

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

DISSERTAÇÃO

**Avaliação da Filtração de Fluidos de Perfuração
não Newtonianos Utilizando a Teoria
Simplificada da Filtração**

BIANCA RANGEL ANTUNES DA SILVA

2017



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

**AVALIAÇÃO DA FILTRAÇÃO DE FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO NÃO NEWTONIANOS
UTILIZANDO A TEORIA SIMPLIFICADA DA
FILTRAÇÃO**

BIANCA RANGEL ANTUNES DA SILVA

Sob a Orientação de
Cláudia Míriam Scheid

e Co-orientação de
Luís Américo Calçada

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

Seropédica, RJ
Dezembro de 2017

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

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

Antunes da Silva, Bianca Rangel, 1990-
A627a Avaliação da Filtração de Fluidos de Perfuração não
Newtonianos Utilizando a Teoria Simplificada da Filtração /
Bianca Rangel Antunes da Silva. - 2017.
89 f.: il.

Orientadora: Cláudia Míriam Scheid.

Coorientador: Luis Américo Calçada.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em
Engenharia Química/ Engenharia Química, 2017.

1. Fluido de Perfuração. 2. Filtração. 3. Não Newtonianos.

I. Scheid, Cláudia Míriam, 1968-, orient.

II. Calçada, Luis Américo, 1966-, coorient. III
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa
de Pós Graduação em Engenharia Química/ Engenharia
Química. IV. Título.

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

BIANCA RANGEL ANTUNES DA SILVA

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 21/12/2017

Prof. Cláudia Míriam Scheid, D.Sc., DEQ/UFRRJ
(Orientadora)

Prof. Cristiano Agenor Oliveira de Araújo, D.Sc., ICET/UFVJM

Prof. Ana Lucia dos Santos Barbosa, D.Sc., DEQ/UFRRJ

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, João Alberto e Elenice.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais João Alberto e Elenice, pelo amor, carinho e incentivo incondicionais.

Aos meus orientadores, Profa. Cláudia Míriam Scheid e Prof. Luis Américo Calçada pelos ensinamentos passados, pela paciência, confiança e compreensão ao longo de todo o curso.

Aos meus irmãos, pelo apoio e carinho.

Aos meus familiares agradeço o apoio, carinho e incentivo de sempre.

A Isadora, por todo apoio, dedicação, carinho e amizade ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos de turma e laboratório, Laura, Kelly, Raquel, Érica, Ramon, Jéssica, Matheus e Victor pelo apoio ao longo dessa caminhada e por fazerem meus dias mais alegres. Em especial a Laura, por toda boa vontade e paciência ao me ajudar quando precisei.

Aos companheiros e professores do Laboratório de Escoamento de Fluidos (LEF) pela boa vontade ao me ajudar, sempre que precisei.

RESUMO

Antunes da Silva, Bianca Rangel Avaliação da filtração de fluidos de perfuração não Newtonianos utilizando a teoria simplificada da filtração 2017. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

Durante o processo de perfuração de poços de petróleo, o diferencial de pressão entre a formação rochosa e a região anular pode ocasionar um processo de filtração e consequente invasão de fluido de perfuração nas rochas, causando operações irreversíveis ao poço. Por isso, são fundamentais estudos para controlar as propriedades da torta de filtração formada na parede do poço. A torta formada deve ser fina e de baixa permeabilidade, minimizando assim a filtração e a invasão do fluido. Este trabalho teve como objetivo principal estudar as características da torta de filtração formada durante o processo de perfuração de poços de petróleo, utilizando fluidos não Newtonianos que seguem a lei da potência, e aplicando a teoria simplificada da filtração adaptada para fluidos não Newtonianos para atingir o objetivo específico que foi o levantamento dos parâmetros de permeabilidade, porosidade, espessura e fator de correção obtidos a partir de dados experimentais de volume de filtrado *versus* tempo, em condições estáticas, em diferentes pressões. Foram obtidos resultados experimentais em diferentes condições de filtração (pressão, viscosificante e adensante) buscando comparar e conhecer os mecanismos que controlam a filtração em condições estáticas. Foram realizados ensaios de filtração a 300 psi, 500 psi e 700 psi, utilizando uma célula HTHP e preparados fluidos de perfuração não-Newtonianos contendo Goma Xantana (GX) e carboximetilcelulose (CMC) como viscosificantes, além de barita e calcita. Foram avaliados os parâmetros da filtração como permeabilidade, porosidade, espessura da torta, tempo de filtração e volume de filtrado. A permeabilidade da torta foi determinada, com o auxílio de um *software* de estimação de parâmetros, utilizando-se a teoria simplificada da filtração adaptada para fluidos não Newtonianos proposta por Massarani e Coelho de Castro (1980). Os resultados obtidos foram confrontados com os obtidos por outras metodologias. Os ensaios experimentais mostraram também que as propriedades da torta variam com a pressão de filtração.

Palavras-chave: Filtração estática, Fluido não Newtoniano, Teoria Simplificada da Filtração.

ABSTRACT

Antunes da Silva, Bianca Rangel Analysis of non Newtonian drilling fluids filtration using the simplified theory of filtration 2017.89 p.Thesis (Master in Science, Chemical Engineering). Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

During the drilling of oil wells, the pressure differential between the rock formation and the annular region can cause a filtration process and consequent invasion of drilling fluid into the rocks, causing irreversible damage to the well. Therefore, studies to control the properties of the well formed mudcake are fundamental. The mudcake formed should be thin and of low permeability, thus minimizing the filtration and the invasion of the fluid. The main purpose of this work was to study the characteristics of the filtration pie formed during the drilling process of oil wells, using non-Newtonian fluids that follow the Power law model, and applying the simplified theory of filtration adapted for non-Newtonian fluids to achieve the specific objective that was the lifting of the parameters of permeability, porosity, thickness and correction factor obtained from experimental data of filtered volume versus time, in Static conditions, at different pressures. Experimental results were obtained in different filtration conditions (pressure, viscosifier agent and weighting material) seeking to compare and know the mechanisms that control filtration in static conditions. Filtration tests were carried out at 300 psi, 500 psi and 700 psi, using a HTHP cell and prepared non-Newtonian drilling fluids containing xanthan gum (XG) and carboxymethylcellulose (CMC) as viscosifier agent, in addition to calcite and barite. Filtration parameters such as permeability, porosity, pie thickness, filtration time and filtered volume have been evaluated. The permeability of the pie was determined, with the aid of a software of estimation of parameters, using the simplified theory of filtration adapted for non Newtonian fluids proposed by Massarani and Coelho de Castro(1980). The results obtained were confronted with those obtained by other methodologies. The experimental tests also showed that the properties of the pie vary with the filtration pressure.

Keywords: Static Filtration, Non-Newtonian Fluid, Simplified Theory of Filtration.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1- Processo de perfuração rotativa. | 1 |
| Figura 2 – Janela operacional de perfuração. | 2 |
| Figura 3 - Formação do reboco na parede de um poço de perfuração de petróleo..... | 9 |
| Figura 4 – Curva de filtração estática. | 10 |
| Figura 5 – Representação da formação da torta. | 12 |
| Figura 6 - (a) Volume de filtrado versus raiz quadrada do tempo; (b) <i>Slowness</i> medido e simulado versus tempo. Fonte: Adaptado Dewan & Chenevert (2001)..... | 13 |
| Figura 7 – Representação filtração plana com formação de torta..... | 16 |
| Figura 8 – Célula de filtração HTHP. | 23 |
| Figura 9 – Esquema simplificado da célula HTHP utilizada nos ensaios de filtração. .. | 24 |
| Figura 10 - Peças da célula HTHP..... | 24 |
| Figura 11 – Agitador Hamilton Beach..... | 26 |
| Figura 12 – Balança de lama Fann modelo 140..... | 26 |
| Figura 13 – Analisador de partículas Malvern..... | 27 |
| Figura 14 – Picnômetro utilizado para o ensaio..... | 27 |
| Figura 15 – Reômetro Haake RheoStress 1, modelo K10. | 29 |
| Figura 16 – Distribuição granulométrica da calcita. | 32 |
| Figura 17 – Distribuição granulométrica da barita..... | 32 |
| Figura 18 – Gráfico Tensão de cisalhamento <i>versus</i> Taxa de deformação das suspensões de goma xantana e barita e também goma xantana e calcita..... | 34 |
| Figura 19 - Gráfico viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação das suspensões de goma xantana e barita e goma xantana e calcita. | 35 |
| Figura 20 - Gráfico Tensão de cisalhamento <i>versus</i> Taxa de deformação das suspensões de GX e barita e GX e calcita..... | 36 |
| Figura 21 - Gráfico viscosidade aparente <i>versus</i> taxa de deformação das suspensões de CMC e barita e CMC e calcita. | 37 |
| Figura 22 - Gráfico Tensão de cisalhamento <i>versus</i> Taxa de deformação das quatro suspensões. | 37 |
| Figura 23 - Gráfico volume de filtrado obtido <i>versus</i> tempo de filtração das suspensões de GX e barita em diferentes pressões. | 38 |
| Figura 24 – Exemplo torta formada na filtração com o fluido GX + barita. | 39 |
| Figura 25 - Gráfico volume de filtrado obtido <i>versus</i> tempo de filtração das suspensões de GX e calcita em diferentes pressões..... | 40 |
| Figura 26 – Torta formada na filtração do fluido GX e calcita. | 41 |
| Figura 27 - Efeito dos sólidos calcita e barita nos fluidos com goma xantana. | 42 |
| Figura 28 - Gráfico volume de filtrado obtido <i>versus</i> tempo de filtração das suspensões de carboximetilcelulose e barita em diferentes pressões. | 42 |
| Figura 29 – Volume de filtrado obtido no experimento com o fluido CMC e barita. | 43 |
| Figura 30 - Gráfico volume de filtrado obtido <i>versus</i> tempo de filtração das suspensões de carboximetilcelulose e calcita em diferentes pressões. | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 31 - Efeito do sólido Carboximetilcelulose com o adensante calcita e barita..... | 45 |
| Figura 32 - Efeito do viscosificante nas suspensões com o adensante barita. | 46 |
| Figura 33 - Efeito do viscosificante nas suspensões com o adensante calcita. | 46 |
| Figura 34 – Triplicata realizada com o fluido goma xantana e barita a 500 psi. | 47 |
| Figura 35 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e barita a 500 psi | 48 |
| Figura 36 – Triplicata realizada com o Fluido carboximetilcelulose e barita a 500 psi. 48 | |
| Figura 37 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e barita a 500 psi. | 49 |
| Figura 38 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e barita a 300 psi. | 51 |
| Figura 39 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e barita a 500 psi. | 51 |
| Figura 40 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e barita a 700 psi. | 51 |
| Figura 41 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e calcita a 300 psi. | 52 |
| Figura 42 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e calcita a 500 psi. | 52 |
| Figura 43 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e calcita a 700 psi. | 52 |
| Figura 44 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e barita a 300 psi..... | 54 |
| Figura 45 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e barita a 500 psi..... | 54 |
| Figura 46 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e barita a 700 psi..... | 54 |
| Figura 47 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e calcita a 300 psi..... | 55 |
| Figura 48 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e calcita a 500 psi..... | 55 |
| Figura 49 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e calcita a 700 psi..... | 55 |
| Figura 50 – Gráfico de permeabilidade x pressão. | 58 |
| Figura 51 - Gráfico <i>t/V versus</i> volume de filtrado das suspensões de GX e barita em diferentes pressões..... | 66 |
| Figura 52 - Gráfico <i>t/V versus</i> volume de filtrado das suspensões de GX e calcita em diferentes pressões..... | 66 |
| Figura 53 - Gráfico <i>t/V versus</i> volume de filtrado das suspensões de CMC e barita em diferentes pressões..... | 67 |
| Figura 54 - Gráfico <i>t/V versus</i> volume de filtrado das suspensões de CMC e calcita em diferentes pressões..... | 67 |
| Figura 55 - Gráfico volume de filtrado obtido <i>versus</i> tempo de filtração das suspensões de GX e barita a 300 psi, dos ensaios realizados em triplicata..... | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 56 - Gráfico volume de filtrado obtido <i>versus</i> tempo de filtração das suspensões de GX e barita a 700 psi, dos ensaios realizados em triplicata..... | 68 |
| Figura 57 - Gráfico volume de filtrado obtido <i>versus</i> tempo de filtração das suspensões de CMC e barita a 300 psi, dos ensaios realizados em triplicata..... | 69 |
| Figura 58 - Gráfico volume de filtrado obtido <i>versus</i> tempo de filtração das suspensões de CMC e barita a 700 psi, dos ensaios realizados em triplicata..... | 69 |
| Figura 59 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e barita a 300 psi. | 70 |
| Figura 60 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e barita a 700 psi. | 70 |
| Figura 61 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e barita a 300 psi. | 71 |
| Figura 62 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e barita a 700 psi. | 71 |
| Figura 63 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e calcita a 300 psi. | 72 |
| Figura 64 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e calcita a 500 psi. | 72 |
| Figura 65 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e calcita a 700 psi. | 73 |
| Figura 66 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e calcita a 300 psi. | 73 |
| Figura 67 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e calcita a 500 psi. | 74 |
| Figura 68 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e calcita a 700 psi. | 74 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Modelos reológicos. | 7 |
| Tabela 2 – Características do papel de filtro utilizado para filtração..... | 25 |
| Tabela 3 – Formulação para os fluidos não Newtonianos. | 25 |
| Tabela 4 - Experimentos realizados | 30 |
| Tabela 5- Equações utilizada nos cálculos dos parâmetros. | 31 |
| Tabela 6 – Parâmetros obtidos na caracterização dos sólidos..... | 33 |
| Tabela 7 – Dados obtidos na picnometria da calcita. | 33 |
| Tabela 8 – Dados obtidos na picnometria da barita. | 34 |
| Tabela 9 - Parâmetros reológicos dos fluidos..... | 35 |
| Tabela 10 - Parâmetros reológicos dos fluidos..... | 38 |
| Tabela 11 – Parâmetros experimentais de filtração do fluido goma xantana e barita. ... | 39 |
| Tabela 12 - Parâmetros experimentais de filtração do fluido GX e calcita. | 40 |
| Tabela 13 - Parâmetros experimentais de filtração do fluido carboximetilcelulose e barita. | 43 |
| Tabela 14 - Parâmetros experimentais de filtração do fluido carboximetilcelulose e calcita. | 44 |
| Tabela 15 - Parâmetros estimados para equação 47, fluido GX e barita e GX e calcita. | 50 |
| Tabela 16 - Parâmetros estimados para equação 30, fluidos CMC e barita e CMC e calcita. | 53 |
| Tabela 17 – Parâmetro calculado da torta de filtração dos fluidos GX e barita e GX e calcita. | 56 |
| Tabela 18 - Parâmetro calculado da torta de filtração do fluido CMC e barita. | 57 |
| Tabela 19 - Permeabilidade calculada..... | 58 |
| Tabela 20- Índice de compressibilidade..... | 59 |

NOMENCLATURA

| | | |
|-------------------|--|------------------------|
| A | Área de filtração | L^2 |
| API | <i>American Petroleum Institute;</i> | - |
| a | Parâmetro da equação 44 | - |
| b | Parâmetro da equação 44 | - |
| BaSO ₄ | Sulfato de bário | - |
| C _s | Concentração de sólidos no fluido | M/L^3 |
| CaCO ₃ | Carbonato de cálcio | - |
| CMC | Carboximetil celulose | - |
| FANN | Marca do agitador | - |
| GX | Goma xantana | - |
| HTHP | <i>High Temperature/High Pressure;</i> | - |
| k_m | Permeabilidade do meio filtrante | L^2 |
| k_1 | Permeabilidade do meio poroso | L^2 |
| k_{mc} | Permeabilidade da torta | L^2 |
| k_{mc0} | Permeabilidade de referência | L^2 |
| LEF | Laboratório de Escoamento de Fluidos | - |
| M | Índice de consistência do fluido (Pa.sn); | $(M/L) \epsilon^{n-2}$ |
| n | Índice de comportamento do fluido | - |
| P | Pressão aplicada ao sistema | $M/L \epsilon^2$ |
| P_{mc} | Pressão através da torta | $M/L \epsilon^2$ |
| P_m | Massa da torta úmida | M |
| P_s | Massa da torta seca | M |
| <i>Power Law</i> | Modelo reológico | - |
| q(t) | Fluxo de filtrado | L/ ϵ |
| R^2 | coeficiente de correlação | - |
| R_m | Resistência do meio filtrante | L^{-1} |
| S_1, S_2 | <i>Slowness</i> | - |
| <i>Slowness</i> | Utilizado na metodologia de Dewan & Chenevert (2001) | - |
| <i>Software</i> | Programa computacional | - |
| <i>Spurt Loss</i> | Fase inicial que antecede a formação da torta de filtração | - |
| t | Tempo | ϵ |
| T_c | Espessura do meio filtrante | L |
| T_{mc} | Espessura da torta | L |
| V | Volume de filtrado | L^3 |
| V_s | Volume de sólidos no fluido | L^3 |
| V_t | Volume total de fluido | L^3 |
| OFITE | <i>OFI Testing Equipment</i> | - |
| D_p | Diâmetro da esfera de mesmo volume da partícula | - |
| D_s | Diâmetro da esfera de mesma área superficial da partícula | - |
| ΔP_c | Pressão através do meio filtrante; | $M/L \epsilon^2$ |
| ΔP_1 | Variação de pressão na torta | $M/L \epsilon^2$ |
| ΔP_2 | Variação de pressão no meio filtrante | $M/L \epsilon^2$ |

Letras gregas

| | | |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| A | Resistividade da torta; | L/M |
| $\langle \alpha \rangle$ | Resistividade média da torta | L/M |
| B | Parâmetro de Kozeny-Carman | - |
| Λ | Taxa de deformação do fluido; | ϵ^{-1} |
| T | Tensão de cisalhamento; | M/L ϵ^2 |
| μ | Viscosidade dinâmica; | M/L ϵ |
| μ_p | Viscosidade plástica | M/L ϵ |
| μ_∞ | Viscosidade limite | M/L ϵ |
| Pf | Densidade do fluido; | M/L ³ |
| Ps | Densidade do sólido; | M/L ³ |
| E | Porosidade da torta | - |
| Γ | Parâmetro da equação 47 | - |
| Δ | um multiplicador | - |
| V | índice de compressibilidade | - |
| \emptyset | Esfericidade | - |
| Φ_{mc0} | Porosidade de referência | (M/L ϵ^2) ^Z |
| Ω | Fator geométrico | - |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 4 |
| 2.1 | Fluido de Perfuração..... | 4 |
| 2.1.1 | Características do fluido de perfuração..... | 4 |
| 2.1.2 | Classificação dos fluidos de perfuração..... | 5 |
| 2.1.2.1 | Fluido a base água..... | 5 |
| 2.1.2.2 | Fluido a base óleo | 5 |
| 2.1.2.3 | Fluido a base sintética | 6 |
| 2.1.2.4 | Fluido a base gás..... | 6 |
| 2.1.3 | Propriedades dos fluidos de perfuração | 6 |
| 2.1.4 | Classificação reológica dos fluidos | 6 |
| 2.2 | Aditivos | 7 |
| 2.2.1 | Adensantes | 8 |
| 2.2.2 | Viscosificantes | 8 |
| 2.3 | O Processo de Formação de Torta de Filtração na Perfuração..... | 8 |
| 2.3.1 | Principais características das tortas de filtração | 10 |
| 2.3.1.1 | Porosidade | 10 |
| 2.3.1.2 | Espessura da torta..... | 10 |
| 2.3.1.3 | Permeabilidade..... | 11 |
| 2.4 | A Teoria Simplificada da Filtração..... | 15 |
| 2.4.1 | Filtração com formação de torta incompressível | 15 |
| 2.4.2 | Filtração com formação de torta compressível | 17 |
| 2.4.3 | Teoria simplificada da filtração para fluidos não Newtonianos..... | 18 |
| 2.5 | Trabalhos de Filtração Desenvolvidos no LEF..... | 21 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 23 |
| 3.1 | Materiais | 23 |
| 3.1.1 | Célula de filtração..... | 23 |
| 3.1.2 | Fluido de perfuração | 25 |
| 3.2 | Métodos..... | 25 |
| 3.2.1 | Preparo do fluido de perfuração | 25 |
| 3.2.2 | Caracterização do tamanho de partículas | 27 |
| 3.2.3 | Caracterização do fluido de perfuração | 27 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.2.3.1 | Densidade do sólido | 27 |
| 3.2.3.2 | Densidade do fluido | 28 |
| 3.2.3.3 | Concentração de Sólidos..... | 28 |
| 3.2.3.4 | Parâmetros reológicos | 29 |
| 3.2.4 | Experimentos de filtração | 29 |
| 4.1 | Caracterização dos Sólidos | 32 |
| 4.1.1 | Caracterização do tamanho de partículas | 32 |
| 4.1.2 | Picnometria..... | 33 |
| 4.1.3 | Concentração de sólidos | 34 |
| 4.1.4 | Estudo Reológico | 34 |
| 4.2 | Dados Experimentais das Filtrações | 38 |
| 4.2.1 | Experimentos com os fluidos viscosificados com goma xantana | 38 |
| 4.2.1.1 | Utilização do adensante barita..... | 38 |
| 4.2.1.2 | Utilização do adensante calcita | 40 |
| 4.2.1.3 | Comparação do efeito do sólido na filtração dos fluidos com GX | 41 |
| 4.2.2 | Experimentos com os fluidos viscosificados com carboximetilcelulose | 42 |
| 4.2.2.1 | Utilização do adensante barita..... | 42 |
| 4.2.2.2 | Utilização do adensante calcita | 44 |
| 4.2.2.3 | Comparação do efeito do sólido nos fluidos com carboximetilcelulose | 45 |
| 4.2.3 | Efeito do viscosificante | 46 |
| 4.2.4 | Erro experimental | 47 |
| 4.3 | Estimação de Parâmetros | 49 |
| 4.3.1 | Estimação de parâmetros da equação da teoria simplificada da filtração dos fluidos viscosificados com goma xantana. | 49 |
| 4.3.2 | Estimação de parâmetros da equação da teoria simplificada da filtração dos fluidos viscosificados com CMC. | 53 |
| 4.4 | Cálculo dos Parâmetros da Torta de Filtração | 56 |
| 4.4.1 | Parâmetros de filtração obtidos dos fluidos com goma xantana. | 56 |
| 4.4.2 | Parâmetros de filtração obtidos dos fluidos com CMC. | 57 |
| 4.4.3 | Cálculo do índice de compressibilidade..... | 58 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 60 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 61 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 62 |

1 INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo resulta na perfuração de poços promovendo a interação entre a rocha reservatória e a superfície. As perfurações de poços de petróleo, realizadas normalmente com o auxílio de uma sonda, são processos que demandam muita atenção pela necessidade de serem realizadas no menor tempo possível e de forma segura, visando minimizar o elevado custo do processo e possíveis danos ao reservatório (WALDMANN, 2005).

As plataformas de perfuração rotativas são comumente utilizadas na perfuração de poços. Nestes casos, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração, Figura 1 (BOURGOYNE *et al.*, 1991).

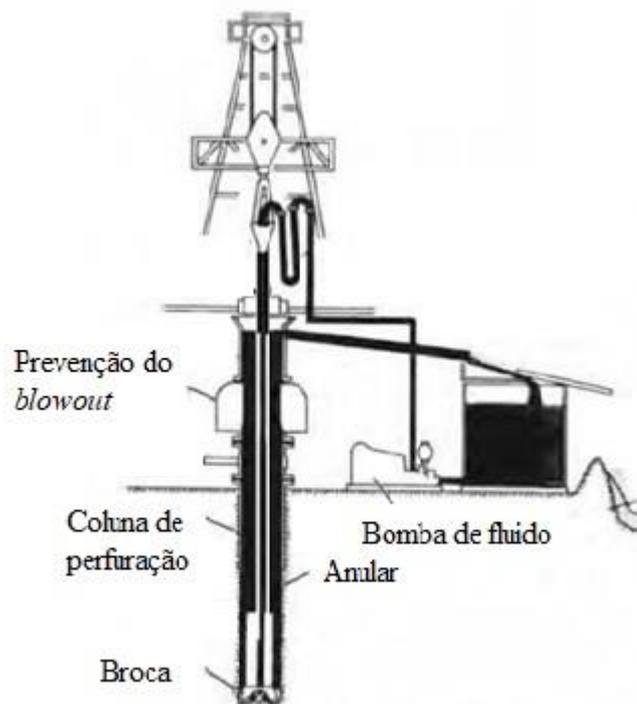


Figura 1- Processo de perfuração rotativa.

Fonte: adaptada Bourgoyne *et al.* (1991).

Durante esse processo, as rochas são rompidas e são formados cascalhos. Para o prosseguimento da perfuração, esses cascalhos são carregados até a superfície devido a circulação de um fluido de perfuração, armazenado em tanques, e injetado por bombas no interior da coluna. O fluido percorre toda a coluna e sai pelos jatos da broca, retornando à superfície pelo espaço anular entre a coluna e o poço carregando os cascalhos. Quando atinge determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e uma coluna de revestimento de aço, que possui um diâmetro menor ao da broca, é inserida ao poço. Com o intuito de isolar as rochas atravessadas e permitir assim o avanço da perfuração com segurança, a região anular (espaço entre os tubos do revestimento e as paredes do poço) é cimentada. Após esse procedimento, a coluna de

perfuração é novamente inserida no poço, realizando o mesmo procedimento anterior, só que dessa vez com uma nova broca de diâmetro menor do que a da coluna do revestimento (THOMAS, 2004).

Existem três tipos de técnicas de perfuração que podem ser utilizadas durante a perfuração de poços de petróleo, são elas: a perfuração *overbalance*, a perfuração *underbalance* e a perfuração *nearbalance*. A escolha da técnica a ser utilizada depende de fatores técnicos como a pressão de poros e fratura da formação, da estabilidade da formação e a viabilidade econômica (ABIMBOLA; KHAN; KHAKZAD, 2014).

A perfuração *overbalance* é caracterizada por trabalhar com a pressão de operação entre a pressão de poros (pressão atuante no fluido que se encontra no espaço poroso da rocha) e a pressão de fratura (valor de pressão para o qual a rocha se rompe) para que a rocha não seja fraturada; esse intervalo é conhecido como janela operacional como pode ser observado na Figura 2.

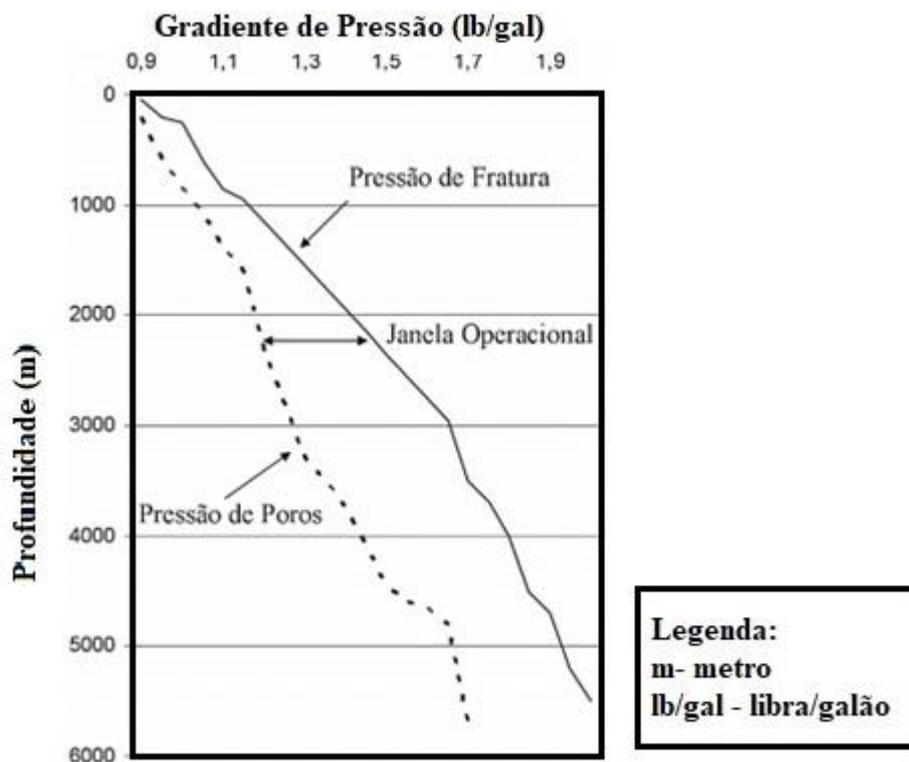


Figura 2– Janela operacional de perfuração.

