tabela 31.</b> Espessura final da torta de filtração obtida por diferentes metodologias. ....	56
<b>Tabela 32.</b> Ângulo de deflexão. ....	64
<b>Tabela 33.</b> Concentração de sólidos e fração volumétrica de sólidos. ....	64

<b>Tabela 34.</b> Dados experimentais da filtração estática do WBM 1.....	65
<b>Tabela 35.</b> Dados experimentais da filtração estática do OBM (emulsão).....	65
<b>Tabela 36.</b> Dados experimentais da filtração estática do WBM 2.....	65
<b>Tabela 37.</b> Dados experimentais da filtração estática do WBM 3.....	66
<b>Tabela 38.</b> Dados experimentais da filtração estática do WBM 4.....	66
<b>Tabela 39.</b> Dados experimentais da filtração dinâmica do WBM 1.....	67
<b>Tabela 40.</b> Dados experimentais da filtração dinâmica do OBM (emulsão).....	67
<b>Tabela 41.</b> Dados experimentais da filtração dinâmica do WBM 2.....	68
<b>Tabela 42.</b> Dados experimentais da filtração dinâmica do WBM 3.....	68
<b>Tabela 43.</b> Dados experimentais da filtração dinâmica do WBM 4.....	69

## LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

A	rea de filtração;
API	<i>American Petroleum Institute</i> ;
$C_s$	Concentração de sólidos no fluido;
CT	<i>Computerized tomography</i> ;
$d_m$	Diâmetro médio das partículas do fluido;
$f_e$	Fator de fricção da torta;
FLCA	<i>Fluid loss control additive</i> ;
HTHP	<i>High temperature/high pressure</i> ;
K	ndice de consistência do fluido;
$k_c$	Permeabilidade do meio filtrante;
$K_f^*$	Permeabilidade crítica da formação;
$k_{mc}$	Permeabilidade da torta;
$k_{mc0}$	Permeabilidade de referência da torta definida para 1 psi;
$k_1, k_2$ e $k_3$	Constantes do viscosímetro FAN 35A;
LE	Limite de escoamento do fluido;
$L_m$	Espessura do meio filtrante;
m	Parâmetro da Equação 5;
$m'$	Parâmetro da Equação 1;
n	ndice de comportamento do fluido;
N	Velocidade de rotação do cone;
$n_r$	Taxa de rotação do cone;
OBM	<i>Oil-base mud</i> ;
P	Pressão aplicada ao sistema;
$P_{mc}$	Pressão através da torta;
$P_{molhado}$	Massa da torta úmida;
$\overline{P_R}$	Pressão média do reservatório;
$P_{seco}$	Massa da torta seca;
$P_w$	Pressão aplicada na perfuração;
q	Fluxo de filtrado;
$q_{eq}$	Taxa de filtração no equilíbrio;
$r_d$	Raio externo da coluna de perfuração;

$r_e$	Raio do reservatório;
$R_m$	Resistência do meio filtrante;
$r_w$	Raio do poço;
$s$	Fração volumétrica de sólidos no fluido;
$S$	<i>Slowness</i> ;
SEM	<i>Scanning electron microscopy</i> ;
$t$	Tempo
$t_c$	Espessura do meio filtrante;
$T_{mc}$	Espessura da torta;
$T_{mceq}$	Espessura de equilíbrio da torta.
$V$	Volume acumulado de filtrado;
$v$	Volume de filtrado por unidade de área;
$VA$	Viscosidade aparente do fluido;
$V_c$	Volume da torta;
$VP$	Viscosidade plástica do fluido;
$V_s$	Volume de sólidos no fluido;
$V_t$	Volume total de fluido;
WBM	<i>Water-base mud</i> ;
$x_{mc}(t)$	Espessura da torta em função do tempo;

### **Letras gregas**

$\alpha$	Parâmetro da Equação 9;
$\alpha_{av}$	Média da resistência específica da torta;
$\gamma$	Taxa de deformação do fluido;
$\delta$	Multiplicador (Equação 5);
$\Delta P_c$	Pressão através do meio filtrante;
$\Delta P_{mc}$	Pressão através da torta;
$\Delta P_t$	Pressão total;
$\Delta V$	Variação do volume de filtrado;
$\varepsilon_{sav}$	Fração volumétrica de sólidos na torta;
$\theta$	Ângulo de deflexão;
$\theta'$	Ângulo do cone com a horizontal;
$\mu$	Viscosidade do filtrado;

$\mu_f$	Viscosidade do fluido;
$v$	Índice de compressibilidade da torta;
$\lambda$	Fator de crescimento da torta;
$\rho_f$	Densidade do fluido;
$\rho_s$	Densidade do sólido;
$\Phi_{mc}$	Porosidade da torta;
$\Phi_{mc0}$	Porosidade de referência da torta definida para 1 psi;
$\tau$	Tensão de cisalhamento;
$\tau_{mc}$	Resistência da torta ao cisalhamento.

## SUMÁRIO

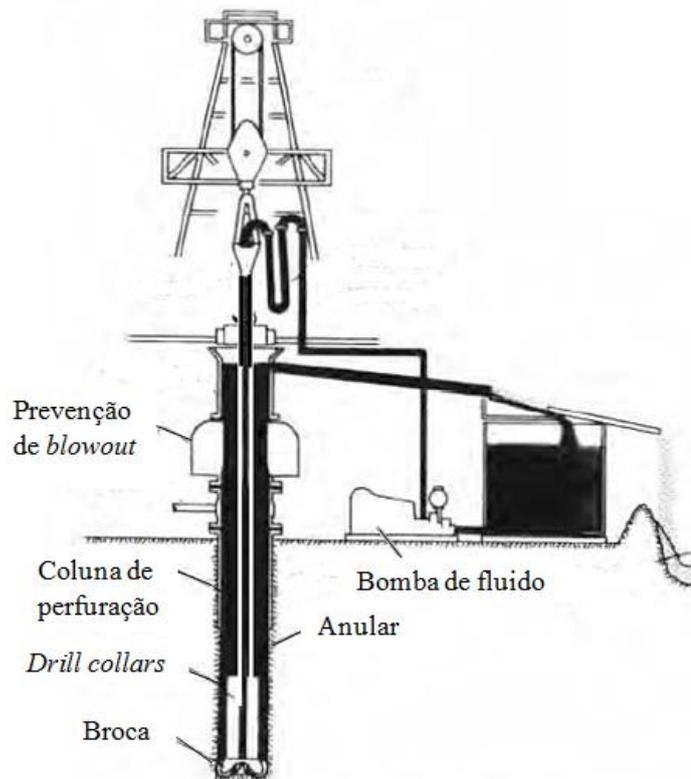
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
CAPÍTULO III.....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1 Material.....	20
3.2 Metodologia.....	21
3.2.1 Preparação dos fluidos.....	21
3.2.2 Reologia.....	22
3.2.3 Densidade e pH.....	25
3.2.4 Concentração de sólidos e fração volumétrica de sólidos.....	26
3.2.5 Filtração.....	27
3.2.6 Experimentos de filtração estática.....	29
3.2.7 Experimentos de filtração dinâmica.....	30
CAPÍTULO IV.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Reologia.....	32
4.2 Densidade e pH.....	34
4.3 Concentração de sólidos e fração volumétrica de sólidos.....	34
4.4 Filtração.....	35
4.4.1 Experimentos de filtração estática.....	36
4.4.2 Experimentos de filtração dinâmica.....	43
4.4.3 Comparação entre WBM 1 e OBM (emulsão).....	48
4.4.4 Espessura de equilíbrio da torta de filtração.....	53
4.4.5 Estudo do fator de fricção da torta de filtração.....	54
4.4.6 Crescimento da torta de filtração e fluxo da invasão de filtrado.....	56
4.5 Estudo de caso para o fluido WBM 3 - Modelagem da filtração.....	57
CAPÍTULO V.....	60
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
CAPÍTULO VI.....	61

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62
ANEXOS .....	64
Anexo 1. Caracterização dos fluidos .....	64
Anexo 2. Filtração.....	65

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUÇÃO

A perfuração de um poço de petróleo é realizada através de uma sonda. Segundo Bourgoyne *et al.* (1991), plataformas de perfuração rotativas, conforme mostrado na Figura 1, são utilizadas em quase todas as perfurações. A perfuração é um processo de custos elevados e por isso deve ser feita de maneira rápida e segura.



**Figura 1.** Processo de perfuração rotativa (Adaptado de Bourgoyne *et al.*, 1991).

Os cascalhos cortados pela broca são levados à superfície pela circulação de um fluido de perfuração no poço. O fluido é injetado na coluna, sai pelos jatos da broca e retorna a superfície pelo espaço anular entre a coluna e o poço, na superfície os cascalhos são separados do fluido de perfuração (Bourgoyne *et al.*, 1991).

Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada e uma coluna de revestimento de aço, com diâmetro inferior ao da broca, é descida no poço. O anular entre os tubos de revestimento e as paredes do poço é cimentado com a finalidade de isolar as rochas atravessadas, permitindo então o avanço da perfuração com segurança. Após a operação de cimentação, a coluna de perfuração é novamente descida no poço, tendo na sua extremidade uma nova broca, de diâmetro menor do que a do revestimento, para o prosseguimento da perfuração (Thomas, 2001).

As técnicas de perfuração que podem ser utilizadas são denominadas: *overbalance*, *underbalance* ou *nearbalance*. A perfuração *overbalance* é mais utilizada e consiste em manter a pressão hidrostática no poço maior do que a pressão de poros da formação. Para

*underbalance*, a pressão hidrostática é menor do que a pressão de poros e para perfuração em *nearbalance*, mantém-se a pressão hidrostática em equilíbrio com a pressão de poros da formação rochosa.

Segundo Caenn e Chillingar (1995), os fluidos de perfuração, que são utilizados neste processo, são responsáveis, por:

- carrear até a superfície os cascalhos cortados pela broca durante a perfuração para que sejam separados do fluido, mantendo o poço constantemente limpo, evitando a obstrução e aumentando a taxa de penetração da broca;
- resfriar e lubrificar a broca;
- reduzir a fricção entre a coluna de perfuração e a parede do poço;
- manter a estabilidade do poço;
- manter uma pressão maior que a pressão de poros da formação para prevenir os *kicks* (no caso de uma perfuração *overbalance*);
- formar uma torta de filtração, fina e de baixa permeabilidade, evitando a invasão de filtrado e o inchamento de formações hidratáveis (argilas);
- não ser prejudicial para a formação produtora, pois o processo de perfuração expõe a formação ao fluido, o que pode causar danos irreversíveis e tornar o reservatório inviável para a produção;
- não ser prejudicial ao meio ambiente e as pessoas;
- permitir uma avaliação adequada da formação geológica que está sendo perfurada (perfilagem do poço).

Essas funções fazem com que esses fluidos sejam indispensáveis à indústria de petróleo, sendo o elemento mais importante na operação de perfuração. O desempenho dessas funções depende diretamente das propriedades dos fluidos, como viscosidade, consistência de gel, controle de filtrado e características da torta de filtração.

No caso de uma perfuração *overbalance*, o diferencial de pressão positivo na direção do poço gera uma tendência do fluido invadir a formação, dando início ao processo de filtração na parede da rocha. A filtração ocorre em dois momentos distintos, quando o fluido está circulando no poço ocorre a filtração dinâmica, o fluido é filtrado ao mesmo tempo em que impõe uma taxa de cisalhamento na superfície da torta que está sendo formada. A espessura da torta, neste caso, é controlada pela quantidade de partículas sólidas depositadas na sua superfície e pela erosão da torta, decorrente do cisalhamento. O cisalhamento permite que um maior volume de filtrado percole o meio filtrante e invada a rocha. Quando a circulação do fluido de perfuração é interrompida, ocorre a filtração estática. Como nessa situação não há erosão da torta de filtração, sua espessura aumenta continuamente.

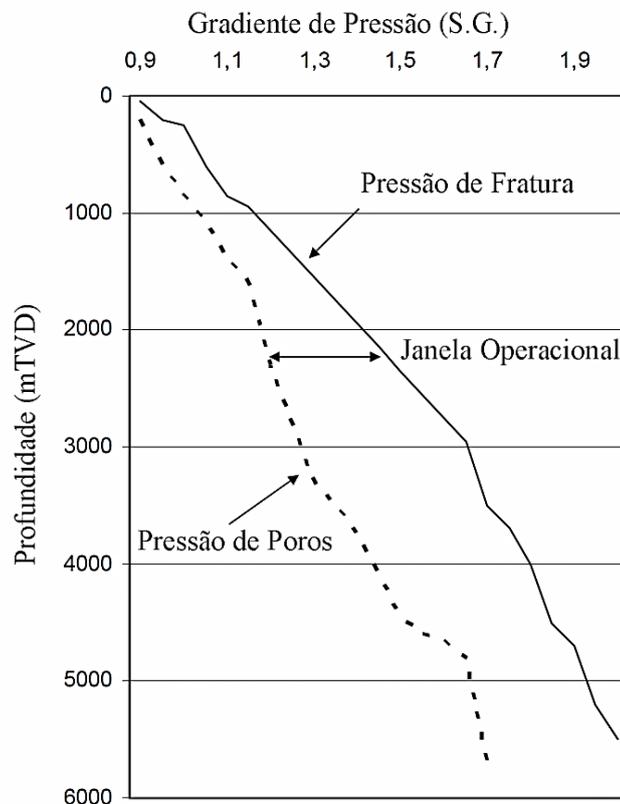
A formação da torta de filtração permite minimizar a quantidade de filtrado que invade a rocha, evitando possíveis danos, como contaminação do óleo ou redução da permeabilidade da formação, o que poderia tornar o poço improdutivo.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivos: estudar a filtração e invasão de fluidos de perfuração base água e base óleo (emulsão), sob condições estáticas e dinâmicas, caracterizar a torta formada a partir da determinação de parâmetros como porosidade, permeabilidade, compressibilidade, resistência da torta ao cisalhamento e fator de fricção, obter resultados comparativos para diferentes tipos de fluido de perfuração (base água e emulsão) e realizar uma modelagem da filtração estática a fim de prever o comportamento de alguns parâmetros da filtração.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A técnica de perfuração *overbalance* mantém a pressão no poço sempre superior às pressões de poros da rocha reservatório, de modo a evitar influxo de fluidos nativos para dentro do poço, fenômeno conhecido como *kick*. Nessa técnica é necessário cuidado para que não seja ultrapassada a pressão de fratura da formação rochosa, pois a rocha fraturada permite uma maior perda de circulação do fluido e essa invasão poderia causar dano irreversível à rocha reservatório. O intervalo entre a pressão de poros e a pressão de fratura da rocha é chamado de janela operacional do processo. A Figura 2 ilustra a janela operacional de pressão de um determinado poço.



**Figura 2.** Representação da janela operacional de pressão (Adaptada de Omland, 2009).

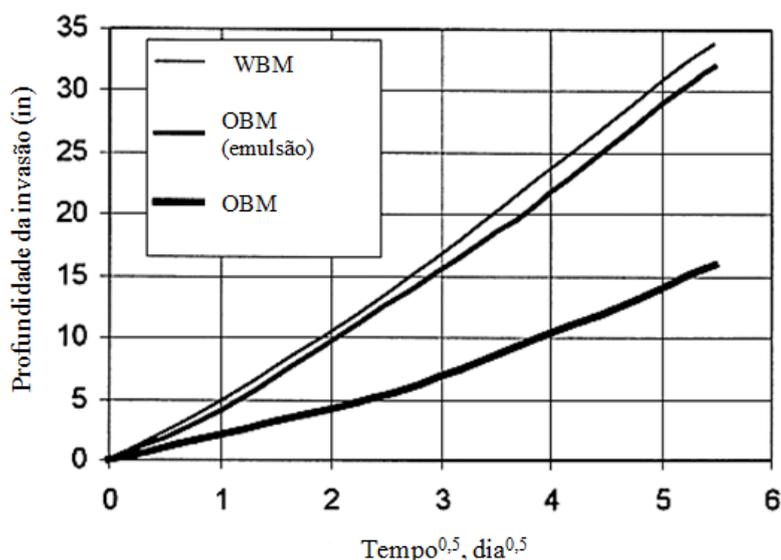
Quando a janela operacional é larga, trabalha-se com a perfuração *overbalance*, quando é estreita opta-se pelo *nearbalance* ou *underbalance*. Segundo Bennion *et al.* (1995) *apud* Civan (2007) a perfuração *overbalance* é mais comum, pois a pressão exercida por fluidos convencionais geralmente é maior do que as pressões típicas encontradas nos reservatórios.

Uma das funções básicas de um fluido de perfuração é a de exercer uma pressão maior que a da formação permeável que está sendo perfurada (perfuração *overbalance*) evitando os *kicks*. Porém, esse diferencial de pressão positivo na direção da formação perfurada gera um processo de filtração. Segundo Queiroz Neto (2006) porções da parte líquida do fluido são perdidas para as formações adjacentes, enquanto parte dos sólidos presentes no fluido de perfuração, constituída por partículas menores que os poros da formação, penetra na rocha

durante a perda do fluido, tamponando rapidamente a região ao redor do poço, formando uma torta interna, as partículas maiores acumulam-se na parede do poço, iniciando a formação de uma torta externa. Segundo Ba geri *et al.* (2013), a escolha de um bom fluido de perfuração passa pelo conhecimento das características da torta formada a partir da sua filtração.

A torta formada na parede do poço, durante a perfuração, é uma suspensão polimérica concentrada, resultante da filtração do fluido de perfuração à base de polímeros. Essa torta é constituída por uma mistura de polímeros, partículas coloidais e granulares, tendo a água ou óleo como a fase líquida intersticial (Bailey *et al.*, 1998). O material dessa torta se comporta como puramente elástico, com escoamento plástico e apresentando um limite de escoamento bem definido (Cerasi *et al.*, 2001). Fisicamente esse material tem aparência de um gel polimérico.

De acordo com Simpson (1974) a profundidade da invasão, ou seja, a distância da formação que é afetada é fortemente dependente do tipo de fluido de perfuração utilizado. Ocorre uma invasão mais intensa quando se utiliza fluidos base água, uma invasão moderada para emulsão e uma menor invasão para fluidos base óleo, como mostrado na Figura 3.



**Figura 3.** Profundidade da invasão de filtrado para diferentes tipos de fluidos de perfuração (Adaptado de Simpson, 1974).

A invasão de filtrado e de partículas finas durante as operações de perfuração, os danos resultantes desse processo e a formação da torta de filtração estão entre os problemas mais importantes dentro dos processos de exploração de poços de petróleo (Civan, 2007).

A invasão de filtrado e o crescimento da torta, se não forem controlados adequadamente, poderão causar diversos problemas, como:

- invasões excessivas de filtrado nas formações geológicas, o que pode comprometer a viabilidade da produção no poço, pois segundo Queiroz Neto (2006), um dos principais problemas ocasionados pela presença do filtrado em zonas produtoras de óleo e gás é o significativo decréscimo nas permeabilidades relativas e consequentemente a redução da produtividade do poço;
- desmoronamento de formações hidratáveis, pois argilas podem ser hidratadas pelo filtrado de um fluido base água;

- avaliações equivocadas da formação que está sendo perfurada, o processo de perfuração do poço pode ser comprometido devido à contaminação do fluido no reservatório;
- redução do diâmetro do poço e aprisionamento da coluna de perfuração no caso de um crescimento descontrolado da torta de filtração.

Segundo Waldmann (2005) a existência ou não de circulação do fluido de perfuração no poço governa o processo de filtração da seguinte forma:

- Quando a circulação é interrompida, forma-se uma torta de baixa permeabilidade que cresce continuamente, sendo esta a responsável por controlar as taxas de filtração no poço. Portanto, à medida que a espessura da torta aumenta, as taxas de filtração vão diminuindo ao longo do tempo. Este processo é conhecido como filtração estática.
- Quando há circulação do fluido, a espessura da torta é uma função do equilíbrio entre a taxa de deposição de partículas sólidas e a taxa de erosão da torta de filtração formada, provocada pela circulação de fluido no poço. Outros autores (Vaussard *et al.*, 1986 e Dewan e Chenevert, 2001) constataram o mesmo comportamento anteriormente. Sendo assim, quando se atinge o equilíbrio, a espessura da torta permanece constante e conseqüentemente as taxas de filtração no poço serão constantes também. Este processo é chamado de filtração dinâmica.

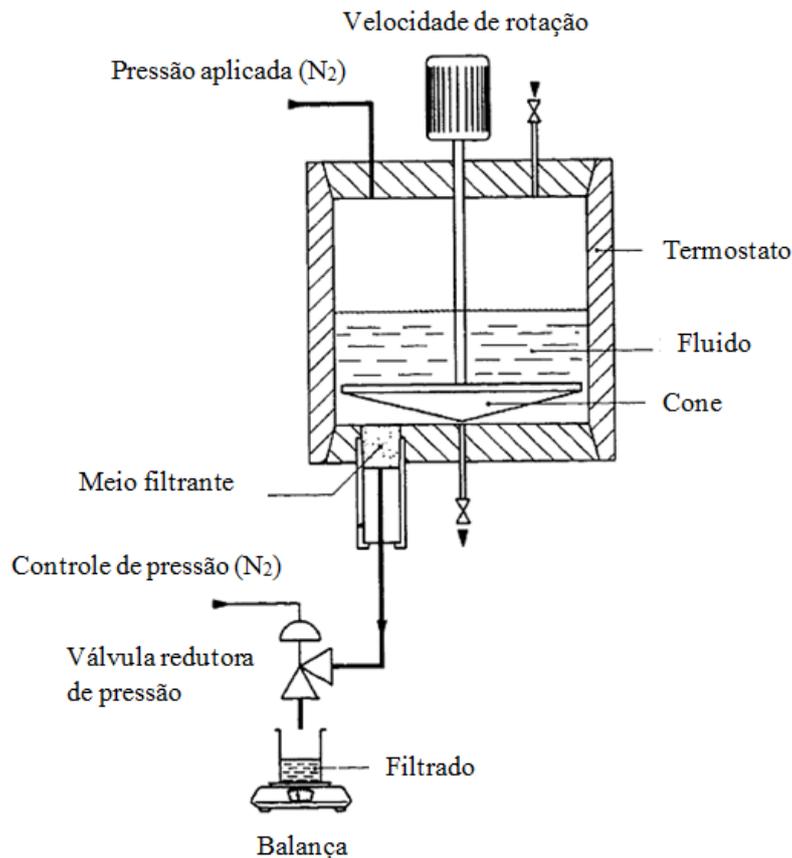
Muitos pesquisadores têm estudado os fenômenos de filtração estática e dinâmica ao longo do tempo, como exemplo pode-se destacar: Outmans 1963; Vaussard *et al.*, 1986 e Jiao e Sharma, 1992. Outros mostram atenção especial à caracterização da torta formada durante a filtração de fluidos de perfuração, como no caso dos trabalhos realizados por Dewan e Chenevert, 2001; Elkhatny *et al.*, 2012 e Ba geri *et al.*, 2013. Conhecer o processo de filtração e invasão de fluidos de perfuração é importante, pois ajuda no controle das condições operacionais e na mitigação de danos ao reservatório, que podem ser irreversíveis tornando-o inviável para a produção de óleo.

Vaussard *et al.* (1986) realizaram um estudo experimental da filtração dinâmica de fluidos de perfuração, sob condições semelhantes as de um poço. Antes do trabalho de Vaussard *et al.* (1986) investigava-se muito sobre a filtração desses fluidos como um importante parâmetro nas operações de perfuração, mas as características da filtração e da torta formada, sob condições semelhantes as de um poço real (condições dinâmicas), geralmente não eram bem estimadas em testes de laboratório, que consideravam apenas a filtração estática.

Segundo Vaussard *et al.* (1986) a filtração dinâmica sob condições de poço envolve três áreas:

- Filtração dinâmica com circulação do fluido de perfuração na superfície do meio filtrante;
- Filtração dinâmica abaixo da broca de perfuração, com renovação constante da superfície de filtração;
- Filtração estática através da torta já formada, quando a circulação de fluido é interrompida.

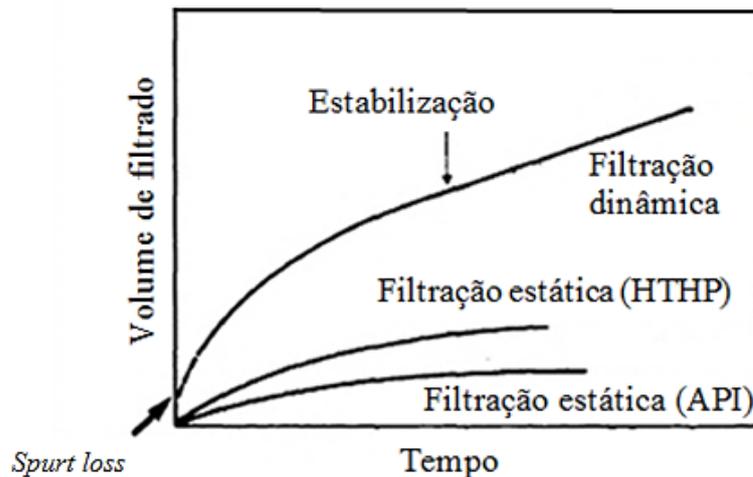
Os experimentos, obtidos através do aparato experimental utilizado por Vaussard *et al.* (1986), ilustrado na Figura 4, permitiram filtrar o fluido enquanto um cisalhamento era aplicado na superfície de filtração através da rotação de um cone, simulando a circulação de fluido no poço. Foram utilizados três fluidos: um fluido base água, um fluido base água polimérico e uma emulsão inversa.



**Figura 4.** Aparato experimental utilizado por Vaussard *et al.* (1986).

Os autores concluíram que a filtração dinâmica é dependente do crescimento da torta de filtração e observaram que a perda inicial de fluido para a formação (*spurt loss*) é função da taxa de cisalhamento. O tempo necessário para a filtração se estabilizar pode ser longo. Concluíram também, que o *spurt loss* é um fenômeno normal no início da filtração, principalmente quando se usa como fluido, uma emulsão inversa com baixa concentração de sólidos, o mesmo fenômeno não ocorre quando o fluido é polimérico, provavelmente devido a sua alta viscosidade.

