

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS**

GIOVANI DE SOUZA FRITOLI

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROCESSO ESTÁTICO DE FORMAÇÃO
DE REBOCO PARTICULADO EM FILTRO PRENSA API**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2018

GIOVANI DE SOUZA FRITOLI

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROCESSO ESTÁTICO DE FORMAÇÃO
DE REBOCO PARTICULADO EM FILTRO PRENSA API**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Ciências Térmicas.

Orientador: Silvio L. M. Junqueira, Dr.

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

F919a Fritoli, Giovani de Souza
2018 Avaliação experimental do processo estático de formação
de reboco particulado em filtro prensa API / Giovani
de Souza Fritoli.-- 2018.

1 arquivo : PDF ; \$c 4.148 KBv

Disponível via World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica e de Materiais. Área de Concentração: Ciências
Térmicas, Curitiba, 2018.
Bibliografia: p. 143-147.

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Materiais
de construção. 3. Revestimentos. 4. Filtros e filtração.
5. Aditivos. 6. Polímeros. 7. Carbonato de cálcio.
I. Junqueira, Silvio Luiz de Mello, orient. II. Universidade
Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação
em Engenharia Mecânica e de Materiais, inst. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

**Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271**

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 334

A Dissertação de Mestrado intitulada ***Avaliação Experimental do Processo Estático de Formação de Reboco Particulado em Filtro Prensa API***, defendida em sessão pública pelo Candidato **Giovani de Souza Fritoli**, no dia 04 de outubro de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Engenharia de Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Silvio Luiz de Mello Junqueira - UTFPR

Prof. Cezar Otaviano Ribeiro Negrão, Ph.D. - UTFPR

Profª Drª Rosângela Barros Zanoni Lopes Moreno - UNICAMPI

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, ____ de _____ de 20__.

Carimbo e assinatura do Coordenador do Programa

“If you believe in nothing else
Just keep believing in yourself
There will be times of trouble,
It's gonna hurt like hell
This much I know, all ends well
It all ends well.”

(Myles Kennedy)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a meus pais Giovani Fritoli e Lurdes Rocha de Souza, pelo incansável apoio nesta trajetória e pelos exemplos de bondade, humildade e perseverança.

Ao Prof. Silvio L. M. Junqueira por ter me confiado uma oportunidade de desenvolver um trabalho à nível de mestrado, pela orientação, amizade e conselhos.

Ao Eng. Fernando C. De Lai pela fundamental orientação deste trabalho, por todos os conselhos essenciais à vida acadêmica e pelas incontáveis lições futebolísticas ministradas neste período.

Aos membros da banca Prof. Cezar O. R. Negrão e Prof^a Rosângela B. Z. L. Moreno pelas sugestões e contribuições.

Aos amigos da UTFPR: Alan Lugarini, Cássio Luis Schneider, Diogo Andrade, Felipe Pereira, Fernando “Lanterna da Liga Cartola 2018” De Lai, Flávia Krugel, Gabriel Merhy, Gabriel Tunoda, Guilherme “12” Hanauer, Gustavo “Negalê” Nascimento, Gustavo Ricardo, Hedilberto “Hedilmessi” Barros, Henrique “Rondônia” Eidt, Holmes Ripoll, Joel “Schmeichel” Karp, Jonathan “Grag” Galdino, Letícia Lima, Lucas “Barba” Garcia, Manoella “Mano” Molinari, Nezia de Rosso, Ricardo Bazarin, Tainan Gabardo, Vinicius “Cabelo” Daroz, Vinicius Poletto e Yamid Garcia.

A todos os membros do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN).

FRITOLI, GIOVANI DE SOUZA. **Avaliação Experimental do Processo Estático de Formação de Reboco Particulado em Filtro Prensa API**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 159 páginas, 2018.

RESUMO

A perda de circulação é um problema detectado em operações de poços de petróleo e é caracterizada pela invasão de fluido de perfuração em formações permeáveis. Este problema, além de gerar custos adicionais à perfuração, pode provocar dano à formações produtoras e, quando não corrigido, reduzir a pressão no interior do poço, induzindo a ocorrência de kicks. Uma das alternativas de combate à perda de circulação é a adição de material para perda de circulação (LCM) ao fluido de perfuração de maneira que um reboco se deposite na superfície porosa e reduza o volume de fluido perdido. No presente trabalho, a deposição de material particulado em substratos porosos é analisada experimentalmente com o objetivo de estudar o processo de formação de reboco em operações de perfuração de poços de petróleo. Tem-se o objetivo de avaliar a influência de aditivos poliméricos (natureza e concentração), das partículas (granulometria e concentração) e do elemento filtrante na formação da torta de filtração. Os experimentos são realizados em um filtro prensa do tipo API à pressões de 100 psi. São utilizados três polímeros: goma xantana (GX), carbopol (CBP) e carboximetilcelulose (CMC) em concentrações de 1 e 2 lb/bbl para formular fluidos não newtonianos e quatro materiais particulados para constituição do reboco (LCM's), sendo duas granulometrias (2-44 e 44-106 μm) de carbonato de cálcio (CaCO_3), uma de microesferas de vidro (180-300 μm) e uma de particulado plástico (250-420 μm). A mistura polímeros/partículas é aplicada sobre três elementos filtrantes. Um procedimento operacional para a correta operação do aparato é desenvolvido e consiste em pressurizar uma amostra da mistura contra um filtro de papel e mensurar o volume coletado ao final do processo (filtrado), a espessura e a massa do reboco úmido e após secagem. Não obstante, a curva de escoamento dos filtrado é obtida e comparada com as formulações de referência. A redução do volume de filtrado é favorecida pelo aumento da concentração de polímero, sendo o aditivo CMC o mais eficiente no combate à perda de circulação, e pelo aumento da concentração de LCM, assim como pela utilização do particulado de carbonato de cálcio com menor granulometria. Os filtrados apresentam característica não newtoniana, contudo os valores de viscosidade determinados são inferiores aos obtidos para as formulações de referência. Tal fenômeno é detectado de maneira mais significativa quando o carbonato de cálcio é utilizado.

Palavras chave: perda de circulação, formação de reboco, LCM, material particulado, aditivo polimérico, filtração, carbonato de cálcio.

FRITOLI, GIOVANI DE SOUZA. **Avaliação Experimental do Processo Estático de Formação de Reboco Particulado em Filtro Prensa API**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 159 páginas, 2018.

ABSTRACT

Lost circulation is a problem detected in oil drilling operations, being characterized by the invasion of the drilling fluid in permeable formations. This problem, despite the additional costs it generates, may damage productive formations and, when uncorrected, reduce the well pressure, inducing kick occurrence. One of the corrective measures is to add lost circulation materials (LCM) to the drilling fluid with the objective of building a filter cake at the porous surface and therefore reduce the volume loss. In this work, particulate deposition on porous formations is experimentally analyzed to study the filter cake formation in oil drilling operations. The goal is to evaluate the influence of polymer additive (type and concentration), LCM's (granulometry and concentration) e porous filter at filter cake formation. The experiments are conducted at an API filter press at pressures of 100 psi. Three polymers are utilized: xanthan gum (GX), carbopol (CBP) and carboxymethylcellulose (CMC) at concentrations of 1 and 2 lb/bbl to formulate non newtonian fluids and four particulate materials to constitute the filter cake (LCM's), being two granulometries (2-44 e 44-106 μm) of calcium carbonate (CaCO_3), one of glass spheres (180-300 μm) and one of plastic particles (250-420 μm). The polymer/particulate mixture is applied over three filter elements. An experimental procedure for the correct operation of the apparatus is developed and consists in pressurizing a mixture sample against a filter paper and measure the collected volume at the end (filtrate), filter cake thickness and mass wet and after drying. The filtrate flow curve is obtained and compared to the reference formulations. Filtrate volume reduction is favored by the increase in polymer concentration, CMC being the most effective polymer at lost circulation mitigation, and LCM concentration and by the use of the smaller calcium carbonate. Filtrates present non newtonian behavior, however filtrate viscosity is lower than the reference fluids. This difference is detected more significantly for calcium carbonate as LCM.

Palavras chave: lost circulation, filter cake formation, LCM, particulate material, polymer additive, filtration, calcium carbonate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Faixa de operação segura e perfil do poço em função da pressão do fluido de perfuração. Adaptado de Gala e Toralde (2011).	25
Figura 1.2 – Representação dos tipos de perda de circulação no conjunto poço-formação. Adaptado de Almagro et al. (2014).....	26
Figura 1.3 – Práticas para o controle e prevenção da perda de circulação. Adaptado de Cook et al. (2012).....	27
Figura 1.4 – Representação do processo de formação do reboco pela deposição de material particulado. Fonte: Lima (2016).....	29
Figura 1.5 – Mecanismo de deposição de partículas no poro. Adaptado de Gao (2007).....	30
Figura 1.6 – Comparativo entre o processo de filtração: (a) estática e (b) dinâmica. Fonte: Adaptado de Araújo (2010).	31
Figura 1.7 – Gráfico do volume cumulativo de filtrado ao longo do tempo para os fenômenos de filtração estática e dinâmica. Adaptado de Vaussard et. al. (1986).	32
Figura 2.1 – Diagrama do comportamento típico de alguns fluidos puramente viscosos em comparação com um newtoniano, sendo (a) a relação entre tensão e taxa de deformação e (b) a relação entre a viscosidade e taxa de deformação.	38
Figura 2.2 – Filtro prensa do tipo: (a)API e (b) HTHP.	41
Figura 2.3 – Curvas de : (a) volume de filtrado e (b) <i>slowness</i> . Adaptado de Dewan e Chenevert (2001).	45
Figura 2.4 – Representação ilustrativa do sistema elemento filtrante e reboco utilizado por Li. Adaptado de Li et. al. (2005).	52
Figura 3.1 – Representação esquemática do circuito hidráulico da célula de filtração API: (a) circuito hidráulico e (b) principais componentes.....	57
Figura 3.2 – Aparato de filtração estática API e acessórios.....	58
Figura 3.3 – Representação esquemática do: (a) conjunto filtro prensa (CF, CG e suporte) e (b) principais componentes da célula de filtração (CF). Adaptado de OFITE (2016).....	59

Figura 3.4 – Montagem do papel filtro (PF) na base da célula de filtração (CF), representando a área efetiva de filtração (A_{ef}).	60
Figura 3.5 – Filtro (F1), regulador (R1) e manômetro (M1) de ar comprimido.	61
Figura 3.6 – Conjunto regulador (R2), manômetro (M2) e válvula de alívio (V2) instalados na entrada da CF: (a) diagrama esquemático e (b) ilustração. Adaptado de OFITE (2016).	62
Figura 3.8 – Balanças utilizadas para os experimentos de filtração: (a) B1 e (b) B2.	62
Figura 3.9 – Diagrama generalizado das etapas experimentais.	63
Figura 3.10 – Diagrama operacional resumido dos ensaios de filtração.	64
Figura 3.11 – Partículas utilizadas nos experimentos como LCMs: (a) Carbonato de cálcio fino comercial (CaCO_3 FC), (b) Carbonato de cálcio fino operacional (CaCO_3 FO), (c) Carbonato de cálcio médio operacional (CaCO_3 MO), (d) Microesferas de vidro (MEV) e (e) abrasivo plástico de urea (APU).	68
Figura 3.12 – Recipiente cilíndrico utilizado para a preparação das amostras sobre o agitador magnético: (a) instante de tempo pouco após adição do polímero e (b) instante de tempo com dissolução quase completa.	70
Figura 3.13 – Agitador mecânico A1.	70
Figura 3.14 – Fluxograma das etapas de formulação do fluido e de preparo da mistura de LCM's.	71
Figura 3.15 – Equipamentos utilizados para obtenção das curvas de escoamento, sendo: (a) Reômetro rotacional Haake Mars III e (b) viscosímetro rotacional Fann 35A.	73
Figura 3.16 – Diagrama operacional para avaliação reológica.	75
Figura 3.17 – pHmetro comercial utilizado nas medições de pH dos fluidos de referência.	76
Figura 3.18 – Diagrama operacional resumido.	77
Figura 3.19 – Exemplo de (a) reboco bem consolidado antes da lavagem, (b) reboco não consolidado, (c) remoção de partículas não consolidadas, (d) reboco após o processo de remoção.	78

Figura 3.20 - Reboco formado pela configuração D3: (a) minutos após ser retirado da célula de teste, (b) após repouso de aproximadamente 20 horas, (c) resquício do particulado do reboco e (d) após secagem no forno.	79
Figura 3.21 – Exemplo de medição da espessura do reboco com paquímetro, sendo medição (a) com medidor de profundidade e (b) direta.....	80
Figura 3.22 – Forno convectivo utilizado para secagem dos rebocos.	80
Figura 3.23 – Diagrama operacional para obtenção dos parâmetros do reboco. .	82
Figura 3.24 – Diagrama operacional para avaliação do filtrado.....	83
Figura 3.25 – Diagrama experimental completo, integrando diferentes etapas da avaliação experimental.....	85
Figura 4.1 – Gráfico mostrando a evolução do volume de filtrado [cm ³] ao longo do tempo [s] para filtro de papel do tipo (a) 40, (b) 42 e (c) 50.	88
Figura 4.2 – Massa dos rebocos de testes ao longo do processo de secagem em forno.....	90
Figura 4.3 – Curvas de viscosidade em triplicata para a formulação de referência CMC 1,50g obtidas no reômetro e no viscosímetro Fann 35A.....	92
Figura 4.4 – Curvas de viscosidade média comparativas entre reômetro e viscosímetro para as concentrações de 1,50g e 3,00g sendo: (a) GX, (b) CMC e (c) CBP.	94
Figura 4.5 - Curvas de viscosidade média obtidas com o viscosímetro para as formulações: (a) GX 1,50g e 3,00g; (b) CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g e (c) CBP 1,50g; 3,00g e 6,00g.	97
Figura 4.6 – Curvas de tensão comparativas entre os valores obtidos com o Fann e os ajustes PL e HB, sendo: (a) GX 1,50g e 3,00g e (b) CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g. .	98
Figura 4.7 – Curvas de viscosidade comparativas entre as formulações de GX e CMC para concentrações de: (a) 1,50g e (b) 3,00g.	101
Figura 4.8 – Distribuição granulométrica para: (a) CaCO ₃ FO, (b) CaCO ₃ FC, (c) CaCO ₃ M, (d) MEV e (e) APU.	103
Figura 4.9 – Volume de filtrado para as configurações com CaCO ₃ FC e CaCO ₃ FO.	105

Figura 4.10 - Curva de viscosidade para os filtrados de CaCO ₃ FC e CaCO ₃ FO em comparação com o fluido CMC 1,5g.	106
Figura 4.11 – Volume de filtrado obtido para as configurações A1, A2 e A3.	110
Figura 4.12 – Curva de viscosidade por taxa de cisalhamento para os filtrados A1, A2 e A3 em comparação com a formulação CMC 1,50g.	113
Figura 4.13 – Volume de filtrado para as configurações B1 a B8, variando a concentração e o aditivo polimérico.	115
Figura 4.14 – Curva de viscosidade para as configurações B1 e B2 em comparação com os fluidos GX 1,50g e GX 3,00g.	118
Figura 4.15 - Curva de viscosidade para os filtrados B3, B4 e B5 em comparação com as formulações CMC 0,75g, 1,50g e 3,00g.	120
Figura 4.16 - Curva de viscosidade para os filtrados B6, B7 e B8 em comparação com as formulações CBP 1,50g, 3,00g e 6,00g.	121
Figura 4.17 – Volume de filtrado para as configurações C1 a C5, todas utilizando o LCM CaCO ₃ FC.	123
Figura 4.18 – Curva de viscosidade para os filtrados C1 a C5 em comparação com a formulação de referência CMC 1,50g.	125
Figura 4.19 – Volume de filtrado para as configurações D1 a D8.	127
Figura 4.20 - Comparação entre a deposição dos particulados CaCO ₃ FC, MEV e APU.	129
Figura 4.21 - Reboco formado pela configuração D3: (a) minutos após ser retirado da célula de teste, (b) após repouso de aproximadamente 20 horas, (c) resquício do particulado do reboco e (d) após secagem no forno.	132
Figura 4.22 - Reboco formado pela configuração D4: (a) minutos após ser retirado da célula de teste, (b) após repouso de aproximadamente 20 horas e (c) após secagem no forno.	133
Figura 4.23 – Curva de viscosidade para as configurações com um aditivo particulado (D1 a D4) em comparação com o fluido de referência CMC 1,50g.	136
Figura 4.24 – Curva de viscosidade para os filtrados D5 a D8 em comparação com a formulação de referência CMC 1,50g e ao filtrado D1.	137

Figura D.1 - Comparação dos rebocos formados com CaCO ₃ FC e FO.	154
Figura D.2 - Rebocos formados na configuração A – Avaliação da influência do elemento filtrante.....	155
Figura D.3 - Rebocos formados na configuração B – Avaliação da influência do aditivo polimérico.....	156
Figura D.4 - Rebocos formados na configuração C – Avaliação da influência da concentração de particulado.	158
Figura D.5 - Rebocos formados na configuração D – Avaliação da influência da granulometria e do tipo de LCM.	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Classificação e exemplos de materiais utilizados como LCM.	28
Tabela 3.1 – Modelos de PF utilizados.	59
Tabela 3.2 - Características dos elementos filtrantes.	60
Tabela 3.3 – Procedimento operacional para os ensaios de filtração.	64
Tabela 3.4 – Características dos aditivos poliméricos utilizados na formulação dos fluidos não newtonianos. Fonte: Brandrup et al. (1999).	65
Tabela 3.5 – Concentração e massa dos aditivos poliméricos.	66
Tabela 3.6 – Características dos aditivos particulados utilizados como aditivos para perda de circulação (LCM).	67
Tabela 3.7 – Concentração e massa dos aditivos particulados.	68
Tabela 3.8 – Valores das constantes k_1 , k_2 e k_3 do viscosímetro utilizado.	74
Tabela 3.9 – Parâmetros de análise da eficiência de filtração e formação de reboco.	84
Tabela 4.1 – Organização dos resultados apresentados.	86
Tabela 4.2 – Classificação, espessura e tamanho do poro dos PF.	86
Tabela 4.3 – Parâmetros e resultados dos testes de obtenção da permeabilidade do PF.	88
Tabela 4.4 – Parâmetros experimentais de filtração para os rebocos utilizados na secagem.	89
Tabela 4.5 – Massa dos rebocos durante a secagem [g].	90
Tabela 4.6 – Classificação das formulações de referência dos fluidos não newtonianos.	91
Tabela 4.7 – Comparação entre as tensões medidas e calculadas pelos ajustes PL e HB para as formulações GX 1,50g e 3,00g.	99
Tabela 4.8 – Parâmetros de ajuste PL e HB para as formulações GX 1,50g e 3,00g.	99
Tabela 4.9 - Comparação entre as tensões medidas e calculadas pelos ajustes PL e HB para as formulações CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g.	100

Tabela 4.10 - Parâmetros de ajuste PL e HB para as formulações CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g.	100
Tabela 4.11 – Comparação entre a granulometria informada e a verificada para os materiais particulados.	102
Tabela 4.12 – Parâmetros utilizados para os testes de filtração para comparação entre o CaCO ₃ FC e FO.	105
Tabela 4.13 – Resultados da filtração para os fluidos com CaCO ₃ FC e CaCO ₃ FO como aditivo particulado.....	106
Tabela 4.14 - Dados de tensão e viscosidade para os filtrados de CaCO ₃ FO e FC obtidos com o Fann 35A.	107
Tabela 4.15 – Parâmetros de filtração fixos para todos os experimentos.....	107
Tabela 4.16 – Critérios de classificação dos experimentos.	107
Tabela 4.17 – Formulações para a avaliação da influência do elemento filtrante.	108
Tabela 4.18 – Formulações para a avaliação da influência do aditivo polimérico.	108
Tabela 4.19 – Formulações para a avaliação da influência da concentração de particulado.....	108
Tabela 4.20 – Formulações para a avaliação da influência granulometria do particulado.....	109
Tabela 4.21 – Principais características dos elementos filtrantes.....	109
Tabela 4.22 – Parâmetros utilizados para os experimentos com fluidos categoria A.	110
Tabela 4.23 – Resultados de filtração para as configurações A1, A2 e A3.	111
Tabela 4.24 – Dados de tensão e viscosidade para os filtrados A1, A2 e A3 obtidos com o Fann 35A.	113
Tabela 4.25 – Classificação dos fluidos para avaliação da influência do aditivo polimérico.....	114
Tabela 4.26 – Parâmetros utilizados para os experimentos com fluidos categoria B.	114

Tabela 4.27 – Resultados de filtração para as configurações preparadas com GX.	116
Tabela 4.28 - Resultados de filtração para as configurações preparadas com CMC.	117
Tabela 4.29 - Resultados de filtração para as configurações preparadas com CBP.	118
Tabela 4.30 - Dados de tensão e viscosidade para os filtrados B1 e B2 obtidos com o Fann 35A e com o reômetro rotacional.	119
Tabela 4.31 - Dados de tensão e viscosidade para os filtrados B3, B4 e B5 obtidos com o Fann 35A e com o reômetro rotacional.	120
Tabela 4.32 - Dados de tensão e viscosidade para os filtrados B6, B7 e B8 obtidos com o Fann 35A.	121
Tabela 4.33 –Configurações para avaliação da influência da concentração do aditivo particulado.	122
Tabela 4.34 – Parâmetros utilizados para os experimentos com objetivo de avaliar o efeito da concentração de LCM.	122
Tabela 4.35 – Resultados de filtração para as configurações C1 a C5.	124
Tabela 4.36 – Dados de tensão e viscosidade para os filtrados C1 a C5 obtidos com o Fann 35A.	126
Tabela 4.37 – Configurações D1 a D8 para avaliação da influência do tipo de aditivo particulado.	126
Tabela 4.38 – Parâmetros fixos para as configurações D1 a D8.	127
Tabela 4.39 – Resultados de filtração para configurações com somente um aditivo particulado (D1 a D4).	130
Tabela 4.40 – Massa específica dos materiais particulados e estimada para as formulações com mais de um aditivo.	134
Tabela 4.41 - Resultados de filtração para as configurações com mais de um aditivo particulado (D5 a D8).	134
Tabela 4.42 – Dados de tensão e viscosidade para os filtrados D1 a D4 obtidos com o Fann 35A.	137