Fonte: adaptada Omland (2009).

Na perfuração *nearbalance*, a pressão do poço é mantida levemente acima da pressão de poro e a perfuração *underbalance* é caracterizada por utilizar uma pressão de operação no poço menor que a pressão de poro da rocha pelo uso de fluidos de perfuração de baixa densidade (ABIMBOLA; KHAN; KHAKZAD, 2014; OSTROOT *et al.*, 2007). Conhecer os valores da pressão de poros e da pressão de fratura é de fundamental importância para o planejamento da perfuração de um poço de petróleo, uma vez que a pressão de operação deve ser mantida dentro de uma zona de segurança a fim de prevenir o escoamento indesejável de fluidos das formações permeáveis para

dentro do poço, fenômeno conhecido como influxo, e para que se tenha a realização de uma perfuração de maneira segura.

Nas operações *overbalance*, geralmente utilizada pela Petrobrás, o diferencial de pressão entre o fluido e a rocha provoca a formação de um reboco, denominado torta de filtração, proveniente da filtração do fluido de perfuração na parede do poço. Durante a perfuração, a filtração pode ocorrer de duas formas: estática e dinâmica. A filtração dinâmica ocorre quando há circulação de fluido no poço. Nela a taxa de filtração é controlada pelo equilíbrio entre a taxa de deposição de partículas e a erosão da torta provocada pelo escoamento axial do fluido de perfuração. A filtração estática ocorre quando não há bombeamento de fluido para o poço, e neste caso a taxa de filtração é controlada pela espessura da torta que cresce continuamente com o tempo provocando o decréscimo da taxa de filtração e da permeabilidade da torta (BARBOSA,2016).

Este trabalho abordou a filtração estática, realizando experimentos a diferentes pressões, testando fluidos de perfuração base aquosa preparados com goma xantana (GX) ou carboximetilcelulose (CMC), e contendo os sólidos barita ou calcita. Foram calculados parâmetros como a porosidade, índice de compressibilidade e espessura da torta de filtração obtida nos experimentos de filtração, além de sua permeabilidade calculada utilizando a teoria simplificada da filtração modificada para fluidos não Newtonianos que seguem a lei da potência (modelo de *Power Law*). Portanto o objetivo principal deste trabalho foi estudar as propriedades da torta de filtração formada na filtração de fluidos não-Newtonianos adaptados ao modelo de *Power Law*, além do objetivo específico que foi fazer o levantamento dos parâmetros de permeabilidade, porosidade, espessura e fator de correção obtidos utilizando a teoria simplificada da filtração adaptada para fluidos não-Newtonianos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fluido de Perfuração

Os fluidos de perfuração são utilizados nas perfurações de poços desde 1901, tendo a sua primeira utilização no poço de Spindletop no Texas (Bourgoyne *et al.*, 1991). Desde então, a indústria do petróleo encara o desafio do desenvolvimento do fluido de perfuração visando o melhor custo, performance técnica e também as exigências ambientais.

Os fluidos de perfuração são formados a partir de misturas de líquidos, sólidos, aditivos químicos e/ou gases, podendo assumir o aspecto de suspensões, emulsões e até mesmo dispersões coloidais de acordo com o estado físico de seus componentes, e geralmente apresentam um comportamento não Newtoniano (VEIGA, 1998). Por este motivo os fluidos de perfuração são chamados, neste trabalho, de suspensões.

Uma das maiores preocupações no processo de perfuração de um poço é a eficiência entre o fluido de perfuração e a natureza do poço a ser perfurado. Por isso, o fluido de perfuração tornou-se objeto de estudo e atualmente o seu desenvolvimento encontra-se cada vez mais qualificado, de forma que todas as propriedades necessárias aos fluidos sejam adquiridas por meio da incorporação de aditivos desenvolvidos especificamente para corrigir e/ou melhorar o desempenho dos mesmos durante a operação de perfuração de poços, garantindo, assim, o sucesso da perfuração (BARBOSA, 2006).

De acordo com Caenn e Chillingar (1996) e Darley e Gray (1988) os fluidos de perfuração são responsáveis por:

- Lubrificar e resfriar a broca;
- Conservar a estabilidade do poço;
- Reduzir o atrito entre a coluna de perfuração e a parede do poço;
- Carrear os cascalhos cortados pela broca durante a perfuração desde a região anular até a superfície, para que estes cascalhos sejam separados do fluido, conservando o poço limpo;
- Manter a pressão hidrostática na formação rochosa maior que a pressão de poros a fim prevenir o influxo indesejável de fluido da formação para dentro do poço;
- Formar uma torta de filtração, fina e de baixa permeabilidade, evitando a invasão de filtrado e o inchamento de formações hidratáveis (argilas);

2.1.1 Características do fluido de perfuração

De acordo com Thomas (2001), para que os fluidos de perfuração exerçam as funções citadas no item anterior, é necessário que eles possuam características que serão listadas a seguir:

- Ser bombeável;
- Ser quimicamente estável;
- Aceitar qualquer tratamento, físico ou químico;

- Ser inerte em relação a danos às rochas produtoras;
- Estabilizar as paredes do poço, mecânica e quimicamente;
- Manter os sólidos em suspensão quando estiver em repouso;
- Separar os cascalhos na superfície, os quais foram produzidos pela broca durante a perfuração;
- Apresentar baixo grau de corrosão em relação a coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação;

2.1.2 Classificação dos fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração são classificados de acordo com a sua composição dependendo do seu constituinte principal (THOMAS, 2004).

De acordo com FERREIRA (2002), os fluidos podem ser divididos em quatro tipos básicos:

- Fluidos à base água
- Fluidos à base óleo
- Fluidos à base sintética
- Fluidos à base Gás.

2.1.2.1 Fluido a base água

O fluido base água está entre os fluidos mais utilizados em indústrias *offshore* (as quais exploram petróleo no fundo do mar). Neles as partículas sólidas são suspensas em água ou salmoura, sendo a fase contínua constituída pela água. Entre os principais componentes de um fluido base água, temos, a água representando a fase dispersante, além das argilas, agentes viscosificantes e minerais que atuam como adensantes, os quais representam a fase dispersa. A principal função da água é oferecer o meio de dispersão adequado para que as argilas e polímeros resultem num fluido com valores coerentes de viscosidade, tensão e limite de escoamento, e de volume de filtrado. Com isso, os fluidos serão capazes de estabilizar as paredes do poço evitando assim efeitos indesejáveis a rocha (THOMAS, 2004).

Algumas das vantagens de ter um fluido base água é que este é considerado menos agressivo ao meio ambiente, facilita a detecção de gás no poço, além de ter menor custo inicial. Porém, fluidos a base água apresentam menor estabilidade a altas temperaturas e não podem ser usados na presença de argilas sensíveis à água, pois quando a água entra em contato com folhelhos argilosos ocorre instabilidade no poço ocasionando perda de fluido indesejada para as formações rochosas (GUIMARÃES; ROSSI, 2007).

2.1.2.2 Fluido a base óleo

O outro tipo de fluido utilizado nas indústrias *offshore* são fluidos à base óleo caracterizados por possuírem partículas sólidas suspensas em óleo. Neste tipo de fluido a fase contínua é constituída por óleo, uma vez que água é emulsionada no óleo. Pequenas gotículas de água ou de soluções aquosa constituem a fase descontínua desses fluidos. Por muito tempo este tipo de fluido foi utilizado em larga escala em função da sua elevada eficiência como inibidor de corrosão. Em contrapartida é considerado prejudicial ao meio ambiente, pois o descarte de fluidos ricos em diesel e óleos minerais, tendem a persistir por muitos anos no meio ambiente. Por este motivo,

quando a formação perfurada aceita a água como fase dispersante do fluido, os fluidos a base óleo são substituídos pelos de base água, devido ao alto custo inicial e o elevado grau de poluição(DUARTE, 2004).

2.1.2.3 Fluido a basesintética

A produção do primeiro fluido sintético foi em 1990 a partir de reações químicas de compostos puros ou agrupamentos químicos. Por possuir éster em sua composição esses fluidos de perfuração possuem alta capacidade de biodegradação e baixa toxicidade (JESUS *et al.*, 2015). Devido às restrições e limitações dos fluidos a base óleo e a base água, os fluidos a base sintética vêm sendo desenvolvidos como alternativa, ganhando assim seu espaço no mercado(SCHAFFEL, 2002).

2.1.2.4 Fluido a base gás

Conhecidos como fluidos pneumáticos, os fluidos a base gás possuem vantagens econômicas em áreas de rochas duras, onde existe pouca chance de se encontrar água. A deposição de cascalhos no poço é reduzida pois o gás promove uma rápida taxa de penetração do fluido(BOURGOYNE JR et al., 1991). Fluidos a base gás circulam através da pressão fornecida por compressores instalados na superfície. As formas básicas de fluidos utilizados na perfuração a gás são pó, névoa ou espuma (SCHAFFEL, 2002).

2.1.3 Propriedades dos fluidos de perfuração

As propriedades dos fluidos de perfuração influenciam diretamente seu comportamento, o que torna a escolha do fluido uma etapa muito importante no processo. Essas propriedades de controle podem ser físicas, as quais são mais genéricas e podem ser medidas em qualquer tipo de fluido; e também podem ser propriedades químicas, que são mais específicas e tornam possível distinguir determinados tipos de fluidos(THOMAS, 2001).

A densidade, os parâmetros reológicos, o teor de sólidos e os parâmetros de filtração são algumas das propriedades físicas medidas em sondas. E as propriedades químicas determinadas com maior frequência são o pH, a alcalinidade e os teores de cloreto.(THOMAS, 2001).

2.1.4 Classificação reológica dos fluidos

A reologia é a ciência que estuda como a matéria escoar e se deforma ao ser submetida a uma força externa. O escoamento de um fluido pode ser explicado por algumas leis que descrevem a variação contínua da taxa ou grau de deformação em função das forças ou tensões aplicadas a ele (MACHADO, 2002).

A viscosidade é um parâmetro intrínseco fundamental que caracteriza o comportamento de fluxo de um material. Matematicamente, a viscosidade (μ) é descrita como a constante de proporcionalidade que relaciona a tensão de cisalhamento (τ) com a taxa de cisalhamento (λ), como mostrado na equação 1:

$$\mu = \frac{\tau}{\lambda} \quad \text{Equação 1}$$

Os materiais são classificados de acordo com seu comportamento de fluxo, em fluidos Newtonianos e não Newtonianos, de acordo com tensão cisalhamento aplicada. Para fluidos Newtonianos, a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação são diretamente proporcionais, de modo que a viscosidade, em uma determinada temperatura, é independente da tensão aplicada. Após os estudos de Newton, observou-se que nem todos os fluidos possuíam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação. Esses fluidos foram então classificados como não Newtonianos e a constante dependente da tensão aplicada foi definida como viscosidade aparente (FOX *et al.*, 2010).

A maioria dos fluidos de perfuração a base de polímeros são não-Newtonianos, independentes do tempo e pseudoplásticos, apresentando ou não uma tensão limite de escoamento. Os fluidos não Newtonianos podem ser ajustados aos modelos reológicos de Bingham, Power Law (lei da potência), Herschell Buckley e Casson. A tabela 1, apresenta as equações dos modelos reológicos.

Tabela 1 - Modelos reológicos.

| Modelos reológicos | Equações do modelo |
|--------------------|---|
| Newtoniano | $\tau = \mu\lambda$ |
| Bingham | $\tau = \mu_p\lambda + \lambda_L$ |
| Power Law | $\tau = M\lambda^n$ |
| Herschell Buckley | $\tau = \tau_0 + \mu_p\lambda^n$ |
| Casson | $\tau^{1/2} = (\mu_\infty\lambda)^{1/2} + \tau_0^{1/2}$ |

Fonte: Machado (2002)

Onde:

τ – tensão de cisalhamento;

μ – viscosidade dinâmica;

λ – taxa de deformação;

μ_p – viscosidade plástica;

λ_L – limite de escoamento ou tensão crítica;

M – índice de consistência;

n – índice de comportamento;

μ_∞ – viscosidade limite.

2.2 Aditivos

Um dos principais componentes do fluido base água e responsáveis pelas alterações nas propriedades dos fluidos de perfuração são os aditivos. Em 1921, apareceu pela primeira vez na literatura o uso de aditivos (DARLEY & GRAY, 1988).

Os aditivos são responsáveis por desempenhar importantes funções no fluido. Dois aditivos básicos na formulação de um fluido a base água serão destacados neste trabalho: os adensantes e os viscosificantes.

2.2.1 Adensantes

Os adensantes são responsáveis por formar uma película de baixa permeabilidade junto à parede do poço, minimizando a invasão indesejada de fluido a rocha. Como exemplo, temos: calcita e barita (MELO, 2008). Fatores que influenciam na escolha do adensante a ser utilizado são a sua densidade, dureza e custo (BOURGOYNE JR *et al.*, 1991).

2.2.2 Viscosificantes

Os viscosificantes fornecem ao fluido importantes características as quais permitem manter os sólidos e cascalhos em suspensão durante o processo de perfuração (CAENN; CHILLINGAR, 1996). A goma xantana (GX), a carboximetilcelulose (CMC) e argilas bentoníticas são exemplos de agentes viscosificantes comumente usados em fluidos de perfuração.

O comportamento reológico dos fluidos de perfuração melhora com a adição de polímeros como a goma xantana e a carboximetilcelulose em fluidos base água, devido à afinidade química existente entre os polímeros e a água. Essa melhora de comportamento reológico da-se devido ao aumento da viscosidade do fluido devido a hidratação das cadeias poliméricas pelo contato existente entre o polímero e a água (HANNA *et al.*, 2006).

A goma xantana é um biopolímero ramificado, aniônico, de alta massa molar produzida pelas bactérias do gênero *Xanthomonas*, durante seu ciclo normal de vida por meio do processo de fermentação. Este biopolímero ganha destaque por possuir alta viscosidade mesmo em baixas concentrações (ARAÚJO *et al.*, 2005).

A goma xantana pode ser empregada na área cosmética, em formulações farmacêuticas, produtos agrícolas, e as indústrias têxtil e petrolífera. Algumas das características deste biopolímero são: elevada viscosidade, pseudoplasticidade, estabilidade em ampla faixa de pH, variações de altas temperaturas, e estabilidade a altas concentrações de sais (VIANA, 2015).

A carboximetilcelulose está entre os polímeros modificados mais utilizados na indústria petrolífera. De caráter aniônico, o polímero produzido pela carboximetilação da celulose, possui diversos valores de peso molecular.

As propriedades reológicas das soluções com este polímero são influenciadas tanto pela temperatura quanto pela concentração de carboximetilcelulose, de acordo com estudos do comportamento reológico realizados por Abdelrahim e Ramaswamy (1995).

Também tem sido estudada a relação entre a estrutura molecular de polímeros carboidratados e as propriedades reológicas da solução. Kulicket *et al.* (1996), por exemplo, analisaram a caracterização em termos de estrutura molecular de soluções aquosas de carboximetilcelulose e sua influência nos parâmetros reológicos.

2.30 Processo de Formação de Torta de Filtração na Perfuração

A perfuração de poços de petróleo pode ocasionar um processo de formação de torta de filtração na parede do poço. Segundo Ferraz (2014), o fenômeno da filtração ocorre quando uma solução contendo sólidos em suspensão é pressurizada contra um meio poroso; as partículas sólidas presentes na suspensão, que possuem tamanho maior que os poros do meio filtrante, tendem a ser depositar na superfície do meio

poroso resultando na formação de um reboco. As partículas menores que os poros, tendem a escoar pelo meio filtrante juntamente com o fluido, conhecido como filtrado.

Dentre as técnicas de perfuração existentes, a perfuração *overbalance* é a mais utilizada na indústria devido a sua baixa complexidade de controle da operação e o baixo custo. Essa técnica tem como objetivo manter a pressão hidrostática do fluido de perfuração no poço superior a pressão das formações rochosas a fim de evitar influxo de fluidos para dentro do poço. Em contrapartida, o fluido tem a tendência a invadir a formação rochosa, devido ao diferencial de pressão do poço para a formação ser positivo, o que pode ocasionar a redução na produtividade do poço (BOURGOYNE *et al.*, 1991; JIAO & SHARMA, 1992).

O reboco formado na parede da formação rochosa é também conhecido como torta de filtração. Essa torta de filtração formada tende a aumentar de espessura mediante a passagem de fluido (filtrado), promovendo uma gradual redução da taxa de filtração.

Na figura 3 pode ser observado a representação desse processo de formação do reboco na parede do poço seguida de filtração.

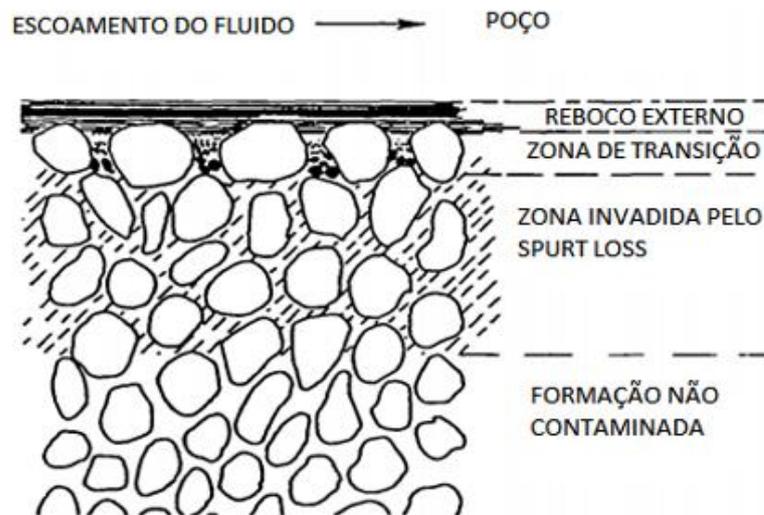


Figura 3 - Formação do reboco na parede de um poço de perfuração de petróleo.

Fonte: Peng (1990).

A Figura 4, a seguir, representa duas fases distintas que ocorrem durante o processo de filtração. A fase inicial que antecede a formação do reboco, é conhecida como *spurt loss*. Nesta fase, acaba ocorrendo uma perda inicial de fluido para a formação, uma vez que ainda não apresentou a formação do reboco na parede do poço. Na segunda fase, após a formação da torta de filtração sobre a superfície do meio filtrante, o crescimento da torta está diretamente ligado a velocidade de filtração. Nesta fase, o fluxo de fluido para a formação é controlado pela permeabilidade da torta (CARTER, 1957). Desta forma a caracterização das tortas formadas pela filtração de fluidos de perfuração ganham destaque no projeto e formulação de fluidos que escoam no poço.

R. YAO *et al.* (2014) demonstram que as características da torta formada, durante o processo de filtração, são de extrema importância para o controle de filtragem. Assim pode-se afirmar que o volume de filtrado depende da torta de filtração formada.

As propriedades da torta são decorrentes de fatores como a físico-química da suspensão sólido-fluido, a colmatação originada pela migração das partículas de pequenas dimensões através da torta e o processo deformatório imposto pelo escoamento do fluido sobre a matriz sólida, o que significa que a configuração e as condições de operação do filtro afetam as características da torta nele produzida (MASSARANI, 1985).

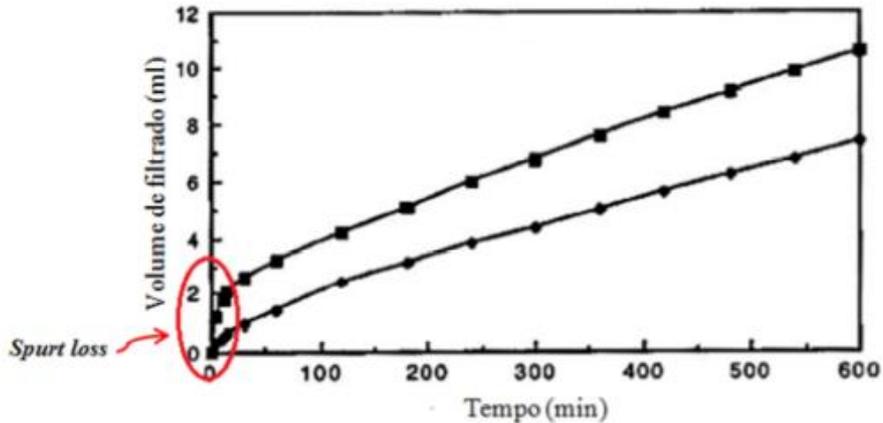


Figura 4 – Curva de filtragem estática.

Fonte: Adaptado de Jião & Sharma (1993).

2.3.1 Principais características das tortas de filtração

2.3.1.1 Porosidade

A porosidade é um parâmetro da torta de filtração que representa a fração de volume do leito não ocupado por sólido. Ela é um dado experimental obtido a partir das massas de tortas úmidas e secas das filtrações. Pode ser definida também como a relação entre o volume de vazios de uma rocha e o volume total da rocha, e pode ser calculada conforme a equação 2:

$$\varepsilon = \frac{v_l}{v_l + v_s} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

ε – porosidade

v_s – volume de sólido

v_l – volume de líquido

A porosidade varia com a pressão durante a formação do leito que se modifica a medida que a torta é formada. Quanto maior a pressão aplicada mais a estrutura tende a se deformar, dessa forma a porosidade tende a diminuir com o aumento da pressão.

2.3.1.2 Espessura da torta

Durante a invasão de fluido na formação, os sólidos em suspensão tendem a fluir juntamente com o líquido, ocasionando a obstrução dos poros e formando uma torta de filtração. Essa torta tende a crescer ilimitadamente quando o fluido de perfuração não está circulando no poço. Já quando o fluido começa a circular, a torta tem sua espessura limitada e a velocidade de filtração é proporcional ao tempo (ASME COMMITTEE, 2005). A espessura da torta de filtração pode ser verificada de duas formas: através de uma medição experimental por meio de uma régua de microescala ou calculada a partir da equação 3 (Dewan e Chenevert, 2001).

$$T_{mc} = \frac{W_w}{A(1-\varepsilon)\rho_s} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

T_{mc} – espessura da torta

W_w – massa da torta molhada

ε – porosidade da torta

ρ_s – densidade do material particulado

A – área de filtração

2.3.1.3 Permeabilidade

Com o crescimento da torta de filtração na parede da formação rochosa, o fluxo de fluido para o interior da formação é governado pela permeabilidade da torta. Esse crescimento de torta nas paredes do poço é importante do ponto de vista da perda de filtrado e de controle de danos a formação, visto que uma torta de baixa permeabilidade reduz a invasão de fluido para a formação (JIÃO & SHARMA, 1993). A permeabilidade da torta de filtração formada durante um processo de perfuração de um poço pode ser determinada por diferentes modelos.

Com base na lei de Darcy desenvolvida por Henry Darcy em 1856, proposta para escoamento em meios porosos, uma série de integrações e substituições dão origem a equação 4 de Engelhardt e Schindewolf (1952), onde é possível calcular a permeabilidade do meio poroso.

$$k = \frac{V \cdot T_{mc} \cdot \mu}{2 \cdot t \cdot \Delta P \cdot A} \quad \text{Equação 4}$$

onde V é o volume de filtrado, T_{mc} é a espessura da torta, t é o tempo, P é a pressão, A é a área de filtração e μ é a viscosidade do filtrado.

Um equacionamento capaz de calcular parâmetros da torta de filtração, como a permeabilidade e a compressibilidade, foi desenvolvido por Dewan e Chenevert (2001). O equacionamento apresentado pelos autores baseia-se na lei de Darcy e em outras correlações propostas na literatura, partindo da hipótese de que o escoamento de um fluido que contém sólidos, provocado por um diferencial de pressão entre o poço e a formação, permeia uma matriz porosa. Conforme o fluido é pressionado contra o meio poroso, ele é filtrado e as partículas sólidas presentes são retidas na parede do meio poroso, dando origem à torta de filtração conforme demonstra a figura 5.

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

$$q(t) = \frac{(P - P_{mc})k_c}{14700 \cdot \mu \cdot t_c} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo: $q(t)$ é o fluxo de filtração, P é a pressão sobre o fluido, P_{mc} é a pressão através da torta, k_c a permeabilidade do meio filtrante, μ a viscosidade do filtrado e t_c a espessura do meio filtrante.

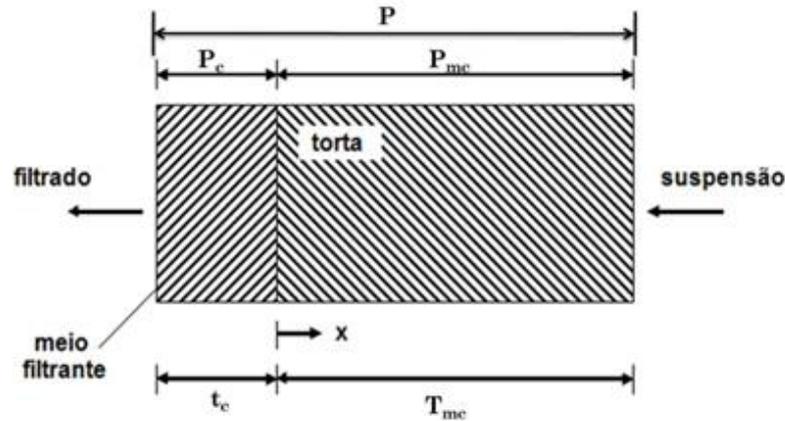


Figura 5 – Representação da formação da torta.

Fonte: Barbosa (2016).

A equação de Darcy (1856) para a queda de pressão através da torta pode ser representada por:

$$P_{mc} = 14700 \cdot \frac{q(t) \cdot T_{mc}(t) \cdot \mu}{k(t)} \quad \text{Equação 6}$$

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

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

$$k = \frac{k_{mc0}}{P_{mc}^v(t)} \quad \text{Equação 7}$$

onde, k_{mc0} é a permeabilidade de referência definida para uma pressão diferencial de 1 psi e v é o índice de compressibilidade.

Para obter-se permeabilidade de referência, necessária a equação 7, utiliza-se a equação 8 para o cálculo, deduzida por Dewan e Chenevert (2001):

$$k_{mc0} = 14700 \cdot \frac{m \mu s}{P^{(1-v)} \left(1 - s - \frac{\phi_{mc0}}{\rho \delta v}\right)} \quad \text{Equação 8}$$

onde, m é um parâmetro e s a fração volumétrica de sólidos no fluido, calculados pelas equações 9 e 10, respectivamente e δ um multiplicador na faixa de 0,1 a 0,2, e ϕ_{mc0} porosidade de referência definida para uma pressão diferencial de 1 psi. Sendo:

$$m = \frac{2t_1}{S_1^2} \quad \text{Equação 9}$$

$$S = \frac{V_s}{V_f} \quad \text{Equação 10}$$

onde (t_1, S_1) é o par de coordenadas do início da mudança de pressão, V_s é o volume de sólidos no fluido e V_f é o volume do fluido.

Dewan & Chenevert (2001) construíram gráficos de *slowness*(v) em função do tempo para visualizar melhor a influência da mudança de pressão quando comparado com a curva de volume de filtrado pela raiz quadrada do tempo, ilustrada na Figura 6(a). A mudança de pressão gera uma queda brusca no valor de *slowness* (s/cm), conforme ilustra a Figura 6(b).