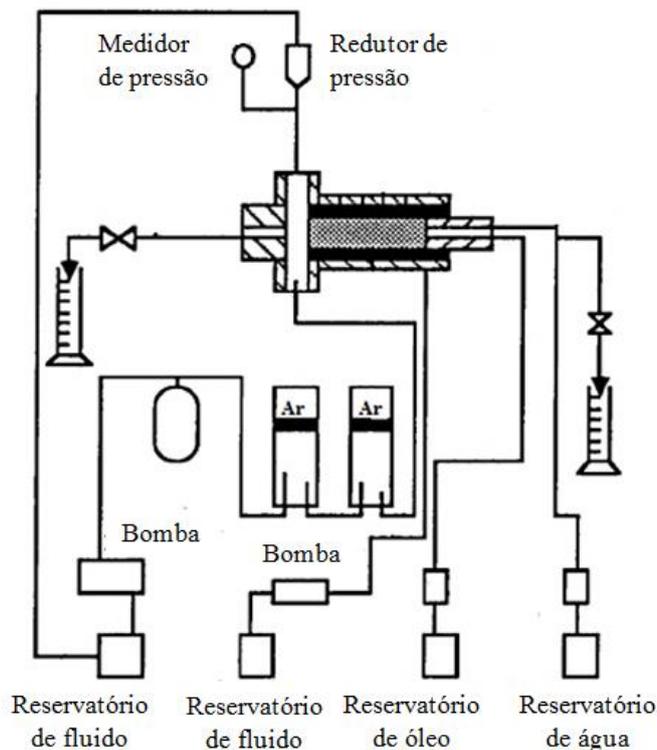
Vaussard *et al.* (1986) observaram que há diferença entre os resultados para filtração estática API e os resultados para filtração dinâmica sob condições de poço, no entanto, eles evoluem na mesma direção, como mostrado na Figura 5. Todos os resultados se mostraram semelhantes ao comportamento apresentado pela Figura 5 e os principais parâmetros que influenciaram no processo se diferem entre os dois tipos de filtração.



**Figura 5.** Curvas de filtração estática e dinâmica. HTHP – *high temperature/high pressure*; API – *American Petroleum Institute*. (Adaptado de Vaussard *et al.*, 1986).

Segundo os autores, a filtração dinâmica é independente da permeabilidade do meio filtrante, exceto no caso de rocha sintética. A filtração e o crescimento da torta dependem de dois fenômenos contrários: a deposição de sólidos e a erosão da torta. A estrutura da torta formada é essencial para ter um bom controle da filtração dinâmica, caso a torta seja frágil, ela é menos eficiente em termos de filtração.

Jiao e Sharma (1992) estudaram os danos causados à formação através de experimentos que simularam a invasão de filtrado e de partículas sólidas do fluido na rocha. O equipamento utilizado foi projetado de forma a permitir a circulação do fluido pela superfície do meio filtrante ao mesmo tempo em que a filtração ocorre (filtração dinâmica). A Figura 6 ilustra o equipamento.



**Figura 6.** Aparato experimental utilizado por Jiao e Sharma (1992).

De acordo com as conclusões apresentadas pelos autores, a invasão de filtrado e de partículas é extremamente danosa para a formação e é fortemente dependente da composição do fluido utilizado, observação que também foi feita anteriormente por Simpson (1974). No entanto, a invasão de partículas sólidas ocorre principalmente durante o *spurt loss*, uma vez que a torta é formada, um número bastante pequeno de partículas é capaz de invadir a rocha.

No caso em que a torta não se forma ou quando ela é de má qualidade, a invasão continua por um longo tempo, causando extensos danos à formação. Da mesma forma que quando a torta formada tem uma boa qualidade, o *spurt loss* é limitado e a invasão de partículas é bem menor. Sendo assim, um bom fluido será aquele que formar rapidamente uma torta de baixa permeabilidade e alta resistência. Abrams (1977) recomenda que as partículas sólidas no fluido sejam maiores do que o tamanho dos poros da formação, para minimizar a invasão.

Jiao e Sharma (1993a) estudaram a filtração dinâmica de fluidos de perfuração base água, utilizando amostras de rochas como meio filtrante e impondo diferentes fluxos do fluido. O equipamento utilizado foi o mesmo do trabalho de Jiao e Sharma (1992) (Figura 6). Os autores observaram que a espessura da torta formada é função sensível da reologia do fluido, da taxa de cisalhamento e da permeabilidade da rocha.

Foi desenvolvido um modelo para relacionar o crescimento da torta, sob condições dinâmicas de filtração, com as propriedades do fluido e da rocha, obtendo uma boa concordância entre resultados experimentais e simulados.

De acordo com Jiao e Sharma (1993a), assim como o modelo prevê, foi observado experimentalmente que nenhuma torta é formada em rochas com baixa permeabilidade, quando a pressão de *overbalance* for reduzida abaixo de um valor crítico. Segundo os autores, geralmente é dito que nenhuma torta se forma em rochas com permeabilidade muito elevada, pois ocorre perda de circulação do fluido. O trabalho de Jiao e Sharma (1993a) mostrou que existe também um limite mínimo de permeabilidade, abaixo do qual nenhuma torta será formada, geralmente entre 0,1 e 1,0 md, e uma pressão de *overbalance* mínima que deve ser mantida na coluna de fluido para permitir a formação da torta.

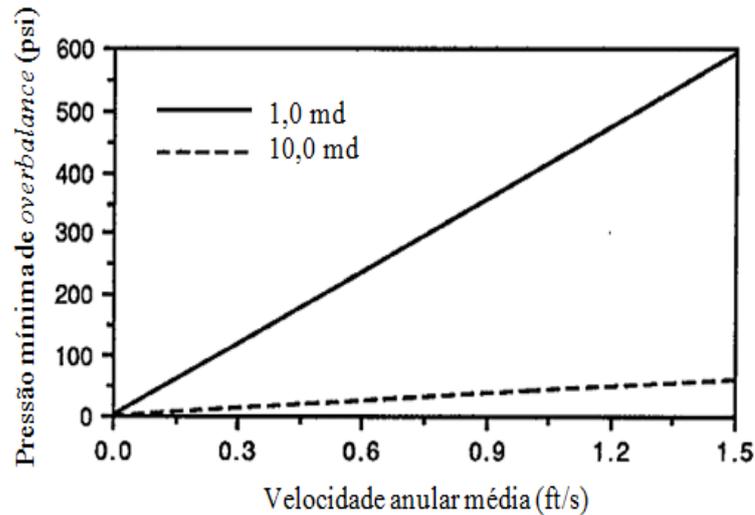
Os autores apresentaram o desenvolvimento de um modelo com equações capazes de determinar diretamente, a partir dos resultados experimentais, a permeabilidade crítica e a pressão mínima de *overbalance* requeridas para a formação da torta. A Equação 1, obtida ao final do equacionamento indica que a permeabilidade crítica é inversamente proporcional a pressão de *overbalance*.

$$2 \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} \right) \frac{m' \mu}{K_f^*} \frac{\bar{V}}{\left( 1 - \frac{r_d}{r_w} \right)} \left( 2 + \frac{1}{n} \right) K^{\frac{1}{n}} = (P_w - \bar{P}_R), \quad (1)$$

sendo  $P_w$  (psi) a pressão aplicada na perfuração,  $P_r$  (psi) a pressão média do reservatório,  $r_e$  o raio do reservatório,  $r_w$  o raio do poço,  $m$  a inclinação de  $q/A$  (m/s) versus  $\tau w^{1/n}$  quando  $q$  está no estado estacionário,  $\mu$  a viscosidade do filtrado,  $K_f^*$  (md) a permeabilidade crítica da formação,  $V$  (ft/s) a velocidade anular média,  $r_d$  o raio fora da coluna de perfuração,  $n$  o índice de comportamento do fluido e  $K$  o índice de consistência do fluido.

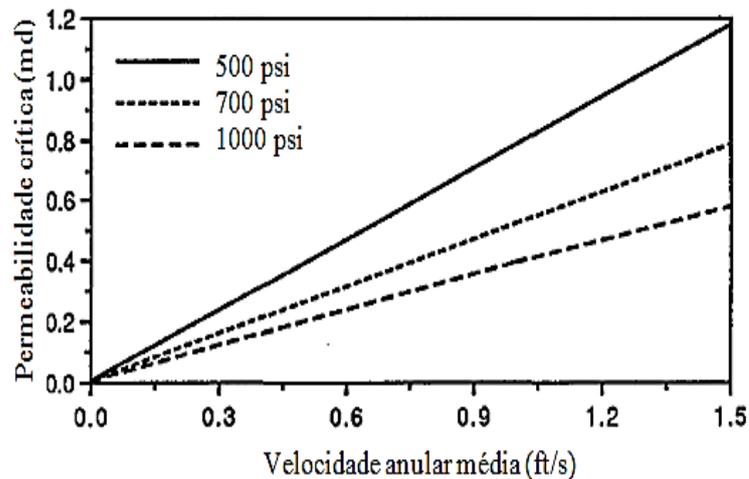
Segundo Jiao e Sharma (1993a) geralmente é aceito que baixas pressões de *overbalance* reduzem as taxas de filtração. No entanto a partir de seus resultados experimentais os autores mostraram que existe uma pressão de *overbalance* mínima abaixo da qual a torta não será formada e a taxa de filtração irá aumentar. Assim, a invasão de sólidos e os danos à formação serão maiores.

De acordo com a Equação 1, um leve aumento no gradiente de pressão vai reduzir significativamente a permeabilidade crítica, ou seja, para certas rochas de baixa permeabilidade, é possível haver a formação de torta se houver um aumento na pressão de *overbalance*. A Figura 7 ilustra a relação entre a pressão de *overbalance* mínima com a velocidade anular para diferentes permeabilidades de rocha.



**Figura 7.** Pressão de *overbalance* mínima requerida para formação da torta na filtração de um fluido base água *versus* velocidade anular média (Adaptado de Jiao e Sharma, 1993a).

Como pode ser observado na Figura 7, uma menor permeabilidade da rocha requer uma pressão maior para que haja formação da torta e quanto maior a velocidade anular maior é a pressão de *overbalance* mínima requerida, para as duas permeabilidades mostradas. A Figura 8 ilustra a variação da permeabilidade crítica com a velocidade anular média para diferentes pressões.



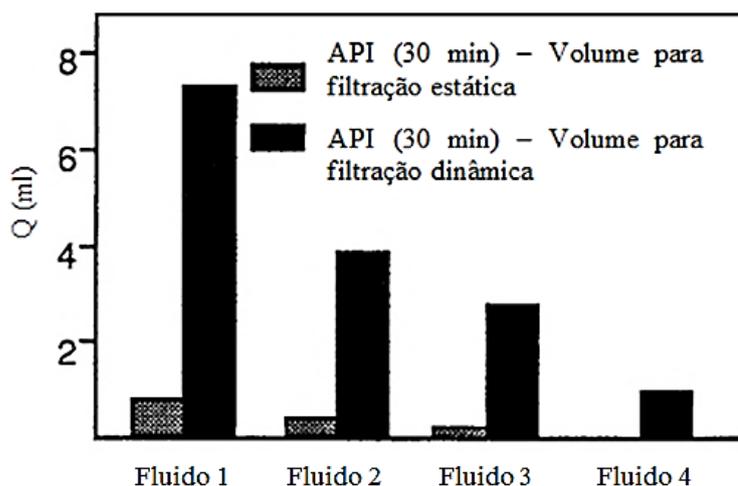
**Figura 8.** Permeabilidade crítica para formação da torta de filtração de um fluido base água *versus* velocidade anular média (Adaptado de Jiao e Sharma, 1993a).

A Figura 8 mostra que a torta será formada na parede da formação perfurada, sob determinada pressão de *overbalance* e fluxo de fluido. Se a permeabilidade da formação for menor que a permeabilidade crítica, espera-se que nenhuma torta seja formada.

Como conclusão de seus estudos Jiao e Sharma (1993a) mostraram também que as propriedades reológicas do fluido (índice de consistência e índice de comportamento do fluido) têm um efeito significativo na formação da torta. Como exemplo pode-se dizer que para um fluido com valores altos dos índices de comportamento e de consistência, será necessária uma alta pressão de *overbalance* e um baixo fluxo de fluido para haver formação de torta, apesar da taxa de filtração para esse tipo de fluido ser alta. Isso ocorre porque, para um mesmo fluxo de fluido, altos valores para esses índices aumentam significativamente a taxa de cisalhamento atuando na superfície de filtração.

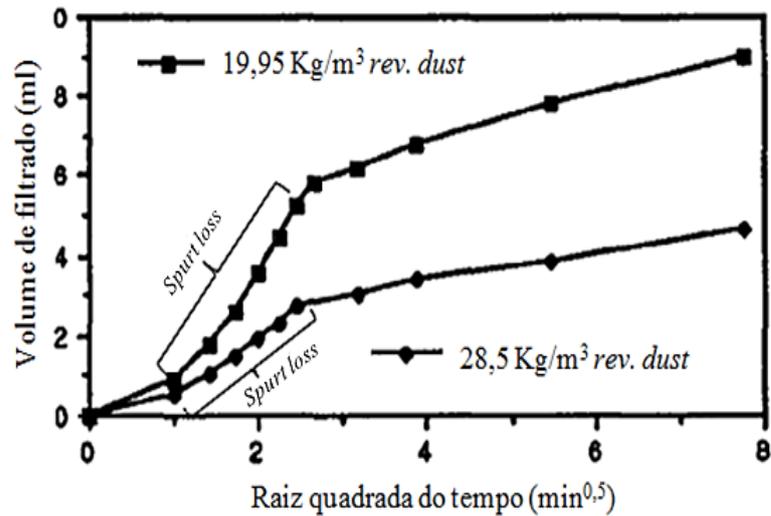
Jiao e Sharma (1993b) estudaram a filtração dinâmica de emulsões inversas com diferentes tipos de aditivos e seus resultados experimentais foram utilizados para investigar os mecanismos da filtração dinâmica desses fluidos. O equipamento utilizado pelos autores foi o mesmo do trabalho de Jiao e Sharma (1992) (Figura 6).

Assim como mostrado por Vaussard *et al.* (1986), Jiao e Sharma (1993b) concluíram que para todos os fluidos testados a taxa de filtração dinâmica é muito maior do que as taxas de filtração estática API, a Figura 9 apresenta a diferença entre os volumes de filtrado obtidos ao final de cada filtração.



**Figura 9.** Comparação entre filtração estática API e filtração dinâmica (Adaptado de Jiao e Sharma, 1993b).

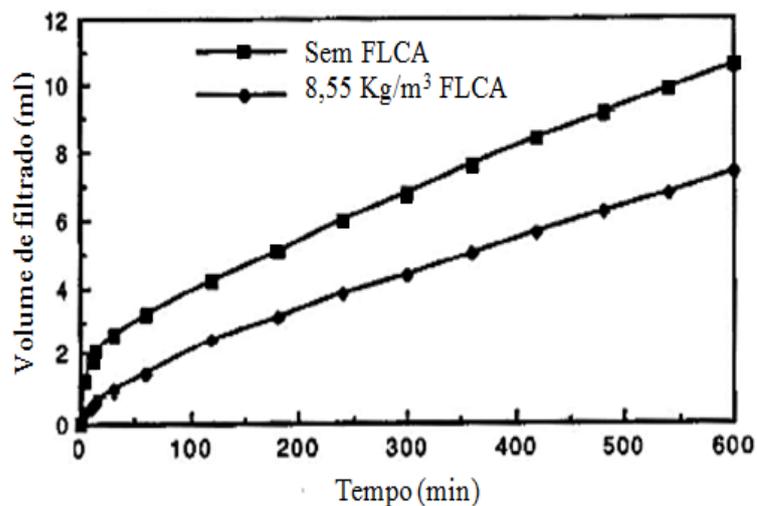
Foi observado pelos autores que durante os primeiros minutos da filtração dinâmica o *spurt loss* é proporcional ao tempo, pois nenhuma torta ainda havia sido formada na superfície da rocha. Essa taxa é controlada pela permeabilidade da rocha. Esse período da filtração pode ser observado na Figura 10 como a parte não linear da curva de volume de filtrado *versus*  $\sqrt{t}$ . Quando a torta começa a ser formada e vai crescendo, o volume de filtrado é proporcional a  $\sqrt{t}$  até o crescimento cessar e uma espessura de equilíbrio ser alcançada.



**Figura 10.** Efeito da concentração de sólidos no *spurt loss* (rev. dust - mistura de caulinita e quartz) (Adaptado de Jiao e Sharma, 1993b).

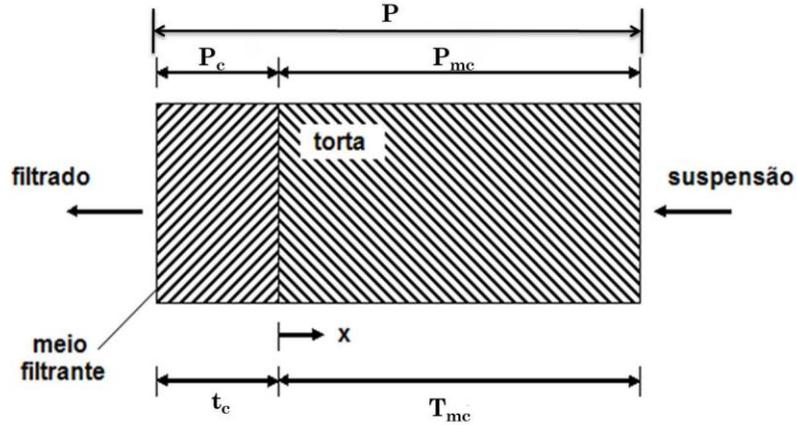
O *spurt loss* e a taxa de filtração foram influenciados pela concentração de sólidos no fluido, como pode ser observado na Figura 10, quanto maior a quantidade de sólidos presentes no fluido, menor o *spurt loss* e a taxa de filtração.

Os autores concluíram também que o uso de aditivos para o controle da perda de fluido na filtração (FLCA's) não reduziram a taxa de filtração, mas diminuíram o *spurt loss* e limitaram a invasão de sólidos e a formação da torta interna. A Figura 11 ilustra o efeito da adição do FLCA.



**Figura 11.** Efeito do FLCA na filtração dinâmica de um fluido base óleo (Adaptado de Jiao e Sharma, 1993b).

Dewan e Chenevert (2001) desenvolveram uma teoria capaz de prever o crescimento da torta e a invasão de filtrado. A Figura 12 apresenta o esquema de filtração no qual os autores se basearam para o desenvolvimento do equacionamento.



**Figura 12.** Esquema de filtração.

Segundo Dewan e Chenevert (2001), o fluxo de filtrado através de um meio filtrante pode ser descrito pela equação de Darcy (Equação 2).

$$q(t) = \frac{(P - P_{mc})k_c}{14700 \cdot \mu \cdot t_c}, \quad (2)$$

sendo  $P_{mc}$  (psi) a pressão através da torta,  $k_c$  (md) a permeabilidade do meio filtrante,  $\mu$  (cP) a viscosidade do filtrado e  $t_c$  (cm) a espessura do meio filtrante.

Pode-se observar que inicialmente ( $t=0$ ) 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 mesma. Isso reduz a pressão através do meio filtrante, logo  $q(t)$  diminui. A equação de Darcy para a queda de pressão através da torta é dada pela Equação 3.

$$P_{mc}(t) = 14700 \cdot \frac{q(t) \cdot T_{mc}(t) \cdot \mu}{k_{mc}(t)}, \quad (3)$$

sendo  $T_{mc}$  (cm) a espessura da torta de filtração.

Com o objetivo de correlacionar a permeabilidade da torta compressível com a pressão aplicada sobre a mesma, utiliza-se a Equação 4.

$$k_{mc}(t) = \frac{k_{mc0}}{P_{mc}^v(t)}, \quad (4)$$

onde  $k_{mc}$  (md) é a permeabilidade da torta,  $k_{mc0}$  (md) é a permeabilidade de referência definida para uma pressão diferencial de 1 psi e  $v$  é o índice de compressibilidade da torta com o aumento da pressão. Se o valor de  $v$  for zero tem-se uma torta 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.

O cálculo da permeabilidade de referência é feito utilizando a Equação 5.

$$k_{mc0} = 14700 \cdot \frac{m \cdot \mu \cdot s}{P^{(1-v)} \left( 1 - s - \frac{\phi_{mc0}}{P^{\delta v}} \right)}, \quad (5)$$

sendo  $m$  (cm<sup>2</sup>/s) um parâmetro,  $s$  a fração volumétrica de sólidos no fluido, calculados pelas Equações 6 e 7, respectivamente e  $\phi_{mc0}$  a porosidade de referência definida para uma pressão diferencial de 1 psi e calculada pela Equação 9.

$$m = \frac{2t_1}{S_1^2}, \quad (6)$$

$$s = \frac{V_s}{V_t}, \quad (7)$$

onde  $(t_1, S_1)$  é o par de coordenadas do início da mudança de pressão,  $V_s$  (cm<sup>3</sup>) é o volume de sólidos no fluido e  $V_t$  (cm<sup>3</sup>) é o volume do fluido.

Para tortas compressíveis, a Equação 8 expressa a porosidade como uma função da pressão.

$$\phi_{mc}(t) = \frac{\phi_{mc0}}{P_{mc}^{\delta v}(t)}, \quad (8)$$

sendo  $\delta$  um multiplicador na faixa de 0,1 a 0,2 (neste trabalho será usado 0,1).

$$\phi_{mc0} = \frac{\alpha}{\alpha + \frac{\rho_f}{\rho_s}}, \quad (9)$$

sendo  $\rho_f$  e  $\rho_g$  (g/cm<sup>3</sup>) as densidades do fluido e do sólido, respectivamente, o parâmetro  $\alpha$  é definido de acordo com a Equação 10.

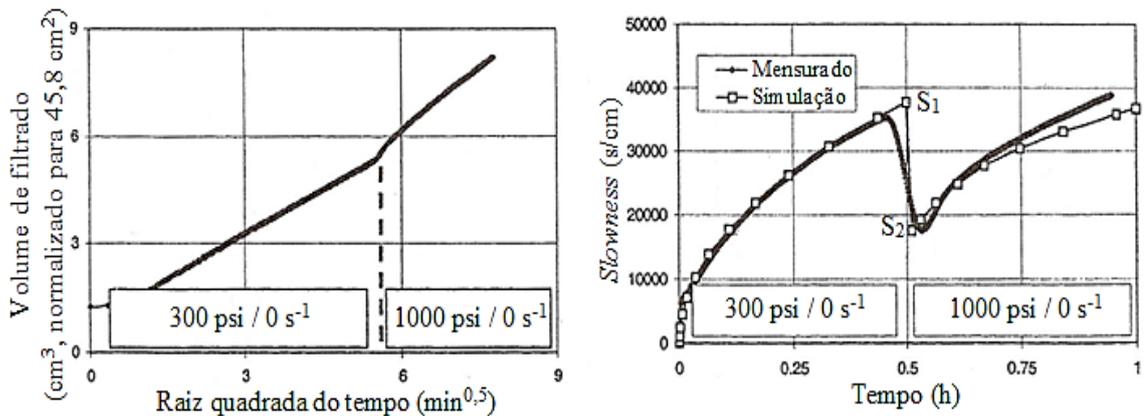
$$\alpha = \frac{P_{molhado}}{P_{seco}} - 1, \quad (10)$$

em que  $P_{molhado}$  (g) é a massa da torta úmida e  $P_{seco}$  (g) é a massa da torta seca em estufa.

A espessura da torta pode ser determinada diretamente utilizando uma régua em microescala ou pela Equação 11, a partir de dados como o peso da torta úmida, a porosidade de referência da torta, obtida pela Equação 9, a densidade do material particulado,  $\rho_s$  (g/cm<sup>3</sup>) e a área de filtração,  $A$  (cm<sup>2</sup>).

$$T_{mc} = \frac{P_{molhado}}{A(1 - \phi_{mc0})\rho_s}, \quad (11)$$

Dewan e Chenevert (2001) realizaram experimentos em uma célula de filtração semelhante à utilizada neste estudo, com fluido de perfuração base água. Os autores definem *slowness* (s/cm) (Equação 12) como sendo uma variação do tempo com o espaço, o significado físico para esse termo é “o tempo para que o filtrado percorra 1,0 cm através do meio filtrante (torta de filtração ou rocha)”. Inicialmente, o valor de *slowness* tende a zero enquanto a taxa de filtrado aproxima-se de infinito. Segundo eles, é preferível apresentar resultados de ensaios de filtração na forma de uma curva de *slowness*, pois fica mais visível a influência da mudança de pressão na curva, que gera uma queda brusca no valor do *slowness*, conforme ilustra a Figura 13.



**Figura 13.** (a) Curva de filtração; (b) Curva de *slowness* - medido e simulado (Adaptado de Dewan e Chenevert, 2001).

$$S = \frac{1}{f} = \frac{A}{\frac{\Delta V}{\Delta t}} = \frac{\Delta t}{\Delta V} A, \quad (12)$$

sendo  $A$  (cm<sup>2</sup>) a área de filtração,  $\Delta V$  (cm<sup>3</sup>) a variação do volume de filtrado entre dois pontos da curva de filtração e  $\Delta t$  (s) a variação de tempo entre os mesmos pontos.