Tabela 4.43 – Dados de tensão e viscosidade para os filtrados D5 a D8 obtidos com o Fann 35A.....	138
Tabela A.1 – Percentual parcial e cumulativo de particulado para os intervalos granulométricos do equipamento analisador de particulado Microtrac Flex.....	148
Tabela B.1 – pH das formulações de GX, CMC e CBP.....	150
Tabela B.2 - Dados de viscosidade para as formulações de referência GX 1,50g e 3,00g; CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g e CBP 1,50g; 3,00g e 6,00g.....	150
Tabela C.1 - Parâmetros de variação do processo de formação do reboco e organização das variáveis resposta.....	151
Tabela C.2 - Variáveis resposta para os ensaios de filtração comparando CaCO ₃ FC e FO.....	151
Tabela C.3 - Variáveis resposta para os ensaios de filtração considerando a influência do elemento filtrante.....	151
Tabela C.4 - Variáveis resposta para os ensaios de filtração considerando a influência do aditivo polimérico.....	152
Tabela C.5 - Variáveis resposta para os ensaios de filtração considerando a influência da concentração de particulado.....	152
Tabela C.6 - Variáveis resposta para os ensaios de filtração considerando a influência do tipo de LCM.....	153
Tabela D.1 - Parâmetros de variação do processo de formação do reboco e organização das imagens dos rebocos.....	154

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

API	<i>American Petroleum Institute</i>
APU	Abrasivo plástico de Urea
CaCO ₃ FC	Carbonato de cálcio fino comercial
CaCO ₃ FO	Carbonato de cálcio fino operacional
CaCO ₃ MO	Carbonato de cálcio médio operacional
CBP	Carbopol
CERNN	Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não Newtonianos
CF	Célula de filtração
CMC	Carboximetilcelulose
CO ₂	Dióxido de carbono
GrMaTS	Grupo de materiais, tribologia e superfícies
GX	Goma xantana
HB	Herschel-Bulkley
HTHP	Alta pressão e alta temperatura
IPT	Teoria do empacotamento ideal
LabReo	Laboratório de Reologia
LaMP	Laboratório de Meios Porosos
LCM	Materiais para perda de circulação – <i>lost circulation materials</i>
LP	Lei de potência – <i>Power Law</i>
MEV	Microesferas de vidro
N ₂	Nitrogênio gasoso
OBM	Fluidos base óleo – <i>oil base mud</i>
OFITE	OFI <i>Testing Equipment</i>
PF	Papel filtro
SI	Sistema Internacional
SPE	<i>Society of Petroleum Engineers</i>
PHPA	Poliacrilamida
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WBM	Fluidos base água – <i>water base mud</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de filtração – Equações (2.11) e (2.20)	[cm ²]
A _{ef}	Área efetiva de filtração – Seção 3.1	[cm ²]
A _p	Área da seção transversal de filtração – Equação (2.2)	[m ²]
C ₁	Taxa de filtração – Equação (2.10)	[m ³ /s ^{0,5}]
C ₂	Volume perdido antes da formação do reboco – Equação (2.10)	[m ³]
C _p	Concentração do polímero – Equação (3.1)	[g/cm ³]
C _s	Concentração de sólidos – Equação (3.2)	[g/cm ³]
E _m	Espessura medida do reboco	[mm]
K	Permeabilidade do substrato poroso – Equação (2.2)	[m ²]
K _f	Permeabilidade do elemento filtrante – Equação (2.22)	[m ²]
K _r	Permeabilidade do reboco – Equação (2.23)	[m ²]
K _{mc}	Permeabilidade do reboco – Equação (2.19)	[milidarcies]
L _f	Espessura do elemento filtrante – Equação (2.22)	[m]
L _{mc}	Espessura do reboco – Equação (2.23)	[m]
L _p	Espessura/comprimento do substrato poroso – Equação (2.2)	[m]
m _{dc}	Massa líquida do reboco seco – Equações (2.14), (2.15), (2.16), (2.18) e (2.20)	[g]
m _d	Massa do conjunto filtro + reboco seco – Equação (2.13)	[g]
m _{df}	Massa do filtro de papel seco – Equação (2.13)	[g]
m _{wc}	Massa líquido do reboco úmido – Equações (2.14), (2.15) e (2.18)	[g]
m _w	Massa do conjunto filtro + reboco úmido – Equação (2.14)	[g]
m _{wf}	Massa do filtro de papel úmido – Equação (2.14)	[g]
m _p	Massa do aditivo polimérico – Equação (3.1)	[g]
m _s	Massa do aditivo particulado – Equação (3.2)	[g]
m _{f+p}	Massa do picnômetro preenchido com o filtrado – Equação (3.3)	[g]
m _{pi}	Massa do picnômetro – Equação (3.3)	[g]
m _i	Massa de cada constituinte – Equação (4.1)	[g]
m _t	Massa total de particulado adicionado – Equação (4.1)	[g]
N	Rotação imposta ao viscosímetro – Equação (3.5)	[rpm]
n	Índice de Lei de potência - Equações (2.7) e (2.9)	

P_{mc}	Queda de pressão ao longo da camada depositada – Equação (2.19)	[psi]
Δp	Diferença de pressão através da torta – Equação (2.2)	[Pa]
Δp_f	Queda de pressão através do elemento filtrante – Equações (2.21) e (2.22)	[Pa]
Δp_t	Diferença de pressão total – Equação (2.21)	[Pa]
Δp_{mc}	Queda de pressão através do reboco – Equações (2.21) e (2.23)	[Pa]
Q	Vazão de fluido percolando o substrato poroso – Equação (2.2)	[m ³ /s]
q	Taxa de filtração – Equações (2.19), (2.22) e (2.23)	[cm/s]
S	<i>Slowness</i> – Equação (2.11)	[s/cm]
T_{mc}	Espessura do reboco – Equações (2.19) e (2.20)	[cm]
t	Tempo de filtração – Equações (2.10) e (2.11)	[s]
u_α	Campo de velocidades na direção α - Equação (2.5)	
V	Volume de filtrado – Equação (2.10)	[m ³]
V_p	Volume de poros interconectados – Equações (2.1) e (2.15)	[cm ³]
V_t	Volume total da torta – Equações (2.1) e (2.16)	[cm ³]
V_f	Volume de filtrado – Equações (2.11) e (3.3)	[cm ³]
V_F	Volume de fluido – Equações (3.1) e (3.2)	[cm ³]

Letras Gregas

α	Diferença percentual entre a massa úmida e a massa seca do reboco – Equações (2.17) e (2.18)	
ν	Índice de compressibilidade do reboco – Equação (2.12)	
ϕ	Fração volumétrica de poros – Porosidade – Equação (2.1)	
ϕ_c	Porosidade do reboco – Equações (2.17) e (2.20)	
θ	Ângulo de deflexão da mola – Equação (3.4)	
η	Viscosidade aparente – Equação (2.6)	[Pa.s]
η_c	Índice de consistência – Equações (2.7) e (2.9)	
ρ_f	Massa específica do filtrado – Equações (2.15), (2.17) e (3.3)	[g/cm ³]
ρ_{eq}	Massa específica equivalente – Equação (4.1)	[g/cm ³]
ρ_s	Massa específica do material sólido depositado - Equações (2.16), (2.17) e (2.20)	[g/cm ³]
μ	Viscosidade absoluta Equações (2.2), (2.4), (2.22) e (2.23)	Pa.s
μ_f	Viscosidade absoluta do filtrado – Equação (2.19)	[cP]
τ	Tensor de tensões – Equação (2.4)	[Pa]
$\tau_{\alpha\beta}$	Tensão na direção $\alpha\beta$ - Equação (2.6)	[Pa]
τ	Tensão aplicada – Equações (2.7) e (3.4)	[Pa]
τ_0	Tensão limite de escoamento – Equações (2.8) e (2.9)	[Pa]

$\dot{\gamma}$	Tensor taxa de deformação – Equação (2.4)	[1/s]
$\dot{\gamma}_{\alpha\beta}$	Taxa de deformação na direção $\alpha\beta$ - Equação (2.5)	[1/s]
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento aplicada – Equações (2.7) e (3.5)	[1/s]

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	24
1.1	Formulação do problema.....	29
1.2	Objetivos gerais.....	32
1.3	Organização do documento.....	33
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1	Propriedades permo-porosas	35
2.2	Fluidos newtonianos e não newtonianos	37
2.3	Estudo experimental da filtração.....	40
2.4	Fatores que influenciam a filtração de fluidos de perfuração.....	43
2.4.1	Tempo de filtração.....	43
2.4.2	Gradiente de pressão e compressibilidade	44
2.4.3	Fluido de perfuração e aditivos poliméricos	45
2.4.4	Formação rochosa e aditivo particulado.....	46
2.5	Parâmetros de análise do processo de filtração.....	49
2.6	Síntese	53
2.7	Objetivos específicos.....	55
3	MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1	Aparato de filtração estática API.....	57
3.2	Procedimentos experimentais do ensaio de filtração.....	63
3.3	Parâmetros experimentais.....	65
3.3.1	Aditivo polimérico	65
3.3.2	Aditivo particulado (LCM)	66
3.3.3	Formulação dos fluidos e preparo das misturas.....	69
3.4	Massa específica, pH e reologia dos fluidos.....	72
3.5	Variáveis resposta	76
3.6	Fechamento do capítulo	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	86
4.1	Estimativa da permeabilidade dos elementos filtrantes.....	86
4.2	Tempo de secagem	89

4.3 Reologia das formulações	91
4.4 Determinação da granulometria do material particulado	102
4.5 Parâmetros de variação.....	107
4.6 Influência do elemento filtrante	109
4.7 Influência do aditivo polimérico.....	114
4.8 Influência da concentração de LCM	122
4.9 Influência do tipo de LCM	126
5 CONCLUSÕES.....	139
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	142
REFERÊNCIAS.....	143
Apêndice A. Resultados dos testes para determinação da distribuição granulométrica do particulado	148
Apêndice B. pH e viscosidade das formulações.....	150
Apêndice C. Resultados Experimentais de filtração	151
Apêndice D. Imagens dos rebocos de filtração para todos os experimentos	154

1 INTRODUÇÃO

A extração de petróleo é um processo custoso e composto de muitas etapas, dentre as quais destaca-se, para este estudo, a perfuração de poços, que tem como objetivo conectar um reservatório produtor à superfície. As formações geológicas, por sua vez, são perfuradas devido à ação conjunta da rotação broca com o peso da coluna de perfuração (Rocha et al., 2011). Neste sentido, o fluido de perfuração é um dos elementos mais importantes pois desempenha um grande número de funções (Growcock e Harvey, 2005), dentre as quais Caenn e Chillingar (1996) destacam:

1. Carrear os fragmentos de rocha até a superfície;
2. Resfriar e limpar a broca;
3. Reduzir o atrito entre a parede do poço e a coluna de perfuração;
4. Estabilizar o poço estruturalmente;
5. Prevenir o influxo de fluidos da formação;
6. Formar um reboco fino com baixa permeabilidade;
7. Não danificar a formação geológica;
8. Minimizar impactos ambientais.

Usualmente, o fluido de perfuração é injetado pelo interior da coluna de perfuração e retorna para a superfície, carreando os cascalhos (fragmentos das rochas perfuradas), através da região anular, caracterizando o percurso denominado circulação direta (Bourgoyne Jr et al., 1991).

Classificar as atribuições do fluido de perfuração apresentadas quanto ao grau de importância não é correto, pois o bom desempenho de todas as funções citadas é necessário para que a operação seja segura e confiável. Entretanto, é de interesse para este trabalho avaliar a interação entre o fluido e a formação geológica (funções #5, #6 e #7).

Prevenir o influxo de fluidos da formação para o poço perfurado (função # 5) decorre da necessidade de evitar que componentes aprisionados nos poros das rochas migrem para o espaço anular e, em casos extremos, para a sonda de perfuração. Este influxo, quando não controlado, coloca em risco a operação, a integridade do poço e até mesmo

a vida dos operadores, podendo provocar explosões na superfície (*blowout*) (Bennion et al., 1993). O controle deste fenômeno implica na imposição de um gradiente de pressão positivo no sentido radial, condição denominada *overbalance*, esquematizada na Figura 1.1, na qual é possível observar a janela operacional do processo de perfuração, tendo como limitante inferior a pressão de poro da formação e superior, a pressão de fratura do substrato poroso (Cook et al., 2012).

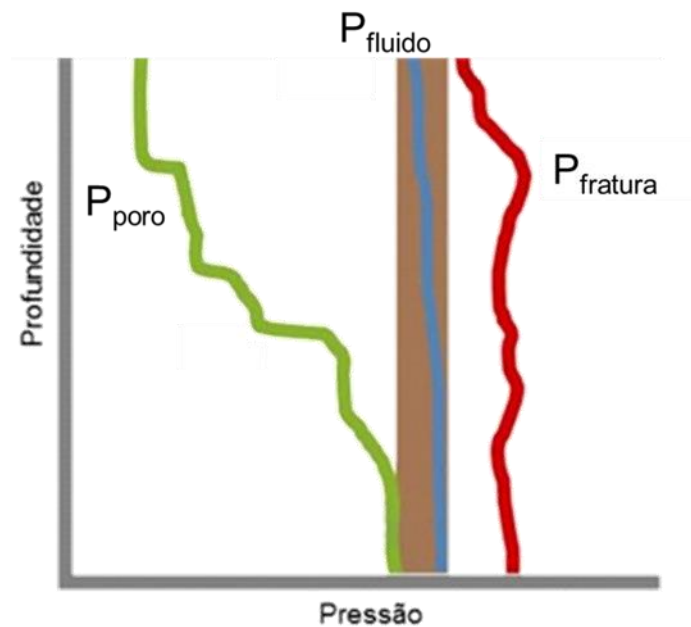


Figura 1.1 - Faixa de operação segura e perfil do poço em função da pressão do fluido de perfuração. Adaptado de Gala e Toralde (2011).

Na ocorrência do gradiente de pressão positivo no sentido radial no poço, o fluido de perfuração tende a invadir a formação rochosa, caracterizando o fenômeno de perda de circulação, detectado em cerca de um terço das formações perfuradas pela Petrobras (Waldmann et al., 2015). Neste sentido, Bernt e Reza (2011) indicam que medidas preventivas ou corretivas para a perda de circulação de fluido de perfuração consomem até 20% do tempo total da operação. Lavrov (2016) estima que o fluido utilizado é responsável por até 40% dos custos da perfuração.

A perda de circulação observada pode ser afetada pelas características geológicas da formação (por exemplo substratos permeáveis ou fraturados e regiões cavernosas) e

classificada em parcial, severa ou total considerando a vazão de fluido perdido (Almagro et al., 2014; Lavrov, 2016). A Figura 1.2 apresenta de maneira simplificada as principais formações permeáveis encontradas ao longo do processo de perfuração quais sejam: substratos porosos permeáveis, fraturas induzidas e naturais e regiões cavernosas.

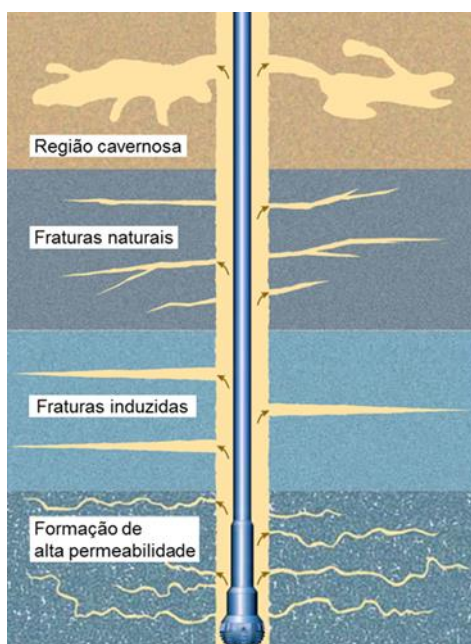


Figura 1.2 – Representação dos tipos de perda de circulação no conjunto poço-formação. Adaptado de Almagro et al. (2014).

Neste contexto, detecta-se a necessidade de combater a perda de circulação, através de medidas preventivas e corretivas, tendo como fator principal a formulação dos fluidos de perfuração utilizados, que são, na grande maioria, uma mistura de sólidos, líquidos e aditivos químicos, sendo usualmente classificados em base água (*water base mud* – WBM) e base óleo - *oil base mud*, OBM- (Taghiyev et al., 2015). A adição de produtos químicos serve aos propósitos de controle da viscosidade, massa específica, manutenção do pH, eliminação de micro-organismos e combate à perda de circulação (Caenn e Chillingar, 1996).

O controle da invasão de fluido de perfuração para a formação geológica é realizado pela utilização de metodologias corretivas ou preventivas, dependendo do tipo de formação e das causas da perda de circulação (Almagro et al., 2014). Os métodos preventivos incluem melhores práticas de perfuração, a seleção do fluido de perfuração

e a adição de materiais para fortalecimento do poço com o objetivo de evitar a perda de circulação. Entretanto, nem sempre a prevenção é suficiente para mitigar a fuga de circulação. Então, medidas corretivas devem ser aplicadas, como exemplificado pela Figura 1.3 (Kumar, 2010).



Figura 1.3 – Práticas para o controle e prevenção da perda de circulação. Adaptado de Cook et al. (2012).

A correção do problema de perda de circulação é realizada pela injeção de partículas de granulometria selecionada, denominadas materiais para perda de circulação (*LCM*, “*lost circulation materials*”). Estes *LCM*'s, por muitas vezes, possuem composição semelhante aos materiais para fortalecimento do poço, diferindo na concentração adicionada e na granulometria utilizada (Lavrov, 2016). A Tabela 1.1 apresenta uma classificação dos *LCM*'s quanto à composição, forma geométrica e características (Alsaba e Nygaard, 2014).

O objetivo deste estudo é utilizar particulados granulares como *LCM*'s para mitigar a perda de circulação para substratos permeáveis, por meio da retenção do material particulado pelo substrato poroso, processo denominado filtração. Usualmente classificado de acordo com o estado de movimento do fluido de perfuração. Neste trabalho é abordada a filtração estática, que ocorre quando o fluido se encontra

estacionário no poço. Em situações nas quais existe o escoamento axial da mistura, o processo é dito dinâmico (*crossflow filtration*).

Tabela 1.1 – Classificação e exemplos de materiais utilizados como LCM.

LCM	Características	Exemplos
Granulares	Elevada resistência ao esmagamento	Grafita, cascas de nozes, carbonato de cálcio, gilsonita, bentonita, asfalto e perlita
Flocos	Apresenta graus de rigidez e são capazes de formar uma “esteira” ou “tapete” sobre a face da formação rochosa	Celofane, mica, cascas de algodão, vermiculita e carbonato de cálcio em flocos
Fibras	Possuem a habilidade de se entrelaçar e formar uma espécie de tapete ou peneira, retendo outras partículas e então formar o selante	Fibras de celulose, fibras de <i>nylon</i> , fibras minerais, pó de serra e papel picado
Solúveis em água ou ácido	Possuem a desvantagem de poder causar danos a formação rochosa	Solúveis em ácido: carbonato de cálcio e fibras minerais; solúveis em água: sais
Squeezes	Normalmente utilizados para conter elevadas taxas de perda de fluido em formações fraturadas ou altamente permeáveis; geralmente necessitam de um procedimento especial com o objetivo de forçar as partículas a invadir as zonas de perda de circulação	Ampla faixa de materiais
Hidratáveis ou dilatáveis	São basicamente uma combinação de LCM's com materiais reativos; são ativados tanto por reagentes químicos quanto pelo contato com o fluido de perfuração ou os fluidos presentes na formação.	Polímeros
Nanopartículas	Definidas como partículas sólidas que possuem uma faixa de tamanho variando entre 1 a 100 nm	Sílica, hidróxido de ferro e carbonato de cálcio
Misturas	Mistura de dois ou mais diferentes tipos de LCM resultam num melhor desempenho no combate à perda de fluido devido às diferentes propriedades que essas misturas apresentam	Ampla faixa de materiais

Fatores inerentes à perfuração e reologia do fluido influenciam diretamente a eficiência de filtração (Gao, 2007; Jiao e Sharma, 1993b; Kumar, 2010; Martins, 2013), sendo as contribuições da composição do fluido, distribuição e características

geométricas e físicas do particulado, das propriedades do meio filtrante (permeabilidade, porosidade) e do diferencial de pressão os tópicos mais investigados.

1.1 Formulação do problema

Dentre as atribuições previamente mencionadas para o fluido de perfuração, destaca-se a formação de um reboco pouco permeável (função #6) é condição essencial para mitigar a perda de circulação, pois a permeabilidade do substrato poroso é maior que a da torta depositada (Ba et al., 2013; Dewan e Chenevert, 2001). A Figura 1.4 representa o processo de retenção de material particulado por uma formação permeável.

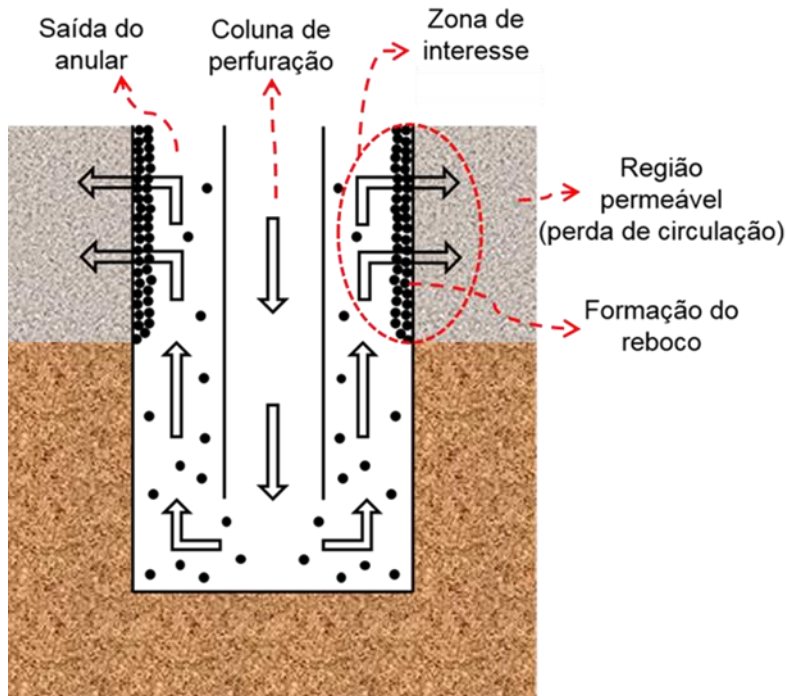


Figura 1.4 – Representação do processo de formação do reboco pela deposição de material particulado. Fonte: Lima (2016).