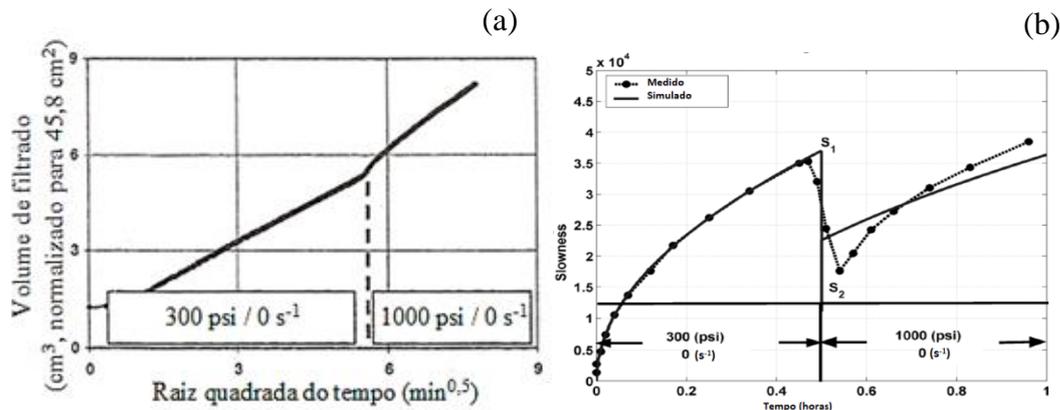


Figura 6 - (a) Volume de filtrado versus raiz quadrada do tempo; (b) *Slowness* medido e simulado versus tempo. Fonte: Adaptado Dewan & Chenevert (2001).

Nos experimentos de filtração estática, é possível obter S_1 e S_2 , exibidos na figura 6(b), necessários para o cálculo do índice de compressibilidade através da equação 11.

$$v = 1 - \frac{\log S_1/S_2}{\log P_1/P_2} \quad \text{Equação 11}$$

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

De acordo com Massarani (1989), um modelo utilizado para o cálculo da permeabilidade em um meio poroso é o de Kozeny-Carman, onde a permeabilidade está relacionada aos parâmetros geométricos do meio através da equação 12:

$$k_1 = \frac{(\phi D_p)^2 \cdot \varepsilon^3}{36\beta \cdot (1-\varepsilon)^2} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

k_1 – permeabilidade do meio poroso;
 D_p – diâmetro médio de Sauter;

ϕ – esfericidade;
 ε – porosidade;
 β – parâmetro de Kozeny-Carman.

De acordo com Medeiros (2011), o valor de β pode ser calculado pela equação 13 a seguir:

$$\beta = \frac{\varepsilon^3 \left[1 + \frac{2}{3}(1-\varepsilon)^{5/3} \right]}{2(1-\varepsilon) \left[1 - \frac{3}{2}(1-\varepsilon)^{1/3} + \frac{3}{2}(1-\varepsilon)^{5/3} - (1-\varepsilon)^2 \right]} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:
 ε – porosidade;
 β – parâmetro de Kozeny-Carman.

E a esfericidade pode ser calculada pela equação 14:

$$\phi = \frac{\pi dp^2}{\pi ds^2} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:
 ϕ – esfericidade;
 dp – diâmetro da esfera de mesmo volume da partícula;
 ds – diâmetro da esfera de mesma área superficial da partícula.

Utilizou-se um valor de 0,8 para a esfericidade (ϕ).

Jaffal, Mohtar e Gray (2016) realizaram experimentos de filtração onde obtiveram dados de volume de filtrado *versus* tempo, e devido à complexidade da formação da torta e dificuldade de medição das propriedades durante a filtração, eles realizaram uma modelagem para avaliar a validade de um novo método proposto (*Wider Windows Filtration Model* - WWFM) e investigar a capacidade do modelo para prever as propriedades da torta de filtração. Além de avaliar as propriedades da torta de filtração pelo WWFM, os autores também utilizaram o equacionamento de Dewan e Chenevert (2001) para avaliar as mesmas propriedades. O WWFM é sugerido pelos autores como um modelo simples que pode ser usado para fornecer espessura e permeabilidade da torta de filtração. Este modelo foi proposto como uma extensão a teoria de Dewan e Chenevert (2001), pois de acordo com os experimentos dos autores o modelo de Dewan e Chenevert possui 2 limitações:

- A primeira limitação é que em todos os experimentos não foi possível capturar com precisão os resultados do volume do filtrado: o modelo subestima o volume de filtrado durante os estágios iniciais de filtração e superestima os estágios posteriores.
- A segunda limitação é na determinação dos parâmetros do modelo que possuem base apenas no volume de filtrado e não proporcionam uma espessura de torta única.

No WWFM, inicialmente, é calculado a taxa de filtração $q(t)$, utilizando dados de volume de filtrado obtido *versus* tempo. Tendo $q(t)$ é possível calcular P_{mc} . E a espessura da torta de filtração T_{mc} é calculada pela equação 15 a seguir:

$$T_{mc}(n+1) = T_{mc}(n) \cdot \frac{1 - \frac{\phi_{mc0}}{P_{mc}(n)\delta v}}{1 - \frac{\phi_{mc0}}{P_{mc}(n+1)\delta v}} + \frac{q(n) \cdot s \cdot \Delta t}{1 - s - \frac{\phi_{mc0}}{P_{mc}(n+1)\delta v}} \quad \text{Equação 15}$$

Onde n representa o tempo em dado momento e $T_{mc}(0) = 0$.

A teoria de Dewan e Chenevert (2001) considera que a permeabilidade de referência da torta de filtração é constante durante o experimento e calcula isso utilizando uma equação aproximada demonstrada anteriormente (Equação 8). Porém as propriedades da torta mudam durante o teste. Não existe torta formada no início da filtração, após o início da formação a torta continua crescendo com o tempo. Na teoria do WWFM, a permeabilidade da torta de filtração k_{mc} , pode ser diretamente calculada reescrevendo a Equação 6, na equação 16 a seguir:

$$k_{mc}(t) = \frac{14,700 \cdot q(t) \cdot T_{mc}(t) \cdot \mu}{P_{mc}(t)} \quad \text{Equação 16}$$

2.4 A Teoria Simplificada da Filtração

A teoria simplificada teve origem a partir da denominada “teoria científica da filtração”. Esta teoria parte do princípio que a velocidade superficial do sólido na torta seja substancialmente menor do que a do líquido, ou seja, a velocidade superficial do líquido é apenas função do tempo de filtração, conforme a equação 17:

$$q_F = q_F(t) \quad \text{Equação 17}$$

2.4.1 Filtração com formação de torta incompressível

A torta de filtração é um meio poroso que cresce e se deforma continuamente. Ao atingir uma determinada posição da torta, parâmetros como a porosidade e a permeabilidade diminuem com o tempo de filtração. Considerando esses parâmetros de filtração constante, a velocidade do sólido na torta é nula e a velocidade do fluido independe da posição, conforme a equação 18 a seguir.

$$\frac{dq}{dx} = 0 \quad \text{Equação 18}$$

Integrando a equação 18, para o fluido no meio filtrante e na torta, os quais constituem dois meios porosos em série, considerando o escoamento Darcyano, temos como resultado a equação 19 para queda de pressão no filtro. A figura 7 representa a formação da torta de filtração, novamente, para ajudar na interpretação da equação 19.

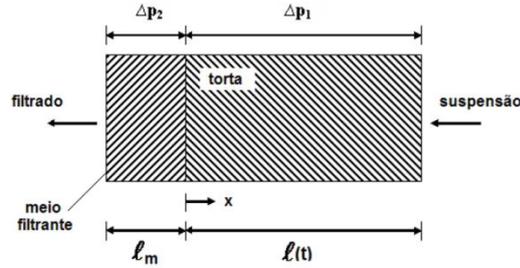


Figura 7 –Representação filtração plana com formação de torta.

Fonte: (Araújo, 2010).

Sendo, Δp_1 e Δp_2 a variação de pressão na torta e no meio filtrante respectivamente, e l_m e l são as espessuras do meio filtrante e da torta respectivamente.

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = \left(\frac{l}{k} + \frac{l_m}{k_m} \right) \mu q \quad \text{Equação 19}$$

Sendo:

$$q = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad \text{Equação 20}$$

E a concentração da suspensão definida pela equação 21:

$$C = \frac{(1-\epsilon)\rho_s A l}{\rho_f V} \quad \text{Equação 21}$$

Resulta a equação:

$$\Delta p = \frac{\mu}{A} \frac{dV}{dt} \left(\frac{C \rho_f V}{k (1-\epsilon) \rho_s A} + \frac{l_m}{k_m} \right) \quad \text{Equação 22}$$

Substituindo as equações 20 e 21 na equação da queda de pressão no filtro, na equação 19, e considerando as equações da resistividade da torta e da resistência ao meio filtrante a seguir:

$$\alpha = \frac{1}{k (1-\epsilon) \rho_s} \quad \text{Equação 23}$$

$$R_m = \frac{l_m}{k_m} \quad \text{Equação 24}$$

Chega-se a equação diferencial da filtração a pressão constante, equação 25:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A \Delta p} \left(\frac{\alpha V \rho_f c}{2A} \right) + R_m \quad \text{Equação 25}$$

2.4.2 Filtração com formação de torta compressível

No caso da torta formada no processo de filtração ser compressível, suas propriedades dependem do sistema sólido-fluido e da pressão que atua sobre a matriz porosa, de acordo com as equações constitutivas (26 e 27) a seguir:

$$\varepsilon^* = \varepsilon^*(p^*) \quad \text{Equação 26}$$

$$k_2 = k_2(p^*) \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

ε^* - porosidade da matriz

p^* - pressão no fluido

k_2 - permeabilidade da matriz

Desprezando a aceleração das partículas sólidas, pode-se demonstrar que as pressões exercidas sobre o sólido e o fluido estão relacionadas entre si de acordo com a equação 28 a seguir:

$$p^*(x, t) = p(l, t) - p(x, t) \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

p^* - pressão no fluido

x - a posição da torta medida na interface meio filtrante-torta

l - a espessura da torta

t - o tempo de filtração

A teoria simplificada considera que a velocidade do fluido na torta independe, para um dado tempo, da posição, hipótese esta um tanto mais razoável quanto menor for a compressibilidade da torta e mais diluída a suspensão submetida ao processo de filtração.

A equação do movimento para o fluido na torta toma a forma:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{k} q_1 \quad \text{Equação 29}$$

seja a massa de sólido na torta,

$$dm = \rho_s (1 - \varepsilon) A dx \quad \text{Equação 30}$$

Integrando a eq. 29, resulta:

$$- \int_{p_l - p_0}^0 \frac{dp}{\alpha} = \frac{p_l - p_0}{(\alpha)} = \frac{\mu q_1}{A} m \quad \text{Equação 31}$$

onde $\langle \alpha \rangle$ é a resistividade média da torta relativa a Δp .

$$\langle \alpha \rangle = \frac{p_1 - p_0}{\int_0^{\Delta p} \frac{dp}{\alpha}} \quad \text{Equação 32}$$

Seguindo o mesmo procedimento utilizado na filtração com formação de torta incompressível, a teoria simplificada conduz, a partir da equação 27, à equação diferencial da filtração:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A(\Delta p)} \left(\frac{\langle \alpha \rangle C \rho_f V}{A} + R_m \right) \quad \text{Equação 33}$$

onde: t é o tempo de filtração, $\langle \alpha \rangle$ a resistividade média da torta, μ a viscosidade do fluido, ρ_f a densidade do fluido, A a área de filtração, v volume de filtrado, Δp a queda de pressão e C a concentração da suspensão.

A integração de algumas equações tem como resultado a famosa equação da filtração para fluidos newtonianos, equação 34:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu_f}{A(\Delta p)} \left(\frac{\langle \alpha \rangle V \rho_f C}{2A} + R_m \right) \quad \text{Equação 34}$$

2.4.3 Teoria simplificada da filtração para fluidos não Newtonianos

O problema da filtração de suspensões sólido-fluido não-newtoniano foi abordado inicialmente por Shirato e colaboradores (1974, 1977). Posteriormente, outros autores tiveram grande interesse na formulação e desenvolveram uma extensão da teoria simplificada.

Uma das formulações propostas, e utilizada neste trabalho foi a teoria simplificada da filtração adaptada para fluidos não Newtonianos proposta por Massarani e Coelho de Castro (1980).

Coelho de Castro (1981) descreve uma equação de filtração à pressão constante, onde é possível prever o desempenho da filtração não newtoniana, conhecendo a resistividade média da torta e a resistência do meio filtrante.

No caso da filtração com formação de torta, partindo do princípio que o fluido siga o modelo reológico de *Power Law* conforme a equação 35,

$$\tau = M \lambda^n \quad \text{Equação 35}$$

Para o escoamento lento unidimensional temos a equação:

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{dp^*}{dx} = \frac{\tau(\lambda) \Omega}{\sqrt{k}} = \frac{M \lambda^n \Omega}{\sqrt{k}} \quad \text{Equação 36}$$

Sendo a resistividade da torta $\langle \alpha \rangle$ e a massa de sólidos dm definidas como:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{k(1-\epsilon) \rho_s} \quad \text{Equação 37}$$

$$dm = (1 - \varepsilon) \rho_s A dx \quad \text{Equação 38}$$

Logo a equação 36 toma a forma:

$$-d_{p^*} = \frac{M}{A} q^n \Omega^{1-n} \alpha^{\frac{n+1}{2}} [(1 - \varepsilon) \rho_s]^{\frac{n-1}{2}} dm \quad \text{Equação 39}$$

Que integrada fornece:

$$\int_{\Delta p_1}^0 \frac{d_{p^*}}{\Omega^{1-n} \alpha^{\frac{n+1}{2} (1-\varepsilon)^{\frac{n-1}{2}}} = \frac{M}{A} q^n \rho_s^{n-1/2} m \quad \text{Equação 40}$$

Assim:

$$\Delta p_1 = \langle \gamma \rangle \frac{M}{A} q^n \rho_s^{n-1/2} \rho_f C V \quad \text{Equação 41}$$

Sendo:

$$\langle \gamma \rangle = \frac{\int_0^{\Delta p_1} \frac{d_{p^*}}{\Omega^{1-n} \alpha^{\frac{n+1}{2} (1-\varepsilon)^{\frac{n-1}{2}}} \cong \frac{\int_0^{\Delta p} \frac{d_{p^*}}{\Omega^{1-n} \alpha^{\frac{n+1}{2} (1-\varepsilon)^{\frac{n-1}{2}}} \quad \text{Equação 42}$$

E, para soluções diluídas:

$$c = \frac{m}{\rho_f V} \quad \text{Equação 43}$$

Por procedimento análogo, encontramos para o meio filtrante, a seguinte equação:

$$\Delta p_2 = \Omega_m^{1-n} M R_m k_m^{1-n/2} q^n \quad \text{Equação 44}$$

Combinando as equações 41 e 44:

$$\Delta p = M \left[\frac{\langle \gamma \rangle}{A} \rho_f \rho_s^{n-1/2} c V + \Omega_m^{1-n} k_m^{1-n/2} R_m \right] \left(\frac{1}{A} \frac{dV}{dT} \right)^n \quad \text{Equação 45}$$

Logo, após essa série de equações, chega-se ao resultado da equação da teoria simplificada da filtração para fluidos não newtonianos, expressa a seguir:

$$\frac{dt}{dV} = \left(\frac{M}{\Delta p}\right)^{\frac{1}{n}} (a + bV)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{A} \quad \text{Equação 46}$$

Integrando a equação 46 para filtração a pressão constante, temos como resultado a equação 47, a qual será utilizada neste trabalho:

$$V = \frac{1}{b} \left(\frac{b t}{\left(\frac{n}{n+1}\right) \left(\frac{1}{A}\right) \left(\frac{M}{\Delta p}\right)^{\frac{1}{n}}} + a^{\frac{(n+1)}{n}} \right)^{\frac{(n+1)}{n}} - \frac{a}{b} \quad \text{Equação 47}$$

Onde:

t – tempo de filtração

V – volume de filtrado

Δp – a queda de pressão total do filtro

A – área de filtração

M – parâmetro reológico

n – parâmetro reológico

E ainda:

$$a = R_m (k_m)^{(1-n)/2} \Omega^{(1-n)} \quad \text{Equação 48}$$

$$b = \gamma \rho_F \rho_s^{(n-1)/2} \cdot \frac{c}{A} \quad \text{Equação 49}$$

$$\gamma \cong \langle \alpha \rangle^{(n+1)/2} \langle 1 - \varepsilon \rangle^{(n-1)/2} \quad \text{Equação 50}$$

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{k (1-\varepsilon) \rho_s} \quad \text{Equação 51}$$

$$\langle 1 - \varepsilon \rangle = \frac{\Delta p}{\int_0^{\Delta p} \frac{dp_s}{(1-\varepsilon) \rho_s}} \quad \text{Equação 52}$$

Que representam:

l_m – a espessura

k_m – a permeabilidade do meio filtrante

R_m – a resistência do meio filtrante

c – concentração de sólido

$\langle \alpha \rangle$ – resistividade média da torta

$\langle \varepsilon \rangle$ – porosidade média da torta

γ – parâmetro da equação 49

ρ_s – densidade do sólido
 ρ_f – densidade do fluido
 Ω – fator geométrico = 1

Para utilizar a teoria simplificada da filtração adaptada para fluidos não Newtonianos, o fluido obrigatoriamente tem que seguir o modelo reológico da lei da potência devido aos parâmetros deste modelo presentes na equação. Portanto os fluidos desta pesquisa foram ajustados ao modelo da lei da potência (ou também conhecido modelo de *Power Law*).

2.5 Trabalhos de Filtração Desenvolvidos no LEF

A filtração com formação de torta que ocorre durante o processo de perfuração de poços de petróleo, está sendo estudada no Laboratório de Escoamento de Fluidos da UFRRJ faz alguns anos. O primeiro trabalho, realizado por Araújo no ano de 2010, foram construídas duas unidades de filtração estática e uma unidade de filtração dinâmica. Dentre as unidades de filtração estática, uma era de bancada e a outra era uma unidade de linha, modificada da filtração dinâmica. Araújo avaliou parâmetros da filtração como a resistividade média da torta, resistência do meio filtrante, porosidade, volume de filtrado e tempo de filtração. Ele concluiu que o acréscimo na pressão para uma suspensão de mesma concentração gera um maior volume de filtrado (Calçada *et.al.*, 2011). Assim como uma maior concentração de sólidos para uma mesma pressão resulta em um volume inferior de filtrado. Ele também concluiu que não há correlação entre a resistividade da torta obtida dinâmica e da obtida na filtração estática.

Martins (2013) realizou modificações necessárias na célula de filtração HTHP produzida pela OFITE, a qual também é utilizada neste trabalho. Martins baseou-se na célula usada por Dewan e Chenevert (2001) e adicionou um cilindro reservatório de 900cm³ que pode substituir o cilindro original da célula, permitindo então realizar experimentos com fluido base óleo. Além disso, adicionou um sistema de cisalhamento que permite a realização de filtração dinâmica. Após as modificações, Martins realizou experimentos para a validação da célula de filtração, onde utilizou três diferentes fluidos de perfuração e diferentes meios filtrantes (papel de filtro e rochas). A partir dos dados experimentais e do equacionamento proposto por Dewan e Chenevert (2001), foram calculados parâmetros da torta de filtração. Em suas conclusões, Martins afirma que a célula de filtração HTHP é eficiente e que o fluido base água produz maior quantidade de filtrado.

Um novo trabalho utilizando a célula HTHP foi desenvolvido por Calabrez (2013), que realizou experimentos de filtração estática e dinâmica utilizando fluidos Newtonianos a base água e óleo para estudar a invasão de filtrado e determinar parâmetros da torta de filtração. A célula de filtração foi capaz de fornecer dados necessários para caracterizar a torta formada, determinando parâmetros como porosidade, permeabilidade, compressibilidade e espessura da torta a partir do equacionamento de Dewan e Chenevert (2001).

O estudo da filtração no LEF teve continuidade com Ferraz (2014). Em seus estudos foram realizados experimentos de filtração estática, na célula de filtração HTHP, utilizando fluidos newtonianos e não newtonianos. Para os fluidos newtonianos a base era glicerina e carbonato de cálcio de diferentes faixas granulométricas ou esferas de vidro, como adensantes. Os fluidos não newtonianos eram suspensões dos polímeros GX e CMC e carbonato de cálcio ou esferas de vidro. Ferraz encontrou volume de

filtrado elevado para todos os tamanhos de partículas de carbonato de cálcio e esferas de vidro. A análise dos parâmetros de filtração foi impossibilitada pois pequenas partículas de sólidos e esferas de vidro foram arrastadas juntamente com o filtrado.

O último trabalho de filtração desenvolvido no LEF, foi o de Barbosa (2016), o qual foi realizado a modificação, instrumentação e automação em um protótipo de célula de filtração para a operação de forma remota e com a menor interferência humana na análise da filtração de fluidos de perfuração. Conhecida como célula de filtração *on line*, a unidade construída por Barbosa foi adequada de maneira a garantir que os dados de volume de filtrado sejam equivalentes aos obtidos em uma célula de bancada tradicionalmente utilizada pela indústria de petróleo.

Esses trabalhos utilizaram a teoria de Dewan e Chenervert (2001) para estudar a filtração com formação de torta durante a perfuração. A proposta desta pesquisa é estudar as propriedades da torta de filtração utilizando a teoria simplificada da filtração adaptada para fluidos não Newtonianos proposta por Massarani e Coelho de Castro (1980).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho teve como objetivo principal estudar as características da torta de filtração formada durante o processo de perfuração de poços de petróleo, utilizando a teoria simplificada da filtração adaptada para fluidos não Newtonianos (Massarani e Coelho de Castro, 1981) aplicada a dados experimentais de volume de filtrado *versus* tempo, em condições estáticas, em diferentes condições de pressão. Para obtenção desses dados, foi utilizada uma célula de filtração HTHP, presente no Laboratório de Escoamento de Fluidos (LEF) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. A partir dos resultados obtidos nos experimentos de filtração estática, foi possível construir curvas de volume de filtrado *versus* tempo de filtração e também calcular parâmetros da torta formada, entre eles a permeabilidade, a porosidade e espessura da torta. Neste capítulo serão apresentadas a unidade experimental, os materiais e os métodos utilizados para realização dos experimentos

3.1 Materiais

3.1.1 Célula de filtração

Para a realização dos experimentos, foi utilizada a célula de filtração HTHP (*High Temperature, High Pressure*) que é uma célula de filtração de alta temperatura e alta pressão, uma foto está apresentada a seguir na Figura 8. Essa célula foi produzida pela OFITE e modificada no LEF da UFRRJ. Uma das modificações feitas no LEF nesta célula, foi a adição de um sistema que permite manter constante a taxa de cisalhamento sobre toda a superfície do meio filtrante. Além disso, um cilindro maior foi desenvolvido para realização de testes com fluidos base óleo. Nesta célula, é possível realizar filtrações em condições estáticas ou dinâmicas, utilizando pressões de até 2000 psi e temperaturas de até 200°F. Neste estudo foram realizados testes de filtração estática, portanto, não foi preciso utilizar o sistema de cisalhamento produzido no LEF, visto que este é utilizado apenas em casos de filtração dinâmica. Foi utilizado o cilindro de menor diâmetro para realização dos experimentos com fluido base água.



Figura 8 – Célula de filtração HTHP.

Abaixo são listadas algumas características da célula de filtração HTHP:

- Fabricante: OFITE (Texas, USA)
- Pressão máxima: 2000 psi
- Temperatura máxima: 200°F (93,3°C)
- Volume comportado pelo cilindro: 250cm³ ou 900cm³
- Filtração: estática ou dinâmica

A célula é composta por um cilindro reservatório fechado na parte superior por um eixo que contém um pistão, o qual separa o fluido, que é adicionado dentro do cilindro, da água que é bombeada para dentro do sistema. A parte inferior do cilindro é fechada usando uma base que também serve de suporte ao meio filtrante. A água é introduzida ao sistema com o auxílio de uma bomba acoplada à célula, a qual realiza a pressurização do sistema ao comprimir o pistão contra o fluido base água cuja composição será vista mais adiante. A Figura 9 apresenta um esquema simplificado da célula HTHP.

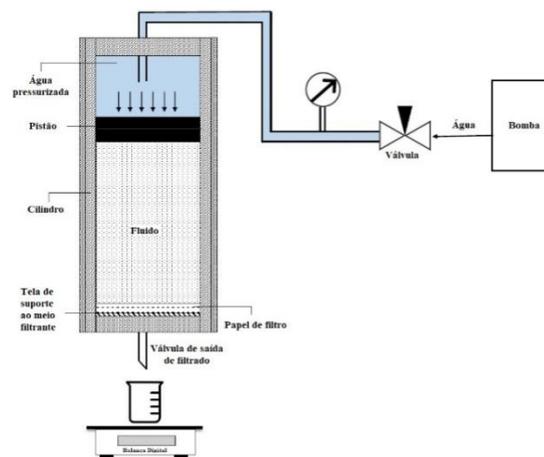


Figura 9 – Esquema simplificado da célula HTHP utilizada nos ensaios de filtração.

A Figura 10 representa as peças da célula de filtração HTHP, onde tem-se (A) cilindro pequeno de 250 cm³ (B) cilindro grande de 900 cm³ (C) eixo com pistão (D) base do cilindro com a válvula de saída de filtrado.

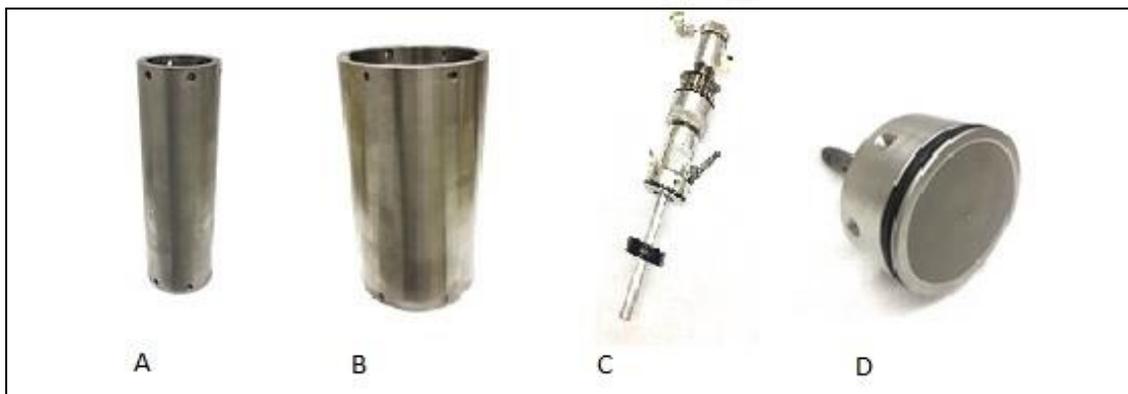


Figura 10- Peças da célula HTHP.

Para realização dos experimentos de filtração foi utilizado, como meio filtrante, papel de filtro cujas características seguem na tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Características do papel de filtro utilizado para filtração.

| Papel de filtro | | | |
|-----------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Marca | Diâmetro (cm) | Área de filtração (cm ²) | Gramatura (g/cm ²) |
| Fann | 6,30 | 31,66 | 0,0105 |

3.1.2 Fluido de perfuração

Neste trabalho foram utilizados quatro diferentes tipos de fluidos de perfuração para realização de testes, sendo os quatro fluidos base água. Todos esses fluidos foram preparados e testados no Laboratório de Escoamento de Fluidos (LEF). A tabela 3 a seguir apresenta um resumo da composição dos fluidos, onde pode-se observar que os fluidos base água diferenciam-se pelo sólido adensante e também pelo viscosificante utilizado. Foi utilizado o bactericida glutaldeído para retardar a degradação do fluido. Os viscosificantes goma xantana e carboximetilcelulose foram escolhidos para este trabalho pois são típicos na formulação de fluidos de perfuração não Newtonianos. A calcita e a barita também foram selecionados para este trabalho pois são tipicamente utilizadas na formulação de fluidos de perfuração, com o intuito de aumentar a densidade do fluido (THOMAS, 2001).