A partir dos experimentos de filtração estática, como mostrado na Figura 13, é possível obter  $S_1$  e  $S_2$  (Figura 13 (b)), necessários para o cálculo do índice de compressibilidade através da Equação 13.

$$v = 1 - \frac{\log S_1/S_2}{\log P_2/P_1}, \quad (13)$$

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

Durante o processo de filtração dinâmica a torta pode sofrer erosão, isso ocorre quando a tensão de cisalhamento imposta pela circulação do fluido de perfuração sobre a superfície da torta é maior que a resistência da torta ao cisalhamento. A tensão de cisalhamento imposta pelo fluido de perfuração, que segue o modelo *Power Law*, é representada pela Equação 14.

$$\tau = K \cdot \gamma^n, \quad (14)$$

onde  $\tau$  (dina/cm<sup>2</sup>) é a tensão de cisalhamento,  $K$  (dina/cm<sup>2</sup>s<sup>-n</sup>) é o índice de consistência do fluido,  $\gamma$  (s<sup>-1</sup>) a taxa de deformação do fluido, calculada pela Equação 15 e  $n$  é o índice de comportamento do fluido.  $K$  e  $n$  são determinados pelo ajuste dos dados reológicos obtidos nos experimentos realizados no viscosímetro.

$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_r}{\tan \theta'}, \quad (15)$$

onde  $n_r$  é a taxa de rotação do cone em rotações por segundo e  $\theta'$  é o ângulo do cone com a horizontal (neste trabalho o ângulo utilizado é 15°).

A resistência da torta ao cisalhamento pode ser escrita como a soma de dois termos, como está representado pela Equação 16.

$$\tau_{mc} = \tau_{mc0} + f_e \cdot \tau_g, \quad (16)$$

sendo  $\tau_{mc0}$  (dina/cm<sup>2</sup>) a resistência da torta ao cisalhamento sobre pressão nula, que vai ser dependente das forças intermoleculares na torta e é esperado que varie fortemente com a composição da mesma. O termo  $f_e \cdot \tau_g$  é uma resistência adicional devido à pressão que é aplicada,  $f_e$  é o coeficiente de fricção da torta e  $\tau_g$  é um cisalhamento resultante da pressão aplicada, calculado segundo a Equação 17.

$$\tau_g = 68950 \cdot P_{mc} \left( \frac{d_m}{T_{mc}} \right)^{\frac{1}{1-v}}, \quad (17)$$

sendo  $d_m$  (cm) o diâmetro médio das partículas do fluido de perfuração. Substituindo a Equação 17 na Equação 16 chega-se a Equação 18.

$$\tau_{mc} = \tau_{mc0} + 68950 \cdot f_e \cdot P_{mc} \left( \frac{d_m}{T_{mc}} \right)^{\frac{1}{1-v}}, \quad (18)$$

Quando a resistência da torta ao cisalhamento (Equação 18) se iguala ao valor da tensão imposta pela circulação do fluido de perfuração (Equação 14) a espessura da torta passa a ser constante, ou seja, ela não irá crescer mais e nem haverá mais a erosão dessa torta. Fazendo isso, chega-se a Equação 19, que será utilizada para determinar  $\tau_{mc0}$  e  $f_e$  no equilíbrio.

$$K \cdot \gamma_i^n = \tau_{mc0} + 68950 \cdot f_e \cdot P_{mci} \left( \frac{d_m}{T_{mci}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}}, \quad (19)$$

onde  $i$  representa o experimento realizado. O equacionamento apresentado por Dewan e Chenevert (2001) será utilizado neste trabalho para determinação dos parâmetros da torta de filtração.

Nishaboori (2009) utilizou em seu trabalho equações para prever o crescimento da torta de filtração (Equação 20) e o fluxo da invasão de filtrado (Equação 21) em função do tempo. Segundo o autor, esse processo de modelagem foi descrito anteriormente por Chin (1995).

$$x_{mc}(t) = \frac{1}{2,54} \sqrt{\frac{2 \cdot t \cdot \Delta P \cdot \lambda \cdot k_{mc}}{14,696 \cdot \mu}}, \quad (20)$$

onde  $x_{mc}(t)$  (in) é a espessura da torta em função do tempo,  $t$  (s) é o tempo de filtração,  $\Delta P$  (psi) é a pressão através da torta,  $\lambda$  é um fator de crescimento,  $k_{mc}$  (md) é a permeabilidade da torta e  $\mu$  (cP) a viscosidade do filtrado.

$$q(t) = \frac{2,54}{14,696} \cdot \frac{k_{mc}}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{x_{mc}(t)}, \quad (21)$$

onde  $q(t)$  é o fluxo da invasão de filtrado ( $\text{cm}^3/(\text{s}/\text{cm}^2)$ ) na formação.

A viscosidade do filtrado, a permeabilidade da torta e o fator de crescimento são considerados constantes durante o processo de invasão. As Equações 20 e 21 foram aplicadas neste trabalho para prever o crescimento da torta e o fluxo da invasão de filtrado para os fluidos utilizados nos ensaios de filtração.

Elkatatny *et al.* (2012) realizaram um estudo de caracterização da torta de filtração gerada na filtração de fluidos de perfuração base água, utilizando tomografia computadorizada (CT). Segundo os autores, muitos trabalhos que estudam a torta de filtração de fluidos de perfuração assumem que essa torta é homogênea, porém Elkatatny *et al.* (2012) afirmam que a torta de filtração não é homogênea, sendo composta por duas camadas com diferentes propriedades. A homogeneidade da torta afeta as propriedades da filtração, como o volume de filtrado, a espessura da torta e o melhor método para removê-la.

O objetivo do trabalho de Elkatatny *et al.* (2012) foi determinar a espessura e a permeabilidade da torta de filtração de fluidos base água, a partir de uma nova metodologia e comparar os resultados com aqueles obtidos por outros modelos (Bourgoyne *et al.*, 1991; Khatib, 1994; Martinez *et al.*, 2000; Rautela, 2000; Tiller, 2002 e Li *et al.*, 2005). Para isso foram realizados experimentos de filtração em uma célula *high-temperature/high-pressure* (HTHP) sob condições estáticas (225 °F e 300 psi) e dinâmicas (225 °F, 300 psi e 100 rpm). Foram utilizados três fluidos base água (A, B, C) para os experimentos de filtração estática e um fluido base água para a filtração dinâmica (A). A CT foi utilizada para determinar a

espessura e a porosidade da torta e a microscopia eletrônica de varredura (SEM) foi utilizada para determinar a sua morfologia.

Os resultados obtidos na CT mostraram que a torta de filtração é heterogênea e possui duas camadas com propriedades diferentes. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos, sob condições estáticas e dinâmicas. Os resultados de filtração estática mostram uma média entre os resultados dos quatro experimentos realizados para o fluido A, escolhido pelos autores como o melhor fluido.

**Tabela 1.** Resultados experimentais de Elkatatny *et al.* (2012).

	Camada próxima ao fluido de perfuração			Camada próxima à superfície da rocha		
	Espessura (in)	Porosidade após 30 min de filtração	Permeabilidade após 30 min de filtração ( $\mu\text{d}$ )	Espessura (in)	Porosidade	Permeabilidade ( $\mu\text{d}$ )
Filtração estática	0,10	nula	0,00	0,06	entre 0,10 e 0,20	0,087
Filtração dinâmica	0,07	nula	0,00	0,04	0,15	0,068

Os resultados da SEM mostraram que havia uma diferença na distribuição do tamanho de partículas entre as duas camadas. Na camada próxima à superfície da rocha, as partículas tinham tamanhos maiores, entre 160 – 280  $\mu\text{m}$ , e na camada próxima ao fluido de perfuração havia uma mistura de partículas de tamanhos maiores (150 – 200  $\mu\text{m}$ ) e menores (90 – 100  $\mu\text{m}$ ), o que conduziu a uma porosidade nula nessa camada.

De acordo com Elkatatny *et al.* (2012), modelos anteriores superestimaram a espessura da torta em aproximadamente 50%. Os autores examinaram algumas metodologias (Bourgoyne *et al.*, 1991; Khatib, 1994; Martinez *et al.*, 2000; Rautela, 2000; Tiller, 2002 e Li *et al.*, 2005) para verificar qual delas iria prever melhor os resultados de permeabilidade obtidos. Os valores previstos por esses modelos são mostrados na Tabela 2.

Comparando os resultados experimentais com os resultados obtidos através dos diferentes modelos, os autores concluíram que o modelo de Li *et al.* (2005) foi o que mostrou melhor concordância entre os valores.

**Tabela 2.** Predição da permeabilidade e da espessura da torta por diferentes modelos (Elkatatny *et al.*, 2012).

Modelo	Permeabilidade ( $\mu\text{d}$ )	Espessura (in)
Bourgoyne <i>et al.</i> (1991)	0,023	0,0450
Martinez <i>et al.</i> (2000)	0,050	0,0450
Tiller (2002)	0,050	0,0450
Li <i>et al.</i> (2005)	0,189	0,1700
Khatib (1994)	63	0,0127
Rautela (2000)	170	-

Ba geri *et al.* (2013) desenvolveram um trabalho de discussão sobre as propriedades mais importantes da torta de filtração, como espessura, permeabilidade, porosidade e mineralogia, para fluidos base água e base óleo. Além disso, mostraram um resumo de diferentes procedimentos para determinar essas propriedades e a precisão de cada um deles. Segundo os autores, a escolha de um bom fluido de perfuração passa pelo conhecimento das características da torta formada a partir da sua filtração.

Em relação à espessura da torta, o método mais comum para a determinação é utilizando um paquímetro ou uma régua em micro escala. Neste método é necessário um contato direto com a torta de filtração e pode haver uma incerteza em torno de  $\pm 0,10$  mm na medida, de acordo com o equipamento utilizado. Outra metodologia, na qual não é necessário um contato direto com a torta, é o uso de laser. Este método tem sido desenvolvido para minimizar os erros gerados pela incerteza inerente ao método tradicional de medida direta com régua ou paquímetro, com o uso do laser o desvio padrão na medida da espessura fica em torno de 0,025 mm. O dispositivo é portátil, de fácil operação e adequado para uma medida rápida da espessura. Um terceiro método é chamado de *dial gauge*, nele utiliza-se um dispositivo eletrônico para medida da espessura da torta, evitando qualquer tipo de dano para a mesma. A espessura da torta mais o papel de filtro é medida em vários pontos. A espessura da torta é determinada pela média dos valores, subtraindo a espessura do papel de filtro. O uso da CT (Elkatatny *et al.*, 2012) é outra metodologia que pode ser aplicada para determinar a espessura da torta, porém esse método considera a heterogeneidade da mesma.

Como mostrado por Dewan e Chenevert (2001) a porosidade da torta é um dos fatores necessários para sua caracterização. As Equações 8 a 10 foram utilizadas por Dewan e Chenevert (2001) para determinar este parâmetro, a mesma metodologia foi utilizada por Dangou e Chandler (2009). Eles usaram a definição fundamental para porosidade: porosidade é igual ao volume de vazios dividido pelo volume total da amostra. A metodologia baseia-se em dados experimentais de massa da torta úmida e massa da torta seca. Os autores afirmaram que a porosidade é diretamente proporcional à distribuição do tamanho de partículas na torta e inversamente proporcional à espessura da mesma. Elkatatny *et al.* (2012) determinaram a porosidade da torta utilizando dados obtidos por CT, aplicando a Equação 22.

$$\phi_c = \frac{CT_{úmida} - CT_{seca}}{CT_{água} - CT_{ar}}, \quad (22)$$

onde,  $CT_{úmida}$  e  $CT_{seca}$  são os números obtidos pela CT para a torta úmida e para a torta seca, respectivamente e  $CT_{água}$  e  $CT_{ar}$  são os números obtidos pela CT para a água e para o ar, respectivamente.

Durante a perfuração de um poço a permeabilidade da torta de filtração pode variar em uma faixa de  $10^{-5}$  a  $10^{-7}$  Darcy. A permeabilidade da torta pode ser determinada por diferentes modelos, a Tabela 3 mostra diferentes equações que podem ser aplicadas para o cálculo da permeabilidade da torta de filtração.

**Tabela 3.** Diferentes equações mostradas por Ba geri *et al.* (2013) para o cálculo da permeabilidade da torta de filtração.

Autor	Ano	Equação	Número
Bourgoyne <i>et al.</i>	1991	$V = \sqrt{2 \cdot k_{mc} \cdot \Delta P \left( \frac{\varepsilon_{sav}}{\rho_s} - 1 \right)} A \frac{\Delta t}{\Delta \mu}$	23
Mahesh	2000	$k_{mc} = V \cdot V_c \frac{\mu}{2 \cdot t \cdot P \cdot A^2}$	24
Martinez <i>et al.</i>	2000	$\frac{P \cdot t}{\mu \cdot v} = \left( \frac{1}{2 \cdot k_{mc}} \right) T_{mc} + R_m$	25
		$c = \frac{\rho_s}{\left( 1 - \frac{\rho_s}{\varepsilon_{sav}} \right)}$	26
Tiller	2002	$\frac{p dt}{\mu \cdot dv} = \alpha_{av} c v + R_m$	27
		$\alpha_{av} \cdot k_{mc} \cdot \varepsilon_{sav} = 1$	28
		$q = k_{mc} \frac{\Delta P_c}{\mu L_m}$	29
Li <i>et al.</i>	2005	$\Delta P_t = \Delta P_{mc} + \Delta P_c$	30
		$q = k_c \frac{\Delta P_{mc}}{\mu \cdot T_{mc}}$	31
Dangou e Cahndler	2009	$k_{mc} = \frac{q_{eq} \cdot T_{mceq} \cdot \mu'}{A \cdot P}$	32

## CAPÍTULO III

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Material

Foi realizado um estudo comparativo entre diferentes tipos de fluidos de perfuração, base água e emulsão. A partir de experimentos de filtração desses fluidos, foi possível determinar parâmetros da torta formada, como porosidade, permeabilidade, compressibilidade, espessura, resistência da torta ao cisalhamento e fator de fricção. Foram determinados os fatores que mais influenciam no valor do fator de fricção estimado a partir de experimentos com diferentes fluidos base água. Foi proposta uma modelagem para prever o comportamento da filtração de fluidos de perfuração.

Neste trabalho, foram utilizados cinco fluidos de perfuração, sendo 4 fluidos base água (WBM) e 1 emulsão (OBM (emulsão)), a Tabela 4 mostra um esquema resumido deste trabalho.

**Tabela 4.** Fluidos de perfuração utilizados e objetivos.

Fluido	Sólido adensante	Objetivos
WBM 1	Carbonato	Determinar os parâmetros da torta de filtração;
OBM (emulsão)	Baritina	Comparar diferentes fluidos;
WBM 2	Carbonato	Modelagem da filtração;
WBM 3	Carbonato	Verificar a influência de diferentes fatores na estimação do fator de fricção da torta de filtração.
WBM 4	Carbonato	

Os fluidos WBM 1 e OBM (emulsão) foram cedidos pelo Cenpes/Petrobras e suas composições não foram informadas. Os demais fluidos, WBM 2, WBM 3 e WBM 4 foram preparados no Laboratório de Escoamento de Fluidos (LEF) e suas composições possuem uma variação na quantidade de sólidos e de amido. Esses fluidos foram feitos com a intenção de verificar a influência exercida pela composição do fluido de perfuração na estimação do fator de fricção da torta, sendo essa uma fonte de questionamentos ao longo dos primeiros experimentos.

Para realização dos experimentos de filtração foi utilizado papel de filtro como meio filtrante, de acordo com a Tabela 5.

**Tabela 5.** Características do papel de filtro utilizado para a filtração de cada fluido.

Volume da célula de filtração (cm <sup>3</sup> )	Fluido	Papel de filtro			
		Marca	Diâmetro (cm)	Área de filtração (cm <sup>2</sup> )	Gramatura (g/cm <sup>2</sup> )
250	WBM	Fann	6,30	31,65	0,0105
900	OBM (emulsão)	Whatman	12,50	100,29	0,0109

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Preparação dos fluidos

Na preparação dos fluidos de perfuração base água, foi utilizada a formulação descrita na Tabela 6. O fluido BR-CARB é um fluido base água e neste caso, trata-se de um fluido conhecido por *drill in*, utilizado para perfurar a rocha reservatório, pois é um fluido que permite pouca quantidade de filtrado invadindo a formação.

**Tabela 6.** Formulação do fluido BR-CARB. Utilizada para preparar WBM 2, WBM 3 e WBM 4 (Fornecida pelo Laboratório de Fluidos de Perfuração do Cenpes/Petrobras).

BR-CARB				
Volume de fluido = 2 L (5,8 bbl)				
Componente	Quantidade (g)			Função
	WBM 2 (1,08 g/cm <sup>3</sup> )	WBM 3 (1,46 g/cm <sup>3</sup> )	WBM 4 (1,08 g/cm <sup>3</sup> )	
Água industrial	QSP	QSP	QSP	Base
NaCl	57,1	57,1	57,1	Salmoura
Goma xantana	11,4	11,4	11,4	Viscosificante
Amido HP	45,7	45,7	22,9	Controlador de filtrado
Óxido de magnésio	8,6	8,6	8,6	Alcalinizante
Polibac TC	2,9	2,9	2,9	Bactericida
Carbonato de cálcio 2-44	151,5	1653,2	189,4	Adensante/Obturante

QSP: Quantidade suficiente para a preparação de 2 L do fluido

Os fluidos WBM 2, WBM 3 e WBM 4 foram preparados no LEF seguindo a metodologia descrita a seguir. Primeiramente, foi preparada uma salmoura, com aproximadamente 1600 ml de água sob uma agitação baixa (300 rpm) durante 10 minutos. Após esse tempo os outros componentes da formulação foram adicionados, exceto o carbonato, sendo que após a adição de cada um, a mistura ficou sob agitação durante 5 minutos (1000 rpm). O volume foi completado com a água até que fosse atingido 2 L. Esse fluido foi então pesado em uma balança de lama, como a mostrada na Figura 14, para que fosse determinada a quantidade de carbonato necessária para se alcançar a densidade desejada. O carbonato foi adicionado ao fluido sob agitação constante, o fluido continuou sendo agitado durante 15 minutos ao final.



**Figura 14.** Balança de lama.

### 3.2.2 Reologia

Para determinar  $K$  e  $n$ , índice de consistência e índice de comportamento do fluido respectivamente, foi feito um ensaio reológico em um viscosímetro FANN 35A, equipamento mostrado nas Figuras 15 e 16. Os modelos de rotor, bob e mola de torção utilizados foram R1, B1 e F1, respectivamente. Para fluidos pseudoplásticos  $n < 1$ , e para dilatantes  $n > 1$ . Os fluidos newtonianos apresentam  $n = 1$ .



**Figura 15.** Viscosímetro FANN 35A.



**Figura 16.** Viscosímetro FANN 35A em detalhes.

Para a realização dos experimentos, inicialmente, o fluido foi agitado durante 15 minutos em um misturador *Hamilton Beach* de 1,5 hp. Após a agitação, o fluido foi transferido para o copo do viscosímetro, que foi elevado até o fluido atingir o nível necessário, determinado no cilindro externo. Se necessário, pode-se regular a temperatura desejada para o fluido. Feito isso, o viscosímetro foi ligado, inicialmente na velocidade de 3 rotações por minuto (rpm), a leitura do ângulo de deflexão foi feita em triplicata e uma média entre os valores pôde ser obtida, chamada de L3. Esse procedimento foi repetido para as outras velocidades utilizadas, 6 rpm (L6), 100 rpm (L100), 200 rpm (L200), 300 rpm (L300) e 600 rpm (L600).

A partir da velocidade de rotação e do ângulo de deflexão lido, pôde-se calcular a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação de acordo com as Equações 33 e 34, retiradas do manual do equipamento.

$$\tau = k_1 \cdot k_2 \cdot \theta, \quad (33)$$

$$\gamma = k_3 \cdot N, \quad (34)$$

sendo,  $\tau$  (dina/cm<sup>2</sup>) a tensão de cisalhamento,  $\gamma$  (s<sup>-1</sup>) a taxa de deformação,  $\theta$  o ângulo de deflexão lido no equipamento,  $N$  (rpm) a velocidade de rotação imposta ao sistema e  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  as constantes do equipamento. As constantes do equipamento,  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ , dispostas na

Tabela 7, estão disponíveis no manual do fabricante e dependem do modelo do rotor, bob e mola de torção utilizados.

**Tabela 7.** Constantes do viscosímetro FANN 35A.

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

Obtidos os valores para tensão e taxa de deformação, eles foram implementados no programa ORIGIN® 8.5.1, no qual os dados experimentais foram ajustados ao modelo *Power Law* para obter os parâmetros reológicos  $K$  e  $n$ .

Outras propriedades reológicas obtidas foram: força gel, viscosidade plástica, viscosidade aparente e limite de escoamento do fluido. Esses testes são feitos porque no momento em que a circulação de fluido no poço é interrompida, para operações de manobra, os cascalhos podem sedimentar obstruindo a broca, os fluidos de perfuração são projetados com uma propriedade importante que minimiza esse problema. O fluido possui uma característica tixotrópica, isto é, adquire um estado semirrígido quando está em repouso. Sua viscosidade aumenta quando diminui o seu movimento. Quando sua circulação para, ele forma um gel espesso que mantém os cascalhos da rocha em suspensão e evita que eles sedimentem no poço. Quando o fluido começa a circular novamente, ele se torna menos viscoso e volta à forma líquida anterior.

No entanto, não é bom que esse gel seja muito consistente (com uma viscosidade muito alta), pois para que o fluido volte a circular será necessário aplicar uma pressão muito alta, o que pode fraturar a rocha. Os resultados de força gel mostram o quanto esse fluido vai ter sua viscosidade aumentada. A força gel inicial mede a resistência inicial para colocar o fluido em fluxo. A força gel final mede a resistência do fluido para reiniciar o fluxo quando este fica durante certo tempo em repouso.

Os experimentos para determinação da força gel foram feitos seguindo a metodologia a seguir. Para obter a força gel inicial o fluido foi colocado sob uma rotação de 600 rpm durante 1 minuto no viscosímetro FANN 35A, após esse tempo o fluido foi deixado em repouso por 10 segundos e logo depois, colocado sob uma rotação de 3 rpm, leu-se o pico que o ângulo de deflexão alcançou. Para obter a força gel final e gel 30 o procedimento foi semelhante ao anterior, no entanto o fluido foi deixado em repouso durante 10 e 30 minutos, respectivamente. A Tabela 8 mostra o esquema de obtenção da força gel. As outras propriedades são obtidas como mostrado na Tabela 9.

**Tabela 8.** Procedimento experimental para obtenção da força gel.

Experimento	Tempo (s)		3 rpm
	600 rpm	Repouso	
Gel <sub>inicial</sub>	60	10	Leitura do pico no ângulo de deflexão
Gel <sub>final</sub>	60	600	Leitura do pico no ângulo de deflexão
Gel <sub>30</sub>	60	1800	Leitura do pico no ângulo de deflexão

**Tabela 9.** Equações utilizadas para obter propriedades reológicas do fluido.

Propriedade	Equação	Número	Unidade	Significado
Viscosidade plástica	$VP = L600 - L300$	35	cP	Medida indicativa da resistência interna de um fluido à sua própria movimentação.
Viscosidade aparente	$VA = \frac{L600}{2}$	36	cP	Indica a viscosidade do fluido.
Limite de escoamento	$LE = L300 - VP$	37	lb/100 ft <sup>2</sup>	Representa o esforço requerido para iniciar um fluido em movimento.

### 3.2.3 Densidade e pH

A densidade dos fluidos foi determinada experimentalmente com o auxílio de uma balança de lama (Figura 14) e também por picnometria, utilizando um balão volumétrico de 10 ml (Figura 17), de acordo com o seguinte procedimento, feito em triplicata. Primeiramente aferiu-se a massa do balão vazio e posteriormente o balão foi preenchido com o fluido de interesse e a massa do balão cheio com o fluido foi obtida. Com os dados experimentais, a densidade do fluido foi calculada através da Equação 39.

$$\rho = \frac{m_{b+f} - m_b}{V}, \quad (39)$$

sendo  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>) a densidade do fluido,  $m_{b+f}$  (g) a massa do balão preenchido com o fluido,  $m_b$  (g) a massa do balão vazio e  $V$  (cm<sup>3</sup>) o volume do balão volumétrico. O pH dos fluidos foi obtido diretamente a partir de um peagâmetro W3B.



**Figura 17.** Balão volumétrico de 10 ml.

### 3.2.4 Concentração de sólidos e fração volumétrica de sólidos

A determinação da concentração de sólidos e da fração volumétrica de sólidos nos fluidos de perfuração foi feita por gravimetria, utilizando formas de alumínio e seguindo o procedimento a seguir. Primeiramente aferiu-se a massa das formas de alumínio, depois a massa da forma contendo o fluido de perfuração, esta foi levada à estufa e deixou-se secar por 24 horas a 100 °C. Após a secagem do fluido obteve-se a massa da forma com os sólidos. O procedimento foi realizado em triplicata.

A concentração de sólidos em um determinado fluido foi definida como a massa de sólidos contida no volume total de fluido. Com os dados experimentais em mãos pôde-se calcular a concentração de sólidos através da Equação 40.

$$C_s = \frac{m_s}{V_f}, \quad (40)$$

sendo  $C_s$  (g/cm<sup>3</sup>) a concentração de sólidos,  $m_s$  (g) a massa de sólidos e  $V_f$  (cm<sup>3</sup>) o volume total de fluido.

A fração volumétrica de sólidos é definida como o volume de sólidos contido no volume total de fluido. A Equação 41 descreve essa relação.

$$s = \frac{V_s}{V_s + V_l}, \quad (41)$$

onde  $s$  é a fração volumétrica de sólidos,  $V_s$  (cm<sup>3</sup>) é o volume de sólidos e o  $V_l$  (cm<sup>3</sup>) é o volume de líquido. O volume de sólidos e o volume de líquido podem ser definidos pelas Equações 42 e 43.