Sob ação do gradiente de pressão proveniente da perfuração em condição overbalance, o fluido invade a região permeável, contudo as partículas suspensas podem ser retidas e tendem a depositar na interface fluido-formação, originando o reboco. Este mecanismo de deposição é influenciado pelas dimensões do material particulado e da matriz porosa, sendo o menor espaçamento entre dois grãos próximos de um meio

poroso denominado garganta de poro. Partículas maiores que a garganta de poro se acumulam na superfície da região permeável, formando uma torta externa, representada em detalhe na Figura 1.4. Adicionalmente, os sólidos menores invadem o substrato e se acumulam internamente, constituindo o reboco interno, como exemplificado na Figura 1.5.

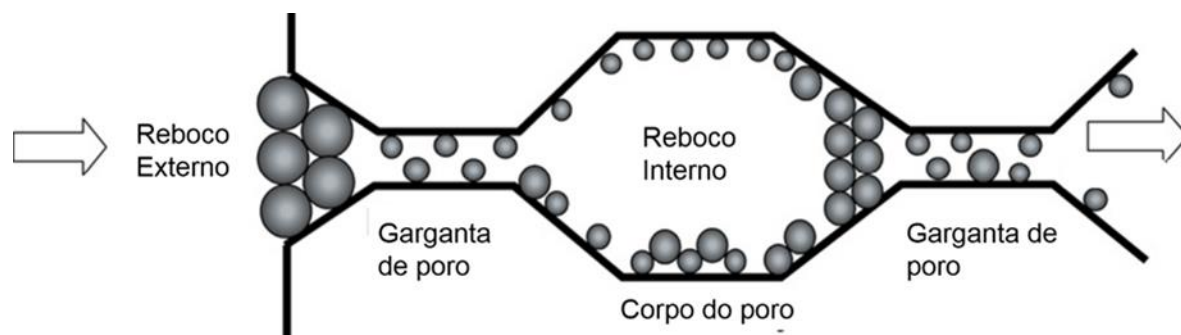


Figura 1.5 – Mecanismo de deposição de partículas no poro. Adaptado de Gao (2007).

Tanto a formação de um reboco externo quanto interno são eficientes no combate à perda de circulação, contudo, em regiões produtoras do reservatório, a deposição de uma torta interna pode danificar a formação geológica, reduzir a permeabilidade do reservatório e prejudicar a produção (Civan, 2007; Martins et al., 2003).

Conforme discutido anteriormente, a retenção do particulado pelo substrato poroso, processo denominado de filtração, é classificada de acordo com o estado de movimento do fluido de perfuração no poço. Simplificando a zona de interesse representada na Figura 1.4 de maneira a desconsiderar a coluna de perfuração e o fundo do poço, uma ilustração do processo de filtração estática é apresentada na Figura 1.6 (a), enquanto a Figura 1.6 (b) representa a filtração denominada dinâmica ou cruzada.

No processo de filtração estática, o fluido de perfuração não escoia axialmente e a perda de circulação ocorre em decorrência do gradiente de pressão radial. Nesta situação não há limite teórico para a espessura do reboco, contudo a retenção do material particulado tende a reduzir continuamente a perda de circulação e por consequência a taxa de filtração (Gao, 2007; Vaussard et al., 1986).

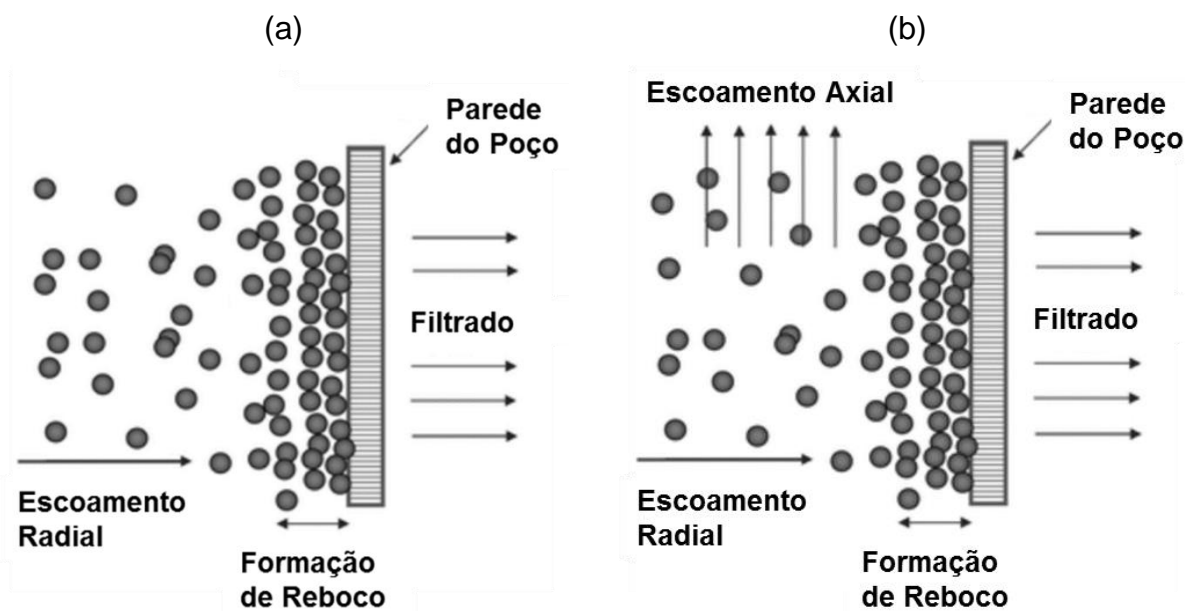


Figura 1.6 – Comparativo entre o processo de filtração: (a) estática e (b) dinâmica.
Fonte: Adaptado de Araújo (2010).

Quando ocorre o escoamento axial do fluido de perfuração no poço, a filtração é denominada dinâmica e a formação do reboco depende de fatores concorrentes: a deposição decorrente do gradiente de pressão radial e o carreamento da camada depositada em virtude do cisalhamento provocado pelo escoamento axial. Este efeito competitivo tem como consequência a tendência de equilibrar a deposição de partículas novas com a estabilização da espessura do reboco e da taxa de filtração (Vaussard et al., 1986). A Figura 1.7 apresenta um gráfico do volume cumulativo de filtrado ao longo do tempo de filtração. Destaca-se o menor volume de filtrado na filtração estática e a estabilização da taxa de filtração dinâmica, evidenciada pela linearidade da curva de volume de filtrado por tempo.

O *American Petroleum Institute* (API) recomenda uma metodologia experimental para avaliar as propriedades de filtração estática de fluidos de perfuração (API, 2014a, 2014b). O procedimento recomendado consiste em pressurizar uma amostra contra um elemento filtrante, normalmente um papel filtro, e observar somente o volume coletado, denominado filtrado, após 30 minutos e a espessura da torta. Nestes experimentos, a pressão recomendada é de 100 psi (libras por polegada quadrada) e a temperatura é a ambiente, porém, testes com até 1800 psi e até 200°C podem ser executados com um

equipamento do tipo HTHP (*High Temperature High Pressure*), que possui o mesmo princípio de funcionamento.

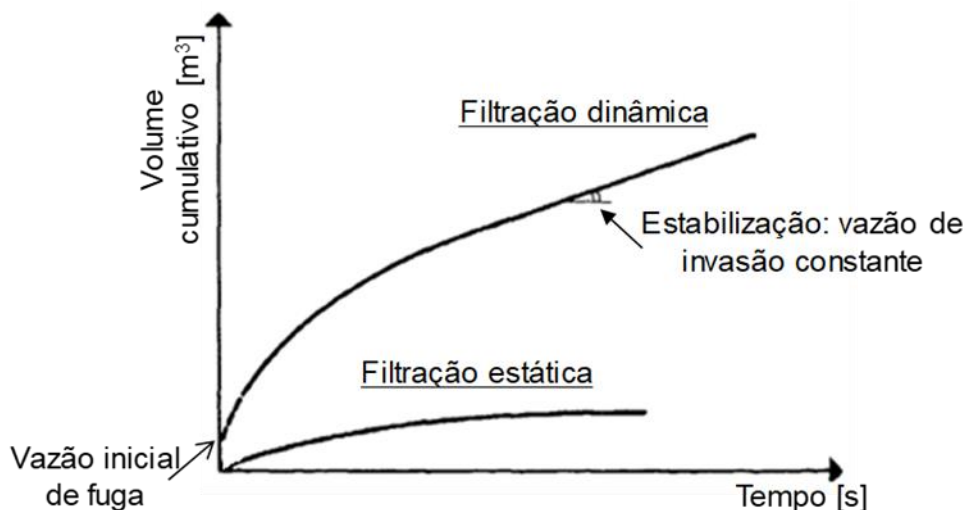


Figura 1.7 – Gráfico do volume cumulativo de filtrado ao longo do tempo para os fenômenos de filtração estática e dinâmica. Adaptado de Vaussard et. al. (1986).

Este trabalho se propõe a estudar a filtração estática em um aparato experimental comercial e avaliar, principalmente, as influências do particulado (concentração e tipo) e da composição do fluido na eficiência de formação do reboco e redução da perda de circulação. A análise dos resultados é efetuada pelo monitoramento do volume de fluido coletado ao final do experimento, denominado filtrado, dos parâmetros do reboco (espessura, massa e aspecto visual) e da reologia do filtrado.

1.2 Objetivos gerais

O objetivo deste trabalho é estudar de maneira experimental a filtração estática de fluidos não newtonianos com presença de LCM's visando avaliar a combinação de aditivos poliméricos e materiais particulados no combate à perda de circulação.

Com este objetivo, propõe-se a elaboração de procedimentos para: (I) formular fluido com aditivo polimérico, (II) adicionar LCM's ao fluido não newtoniano formulado, (III) realizar os ensaios experimentais de filtração estática, (IV) analisar as características

reométricas do filtrado e (V) avaliar o reboco depositado são desenvolvidos. O aparato e os materiais utilizados são apresentados com maior detalhamento no Capítulo 3.

Os experimentos de filtração visam compreender o efeito da variação do (A) elemento filtrante, (B) aditivo polimérico, (C) concentração de LCM e (D) tipo de LCM na eficiência do combate à perda de circulação.

Este trabalho utiliza como variáveis resposta: (1) o volume de fluido coletado na saída da célula de teste, denominado filtrado, (2) a reologia do filtrado em comparação com o fluido não newtoniano formulado e (3) as características do reboco formado (massa úmida e seca e espessura).

Desta maneira, objetiva-se compreender melhor a influência de cada parâmetro na eficiência de formação de reboco e determinar o aditivo polimérico e o material para perda de circulação (LCM) que proporcionam um melhor combate à perda de circulação.

1.3 Organização do documento

O primeiro capítulo deste documento introduz o problema de perda de circulação para formações permeáveis durante operações de perfuração de poços de petróleo e apresenta uma das técnicas corretivas empregadas, a injeção de aditivos particulados (LCM) para obstruir os poros da formação. Na sequência, o problema é formulado e os objetivos do estudo são apresentados.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos e definições importantes para a compreensão do fenômeno de filtração e os trabalhos e publicações que fundamentam este estudo. Não obstante, os objetivos específicos deste trabalho são descritos.

No Capítulo 3, o aparato experimental utilizado é detalhado e os materiais e procedimentos utilizados são descritos, com ênfase para os aditivos poliméricos e LCM's, bem como as metodologias de preparo das amostras, do ensaio experimental e da avaliação dos resultados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos experimentos propostos. Inicialmente, ensaios com o intuito de verificar ou determinar algum parâmetro do processo são apresentados e discutidos. Na sequência, os resultados dos experimentos de filtração considerando a variação do aditivo polimérico e do LCM são discutidos.

No Capítulo 5 as conclusões deste trabalho são resumidas e apresentadas, enquanto o Capítulo 6 lista as sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente neste capítulo serão apresentados alguns conceitos básicos sobre meios porosos (e.g., porosidade, permeabilidade). Na sequência são abordados os conceitos e características de fluidos não-newtonianos, ressaltando os diferentes comportamentos da relação entre viscosidade e taxa de deformação. Ainda neste capítulo, são apresentadas as principais características do processo de filtração, destacando aspectos de análises experimentais. Diferentes fatores que influenciam a filtração de fluidos de perfuração são destacados para a melhor compreensão e embasamento para os estudos do presente trabalho (e.g., tempo de filtração, gradiente de pressão, compressibilidade do reboco, formação rochosa, propriedades do fluido de perfuração e características do material particulado).

2.1 Propriedades permo-porosas

A perda de circulação detectada em substratos permeáveis e a deposição de material particulado são influenciados pelas características geométricas da formação, com destaque para a porosidade, ou fração volumétrica de vazios, assim como a permeabilidade.

A fração volumétrica de vazios (ϕ) de um meio poroso, representada pela Equação (2.1), é definida como a razão entre o volume de poros (V_p) e o volume total da amostra analisada (V_t) (Vafai, 2005).

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (2.1)$$

Permeabilidade é a propriedade de um meio poroso que quantifica a resistência que este substrato oferece ao escoamento de um fluido através dos poros. A primeira pesquisa referente à este tema foi realizada por Darcy em 1856, a qual analisou a vazão de água que percolava o substrato poroso, a queda de pressão e as características geométricas, tendo formulado uma relação para calcular a permeabilidade da amostra. A Equação (2.2) apresenta a equação de Hazen-Darcy para um escoamento unidimensional (apud Nield e Bejan, 2006).

$$Q = \frac{\Delta p}{L_p} \frac{A_p}{\mu} K \quad (2.2)$$

sendo Q a vazão que percola o substrato poroso [m^3/s], Δp o diferencial de pressão [Pa], L_p o comprimento do substrato poroso [m], A_p a área da seção transversal de filtração [m^2], μ a viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s] e K a permeabilidade do substrato poroso [m^2]. Vale ressaltar que a unidade permeabilidade mais comum em operações de exploração de petróleo é o darcy [D], relacionado com a unidade adotada pelo Sistema Internacional (SI) através da Equação (2.3).

$$1\text{D} \cong 9,9 \times 10^{-13} \text{m}^2 \quad (2.3)$$

O darcy é convencionado como a permeabilidade de um meio pelo qual escoar um fluido com viscosidade de um centipoise [cP] com vazão de um centímetro cúbico por segundo [cm^3/s], quando submetido à um gradiente de pressão de uma atmosfera por centímetro [atm/cm] através de uma área transversal de um centímetro quadrado [cm^2] (SPE, 1984).

Alguns pesquisadores, com destaque para Dipuit, Forchheimer e Brinkman, analisaram e modificaram a equação original de Darcy. Tais estudos confirmaram que a equação proposta por Darcy é adequada para representar escoamentos a baixas velocidades, contudo não considera o arrasto devido à geometria dos poros, que é significativo com o aumento de velocidade (Kaviany, 1995; Nield e Bejan, 2006; Vafai, 2005).

Martins et al. (2003) avaliaram experimentalmente o escoamento de soluções poliméricas de Carboximetilcelulose (CMC), goma xantana (GX) e poliácridamida (PHPA) através de substratos porosos consolidados e verificaram que o modelo de Hazen-Darcy obtém valores de vazão próximos aos mensurados para concentrações mais baixas dos polímeros (1-2 libras por barril). Contudo, com o aumento do diferencial de pressão imposto e, por consequência, da velocidade do escoamento, as divergências são mais elevadas, atingindo até 220%. Também detectaram que com o aumento da concentração de polímero, o que resultava em fluidos com características viscoplásticas, os valores mensurados para a vazão diferiam consideravelmente dos calculados através do modelo de Hazen-Darcy.

2.2 Fluidos newtonianos e não newtonianos

De maneira simplificada, os fluidos podem ser classificados de acordo com o comportamento da viscosidade quando submetidos a uma taxa de deformação, i.e., na solitação de cisalhamento do fluido. Definida como a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação à qual um fluido está sujeito, a viscosidade, Equação (2.4), pode ser explicada como a resistência de um fluido ao escoamento (White, 1991).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_{\alpha\beta}} \quad (2.4)$$

sendo μ a viscosidade absoluta ou dinâmica do fluido [Pa.s], τ a tensão de cisalhamento imposta ao fluido [Pa] e $\dot{\gamma}_{\alpha\beta}$ a taxa de deformação [1/s], expressa pela Equação (2.5)

$$\dot{\gamma}_{\alpha\beta} = \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial x_{\beta}} + \frac{\partial u_{\beta}}{\partial x_{\alpha}} \quad (2.5)$$

sendo u a componente de velocidade do fluido, α a direção normal ao plano de tensão ou deformação e β a direção da força responsável pela tensão.

Em situações nas quais, para uma mesma pressão e temperatura, a relação entre a tensão e a taxa de deformação é linear (i.e., a magnitude da viscosidade não é alterada pela mudança da taxa de cisalhamento), o fluido é denominado newtoniano.

Os fluidos que se comportam diferentemente de um fluido newtoniano são denominados não newtonianos e podem ser classificados em:

- fluidos independentes do tempo ou puramente viscosos: fluidos nos quais a taxa de deformação em qualquer ponto é determinada somente pelo valor da tensão naquele ponto e instante;
- fluidos dependentes do tempo: aqueles nos quais o histórico de cisalhamento do fluido influencia a relação entre tensão e taxa de deformação;
- fluidos viscoelásticos: que apresentam simultaneamente características de um sólido elástico e de um fluido puramente viscoso (Bird et al., 1987).

Este trabalho se restringe à análise de fluidos puramente viscosos, sendo a relação entre tensão e taxa de deformação análoga à de fluidos newtonianos (Bird et al., 1987), expressa na Equação (2.6).

$$\tau_{\alpha\beta} = \eta \dot{\gamma}_{\alpha\beta} \quad (2.6)$$

sendo η a viscosidade aparente do fluido.

A Figura 2.1 ilustra a relação entre tensão e taxa de deformação (a) e entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento (b) típica de alguns fluidos independentes do tempo.

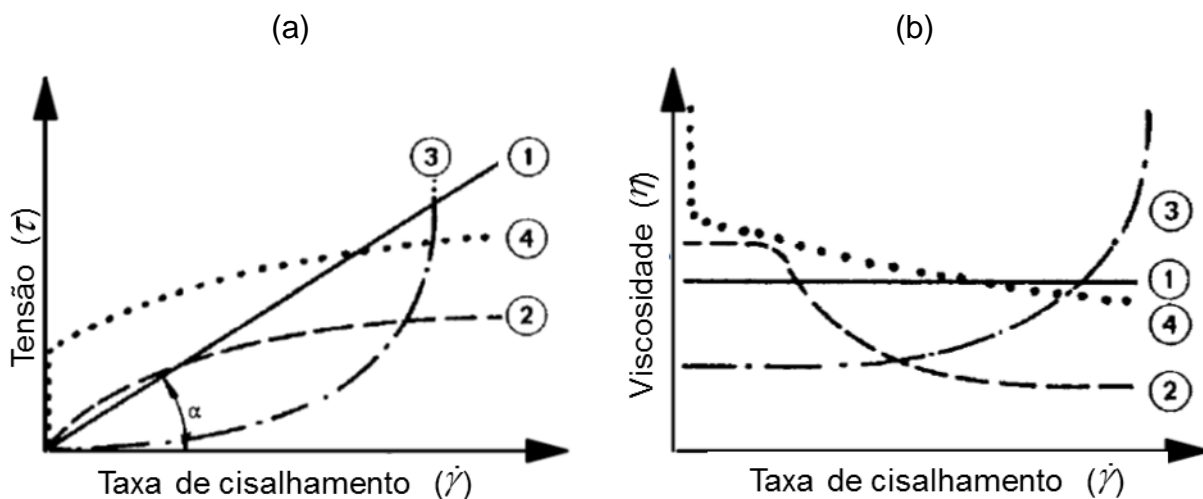


Figura 2.1 – Diagrama do comportamento típico de alguns fluidos puramente viscosos em comparação com um newtoniano, sendo (a) a relação entre tensão e taxa de deformação e (b) a relação entre a viscosidade e taxa de deformação.

Conforme discutido anteriormente, fluidos newtonianos (1) apresentam crescimento linear da tensão com o aumento da taxa de cisalhamento e viscosidade constante. As curvas indicadas por (2) referem-se a um fluido não newtoniano denominado pseudoplástico, o qual apresenta crescimento não linear da tensão com o aumento da taxa e redução da viscosidade.

Outro fluido que apresenta crescimento não linear da tensão é representado pela curva (3), onde a viscosidade deste material aumenta com a taxa de cisalhamento. Estes são denominados fluidos dilatantes.

As curvas de tensão para os fluidos 1, 2 e 3 tem início na origem dos eixos, indicando que para uma deformação nula, a tensão também é nula. Isto não ocorre para o fluido 4, denominado viscoplástico. Neste caso existe uma tensão mínima necessária para o escoamento ocorrer, denominada de tensão limite de escoamento. Caso a tensão seja inferior a este valor crítico, o fluido não escoar e a viscosidade tende ao infinito. Quando a tensão aplicada supera o valor limite, há escoamento e a relação entre tensão e taxa de deformação se assemelha à apresentada para fluidos newtonianos (plástico de Bingham) e pseudoplástico (Bird et al., 1987; Chhabra e Richardson, 1999).

Na literatura são encontrados diversos ajustes e modelos para representar fluidos puramente viscosos, como os ajustes de lei de potência, Casson, Carreau-Yasuda e Herschel-Bulkley (Chhabra e Richardson, 1999). Neste trabalho são considerados apenas os ajustes de lei de potência e de Herschel-Bulkley, apresentados em detalhe na sequência.