Os fluidos foram preparados numa concentração fixa de 2lb/bbl de viscosificante, e a densidade foi ajustada até a suspensão atingir a densidade de 1,2g/cm³ que é um valor de referência utilizado em fluidos de perfuração, conforme FERRAZ (2014).

Tabela 3 – Formulação para os fluidos não Newtonianos.
Volume do Fluido: 0,5 L

| Componente | Função | Fluido 1 | Fluido 2 | Fluido 3 | Fluido 4 |
|--------------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|
| água (L) | Base | 0,5 | 0,5 | 0,5 | - |
| goma xantana (g) | Viscosificante | 2,85 | 2,85 | - | - |
| carboximetilcelulose (g) | Viscosificante | - | - | 2,85 | 2,85 |
| glutaldeído (L) | Bactericida | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| calcita(g) | Adensante | - | 208 | - | 208 |
| barita(g) | Adensante | 230 | - | 230 | - |

3.2 Métodos

3.2.1 Preparo do fluido de perfuração

Inicialmente, foram preparadas soluções compostas por água deionizada, viscosificante e bactericida. Essas soluções foram submetidas a 30 minutos de agitação no *Hamilton Beach-Fann*, (Figura 11) a uma velocidade de 18000 rpm.

No caso dos fluidos preparados com o viscosificante goma xantana, foi necessário que as soluções fossem mantidas em repouso por 24 horas para que houvesse a hidratação da goma e ela atingisse sua viscosidade máxima (MELO, 2008). A carboximetilcelulose não foi necessária hidratar visto que suas soluções não apresentam mudanças reológicas significativas com o decorrer do tempo (MELO, 2008).



Figura 11 – Agitador Hamilton Beach

Fonte: FANN (2017).

A solução então foi pesada em balança de lama *Fann* modelo 140 (Figura 12), para que fosse determinada a sua densidade e então calculado a quantidade de adensante necessária para atingir a densidade aproximada da suspensão de $1,2 \text{ g/cm}^3$.

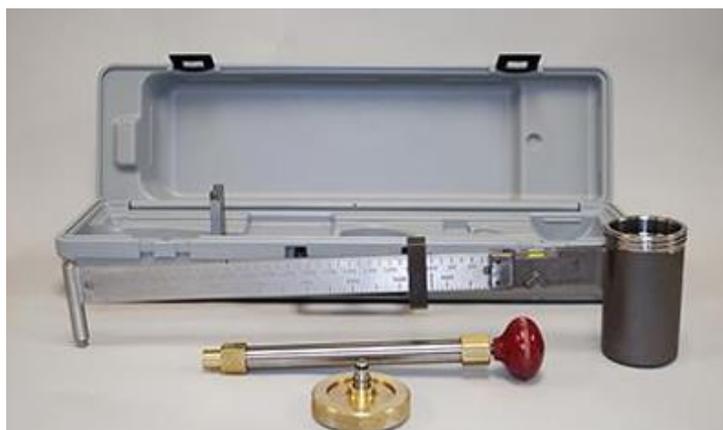


Figura 12 – Balança de lama Fann modelo 140

Fonte: FANN (2017).

No caso das soluções preparadas com goma xantana, após as 24 horas de repouso, a solução foi colocada novamente no *Hamilton Beach-Fann* e o adensante adicionado, sob agitação constante, permanecendo o fluido por mais 15 minutos no agitador a 18000 rpm. Já para os fluidos preparados com CMC, imediatamente após os 30 minutos de agitação da solução com viscosificante, foi adicionado o adensante (13% v/v) e levado ao agitador por mais 15 minutos.

3.2.2 Caracterização do tamanho de partículas

Foi utilizado um analisador de partículas Malvern – Mastersizer 2000 Hydro 2000 (Figura 13), para realizar a caracterização das faixas granulométricas dos sólidos barita e calcita.



Figura 13 – Analisador de partículas Malvern

Fonte: MALVERN (2017).

O equipamento utiliza a técnica de difração a laser para determinar o ângulo de espalhamento em função do tamanho de partículas. Nesse experimento, a amostra circulada continuamente através da janela de medição para garantir sua homogeneização. O equipamento pode analisar uma faixa analítica de 0,04 a 2000 μm e os resultados são expressos em percentual relativo de volume de material distribuído em uma ampla faixa de tamanho que compõem as bandas do detector.

3.2.3 Caracterização do fluido de perfuração

3.2.3.1 Densidade do sólido

A densidade dos materiais é uma propriedade empregada como ferramenta auxiliar para a identificação dos mesmos. Uma das técnicas utilizadas para medir a densidade de sólidos é a picnometria. Um picnômetro consiste, num balão de vidro com fundo chato, equipado com uma tampa também de vidro, através da qual passa um tubo capilar, conforme mostrado na Figura 14.



Figura 14 – Picnômetro utilizado para o ensaio.

Além do picnômetro, esta técnica exige também uma balança de precisão com duas casas decimais, no mínimo. Para assegurar que o procedimento foi utilizado

corretamente, recomenda-se a determinação da densidade em triplicata. Foi utilizada a seguinte metodologia:

- Foi pesado o picnômetro vazio junto com a tampa, previamente limpo e seco em estufa a 100°C;
- A amostra foi adicionada no picnômetro e, em seguida, todo o conjunto foi pesado. A massa da amostra é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com e sem amostra (vazio);
- Foi adicionado água até transbordar o picnômetro, posteriormente secando a água que molha a superfície externa do mesmo e, em seguida, o picnômetro com água e o sólido foi pesado;
- Por último foi pesado o picnômetro com a tampa e água.

Depois de realizada as pesagens, calcula-se o valor da densidade do sólido a partir da equação 53 (Peçanha, 2014).

$$\rho_s = \frac{(mps - mp)}{(mpl - mp) - (mpsl - mps)} * \rho_l \quad \text{Equação 53}$$

Onde:

- mps – massa do picnômetro com tampa mais sólido
- mp – massa do picnômetro com tampa
- mpl – massa do picnômetro com tampa mais líquido
- mpsl – massa do picnômetro com tampa mais sólido e líquido
- ρ_s – densidade do sólido
- ρ_l – densidade do líquido de referência

3.2.3.2 Densidade do fluido

Após os fluidos preparados, a densidade foi novamente medida em balança de lama *Fann*, para confirmar que o fluido estava dentro das especificações de densidade desejada.

3.2.3.3 Concentração de Sólidos

A concentração de sólidos dos fluidos 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 54.

$$C = \frac{m_s}{V_f} \quad \text{Equação 54}$$

Onde:

- C - a concentração de sólidos;
- m_s - a massa de sólidos;
- V_f - o volume total de fluido.

3.2.3.4 Parâmetros reológicos

Para determinar os parâmetros reológicos dos fluidos, foi utilizado o Reômetro Thermo Haake modelo RheoStress 1; equipamento representado na Figura 15.



Figura 15 – Reômetro Haake RheoStress 1, modelo K10.

Foi aplicada a geometria de cilindros coaxiais, utilizando copo de medição DG43 e rotor cilíndrico DG43-Ti. Os testes tiveram duração de 120 s, com taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) controlada no intervalo de 0 a 1021 s⁻¹. Um banho termostático Haake modelo K10, foi utilizado para a manutenção da temperatura em 25°C.

Os dados de tensão e a taxa de deformação obtidos nos ensaios foram enviados para um computador acoplado ao equipamento. Um *software* gerou os gráficos de tensão de cisalhamento (τ) *versus* taxa de deformação, ajustando ao melhor modelo matemático selecionado pelo operador, neste caso o modelo *Power Law*.

3.2.4 Experimentos de filtração

As suspensões com goma xantana e carboximetilcelulose foram filtradas na célula de filtração HTHP anteriormente apresentada. Os experimentos de filtração foram realizados a temperatura ambiente, com duração de 30 minutos e em três diferentes pressões: 300 psi, 500 psi e 700 psi. Os experimentos com o sólido barita foram realizados em triplicata para que pudesse ser calculado o erro experimental. A Tabela 4 a seguir apresenta o total de experimentos realizados neste trabalho.

Tabela 4 - Experimentos realizados

| Fluido | Número de experimentos em cada pressão | | | Total de experimentos |
|---------------|--|---------|---------|-----------------------|
| | 300 psi | 500 psi | 700 psi | |
| GX + Barita | 3 | 3 | 3 | 9 |
| GX + Calcita | 1 | 1 | 1 | 3 |
| CMC + Barita | 3 | 3 | 3 | 9 |
| CMC + Calcita | 1 | 1 | 1 | 3 |
| | | | | 24 |

A massa de filtrado obtida foi medida de 10 em 10 segundos, utilizando uma balança digital; Considerando que a densidade do fluido base é $1,0 \text{ g/cm}^3$, esses valores foram convertidos em volume de filtrado.

3.2.5 Estimação de parâmetros

3.5.1 Estimação de parâmetros reológicos

Inicialmente foi feita uma análise do perfil reológico para os fluidos não Newtonianos, seguindo o modelo reológico de *Power Law*. Este modelo foi escolhido, pois para utilizar a teoria simplificada da filtração para fluidos não Newtonianos, o fluido obrigatoriamente deve seguir o modelo reológico de *Power Law*. Os parâmetros M e n presentes na equação do modelo foram estimados com auxílio de um *software*.

3.5.2 Estimação de parâmetros da equação da teoria simplificada

Foi proposto o uso da equação 46, proposta por Coelho de Castro (1981), para o estudo dos parâmetros da torta de filtração de fluidos não Newtonianos a partir de dados experimentais de volume de filtrado obtido em função do tempo de experimento, por meio da filtração de fluidos não newtonianos. Foi utilizado um *software* e o método matemático que melhor se adequou as estimativas foi o método de Rosebrock Quase Newton. A utilização da teoria simplificada da filtração para fluidos não Newtonianos foi proposta visando utilizar um equacionamento mais simples para os cálculos dos parâmetros da torta de filtração formada por meio da filtração de fluidos de perfuração. A equação 55 a seguir foi utilizada para o cálculo do índice de compressibilidade da torta.

$$K = K_0 \Delta P^v \quad \text{Equação 55}$$

Onde:

K - permeabilidade

K_0 - permeabilidade de referência

ΔP - diferencial de pressão

v - índice de compressibilidade

A tabela 5 a seguir apresenta as equações utilizadas nos cálculos dos parâmetros da torta de filtração.

Tabela 5- Equações utilizada nos cálculos dos parâmetros.

| Parâmetro estimado | Equação | número |
|------------------------------------|--|---------------|
| Espessura da torta | $T_{mc} = \frac{W_w}{A (1 - \phi_{mc}) \rho_s}$ | Equação 3 |
| Porosidade | $\varepsilon = \frac{Vl}{Vl + V_s}$ | Equação 2 |
| Permeabilidade | $\frac{dt}{dV} = \left(\frac{M}{\Delta p} \right)^{\frac{1}{n}} (a + bV)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{A}$ | Equação 46 |
| Índice de compressibilidade | $K = K_0 \Delta P^v$ | Equação 55 |

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos Sólidos

4.1.1 Caracterização do tamanho de partículas

Nos experimentos foram utilizadas suspensões de calcita e de barita, que atuam como adensantes no fluido. Portanto, inicialmente foi realizada a caracterização desses sólidos. A distribuição granulométrica da calcita e da barita foram realizadas utilizando o analisador de partículas Malvern Mastersizer. A Figura 16 ilustra a curva da distribuição granulométrica da calcita, onde podemos observar a granulometria compreendida entre 10 e 100 μm , concentrando-se a maior quantidade na faixa de 70 à 90 μm .



Figura 16 – Distribuição granulométrica da calcita.

A Figura 17 representa a curva da distribuição granulométrica da barita, onde podemos observar a granulometria compreendida entre 10 e 100 μm , porém apresenta maior quantidade de partículas na faixa de 15 à 30 μm .

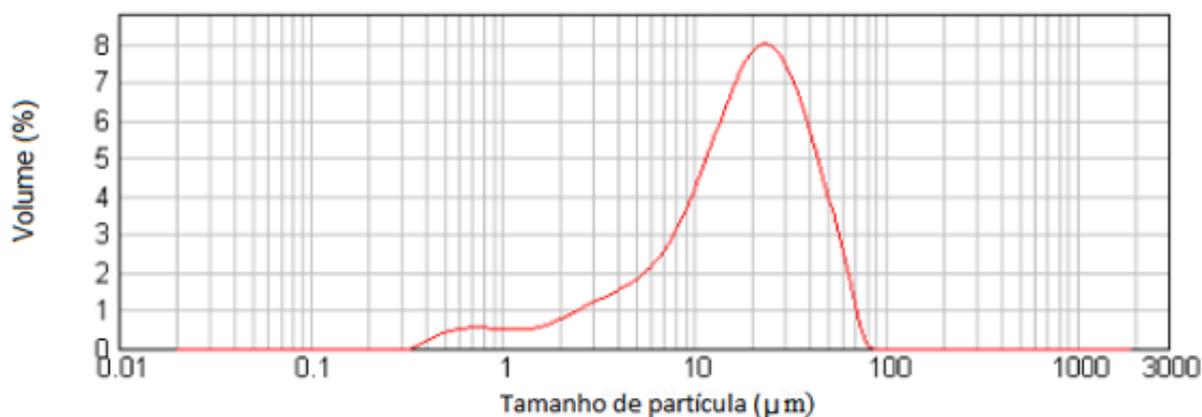


Figura 17 – Distribuição granulométrica da barita.

Além da distribuição granulométrica dos sólidos, o analisador de partículas fornece dados dos parâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} e o diâmetro médio de Sauter que foram obtidos na caracterização dos sólidos. A tabela 6 apresenta esses parâmetros, onde: D_{10} representa o diâmetro máximo apresentado por 10% das partículas; D_{50} representa o diâmetro máximo apresentado por 50% das partículas; D_{90} é o diâmetro máximo apresentado por 90% das partículas e D_p representa o diâmetro médio de Sauter, indicando que a barita é um pouco mais fina que a calcita.

Tabela 6 – Parâmetros obtidos na caracterização dos sólidos.

| Material | $D_{10}(\mu\text{m})$ | $D_{50}(\mu\text{m})$ | $D_{90}(\mu\text{m})$ | $D_p(\mu\text{m})$ |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| Calcita | 5,50 | 46,47 | 128,93 | 10,33 |
| Barita | 3,77 | 18,99 | 44,35 | 7,25 |

4.1.2 Picnometria

A densidade desses sólidos foi determinada por picnometria. Com base nos resultados dos experimentos realizados em triplicata e na equação 25, foi realizado uma média da densidade obtida em cada experimento. A tabela 7 apresenta os resultados obtidos das análises realizadas com calcita. A densidade obtida foi $2,7\text{g/cm}^3$ para este sólido.

Tabela 7 – Dados obtidos na picnometria da calcita.

| Experimento | Massa (g) | | | | Densidade da calcita |
|-------------------|------------|---------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| | Picnômetro | Picnômetro + Sólido | Picnômetro + Sólido + Líquido | Picnômetro + Líquido | |
| 1 | 28,01 | 28,36 | 55,88 | 55,63 | 2,89 |
| 2 | 29,26 | 29,78 | 57,76 | 57,44 | 2,46 |
| 3 | 30,15 | 31,10 | 58,52 | 57,91 | 2,75 |
| Densidade média = | | | | | $2,70\text{ g/cm}^3$ |
| Desvio padrão = | | | | | $\pm 0,21$ |

De acordo com os experimentos a barita possui densidade de $3,86\text{ g/cm}^3$. A tabela 8, a seguir, apresenta os resultados obtidos.

Tabela 8 – Dados obtidos na picnometria da barita.

| Experimento | Massa (g) | | | | Densidade da barita |
|-------------------|------------|---------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------|
| | Picnômetro | Picnômetro + Sólido | Picnômetro + Sólido + Líquido | Picnômetro + Líquido | |
| 1 | 31,42 | 28,03 | 55,67 | 58,06 | 3,39 |
| 2 | 30,71 | 26,49 | 54,52 | 57,77 | 4,34 |
| 3 | 30,81 | 28,06 | 55,69 | 57,73 | 3,83 |
| Densidade média = | | | | | 3,86 g/cm ³ |
| Desvio padrão = | | | | | ± 0,47 |

4.1.3 Concentração de sólidos

A concentração de sólidos da suspensão foi calculada a partir da equação 54, e o valor utilizado para c para as suspensões de calcita foi de 416g/L, e para as suspensões de barita foi de 460g/L.

4.1.4 Estudo Reológico

As figuras 18 e 19 apresentam as curvas de fluxo e viscosidade aparente dos fluidos de goma xantana e barita e goma xantana e calcita, onde são observados os comportamentos reológico dos fluidos.

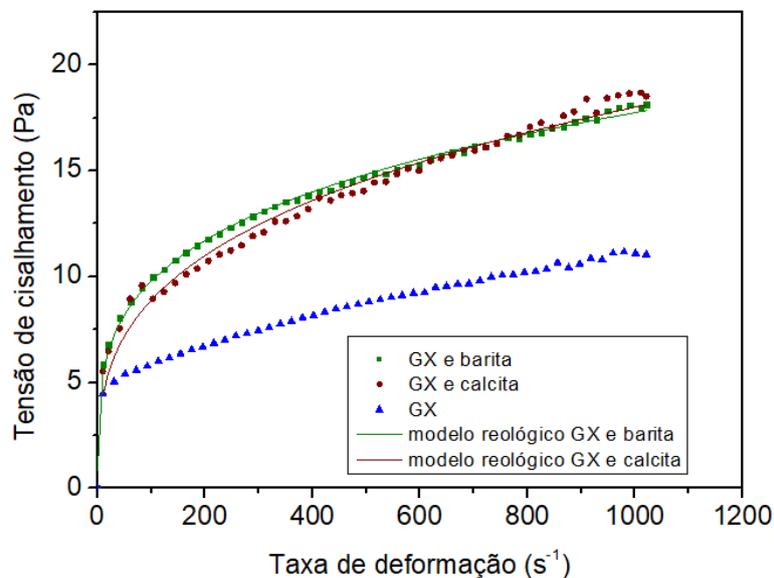


Figura 18 – Gráfico Tensão de cisalhamento *versus* Taxa de deformação das suspensões de goma xantana e barita e também goma xantana e calcita.

Observa-se que os valores de tensão de cisalhamento e taxa de deformação apresentados pelo modelo reológico ajustado aproximam-se aos valores experimentais das suspensões de goma xantana. Ainda é possível observar que as suspensões contendo sólido diferenciam-se da solução pura de goma xantana.

Observando a figura 18 pode ser notar que o modelo de Power Law se adequa a curva de fluxo durante o intervalo de taxa de deformação, tornando possível a utilização deste fluido neste trabalho.

Utilizando a equação do modelo matemático da lei da potência, e os dados experimentais de tensão de cisalhamento e taxa de deformação foi possível calcular os parâmetros reológicos dos fluidos, com o auxílio de um *Software*. Os parâmetros reológicos obtidos foram necessários para utilização da equação da teoria simplificada da filtração para fluidos não newtonianos. A tabela 9 apresenta os valores dos parâmetros M , n obtidos e o coeficiente de correlação (R^2). Os experimentos foram conduzidos a 1 atm de pressão e 25°C de temperatura.

Tabela 9 - Parâmetros reológicos dos fluidos.

| Parâmetros | | | |
|--------------|--------------------------|------------|-------|
| Fluidos | $M(\text{g/cm.s}^{n-2})$ | n (adim) | R^2 |
| GX e barita | 2,97 | 0,26 | 0,99 |
| GX e calcita | 2,16 | 0,31 | 0,98 |

A figura 19 apresenta a curva de viscosidade aparente versus taxa de deformação para os fluidos com goma xantana.

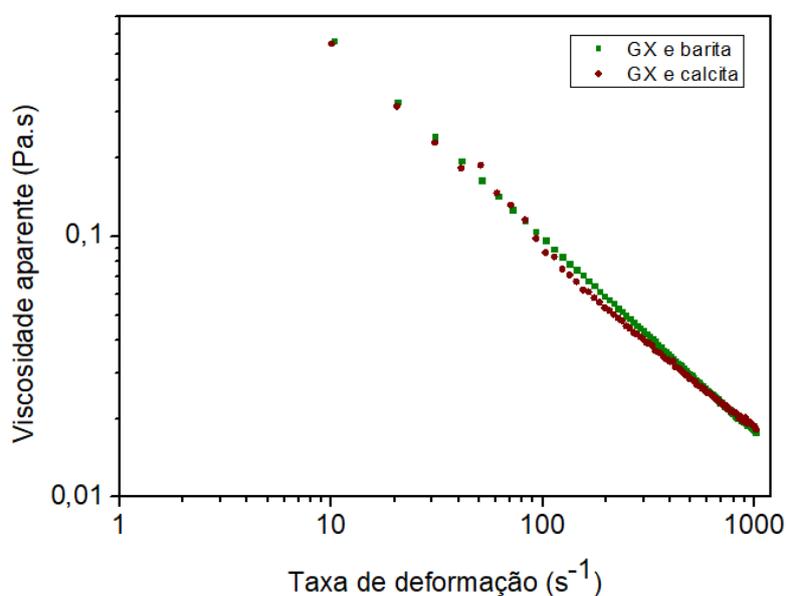


Figura 19 - Gráfico viscosidade aparente *versus* taxa de deformação das suspensões de goma xantana e barita e goma xantana e calcita.

Pode-se observar que os valores de viscosidade aparente diminuem com o aumento da taxa de deformação, sendo o comportamento de ambos os fluidos bem semelhantes no decorrer do ensaio. Esta perda de viscosidade com o aumento da taxa de deformação pode ser explicada pela irregularidade das partículas dispersas nos sistemas pseudoplásticos, proporcionando ao fluido uma elevada resistência ao fluxo caracterizada pela alta viscosidade. As partículas vão se orientando linearmente na direção do fluxo com o aumento do cisalhamento, diminuindo assim sua viscosidade (MELO, 2008).

As figuras 20 e 2, a seguir, apresentam as curvas de escoamento e de viscosidade dos fluidos de carboximetilcelulose e barita e carboximetilcelulose e calcita.

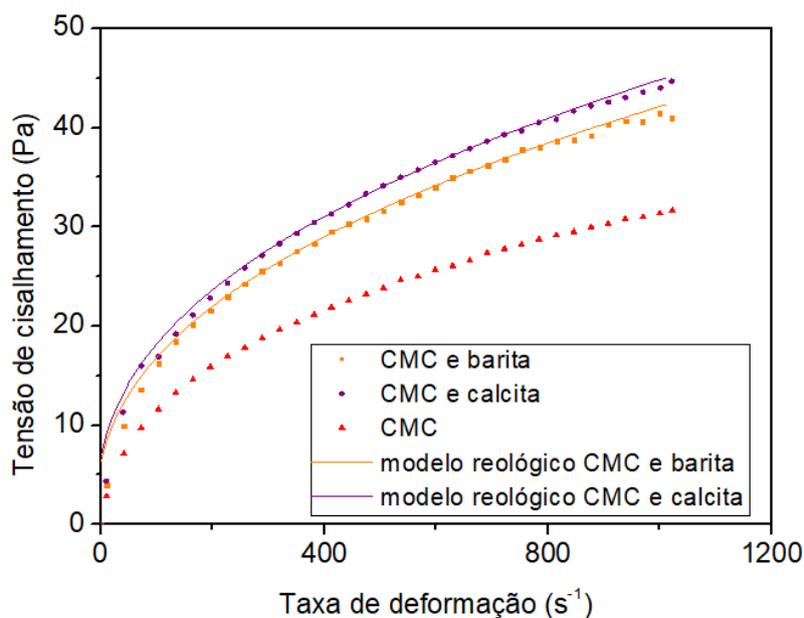


Figura 20 - Gráfico Tensão de cisalhamento *versus* Taxa de deformação das suspensões de GX e barita e GX e calcita.

Na figura 20, o gráfico mostra que a suspensão de carboximetilcelulose e calcita apresentou maiores valores de tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação do que a suspensão de carboximetilcelulose e barita. Ainda neste gráfico é possível notar a diferença da curva da carboximetilcelulose pura, quando da carboximetilcelulose na presença de adensantes. No gráfico da figura 21, representa-se a viscosidade aparente das suspensões com a carboximetilcelulose *versus* taxa de deformação. O comportamento viscoso de ambas as suspensões, tanto com calcita quanto com barita, é semelhante no decorrer do ensaio, não apresentando efeito significativo.

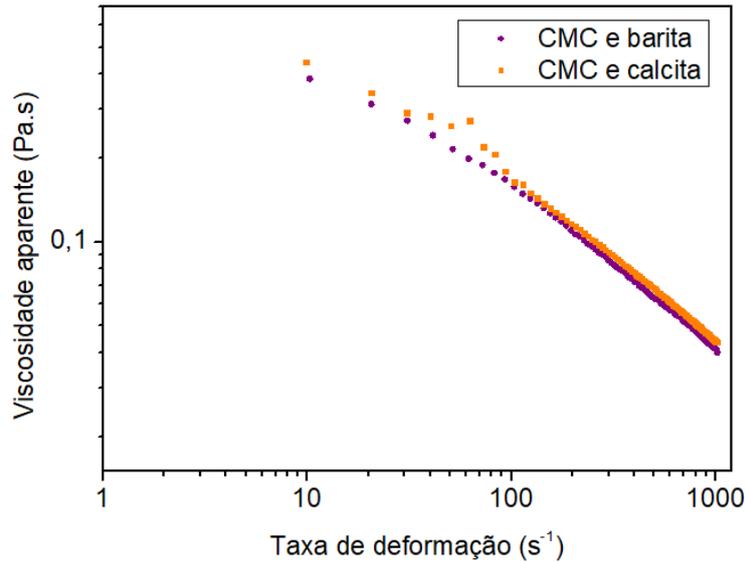


Figura 21 - Gráfico viscosidade aparente *versus* taxa de deformação das suspensões de CMC e barita e CMC e calcita.

Comparando, na figura 22, as suspensões dos dois polímeros, pode-se observar que as suspensões com o polímero carboximetilcelulose possuem maiores valores de tensão de cisalhamento em comparação as suspensões de goma xantana para uma dada taxa de deformação. Isso pode ser justificado pelo fato do polímero carboximetilcelulose apresentar alta massa molecular aumentando a viscosidade do fluido devido as interações formadas pelas ligações fracas causada pelos ânions carboxilatos presentes no polímero (OLIVEIRA, 2017).

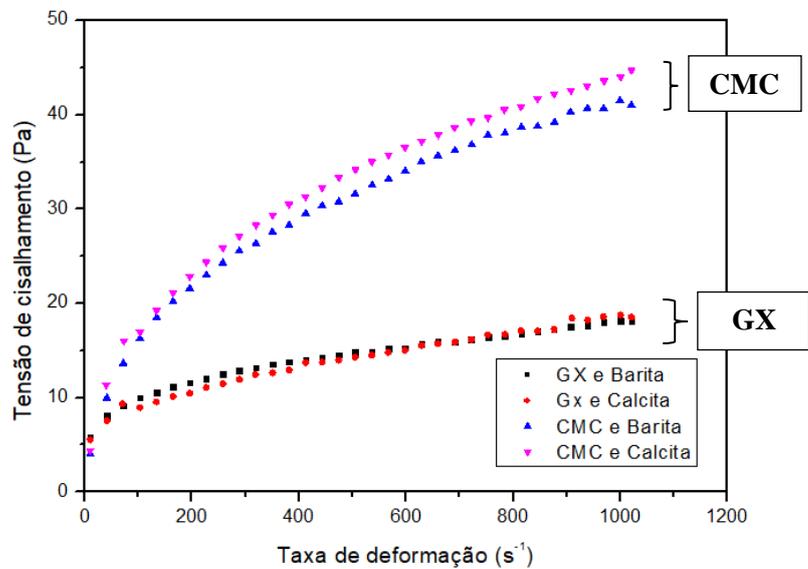


Figura 22 - Gráfico Tensão de cisalhamento *versus* Taxa de deformação das quatro suspensões.