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s}, \quad (42)$$

$$V_l = \frac{m_l}{\rho_l}, \quad (43)$$

sendo  $m_s$  (g) a massa de sólidos,  $\rho_s$  (g/cm<sup>3</sup>) a densidade dos sólidos,  $m_l$  (g) a massa de líquido e  $\rho_l$  (g/cm<sup>3</sup>) a densidade do líquido. Substituindo as Equações 42 e 43 na Equação 41 chega-se a Equação 44, que foi utilizada na determinação da fração volumétrica de sólidos, utilizando os dados experimentais.

$$s = \frac{\frac{m_s}{\rho_s}}{\frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_l}{\rho_l}}, \quad (44)$$

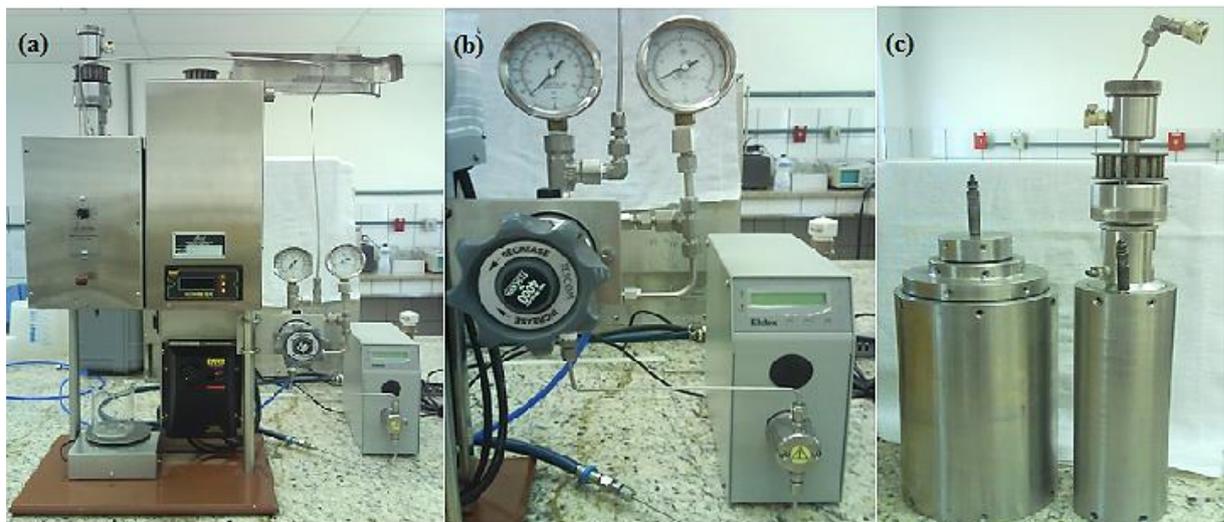
A Figura 18 ilustra as formas de alumínio utilizadas nos experimentos, como exemplo, nelas está contido o fluido de perfuração base água, depois de seco na estufa.



**Figura 18.** Formas de alumínio com fluido de perfuração base água depois de seco (Triplicata).

### 3.2.5 Filtração

Os experimentos de filtração foram realizados em uma célula HTHP (*high temperature/high pressure*) produzida pela OFI Testing Equipments (OFITE). A Figura 19 ilustra o equipamento utilizado.



**Figura 19.** (a) Célula HTHP; (b) Sistema de pressurização; (c) Células de filtração de 900 cm<sup>3</sup> e de 250 cm<sup>3</sup>, respectivamente.

A célula padrão, produzida pela empresa, foi modificada para atender as necessidades do projeto. Entre as modificações, foi projetado um sistema que mantém a taxa de cisalhamento constante sobre toda a superfície do meio filtrante e um cilindro reservatório de fluido de maior capacidade, para operação com fluidos base óleo e emulsões, pois estes fluidos apresentam menores volumes de filtrado, quando comparados com fluidos base água.

A grande diferença desta célula para uma de teste convencional HTHP é que o fluido pode ser circulado enquanto o filtrado é recolhido, simulando a circulação de fluido no poço.

O equipamento visualizado na Figura 19(a) permite a acomodação, em momentos distintos, das duas células de filtração mostradas na Figura 19(c). As duas células foram utilizadas devido à diferença entre os dois fluidos usados nos experimentos, um base água e outro base óleo (emulsão). O fluido base água não oferece muita resistência à filtração, por isso foi usado na célula com capacidade para aproximadamente 250 cm<sup>3</sup>. Já o fluido base óleo (emulsão), quando usado na célula com capacidade para aproximadamente 250 cm<sup>3</sup>, apresentava uma baixa quantidade de filtrado, isso se dá pelo fato das gotículas de água emulsionadas obstruírem os poros do papel de filtro, formando uma espécie de torta interna que dificulta o escoamento do fluido pelo papel. Por isso, para esse tipo de fluido foi utilizada uma célula com capacidade maior, aproximadamente 900 cm<sup>3</sup>, pois a força imposta sobre o fluido a uma dada pressão é maior nesta célula do que na célula menor, promovendo uma filtração mais rápida.

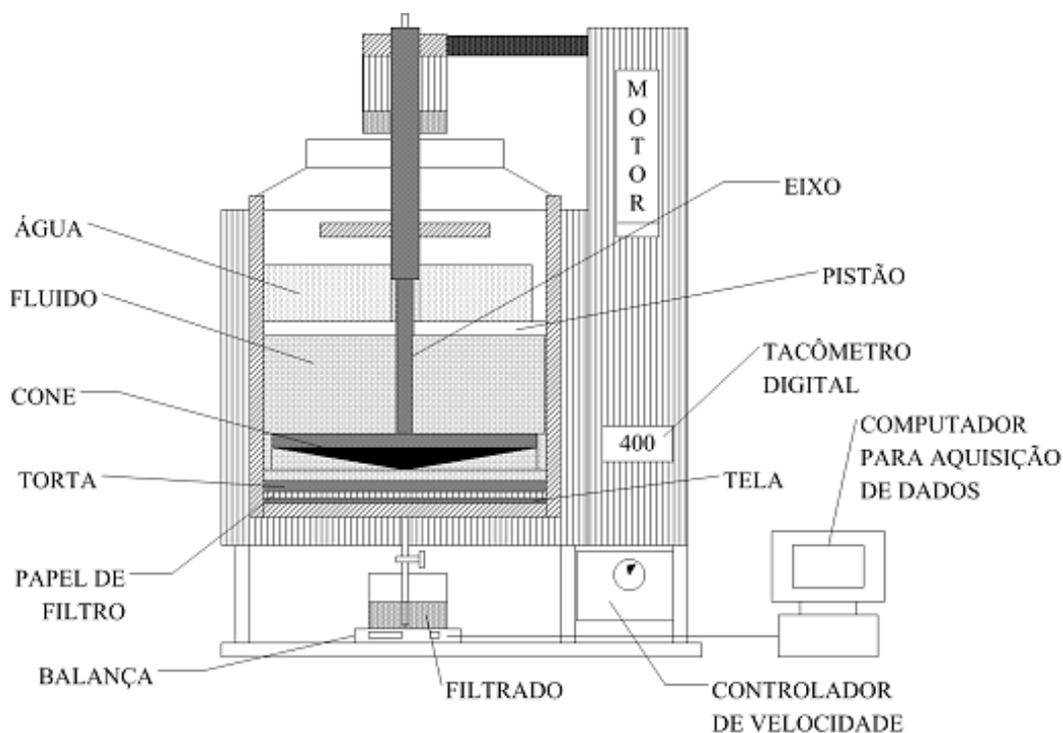
A célula de filtração possui um eixo comandado por um motor de ½ hp e de velocidade variável, onde é possível acoplar um sistema de agitação ou um cone que irá possibilitar o cisalhamento da torta formada. A velocidade do sistema pode variar de 20 a 2740 rpm (sob nenhuma tensão) impondo um escoamento laminar ou turbulento ao fluido dentro da célula. A potência é transmitida ao eixo de agitação por uma correia dentada e polias.

Embora a configuração do sistema não seja a mesma do poço, os experimentos permitem um maior controle da pressão e especificação da taxa de cisalhamento. Isso permite que a célula realize medidas das propriedades de filtração sob diferentes condições dinâmicas, assemelhando-se as condições reais de operação do processo de perfuração de poços de petróleo. Os experimentos realizados nesta célula de filtração possibilitam a determinação de parâmetros de filtração e invasão de fluidos de perfuração em meios porosos.

O meio filtrante pode ser papel de filtro ou amostra de rocha reservatório de 1,0 in de espessura. Estes se encaixam no fundo da célula, apoiados sobre uma tela. Acima do meio filtrante está o cilindro reservatório com o fluido de perfuração a ser testado. Isolada do compartimento de fluido por um pistão e com anéis de vedação no eixo central da célula, localiza-se a câmara de água. Esta câmara é conectada a uma bomba externa com um controlador digital e é utilizada para aplicar a pressão desejada ao fluido de perfuração. Na Figura 19(b) é apresentada a bomba externa utilizada na pressurização da célula de filtração.

Acima do meio filtrante e no interior do cilindro reservatório, imerso no fluido, está o cone, ligado ao eixo. Este é responsável por impor taxas de cisalhamento de até 600 s<sup>-1</sup> e promover o cisalhamento da torta. O cone é recuado em aproximadamente 3 mm do meio filtrante para proporcionar espaço suficiente para o crescimento da torta. O desenho esquemático da célula de filtração, descrita anteriormente, é ilustrado na Figura 20.

Os experimentos de filtração foram feitos seguindo a metodologia descrita a seguir. Primeiramente o fluido foi agitado em um misturador *Hamilton Beach* de 1,5 hp, foi transferido para o compartimento inferior da célula e então foram encaixados o papel de filtro e válvula de saída de filtrado. A bomba foi ligada, para que a água fosse bombeada e exercesse a pressão desejada e quando necessário, foram impostas as taxas de cisalhamento através da rotação do cone encaixado ao eixo central da célula, o tacômetro digital mostra a velocidade de rotação do cone. Quando as condições experimentais desejadas foram alcançadas, deu-se início ao funcionamento do *software* de aquisição de dados, juntamente com a abertura da válvula de saída de filtrado. O filtrado foi recolhido no béquer, logo abaixo da válvula, a massa de filtrado foi convertida em volume pelo *software*, que forneceu um gráfico de volume de filtrado por tempo de filtração.



**Figura 20.** Desenho esquemático da célula de filtração.

Os dados experimentais foram utilizados para dar início aos cálculos dos parâmetros da torta de filtração, feitos no programa *Excel*. No fim do experimento, a torta foi retirada da célula, juntamente com o papel de filtro, foi pesada e sua espessura foi medida com o auxílio de uma régua em micro escala.

### 3.2.6 Experimentos de filtração estática

Para a determinação dos parâmetros de filtração (permeabilidade, porosidade, espessura e índice de compressibilidade da torta) foram realizados experimentos de filtração estática na célula de filtração HTHP, utilizando o procedimento descrito anteriormente, porém nenhuma taxa de cisalhamento foi imposta ao fluido nesses experimentos.

Os experimentos de filtração estática foram reproduzidos em triplicata, para todos os fluidos. Utilizou-se apenas papel de filtro como meio filtrante, pois o objetivo deste trabalho foi estudar as características de formação da torta de filtração e não a interação rocha-fluido, caso fossem utilizados exemplares de rochas, o fenômeno de interação poderia interferir no estudo detalhado da torta de filtração.

Os experimentos foram iniciados com uma corrida de 30 minutos, a pressão aplicada no sistema foi de 500 psi e cisalhamento zero. Nos 30 minutos finais aplicou-se uma pressão de 1000 psi e cisalhamento zero. A Tabela 10 resume as condições operacionais para os experimentos de filtração estática.

**Tabela 10.** Condições operacionais dos experimentos para determinação dos parâmetros da torta de filtração – Filtração estática.

Filtração estática		
Experimento 1 (Triplicata)		
Condições operacionais	Tempo (min)	
	0 - 30	30 - 60
Pressão (psi)	500	1000
Rotação (rpm)	0	0

Para cada um desses experimentos foram obtidos os dados referentes ao filtrado e a torta de filtração formada. Sendo eles: volume total de filtrado, massa da torta úmida, massa da torta seca e espessura da torta. As condições aplicadas ao sistema permitiram a obtenção do *slowness*, conforme a metodologia utilizada por Dewan e Chenevert (2001).

Os parâmetros da torta de filtração foram obtidos utilizando o modelo proposto por Dewan e Chenevert (2001). A Tabela 11 apresenta os parâmetros que foram determinados, bem como as equações que foram utilizadas.

**Tabela 11.** Parâmetros a serem determinados e equações utilizadas – Filtração estática.

Parâmetro da torta de filtração	Equação	Número
Permeabilidade de referência ( $K_{mc0}$ )	$K_{mc0} = 14700 \frac{m\mu s}{P^{(1-\nu)} \left( 1 - s - \frac{\Phi_{mc0}}{P\delta\nu} \right)}$	5
Porosidade de referência ( $\phi_{mc0}$ )	$\phi_{mc0} = \frac{\alpha}{\alpha + \frac{\rho_f}{\rho_s}}$	9
Espessura da torta ( $T_{mc}$ )	$T_{mc0} = \frac{P_{molhado}}{A(1 - \Phi_{mc0})\rho_s}$	11
Índice de compressibilidade ( $\nu$ )	$\nu = 1 - \frac{\log S_1/S_2}{\log P_2/P_1}$	13

### 3.2.7 Experimentos de filtração dinâmica

Para estimar os parâmetros de resistência da torta ao cisalhamento e o fator de fricção da torta, foram realizados dois experimentos de filtração dinâmica para cada fluido, utilizando papel de filtro como meio filtrante. Esses experimentos consideram a erosão da torta de filtração formada, através da taxa de cisalhamento imposta ao sistema.

No experimento 2 aplicou-se uma pressão de 500 psi e uma velocidade de rotação do cone de 320 rpm, no experimento 3 utilizou-se uma pressão de 1000 psi e uma velocidade de rotação do cone de 580 rpm. Isso foi repetido para cada fluido utilizado, o tempo total de cada experimento foi de 1 hora. A Tabela 12 apresenta as condições operacionais dos experimentos.

**Tabela 12.** Condições operacionais dos experimentos para estimação dos parâmetros da torta de filtração – Filtração dinâmica.

Filtração dinâmica		
Condições operacionais	Tempo (min)	
	0 – 60	
	Experimento 2	Experimento 3
Pressão (psi)	500	1000
Rotação do cone (rpm)	320	580

Os dados experimentais obtidos foram: volume total de filtrado, massa da torta úmida, massa da torta seca e espessura da torta. A Tabela 13 apresenta os parâmetros que foram obtidos e as respectivas equações que foram utilizadas.

**Tabela 13.** Parâmetros a serem determinados e equações utilizadas – Filtração dinâmica.

Parâmetro	Equação	Número
Porosidade de referência ( $\phi_{mc0}$ )	$\phi_{mc0} = \frac{\alpha}{\alpha + \frac{\rho_f}{\rho_s}}$	9
Espessura da torta ( $T_{mc}$ )	$T_{mc} = \frac{P_{moldado}}{A(1 - \phi_{mc0})\rho_s}$	11
Taxa de deformação ( $\gamma$ )	$\gamma = \frac{2\pi n_r}{\tan\theta}$	15
Resistência da torta ao cisalhamento ( $\tau_{mc0}$ )	$K\gamma_i^n = \tau_{mc0} + 68950f_e P_{mci} \left(\frac{d_m}{T_{mci}}\right)^{\frac{1}{1-\nu}}$	19
Fator de fricção ( $f_e$ )		

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os fluidos foram caracterizados de acordo com sua reologia, densidade, pH, concentração de sólidos e fração volumétrica de sólidos. Após a caracterização, foram realizados experimentos de filtração para a determinação dos parâmetros da torta de filtração e estudo do fator de fricção da torta, utilizando o equacionamento proposto por Dewan e Chenevert (2001). Foram aplicadas as equações mostradas por Nishaboori (2005) para prever o crescimento da torta e o fluxo da invasão de filtrado durante o tempo de filtração. Os experimentos foram conduzidos em uma célula de filtração HTHP (*high temperature/high pressure*) e foi utilizado papel de filtro como meio filtrante. A modelagem da filtração foi feita com o auxílio do *software* MATLAB®.

#### 4.1 Reologia

A reologia dos fluidos foi obtida através de experimentos utilizando um viscosímetro FANN 35A. Preencheu-se o copo do equipamento com aproximadamente 350 ml de fluido e foram aplicadas diferentes velocidades de rotação ao sistema (3, 6, 100, 200, 300 e 600 rpm). Os valores do ângulo de deflexão, lidos em triplicata, para cada uma das velocidades impostas estão apresentados na Tabela 31 (Anexo 1). Aplicando as Equações 33 e 34, obtiveram-se os valores para tensão de cisalhamento e taxa de deformação do fluido.

A Figura 21 ilustra a variação da taxa de deformação com a tensão de cisalhamento imposta pelo fluido. Os dados experimentais foram ajustados ao modelo *Power Law*, para obter os valores de  $K$  e  $n$ , índice de consistência e índice de comportamento do fluido, respectivamente. Os resultados foram obtidos utilizando o *software* ORIGIN® 8.5.1.

Os valores obtidos para o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e para os parâmetros do modelo *Power Law* estão dispostos na Tabela 14.

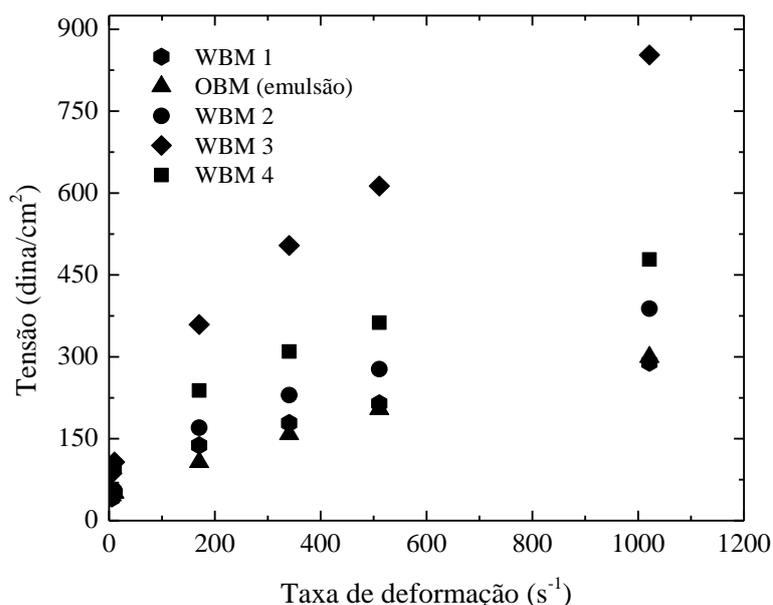


Figura 21. Tensão *versus* taxa de deformação dos fluidos.

**Tabela 14.** Dados reológicos obtidos para o ajuste dos dados experimentais ao modelo *Power Law*.

Modelo <i>Power Law</i>	Fluido				
	WBM 1	OBM (emulsão)	WBM 2	WBM 3	WBM 4
$R^2$	0,9936	0,9045	0,9922	0,9958	0,9963
$K$ (dina/cm <sup>2</sup> s <sup>-n</sup> )	21,54	23,72	22,36	40,69	35,96
$N$	0,3681	0,3391	0,4039	0,4335	0,3719

O modelo *Power Law* foi escolhido, porque possibilitava trabalhar com apenas dois parâmetros e não com três, como seria no caso do modelo de Herschel-Bulkley. A escolha foi aceita, visto que os valores para  $R^2$  foram satisfatórios. Pela Figura 21 é possível comparar o comportamento reológico para os fluidos base água, com os valores de  $K$ , mostrados na Tabela 14, notou-se que quanto maior o índice de consistência do fluido ( $K$ ) maior a tensão que ele exerce.

As outras propriedades reológicas obtidas foram: força gel, viscosidade plástica, viscosidade aparente e limite de escoamento do fluido. Os valores para  $G_{l_{inicial}}$ ,  $G_{l_{final}}$  e  $G_{l_{30}}$  são obtidos diretamente pelo valor do ângulo lido no viscosímetro FANN 35A. Os valores de viscosidade plástica e aparente e do limite de escoamento do fluido foram calculados a partir das Equações 35 a 37. Os resultados estão apresentados na Tabela 15.

**Tabela 15.** Dados reológicos de força gel.

Força Gel	Unidade	Fluido				
		WBM 1	OBM (emulsão)	WBM 2	WBM 3	WBM 4
$G_{l_{inicial}}$	lbf/100ft <sup>2</sup>	10	12	9	20	19
$G_{l_{final}}$	lbf/100ft <sup>2</sup>	13	21	14	36	25
$G_{l_{30}}$	lbf/100ft <sup>2</sup>	14	25	15	45	30
Viscosidade plástica	cP	14,67	18,67	23,00	47,00	22,67
Limite de escoamento	cP	27,33	21,33	31,33	73,00	48,33
Viscosidade aparente	cP	28,33	29,33	38,00	83,50	46,83

As medidas experimentais dos géis ( $G_{l_{inicial}}$ ,  $G_{l_{final}}$  e  $G_{l_{30}}$ ) permitiram verificar se o fluido formaria um gel progressivo ou não quando ficasse parado dentro do poço, isso ocorre durante uma parada na sua circulação para operações de manobra. Todos os fluidos mostraram bons resultados, isso pode ser dito, pois os valores dos géis não foram drasticamente alterados de uma medida para outra, principalmente quando se compara  $G_{l_{final}}$  e  $G_{30}$ . Seria aceitável dizer que o fluido formou um gel progressivo caso o valor do  $G_{30}$  fosse o dobro do valor do  $G_{l_{final}}$ .

Um gel progressivo não é um bom resultado, pois isso mostra que para o fluido voltar a circular no poço, após certo tempo em repouso, seria necessário aplicar uma energia muito alta, que pode gerar uma pressão muito alta do fluido contra a parede do poço, podendo causar fraturas na rocha.

## 4.2 Densidade e pH

A densidade dos fluidos foi obtida por dois procedimentos. O primeiro foi utilizando uma balança de lama, da qual se obteve diretamente a densidade do fluido. Outro método foi realizado com o auxílio de um balão volumétrico de 10 ml (picnometria). Primeiramente, aferiu-se a massa do balão vazio e depois a massa do balão preenchido com o fluido de interesse. Utilizando os dados experimentais e a Equação 39 foi possível determinar a densidade dos fluidos. As densidades obtidas ao final foram as mesmas utilizando os dois métodos. A determinação do pH foi feita diretamente utilizando um peagâmetro W3B. Os resultados são mostrados na Tabela 16.

**Tabela 16.** Densidade e pH dos fluidos.

	Fluido					
	WBM 1	OBM (emulsão)	WBM 2	WBM 3	WBM 4	
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Picnometria	1,40	1,52	1,08	1,46	1,08
	Balança de lama	1,40	1,52	1,08	1,46	1,08
pH	9,26	10,60	10,12	10,10	8,41	

Um pH aceitável para um fluido de perfuração é o que encontra-se em torno de 9,0 (alcalino), como mostrado pela Tabela 16 todos os fluidos ficaram dentro desta faixa de valor, mostrando pequenas variações. O pH é uma característica importante, pois através dele pode-se controlar a interação com as argilas reativas, a solubilidade e dispersibilidade de produtos, fazer um controle da corrosão e promover a preservação ambiental.

## 4.3 Concentração de sólidos e fração volumétrica de sólidos

Para a determinação da concentração de sólidos e da fração volumétrica de sólidos utilizou-se formas de alumínio com a massa previamente aferida. Os experimentos foram realizados em triplicata. A massa das formas contendo fluido foi aferida antes e depois de serem secas em estufa. Com os dados experimentais aplicados nas Equações 40 e 44 pôde-se obter a concentração de sólidos ( $C_s$ ) e a fração volumétrica de sólidos no fluido ( $s$ ), respectivamente.

Os resultados experimentais obtidos são apresentados na Tabela 32 (Anexo 1) e a Tabela 17 apresenta os valores médios obtidos para a fração volumétrica de sólidos e a concentração de sólidos nos fluidos.

**Tabela 17.** Concentração de sólidos e fração volumétrica de sólidos nos fluidos.

	Fluido				
	WBM 1	OBM (emulsão)	WBM 2	WBM 3	WBM 4
$C_s$ (g/l)	518,29	745,51	150,73	528,27	146,93
$s$	0,18	0,18	0,06	0,27	0,06

Foi possível notar nos resultados, de acordo com o que foi planejado, que os fluidos WBM 2 e WBM 3 possuem diferentes quantidades de sólidos (carbonato) entre si e o WBM 4 possui a mesma quantidade de carbonato que WBM 2, no entanto tem a metade da quantidade de amido do mesmo. Essas características diferenciadas entre esses 3 fluidos tornou possível verificar as propriedades que mais influenciaram na estimação do fator de fricção da torta de filtração.

#### 4.4 Filtração

Como resultado dos experimentos realizados obteve-se a curva de filtração dos fluidos (volume de filtrado por tempo de filtração). Para isso, a massa de filtrado, em gramas, foi convertida para volume, considerando a densidade do filtrado igual a  $1,0 \text{ g/cm}^3$ , esse procedimento foi feito pelo próprio *software*. Para a obtenção do *slowness*, definido por Dewan e Chenevert (2001) como “o tempo para que o filtrado percorra 1,0 cm através do meio filtrante (torta de filtração ou rocha)”, utilizou-se a Equação 12, gerando a curva de *slowness* por tempo de filtração.

Para a realização dos experimentos com WBM a célula de filtração com menor volume ( $250 \text{ cm}^3$ ) foi utilizada e para os experimentos com OBM (emulsão), utilizou-se a célula com maior volume ( $900 \text{ cm}^3$ ). A Tabela 18 apresenta os valores das propriedades obtidas previamente e que foram necessárias para de determinação dos parâmetros de filtração.