A Equação (2.7) apresenta o ajuste de lei de potência (PL), muito utilizado para fluidos pseudoplásticos e dilatantes (Bird et al., 1987).

$$\tau = \eta_c \dot{\gamma}^n \quad (2.7)$$

sendo τ a tensão, η_c o índice de consistência e n o índice de lei de potência, que representa fluidos pseudoplásticos quando menor que um e dilatantes para n maior que um.

O escoamento de um fluido viscoplástico pode ser representado pelo ajuste de Herschel-Bulkley, representado pelas Equações (2.8) e (2.9).

$$\dot{\gamma} = 0 \text{ para } \tau < \tau_0 \quad (2.8)$$

$$\tau = \tau_0 + \eta_c \dot{\gamma}^n \text{ para } \tau > \tau_0 \quad (2.9)$$

sendo τ , a tensão e τ_0 , a tensão limite de escoamento. Os índices η_c e n possuem o mesmo significado que para o ajuste lei de potência. Esta relação considera a existência de uma tensão limite de escoamento. Caso a tensão imposta seja inferior a este limite, o fluido se comporta como um sólido, não escoando, situação representada pela Equação (2.8). Quando a tensão for superior à τ_0 o fluido escoar de acordo com a Equação (2.9) e a viscosidade absoluta pode diminuir ($n < 1$), aumentar ($n > 1$) ou se manter constante ($n = 1$) com o aumento da taxa de deformação.

Na literatura, diversos polímeros são utilizados para conceder o comportamento não newtoniano aos fluidos. Particularmente para este trabalho, são estudadas as soluções poliméricas de goma xantana (GX), carboximetilcelulose (CMC) e carbopol (CBP).

O comportamento de soluções de goma xantana foi estudado por Whitcomb et al. (1977) e os autores detectaram que para concentrações inferiores a 1% em massa de polímero, o fluido apresenta comportamento pseudoplástico. Porém, com o aumento da quantidade de soluto, as soluções apresentam tensão limite de escoamento. Benchabane e Bekkour (2008) utilizaram CMC como aditivo polimérico e observaram que este também é pseudoplástico em concentrações inferiores a 2%. Para o carbopol, resultados experimentais mostram que soluções com concentração a partir de 0,1% em massa apresentam comportamento viscoplástico (Costa, 2017; Di Giuseppe et al., 2015).

2.3 Estudo experimental da filtração

Conforme apresentado no Capítulo 1, este trabalho utiliza um aparato comercial para estudar a filtração estática. Neste sentido, uma análise dos equipamentos comerciais é efetuada a seguir.

Na Figura 2.2 estão indicados dois modelos de equipamentos comerciais utilizados para analisar a filtração estática. O filtro-prensa do tipo API (a) não disponibiliza controle da temperatura e permite pressurização somente na entrada da célula de teste (*core holder*), usualmente realizada por gases pouco reativos com o fluido de trabalho, como dióxido de carbono (CO₂), nitrogênio (N₂) e ar comprimido isento de impurezas e com magnitude máxima de 100 psi. Os filtros HTHP (b) permitem a regulação de temperatura até aproximadamente 200 °C com a utilização de uma jaqueta térmica e trabalham com pressões máximas de 1800 psi. Além disso, alguns modelos permitem a pressurização tanto na entrada quanto na saída da célula de teste, possibilitando o controle do gradiente, importante em experimentos com temperatura elevada para evitar a evaporação do fluido filtrado (OFITE, 2014).

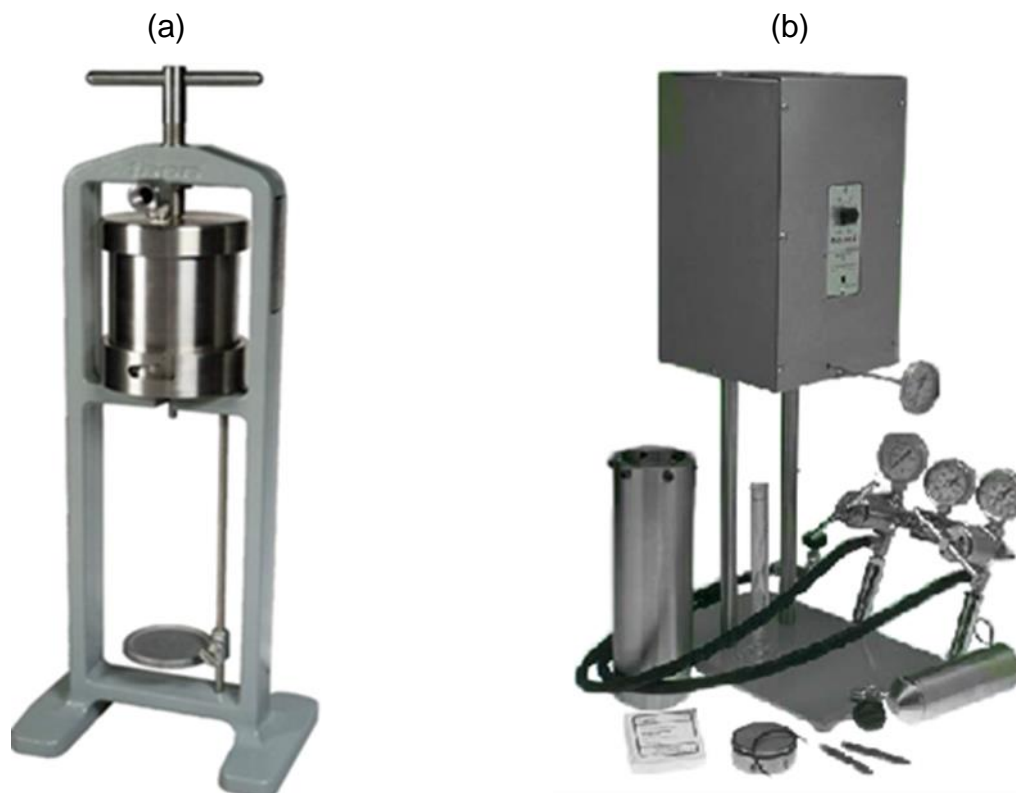


Figura 2.2 – Filtro prensa do tipo: (a)API e (b) HTHP.
Adaptado de Fann (2012).

Ambos os equipamentos utilizam como meio filtrante um papel filtro com permeabilidade e porosidade conhecidas. Não obstante, o modelo HTHP pode ser adaptado para possibilitar a análise de substratos porosos com no máximo uma polegada de espessura. Sob o efeito do gradiente de pressão, o fluido é obrigado a percolar o substrato poroso, causando o acúmulo de partículas na superfície do filtro de papel. A vantagem de utilização destes aparatos reside na simplicidade dos experimentos e mobilidade do equipamento, sendo muito utilizados durante operações em campo. Porém, o emprego de filtros de papel como meio filtrante e a impossibilidade de cisalhar o reboco no decorrer do experimento são as principais ressalvas quanto aos resultados obtidos (Ferguson e Klotz, 1954; Krueger, 1962; Prokop, 1952).

Em situações denominadas estáticas, um reboco ideal seria impermeável, mitigando por completo a perda de circulação e estabilizando a espessura. Contudo, Prokop (1952) observou experimentalmente que a perda de circulação não é completamente eliminada, portanto o reboco tende a crescer indefinidamente. Quando a

filtração é denominada dinâmica, ocorre o cisalhamento do reboco e este tende à uma espessura constante (Williams, 1939).

Vaussard et al. (1986) e Calabrez (2013) modificaram um filtro prensa de alta pressão com o intuito de permitir a avaliação da formação de reboco sujeito ao cisalhamento. Para tal, um cone conectado a um motor foi inserido na célula de teste, de maneira que a rotação da superfície em contato com o fluido simula uma situação de filtração dinâmica. Williams (1939) foi pioneiro no estudo da formação de torta analisando a filtração de um escoamento ascendente em uma geometria cilíndrica monitorando o volume de filtrado ao longo do tempo do experimento e a espessura da torta formada, concluindo que após um determinado tempo, a taxa de filtração atingia um valor constante.

Os resultados de Williams (1939) motivaram a investigação das divergências entre os resultados da filtração estática e dinâmica e a análise da influência dos parâmetros de teste (e.g. propriedades reológicas, gradiente de pressão, características do particulado e substrato poroso). Prokop (1952), utilizando uma geometria semelhante, concluiu que o reboco formado na ausência de cisalhamento é difícil de erodir e detectou também que a taxa de filtração observada em processos estáticos se mantinha aproximadamente constante e que a espessura da torta depositada nesses casos era significativamente maior que a observada durante a filtração dinâmica.

Ferguson e Klotz (1954), Krueger (1962), Jiao e Sharma (1993a), Waldmann (2005) e Calabrez (2013) são alguns dos autores que também estudaram as diferenças entre os dois mecanismos de deposição. Com diferentes níveis de exigência, cada pesquisador avaliou a capacidade dos experimentos estáticos em representar adequadamente o fenômeno e concluíram que o filtro prensa do tipo API fornece as tendências do processo de filtração, estimando corretamente a influência das propriedades e parâmetros utilizados (e.g., tipo; granulometria e concentração de particulado, concentração de aditivo polimérico, gradiente de pressão). Não obstante, os filtros do tipo API são importantes para qualificar o fluido testado quanto à capacidade de formação de reboco, possibilitando a comparação do desempenho em diferentes condições de filtração. Atualmente é a metodologia mais utilizada para classificar fluidos

de perfuração e está indicada nas práticas recomendadas 13A e 13B da API (2014a) e (2014b).

Partindo das definições e conceitos apresentados, uma revisão dos trabalhos presentes na literatura é realizada na sequência deste capítulo.

2.4 Fatores que influenciam a filtração de fluidos de perfuração

A complexidade do fenômeno de filtração dificulta uma análise isolada de cada parâmetro influenciador, pois existem interdependências e efeitos competitivos entre dois ou mais fatores. Esta revisão busca dividi-los de maneira a facilitar o entendimento. Para tanto, inicialmente, a influência do tempo de filtração é brevemente discutida, seguida do efeito do gradiente de pressão e da compressibilidade do reboco, que também é afetada pelo material particulado. O efeito do fluido e, principalmente, dos aditivos viscosificantes e adensantes são explicados e, por fim, as características do particulado e do substrato poroso são retratadas concomitantemente.

2.4.1 Tempo de filtração

Poucos autores se dedicaram a avaliar a influência do tempo de filtração nas propriedades do reboco. Hassen (1980) desenvolveu um modelo matemático para prever o volume de filtrado após um dado período de tempo tanto no processo estático quanto no dinâmico e formulou a equação (2.10), que representa a relação linear do volume com a raiz quadrada do tempo para a filtração sem cisalhamento.

$$V = C_1\sqrt{t} + C_2 \quad (2.10)$$

sendo C_1 a taxa de filtração constante do processo estático, t o tempo do experimento e C_2 o volume perdido antes da formação da torta. Este modelo considera o crescimento constante do reboco, porém, com o acúmulo do material particulado detecta-se uma redução da taxa de filtração. Desta maneira, em situações reais, a taxa de filtração representada por C_1 não é uma constante. Uma metodologia para estimar a espessura do reboco foi desenvolvida por Dewan e Chenevert (2001) e é explicada detalhadamente na seção 2.5.

Em processos de filtração dinâmica, verifica-se a existência de um período de formação do reboco, durante o qual a taxa de filtração diminui até assumir um valor constante, a partir do qual inicia-se um período com espessura de torta invariante. Este equilíbrio pode ocorrer de maneira rápida ou somente após dezenas de horas (Jiao e Sharma, 1993a, 1992a; Prokop, 1952; Williams, 1939).

2.4.2 Gradiente de pressão e compressibilidade

Em condições estáticas, a invasão do fluido de perfuração é consequência do gradiente de pressão radial existente entre o poço e a formação rochosa. Desta maneira, alterações na intensidade deste gradiente irão alterar a deposição do reboco.

Com o objetivo de investigar o efeito da pressão na filtração, Dewan e Chenevert (2001) definiram um parâmetro denominado “*slowness*”, Equação (2.11), cujo significado físico é o tempo necessário para o fluido percolar um centímetro do substrato poroso.

$$S = \frac{t}{V_f} A \quad (2.11)$$

sendo S o parâmetro *slowness* [s/cm], t a duração do experimento [s], V_f o volume de filtrado [cm³] e A a área de filtração [cm²].

Na Figura 2.3 são apresentados os gráficos de volume de filtrado por tempo (a) e de *slowness* por tempo (b) para um processo de filtração dinâmica. Uma alteração na pressão imposta ao fluido altera sutilmente a inclinação da curva de volume de filtrado, Figura 2.3 (a). Contudo o acréscimo de pressão provoca uma queda brusca no valor de *slowness* indicando que o tempo necessário para o fluido invadir um centímetro de formação diminui, Figura 2.3 (b).

A análise da curva de *slowness* possibilita a obtenção de S_1 e S_2 , Figura 2.3 (b), que representam os pontos de *slowness* no acréscimo de pressão de P_1 para P_2 e são necessários para calcular o índice de compressibilidade do reboco formado (ν) através da Equação (2.12). Para ν nulo, a torta é considerada incompressível e valores perto da unidade representam rebocos extremamente compressíveis.

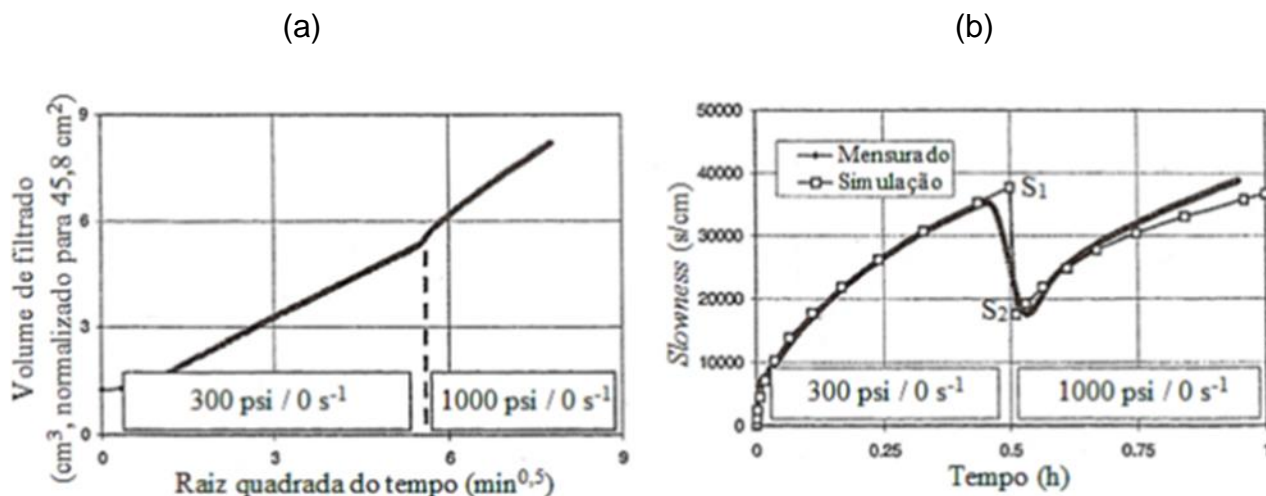


Figura 2.3 – Curvas de : (a) volume de filtrado e (b) *slowness*. Adaptado de Dewan e Chenevert (2001).

$$v = 1 - \frac{\log\left(\frac{S_1}{S_2}\right)}{\log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} \quad (2.12)$$

A deposição e compressão do material particulado são efeitos competitivos no crescimento da torta (Peng, 1990) e é evidenciado que o aumento de pressão provoca uma redução dos espaços vazios entre as partículas, reduzindo a porosidade e permeabilidade de rebocos compressíveis, resultados também verificados por Vaussard et al. (1986) e Jiao e Sharma (1993b).

O principal efeito da pressão imposta é denotado pela compressibilidade do reboco. De maneira geral, pressões maiores compactam o reboco e diminuem a permeabilidade. Este efeito não é detectado neste trabalho, pois a pressão utilizada é mantida constante.

2.4.3 Fluido de perfuração e aditivos poliméricos

Conforme descrito na Seção 2.2, a adição de polímeros altera o comportamento reológico dos fluidos. Neste contexto, Ferraz (2014) estudou o efeito de aditivos poliméricos e da granulometria do LCM (carbonato de cálcio e esferas de vidro) na formação do reboco no processo de filtração estática. Inicialmente os experimentos foram realizados com uma solução de glicerina e água, que apresenta um

comportamento newtoniano e observou-se que a taxa de filtração foi extremamente elevada, com praticamente todo o volume analisado sendo filtrado antes do tempo pré determinado para o fim do experimento. Fluidos não newtonianos foram formulados com a adição de goma xantana e CMC à água nas concentrações de uma e duas libras por barril [lb/bbl] (Caenn e Chillingar, 1996). Ferraz (2014) detectou que para o CMC, LCM's com menor granulometria apresentaram menor volume de filtrado, situação inversa ao observado para os fluidos com goma xantana. Não obstante, o carbonato de cálcio obteve melhor desempenho no combate à perda de circulação.

Ferraz (2014) ajustou as equações de lei de potência e de Herschel-Bulkley às curvas de viscosidade das soluções poliméricas. Para os fluidos com goma xantana, o melhor ajuste foi o de Herschel-Bulkey, enquanto para o CMC, a equação de lei de potência apresentou melhor resultado. Isto indica a existência de uma tensão limite de escoamento para a solução de goma xantana, dependente da concentração do aditivo polimérico.

Trabalhos comparando a efetividade de fluidos base água, óleo e emulsões na formação do reboco concluem que a presença de gotículas de água emulsionadas agem como agentes tamponadores dos poros da formação, resultando num menor volume de filtrado e num reboco menos permeável (Caenn e Chillingar, 1996; Calabrez, 2013; Martins, 2013).

Desta maneira, conclui-se que o tipo e a concentração de polímero adicionado influenciam o comportamento não newtoniano da solução e, por consequência, o processo de filtração. As características de cada solução polimérica formulada neste trabalho são avaliadas no Capítulo 4.

2.4.4 Formação rochosa e aditivo particulado

O combate à perda de circulação pode ser efetuado pela adição de materiais para perda de circulação ao fluido (Caenn e Chillingar, 1996). Desta forma, nesta seção contempla-se o efeito das partículas e das propriedades permo-porosas do substrato no processo de filtração e formação de reboco.

Em uma investigação do processo de filtração estática, Hook e Ernst (1969) realizaram experimentos utilizando papel filtro com tamanho de poro 44 micrometros (325 mesh) e duas amostras rochosas com permeabilidades de 30 e 300 md (milidarcys) como meio filtrante. Os autores estipularam uma espessura fixa de reboco e analisando o tempo necessário para cada substrato atingir o valor convencional observaram que para a rocha mais permeável, o reboco formava-se mais rapidamente, pois o fluido de perfuração percola o substrato com maior facilidade, implicando numa maior deposição de LCM.

Vaussard et al. (1986) avaliaram experimentalmente o volume de fluido que invade o substrato poroso durante o processo de filtração dinâmica. Para tanto, foram utilizadas rochas naturais e amostras metálicas sinterizadas com permeabilidades de 50 e 200 md. Os autores concluíram que uma pequena diferença pode ser observada no início do processo e que após a estabilização da taxa de filtração não há discrepância entre o volume de filtrado para os dois meios porosos. Utilizando um core holder do tipo HTHP modificado para avaliar a filtração dinâmica, Martins (2013) concluiu que o aumento da permeabilidade do substrato provoca um leve incremento no volume de fluido coletado na saída da célula de filtração (filtrado), porém não influencia a espessura do reboco.

Jiao e Sharma (1993a), utilizando modelos matemáticos e métodos experimentais, desenvolveram o conceito de permeabilidade crítica. Os autores identificaram a existência de uma pressão de perfuração mínima necessária para formar o reboco no processo de filtração dinâmica e observaram que amostras com permeabilidade mais baixa demandavam maiores gradientes de pressão para a ocorrência do reboco.

Um dos primeiros estudos relativos à influência do material particulado afirma que um reboco eficiente é formado quando os sólidos são, em maioria, de natureza coloidal, i.e., partículas com ordem de grandeza de 1 micrometro (Vaussard et al., 1986).

Jiao e Sharma (1992a) estudaram o dano à formação provocado pela invasão de fluido e material particulado nos processos de filtração dinâmica utilizando soluções contendo 2% e 4% de bentonita, uma argila de natureza coloidal. Os autores identificaram que o aumento da concentração do material adicionado reduz significativamente a taxa de filtração e, conseqüentemente, o volume de fluido perdido para a formação. Este resultado corrobora o estudo realizado por Hook e Ernst (1969),

que investigaram o efeito da concentração de aditivo utilizando o teste API. Ambas as pesquisas concluem que o aumento na quantidade de material particulado proporciona uma união (“*bridging*”) mais uniforme, reduzindo a permeabilidade do reboco e o grau de invasão das partículas.

A granulometria do material também foi investigada no processo de filtração dinâmica por Jiao e Sharma (1992a) com a utilização de dois fluidos, um com a adição de um material floculante, responsável por aumentar a agregação do particulado, e outro com um dispersante. O segundo fluido quase não apresentou reboco externo, pois as partículas invadiram severamente o substrato poroso, constituído de areia e com permeabilidade de aproximadamente 100 md. Este resultado não foi observado para a primeira solução, que restringiu a invasão das partículas aos primeiros centímetros da formação rochosa.

Em uma revisão da literatura, Gao (2007) analisou a deposição de partículas em meios porosos. O autor concluiu que o aumento da granulometria implica em um reboco mais permeável e uma invasão severa, porém de pequena profundidade da formação rochosa com a ressalva dos estudos revisados utilizarem um intervalo reduzido para o diâmetro do particulado.

Elkatatny e Nasr-El-Din (2012) estudaram o reboco formado nos processos de filtração estática e dinâmica utilizando um tomógrafo computadorizado. Esta técnica comprovou a afirmação de Jiao e Sharma (1993b) que a torta é heterogênea, com partículas maiores se depositando primeiro e os interstícios sendo ocupados por aditivos de tamanho cada vez menor.

Utilizando uma célula de filtração estática, Barkman e Davidson (1972) testaram a filtração de água com particulado e afirmaram que quando as partículas suspensas são maiores que os poros do substrato, o reboco é formado antes de qualquer perda de fluido, enquanto que em situações nas quais o aditivo sólido é muito menor, foi detectada a invasão de sólidos no meio filtrante e uma fuga de fluido inicial significativa.