Tabela 10 - Parâmetros reológicos dos fluidos.

| Parâmetros | | | |
|---------------|---------------------------|---------|----------------|
| Fluidos | M(g/cm.s ⁿ⁻²) | n(adim) | R ² |
| CMC e barita | 2,40 | 0,41 | 0,99 |
| CMC e calcita | 2,69 | 0,41 | 0,99 |

Os valores obtidos do parâmetro $n < 0,5$ confirmam uma maior aplicabilidade da equação (Coelho de Castro, 1981). Os dados de tensão de cisalhamento e taxa de deformação se ajustaram ao modelo de *Power Law*, apresentando bons coeficientes de correlação (entre 0,98 a 0,99) indicando uma boa qualidade do ajuste.

4.2 Dados Experimentais das Filtrações

Para a obtenção de dados de filtração para o fluido base água foi utilizado a célula de filtração HTHP, com um volume de 250 cm³. Foi utilizado papel de filtro como meio filtrante. Os experimentos tiveram duração de 30 minutos contabilizados a partir do momento que a célula atingiu e estabilizou a pressão de trabalho desejada e a válvula de filtração foi aberta. Foram realizados experimentos na pressão de 300 psi, 500 psi e 700 psi.

4.2.1 Experimentos com os fluidos viscosificados com goma xantana

4.2.1.1 Utilização do adensante barita

A Figura 23 apresenta a curva de filtração (volume de filtrado *versus* tempo) para as suspensões de barita em GX com concentração de 2lb/bbl do viscosificante.

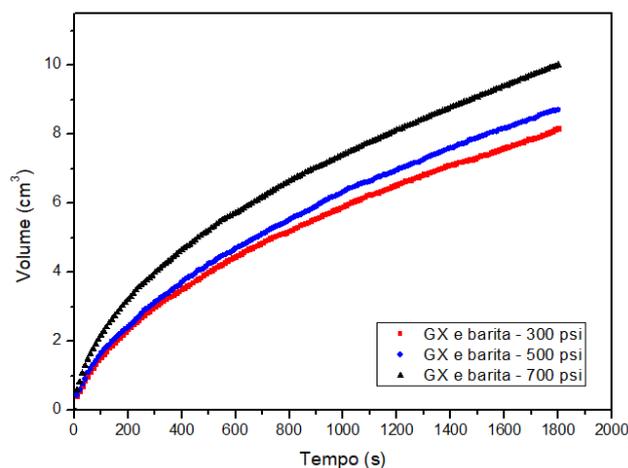


Figura 23 - Gráfico volume de filtrado obtido *versus* tempo de filtração das suspensões de GX e barita em diferentes pressões.

Nestas curvas pode-se observar o efeito da pressão no experimento: conforme aumenta a pressão o volume de filtrado obtido também aumenta para um dado tempo. O comportamento do gráfico t/V versus V , de todos os fluidos analisados e nas três pressões avaliadas, pode ser observado no Anexo A.

A tabela 11 apresenta os dados experimentais de volume de filtrado, espessura, e porosidade obtidos com o fluido goma xantana e barita, nas três diferentes pressões.

Na filtração da suspensão de goma xantana e barita pode-se observar conforme aumento da pressão, o volume final de filtrado aumenta. Esse comportamento já era esperado visto que este efeito também foi observado por Calçada *et al.* (2011) enquanto estudava o efeito da pressão em suspensões com carbonato de cálcio durante experimentos de filtração.

Tabela 11 – Parâmetros experimentais de filtração do fluido goma xantana e barita.

| Parâmetros de Filtração – GXebarita | | | | |
|--|--|------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Pressão (psi) | Volume final de filtrado (cm³) | Espessura medida (cm) | Espessura calculada (cm) | Porosidade |
| 300 | 8,17 | 0,22 | 0,16 | 0,52 |
| 500 | 8,72 | 0,24 | 0,20 | 0,58 |
| 700 | 10,01 | 0,25 | 0,21 | 0,57 |

As espessuras das tortas foram obtidas experimentalmente e medidas com o auxílio de um paquímetro. Pode ser observado que a espessura da torta de filtração, representada na Figura 24, apresentou valores satisfatórios considerando a incerteza de medição do paquímetro. Nota-se que assim como o volume de filtrado, a espessura da torta apresentou pequeno aumento com o aumento da pressão.



Figura 24 –Exemplo torta formada na filtração com o fluido GX e barita.

4.2.1.2 Utilização do adensante calcita

A figura 25 apresenta a curva de filtração (volume de filtrado *versus* tempo) para as suspensões de calcita em goma xantana. Os experimentos realizados com este fluido diferenciam-se dos anteriores pela utilização de um adensante diferente, nesse caso a calcita.

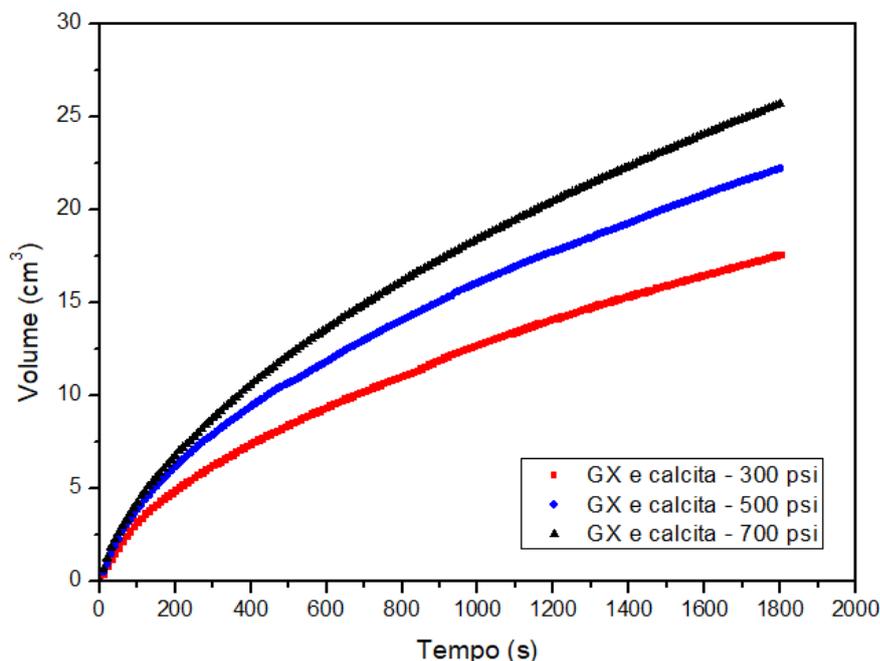


Figura 25 - Gráfico volume de filtrado obtido *versus* tempo de filtração das suspensões de GX e calcita em diferentes pressões.

A tabela 12 apresenta os dados experimentais da filtração na célula HTHP do fluido GX e calcita. Os experimentos foram realizados a temperatura ambiente, com duração de 30 minutos e em diferentes pressões: 300 psi, 500 psi e 700 psi.

Tabela 12 - Parâmetros experimentais de filtração do fluido GX e calcita.

| Parâmetros de Filtração – GX e calcita | | | | |
|--|---|-----------------------|--------------------------|------------|
| Pressão (psi) | Volume final de filtrado (cm ³) | Espessura medida (cm) | Espessura calculada (cm) | Porosidade |
| 300 | 17,61 | 0,41 | 0,39 | 0,50 |
| 500 | 22,25 | 0,47 | 0,46 | 0,47 |
| 700 | 25,70 | 0,46 | 0,49 | 0,47 |

O volume final de filtrado obtido na filtração deste fluido não Newtoniano aumentou com o aumento da pressão, conforme havia sido observado nos experimentos realizados com o fluido anterior, independente do adensante utilizado. Conforme citado anteriormente este comportamento já foi observado por Calçada *et al.* (2011).

A espessura calculada apresentou valores próximos aos valores obtidos experimentalmente, comprovando a eficiência do equacionamento. A torta formada segue apresentada na Figura 26.

As porosidades calculadas para as tortas com este fluido, apresentaram valores um pouco elevado.



Figura 26 – Torta formada na filtração do fluido GX e calcita.

4.2.1.3 Comparação do efeito do sólido na filtração dos fluidos com GX

Foram traçadas curvas de volume de filtrado obtido *versus* tempo de filtração para um mesmo viscosificante, podendo então ser observado o efeito do sólido nos fluidos de perfuração. Na figura 27, estão os fluidos com goma xantana e os sólidos barita e calcita. Pode ser observado que os fluidos com o sólido calcita apresentaram mais que o dobro do volume de filtrado que os fluidos com o sólido barita. Isto ocorre devido ao tamanho das partículas da calcita. Como visto nos experimentos de caracterização dos sólidos, a granulometria da calcita está compreendida entre 10 e 100 μ m, concentrando-se a maior quantidade de partículas na faixa de 70 à 90 μ m. Enquanto o sólido barita apresenta maior quantidade de partículas na faixa de 15 à 30 μ m. Esse comportamento, com relação ao volume da calcita ser maior que o volume de filtrado da barita, era esperado pois como estudado por Buranasrisak e Narasingha (2012), o aumento da fração de partículas finas em uma suspensão favorece a formação de aglomerados nos espaços vazios entre as partículas maiores. Assim ocorre uma redução do fluxo de água por estes espaços, contribuindo para o aumento da viscosidade da suspensão, resultando num menor volume de filtrado.

Ainda, de acordo com Garcia *et al.* (2003) e Parkinson *et al.* (1969) quando o número de partículas pequenas na suspensão aumenta, a distância interpartícula diminui. Isso resulta em um acréscimo das interações hidrodinâmicas na suspensão, assim como da resistência ao fluxo.

Pode-se notar no gráfico que o efeito da pressão foi mais significativo para os experimentos com calcita.

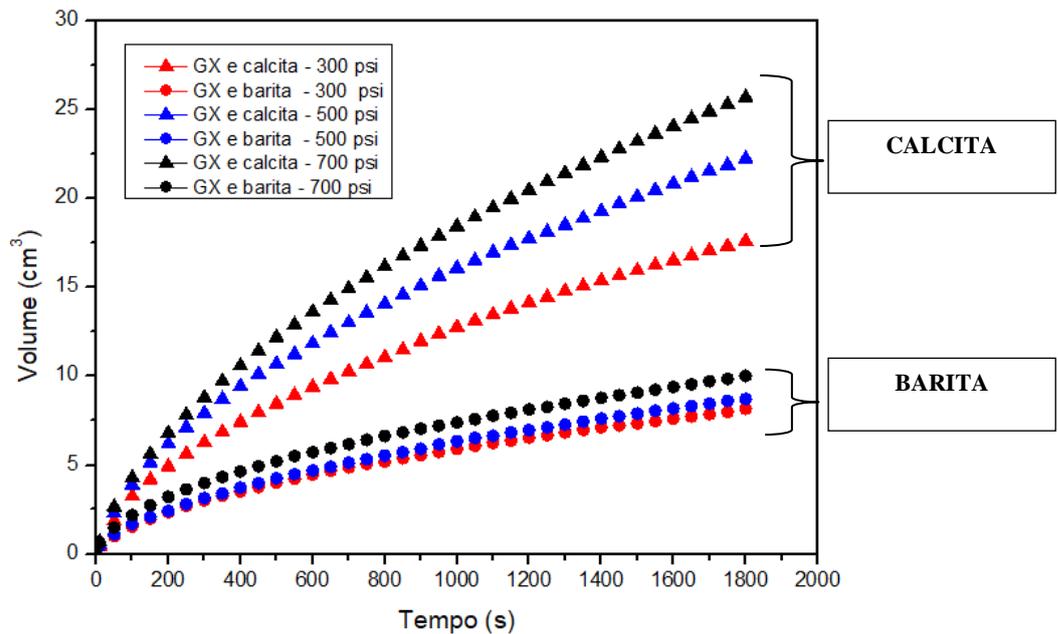


Figura 27 - Efeito dos sólidos calcita e barita nos fluidos com goma xantana.

4.2.2 Experimentos com os fluidos viscosificados com carboximetilcelulose

4.2.2.1 Utilização do adensante barita

Podemos observar graficamente, na Figura 28, o efeito da pressão na curva de filtração (volume de filtrado *versus* tempo) para as suspensões de barita em carboximetilcelulose com concentração de 2lb/bbl do viscosificante.

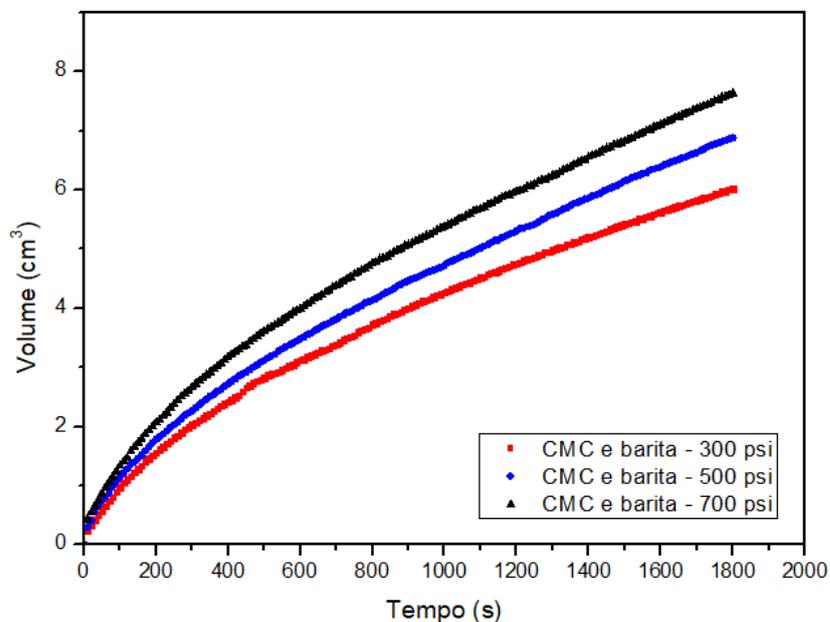


Figura 28 - Gráfico volume de filtrado obtido *versus* tempo de filtração das suspensões de carboximetilcelulose e barita em diferentes pressões.

Como observado com os fluidos anteriores, viscosificados com goma xantana, conforme a pressão aumenta o volume final de filtrado também aumenta.

Os dados experimentais de volume de filtrado, espessura da torta e porosidade da filtração do fluido carboximetilcelulose e barita são apresentados na tabela 13. Os experimentos foram realizados a temperatura ambiente, com duração de 30 minutos e em três diferentes pressões: 300 psi, 500 psi e 700 psi.

Tabela 13 - Parâmetros experimentais de filtração do fluido carboximetilcelulose e barita.

| Parâmetros de Filtração – CMC e barita | | | | |
|---|--|--------------------------------------|--|-------------------|
| Pressão (psi) | Volume final de filtrado (cm³) | Espessura da tortamedida (cm) | Espessura da torta calculada (cm) | Porosidade |
| 300 | 6,02 | 0,20 | 0,28 | 0,58 |
| 500 | 6,88 | 0,32 | 0,30 | 0,51 |
| 700 | 7,64 | 0,36 | 0,34 | 0,56 |

Na filtração do fluido carboximetilcelulose e barita podemos observar que o volume final de filtrado, observado na Figura 29, aumenta, conforme o aumento da pressão.

As espessuras calculadas apresentaram valores próximos aos valores obtidos experimentalmente, comprovando a eficiência do equacionamento e também do experimento realizado.

Os valores da porosidade das tortas com este fluido, assim como o fluido anterior, apresentaram valores elevados.



Figura 29 – Volume de filtrado obtido no experimento com o fluido CMC e barita.

4.2.2.2 Utilização do adensante calcita

A curva de filtração obtida (volume de filtrado *versus* tempo) para as suspensões de calcita em carboximetilcelulose com concentração de 2lb/bbl, pode ser observada na Figura 30. O efeito da pressão pode ser observado neste experimento. Conforme a pressão aumenta, o volume final de filtrado também aumenta.

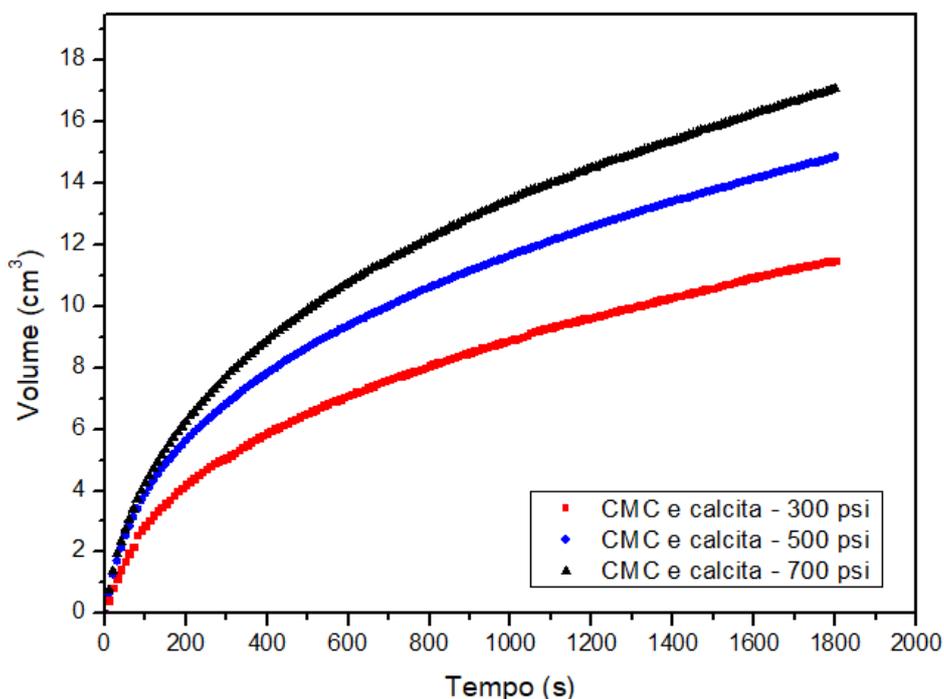


Figura 30 - Gráfico volume de filtrado obtido *versus* tempo de filtração das suspensões de carboximetilcelulose e calcita em diferentes pressões.

A tabela 14 apresenta os dados experimentais obtidos na filtração do fluido carboximetilcelulose e calcita.

Tabela 14 - Parâmetros experimentais de filtração do fluido carboximetilcelulose e calcita.

| Parâmetros de Filtração – CMC e calcita | | | | |
|---|---|--------------------------------|-----------------------------------|------------|
| Pressão (psi) | Volume final de filtrado (cm ³) | Espessura da torta medida (cm) | Espessura da torta calculada (cm) | Porosidade |
| 300 | 11,50 | 0,32 | 0,28 | 0,45 |
| 500 | 14,89 | 0,37 | 0,32 | 0,41 |
| 700 | 17,09 | 0,38 | 0,45 | 0,49 |

Podemos observar que o volume final de filtrado, do fluido carboximetilcelulosee calcita, aumenta conforme o aumento da pressão; assim como ocorreu na filtração com o fluido anterior (goma xantana e calcita).

A espessura da torta formada experimentalmente e medida com paquímetro, aumenta com o aumento da pressão. Vale destacar que as espessuras das tortas das suspensões preparadas com calcita são bem maiores do que as espessuras das suspensões com barita. Isto pode ser explicado pela densidade da barita ser maior que a da calcita, possuindo uma maior concentração de sólidos que irão se depositar e aumentar a espessura da torta.

4.2.2.3 Comparação do efeito do sólido nos fluidos com carboximetilcelulose

Na figura 31, estão os fluidos com carboximetilcelulose e os sólidos barita e calcita. Pode ser observado que os fluidos com o sólido calcita também apresentaram mais que o dobro do volume de filtrado, que os fluidos com o sólido barita assim como no gráfico da comparação de goma xantana. Assim como nos experimentos com a goma xantana, para os fluidos preparados com carboximetilcelulose o menor volume de filtrado para os fluidos contendo barita era esperado pois como estudado por Buranasrisak e Narasingha (2012), o menor tamanho das partículas do sólido barita que apresenta maior quantidade de partículas na faixa de 15 à 30 μ m, contribui para o aumento da viscosidade da suspensão e conseqüentemente um menor volume de filtrado.

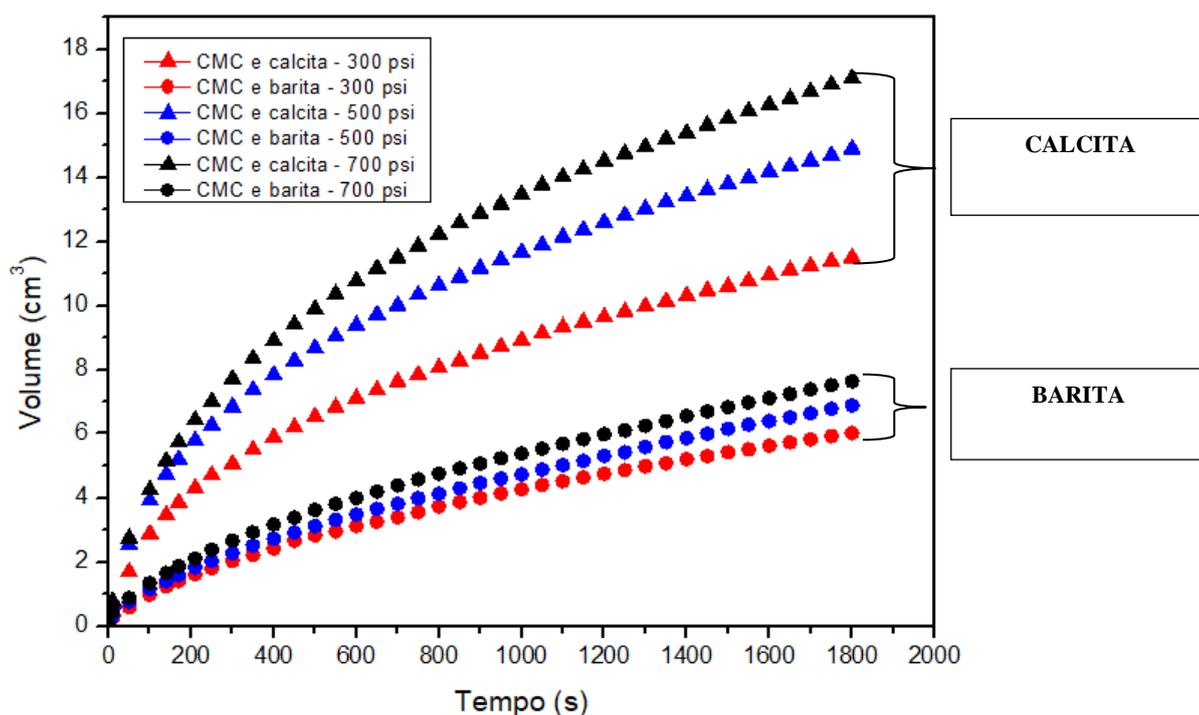


Figura 31 - Efeito do sólido Carboximetilcelulose com o adensante calcita e barita.

4.2.3 Efeito do viscosificante

As figuras 32 e 33 representam o efeito dos viscosificantes goma xantana (GX) e carboximetilcelulose (CMC) nas suspensões formadas com barita e calcita, respectivamente, em três diferentes pressões.

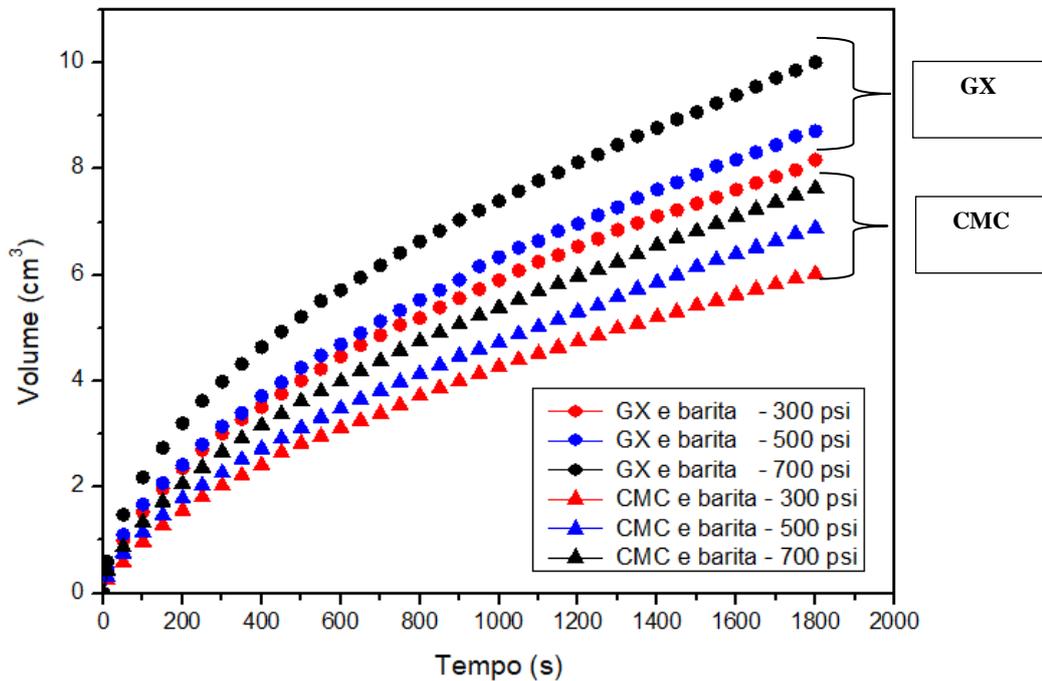


Figura 32 - Efeito do viscosificante nas suspensões com o adensante barita.

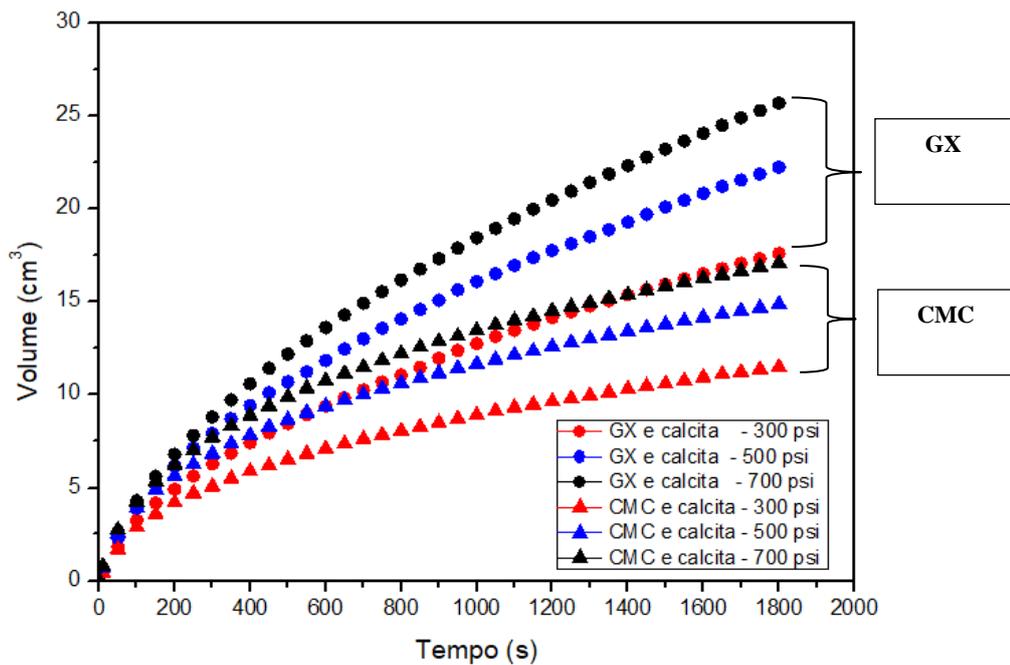


Figura 33 - Efeito do viscosificante nas suspensões com o adensante calcita.