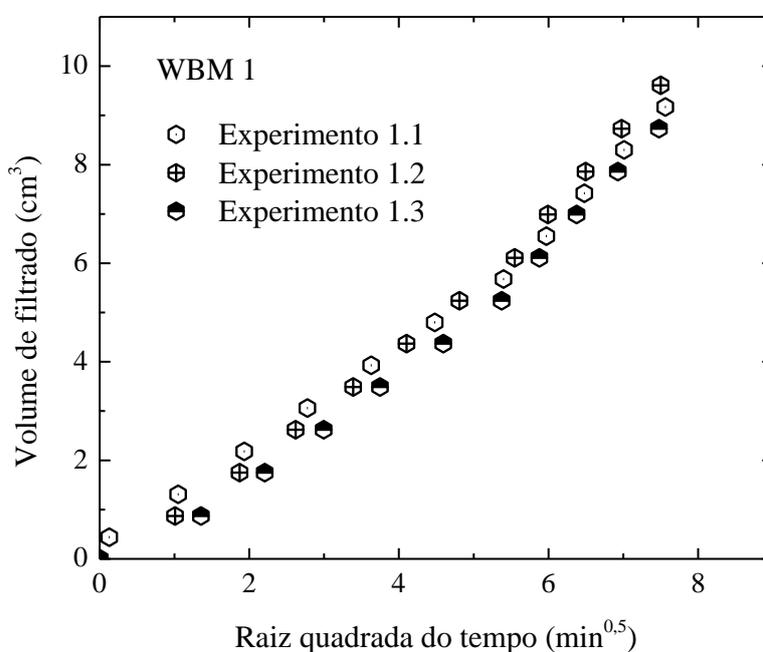
**Tabela 18.** Propriedades utilizadas na determinação dos parâmetros de filtração.

Propriedade	WBM Célula de $250 \text{ cm}^3$	OBM (emulsão) Célula de $900 \text{ cm}^3$
Diâmetro do meio filtrante (cm)	6,35	11,30
Área de filtração ( $\text{cm}^2$ )	31,65	100,29
Massa do papel de filtro seco (g)	0,33	1,10
Massa do papel de filtro úmido (g)	0,70	3,43
$\rho_{\text{sólidos}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,65	2,65
$\rho_{\text{filtrado}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,00	1,00
$\mu_{\text{filtrado}} \text{ (cP)}$	1,00	1,00

Primeiramente, serão apresentados os resultados para todos os fluidos utilizados neste trabalho: curvas de filtração, curvas de *slowness* e os parâmetros da torta de filtração. Com o objetivo de se obter uma comparação entre resultados experimentais e entre os parâmetros obtidos para fluidos com composições base diferentes, foram utilizados os fluidos WBM 1 e OBM (emulsão), cedidos pelo Cenpes/Petrobras. Os demais fluidos (WBM 2, WBM 3 e WBM 4), preparados no LEF, foram utilizados na investigação do fator de fricção da torta, para verificar quais os fatores que mais influenciaram na sua estimação.

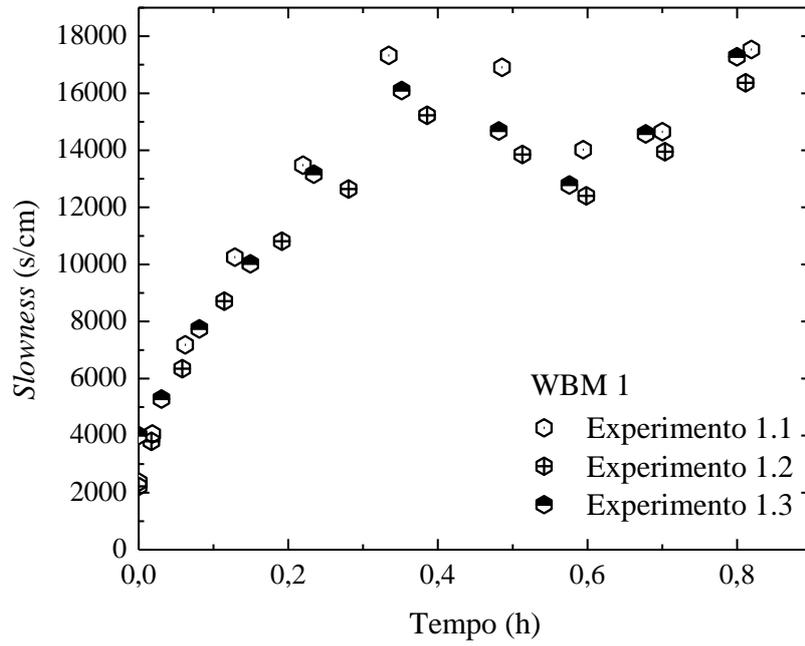
#### 4.4.1 Experimentos de filtração estática

Os experimentos de filtração estática tiveram duração de uma hora e foram realizados em triplicata. Nos primeiros 30 minutos, foi aplicada uma pressão de 500 psi e posteriormente a pressão foi de 1000 psi. Não foi imposta nenhuma taxa de cisalhamento, dessa forma não ocorreu o fenômeno de erosão da torta de filtração (Tabela 10). Nas Tabelas 33 a 37 (Anexo 2) encontram-se os dados de volume de filtrado por tempo de filtração, que foram fornecidos pelo sistema de aquisição de dados acoplado a célula e o *slowness* calculado de acordo com a Equação 12. As Figuras 22 a 31 apresentam as curvas obtidas: curvas de filtração e de *slowness*.

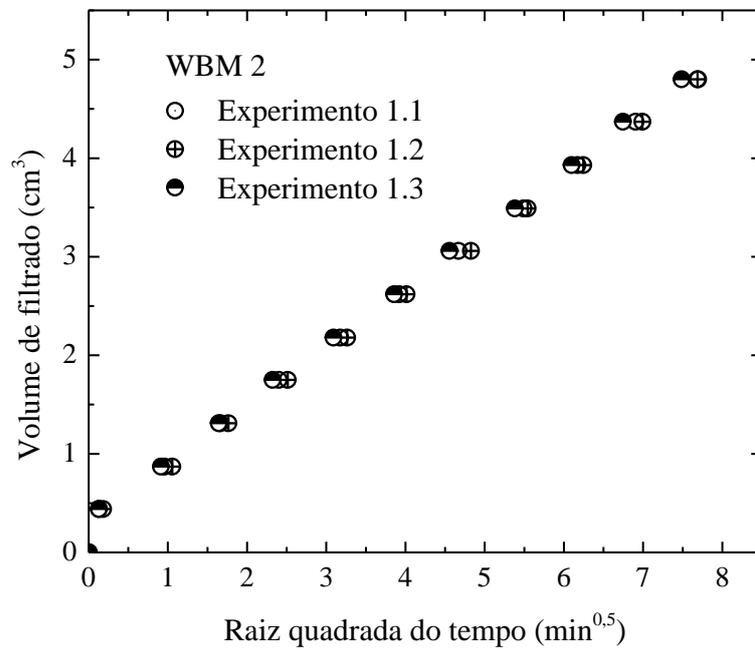


**Figura 22.** Curvas de filtração estática – Triplicata WBM 1.

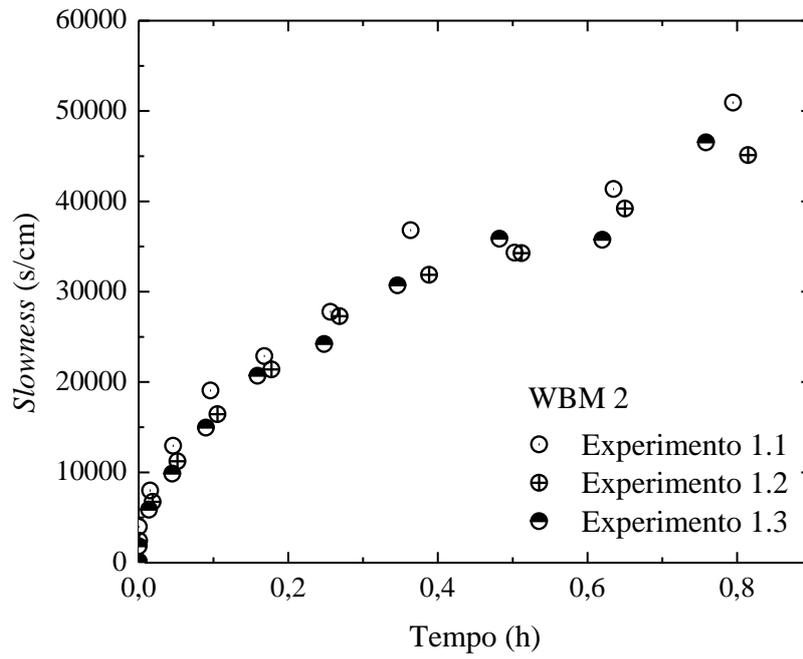
Utilizando a raiz quadrada do tempo é possível observar uma leve mudança na inclinação da curva de filtração quando a pressão é aumentada de 500 para 1000 psi, com aproximadamente 30 minutos de experimento. No entanto, plotando a curva de *slowness*, fica ainda mais visível essa variação na pressão do sistema.



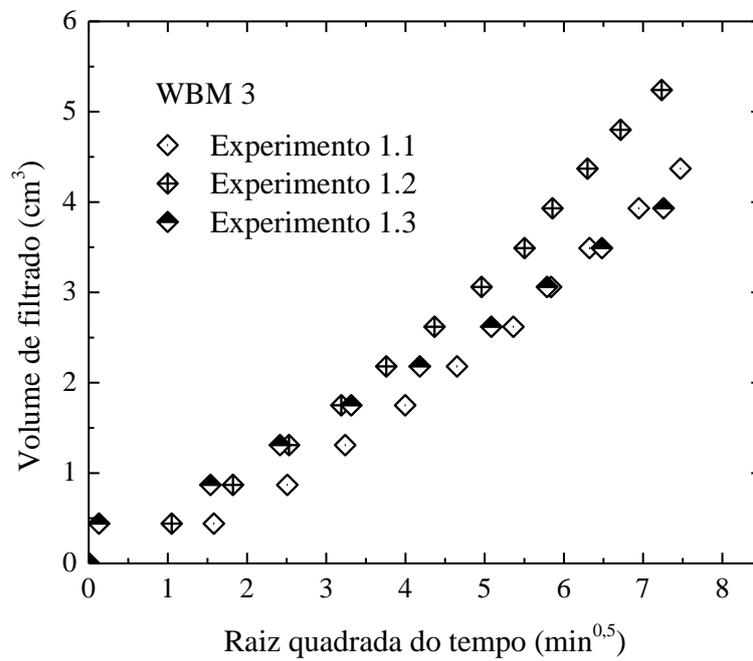
**Figura 23.** Curvas de *slowness* – Triplicata WBM 1.



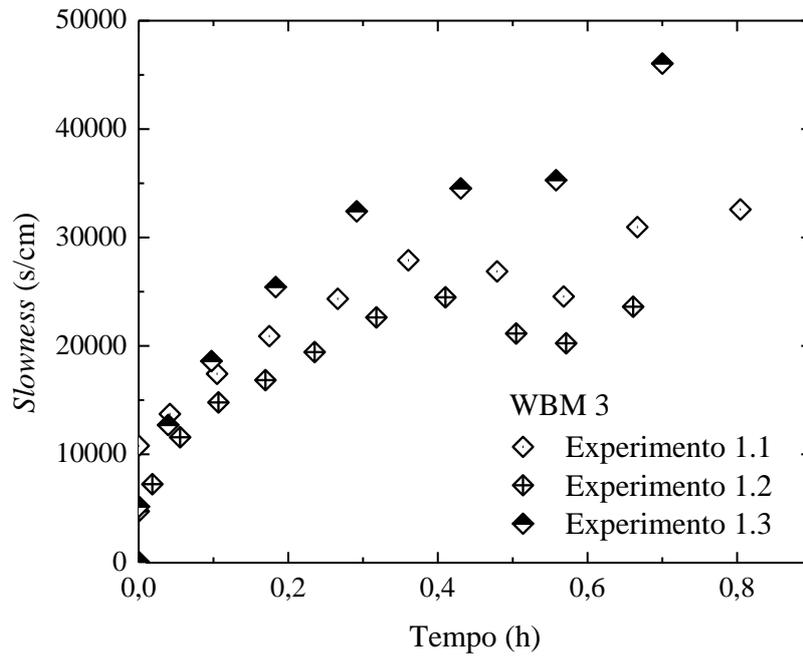
**Figura 24.** Curvas de filtração estática – Triplicata WBM 2.



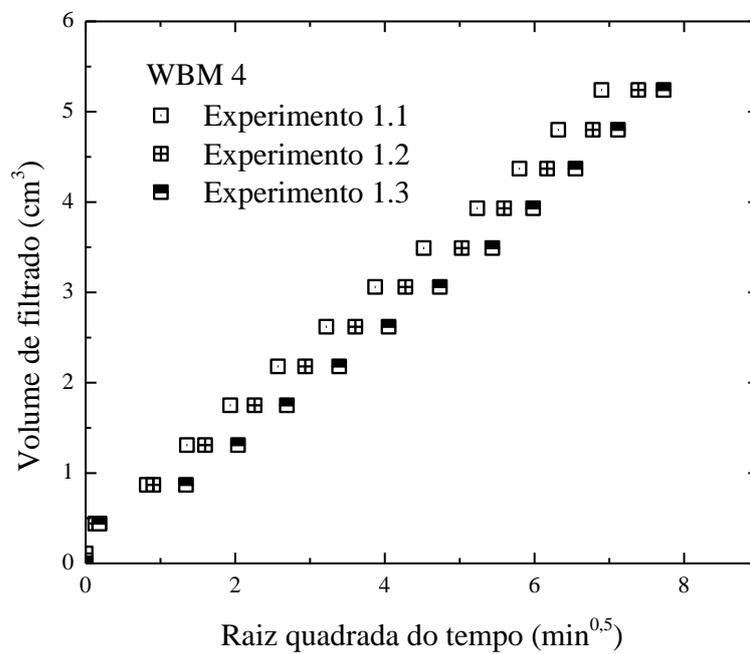
**Figura 25.** Curvas de *slowness* – WBM 2.



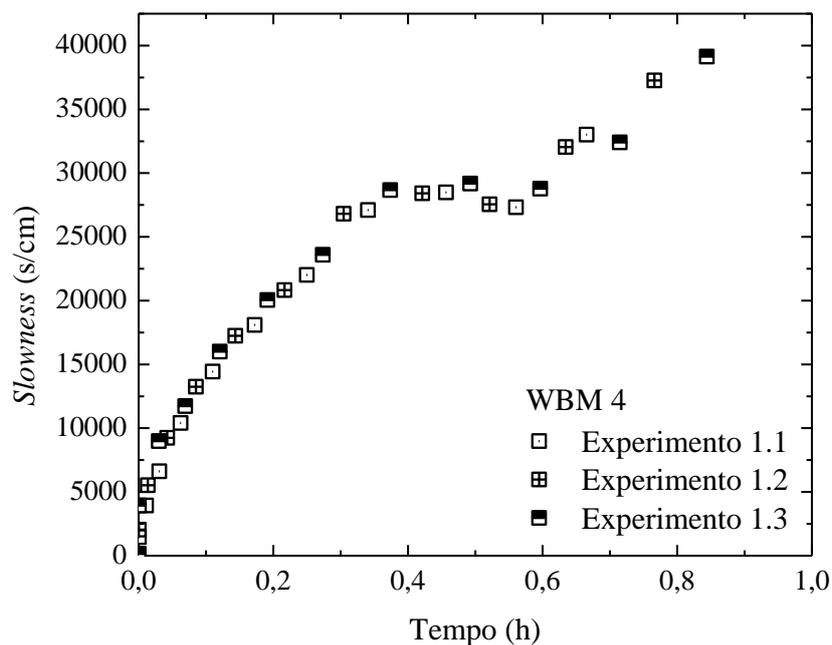
**Figura 26.** Curvas de filtração estática – Triplicata WBM 3.



**Figura 27.** Curvas de *slowness* – WBM 3.



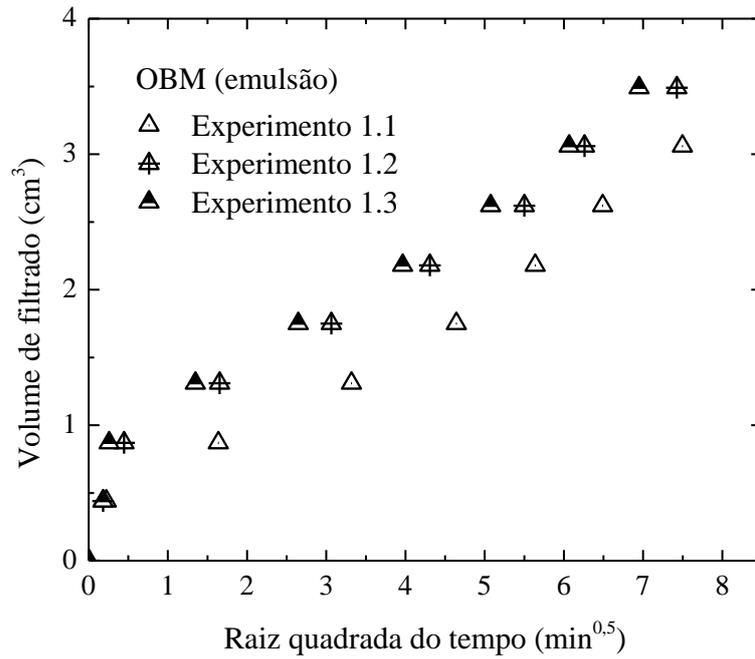
**Figura 28.** Curvas de filtração estática – Triplicata WBM 4.



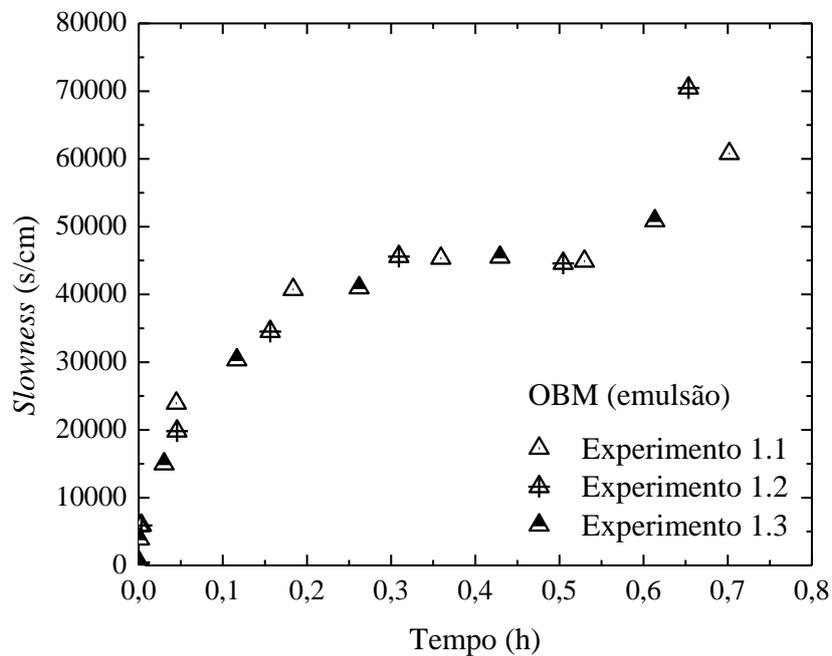
**Figura 29.** Curvas de *slowness* – WBM 4.

Nas Figura 23, 25, 27, 29 e 31 (curvas de *slowness*), notou-se que ao ser aplicada uma pressão maior, aproximadamente com 30 minutos de experimento, ocorreu uma queda no valor do *slowness*, isso aconteceu, pois ao pressurizar a célula, a taxa de filtração aumenta, ou seja, o fluido demora menos tempo para atravessar 1,0 cm através do meio filtrante. É da curva de *slowness* que se obtêm também os valores de  $S_1$  e  $S_2$ , necessários no cálculo do índice de compressibilidade da torta (Equação 13).

Na Figura 30, o salto inicial no valor do volume de filtrado para OBM (emulsão) indica a ocorrência do *spurt loss*, que de acordo com Jiao e Sharma (1992), é neste momento que as partículas sólidas presentes no fluido invadem a formação e quando isso ocorre pode causar consequências como a redução da permeabilidade da rocha ou contaminação do reservatório. Este fenômeno é claramente observado experimentalmente, imediatamente após a abertura da válvula de saída de filtrado. A observação desse fenômeno também foi feita em outros trabalhos (Vaussard *et al.*, 1986; Jiao e Sharma, 1993b; Elkatatny *et al.*, 2012).



**Figura 30.** Curvas de filtração estática – OBM (emulsão).



**Figura 31.** Curvas de *slowness* – OBM (emulsão).

Os resultados experimentais obtidos para a torta de filtração foram: massa da torta úmida, massa da torta seca e espessura, esses dados são necessários para a determinação dos

parâmetros da mesma. A partir dos dados obtidos experimentalmente e através das equações listadas anteriormente na Tabela 11, foi possível calcular os parâmetros das tortas de filtração. De acordo com Dewan e Chenevert (2001), o valor padrão para o multiplicador delta ( $\delta$ ) é 0,10, portanto adotou-se este valor para os cálculos dos parâmetros. Os resultados para os parâmetros calculados a partir dos experimentos de filtração estática, em triplicata, estão dispostos nas Tabelas 19 a 23.

**Tabela 19.** Parâmetros da torta resultante da filtração estática – Triplicata WBM 1.

Experimento	$\nu$	$\phi_{mc}$		$T_{mc}$ (cm)		$K_{mc}$ (md)	
		500 psi	1000 psi	Medida	Calculada	500 psi	1000 psi
1.1	0,34	0,47	0,46	0,10	0,07	$1,51 \times 10^{-4}$	$7,32 \times 10^{-5}$
1.2	0,32	0,45	0,44	0,10	0,07	$2,07 \times 10^{-4}$	$1,01 \times 10^{-4}$
1.3	0,29	0,43	0,43	0,10	0,08	$1,54 \times 10^{-4}$	$7,51 \times 10^{-5}$
Média	0,32	0,45	0,44	0,10	0,07	$1,54 \times 10^{-4}$	$7,51 \times 10^{-5}$
Desvio Padrão	0,03	0,02	0,02	0,00	0,01	$0,32 \times 10^{-4}$	$1,55 \times 10^{-5}$

**Tabela 20.** Parâmetros da torta resultante da filtração estática – Triplicata WBM 2.

Experimento	$\nu$	$\phi_{mc}$		$T_{mc}$ (cm)		$K_{mc}$ (md)	
		500 psi	1000 psi	Medida	Calculada	500 psi	1000 psi
1.1	0,76	0,51	0,48	0,10	0,06	$8,58 \times 10^{-6}$	$4,05 \times 10^{-6}$
1.2	0,76	0,52	0,50	0,10	0,06	$1,26 \times 10^{-5}$	$5,94 \times 10^{-6}$
1.3	0,73	0,51	0,49	0,10	0,06	$1,15 \times 10^{-5}$	$5,42 \times 10^{-6}$
Média	0,76	0,51	0,49	0,10	0,06	$1,15 \times 10^{-5}$	$5,42 \times 10^{-6}$
Desvio Padrão	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	$0,21 \times 10^{-5}$	$0,97 \times 10^{-6}$

**Tabela 21.** Parâmetros da torta resultante da filtração estática – Triplicata WBM 3.

Experimento	$\nu$	$\phi_{mc}$		$T_{mc}$ (cm)		$K_{mc}$ (md)	
		500 psi	1000 psi	Medida	Calculada	500 psi	1000 psi
1.1	0,37	0,37	0,36	0,20	0,18	$7,32 \times 10^{-5}$	$3,54 \times 10^{-5}$
1.2	0,34	0,37	0,36	0,20	0,19	$1,14 \times 10^{-4}$	$5,52 \times 10^{-5}$
1.3	0,34	0,39	0,38	0,20	0,16	$4,18 \times 10^{-5}$	$2,02 \times 10^{-5}$
Média	0,34	0,37	0,36	0,20	0,18	$7,32 \times 10^{-5}$	$3,54 \times 10^{-5}$
Desvio Padrão	0,02	0,01	0,01	0,00	0,02	$3,61 \times 10^{-5}$	$1,76 \times 10^{-5}$

**Tabela 22.** Parâmetros da torta resultante da filtração estática – Triplicata WBM 4.

Experimento	$\nu$	$\phi_{mc}$		$T_{mc}$ (cm)		$K_{mc}$ (md)	
		500 psi	1000 psi	Medida	Calculada	500 psi	1000 psi
1.1	0,54	0,57	0,55	0,08	0,06	$1,59 \times 10^{-5}$	$7,54 \times 10^{-6}$
1.2	0,54	0,58	0,56	0,09	0,06	$1,31 \times 10^{-5}$	$6,18 \times 10^{-6}$
1.3	0,55	0,57	0,55	0,09	0,06	$1,53 \times 10^{-5}$	$7,21 \times 10^{-6}$
Média	0,54	0,57	0,55	0,09	0,06	$1,53 \times 10^{-5}$	$7,21 \times 10^{-6}$
Desvio Padrão	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	$0,15 \times 10^{-5}$	$0,71 \times 10^{-6}$

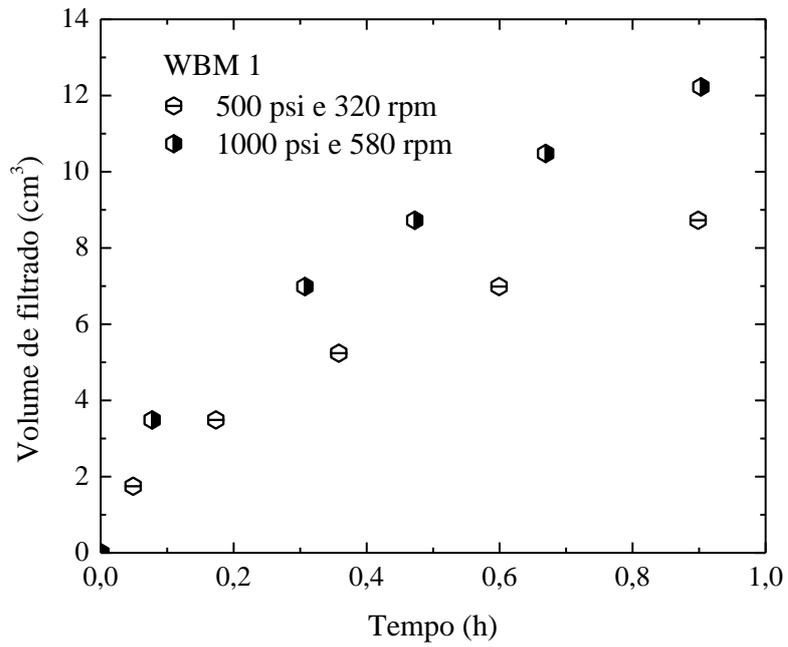
**Tabela 23.** Parâmetros da torta resultante da filtração estática – Triplicata OBM (emulsão).