A razão entre as dimensões do material particulado e da garganta de poro influencia diretamente na formação do reboco. Abrams (1977) recomenda que as partículas de LCM tenham um terço ($1/3$) do diâmetro médio de poro para proporcionar a formação do reboco externo. Tal critério se mostrou inválido para vários experimentos subsequentes,

pois um meio poroso natural é extremamente heterogêneo, dificultando a adoção de um critério simples para a seleção de particulado.

Dick et al. (2000) expandiram o critério proposto por Abrams para considerar um intervalo ótimo de diâmetro para as partículas. Os autores propuseram a teoria de empacotamento ideal (IPT), um método gráfico que utiliza a raiz quadrada do diâmetro de poro, obtido através de medições experimentais ou estimado pela raiz quadrada da permeabilidade, para ajustar as distribuições granulométricas do material obturante.

Em experimentos de filtração dinâmica, He e Stephens (2011) detectaram que em rochas com distribuição de tamanho de poros uniforme, a teoria de empacotamento ideal apresentou resultados satisfatórios, reduzindo a quantidade de filtrado em até 70%. Porém, quando as formações apresentavam estruturas pouco homogêneas ou com poros e falhas de tamanho excessivo, as partículas não foram capazes de selar os interstícios maiores.

De maneira geral, pode-se afirmar que rebocos formados por partículas coloidais apresentam menor permeabilidade e são efetivos no combate à perda de circulação. Não obstante, o aumento da concentração destes aditivos reduz ainda mais a invasão. Porém, tais afirmações não podem ser generalizadas, pois o substrato poroso também influencia a deposição das partículas, sendo necessário considerá-lo na seleção do aditivo.

2.5 Parâmetros de análise do processo de filtração

Nesta seção são discutidos os principais parâmetros de análise do processo de filtração e formação de reboco.

As práticas 13B (API, 2014a, 2014b) recomendam que o volume de fluido filtrado ao final do experimento e a espessura da torta sejam catalogados e o reboco classificado quanto à aparência (liso ou rugoso) e resistência (firme ou macio). Usualmente, o volume é monitorado ao longo do processo, permitindo uma avaliação mais confiável do fenômeno, pois a mudança de inclinação da curva indica alterações na taxa de filtração.

Em uma revisão, Ba Geri et al. (2013) apresentam os principais parâmetros do reboco, além de métodos para mensurá-los ou calculá-los. A metodologia mais aplicada

para a obtenção da espessura é a medição direta com o emprego de um paquímetro ou de uma régua em microescala com precisão de 0,1 milímetros. A utilização de medidores a laser e por imagem, que chegam a ser 100 vezes mais precisos, cresceu significativamente no início do século XXI.

O volume de poros pode ser aferido diretamente com a utilização de um equipamento denominado porosímetro, e a porosidade ou fração volumétrica de poros pode ser calculada através da Equação (2.1).

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (2.1)$$

Por muitas vezes, o reboco formado é frágil e difícil de ser adaptado para utilização com o porosímetro, destacando a necessidade de metodologias alternativas.

Dewan e Chenevert (2001) desenvolveram equações para prever o crescimento do reboco e estimar os parâmetros com base nas massas do reboco ao final do experimento e por fim submetendo-as a um processo de secagem para eliminação de fluidos aprisionados.

Inicialmente, as massas do papel filtro úmido (m_{wf}) e seco (m_{df}) são mensuradas. Após o experimento de filtração, a massa do conjunto papel filtro e reboco é aferida e utilizam-se as Equações (2.13) e (2.14) para obter a massa do reboco seco (m_{dc}) e úmido (m_{wc}), respectivamente.

$$m_{dc} = m_d - m_{df} \quad (2.13)$$

$$m_{wc} = m_w - m_{wf} \quad (2.14)$$

sendo m_{df} a massa do filtro de papel seco, m_d a massa do conjunto papel filtro e reboco após secagem, m_{dc} a massa líquida do reboco seco, m_{wf} a massa do filtro de papel saturado com o fluido de trabalho, m_w a massa do conjunto filtro e reboco logo após o ensaio de filtração e m_{wc} a massa líquida do reboco úmido. Todas medidas em gramas [g].

A partir dos dados obtidos com as Equações (2.13) e (2.14) e dos valores de massa específica do filtrado e do particulado constituinte do LCM, o volume de poros (V_p) e o

volume total do reboco (V_t) são calculados através das Equações (2.15) e (2.16), respectivamente.

$$V_p = \frac{m_{wc} - m_{dc}}{\rho_f} \quad (2.15)$$

$$V_t = \frac{m_{dc}}{\rho_s} \quad (2.16)$$

sendo ρ_f e ρ_s , respectivamente, a massa específica do filtrado [g/cm^3] e do material sólido depositado [g/cm^3]. É importante denotar que a massa específica do fluido de perfuração não é a mesma do filtrado, porém experimentos realizados por Dewan e Chenevert (2001) indicam que utilizar a massa específica do líquido recolhido após o teste é uma aproximação válida. Não obstante, quando mais de um aditivo particulado for utilizado simultaneamente, é necessário utilizar uma massa específica equivalente para os sólidos.

Desta maneira, as Equações (2.15) e (2.16) podem ser substituídas na Equação (2.1) para obtenção da Equação (2.17), que fornece a porosidade em função das massas específicas do filtrado e do LCM e das massas úmida e seca do reboco.

$$\phi_c = \frac{\alpha}{\alpha + \frac{\rho_f}{\rho_s}} \quad (2.17)$$

sendo ϕ_c a porosidade do reboco e α a diferença percentual entre a massa úmida e seca do reboco, calculado com a Equação (2.18), criado para simplificar a escrita da Equação (2.17).

$$\alpha = \frac{m_{wc}}{m_{dc}} - 1 \quad (2.18)$$

Elkatatny e Nasr-El-Din (2012) utilizaram uma metodologia semelhante aplicada à medições realizadas com um tomógrafo para o cálculo da porosidade.

De maneira semelhante à medição da porosidade, a obtenção direta da permeabilidade do reboco é, em muitas ocasiões, impossível, sendo necessária a utilização de modelos para prever as propriedades permo-porosas da torta. Com este objetivo, Bourgoyne et al. (1991), em um estudo experimental, desenvolveram uma relação entre o volume de filtrado e a raiz quadrada do tempo de filtração, considerando

a dependência dos parâmetros de filtração como pressão e fração volumétrica de sólidos.

Dewan e Chenevert (2001) aplicaram a lei de Darcy para a queda de pressão através do reboco e calcularam a permeabilidade utilizando a Equação (2.19).

$$K_{mc} = 14700 \frac{q T_{mc} \mu_f}{P_{mc}} \quad (2.19)$$

sendo K_{mc} a permeabilidade do reboco [md], q a taxa de filtração [cm/s], T_{mc} a espessura da torta [cm], μ_f a viscosidade absoluta do filtrado [cP] e P_{mc} a queda de pressão ao longo da camada depositada [psi].

Os autores também desenvolveram uma expressão para calcular a espessura do reboco formado em função dos parâmetros de filtração, apresentada na Equação (2.20)

$$T_{mc} = \frac{m_{dc}}{A(1-\phi_c)\rho_s} \quad (2.20)$$

Li et. al. (2005) desenvolveram uma nova metodologia para estimar a permeabilidade do reboco, considerando que a queda de pressão total [Pa] é a soma das quedas de pressão no elemento filtrante (Δp_f) e no reboco (Δp_{mc}), como indicado na Figura 2.4 e Equação (2.21).

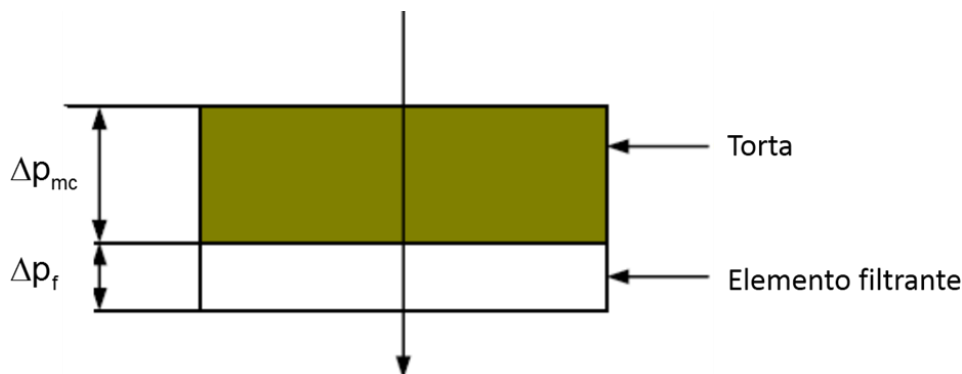


Figura 2.4 – Representação ilustrativa do sistema elemento filtrante e reboco utilizado por Li. Adaptado de Li et. al. (2005).

$$\Delta p_t = \Delta p_{mc} + \Delta p_f \quad (2.21)$$

Tendo em vista que ambos os elementos estão sujeitos à mesma vazão, a lei de Darcy é aplicada para cada componente e a queda de pressão ao longo da membrana filtrante é obtida com a Equação (2.22).

$$q = 100K_f \frac{\Delta p_f}{\mu L_f} \quad (2.22)$$

sendo q a taxa de filtração [cm/s], obtida a partir da inclinação da curva de volume por tempo, K_f a permeabilidade da membrana filtrante [m²], que pode ser calculada pela lei de Darcy utilizando dados de um experimento em que o fluido de trabalho não apresenta sólidos, μ a viscosidade absoluta da solução [Pa.s] e L_f a espessura do elemento filtrante [m].

O gradiente de pressão total é um parâmetro controlado do processo, então com o conhecimento de Δp_f obtém-se Δp_{mc} através da Equação (2.22) e a permeabilidade do reboco, K_r [m²], é então calculada com a Equação (2.23).

$$q = 100K_r \frac{\Delta p_{mc}}{\mu L_{mc}} \quad (2.23)$$

sendo L_{mc} a espessura do reboco [m] mensurada após o experimento de filtração.

A presente revisão destaca que a eficiência de filtração é analisada pelo volume de filtrado e pelos parâmetros do reboco, mais especificamente a espessura e o aspecto visual. Tratamentos adicionais podem ser realizados de maneira a estimar a porosidade e permeabilidade da camada de partículas depositadas em função dos parâmetros do reboco. Uma discussão mais aprofundada dos parâmetros de análise utilizados neste trabalho é efetuada na Seção 3.5.

2.6 Síntese

A revisão bibliográfica denota a complexidade em compreender o fenômeno de formação de reboco e a dificuldade em isolar a influência dos parâmetros do processo e propriedades dos constituintes. Apesar da existência de controvérsias nas discussões a respeito de aspectos específicos, os autores citados têm consenso sobre as conclusões listadas abaixo.

- A adição de goma xantana em água modifica o comportamento reológico do fluido. Para concentrações inferiores a 1% em massa, a solução aparenta ser pseudoplástica, e para concentrações maiores, viscoplástica (Ferraz, 2014; Muller e Davidson, 1994; Whitcomb et al., 1977);
- A adição de CMC em água, com concentração inferior à 2%, resultou em soluções pseudoplásticas (Benchabane e Bekkour, 2008; Ferraz, 2014; Kelessidis et al., 2011);
- Soluções com concentração de carbopol superior a 0,1% apresentam comportamento viscoplástico (Costa, 2017; Di Giuseppe et al., 2015);

Os três polímeros mencionados são utilizados neste trabalho, as concentrações são informadas na Seção 3.3.1, o procedimento para formulação dos fluidos não newtonianos na Seção 3.3.3 e a discussão do comportamento reológico na Seção 4.3.

- O processo de filtração estática resulta em um menor volume de filtrado, um reboco mais rígido, mais espesso e menos permeável quando comparado à filtração dinâmica (Ferraz, 2014; Outmans, 1963; Vaussard et al., 1986);
- As práticas recomendadas 13B da API indicam as condições de estudo experimental da filtração estática, porém sugerem poucos parâmetros de análise (i.e., volume de filtrado e espessura do reboco);
- O tipo e concentração de aditivo polimérico influenciam a formação do reboco. Soluções de CMC obtiveram menor volume de filtrado com LCM's de menor granulometria (carbonato de cálcio 0-44 micrometros) enquanto fluidos com goma xantana foram mais eficientes com particulados maiores (carbonato de cálcio 50-100 micrometros) (Ferraz, 2014);
- Formações mais permeáveis facilitam a perda de circulação, resultando numa maior deposição de LCM (Ernst e Hook, 1969; Jiao e Sharma, 1993a);
- O aumento da concentração de LCM do fluido de perfuração favorece a deposição das partículas no substrato poroso, aumentando a espessura do reboco (Ernst e Hook, 1969; Jiao e Sharma, 1992b);

Neste trabalho, são utilizados carbonato de cálcio nas granulometrias de 2 – 44 micrometros e 44 – 106 μm , esferas de vidro (180-300 μm) e um particulado plástico

(250-420 μm) como LCM's. Maiores detalhes dos materiais são fornecidos na Seção 3.3.2.

- A revisão revelou uma interação significativa da granulometria das partículas, do tamanho de poros da formação e da natureza dos aditivos poliméricos, dificultando determinar a influência individual de cada elemento no processo de formação de reboco;

Modelos matemáticos e metodologias experimentais, normalmente derivados da lei de Darcy, foram propostos para avaliar as propriedades do reboco formado e a eficiência de filtração.

Neste estudo, a análise do processo de filtração é realizada através da obtenção de parâmetros do filtrado (volume e curva de escoamento) e do reboco (massa úmida, massa seca e espessura). Não obstante, a espessura também é estimada pela Equação (2.20), proposta por Dewan e Chenevert (2001).

$$T_{mc} = \frac{m_{dc}}{A_{ef} (1 - \phi_c) \rho_s} \quad (2.20)$$

Uma discussão mais aprofundada das variáveis resposta e métodos de obtenção/medição utilizados neste trabalho é apresentado na Seção 3.5.

2.7 Objetivos específicos

Com base nos objetivos gerais (Seção 1.2), definidos em função da caracterização do problema, assim como na síntese realizada na Seção 2.6, referente à revisão bibliográfica sobre os processos de filtração e formação de reboco, pode-se destacar alguns objetivos específicos para o presente trabalho.

1. Caracterizar o aparato de filtração estática API (Seção 3.1);
2. Desenvolver um procedimento experimental para os ensaios de filtração (Seção 3.2);
3. Definir as concentrações dos polímeros (GX, CMC e CBP) e LCM's (carbonato de cálcio, esferas de vidro e particulado plástico) utilizados (Seção 3.3);
4. Desenvolver um procedimento para o preparo dos fluidos não newtonianos e para a adição do LCM (Seção 3.3.3);

5. Desenvolver uma metodologia para obtenção da curva de escoamento das formulações de fluidos não newtonianos (Seção 3.4);
6. Identificar as variáveis resposta utilizadas e descrever as metodologias de medição/obtenção (Seção 3.5);
7. Estimar a permeabilidade dos elementos filtrantes (Seção 4.1);
8. Obter o tempo de secagem ideal para os rebocos (Seção 4.2);
9. Caracterizar o comportamento reológico das formulações não newtonianas, ajuste das equações de lei de potência e Herschel-Bulkley aos dados experimentais (Seção 4.3);
10. Verificar a granulometria informada para os LCM's (Seção 4.4);
11. Confeccionar um quadro de ensaios experimentais, contemplando a variação dos parâmetros de interesse (Seção 4.5);
12. Com relação à formação do reboco, avaliar a influência dos seguintes fatores: elemento filtrante (Seção 4.6), aditivo polimérico (Seção 4.7), concentração de LCM (Seção 4.8), tipo de LCM (Seção 4.9), da filtração na reologia do filtrado (Seções 4.6 a 4.9).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, inicialmente será apresentado o aparato de filtração API, destacando as características dos componentes e acessórios utilizados. Na sequência o procedimento operacional para os ensaios experimentais é descrito, seguido dos aditivos poliméricos, materiais particulados e parâmetros para a realização dos testes experimentais de formação de reboco particulado.

Ainda neste capítulo, os procedimentos para a formulação dos fluidos não newtonianos, preparo da mistura com os LCM's e obtenção das características dos fluidos (e.g., massa específica, pH, reologia) são apresentados.

Por fim as variáveis-resposta do processo e as metodologias utilizadas para obtenção e medição são apresentadas.

3.1 Aparato de filtração estática API

Os experimentos de filtração são realizados em uma célula API do fabricante OFITE (“OFI Testing Equipment”), sendo a pressurização efetuada por ar comprimido isento de óleo e partículas. O circuito hidráulico com os principais componentes do aparato é apresentado na Figura 3.1.

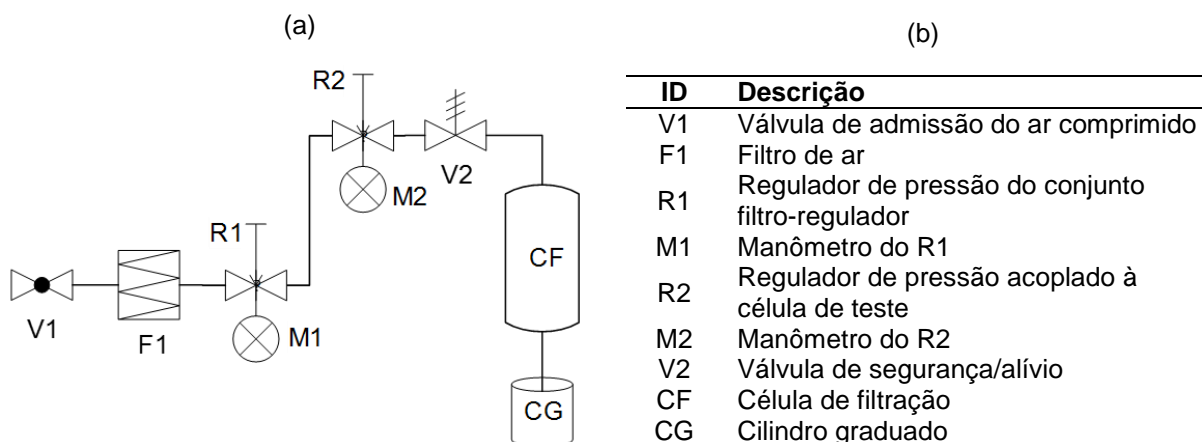


Figura 3.1 – Representação esquemática do circuito hidráulico da célula de filtração API: (a) circuito hidráulico e (b) principais componentes.

A Figura 3.2 apresenta o aparato de filtração API, instalado nas dependências do Laboratório de Meios Porosos (LaMP) do Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) com alguns acessórios utilizados.



Figura 3.2 – Aparato de filtração estática API e acessórios.

O corpo da célula (CC) pode ser de aço ou de acrílico e é um dos componentes da célula de filtração (CF). Na Figura 3.3 (a) está representado o conjunto CF + cilindro graduado para coleta do filtrado (CG) + suporte, e o detalhamento dos componentes da CF é representado na Figura 3.3 (b), com destaque para o papel filtro (PF), a utilização de anéis de vedação de maneira a evitar a fuga de fluido pelas bordas da célula, a presença da tela com granulometria 60 Mesh, responsável por reter partículas maiores que 250 micrometros, evitando a obstrução do tubo de coleta de filtrado.

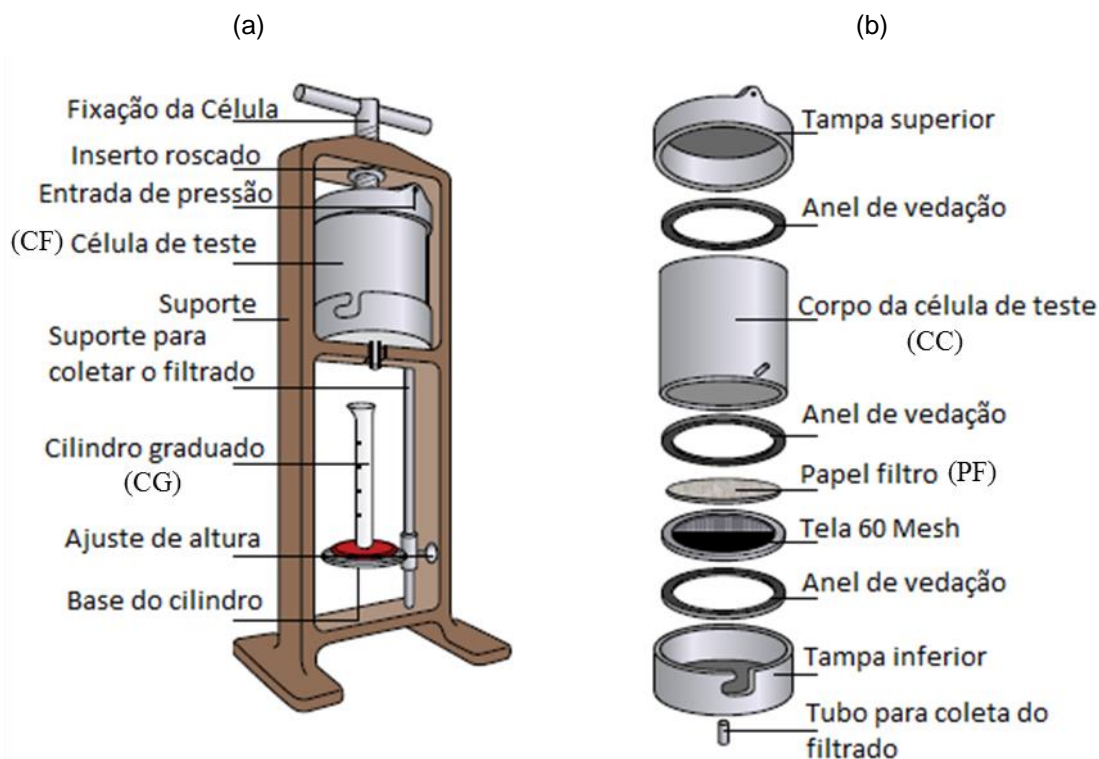


Figura 3.3 – Representação esquemática do: (a) conjunto filtro prensa (CF, CG e suporte) e (b) principais componentes da célula de filtração (CF). Adaptado de OFITE (2016).