Para esses fluidos é possível observar que as suspensões formuladas com o polímero CMC possuem um menor volume de filtrado do que as suspensões com o polímero GX, independente do sólido utilizado. Isto pode ser justificado pelo fato da CMC ser um polímero de alta massa molecular, apresentando em geral maiores valores de tensão de cisalhamento e viscosidade aparente quando comparados com as suspensões com o polímero GX. Outro fator que também pode ser levado em consideração é o fato do polímero CMC ser utilizado como redutor de filtrado (LUCENA D.V. , LIRA H.L. , AMORIM L.V., 2014).

4.2.4 Erro experimental

Os experimentos com as suspensões de barita foram realizados em triplicata. Foi tirada uma média dos volumes obtidos nesses três experimentos e calculado um volume médio o qual foi considerado e utilizado nos cálculos seguintes. A partir dos valores da triplicata foi possível calcular o erro experimental dos experimentos. O erro médio foi de 9 %, sendo este calculado a partir de 1 vez o valor do desvio padrão calculado ponto a ponto nos experimentos. Os cálculos do erro experimental foram realizados a partir dos dados dos fluidos de goma xantana (GX) e de carboximetilcelulose (CMC), ambos nas 3 pressões de trabalho. A partir do erro de todos esses experimentos, foi calculada uma média de todos os erros, sendo esta média considerada o valor do erro para todos os experimentos. O valor do erro foi adotado para os experimentos com calcita também. A curva de filtração da triplicata realizada com o fluido GX e barita na pressão de 500 psi encontra-se representada na figura 34. Já o gráfico com a média de volume obtidos na triplicata juntamente com a barra de erro experimental, encontra-se disponível na figura 35, para a pressão de 500 psi. No Anexo B deste trabalho, estão as curvas de filtração da triplicata dos demais fluidos preparados. E no Anexo C os gráficos com volume médio e suas barras de erro representadas.

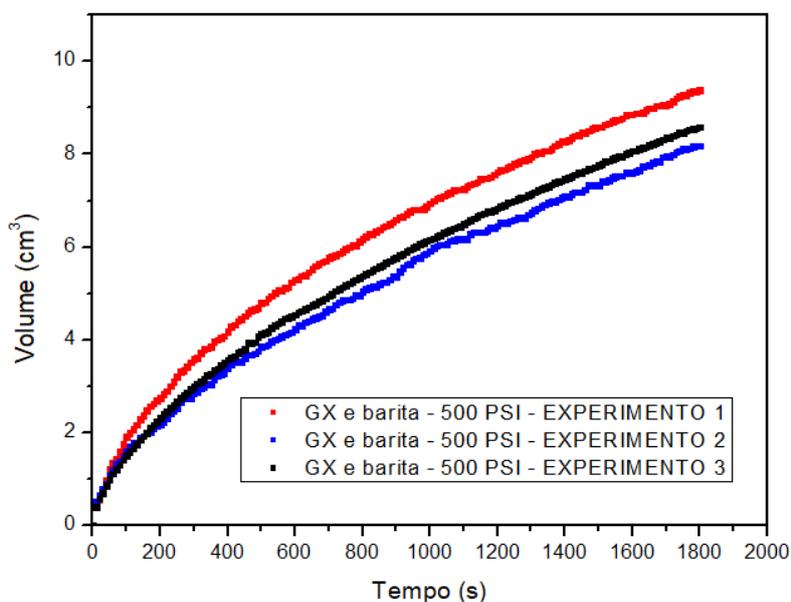


Figura 34 – Triplicata realizada com o fluido goma xantana e barita a 500 psi.

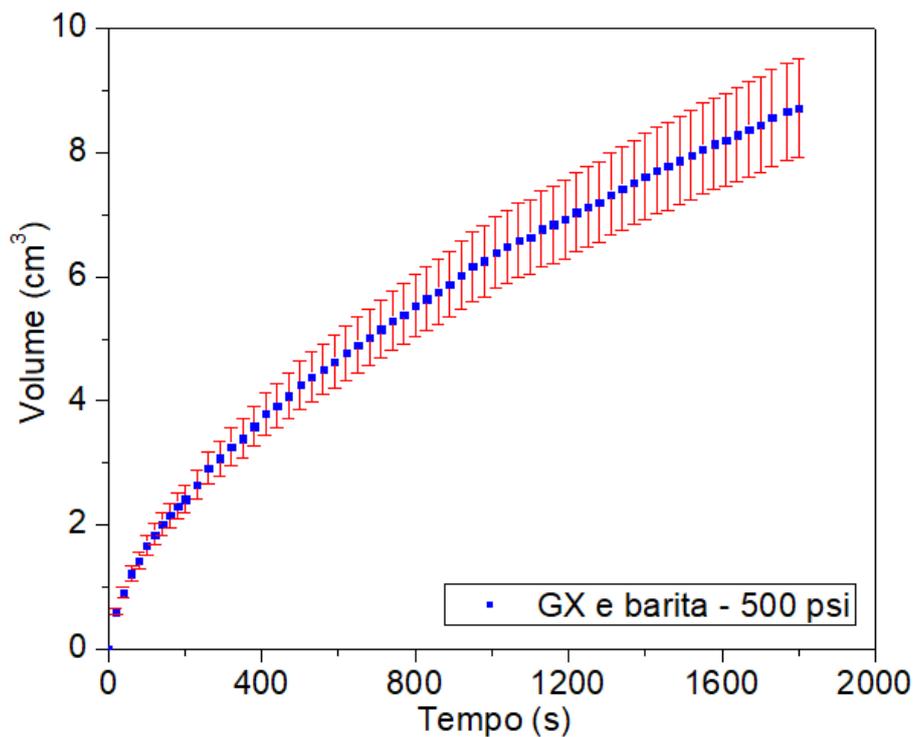


Figura 35 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e barita a 500 psi

A figura 36 representa a curva de filtração da triplicata do fluido de CMC e barita na pressão de 500 psi. e a figura 39 o gráfico com a média de volume obtidos na triplicata juntamente com a barra de erro experimental.

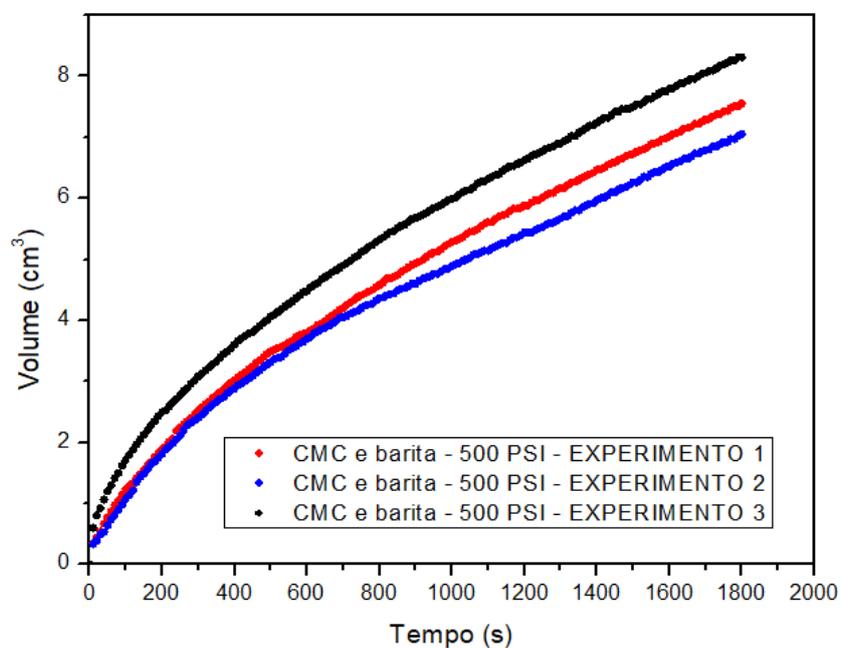


Figura 36 – Triplicada realizada com o Fluido carboximetilcelulose e barita a 500 psi.

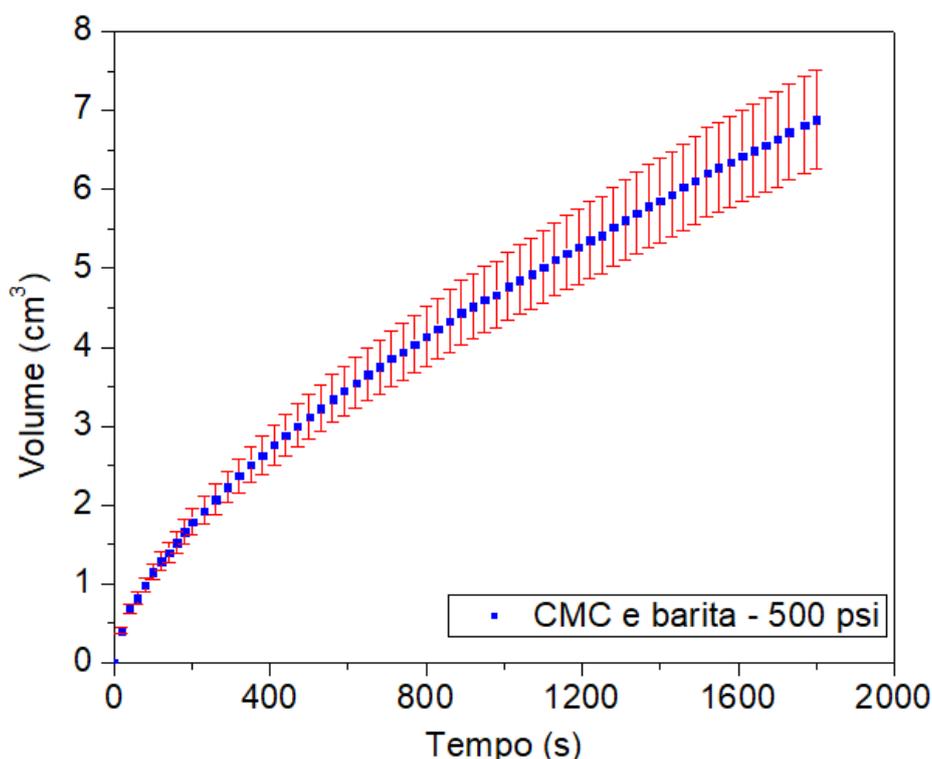


Figura 37 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e barita a 500 psi.

4.3 Estimação de Parâmetros

4.3.1 Estimação de parâmetros da equação da teoria simplificada da filtração dos fluidos viscosificados com goma xantana.

Utilizando a equação da teoria simplificada da filtração para fluidos não newtonianos e os dados experimentais de **volume de filtrado** obtidos *versus* **tempo** de filtração, foram estimados com auxílio de um *software* os parâmetros (a e b) presentes na equação 47, representada novamente a seguir:

$$V = \frac{1}{b} \left(\frac{b t}{\left(\frac{n}{n+1}\right) \left(\frac{1}{A}\right) \left(\frac{M}{\Delta p}\right)^{\frac{1}{n}}} + a^{\frac{(n+1)}{n}} \right)^{\frac{n}{n+1}} - \frac{a}{b}$$

A tabela 15 apresenta a estimativa dos parâmetros a,b presentes no equacionamento da teoria simplificada da filtração.

Foi observado que esses parâmetros também se correlacionam com a pressão, pois conforme o aumento da pressão os valores de a e b também aumentam

Além dos valores de **a** e **b**, o *software* fornece também o valor do desvio padrão dos parâmetros estimados. Os valores do desvio fornecido pelo programa são

significativos, pois apesar de elevado o parâmetro estimado está numa ordem de grandeza 2 vezes maior que do o desvio padrão estimado. Com isso, foi possível construir gráficos de sensibilidade paramétrica, onde foi observado o comportamento do modelo da curva de filtração mais seu limite superior e seu limite inferior.

Tabela 15 - Parâmetros estimados para equação 47, fluido GX e barita e GX e calcita.

| GX e BARITA | | | |
|----------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Pressão (psi) | a | b | R² |
| 300 | $4,67. 10^7 \pm 1,40. 10^5$ | $4,22. 10^6 \pm 3,79. 10^4$ | 0,99 |
| 500 | $7,94. 10^7 \pm 2,61. 10^5$ | $6,27. 10^6 \pm 6,65. 10^4$ | 0,99 |
| 700 | $9,95. 10^7 \pm 3,04. 10^5$ | $8,96. 10^6 \pm 6,91. 10^4$ | 0,99 |
| GX e CALCITA | | | |
| Pressão (psi) | a | b | R² |
| 300 | $7,8. 10^7 \pm 2,53. 10^5$ | $3,70. 10^6 \pm 3,25. 10^4$ | 0,99 |
| 500 | $12,20. 10^7 \pm 3,49. 10^5$ | $4,59. 10^6 \pm 3,57. 10^4$ | 0,99 |
| 700 | $16,75. 10^7 \pm 3,89. 10^5$ | $5,01. 10^5 \pm 3,44. 10^4$ | 0,99 |

As Figuras 38, 39 e 40 a seguir apresentam o comportamento do modelo estimado nas curvas de filtração, com o valor dos parâmetros mais o limite superior e o limite inferior deste parâmetro. É possível observar que o modelo não subestima ou superestima o volume de filtrado inicial ou final, como ocorreu nos experimentos de Jaffal, Mohtar e Gray (2016) utilizando a teoria de Dewan e Chenevert (2001).

Nos gráficos ainda estão representadas as barras de erro experimental. E é possível observar que o modelo encontra-se dentro deste limite de erro experimental. Os parâmetros da equação estimados para o fluido goma xantana calcita seguem as mesmas características que as suspensões com barita. Conforme o aumento da pressão os valores de a e b também aumentam. As Figuras 41, 42 e 43 apresentam o comportamento das curvas de filtração para o fluido goma xantana e calcita, estimadas com o valor dos parâmetros mais seu limite superior e seu limite inferior.

Assim como o fluido goma xantana e barita, para a curva goma xantana e calcita, uma mudança nos parâmetros estudados pouco influencia no incremento da curva, uma vez que as abordagens analíticas e numéricas pouco divergem, para os experimentos nas três pressões

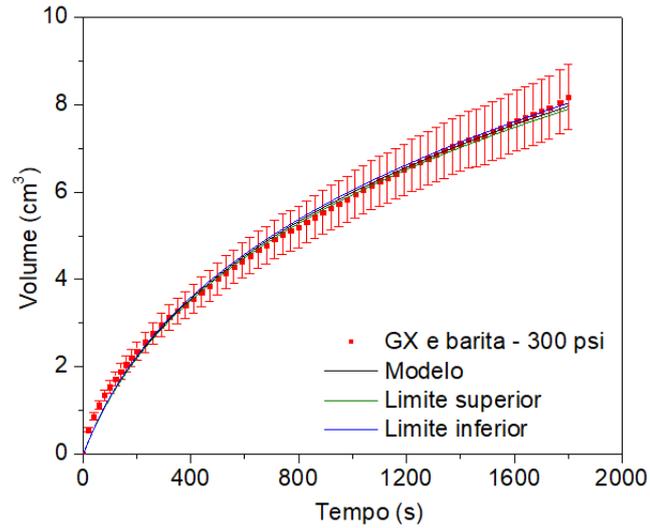


Figura 38 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e barita a 300 psi.

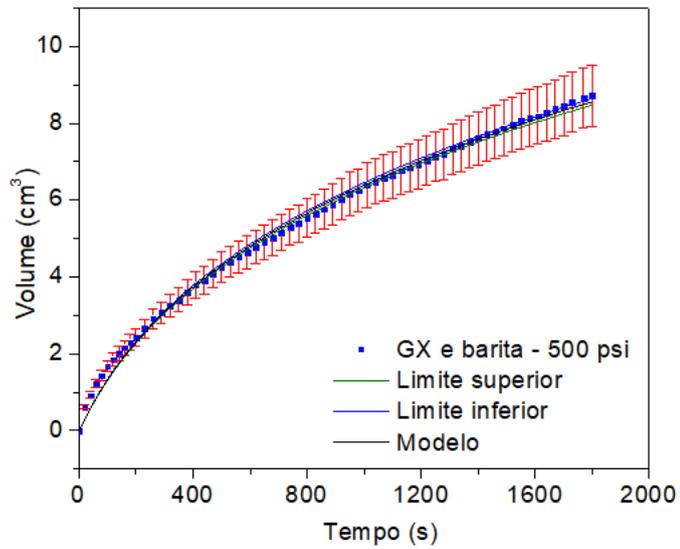


Figura 39 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e barita a 500 psi.

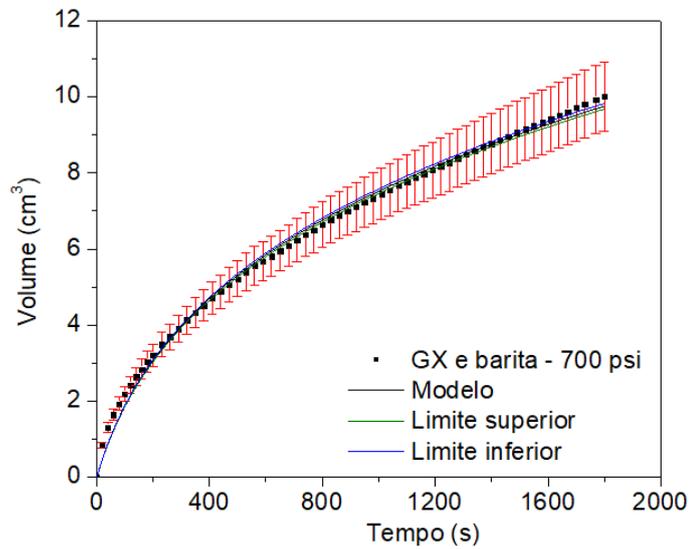


Figura 40 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e barita a 700 psi.

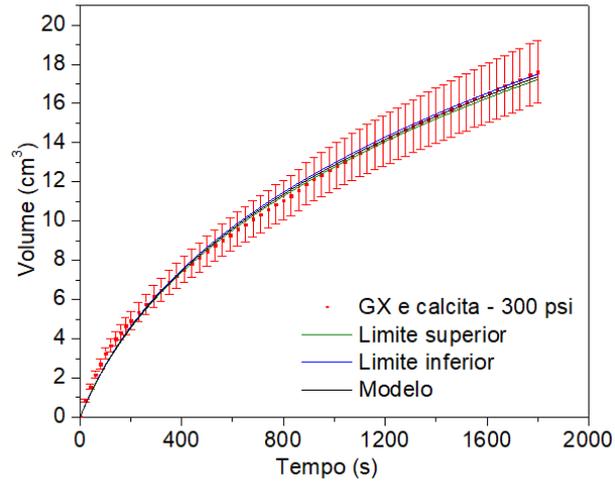


Figura 41 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e calcita a 300 psi.

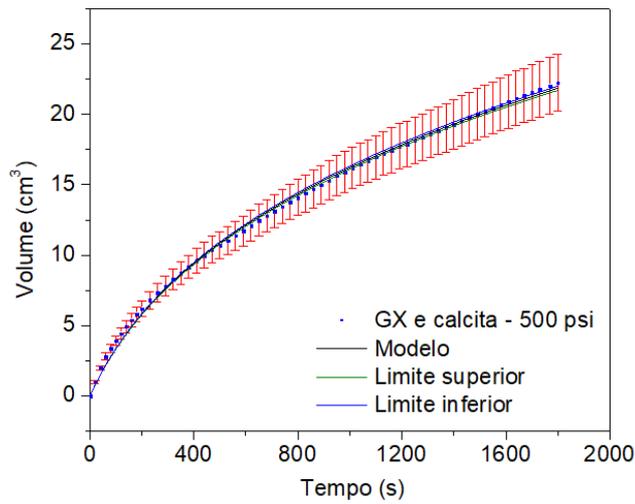


Figura 42 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e calcita a 500 psi.

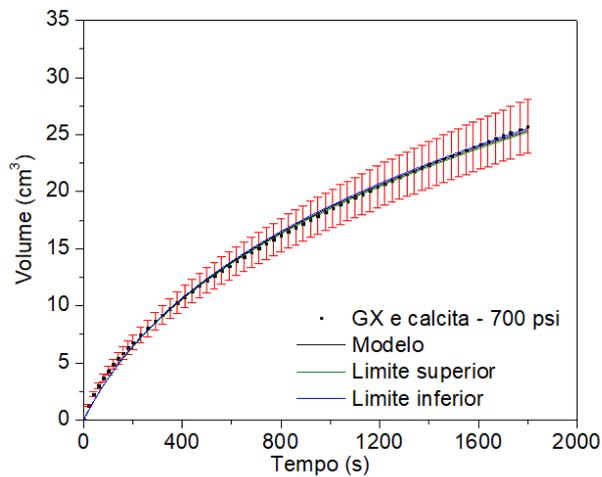


Figura 43 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de GX e calcita a 700 psi.

4.3.2 Estimação de parâmetros da equação da teoria simplificada da filtração dos fluidos viscosificados com CMC.

Os parâmetros *a*, *b* utilizados no equacionamento da teoria simplificada da filtração para o fluido CMC e barita e CMC e calcita, são representados na tabela 16. Foi observado que esses parâmetros também se correlacionam com a pressão. Conforme o aumento da pressão os valores de *a* e *b* também aumentam.

Tabela 16 - Parâmetros estimados para equação 30, fluidos CMC e barita e CMC e calcita.

| CMC e BARITA | | | |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Pressão | a | b | R² |
| 300 | $2,38. 10^8 \pm 8,33. 10^5$ | $4,13. 10^7 \pm 3,21. 10^5$ | 0,99 |
| 500 | $3,77. 10^8 \pm 2,18. 10^6$ | $5,81. 10^7 \pm 7,70. 10^5$ | 0,99 |
| 700 | $4,99. 10^8 \pm 2,61. 10^6$ | $7,73. 10^7 \pm 8,04. 10^5$ | 0,99 |
| CMC e CALCITA | | | |
| Pressão | a | b | R² |
| 300 | $1,04. 10^8 \pm 3,48. 10^5$ | $2,22.10^7 \pm 6,81. 10^4$ | 0,99 |
| 500 | $1,43. 10^8 \pm 3,21. 10^5$ | $2,71. 10^7 \pm 4,78. 10^4$ | 0,99 |
| 700 | $1,96. 10^8 \pm 2,56. 10^5$ | $2,89. 10^7 \pm 3,34. 10^4$ | 0,99 |

Além dos valores de *a* e *b*, o *software* fornece também o valor do desvio padrão desses parâmetros estimados. Com isso, foi possível construir gráficos de sensibilidade paramétrica, onde pode-se observar o comportamento do modelo caso os parâmetros estimados a partir da equação possuam um desvio. As figuras 44,45,46a seguir apresentam o comportamento das curvas de filtração do fluido goma xantana e barita nas três pressões trabalhadas, estimadas com o seu limite superior e inferior calculado pelo desvio padrão do experimento. As figuras 47, 48 e 50 a seguir apresentam o comportamento das curvas de filtração para o fluido carboximetilcelulose e calcita, estimadas com o valor dos parâmetros mais seu limite superior e seu limite inferior. Neste caso também não ocorreu a subestimação ou superestimação do modelo, como ocorreu nos experimentos de Jaffal, Mohtar e Gray (2016) utilizando a teoria de Dewan e Chenevert (2001).

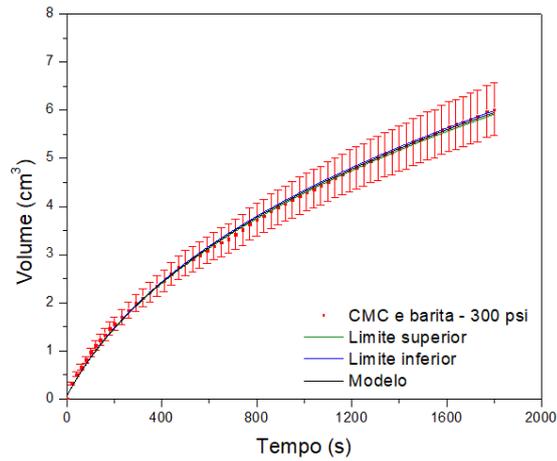


Figura 44 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e barita a 300 psi.

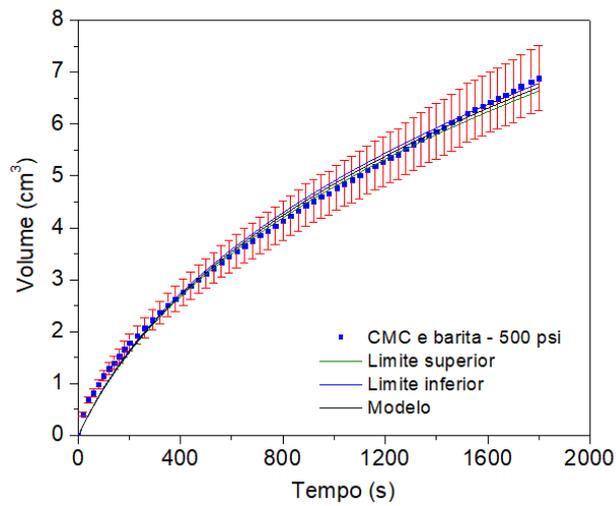


Figura 45 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e barita a 500 psi.

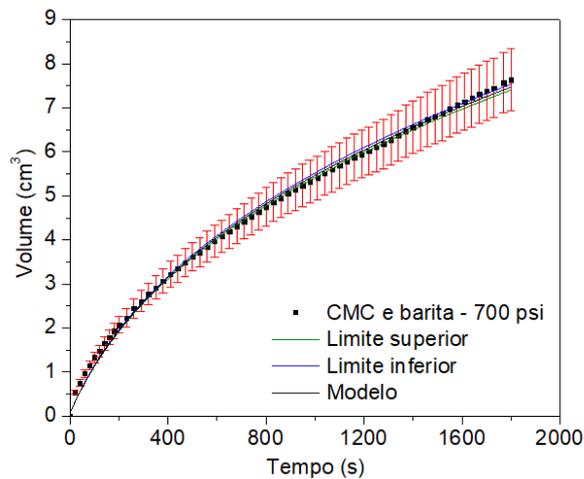


Figura 46 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e barita a 700 psi.

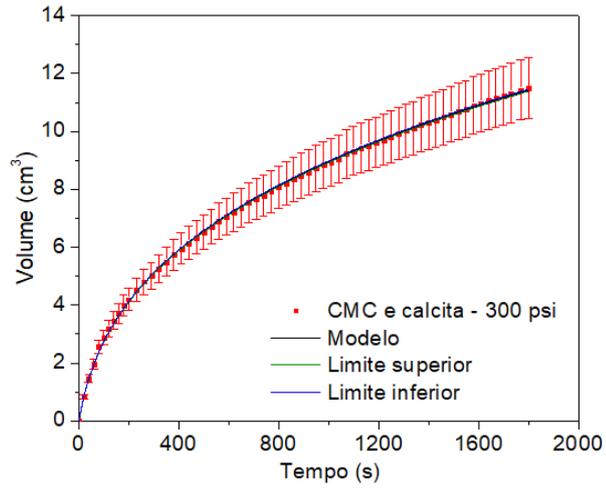


Figura 47 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e calcita a 300 psi.