Experimento	$\nu$	$\phi_{mc}$		$T_{mc}$ (cm)		$K_{mc}$ (md)	
		500 psi	1000 psi	Medida	Calculada	500 psi	1000 psi
1.1	0,64	0,44	0,42	0,28	0,63	$1,70 \times 10^{-5}$	$8,12 \times 10^{-6}$
1.2	0,67	0,42	0,40	0,30	0,69	$1,53 \times 10^{-5}$	$7,31 \times 10^{-6}$
1.3	0,68	0,42	0,40	0,28	0,66	$1,88 \times 10^{-5}$	$8,99 \times 10^{-6}$
Média	0,67	0,42	0,40	0,28	0,66	$1,70 \times 10^{-5}$	$8,12 \times 10^{-6}$
Desvio Padrão	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	$0,18 \times 10^{-5}$	$0,84 \times 10^{-6}$

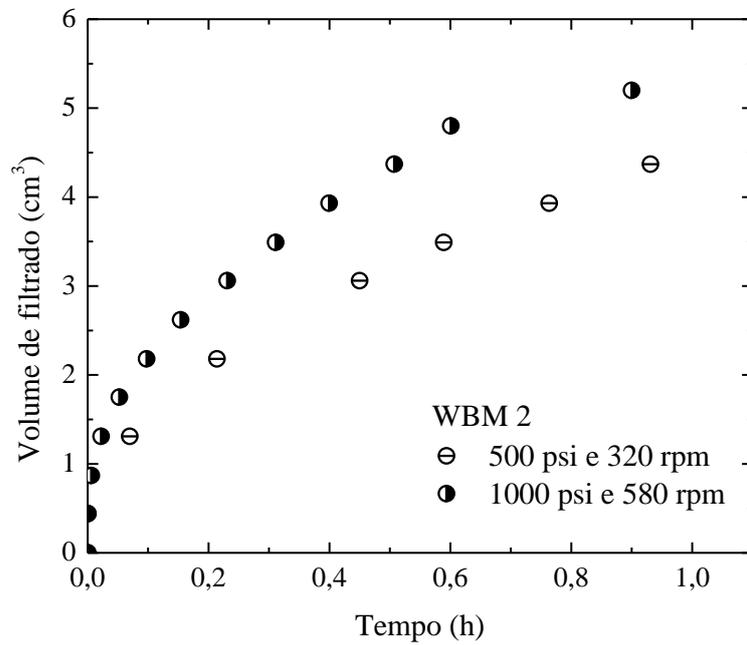
A partir da observação das curvas de filtração e *slowness* (Figuras 22 a 31) e dos parâmetros obtidos (Tabelas 19 a 23), concluiu-se que as triplicatas apresentaram resultados com boa reprodutibilidade. Na comparação entre espessura medida e calculada para a torta formada pelo OBM (emulsão) (Tabela 23) houve um erro considerável entre os valores. No trabalho realizado por Dewan e Chenevert (2001) a Equação 11, obtida a partir de um balanço de massa, foi aplicada somente para tortas formadas por fluidos base água, neste trabalho a aplicação de todo equacionamento foi estendida também para emulsão. É possível que o balanço de massa não seja a melhor forma para obter a espessura da torta para uma emulsão, mas também é preciso levar em consideração que podem ocorrer erros na medida experimental realizada. Diante disto, a Equação 20 também foi testada, essa equação aparece com a vantagem de fornecer dados de espessura da torta como função do tempo e não apenas a espessura final, como no caso da Equação 11. Resultados para a aplicação da Equação 20 serão mostrados na continuação deste trabalho.

#### 4.4.2 Experimentos de filtração dinâmica

Os experimentos de filtração dinâmica foram feitos com o objetivo de tornar possível a estimação dos parâmetros de resistência da torta ao cisalhamento e fator de fricção, considerando a erosão da torta formada. Os experimentos foram conduzidos utilizando papel de filtro como meio filtrante e tiveram 1 hora de duração. Para cada fluido foram realizados dois ensaios de acordo com as condições mostradas na Tabela 12. As Tabelas 38 a 42 (Anexo 2) mostram os dados de volume de filtrado por tempo de filtração para estes experimentos. As Figuras 32 a 36 apresentam as curvas obtidas sob diferentes condições de pressão e velocidade de rotação do cone.



**Figura 32.** Curvas de filtração dinâmica - WBM 1.



**Figura 33.** Curvas de filtração dinâmica - WBM 2.

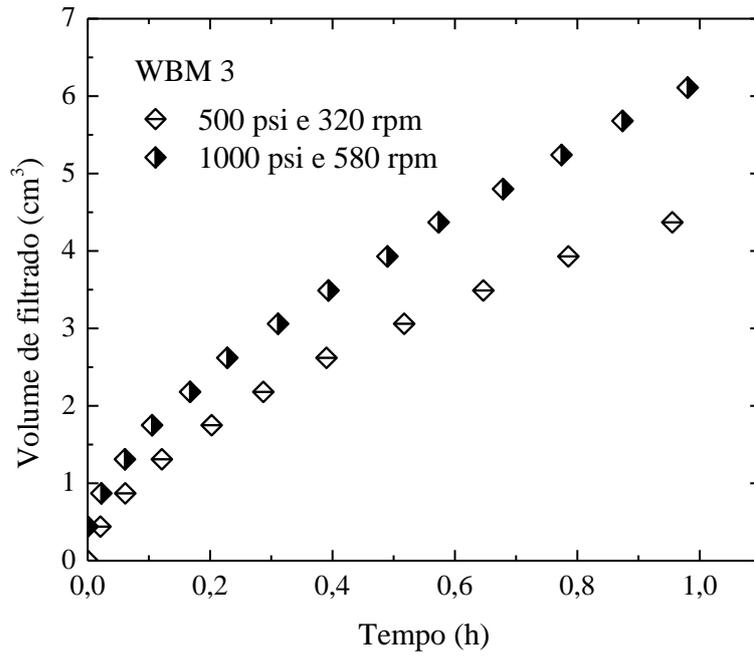


Figura 34. Curvas de filtração dinâmica - WBM 3.

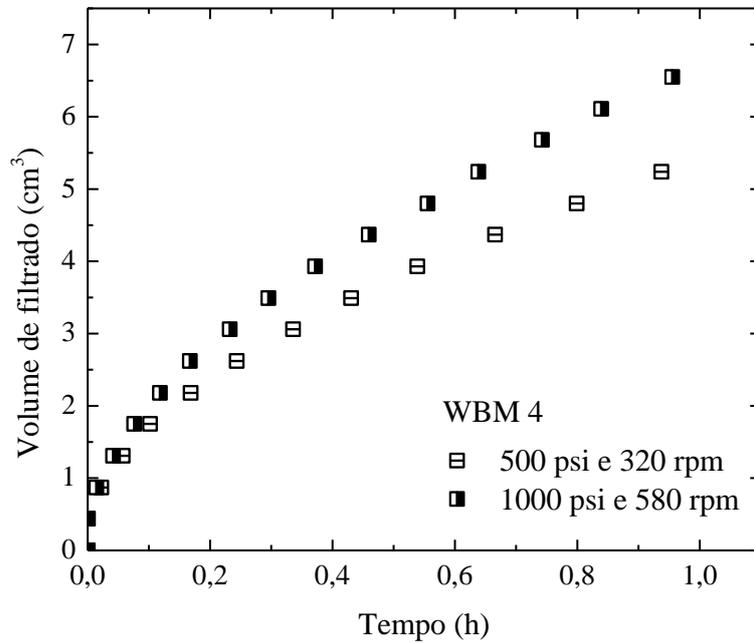
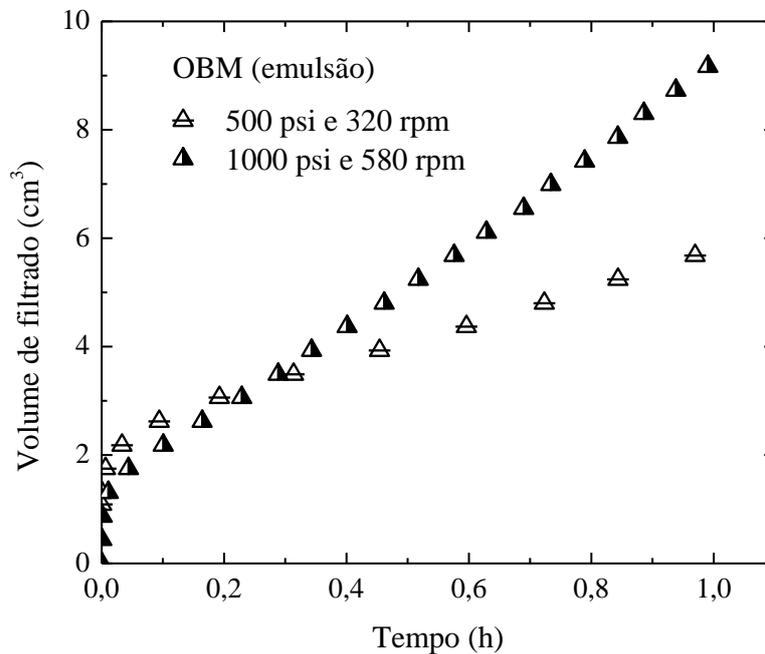


Figura 35. Curvas de filtração dinâmica - WBM 4.



**Figura 36.** Curvas de filtração dinâmica - OBM (emulsão).

Quando se compara as condições operacionais aplicadas (pressão e taxa de cisalhamento), notou-se que sob a condição de 580 rpm e 1000 psi gerou-se um maior volume de filtrado ao final do experimento. Isso ocorreu, pois altas taxas de cisalhamento impostas ao sistema introduzem o fenômeno conhecido como erosão da torta de filtração, o que permite que uma maior quantidade de filtrado passe pela mesma.

Nas curvas de filtração dinâmica para OBM (emulsão) (Figura 36) notou-se a ocorrência do *spurt loss* no início da filtração, esse fenômeno foi um pouco mais acentuado sob 500 psi e 320 rpm, aproximadamente  $1,00 \text{ cm}^3$  e sob 1000 psi e 580 rpm esse valor foi de aproximadamente  $0,80 \text{ cm}^3$ . Para os experimentos de filtração dinâmica não foram obtidas as curvas de *slowness*, pois não houve variação na pressão durante estes experimentos.

A partir dos dados coletados experimentalmente: massa da torta úmida e massa da torta seca e através das equações listadas na Tabela 13, foram obtidos os parâmetros da torta de filtração, mostrados na Tabela 24.

**Tabela 24.** Parâmetros calculados e utilizados na estimação de  $\tau_{mc0}$  e  $f_e$  (Continua).

Fluido: Reologia $K(\text{dina/cm}^2\text{s}^{-n})$ $n$	Experimento 2 ( $P=500$ psi; $\gamma=124,94$ s $^{-1}$ )				Experimento 3 ( $P=1000$ psi; $\gamma=226,68$ s $^{-1}$ )			
	$\tau_{\text{fluido}}$ (dina/cm $^2$ )	$\phi_{mc}$	$T_{mc}$ (cm)		$\tau_{\text{fluido}}$ (dina/cm $^2$ )	$\phi_{mc}$	$T_{mc}$ (cm)	
			Medida	Calculada			Medida	Calculada
WBM 1 ( $K=21,53$ ; $n=0,3681$ )	127,36	0,47	0,10	0,08	158,59	0,46	0,10	0,07
WBM 2 ( $K=22,36$ ; $n=0,4039$ )	157,15	0,49	0,10	0,07	199,90	0,48	0,10	0,06
WBM 3 ( $K=40,68$ ; $n=0,4335$ )	329,83	0,44	0,10	0,11	427,02	0,44	0,10	0,10
WBM 4 ( $K=35,96$ ; $n=0,3719$ )	216,56	0,58	0,10	0,06	270,27	0,53	0,10	0,05
OBM (emulsão) ( $K=23,72$ ; $n=0,3391$ )	121,93	0,39	0,20	0,11	149,22	0,40	0,15	0,08

Os valores mostrados na Tabela 24 foram utilizados na estimação dos parâmetros  $\tau_{mc0}$  e  $f_e$ . Observando a Equação 19, quando se tem dados experimentais para dois experimentos de filtração dinâmica, sob diferentes condições, chega-se a um sistema com duas equações e duas incógnitas para serem determinadas, neste caso  $\tau_{mc0}$  e  $f_e$ . O sistema foi resolvido no *software* MATLAB® e os resultados estão dispostos na Tabela 25.

**Tabela 25.** Parâmetros estimados.

Fluido	$\nu$ (valor médio)	Resistência da torta ao cisalhamento	Fator de fricção
		$\tau_{mc0}$ (dina/cm $^2$ )	$f_e$
WBM 1 ( $\rho=1,40$ g/cm $^3$ )	0,32	105,54	$1,00 \times 10^{-4}$
WBM 2 ( $\rho=1,08$ g/cm $^3$ )	0,76	141,89	$1,20 \times 10^0$
WBM 3 ( $\rho=1,46$ g/cm $^3$ )	0,34	255,75	$9,00 \times 10^{-3}$
WBM 4 ( $\rho=1,08$ g/cm $^3$ )	0,54	189,34	$1,30 \times 10^{-3}$
OBM (emulsão) ( $\rho=1,52$ g/cm $^3$ )	0,67	115,51	$3,50 \times 10^{-2}$

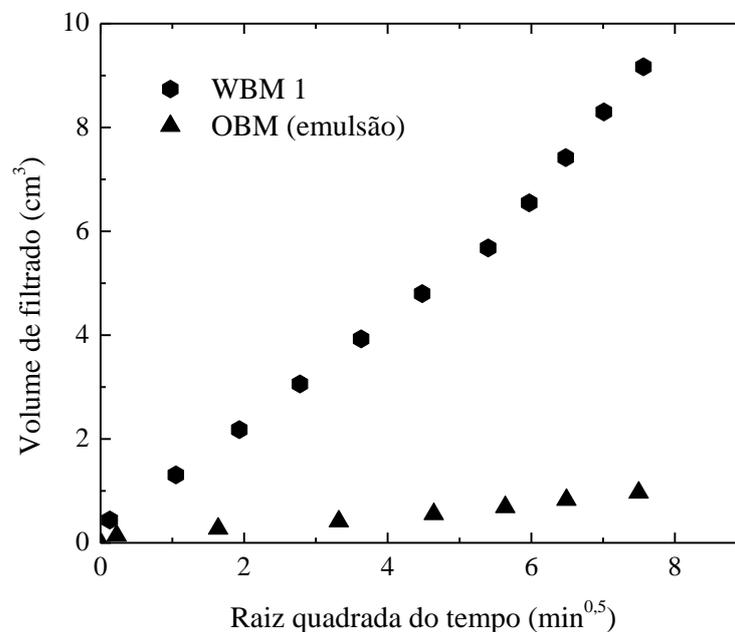
Analisando os valores obtidos, percebeu-se que para ambos os experimentos (2 e 3) a tensão de cisalhamento imposta pela circulação do fluido ( $\tau_{\text{fluido}}$ , Tabela 24) é superior à resistência da torta ao cisalhamento (Tabela 25). Isso significa dizer que ocorreu a erosão da torta de filtração. Quando a erosão ocorre, a espessura da torta diminui o que por sua vez causa um aumento na sua resistência ao cisalhamento.

Substituindo na Equação 18 os valores médios de  $v$ ,  $\tau_{mc0}$  e  $f_e$ , obtidos para cada um dos fluidos analisados, torna-se possível o cálculo da resistência da torta ao cisalhamento, sob determinada pressão.

#### 4.4.3 Comparação entre WBM 1 e OBM (emulsão)

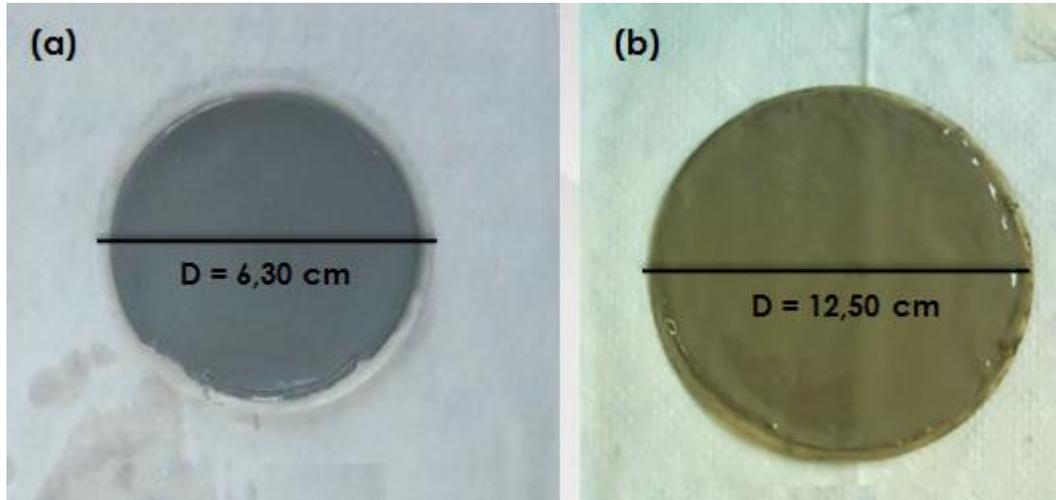
Para a comparação entre as curvas de filtração do WBM 1 e OBM (emulsão), foram escolhidos os experimentos 1.1 de cada fluido, visto que os resultados da triplicata tiveram boa reprodutibilidade.

O volume de filtrado para OBM (emulsão) foi dividido por 3,16 devido à diferença entre as áreas de filtração para os dois fluidos,  $31,65 \text{ cm}^2$  para WBM 1 e  $100,29 \text{ cm}^2$  para OBM (emulsão). Assim como foi observado por Simpson (1974) (Figura 3), na comparação entre WBM 1 e OBM (emulsão) mostrada pela Figura 37, percebeu-se que o fluido base água permitiu uma maior quantidade de filtrado do que o fluido base óleo (emulsão), que apresentou um volume moderado de filtrado. A Figura 38 ilustra as tortas formadas na filtração do WBM 1 e do OBM (emulsão).

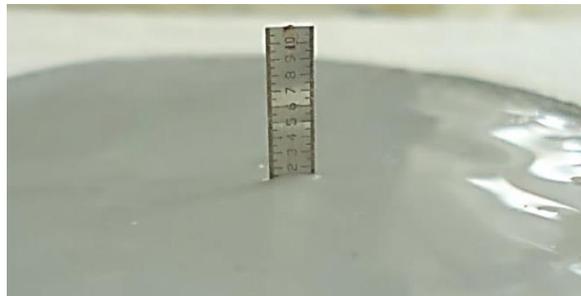


**Figura 37.** Comparação entre volume de filtrado para WBM 1 e OBM (emulsão) – Experimento 1.1.

A torta formada pelo WBM 1 foi mais fina e mais firme quando comparada com a torta formada pelo OBM (emulsão), que teve uma espessura maior, uma aparência mais macia e mais cremosa. A espessura da torta foi obtida experimentalmente, logo após o fim do experimento, com o auxílio de uma régua em micro escala, ilustrada na Figura 39.



**Figura 38.** Torta de filtração formada pelo (a) WBM 1 e (b) OBM (emulsão) (D=Diâmetro do meio filtrante).



**Figura 39.** Régua em micro escala utilizada para medir a espessura da torta de filtração.

Na Tabela 26 é apresentada a comparação entre os valores médios para cada parâmetro obtido, sendo possível analisar as diferenças entre as características da torta formada na filtração do WBM 1 e OBM (emulsão).

**Tabela 26.** Comparação entre os valores médios dos parâmetros obtidos para WBM 1 e OBM (emulsão).

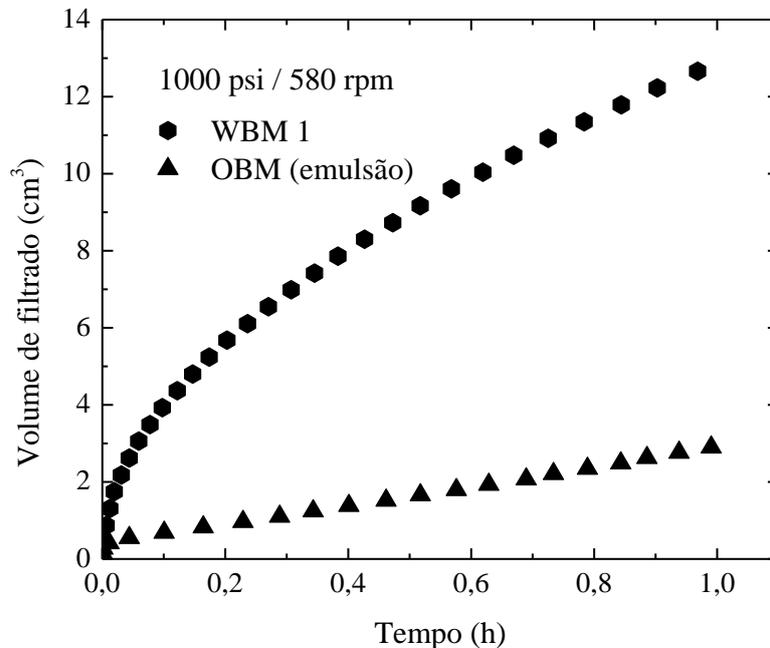
Fluido	$\nu$	$\phi_{mc}$		$T_{mc}$ (cm)	$K_{mc}$ (md)	
		500 psi	1000 psi	Medida	500 psi	1000 psi
WBM 1	$0,32 \pm 0,03$	$0,45 \pm 0,02$	$0,44 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,00$	$(1,54 \pm 0,32) \times 10^{-4}$	$(7,51 \pm 1,55) \times 10^{-5}$
OBM (emulsão)	$0,67 \pm 0,02$	$0,42 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,01$	$(1,70 \pm 0,18) \times 10^{-5}$	$(8,12 \pm 0,84) \times 10^{-6}$

Como resultado da comparação entre WBM 1 e OBM (emulsão), notou-se que a torta formada a partir do fluido base água é aproximadamente 50% menos compressível do que a torta formada pela emulsão. A torta do WBM 1 é mais permeável e mais porosa do que a torta para OBM (emulsão), o que permitiu que o fluido base água tivesse um maior volume de filtrado durante o processo de filtração, como mostrado na Figura 37. A torta do OBM (emulsão) é mais espessa que a torta do WBM 1. Na Tabela 27 é mostrada a comparação entre os parâmetros estimados para os fluidos.

**Tabela 27.** Comparação entre os valores médios dos parâmetros estimados para WBM 1 e OBM (emulsão).

Fluido	$\tau_{mc0}$ (dina/cm <sup>2</sup> )	$f_e$
WBM 1	105,54	$1,00 \times 10^{-4}$
OBM (emulsão)	115,51	$3,50 \times 10^{-2}$

Na comparação entre WBM 1 e OBM (emulsão) foi possível observar que a torta formada na filtração do fluido base água foi uma torta menos resistente ao cisalhamento, ou seja, uma torta mais inclinada a sofrer erosão causada pela circulação do fluido na sua superfície e conseqüentemente, permitir que mais filtrado passe por ela. Essa observação pode ser comprovada pela Figura 40, que compara o volume de filtrado obtido na filtração dinâmica de cada um dos fluidos, sob uma pressão de 1000 psi e 580 rpm. Novamente o volume de filtrado do OBM (emulsão) foi dividido por 3,16, devido diferença entre as áreas de filtração. Em relação ao fator de fricção da torta de filtração, o valor encontrado para a torta do WBM 1 foi menor do que aquele encontrado para o OBM (emulsão).

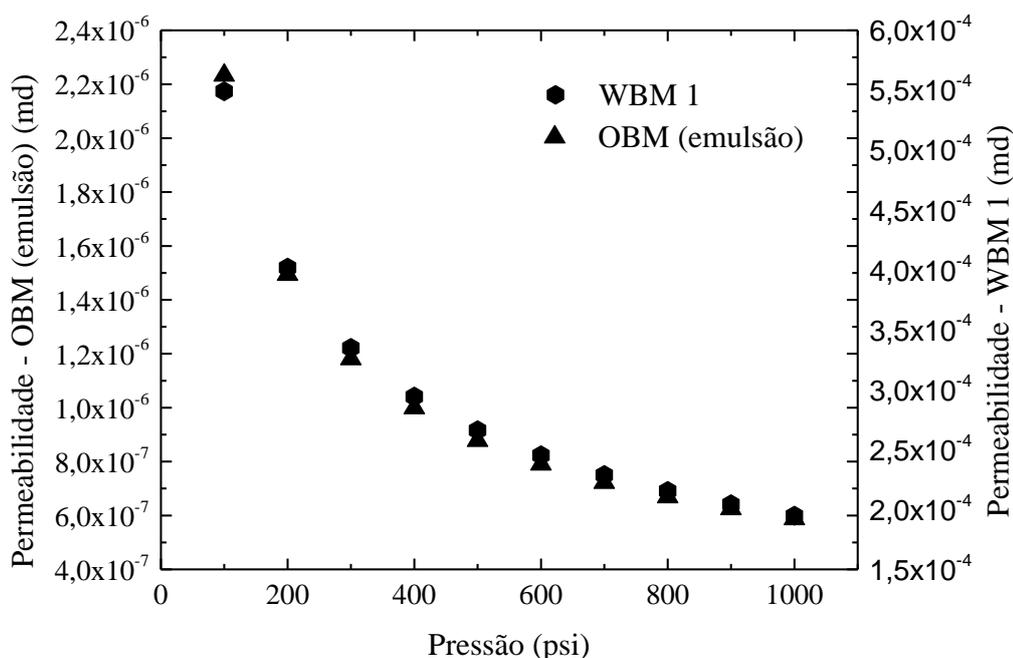


**Figura 40.** Comparação entre volume de filtrado para a filtração dinâmica do WBM 1 e OBM (emulsão) – Condição operacional: 1000 psi e 580 rpm.