São utilizados três tipos de filtros de papel (PF) comerciais com nove cm de diâmetro e área de filtração efetiva de 45,80 cm², apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Modelos de PF utilizados.

PF	Fabricante	Característica	Tamanho de poro [μm]
40	Whatman	Papel filtro celulósico de filtração lenta	2,5
42	Whatman	Papel filtro celulósico de filtração média	8
50	OFITE	Papel filtro celulósico de filtração lenta	2,7

A Tabela 3.2 apresenta as características geométricas e físicas de cada PF, sendo que o diâmetro e a espessura são informados pelo fabricante e as massas do filtro seco e saturado com água são aferidas em uma balança semianalítica (B2). Esta balança, localizada nas dependências do Laboratório de Reometria (LabReo) da UTFPR, será

apresentada concomitantemente com a balança B1, utilizada em conjunto com o aparato de filtração. Para cada PF, os valores de massa foram medidos em triplicata e são apresentados como a média aritmética dos resultados.

Tabela 3.2 - Características dos elementos filtrantes.

PF	Diâmetro [cm]	Área de filtração efetiva - A_{ef} [cm ²]	Espessura [μ m]	Massa seca [g]	Massa úmida [g]
40			210	0,61	2,00
42	9	45,80	200	0,62	1,77
50			121	0,59	1,55

A área de filtração efetiva (A_{ef}), também informada pelo fabricante, é obtida considerando que o PF não é utilizado integralmente, pois uma parcela do PF fica alojada sob o anel de vedação, conforme ilustrado pela Figura 3.4, não participando da filtração. Este dado foi verificado e um diâmetro efetivo de 7,6 cm foi obtido.



Figura 3.4 – Montagem do papel filtro (PF) na base da célula de filtração (CF), representando a área efetiva de filtração (A_{ef}).

O conjunto filtro e regulador (F1, R1 e M1), apresentado na Figura 3.5, tem como função filtrar o ar comprimido, proveniente de um compressor, para garantir a isenção de partículas sólidas, gotas de água e óleo, além de regular a pressão, suportando magnitudes de até 150 psi.

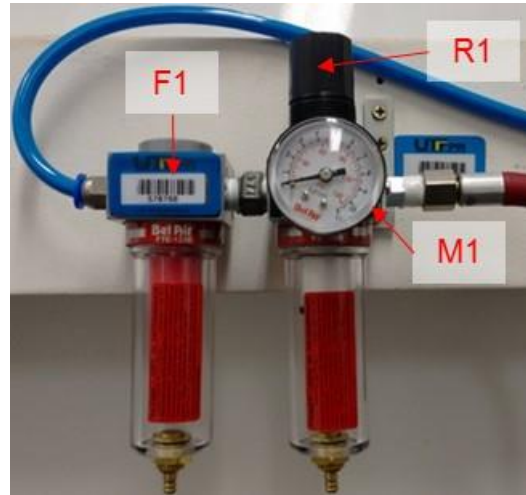


Figura 3.5 – Filtro (F1), regulador (R1) e manômetro (M1) de ar comprimido.

Um segundo estágio de regulação da pressão é realizado na entrada da célula de filtração (CF), que também é equipada com uma válvula de alívio (V2), utilizada para despressurizar o sistema e evitar uma sobrepressão na CF. A Figura 3.6 apresenta o conjunto regulador (R2), manômetro (M2) e válvula de segurança (V2) na forma de: (a) diagrama e (b) ilustração.

Neste estudo são utilizadas duas balanças (B1 e B2) e dois agitadores (A1 e A2). A primeira balança (B1), apresentada em conjunto com o aparato de filtração API na Figura 3.2, possui precisão de um grama e é empregada na medição da massa de LCM adicionada ao fluido não newtoniano. Todas as outras medições de massa neste estudo (massa de filtrado, de polímero e dos rebocos) são efetuadas na balança B2, com precisão de 1 centésimo de grama (0,01 g). A Figura 3.7 apresenta ambas as balanças, sendo: (a) B1 e (b) B2.

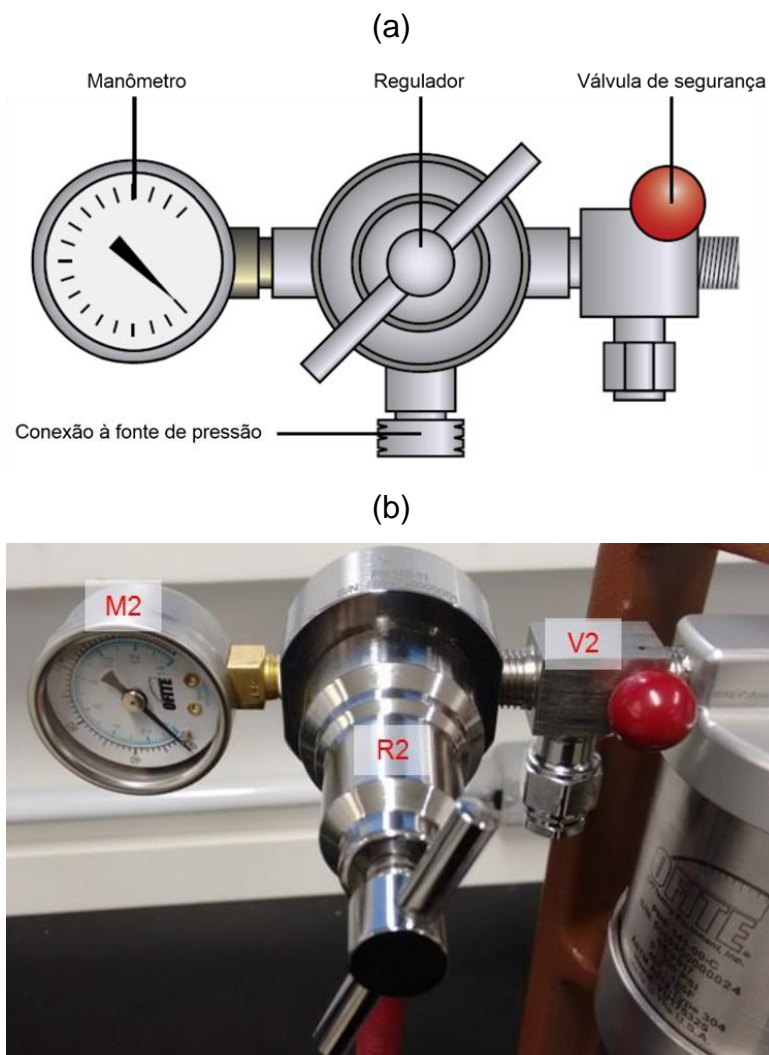


Figura 3.6 – Conjunto regulador (R2), manômetro (M2) e válvula de alívio (V2) instalados na entrada da CF: (a) diagrama esquemático e (b) ilustração. Adaptado de OFITE (2016).



Figura 3.7 – Balanças utilizadas para os experimentos de filtração: (a) B1 e (b) B2.

O agitador mecânico A1 é utilizado na adição de LCM ao fluido não newtoniano e para manter a mistura sob agitação até o instante do teste de filtração, enquanto o agitador A2, magnético, é empregado na diluição dos polímeros em água e na agitação antes dos testes reométricos. Ambos os agitadores são apresentados na Seção 3.3.3.

3.2 Procedimentos experimentais do ensaio de filtração

Esta seção é destinada a detalhar o procedimento experimental para a correta operação do aparato de filtração API. A Figura 3.8 apresenta um diagrama contemplando as etapas necessárias para a execução e análise dos experimentos. Inicialmente, um procedimento para preparo de amostras é apresentado na Seção 3.3.

O procedimento operacional para os ensaios de filtração é descrito nesta seção. Conforme ilustrado na Figura 3.8, a filtração apresenta duas parcelas como saída: o reboco, formado pela retenção do material particulado e o filtrado, volume de fluido coletado na saída da CF. Os parâmetros e procedimentos para análise destas duas saídas são apresentados na Seção 3.5.

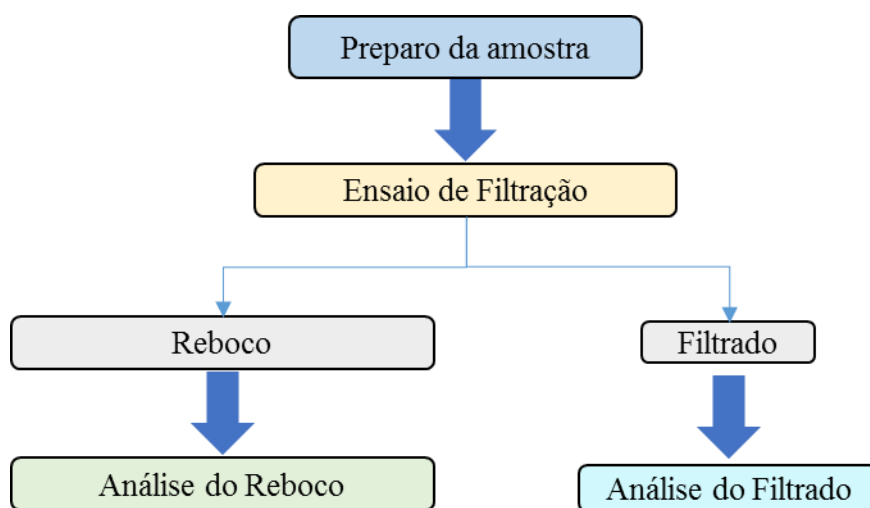


Figura 3.8 – Diagrama generalizado das etapas experimentais.

O procedimento operacional para os ensaios de filtração é apresentado detalhadamente na Tabela 3.3 e resumido em formato de diagrama na Figura 3.9.

Tabela 3.3 – Procedimento operacional para os ensaios de filtração.

Etapa 1	Certificar-se de que o sistema está despressurizado (Válvula V1 fechada e leituras nos manômetros M1 e M2 nulas).
Etapa 2	Caso o sistema esteja pressurizado, despressurizar abrindo a válvula de segurança V2 (Pino vermelho puxado) e rotacionando o regulador R2 no sentido horário até que os manômetros indiquem pressão nula. Retornar o regulador R2 à posição inicial.
Etapa 3	Inserir o papel filtro na base da CF, cobri-lo com um anel de vedação e encaixar o corpo na base. Fixar o conjunto no suporte e posicionar um recipiente para a coleta de filtrado na saída do aparato.
Etapa 4	Colocar o fluido de teste na célula, posicionar a tampa superior e utilizar a haste em T para fixar a tampa. Verificar se a válvula V2 não está em contato com o suporte. Em caso positivo, reposicionar a tampa.
Etapa 5	Abrir a válvula V1 e regular a pressão no filtro rotacionando R1 (sentido anti-horário restringe a pressão). A pressão de M1 deve ser levemente superior à pressão desejada.
Etapa 6	Fechar a válvula V2 (Pino vermelho empurrado) e aplicar a pressão à célula de teste rotacionando R2 no sentido horário até que a pressão lida em M2 seja a desejada.
Etapa 7	Após o término do experimento, fechar a válvula V1 e despressurizar o sistema como indicado na Etapa 2.
Etapa 8	Cuidadosamente retirar a tampa superior e remover qualquer fluido restante na CF. Desacoplar o corpo da célula da base e remover o reboco formado.
Etapa 9	Lavar a CF e preparar o equipamento para um novo experimento.
Etapa 10	Procedimento de análise do reboco e do filtrado

As orientações descritas na Tabela 3.3 foram desenvolvidas considerando as recomendações do fabricante e necessidades verificadas durante a operação do aparato.

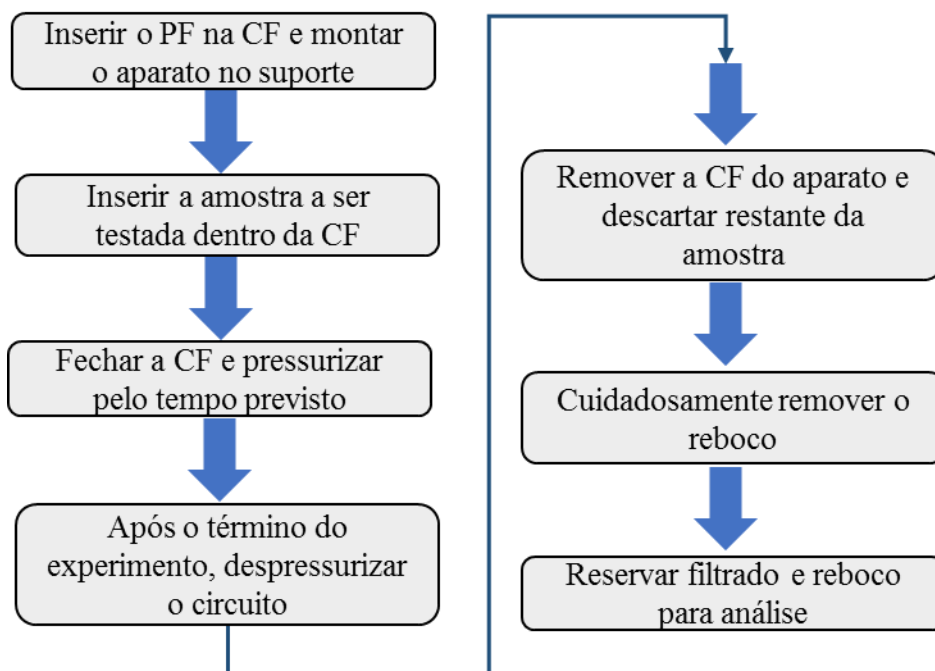


Figura 3.9 – Diagrama operacional resumido dos ensaios de filtração.

3.3 Parâmetros experimentais

Para avaliar o processo de formação de reboco particulado com fluidos não newtonianos são necessárias duas etapas de formulação distintas. A primeira consiste na dissolução de aditivos poliméricos em água, que atuam como modificadores reológicos. Na segunda formulação são adicionados os materiais de perda de circulação, LCM (aditivos particulados), em conjunto com a solução polimérica preparada na primeira etapa.

Com essa mistura, i.e., solução polimérica em conjunto com LCM, é possível observar a formação do reboco, que conforme a revisão bibliográfica pode apresentar diferentes aspectos morfológicos (e.g., consolidado, pastoso, liso, rugoso).

3.3.1 Aditivo polimérico

Com base na revisão bibliográfica, o presente trabalho irá utilizar três aditivos poliméricos em pó, Goma Xantana (GX), Carboximetilcelulose (CMC) e Carbopol (CBP). Na Tabela 3.4 são resumidas as principais características de cada um destes polímeros.

Tabela 3.4 – Características dos aditivos poliméricos utilizados na formulação dos fluidos não newtonianos. Fonte: Brandrup et al. (1999).

Polímero	ID	Obtenção	Aplicação
Carboximetil-celulose	CMC	Polímero aniônico derivado da celulose.	Viscosificantes e espessantes gerais, material auxiliar em processos de filtração.
Goma xantana	GX	Polímero natural aniônico obtido pela fermentação.	Espessante e viscosificante nas indústrias farmacêutica e petrolífera
Carbopol	CBP	Polímero hidrossolúvel com ação espessante e formação de gel.	Indústria de cosméticos – produtos em gel

A concentração do aditivo polimérico (C_p), definida como a razão entre a massa de polímero e o volume de fluido, também é avaliada e pode ser calculada através da Equação (3.1).

$$C_p = \frac{m_p}{V_F} \quad (3.1)$$

sendo C_p a concentração do polímero [g/cm^3], m_p a massa do aditivo polimérico [g] e, V_F o volume de fluido [cm^3].

Duas concentrações de material polimérico são utilizadas para todos os aditivos: 1,05 e 2,10 libras por barril, unidade comumente utilizada na indústria petrolífera (Calçada et al., 2010; Martins et al., 2003; SPE, 1984). Uma concentração inferior é utilizada para o CMC e outra superior para o carbopol. As concentrações de aditivos poliméricos, utilizadas nas formulações dos fluidos, são apresentadas na Tabela 3.5, assim como a respectiva massa de polímero, adicionada em 500 cm^3 de água, necessária para a preparação das amostras. O procedimento de formulação da solução polimérica é apresentado na Seção 3.3.3.

Tabela 3.5 – Concentração e massa dos aditivos poliméricos.

C_p em unidade operacional [lb/bbl]	C_p [g/cm^3]	Massa de polímero para 500 cm^3 de água [g]
0,525	0,0015	0,75
1,050	0,0030	1,50
2,100	0,0060	3,00
4,200	0,0120	6,00

Dentre os três aditivos apresentados, o CMC foi definido como padrão para os experimentos com objetivo de avaliar a influência do elemento filtrante e dos materiais particulados (LCM). Neste contexto, a concentração de $0,003 \text{ g}/\text{cm}^3$ foi padronizada para os experimentos que não contemplam a variação da concentração do polímero adicionado e os aditivos CMC e CBP foram utilizados para verificar a influência de C_p no combate à perda de circulação.

Ressalta-se que a massa de polímero a ser adicionada influencia consideravelmente o comportamento da solução final e que imprecisões no momento de mensurar esta massa podem alterar o comportamento da formulação. Portanto, a balança semianalítica B2 foi utilizada para mensurar a quantidade de polímero.

3.3.2 Aditivo particulado (LCM)

De maneira a avaliar como a granulometria e a concentração do material particulado influenciam na formação do reboco, são utilizadas partículas de três materiais

diferentes (carbonato de cálcio - CaCO_3 , vidro - MEV e abrasivo plástico de urea - APU) em quatro granulometrias (I-IV), apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Características dos aditivos particulados utilizados como aditivos para perda de circulação (LCM).

Particulado	Material	ID	Distribuição granulométrica informada [μm]	ρ_s informada [g/cm^3]
I.1	CaCO_3 fino comercial	CaCO_3 FC	2 - 44	2,65
I.2	CaCO_3 fino operacional	CaCO_3 FO		
II	CaCO_3 médio operacional	CaCO_3 MO	44 - 106	2,65
III	Microesferas de vidro	MEV	180 - 300	2,50
IV	Abrasivo plástico	APU	250 - 420	1,50

Semelhante ao que foi efetuado para o aditivo polimérico, uma sigla de identificação foi atribuída à cada LCM: os três carbonatos são referenciados como CaCO_3 seguido pela terminação FC, FO e MO, que significam, respectivamente, fino comercial, fino operacional e médio operacional.

Para o particulado I, que representa o carbonato de cálcio fino, existem duas variantes do material. A primeira adquirida de forma comercial (CaCO_3 FC), através de um fornecedor de materiais químicos e a segunda fornecida pela empresa Petrobras, denominada neste trabalho como operacional (CaCO_3 FO). Ressalta-se ainda que o CaCO_3 FC é utilizado como padrão para os experimentos de filtração devido à aplicação deste material no combate a perda de circulação e à quantidade disponível do particulado I.1.

Para o carbonato de cálcio existe uma segunda granulometria, denominada como média operacional (CaCO_3 MO – particulado II), para efeitos de comparação do mesmo material. As microesferas de vidro, particulado III (MEV), são partículas transparentes de sílica com alta esfericidade, enquanto o abrasivo plástico, particulado IV ou APU, é um composto de urea altamente irregular e opaco, sendo ambos usualmente empregados em processos de jateamento e são utilizados nos experimentos de maneira a investigar a influência de diferentes granulometrias no processo de filtração. Uma comparação visual dos cinco tipos de particulados é apresentada na Figura 3.10.

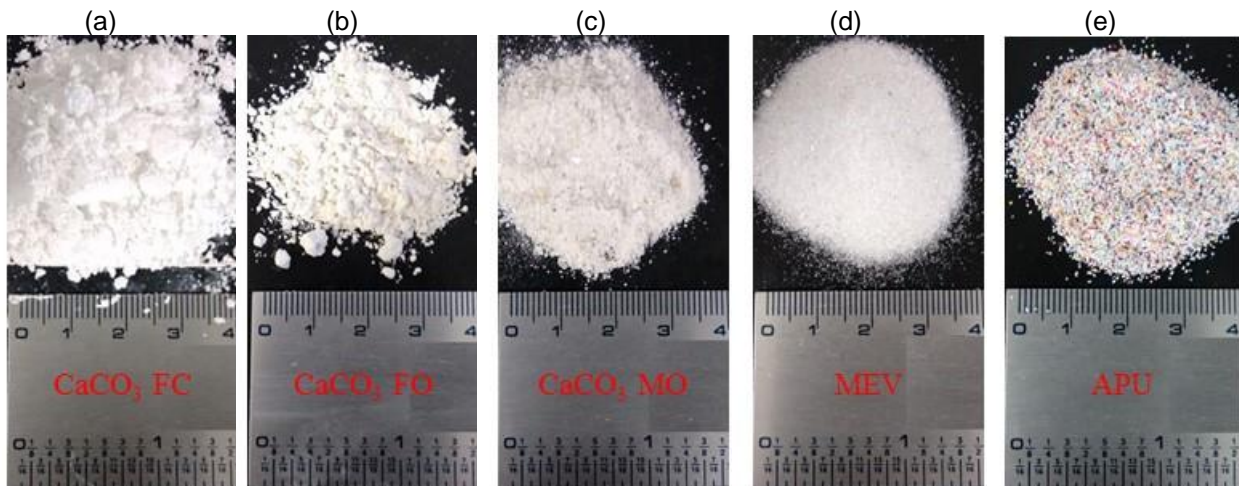


Figura 3.10 – Partículas utilizadas nos experimentos como LCMs: (a) Carbonato de cálcio fino comercial (CaCO_3 FC), (b) Carbonato de cálcio fino operacional (CaCO_3 FO), (c) Carbonato de cálcio médio operacional (CaCO_3 MO), (d) Microesferas de vidro (MEV) e (e) abrasivo plástico de urea (APU).

Conforme mencionado anteriormente, o CaCO_3 FC é definido como padrão para os experimentos. Não obstante, testes de filtração comparando o desempenho do material comercial com o operacional são previstos (Seção 4.4).

Outro parâmetro de variação do LCM é a concentração de sólidos, obtida através da Equação (3.2).

$$C_s = \frac{m_s}{V_F} \quad (3.2)$$

sendo C_s a concentração de sólidos [g/cm^3], m_s a massa do aditivo particulado [g] e V_F o volume de fluido [cm^3].