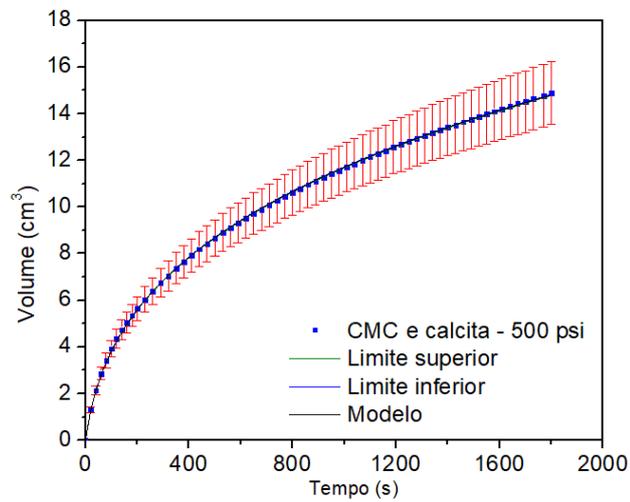


Figura 48 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e calcita a 500 psi

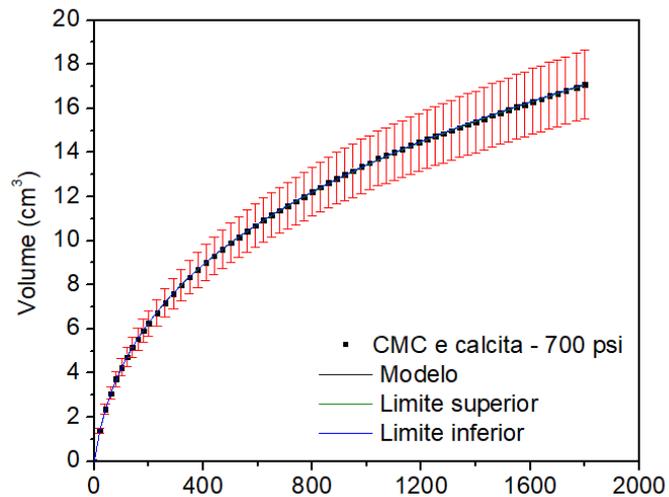


Figura 49 - Gráfico de sensibilidade paramétrica da suspensão de CMC e calcita a 700 psi.

4.4 Cálculo dos Parâmetros da Torta de Filtração

4.4.1 Parâmetros de filtração obtidos dos fluidos com goma xantana.

Depois de estimados todos os parâmetros presentes no equacionamento da teoria simplificada da filtração, foi calculada a permeabilidade da torta de filtração, a partir das equações presentes na tabela 17.

Tabela 17– Parâmetro calculado da torta de filtração dos fluidos GX e barita e GX e calcita.

| Fluido GX e BARITA | | |
|----------------------------|--|-------------------------|
| Pressão (psi) | Permeabilidade (cm²) | |
| | Teoria Simplificada | Kozeny – Carman |
| 300 | 8,32. 10 ⁻⁸ | 1,35. 10 ⁻⁹ |
| 500 | 6,68. 10 ⁻⁸ | 1,95. 10 ⁻⁹ |
| 700 | 4,93. 10 ⁻⁸ | 1,77 10 ⁻⁹ |
| Fluido GX e CALCITA | | |
| 300 | 2,35. 10 ⁻⁷ | 2,12. 10 ⁻⁹ |
| 500 | 1,90. 10 ⁻⁷ | 1,50. 10 ⁻¹⁰ |
| 700 | 1,79. 10 ⁻⁷ | 1,60. 10 ⁻⁹ |

A permeabilidade das tortas formadas na filtração dos fluidos viscosificados com GX, calculada pelo equacionamento da teoria simplificada da filtração adaptada para fluidos não Newtonianos, diminuiu com o aumento da pressão como era previsto. Os valores de permeabilidade calculados pela equação da teoria simplificada corroboram os valores encontrados na literatura utilizando um outro equacionamento (Ferraz, 2014). A permeabilidade calculada pelo equacionamento de Kozeny-Carman está uma ordem de grandeza acima do valor calculado pela teoria simplificada. A tabela ainda mostra que na equação de Kozeny-Carman o aumento da pressão não causa a diminuição da permeabilidade, assim como demonstrado na teoria simplificada. Isso já era esperado visto que a equação de Kozeny-Carman é usada para meio poroso.

De acordo com JIAO & SHARMA (1993) espera-se que com o aumento da pressão a permeabilidade da torta de filtração diminua, como demonstrado pelos cálculos com a equação da teoria simplificada.

Comparando o efeito do sólido, pode ser observado que as tortas de barita apresentam uma menor permeabilidade do que das tortas de calcita, ou seja, as tortas de barita são menos permeáveis que as de calcita. Isso provavelmente está relacionado com o tamanho das partículas de barita serem menor.

4.4.2 Parâmetros de filtração obtidos dos fluidos com CMC.

Para os fluidos viscosificados com CMC, após a obtenção dos parâmetros da equação de forma similar a descrita anteriormente, foi possível analisar a permeabilidade da torta para estes fluidos como pode ser observado na tabela 18a seguir.

Tabela 18 - Parâmetro calculado da torta de filtração do fluido CMC e barita.

| Fluido CMC e BARITA | | |
|-----------------------------|--|-------------------------|
| Pressão (psi) | Permeabilidade (cm²) | |
| | Teoria Simplificada | Kozeny – Carman |
| 300 | 10,07. 10 ⁻⁸ | 1,76. 10 ⁻⁹ |
| 500 | 7,47. 10 ⁻⁸ | 9,78. 10 ⁻¹⁰ |
| 700 | 6,67. 10 ⁻⁸ | 1,54 10 ⁻⁹ |
| Fluido CMC e CALCITA | | |
| 300 | 1,78. 10 ⁻⁷ | 8,40. 10 ⁻¹⁰ |
| 500 | 1,47. 10 ⁻⁷ | 1,23. 10 ⁻⁹ |
| 700 | 1,58. 10 ⁻⁷ | 1,89 10 ⁻⁹ |

A permeabilidade das tortas formadas na filtração dos fluidos viscosificados com CMC, calculada pelo equacionamento da teoria simplificada da filtração para fluidos não Newtonianos, também diminuiu com o aumento da pressão, corroborando JIAO & SHARMA (1993) que afirma que com o aumento da pressão a permeabilidade da torta de filtração diminua. Para estes fluidos os valores de permeabilidade calculados pela equação da teoria simplificada apresentam valores próximos aos valores encontrados por Ferraz (2014) utilizando o equacionamento de Dewan e Chenevert (2001). No cálculo pela equação de Kozeny Carman, assim como no experimento com o fluido anterior, o aumento da pressão não causa a diminuição da permeabilidade como demonstrado pelos cálculos com a equação da teoria simplificada.

Na comparação do efeito do sólido, para os fluidos viscosificados com CMC, as tortas de barita também apresentam uma menor permeabilidade, ou seja, são menos permeáveis do que as tortas de calcita assim como demonstrado anteriormente com os fluidos viscosificados com goma xantana.

A tabela 19 a seguir apresenta o valor da permeabilidade da torta de todos os fluidos estudados, onde agora é possível comparar a influência do viscosificante e do sólido na permeabilidade das tortas. Nota-se que quando comparamos os fluidos com barita para ambos os viscosificantes a permeabilidade encontra-se na mesma ordem de grandeza. Isto indica que a mudança de viscosificante não possui grande influência na variação da permeabilidade. Agora se comparamos os fluidos preparados com o mesmo viscosificante, por exemplo o CMC, nota-se que a permeabilidade das tortas de CMC e

barita possuem uma ordem de grandeza menor. Este comportamento mostra que o sólido possui influencia no valor da permeabilidade.

Tabela 19 -Permeabilidade calculada.

| Permeabilidade - Teoria simplificada da filtração | | | |
|--|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | Pressão (psi) | | |
| | 300 | 500 | 700 |
| Fluido GX e barita | $8,32 \cdot 10^{-8}$ | $6,68 \cdot 10^{-8}$ | $4,93 \cdot 10^{-8}$ |
| Fluido GX e calcita | $2,35 \cdot 10^{-7}$ | $1,90 \cdot 10^{-7}$ | $1,79 \cdot 10^{-7}$ |
| Fluido CMC e barita | $10,07 \cdot 10^{-8}$ | $7,47 \cdot 10^{-8}$ | $6,67 \cdot 10^{-8}$ |
| Fluido CMC e calcita | $1,78 \cdot 10^{-7}$ | $1,47 \cdot 10^{-7}$ | $1,58 \cdot 10^{-7}$ |

Ainda foi observado que com o aumento da pressão a permeabilidade da torta de filtração diminui em praticamente todos os casos estudados.

Como visto anteriormente as suspensões formuladas com o sólido barita são menos permeáveis que as suspensões de calcita, independente do viscosificante utilizado. Isso é importante pois a baixa permeabilidade da torta de filtração significa uma redução da invasão de fluido na formação.

Além disso, pode ser observado que os fluidos com barita preparados com CMC formaram tortas mais permeáveis que os de GX, o que pode ser alguma interação do sólido com o polímero. Enquanto isso, nos fluidos com calcita preparados com GX são mais permeáveis que os preparados com CMC, o que pode ser ocasionado pela estrutura do polímero.

4.4.3 Cálculo do índice de compressibilidade.

A partir do ajuste linear do gráfico K x P (permeabilidade *versus* pressão) representado na figura 50, é possível calcular o índice de compressibilidade das tortas.

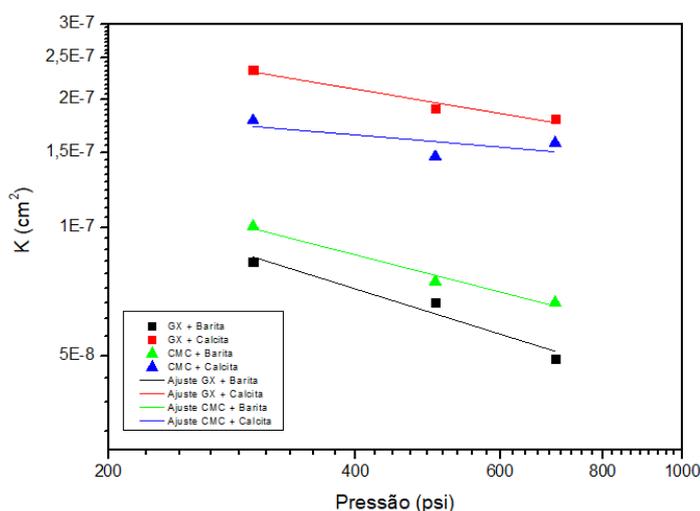


Figura 50 – Gráfico de permeabilidade x pressão.

A tabela 20 apresenta os valores o índice de compressibilidade (ν) calculados pela relação apresentada na equação 53. Nela podemos observar o coeficiente de correlação, o K_0 , e o valor do índice que indicam que as tortas de barita possuem um maior valor do índice de compressibilidade.

Tabela 20- Índice de compressibilidade

| Fluido | ν | K_0 (cm^2) | R^2 |
|---------------------------------|-------|----------------------------|-------|
| Fluido GX e barita | 0,60 | $2,63 \cdot 10^{-6}$ | 0,97 |
| Fluido GX e calcita | 0,32 | $1,48 \cdot 10^{-6}$ | 0,97 |
| Fluido CMC e barita | 0,49 | $1,70 \cdot 10^{-6}$ | 0,99 |
| Fluido CMC e calcita | 0,16 | $4,36 \cdot 10^{-7}$ | 0,98 |

De acordo com Dewan e Chenevert (2001), o índice de compressibilidade é calculado a partir de uma curva de *slowness* onde é necessário que tenha uma variação de pressão durante o experimento. Como neste trabalho não foram realizadas filtrações variando a pressão num mesmo experimento, foi utilizada um novo equacionamento para obter o valor do índice de compressibilidade, seguindo uma metodologia diferente do que vinha sendo apresentado nos trabalhos do laboratório de escoamento de fluidos. Para Chenevert se o valor do índice de compressibilidade for zero, a torta é considerada incompressível. Já se ν atingir a unidade tem-se uma torta tão compressível que a sua permeabilidade é inversamente proporcional ao diferencial de pressão através dela. Os valores do índice para os fluidos viscosificados com CMC e GX são semelhantes aos valores encontrados no trabalho de Ferraz (2014) calculado pelo equacionamento de Chenevert. E os valores obtidos neste trabalho pela equação 55, indicam que as tortas de barita são mais compressíveis pois são menores.

5 CONCLUSÕES

Comparando-se o comportamento reológico das suspensões dos polímeros goma xantana e carboximetilcelulose, observou-se que as suspensões com carboximetilcelulose possuíram maiores valores de tensão de cisalhamento em comparação as suspensões de goma xantana, para uma dada taxa de deformação.

Os ensaios de filtração com variação de pressão indicaram que o aumento da pressão ocasiona o aumento do volume de filtrado, independente do tipo de sólido presente na suspensão.

Com relação ao efeito do sólido sobre a filtração, verificou-se que, para suspensões utilizando o mesmo viscosificante, os fluidos com calcita apresentaram maior volume de filtrado que os fluidos com barita. Isto ocorre provavelmente devido ao tamanho das partículas da calcita, que são maiores.

Com relação ao efeito do viscosificante, verificou-se que, para suspensões com o mesmo sólido, foi possível observar que as suspensões formuladas com goma xantana possuem um maior volume de filtrado que as suspensões com carboximetilcelulose, independente do sólido utilizado.

Os experimentos de barita foram realizados em triplicata, obtendo um erro experimental de 9%.

Os parâmetros estimados, com auxílio do *software* de estimação, utilizando o equacionamento baseado na teoria simplificada da filtração para fluidos não Newtonianos, foram de boa qualidade e baixa variação de seu limite superior e inferior não apresentando superestimação como visto na literatura, utilizando-se outro modelo. Os parâmetros estimados permitiram calcular a permeabilidade da torta de filtração. Os valores de permeabilidade obtidos são coerentes com os valores presentes na literatura, e inclusive calculados utilizando-se outra metodologia. Os experimentos realizados geraram um banco de dados que pode ser utilizado em trabalhos futuros.

Foram calculados os valores do índice de compressibilidade utilizando uma metodologia clássica, e os valores também apresentam correspondência com os valores encontrados na literatura a partir de uma outra metodologia.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Experimentos testando novos fluidos, principalmente fluidos base óleo.
- Estimar o erro diretamente do valor da permeabilidade.
- Realizar experimentos com *slowness*.
- Com base neste banco de dados comparar a metodologia com outras da literatura.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELRAHIM, K. A., RAMASWAMY H. S.; **High Temperature/Pressure Rheology of Carboxymethyl Cellulose (CMC)**, Food Research International, v. 28, n. 3, p. 285-290, 1995.
- ABIMBOLA, M.; KHAN, F.; KHAKZAD, N. **Dynamic safety risk analysis of offshore drilling**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 30, p. 74–85, 2014.
- ARAÚJO T. A., FARIA S., FRANÇA F. P., CARDOSO V. L. Avaliação do comportamento reológico dos diferentes meios de produção de goma xantana a partir do caldo de cana. VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Campinas, SP, 2005.
- ARAÚJO, C. A. O. **Estudo da Filtração Cruzada em Geometria Cilíndrica**. Dissertação de Mestrado. Instituto de tecnologia. Departamento de Engenharia química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2010.
- ASME SHALE SHAKER COMMITTEE. **Drilling Fluids Processing – Handbook**. Editora Elsevier. Oxford, UK, 2005.
- BARBOSA, M. I. R. **Bentonitas aditivas com polímeros para a aplicação em fluidos de perfuração**. 2006. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2006.
- BARBOSA, R. F. **Automação e validação de uma célula filtração *on line*** 2016. 67 p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2016.
- BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An Introduction to Rheology**. Elsevier, 1989.
- BOURGOYNE JR, A.T.; MILLHEIM, K.K.; CHENEVERT, M.E.; YOUNG, F.S. **Applied Drilling Engineering**. Second Printing, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, 1991.
- BURANASRISAK, P.; NARASINGHA, M. H; Effects of particle size distribution and packing characteristics on the preparation of highly-loaded coal-water slurry. International Journal of Chemical Engineering and Applications. p. 31-35. 2012.
- CAENN, R.; CHILLINGAR, G. V. **Drilling fluids: State of the art**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v.14, p.221, 1996.
- CALABREZ, N. D. **Filtração e Invasão de Fluidos de Perfuração: Estudo comparativo, Caracterização da Torta e Modelagem**. Dissertação de Mestrado. Instituto de tecnologia. Departamento de Engenharia química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2013.

CALÇADA, L.A. ; SCHEID, C.M. ; ARAÚJO, C. A. O. ; WALDMANN, A.T.A. ; MARTINS, A.L. **Analysis of dynamic and static filtration and determination of mud cake parameters.** Brazilian journal of petroleum and gas , v. 5, p. 159-170, 2011.

CARTER, W.D.; 1957, **Disconformity between Lower and Upper Cretaceous in western Colorado and eastern Utah: Geological Society of America Bulletin**, v 68, p. 307- 314, 1957.

COELHO DE CASTRO, L.M.N.; **“Filtração de Suspensões Sólido-Fluido Não Newtoniano”**.RBT, 1981.

DARCY, H. Les Fontaines Publiques de la Ville de DijonParis, 1856.

DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids.** 5 Edition, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1988.

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.

DUARTE, R. G. **Avaliação da Interação Folhelho-Fluido de Perfuração para estudo de Estabilidade de Poço.** Dissertação de Mestrado. Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2004.

FANN - Disponível em:<www.fann.com.br> Acesso em: 02 de setembro de 2017.

FERRAZ, A. S. F. S. **Efeito da distribuição granulométrica de partículas sólidas e de polímeros aniônicos na formação da torta de filtração e no volume de filtrado.** 2014. 76p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2014.

FERREIRA, M. I. P., **“Impactos Ambientais Associados ao Emprego dos Fluidos de Perfuração”**, COPPE / UFRJ, Macaé, RJ, 2003.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos.**LTC, 2010.

GUIMARÃES, I. B.; ROSSI, L. F. S. **Estudo dos constituintes dos fluidos de perfuração: proposta de uma formulação otimizada e ambientalmente correta.** 4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás (PDPETRO). Campinas – SP, 2007.

HANNA, R. A. et al.**Propriedades reológicas das bentonitas de Franca – SP com a adição de polieletrólitos.** 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT), PR, 2006.

JESUS, J.C.; CANUTO, G.H.; LUCENA, S.; MACIEL, S.T.A.; SILVA, G.F. **Desenvolvimento de um fluido de perfuração de poços de petróleo com alta estabilidade térmica.** In: I Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis. Campo Grande, Paraná, 2015.

JIAO,D; SHARMA. **Investigation of dynamic mud cake formation: the concept of minimum overbalance pressure**, Texas, 1993.

KULICKET, W. M., KULL A. H., KULL W., THIELKING H.;**Characterization of Aqueous Carboxymethylcellulose Solutions in Terms of Their Molecular Structure and Its Influence on Rheological Behaviour**, Polymer, v. 37, n. 13, p. 2723-2731, 1996.

LUCENA D.V. , LIRA H.L. , AMORIM L.V. , Efeito de aditivos poliméricos nas propriedades reológicas e de filtração de fluidos de perfuração, Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014.

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

MALVERN - Disponível em: <www.malvern.com.br> Acesso em: 2 de setembro de 2017.

MARTINS, L. F. **Estudo da formação e estabilidade de tortas de filtração na perfuração de poços de petróleo**. Dissertação de Mestrado. Instituto de tecnologia. Departamento de Engenharia química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2013.

MASSARANI, G.; “**Filtration process**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, special issue” September, 1985.

MASSARANI, G.; **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. Programa de Engenharia Química, COPPE/UFRRJ, 2ª edição , 2001.

MASSARANI G.; COELHO DE CASTRO, L.M.N.; “**Filtração de Suspensões Sólido-Fluido Não Newtoniano**”. RBT, 1980.

MEDEIROS, P.T; “Física Industrial II: Apostila Geral” , UFPB, 2011.

MELO, K. C. **Avaliação e modelagem reológica de fluidos de perfuração base água**. 2008. 90p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

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

OLIVEIRA, B.R.**Estudo reológico e da perda de carga no escoamento em fraturas para suspensões de CMC e GX com calcita e carbonato de cálcio laminar**. Monografia . Instituto de tecnologia. Departamento de Engenharia química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2017.

PEÇANHA, R.;**Sistemas particulados: operações unitárias envolvendo partículas e fluidos**. 1.ed. – Rio de Janeiro. Elsevier, 2014.

PEDEN, J.M., ARTHUR, K.G., MARGARITA AVALOS. **“The Analysis of filtration under dynamic and Static Conditions”**, Society of Petroleum Engineers of AIME, SPE 12503, Bakersfield, CA, February 13-14, 1984.

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

R. YAO ET AL., **Effect of water-based drilling fluid components on filter cake structure**, Powder Technology 262 p.51–61, 2014.

SCHAFFEL, S. B. A. **Questão Ambiental na Etapa da Perfuração de Poços Marítimos de Óleo e Gás no Brasil**. Dissertação de Mestrado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

SCHEID, M.C., MASSARANI, G. **Separação sólido-fluido não-newtoniano II: Filtração com formação de torta**, Revista Universidade Rural Série Ciências Exatas e da Terra, v.21, p. 205-210, 2002.

THOMAS, J. E. et al. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: 2 edição . Editora Interciência, 2004.

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

VEIGA, L.F., **Estudo da Toxicidade Marinha de Fluidos de Perfuração de Poços de Óleo e Gás**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1998.

VIANA, V. R. **Uso de goma xantana na estabilização de uma emulsão O/A para veiculação oral de vitamina D3**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Macromoléculas. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2015.

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. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.

Anexo A – Gráfico t/V versus V de cada fluido nas três pressões de trabalho

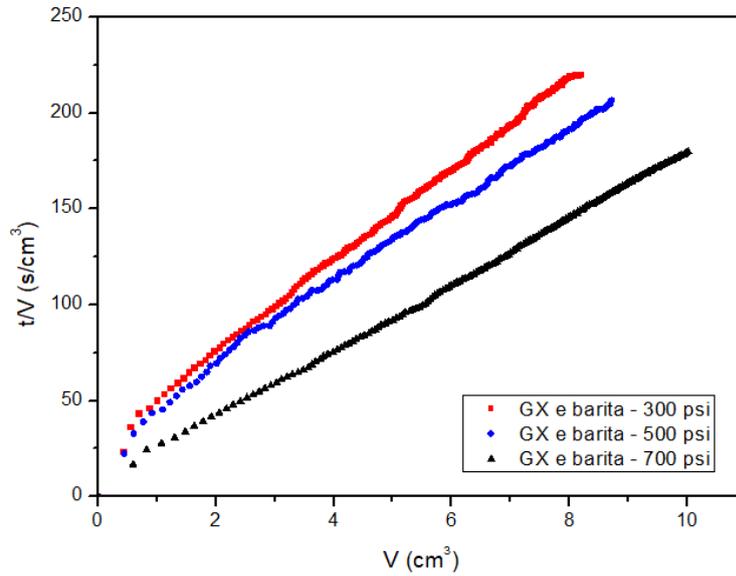


Figura 51 - Gráfico t/V versus volume de filtrado das suspensões de GX e barita em diferentes pressões.

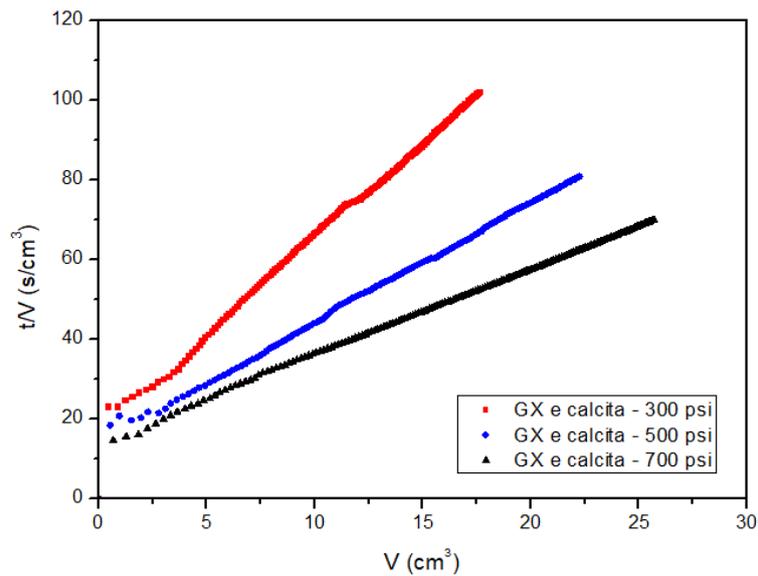


Figura 52 - Gráfico t/V versus volume de filtrado das suspensões de GX e calcita em diferentes pressões.

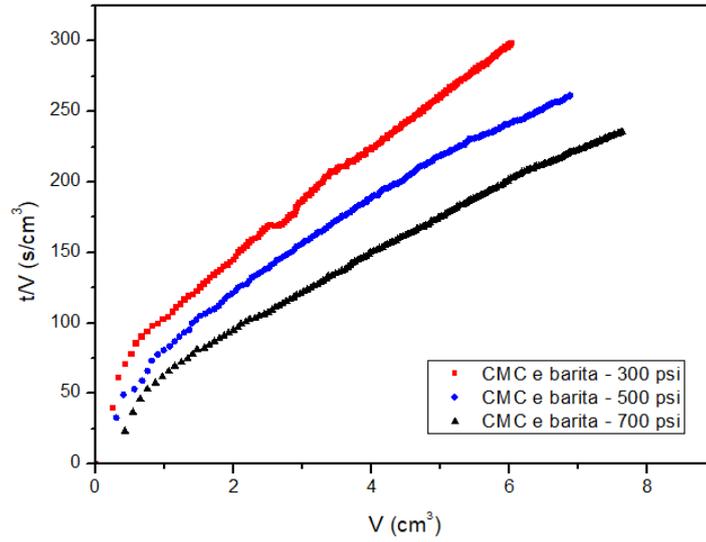


Figura 53 - Gráfico t/V versus volume de filtrado das suspensões de CMCe barita em diferentes pressões.

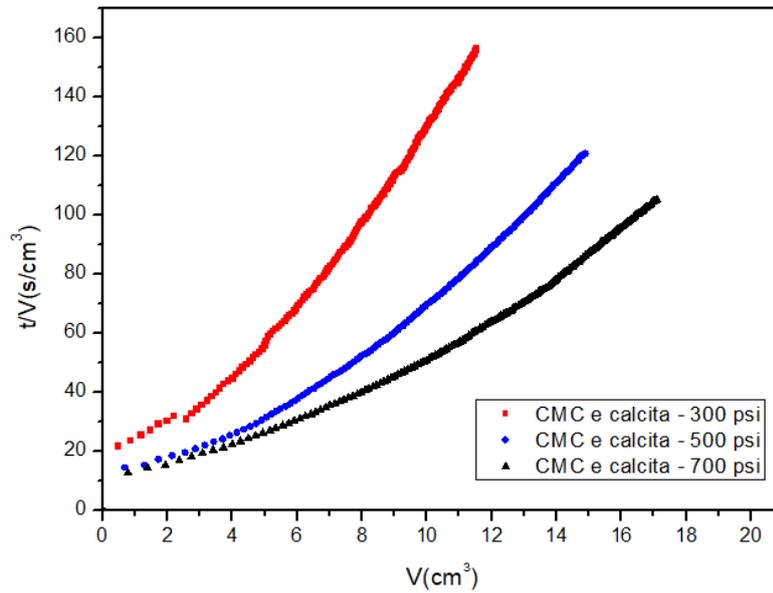


Figura 54 - Gráfico t/V versus volume de filtrado das suspensões de CMCe calcita em diferentes pressões.