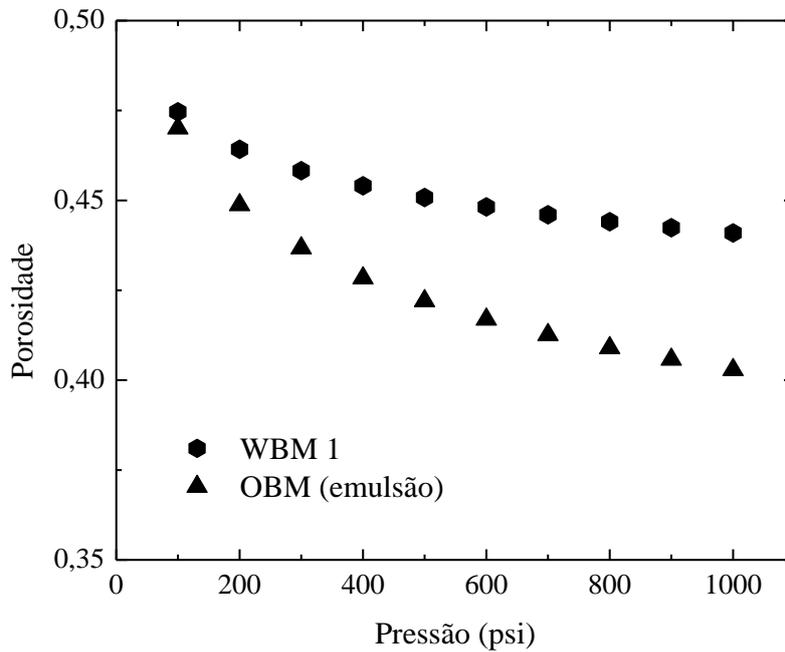
A fim de obter uma comparação entre a variação da permeabilidade e da porosidade da torta de filtração para os fluidos WBM 1 e OBM (emulsão) foram construídas as Figuras 41 e 42, que ilustram, respectivamente, a variação da permeabilidade e da porosidade da torta com a pressão, obtidas pelas Equações 4 e 8, respectivamente.

O mesmo comportamento de decréscimo da porosidade da torta com um aumento na pressão foi observado por Tiller e Cooper (1962), como mostrado na Figura 43 os autores determinaram a porosidade da torta em função da pressão para materiais bem distintos e em todos os casos a porosidade cai com o aumento da pressão.

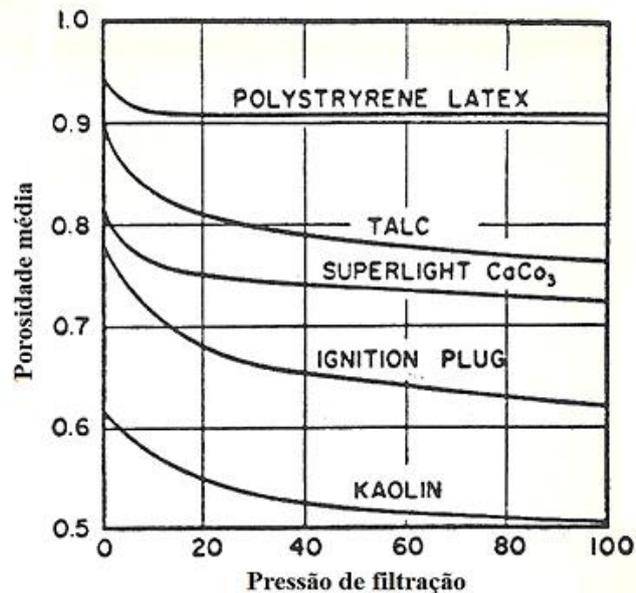
A permeabilidade é a medida de quão fácil o fluido pode fluir dentro da formação. Para ter permeabilidade, a rocha deve conter alguns poros interconectados, capilares ou fraturas. Assim, há uma relação entre porosidade e permeabilidade que mostra que maior porosidade resulta numa maior permeabilidade. Contudo, isso não é uma regra absoluta, uma vez que se pode ter grande quantidade de poros sem conectividade (Honório, 2007). Para que essa relação seja verdadeira os poros devem estar interconectados.



**Figura 41.** Variação da permeabilidade da torta em função da pressão do sistema.



**Figura 42.** Variação da porosidade da torta em função da pressão do sistema.



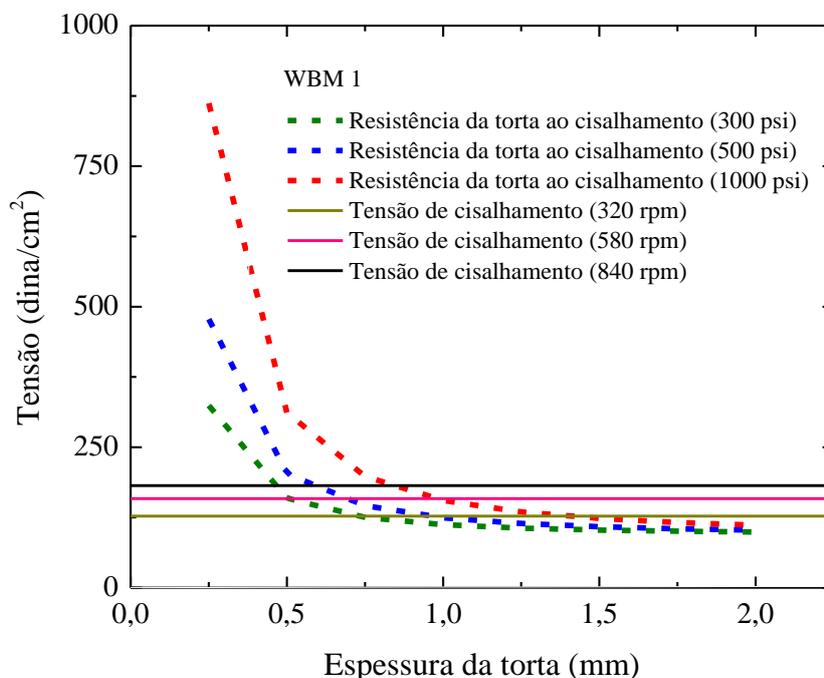
**Figura 43.** Porosidade dos materiais em função da pressão (Adaptado de Tiller e Cooper, 1962).

Nas Figuras 41 e 42 notou-se que para os dois fluidos o comportamento apresentado é o mesmo, a permeabilidade e a porosidade diminuem com o aumento da pressão aplicada, o que pode ser esperado, pois com um aumento da pressão através da torta de filtração, o volume de espaços vazios (porosidade) tende a diminuir devido à compressão da mesma, conseqüentemente diminuindo também a permeabilidade. Nesse caso, pode-se dizer que a relação entre porosidade e permeabilidade existe, ou seja, os poros estão interconectados, pois ambas diminuem quando se aumenta a pressão.

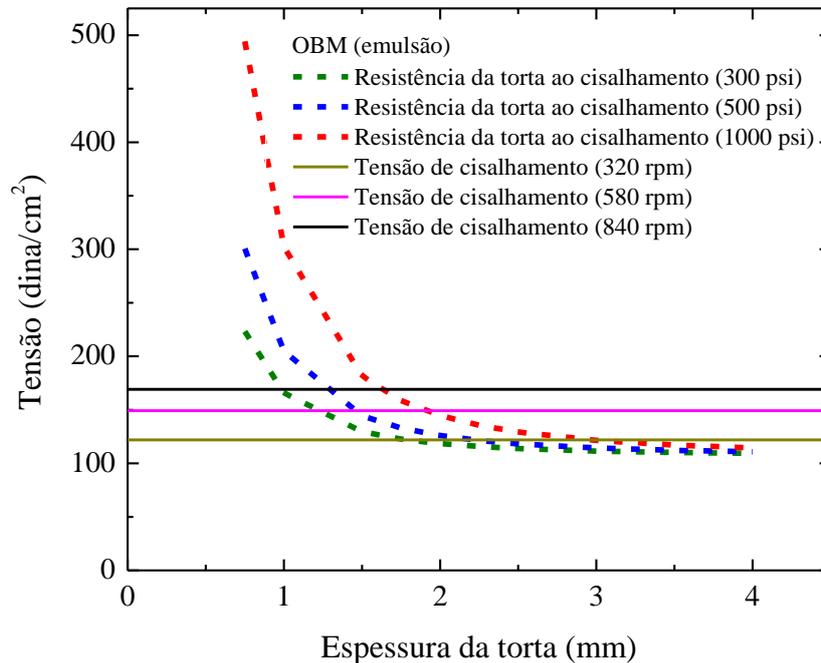
#### 4.4.4 Espessura de equilíbrio da torta de filtração

Com o objetivo de obter uma relação entre a resistência da torta ao cisalhamento, o cisalhamento imposto pela circulação do fluido de perfuração e a espessura da torta, foram construídas as Figuras 44 e 45, para WBM 1 e OBM (emulsão), respectivamente. Estas figuras ilustram claramente o aumento na resistência da torta com a diminuição da sua espessura. A tensão de cisalhamento foi calculada pela Equação 14 e a resistência da torta ao cisalhamento foi obtida pela Equação 18.

As linhas sólidas representam os valores constantes de tensão de cisalhamento e indicam a tensão imposta pela circulação do fluido de perfuração na superfície da torta, quando a curva pontilhada, que representa a resistência da torta ao cisalhamento, intercepta essa linha, é possível obter um valor para a espessura dessa torta no equilíbrio, sob uma determinada condição operacional de pressão e rotação do cone.



**Figura 44.** Variação da resistência da torta ao cisalhamento em função da espessura da torta de filtração - WBM 1.



**Figura 45.** Variação da resistência da torta ao cisalhamento em função da espessura da torta de filtração - OBM (emulsão).

Pela Tabela 24, percebeu-se que a tensão de cisalhamento imposta pelo fluido na superfície da torta formada foi mais alta para os experimentos de filtração dinâmica denominados de 3. Isso implica dizer que nesses experimentos o processo de erosão foi maior, gerando uma menor espessura da torta, quando comparado aos experimentos denominados de 2. Sendo assim, de acordo com as Figuras 44 e 45, pode-se dizer que nos experimentos denominados de 3 a torta formada é mais resistente ao cisalhamento, pelo fato de ser menos espessa.

#### 4.4.5 Estudo do fator de fricção da torta de filtração

Para verificar os parâmetros que mais influenciaram na estimação do fator de fricção da torta de filtração ( $f_e$ ) foram preparados três fluidos de perfuração base água. Os fluidos possuem diferentes concentrações de sólidos e de amido entre si. O WBM 2 possui uma composição base, o WBM 3 foi formulado com uma maior quantidade de carbonato e com a mesma quantidade de amido do WBM 2. Já o WBM 4 foi formulado com a mesma quantidade de carbonato que o WBM 2, porém com a quantidade de amido reduzida pela metade.

Os resultados das triplicatas dos experimentos de filtração estática (Figuras 22 a 31) mostraram boa reprodutibilidade. Nos resultados de filtração dinâmica (Figuras 32 a 36), a condição de 1000 psi e 580 rpm permitiu um maior volume final de filtrado devido a maior taxa de cisalhamento e consequente erosão da torta de filtração.

Na Tabela 28 são mostrados alguns resultados de caracterização dos fluidos em conjunto com os índices de compressibilidade obtidos (valores médios), esses fatores foram escolhidos por serem considerados aqueles que mais poderiam afetar na estimação do fator de fricção da torta.

**Tabela 28.** Características gerais das tortas formadas pela filtração dos fluidos WBM 2, WBM 3 e WBM 4 – Verificação da influência na estimação do fator de fricção da torta.

Fluido	$K$ (dina/cm <sup>2</sup> s <sup>-n</sup> )	$n$	$C_s$ (g/L)	$\nu$	$fe$
WBM 2	22,36	0,4039	150,73	0,76±0,02	1,20x10 <sup>0</sup>
WBM 3	40,69	0,4335	528,27	0,34±0,02	9,00x10 <sup>-4</sup>
WBM 4	35,96	0,3719	146,93	0,54±0,01	1,30x10 <sup>-3</sup>

O WBM 2 tem uma composição tida como base. Quando se compara os resultados, pode-se dizer que tanto o aumento na quantidade de sólidos (WBM 2 e WBM 3) quanto a diminuição na quantidade de amido (WBM 2 e WBM 4) influenciaram no valor estimado do fator de fricção da torta. Quanto maior o índice de consistência do fluido (K), menor foi o fator de fricção obtido, em relação ao índice de comportamento do fluido (n), não foi observada nenhuma correlação com o fator de atrito estimado. Apesar do índice de consistência do fluido ter mostrado influência neste estudo, o índice de compressibilidade foi o fator com maior efeito direto, sua variação dentro da equação, para as mesmas características reológicas, gerou grande mudança nos valores estimados. Isso mostra que o índice de compressibilidade exerceu uma maior influência na estimação do fator do que as características reológicas do fluido, que também fazem parte dos cálculos.

A fim de comparar os valores dos fatores de fricção obtidos para fluidos base água neste trabalho foi montada a Tabela 29, que mostra alguns dados disponíveis na literatura.

**Tabela 29.** Valores para fatores de fricção encontrados na literatura.

Fluido	$K$ (dina/cm <sup>2</sup> s <sup>-n</sup> )	$n$	$fe$	Autor
Base água	8,00	0,319	4,50x10 <sup>-3</sup>	Jiao e Sharma (1993c)
Base água	7,00	0,313	3,50x10 <sup>-3</sup>	Jiao e Sharma (1993c)
Base água	17,00	0,235	4,80x10 <sup>-5</sup>	Jiao e Sharma (1993c)
Base água	3,96	0,626	1,79x10 <sup>2</sup>	Dewan e Chenevert (2001)
Base água	1,87	0,680	8,70x10 <sup>-3</sup>	Dewan e Chenevert (2001)

Comparando a Tabela 29 com a Tabela 28, foi possível concluir que os valores estimados neste trabalho estão em concordância com os dados disponíveis na literatura. Os valores aqui estimados estão dentro da faixa daqueles encontrados em outros trabalhos, que variam da ordem de 10<sup>-5</sup> a 10<sup>2</sup>.

#### 4.4.6 Crescimento da torta de filtração e fluxo da invasão de filtrado

Tendo obtido os dados dos ensaios de filtração, foi possível aplicá-los nas Equações 20 e 21 para prever a espessura da torta em função do tempo de filtração assim como o fluxo de filtrado que invade a formação. O fator de crescimento ( $\lambda$ ) foi estimado no programa STATISTICA® e os valores encontrados são mostrados na Tabela 30.

**Tabela 30.** Fator de crescimento estimado para cada fluido.

Fluido	Fator de crescimento ( $\lambda$ )
WBM 1	$2,19 \times 10^{-4}$
WBM 2	$2,99 \times 10^{-3}$
WBM 3	$1,85 \times 10^{-3}$
WBM 4	$1,10 \times 10^{-3}$
OBM (emulsão)	$1,80 \times 10^{-2}$

Como resultado, foram obtidos gráficos de espessura da torta e fluxo de filtrado em função do tempo de filtração. Os resultados para o fluxo de filtrado são mostrados nas Figuras 49 a 53 (Anexo 2). A espessura final, obtida pela Equação 20, foi comparada com a espessura medida ao final do experimento, a Tabela 31 mostra os resultados.

As espessuras obtidas ao final de uma hora de experimento de filtração estática tiveram uma boa concordância entre as metodologias utilizadas na maioria dos casos, levando em consideração a incerteza da medida feita diretamente com a régua em micro escala, que é de 0,05 cm.

**Tabela 31.** Espessura final da torta de filtração obtida por diferentes metodologias.

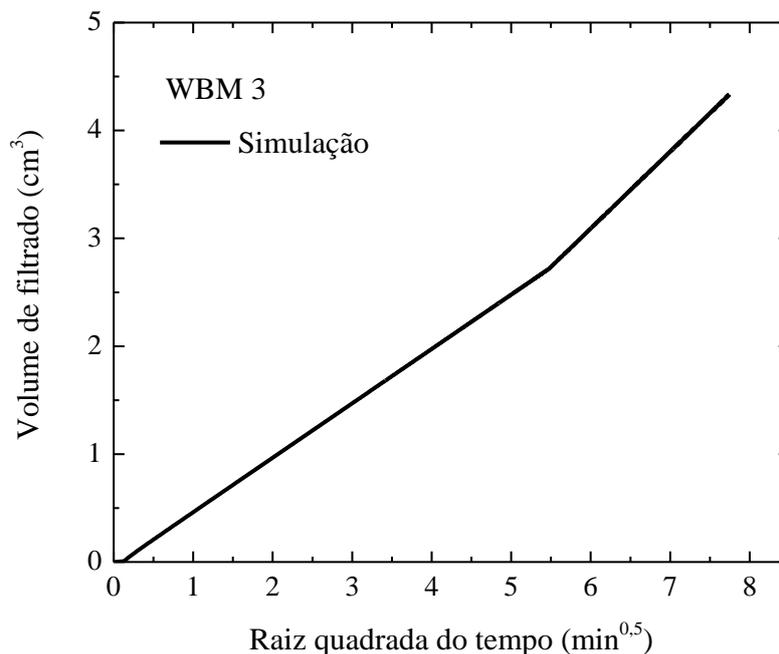
Fluido	Experimento	Espessura da torta de filtração (cm)	
		Medida	Equação 20
WBM 1	1.1	0,10	0,09
	1.2	0,10	0,10
	1.3	0,10	0,09
WBM 2	1.1	0,10	0,08
	1.2	0,10	0,09
	1.3	0,10	0,09
WBM 3	1.1	0,20	0,18
	1.2	0,20	0,22
	1.3	0,20	0,16
WBM 4	1.1	0,08	0,06
	1.2	0,09	0,06
	1.3	0,09	0,06
OBM (emulsão)	1.1	0,28	0,27
	1.2	0,30	0,25
	1.3	0,28	0,28

Em relação aos fluidos base água, apenas os valores para WBM 1 se afastaram um pouco mais. Por se tratar de um fluido cuja composição não é conhecida, pode-se dizer que provavelmente o fator de crescimento médio estimado não foi um bom valor para esse fluido, pois provavelmente ele possui aditivos diferentes daqueles utilizados no WBM 2, WBM 3 e WBM 4, cujas composições são conhecidas e foram utilizados os mesmos componentes em todos eles, variando apenas a quantidade. Sendo assim, podemos concluir que a variação na espessura da torta é uma função da composição do fluido de perfuração.

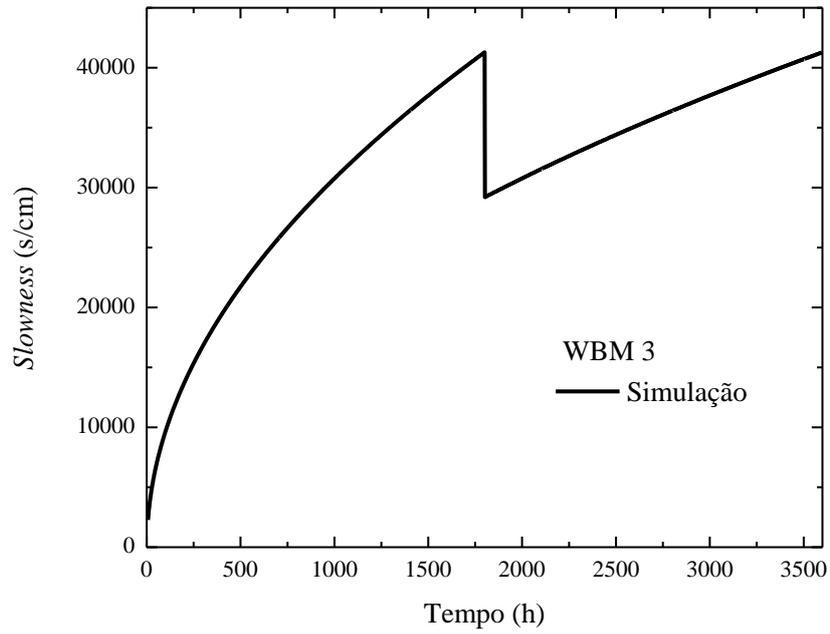
#### 4.5 Estudo de caso para o fluido WBM 3 - Modelagem da filtração

O objetivo de buscar equações para modelar o processo de filtração foi verificar se é possível prever resultados como: o volume de filtrado que invade a formação, a curva de *slowness* e a espessura da torta de filtração em função do tempo. Para confirmar se o modelo foi capaz de prever esses fatores, foi realizado um estudo de caso e o fluido escolhido foi o WBM 3.

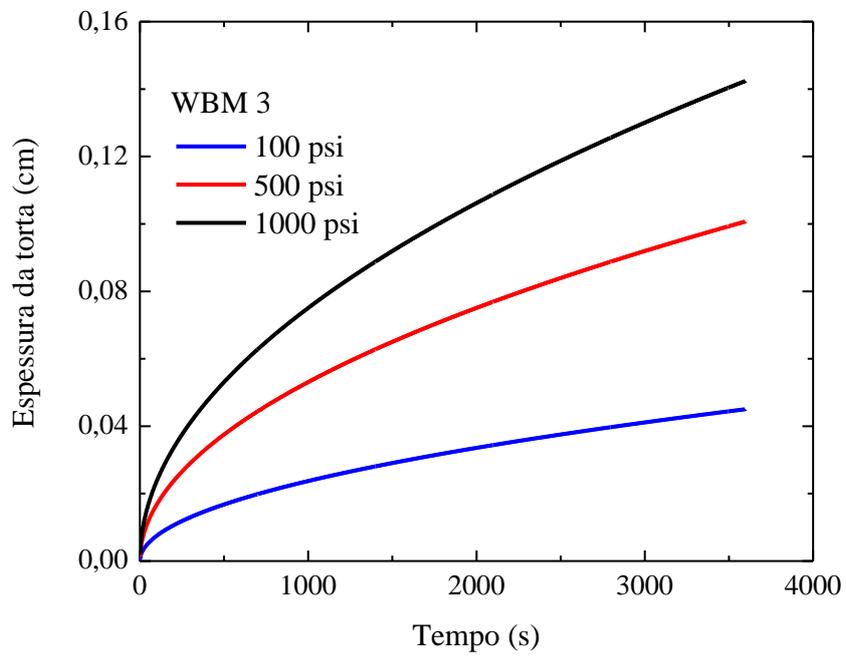
O volume de filtrado foi obtido a partir do fluxo de filtrado que invade a formação (Equação 21), o volume inicial foi considerado zero. O *slowness* foi obtido pela Equação 12, no entanto sabe-se também que este parâmetro é o inverso do fluxo. Para a espessura da torta de filtração foi aplicada a Equações 20. Nas Figuras 46 a 48 são mostrados os resultados das simulações.



**Figura 46.** Volume de filtrado simulado – WBM 3.



**Figura 47.** Slowness simulado – WBM 3.



**Figura 48.** Espessura da torta simulada para diferentes pressões – WBM 3.

Na Figura 48 fica claro que quanto maior a pressão aplicada à filtração maior será a espessura da torta formada. Se for feita uma comparação entre a espessura final obtida na pressão de 1000 psi, aproximadamente 0,15 cm, com a espessura medida ao final do experimento com WBM 3 que foi de 0,20 cm, pode-se dizer que os resultados estão de acordo, considerando a incerteza de 0,05 cm na medida da régua utilizada.

Com relação ao modelo e aos parâmetros obtidos não foi feita a validação frente a novos dados experimentais, no entanto, foi possível concluir que qualitativamente os resultados fornecidos pelo modelo estão de acordo com o comportamento observado experimentalmente. Os dados obtidos neste trabalho auxiliaram no projeto de uma célula de filtração para operar *on line*.

## CAPÍTULO V

### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos experimentos de filtração estática e dinâmica dos fluidos de perfuração base água e base óleo (emulsão), foi possível concluir que a célula de filtração HTHP utilizada foi capaz de fornecer dados necessários para caracterizar a torta de filtração formada. Foram determinados parâmetros como porosidade, permeabilidade, compressibilidade e espessura da torta, sendo estes obtidos a partir dos experimentos de filtração estática. Posteriormente, com os experimentos de filtração dinâmica, foram estimados outros parâmetros: a resistência da torta ao cisalhamento e seu fator de fricção. Ficou comprovado também que é possível obter a espessura da torta de filtração no equilíbrio, através de uma relação entre as curvas de resistência da torta ao cisalhamento e de tensão imposta pelo fluido.

Com todos os resultados experimentais obtidos, foi feita a comparação entre o WBM 1 e OBM (emulsão), essa análise mostrou que o fluido base água permitiu que mais filtrado atravessasse o meio filtrante, isso ocorreu porque este fluido formou uma torta mais permeável e mais porosa, em comparação com a emulsão. A filtração da emulsão forneceu uma torta com espessura aproximadamente 3 vezes maior do que aquela formada pelo fluido base água, essa tendência ficou comprovada na determinação do fator de crescimento para as torta de filtração, a torta formada pela emulsão teve um fator de crescimento maior do que aqueles encontrados para os fluidos base água.

No estudo do fator de fricção da torta de filtração foram analisados os resultados obtidos para três diferentes fluidos base água, preparados no LEF. Os resultados mostraram que uma variação na quantidade de sólidos (carbonato de cálcio) e de amido na composição dos fluidos gerou uma variação no fator de fricção estimado. A reologia do fluido ( $K$  e  $n$ ) também teve influência, no entanto, o índice de compressibilidade foi o parâmetro que mais afetou a estimação do fator de fricção da torta.