No presente trabalho são propostas cinco concentrações para o aditivo particulado. Estes valores são apresentados na Tabela 3.7, que também informa a massa de LCM adicionada à 500 cm^3 de água, volume definido para a preparação das amostras de ensaio.

Tabela 3.7 – Concentração e massa dos aditivos particulados.

C_s [g/cm^3]	Massa de particulado em 500 cm^3 de água [g]
0,10	50
0,15	75
0,20	100
0,30	150
0,40	200

Neste contexto, a concentração de LCM é o único parâmetro com 2 padrões para os experimentos. O primeiro padrão utiliza uma concentração de $0,20 \text{ g/cm}^3$, definida como referência, para os experimentos. Contudo, para experimentos contemplando a utilização simultânea de mais de um LCM, utiliza-se o padrão de $0,30 \text{ g/cm}^3$, de maneira a limitar a massa mínima de cada particulado na mistura em 50 g. Maiores detalhes dos experimentos são fornecidos na Seção 4.5.

3.3.3 Formulação dos fluidos e preparo das misturas

Esta seção descreve o procedimento empregado no preparo das amostras de teste, dividido em duas etapas. A primeira consiste na dissolução de um aditivo polimérico em água, denominada neste trabalho de formulação, com o objetivo de conceder comportamento não newtoniano e a segunda etapa é a mistura do fluido formulado com os aditivos particulados (LCM). Neste sentido, este trabalho utiliza as denominações de fluido para a solução polimérica formulada (etapa 1) e de mistura para a suspensão de LCM na formulação (etapa 2).

O procedimento de formulação do fluido tem início com a inserção de 500 cm^3 de água num recipiente cilíndrico. A balança semianalítica B2 é utilizada para mensurar a massa de polímero a ser adicionada, num recipiente secundário.

Na sequência, o recipiente com água é colocado sobre um agitador magnético com controle de rotação entre 10 e 1500 rotações por minuto (rpm). Neste contexto, uma rotação de 500 rpm é imposta à água e então, o polímero contido no segundo recipiente é adicionado aos poucos. Com a gradativa dissolução do aditivo polimérico, a rotação imposta é elevada até o máximo, e fixada neste limite até a completa dissolução, que pode variar entre 40 e 240 minutos. A Figura 3.11 apresenta o recipiente cilíndrico sobre o agitador magnético, sendo (a) a mistura sob agitação momentos após a adição do polímero e (b) momento quando o polímero está quase completamente dissolvido.

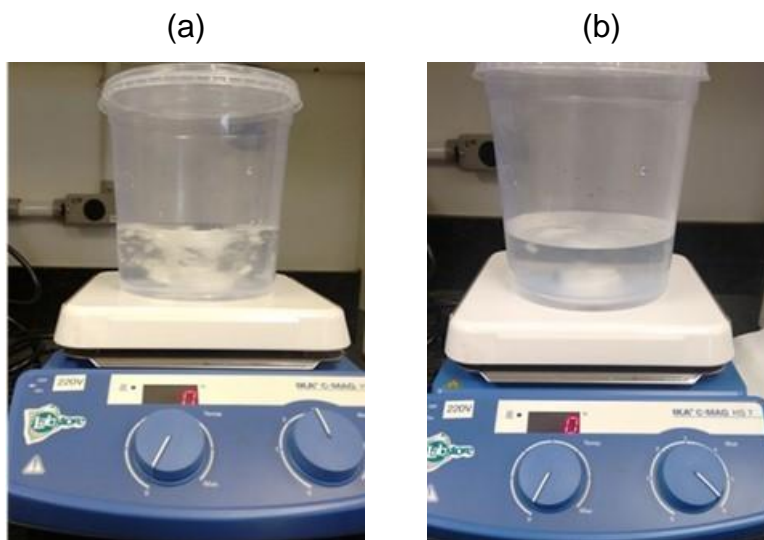


Figura 3.11 – Recipiente cilíndrico utilizado para a preparação das amostras sobre o agitador magnético: (a) instante de tempo pouco após adição do polímero e (b) instante de tempo com dissolução quase completa.

Após a homogeneização, o fluido não newtoniano formulado é mantido em repouso por 24 horas. Neste momento uma amostra pode ser retirada para análise reométrica. As amostras são definidas como formulações de referência para futura comparação com a reologia do filtrado. O fluido preparado é transferido para um recipiente fechado e levado para análise no LabReo, seguindo o procedimento descrito na Seção 3.4.

Para a preparação da mistura de LCM com o fluido formulado, os aditivos particulados são adicionados de maneira fracionada e a suspensão é mantida sob agitação constante por 10 minutos até a execução do experimento de filtração, por meio do agitador mecânico A1, apresentado na Figura 3.12



Figura 3.12 – Agitador mecânico A1.

O agitador A1 possui intervalo de rotação em vazio de 0 - 1200 rpm e torque máximo de 27 Nm. Para a mistura dos LCM's aos fluidos formulados, uma rotação de aproximadamente 500 rpm foi imposta.

O procedimento de formulação do fluido não newtoniano e do preparo da mistura de LCM's é resumido pelo fluxograma apresentado na Figura 3.13.

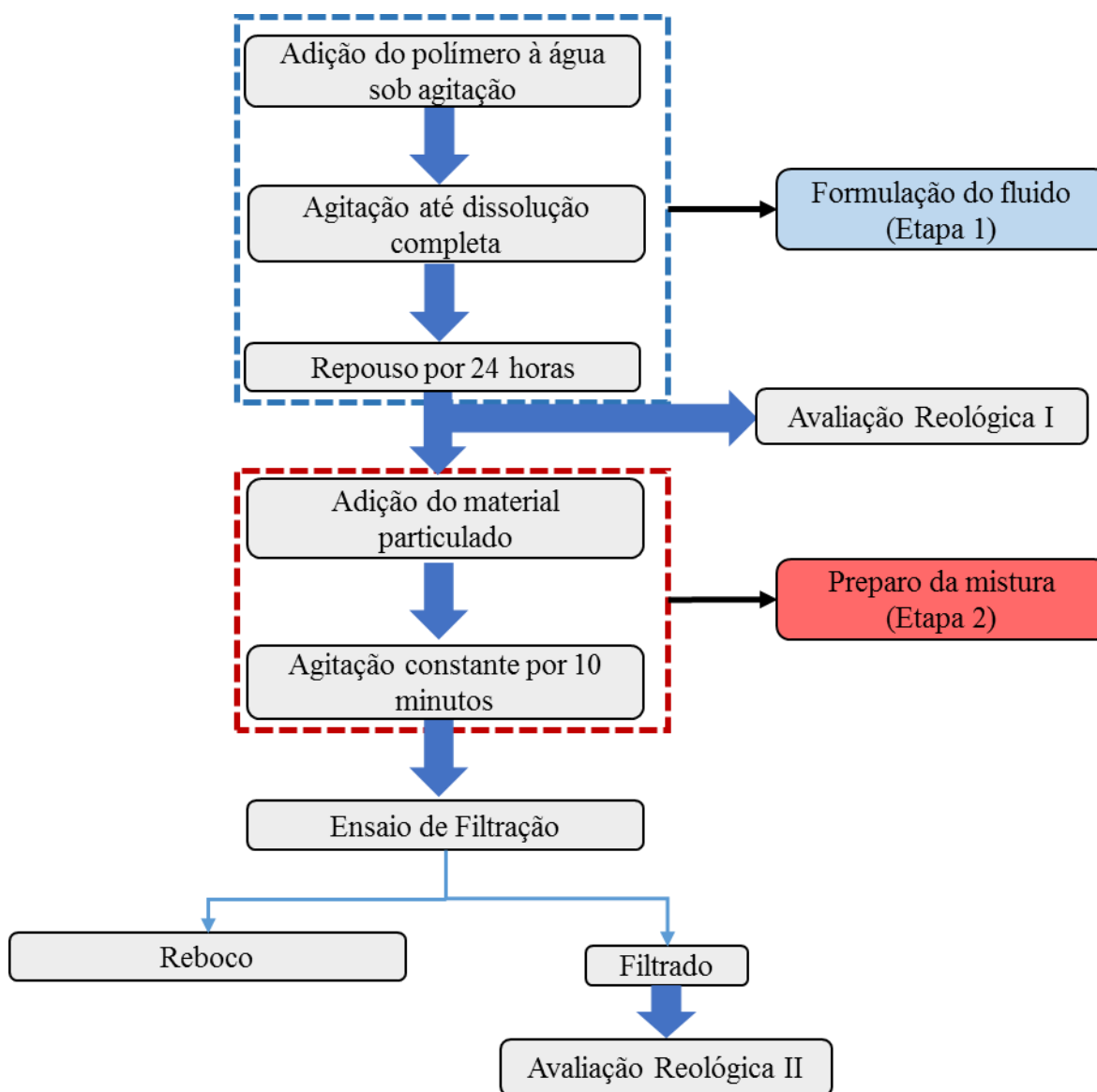


Figura 3.13 – Fluxograma das etapas de formulação do fluido e de preparo da mistura de LCM's.

O fluxograma apresentado lista as etapas utilizadas para a formulação dos fluidos e preparo das misturas com LCM. Após a realização das duas etapas anteriores, é realizado o ensaio de filtração, o qual possui duas saídas: o reboco e o filtrado. O procedimento operacional para os experimentos foi descrito na Seção 3.2 e as variáveis resposta dos experimentos são apresentadas na Seção 3.5. Além disso, o fluxograma estabelece duas avaliações reológicas, sendo a primeira realizada somente para as formulações de referência, e a segunda, efetuada para todos os filtrados. Os detalhes sobre a avaliação reológica de cada etapa são apresentados na Seção 3.4.

É importante salientar que todos os experimentos de filtração são realizados em triplicata, sendo que cada mistura é preparada e testada três vezes. Os resultados são apresentados como a média aritmética e o desvio padrão destes três experimentos. O procedimento dos testes reológicos apresenta algumas diferenças e é explicado na Seção 3.4.

3.4 Massa específica, pH e reologia dos fluidos

Nesta seção, metodologias para a obtenção da massa específica e da curva de viscosidade dos fluidos e filtrados são apresentadas. Adicionalmente, o procedimento para medir o pH das formulações de referência é descrito.

A massa específica do filtrado é aferida com o auxílio de uma balança e um recipiente de vidro com volume fixo denominado picnômetro. As massas do recipiente vazio e preenchido com filtrado são aferidas e a massa específica é obtida com a Equação (3.3).

$$\rho_f = \frac{m_{f+p} - m_{pi}}{V_f} \quad (3.3)$$

sendo ρ_f a massa específica do filtrado [g/cm^3], m_{f+p} o valor indicado pela balança com o recipiente preenchido [g], m_{pi} a massa do picnômetro [g] e V_f o volume da amostra de filtrado [cm^3]. As medições foram realizadas em triplicata para todos os filtrados.

Esta medição também foi realizada para as formulações de referência, porém não foi efetuada para as misturas com LCM.

De maneira a verificar o efeito da adição dos polímeros mencionados na Seção 3.3, a curva de escoamento para os fluidos é obtida. E para fins de comparação, os ensaios reométricos também são realizados para os filtrados.

Inicialmente, os fluidos de referência são formulados de acordo com a etapa 1 do procedimento apresentado na Figura 3.13. Para estas formulações, a curva de escoamento é obtida em um reômetro rotacional e num viscosímetro rotacional Fann 35 A. Desta maneira, os 500 cm³ formulados para cada amostra são separados em dois recipientes fechados, um a ser testado no reômetro e outro no viscosímetro, com o objetivo de comparar as curvas de escoamento obtidas com os dois equipamentos. A Figura 3.14 apresenta os dois equipamentos utilizados na obtenção das curvas de escoamento, sendo: (a) Reômetro rotacional Haake Mars III e (b) viscosímetro rotacional Fann 35A.

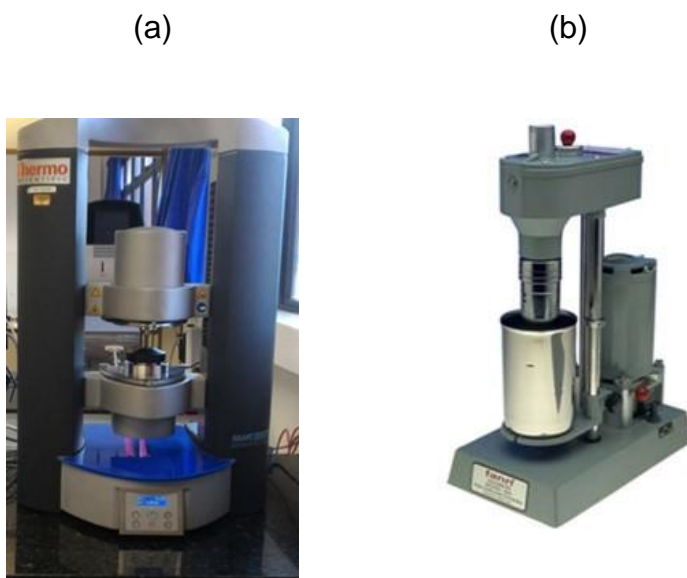


Figura 3.14 – Equipamentos utilizados para obtenção das curvas de escoamento, sendo: (a) Reômetro rotacional Haake Mars III e (b) viscosímetro rotacional Fann 35A.

O procedimento para avaliação reológica é o mesmo para os dois equipamentos, com algumas diferenças na inserção da amostra e no tratamento de dados. Inicialmente, a amostra é homogeneizada por 10 minutos sob rotação de 300 rpm, imposta pelo agitador magnético A2. Após este período, as amostras são inseridas nos equipamentos,

que utilizam a geometria de cilindro concêntricos. O volume de amostra necessária para o teste no Fann (aproximadamente 150 cm³) é superior ao requerido pelo reômetro.

Na sequência, uma taxa de cisalhamento pré definida é imposta ao fluido e a tensão de cisalhamento é obtida. A taxa de cisalhamento é então alterada para um novo patamar e uma nova medição é realizada. Para o reômetro, o controle das taxas impostas é realizado eletronicamente, sendo os parâmetros programados previamente no software do equipamento, que fornece ao final do teste, os valores de taxa de cisalhamento e tensão para todos os patamares.

O viscosímetro Fann impõe uma rotação ao cilindro através de um sistema de engrenagens, que permite somente seis valores de rotação (3, 6, 100, 200, 300 e 600 rpm). A resposta do fluido à taxa de cisalhamento imposta é sentida através do ângulo de deflexão de uma mola. Em sequência, estes valores de rotação e ângulo de deflexão são convertidos em taxa de cisalhamento e tensão, respectivamente, através das Equações (3.4) e (3.5).

$$\tau = \frac{k_1 k_2 \theta}{10} \quad (3.4)$$

$$\dot{\gamma} = k_3 N \quad (3.5)$$

sendo τ a tensão [Pa], θ o ângulo de deflexão [°], N a rotação imposta [rpm] e $\dot{\gamma}$ a taxa de cisalhamento [s⁻¹]. Os parâmetros k_1 , k_2 e k_3 são constantes do equipamento, sendo apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Valores das constantes k_1 , k_2 e k_3 do viscosímetro utilizado.

k_1 [dina.cm/°]	300
k_2 [1/cm ³]	0,01323
k_3 [1/s.rpm]	1,7023

De maneira semelhante ao efetuado para a formulação dos fluidos, um diagrama operacional da análise reológica é apresentado na Figura 3.15. Neste diagrama estão descritos os procedimentos gerais para os dois procedimentos de avaliação reológica. Contudo, para a avaliação do filtrado é necessário atentar para o procedimento de

obtenção da amostra. O volume de filtrado resultante de um único ensaio de filtração é, por muitas vezes, insuficiente para a realização dos testes reológicos. Neste sentido, opta-se por coletar o filtrado para cada um dos três experimentos da triplicata e misturá-los para a obtenção de uma amostra com volume suficiente para a análise reológica. Na Seção 4.3 são apresentados resultados comparando as curvas de viscosidade obtidas para o filtrado de um único teste e para a mistura resultante da triplicata.

Os fluidos formulados são testados tanto no reômetro quanto no viscosímetro de maneira a comparar os desvios entre os dois equipamentos. Estes resultados também são apresentados na Seção 4.3.

Devido à grande quantidade de testes e à necessidade da avaliação reológica no mesmo dia dos ensaios de filtração, de maneira a reduzir efeitos de degradação, opta-se por utilizar o viscosímetro para a avaliação reológica dos filtrados. Situações nas quais, mesmo com a combinação dos três ensaios da triplicata, o volume de amostra de filtrado seja insuficiente para a utilização do viscosímetro podem ocorrer, e, neste caso, a avaliação reológica II será efetuada no reômetro.

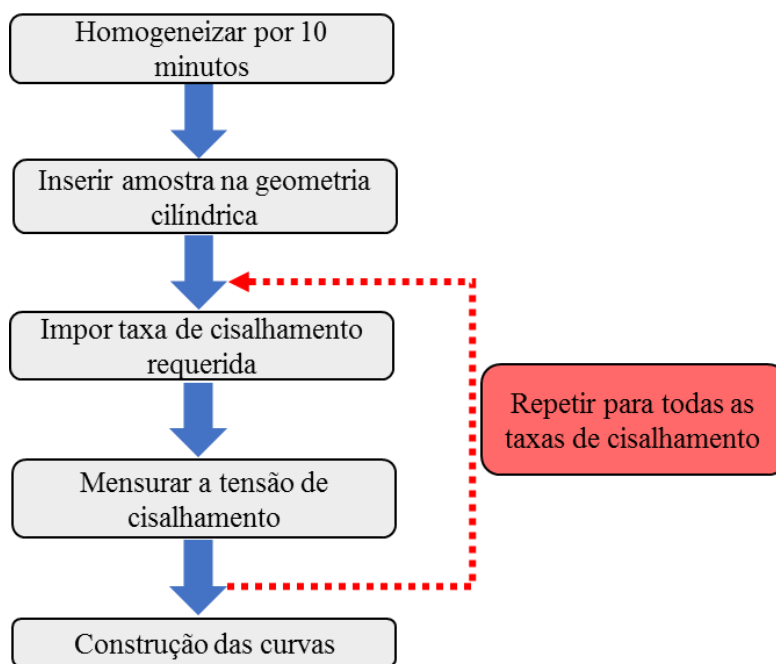


Figura 3.15 – Diagrama operacional para avaliação reológica.

O pH dos fluidos formulados foi mensurado com um pHmetro comercial, apresentado na Figura 3.16. Os resultados de pH para os fluidos formulados são apresentados na Seção 4.3, concomitantemente com as curvas de viscosidade.

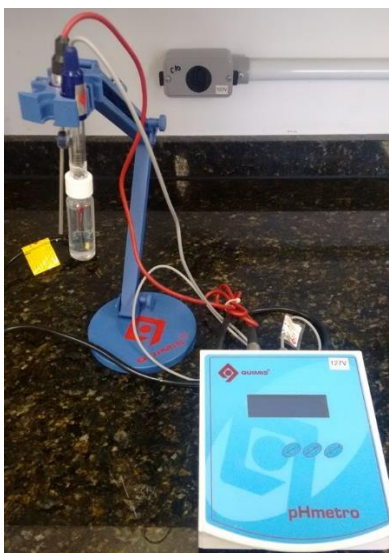


Figura 3.16 – pHmetro comercial utilizado nas medições de pH dos fluidos de referência.

Na sequência deste trabalho, as variáveis resposta, assim como os procedimentos experimentais para análise são apresentados.

3.5 Variáveis resposta

Esta seção é destinada a detalhar as variáveis resposta a serem avaliados neste estudo e as respectivas metodologias de obtenção/medição. A Figura 3.17 apresenta o fluxograma experimental resumindo as principais etapas do processo. Conforme apresentado anteriormente, o ensaio de filtração possui duas saídas: o reboco e o filtrado.

Iniciando a análise pelo filtrado, dois parâmetros são avaliados: a curva de viscosidade, detalhada na seção anterior, e o volume de filtrado. O cilindro graduado (CG) de coleta do filtrado não possui precisão na medida. Desta maneira, o procedimento utilizado para aferir este parâmetro é mensurar a massa de filtrado na balança B2 e converter este valor em volume através da massa específica, estimada de acordo com a metodologia apresentada na Seção 3.4.

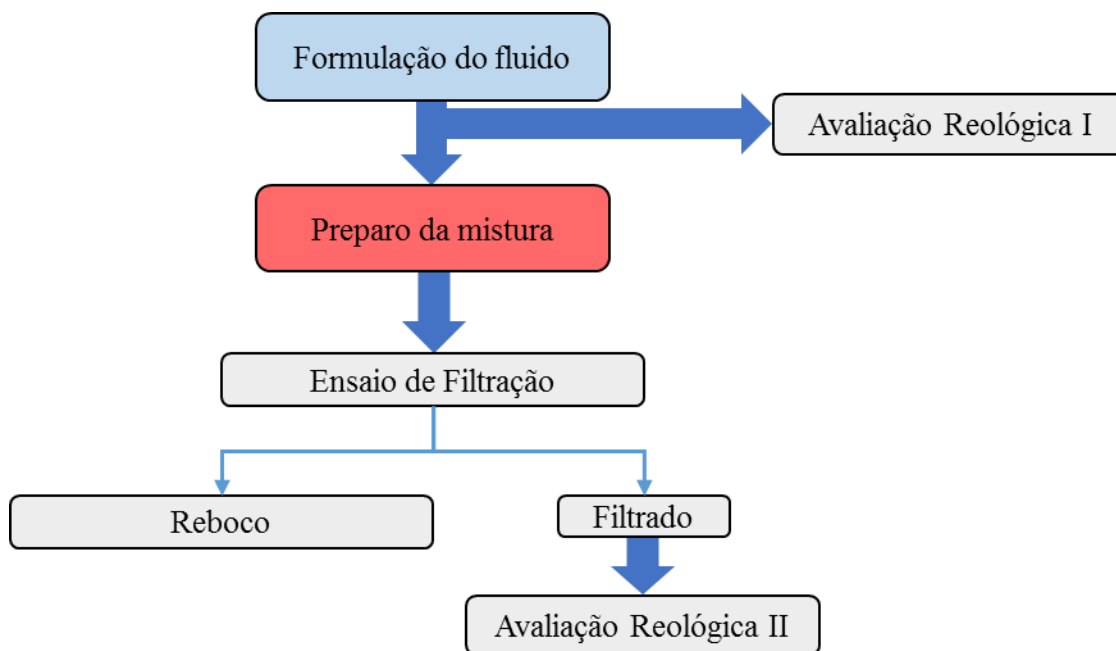


Figura 3.17 – Diagrama operacional resumido.