Anexo B – Gráficos dos ensaios realizados em triplicatas

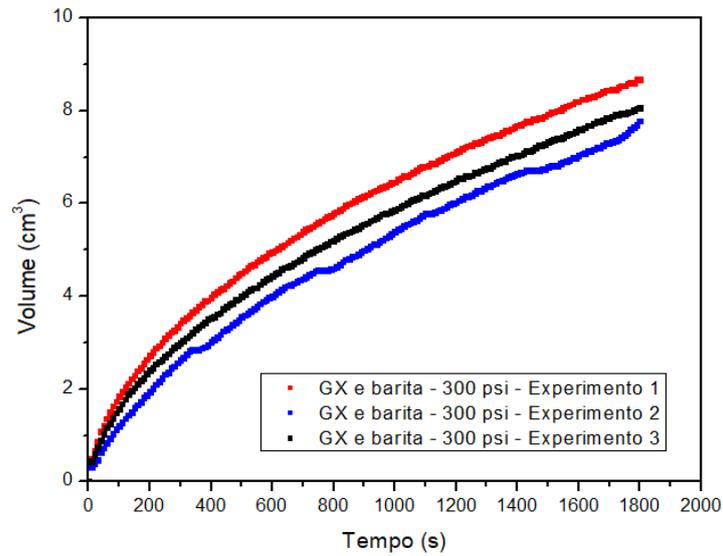


Figura 55 - Gráfico volume de filtrado obtido *versus* tempo de filtração das suspensões de GX e barita a 300 psi, dos ensaios realizados em triplicata.

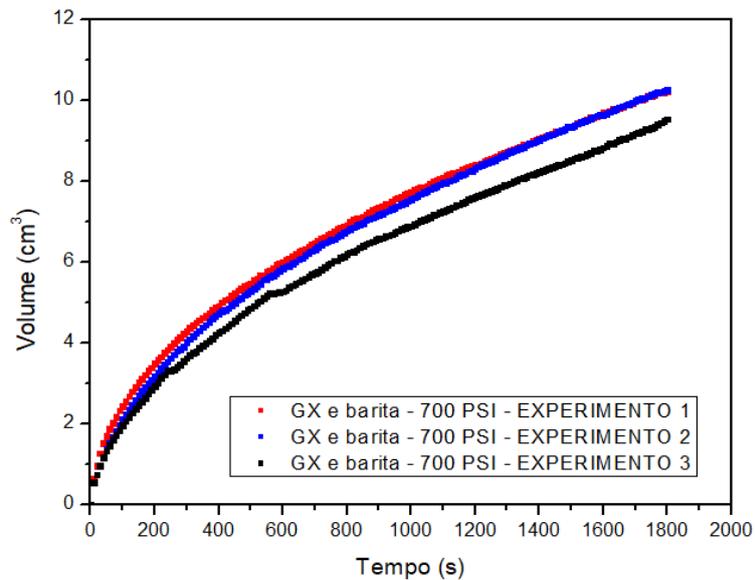


Figura 56 - Gráfico volume de filtrado obtido *versus* tempo de filtração das suspensões de GX e barita a 700 psi, dos ensaios realizados em triplicata.

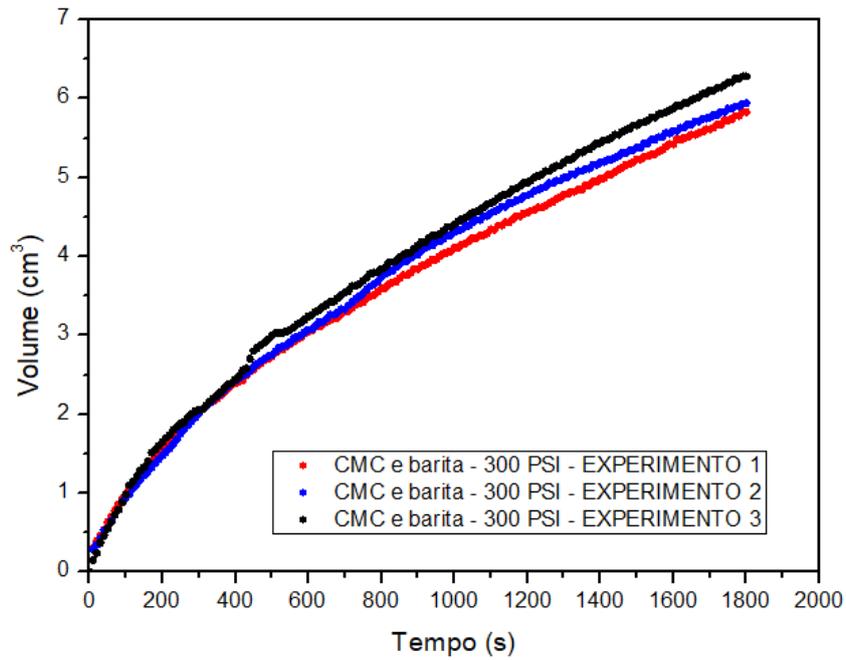


Figura 57 - Gráfico volume de filtrado obtido *versus* tempo de filtração das suspensões de CMC e barita a 300 psi, dos ensaios realizados em triplicata.

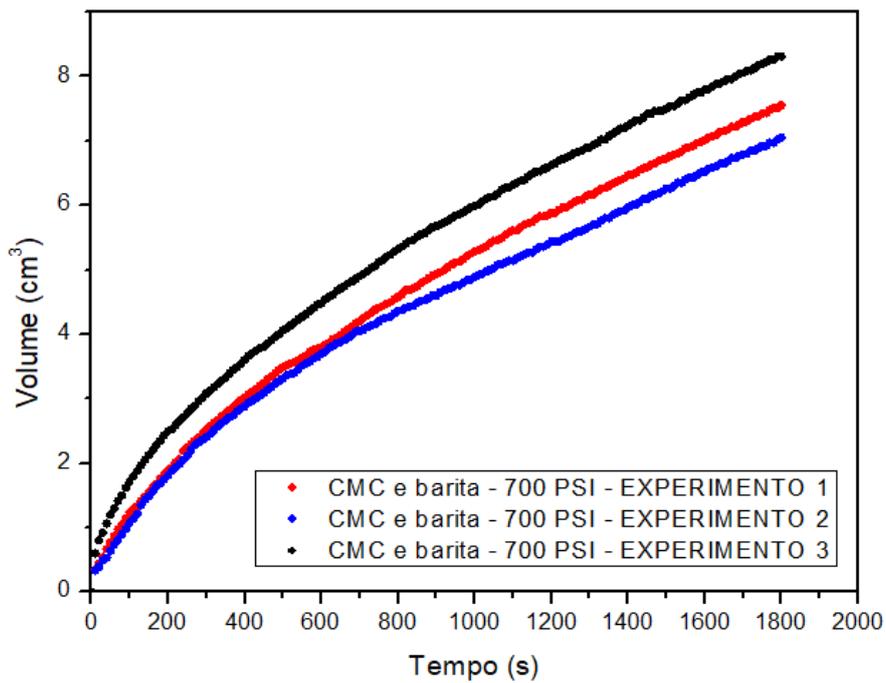


Figura 58 - Gráfico volume de filtrado obtido *versus* tempo de filtração das suspensões de CMC e barita a 700 psi, dos ensaios realizados em triplicata.

Anexo C – Gráficos do volume médio com as barras de erro experimental

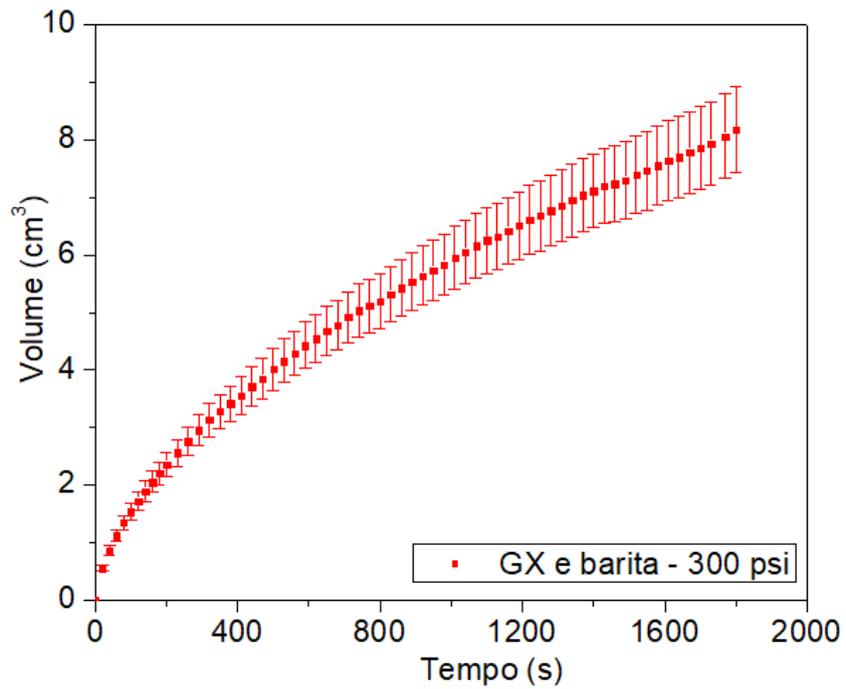


Figura 59 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e barita a 300 psi.

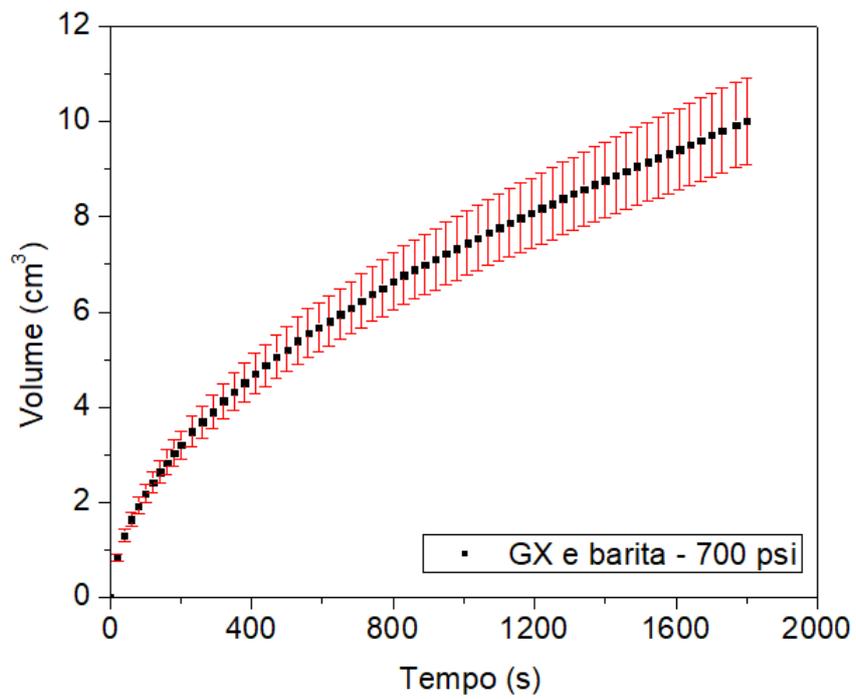


Figura 60 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e barita a 700 psi.

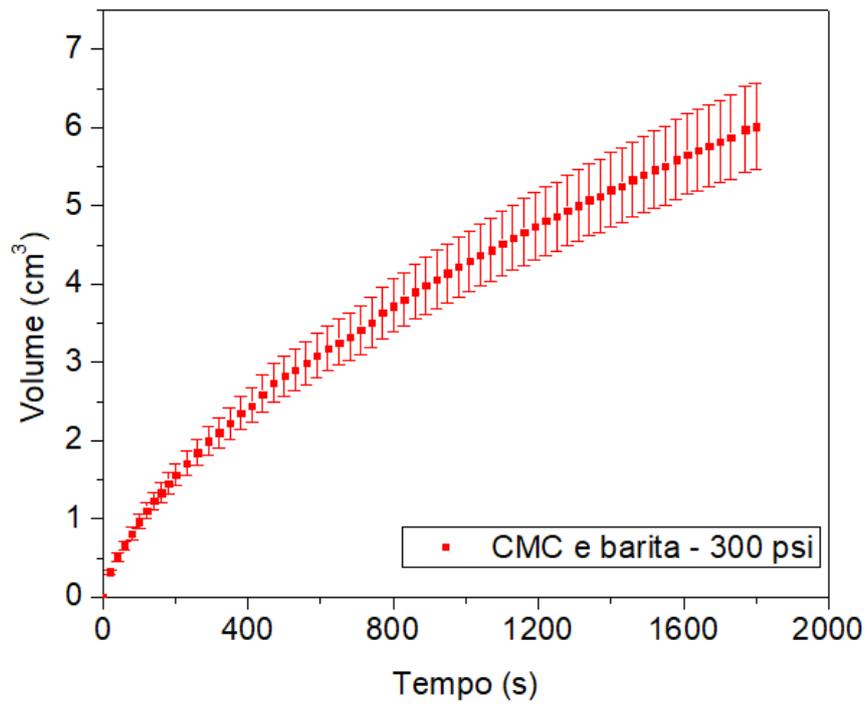


Figura 61 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e barita a 300 psi.

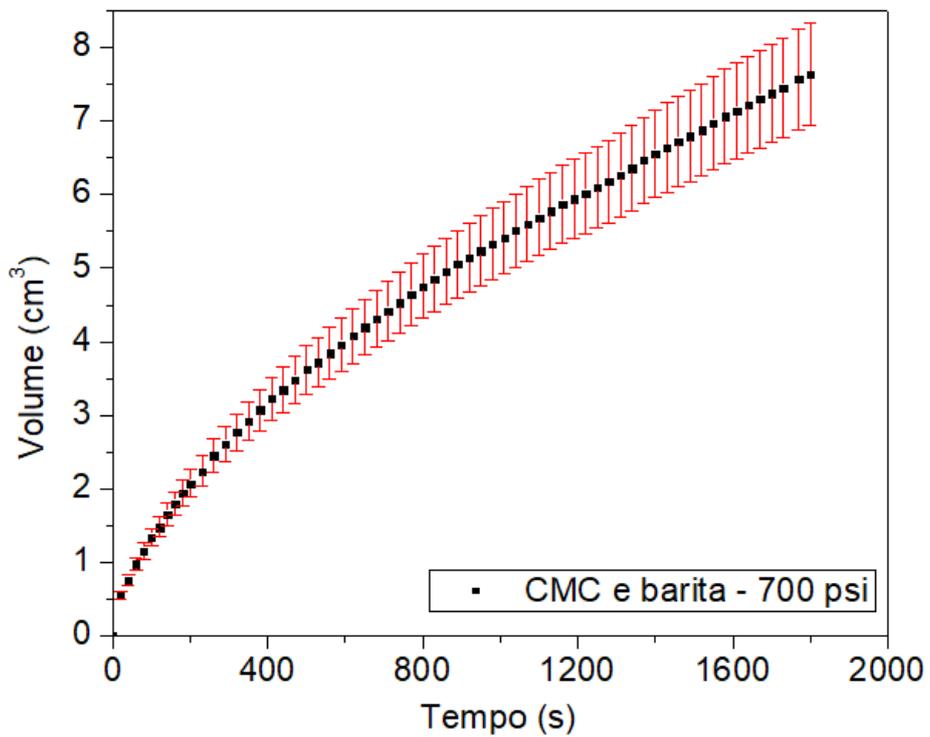


Figura 62 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e barita a 700 psi.

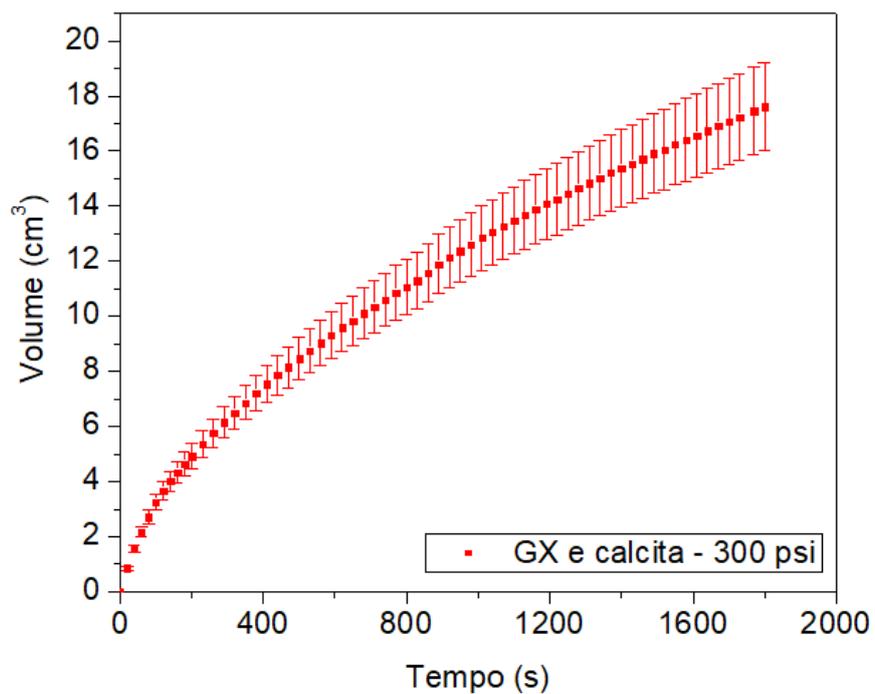


Figura 63 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e calcita a 300 psi.

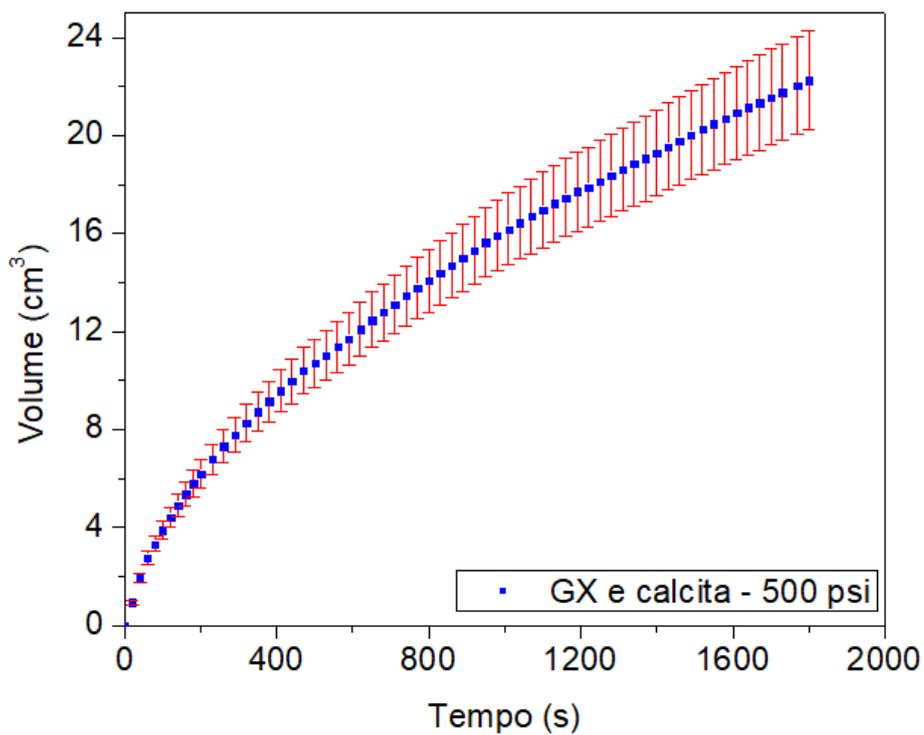


Figura 64 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e calcita a 500 psi.

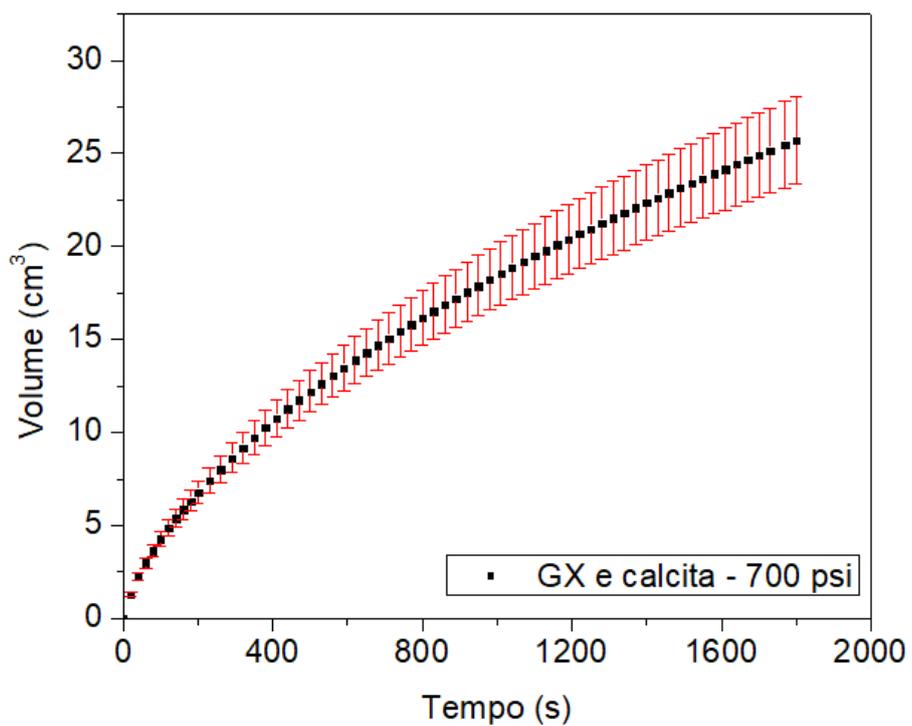


Figura 65 - Gráfico erro experimental do fluido goma xantana e calcita a 700 psi.

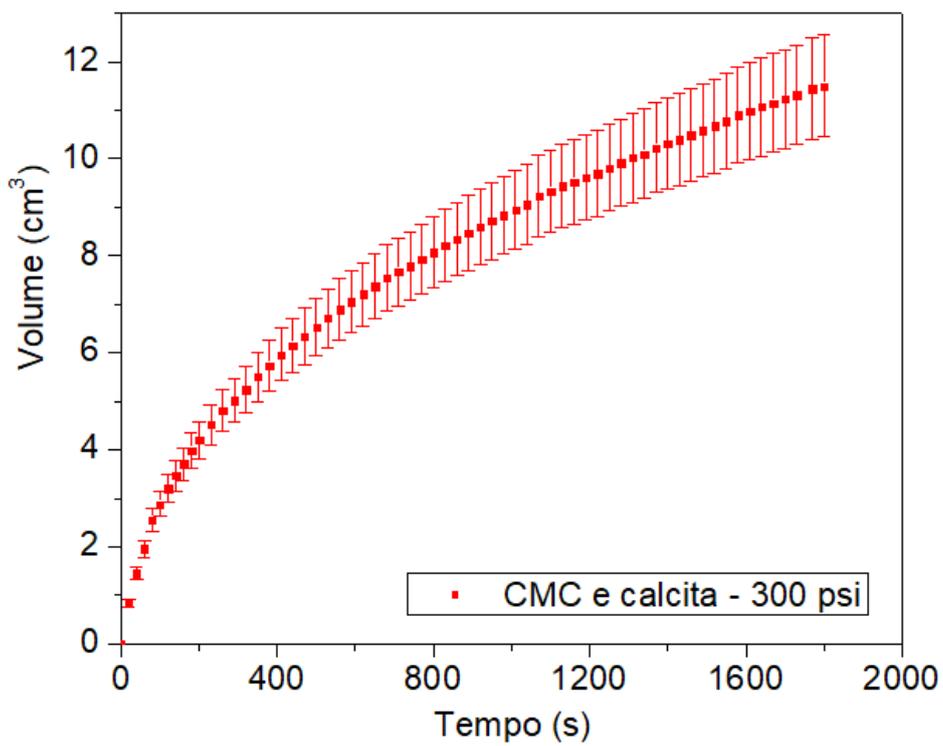


Figura 66 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e calcita a 300 psi.

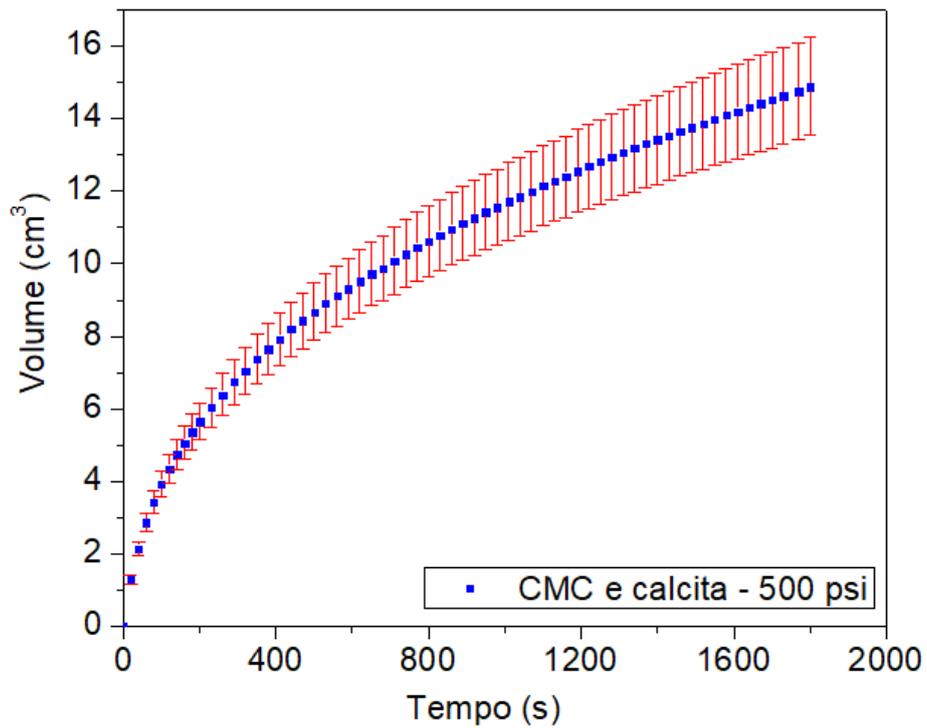


Figura 67 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e calcita a 500 psi.

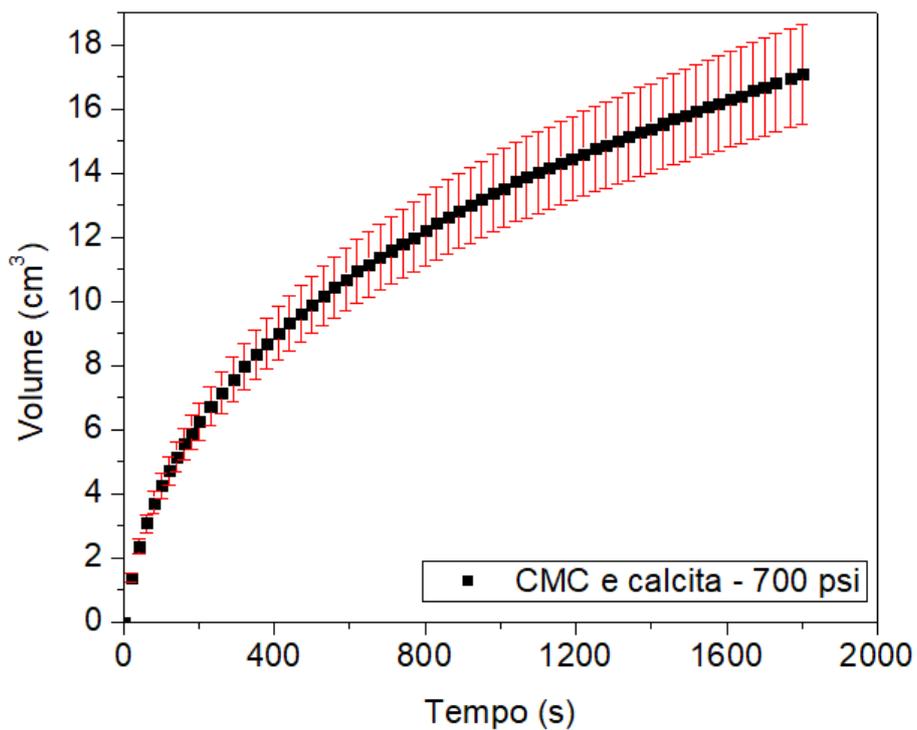


Figura 68 - Gráfico erro experimental do fluido carboximetilcelulose e calcita a 700 psi.