Foi feito um estudo de caso da modelagem da filtração estática do fluido WBM 3. Os resultados foram capazes de prever o comportamento das curvas de volume de filtrado, *slowness* e espessura da torta em função do tempo de filtração. As curvas fornecidas mostraram semelhança com o comportamento observado experimentalmente, sendo assim pode-se concluir que qualitativamente, a modelagem apresentou bons resultados.

## CAPÍTULO VI

### 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar seguimento ao estudo da filtração de fluidos de perfuração, os próximos passos sugeridos são:

- Montagem de uma célula de filtração *on line*;
- Obter dados de filtração e invasão de fluidos de perfuração *on line*;
- Aprimorar a modelagem da filtração estática e posteriormente incluir os fatores relacionados com a filtração dinâmica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, W. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion. SPE 5713, 1977.
- BA GERI, B. S., AL-MUTAIRI, S. H. e MAHMOUD, M. A. Different techniques for characterizing the filter cake. SPE 163960, 2013.
- BAILEY, L., MEETEN, G., WAY, P. e L'ALLORET, F. "Filter cake Integrity and Reservoir Damage". SPE 39429, 1998.
- BOURGOYNE, A.T.; MILLHEIM, K.K.; CHENEVERT, M.E.; YOUNG, F.S. Applied Drilling Engineering. Second Printing, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, 1991.
- CAEN, R., CHILLINGAR, G. V. Drilling fluids: State of the art. Journal Of Petroleum Science and Engineering, vol. 14, pp. 221-230, 1995.
- CERASI, P., LADVA, H. K., BRADBURY, A. J. e SOGA, K. "Measurement of the mechanical properties of filtercakes". SPE 68948, 2001.
- CIVAN, F. Reservoir formation damage. Second Edition, Gulf professional publishing. U.S.A., 2007.
- DEWAN, J. T. e CHENEVERT, M. E. A model for filtration of water-base mud during drilling: determination of mudcake parameters. Petrophysics, vol. 42, pp. 237-250, 2001.
- ELKATATNY, S. M., MAHMOUD, M. A. e NASR-EL-DIN, H. A. Characterization of filter cake generated by water-based drilling fluids using CT scan. SPE 144098, 2012.
- HONÓRIO, M. C. Qualidade dos dados transmitidos durante a perfuração de poços de petróleo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, 2007.
- JIAO, D. AND SHARMA, M. M. Formation damage due static and dynamic filtration of water-base muds. SPE 23823, 1992.
- JIAO, D. AND SHARMA, M. M. Investigation of dynamic mudcake formation: The concept of minimum overbalance pressure. SPE 26323, 1993a.
- JIAO, D. AND SHARMA, M. M. Dynamic filtration of invert-emulsion muds. SPE 24759. 1993b.
- JIAO, D. AND SHARMA, M. M. Mechanism of buildup in crossflow filtration of colloidal suspensions. Journal of colloid and interface science, vol. 162, pp. 454-462, 1993c.
- NISHABOORI, A. H. Wireline and while-drilling formation-tester sampling with oval, focused and conventional probe types in the presence of water and oil-base-filtrate invasion in deviated wells. Dissertação de Mestrado. The University of Texas at Austin, 2009.

OMLAND, T. H. Particle settling in non-Newtonian drilling Fluids. Dissertação de Ph.D. University of Stavanger, Faculty of Science and Technology, 2009.

OUTMANS, H. D. Mechanics of dynamic and static filtration in the borehole. SPE Journal, pp. 236-244, 1963.

QUEIROZ NETO, J, C. Redução na pressão de rompimento da torta de filtração através de melhorias na composição do fluido de perfuração à base de polímeros. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

SIMPSON, J. P. Drilling fluid filtration under stimulated downhole conditions. SPE 4779, 1974.

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

TILLER, F.M., COOPER, H. The role of porosity in filtration: Part V - Porosity variation in filter cakes. AIChE Journal, vol. 8, pp. 445-449, 1962.

VAUSSARD, A., MARTIN, M., KONIRSCH, O. e PATRONI, J. M. An experimental study of drilling fluids dynamic filtration. SPE 15412, 1986.

WALDMANN, A. T. A. Mecanismos que governam a efetividade de agentes obturantes no controle da invasão de fluidos de perfuração na rocha reservatório de petróleo. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.

## ANEXOS

### Anexo 1. Caracterização dos fluidos

**Tabela 32.** Ângulo de deflexão.

Fluido	Velocidade (rpm)					
	3	6	100	200	300	600
	Ângulo de deflexão - Média da triplicata (°)					
	L3	L6	L100	L200	L300	L600
WBM 1	8	10	27	35	42	57
OBM (emulsão)	9	10	21	31	40	59
WBM 2	9	11	33	45	54	76
WBM 3	17	21	70	99	120	167
WBM 4	11	20	47	61	71	94

**Tabela 33.** Concentração de sólidos e fração volumétrica de sólidos.

Fluido	Massa da	Massa da forma	Massa da forma	s	C <sub>s</sub> (g/l)
	forma (g)	com fluido (g)	com sólido (g)		
Média da triplicata					
WBM 1	5,85	19,90	11,07	0,18	518,29
OBM (emulsão)	10,41	22,33	16,25	0,18	745,51
WBM 2	7,68	19,53	9,35	0,06	150,73
WBM 3	7,72	20,70	14,06	0,27	528,27
WBM 4	7,67	25,20	10,00	0,06	146,93

## Anexo 2. Filtração

**Tabela 34.** Dados experimentais da filtração estática do WBM 1.

Experimento 1.1			Experimento 1.2			Experimento 1.3		
Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	Slowness (s/cm)	Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	Slowness (s/cm)	Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	Slowness (s/cm)
0,0003	0,44	2364,66	0,0000	0,00	2219,14	0,0000	0,00	4001,72
0,0183	1,31	4056,29	0,0169	0,87	3798,00	0,0306	0,87	5281,03
0,0622	2,18	7180,03	0,0583	1,75	6348,09	0,0811	1,75	7740,69
0,1286	3,06	10254,60	0,1144	2,62	8712,84	0,1494	2,62	10022,50
0,2197	3,93	13478,53	0,1914	3,49	10815,26	0,2342	3,49	13166,40
0,3344	4,80	17326,11	0,2806	4,37	12641,91	0,3517	4,37	16096,29
0,4858	5,68	16910,14	0,3856	5,24	15224,74	0,4814	5,24	14679,05
0,5942	6,55	14024,22	0,5131	6,11	13853,66	0,5758	6,11	12786,60
0,7000	7,42	14649,43	0,5983	6,99	12406,80	0,6778	6,99	14577,09
0,8192	8,30	17534,83	0,7036	7,86	13951,47	0,7997	7,86	17280,17
0,9531	9,17	-	0,8114	8,73	16364,49	0,9317	8,73	-
-	-	-	0,9378	9,61	-	-	-	-

**Tabela 35.** Dados experimentais da filtração estática do OBM (emulsão).

Experimento 1.1			Experimento 1.2			Experimento 1.3		
Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	Slowness (s/cm)	Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	Slowness (s/cm)	Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	Slowness (s/cm)
0,0000	0,00	215,80	0,0000	0,00	143,86	0,0000	0,00	143,86
0,0008	0,44	5857,07	0,0006	0,44	436,55	0,0006	0,44	145,52
0,0447	0,87	23937,59	0,0033	0,87	5893,45	0,0011	0,87	3892,59
0,1836	1,31	40713,41	0,0456	1,31	19817,22	0,0303	1,31	14961,82
0,3592	1,75	45328,62	0,1564	1,75	34523,97	0,1167	1,75	30340,34
0,5297	2,18	44892,07	0,3092	2,18	45583,28	0,2619	2,18	40963,10
0,7019	2,62	60782,39	0,5044	2,62	44561,76	0,4294	2,62	45496,88
0,9367	3,06	-	0,6533	3,06	70439,65	0,6133	3,06	50860,81
-	-	-	0,9192	3,49	-	0,8053	3,49	-

**Tabela 36.** Dados experimentais da filtração estática do WBM 2 (Continua).

Experimento 1.1			Experimento 1.2			Experimento 1.3		
Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	Slowness (s/cm)	Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	Slowness (s/cm)	Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	Slowness (s/cm)
0,0000	0,00	71,93	0,0000	0,00	143,86	0,0000	0,00	71,93
0,0003	0,44	3974,65	0,0006	0,44	2437,41	0,0003	0,44	1818,97
0,0153	0,87	7984,43	0,0186	0,87	6730,17	0,0139	0,87	5857,07
0,0461	1,31	12947,73	0,0519	1,31	11221,36	0,0450	1,31	9854,66
0,0961	1,75	19063,60	0,1053	1,75	16443,45	0,0900	1,75	14951,90
0,1681	2,18	22874,32	0,1775	2,18	21391,03	0,1592	2,18	20699,83
0,2564	2,62	27765,68	0,2686	2,62	27298,13	0,2481	2,62	24205,06

**Tabela 36.** Continuação

0,3636	3,06	36802,33	0,3883	3,06	31868,28	0,3461	3,06	30704,14
0,5025	3,49	34311,48	0,5119	3,49	34269,31	0,4825	3,49	35870,00
0,6350	3,93	41360,80	0,6500	3,93	39202,84	0,6200	3,93	35750,11
0,7947	4,37	50934,42	0,8147	4,37	45119,65	0,7586	4,37	46518,14
0,9869	4,80	-	0,9850	4,80	-	0,9342	4,80	-

**Tabela 37.** Dados experimentais da filtração estática do WBM 3.

Experimento 1.1			Experimento 1.2			Experimento 1.3		
Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	<i>Slowness</i> (s/cm)	Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	<i>Slowness</i> (s/cm)	Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	<i>Slowness</i> (s/cm)
0,0000	0,00	10789,77	0,0000	0,00	4747,50	0,0000	0,00	71,93
0,0417	0,44	13715,00	0,0183	0,44	7239,48	0,0003	0,44	5165,86
0,1047	0,87	17425,69	0,0553	0,87	11568,62	0,0394	0,87	12696,38
0,1747	1,31	20896,19	0,1067	1,31	14781,99	0,0972	1,31	18594,38
0,2661	1,75	24337,76	0,1694	1,75	16843,62	0,1831	1,75	25429,14
0,3606	2,18	27902,93	0,2353	2,18	19426,55	0,2914	2,18	32413,97
0,4792	2,62	26866,53	0,3178	2,62	22622,56	0,4306	2,62	34527,27
0,5681	3,06	24556,03	0,4100	3,06	24483,28	0,5581	3,06	35287,93
0,6667	3,49	30958,79	0,5047	3,49	21136,38	0,7000	3,49	46036,36
0,8044	3,93	32585,11	0,5714	3,93	20248,81	0,8778	3,93	-
0,9303	4,37	-	0,6611	4,37	23610,17	-	-	-
-	-	-	0,7517	4,80	31218,41	-	-	-
-	-	-	0,8722	5,24	-	-	-	-

**Tabela 38.** Dados experimentais da filtração estática do WBM 4.

Experimento 1.1			Experimento 1.2			Experimento 1.3		
Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	<i>Slowness</i> (s/cm)	Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	<i>Slowness</i> (s/cm)	Tempo (h)	Volume de Filtrado (cm <sup>3</sup> )	<i>Slowness</i> (s/cm)
0,0000	0,00	143,86	0,0000	0,11	95,91	0,0000	0,00	143,86
0,0006	0,44	1455,17	0,0003	0,44	2040,59	0,0006	0,44	3928,97
0,0111	0,87	3928,97	0,0136	0,87	5529,66	0,0300	0,87	8985,69
0,0306	1,31	6617,73	0,0425	1,31	9243,24	0,0692	1,31	11724,89
0,0622	1,75	10404,48	0,0850	1,75	13242,07	0,1206	1,75	16006,90
0,1100	2,18	14442,59	0,1436	2,18	17243,79	0,1914	2,18	20045,00
0,1725	2,62	18090,85	0,2167	2,62	20824,26	0,2736	2,62	23593,64
0,2497	3,06	22009,48	0,3044	3,06	26811,55	0,3736	3,06	28666,90
0,3406	3,49	27102,59	0,4214	3,49	28412,24	0,4925	3,49	29176,21
0,4567	3,93	28485,00	0,5214	3,93	27549,89	0,5964	3,93	28772,73
0,5606	4,37	27320,86	0,6342	4,37	32050,17	0,7147	4,37	32413,97
0,6653	4,80	33016,70	0,7661	4,80	37260,68	0,8439	4,80	39130,91
0,7928	5,24	-	0,9100	5,24	-	0,9950	5,24	-

**Tabela 39.** Dados experimentais da filtração dinâmica do WBM 1.

Experimento 1		Experimento 2	
Tempo (h)	Volume de filtrado (cm <sup>3</sup> )	Tempo (h)	Volume de filtrado (cm <sup>3</sup> )
0,0003	0,00	0,0000	0
0,0011	0,44	0,0008	0,44
0,0106	0,87	0,0064	0,87
0,0264	1,31	0,0122	1,31
0,0489	1,75	0,0194	1,75
0,0736	2,18	0,0308	2,18
0,1022	2,62	0,0439	2,62
0,1375	3,06	0,0594	3,06
0,1733	3,49	0,0775	3,49
0,2156	3,93	0,0975	3,93
0,2589	4,37	0,1219	4,37
0,3092	4,8	0,1469	4,8
0,3581	5,24	0,1739	5,24
0,4147	5,68	0,2028	5,68
0,4750	6,11	0,2364	6,11
0,5328	6,55	0,2703	6,55
0,5992	6,99	0,3072	6,99
0,6692	7,42	0,3453	7,42
0,7425	7,86	0,3833	7,86
0,8192	8,3	0,4267	8,3
0,8986	8,73	0,4725	8,73
0,9833	9,17	0,5172	9,17
-	-	0,5678	9,61
-	-	0,6192	10,04
-	-	0,6692	10,48
-	-	0,7253	10,92
-	-	0,7839	11,35
-	-	0,8442	11,79
-	-	0,9028	12,23
-	-	0,9683	12,66

**Tabela 40.** Dados experimentais da filtração dinâmica do OBM (emulsão) (Continua).

Experimento 1		Experimento 2	
Tempo (h)	Volume de filtrado (cm <sup>3</sup> )	Tempo (h)	Volume de filtrado (cm <sup>3</sup> )
0,0000	1,09	0,0000	0,00
0,0003	1,31	0,0003	0,44
0,0064	1,75	0,0011	0,87
0,0333	2,18	0,0108	1,31
0,0942	2,62	0,0439	1,75
0,1925	3,06	0,1006	2,18
0,3136	3,49	0,1642	2,62
0,4542	3,93	0,2289	3,06
0,5961	4,37	0,2886	3,49

**Tabela 40.** Continuação.

0,7233	4,8	0,3431	3,93
0,8436	5,24	0,4011	4,37
0,9697	5,68	0,4617	4,80
-	-	0,5175	5,24
-	-	0,5761	5,68
-	-	0,6286	6,11
-	-	0,6894	6,55
-	-	0,7339	6,99
-	-	0,7892	7,42
-	-	0,8433	7,86
-	-	0,8861	8,30
-	-	0,9383	8,73
-	-	0,9906	9,17

**Tabela 41.** Dados experimentais da filtração dinâmica do WBM 2.

Experimento 1		Experimento 2	
Tempo (h)	Volume de filtrado (cm <sup>3</sup> )	Tempo (h)	Volume de filtrado (cm <sup>3</sup> )
0,0000	0,00	0,0000	0,00
0,0003	0,44	0,0006	0,44
0,0697	1,31	0,0061	0,87
0,2139	2,18	0,0222	1,31
0,4500	3,06	0,0525	1,75
0,5892	3,49	0,0975	2,18
0,7636	3,93	0,1539	2,62
0,9311	4,37	0,2308	3,06
-	-	0,3111	3,49
-	-	0,3994	3,93
-	-	0,5072	4,37
-	-	0,6008	4,80
-	-	0,9000	5,20

**Tabela 42.** Dados experimentais da filtração dinâmica do WBM 3 (Continua).

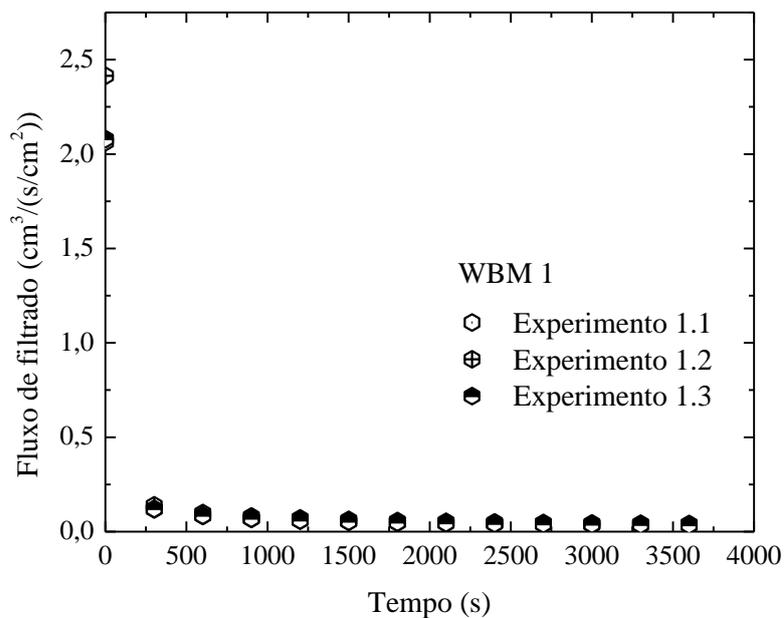
Experimento 1		Experimento 2	
Tempo (h)	Volume de filtrado (cm <sup>3</sup> )	Tempo (h)	Volume de filtrado (cm <sup>3</sup> )
0,0000	0,00	0,0000	0,44
0,0208	0,44	0,0222	0,87
0,0614	0,87	0,0608	1,31
0,1211	1,31	0,1053	1,75
0,2025	1,75	0,1672	2,18
0,2869	2,18	0,2281	2,62
0,3903	2,62	0,3111	3,06
0,5172	3,06	0,3933	3,49
0,6464	3,49	0,4897	3,93
0,7853	3,93	0,5733	4,37
0,9553	4,37	0,6786	4,8

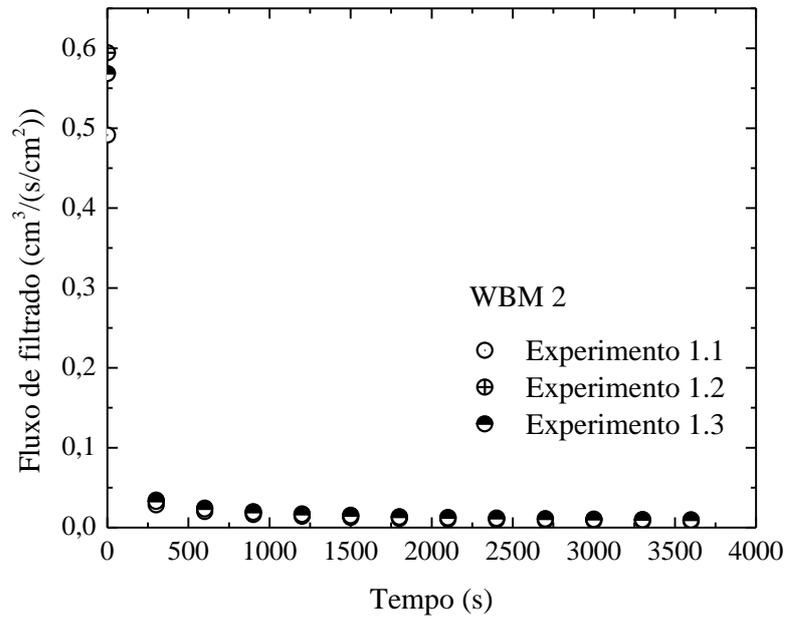
**Tabela 42.** Continuação.

-	-	0,7742	5,24
-	-	0,8739	5,68
-	-	0,9803	6,11

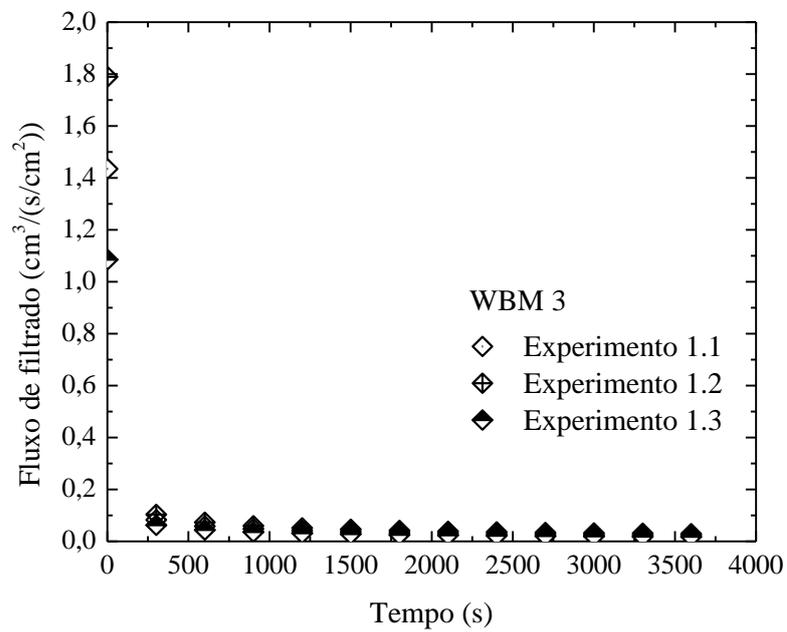
**Tabela 43.** Dados experimentais da filtração dinâmica do WBM 4.

Experimento 1		Experimento 2	
Tempo (h)	Volume de filtrado (cm <sup>3</sup> )	Tempo (h)	Volume de filtrado (cm <sup>3</sup> )
0,0000	0,00	0,0000	0,00
0,0006	0,44	0,0003	0,44
0,0222	0,87	0,0142	0,87
0,0572	1,31	0,0417	1,31
0,1019	1,75	0,0761	1,75
0,1683	2,18	0,1181	2,18
0,2436	2,62	0,1669	2,62
0,3356	3,06	0,2322	3,06
0,4306	3,49	0,2953	3,49
0,5386	3,93	0,3717	3,93
0,6658	4,37	0,4594	4,37
0,7992	4,8	0,5556	4,8
0,9375	5,24	0,6383	5,24
-	-	0,7422	5,68
-	-	0,8392	6,11
-	-	0,9553	6,55

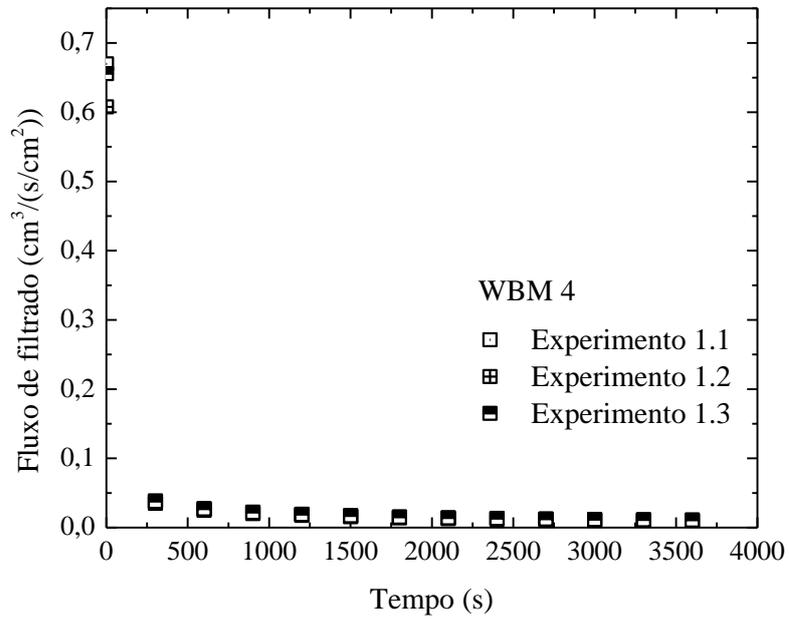
**Figura 49.** Fluxo da invasão de filtrado – WBM 1.



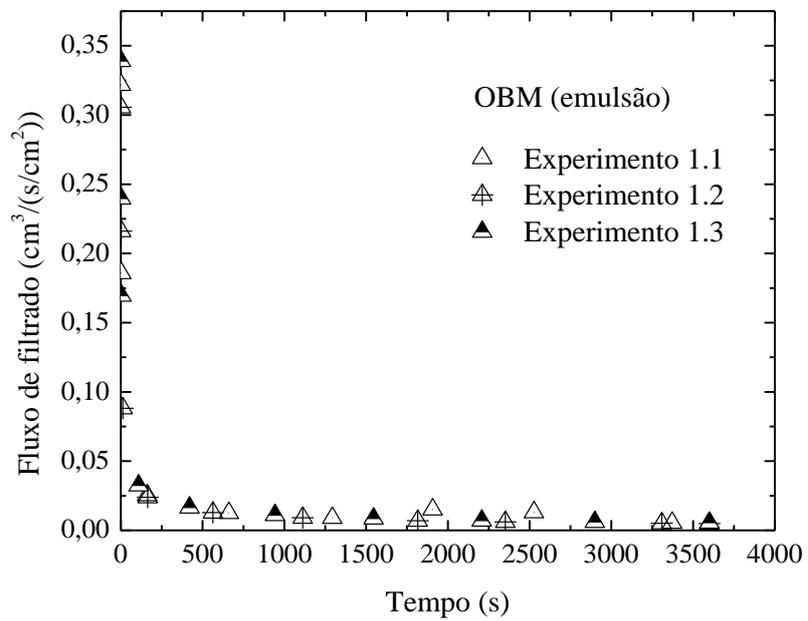
**Figura 50.** Fluxo da invasão de filtrado – WBM 2.



**Figura 51.** Fluxo da invasão de filtrado – WBM 3.



**Figura 52.** Fluxo da invasão de filtrado – WBM 4.



**Figura 53.** Fluxo da invasão de filtrado – OBM (emulsão).