As práticas recomendadas 13A da API (2014a) indicam a medição da espessura do reboco e a avaliação do aspecto do reboco, classificando-os em consolidados, quando apresentam forma definida, ou pastosos (não consolidados), quando as partículas não formam uma camada bem definida com formato fixo. No presente trabalho, além dos dois parâmetros previamente mencionados, a massa do reboco logo após o ensaio de filtração (massa úmida - m_{wc}) e a massa após um processo de secagem (massa seca - m_{dc}) também são avaliadas.

Ao término do ensaio de filtração, o fluido em excesso é retirado da CF e então o reboco é removido e analisado. Inicialmente, uma investigação visual da torta é realizada de maneira a verificar a consistência da mesma. Nos casos em que as partículas depositadas apresentam formato bem consolidado, o reboco é então submetido à água corrente para remoção das partículas não consolidadas. A Figura 3.18 (a) apresenta um exemplo de um reboco consolidado antes da lavagem, enquanto na Figura 3.18 (b) é exemplificado uma situação na qual a torta formada é não consolidada. Percebe-se que para o caso não consolidado, a camada depositada tende a assentar com o passar do tempo, ultrapassando os limites do meio filtrante.

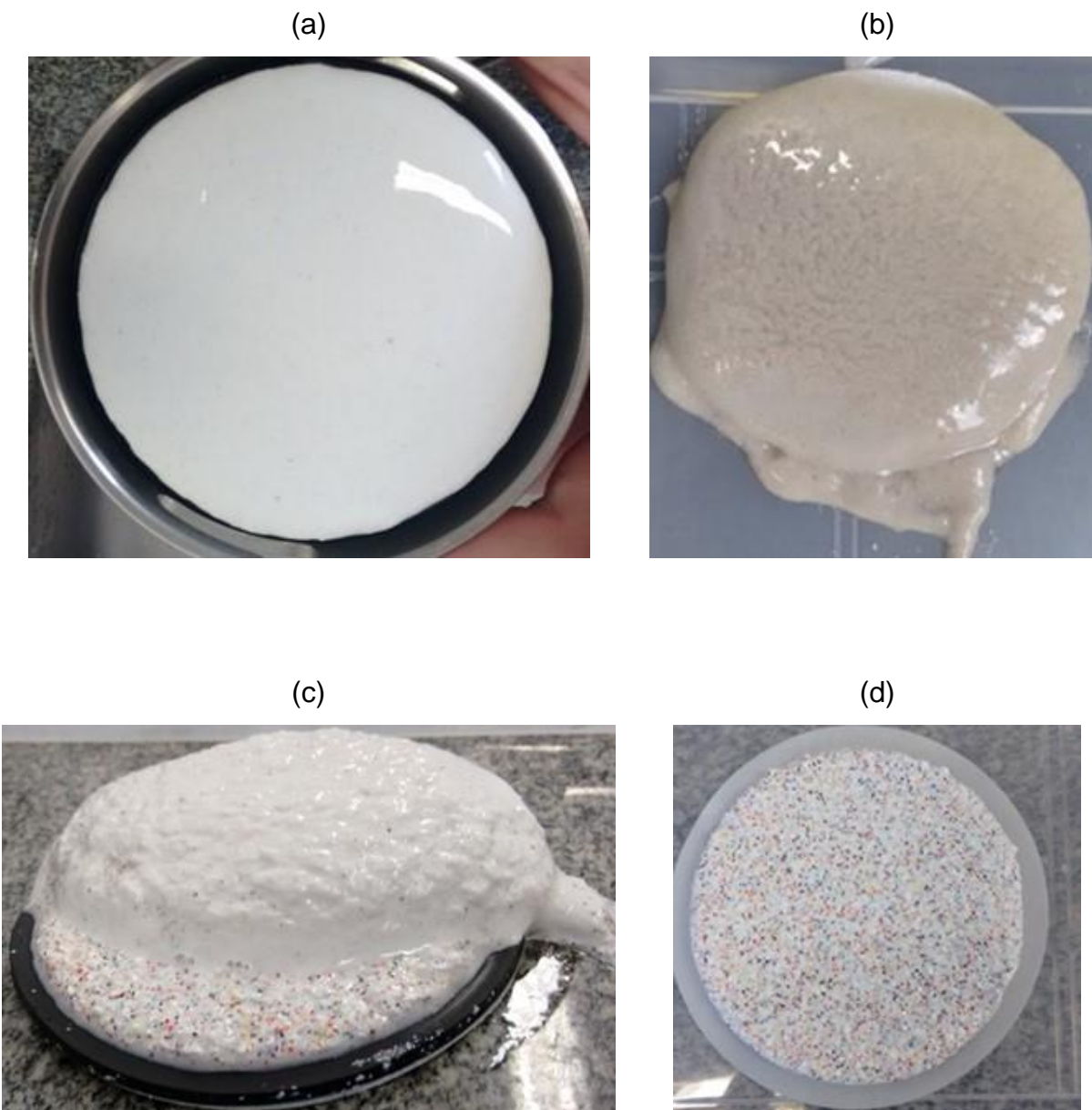


Figura 3.18 – Exemplo de (a) reboco bem consolidado antes da lavagem, (b) reboco não consolidado, (c) remoção de partículas não consolidadas, (d) reboco após o processo de remoção.

A Figura 3.18 (c) registra um exemplo de reboco durante o processo de lavagem, distinguindo-se claramente duas camadas, uma consolidada e outra, consideravelmente mais espessa e não consolidada. Por fim, a Figura 3.18 (d) apresenta um reboco obtido após a remoção das partículas em excesso. Este procedimento de remoção só é recomendado em situações nas quais a torta formada é claramente consolidada, caso

contrário, a água irá carrear todas as partículas, impossibilitando a análise posterior do reboco.

Nos casos em que um reboco não consolidado é formado, o procedimento adotado é diferente. Neste contexto, a Figura 3.19 apresenta tortas não consolidadas formadas pelo processo de filtração de particulados de MEV em diferentes etapas do procedimento. Inicialmente é realizada a remoção da camada depositada da CF, que é então colocada em repouso sobre uma superfície plana, como ilustrado na Figura 3.19 (a). Este repouso, com duração aproximada de 20 horas, tem como função permitir que o particulado se assente e adquira um formato mais estável, situação representada na Figura 3.19 (b). Após este processo, a torta é removida para separar o excesso de material que se acomodou fora do papel filtro, ilustrado na Figura 3.19 (c), tendo como resultado o reboco apresentado na Figura 3.19 (d).

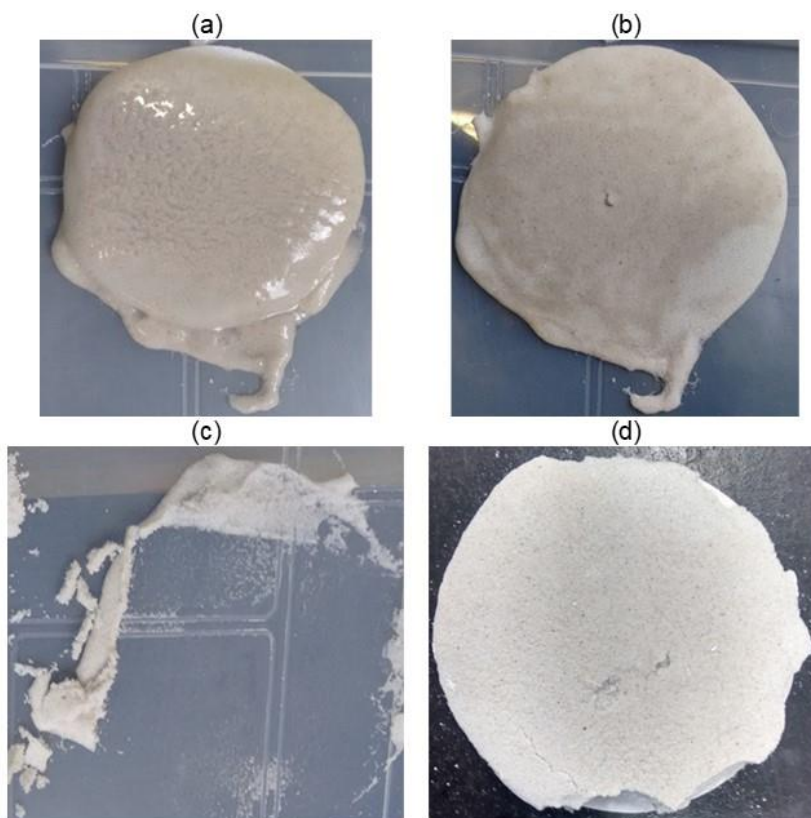


Figura 3.19 - Reboco formado pela configuração D3: (a) minutos após ser retirado da célula de teste, (b) após repouso de aproximadamente 20 horas, (c) resquício do particulado do reboco e (d) após secagem no forno.

Na sequência destes procedimentos, a espessura do reboco é aferida com um paquímetro analógico, conforme exemplificado na Figura 3.20 (a) (medidor de profundidade) e na Figura 3.20 (b) (medição direta), e a balança semianalítica B2 é utilizada para a obtenção da massa úmida (m_{wc}). A próxima etapa do processo é realizar a secagem dos rebocos de maneira a remover a umidade retida nos poros. Este procedimento é realizado num forno convectivo instalado no LabReo, apresentado na Figura 3.21.

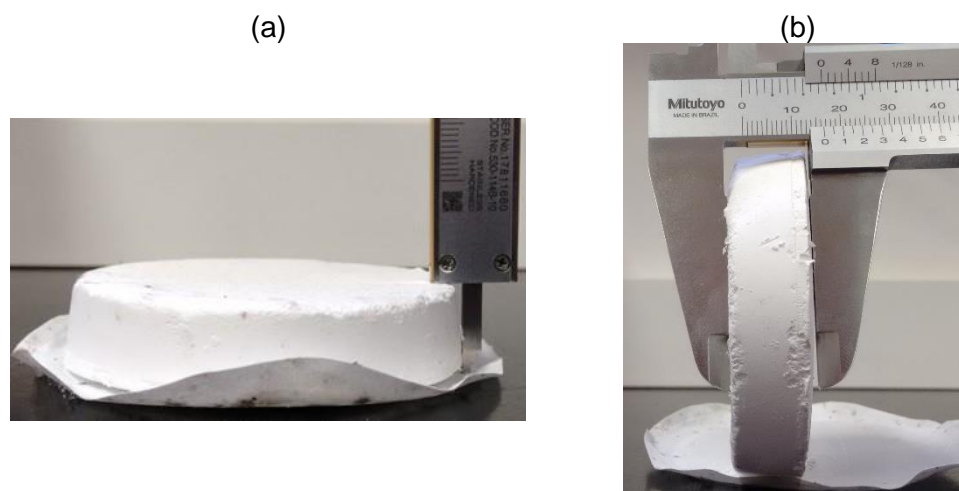


Figura 3.20 – Exemplo de medição da espessura do reboco com paquímetro, sendo medição (a) com medidor de profundidade e (b) direta.



Figura 3.21 – Forno convectivo utilizado para secagem dos rebocos.

Os rebocos são levados ao forno à temperatura de 105 °C, recomendada por Colestino (2010) e Ferraz (2014), contudo não há padronização sobre o tempo de secagem. Neste contexto, Dewan e Chenevert (2001) indicam um procedimento de várias horas, porém não informam o valor utilizado, enquanto outros pesquisadores (Calabrez, 2013; Ferraz, 2014; Martins, 2013) utilizam tempos de 12 ou 24 horas de maneira a garantir que toda a água seja evaporada. Neste contexto, são realizados experimentos preliminares para determinar o tempo de secagem ideal para os rebocos formados neste estudo, apresentados na Seção 4.2.

Após a secagem, a massa seca (m_{dc}) é aferida com a balança B2. O conhecimento de m_{wc} e m_{dc} permite calcular o percentual de água retida por cada reboco e de estimar a espessura do reboco através da Equação (2.20), proposta por Dewan e Chenevert (2001).

$$T_{mc} = \frac{m_{dc}}{A_{ef}(1-\phi_c)\rho_s} \quad (2.20)$$

sendo T_{mc} a espessura estimada do reboco [cm], m_{dc} a massa do reboco seco, A_{ef} a área de filtração [cm²], ϕ_c a porosidade do reboco calculada com a Equação (2.17) e ρ_s a massa específica dos sólidos constituintes do reboco [g/cm³].

$$\phi_c = \frac{\alpha}{\alpha + \frac{\rho_f}{\rho_s}} \quad (2.17)$$

sendo α um parâmetro adicional criado por Dewan e Chenevert (2001) e calculado através da Equação (2.18) e ρ_f a massa específica da fase fluida [g/cm³].

$$\alpha = \frac{m_{wc}}{m_{dc}} - 1 \quad (2.18)$$

Desta maneira a espessura mensurada é comparada com a estimativa proveniente da Equação proposta por Dewan e Chenevert (2001).

O diagrama apresentado na Figura 3.22 resume o procedimento de avaliação do reboco formado e obtenção dos parâmetros de análise.

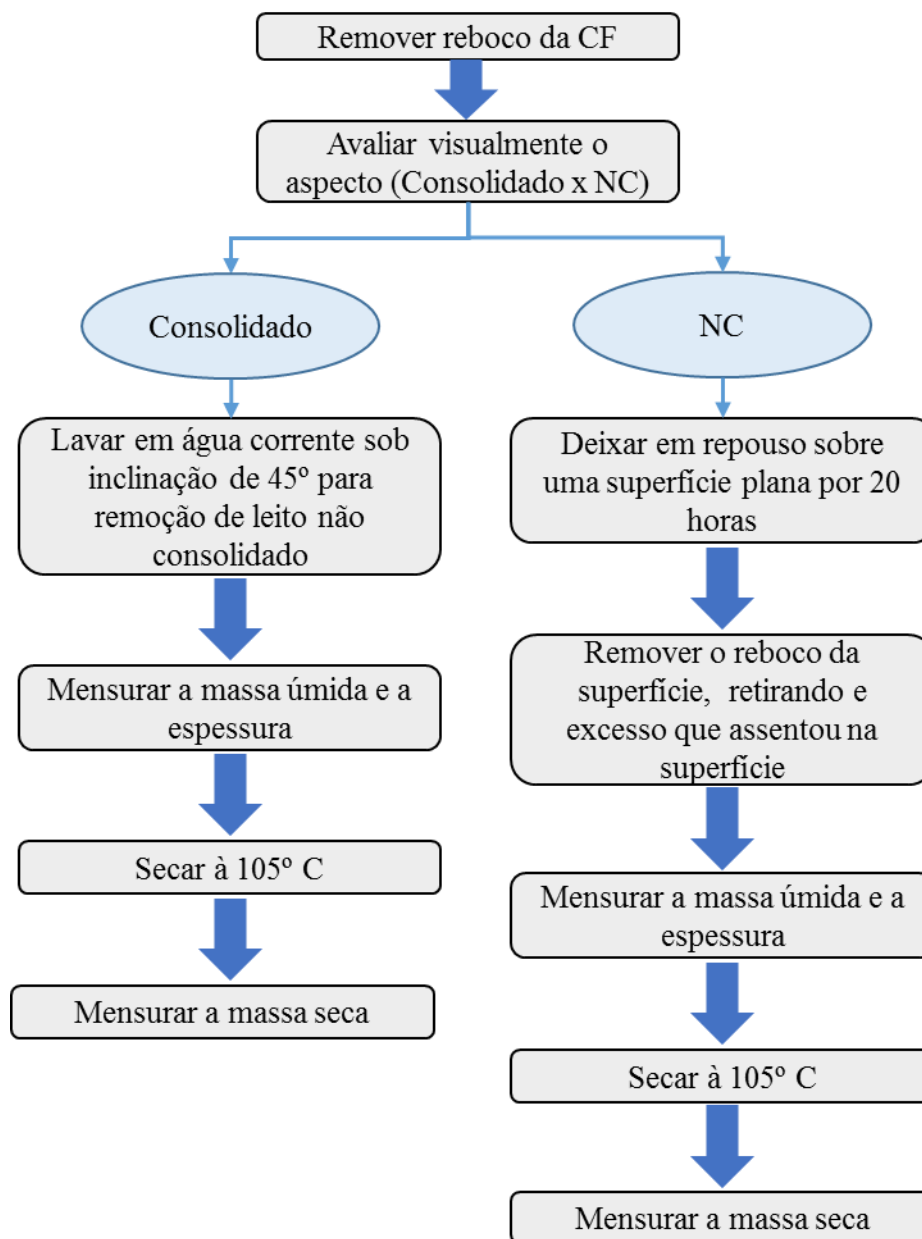


Figura 3.22 – Diagrama operacional para obtenção dos parâmetros do reboco.

A Figura 3.23 apresenta o diagrama operacional para análise do filtrado, sendo que a última etapa deste procedimento é a Avaliação Reológica II, discutida anteriormente na Seção 3.4.

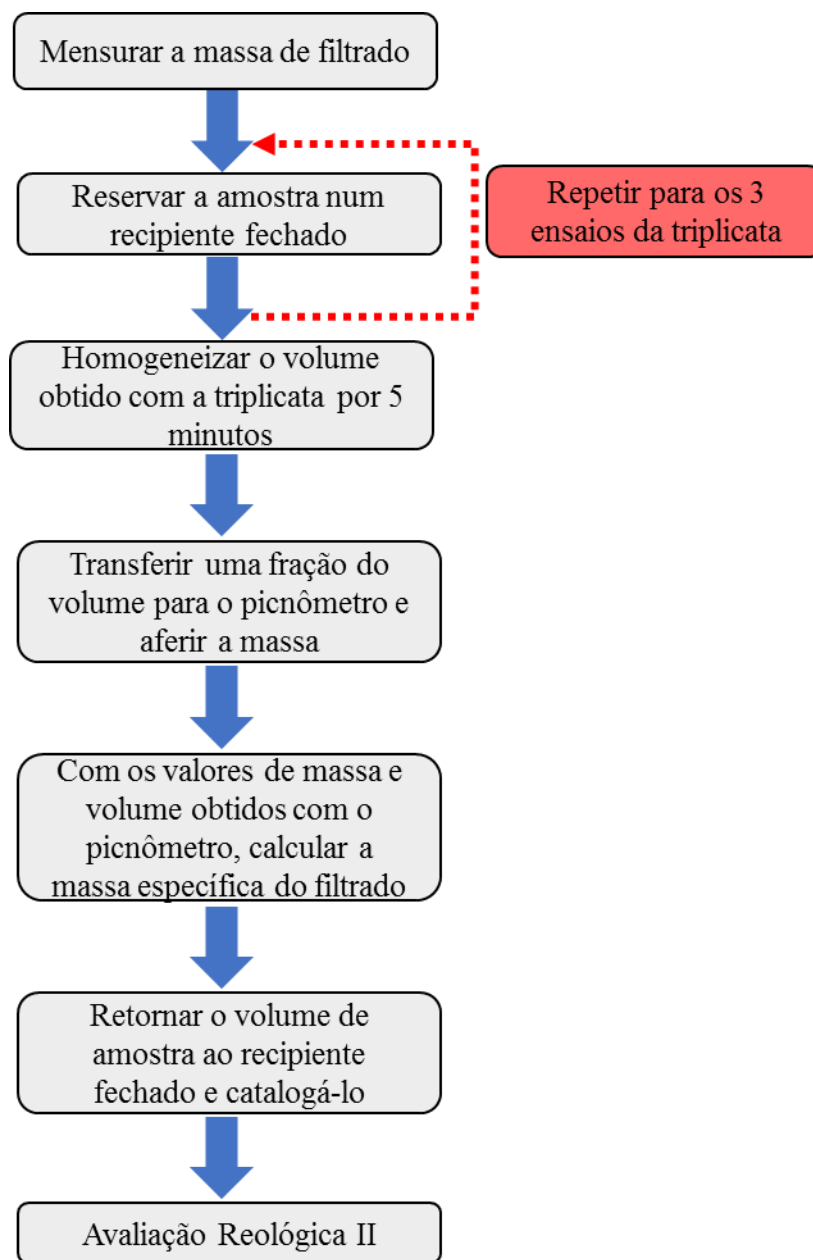


Figura 3.23 – Diagrama operacional para avaliação do filtrado.

Os parâmetros apresentados nesta seção e os métodos utilizados para obtenção são resumidos na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Parâmetros de análise da eficiência de filtração e formação de reboco.

Parâmetro	Método
Filtrado	
Volume de filtrado (V_f)	Balança B2, picnômetro e conversão através da massa específica
Reologia – curva de escoamento	Viscosímetro Fann 35A e Reômetro rotacional
Reboco	
Aspecto visual	API RP 13B
Espessura medida (E_m)	Paquímetro analógico
Massa úmida (m_{wc})	Balança B2
Massa seca (m_{dc})	Balança B2 e forno convectivo
Espessura estimada (T_{mc})	$T_{mc} = \frac{m_{dc}}{A_{ef} (1 - \phi_c) \rho_s}$

3.6 Fechamento do capítulo

No decorrer deste capítulo o aparato experimental de filtração API foi apresentado e detalhado. Na sequência, foi definido que as amostras para os ensaios de filtração são soluções de aditivos poliméricos (GX, CMC e CBP) em água com a mistura de LCM's (CaCO₃, FC, FO, e MO, MEV e APU).

Os equipamentos e acessórios utilizados para o preparo de amostras, execução dos ensaios e análise das variáveis resposta também foram apresentados, com destaque para o reômetro rotacional, o viscosímetro FANN 35 A, os agitadores A1 e A2 e as balanças B1 e B2.

Inicialmente, um diagrama operacional das etapas experimentais foi apresentado na Figura 3.8, sendo que cada um dos procedimentos deste diagrama inicial foi detalhado ao longo do capítulo. Desta maneira, a Figura 3.24 apresenta o diagrama experimental completo, detalhando cada um dos procedimentos.

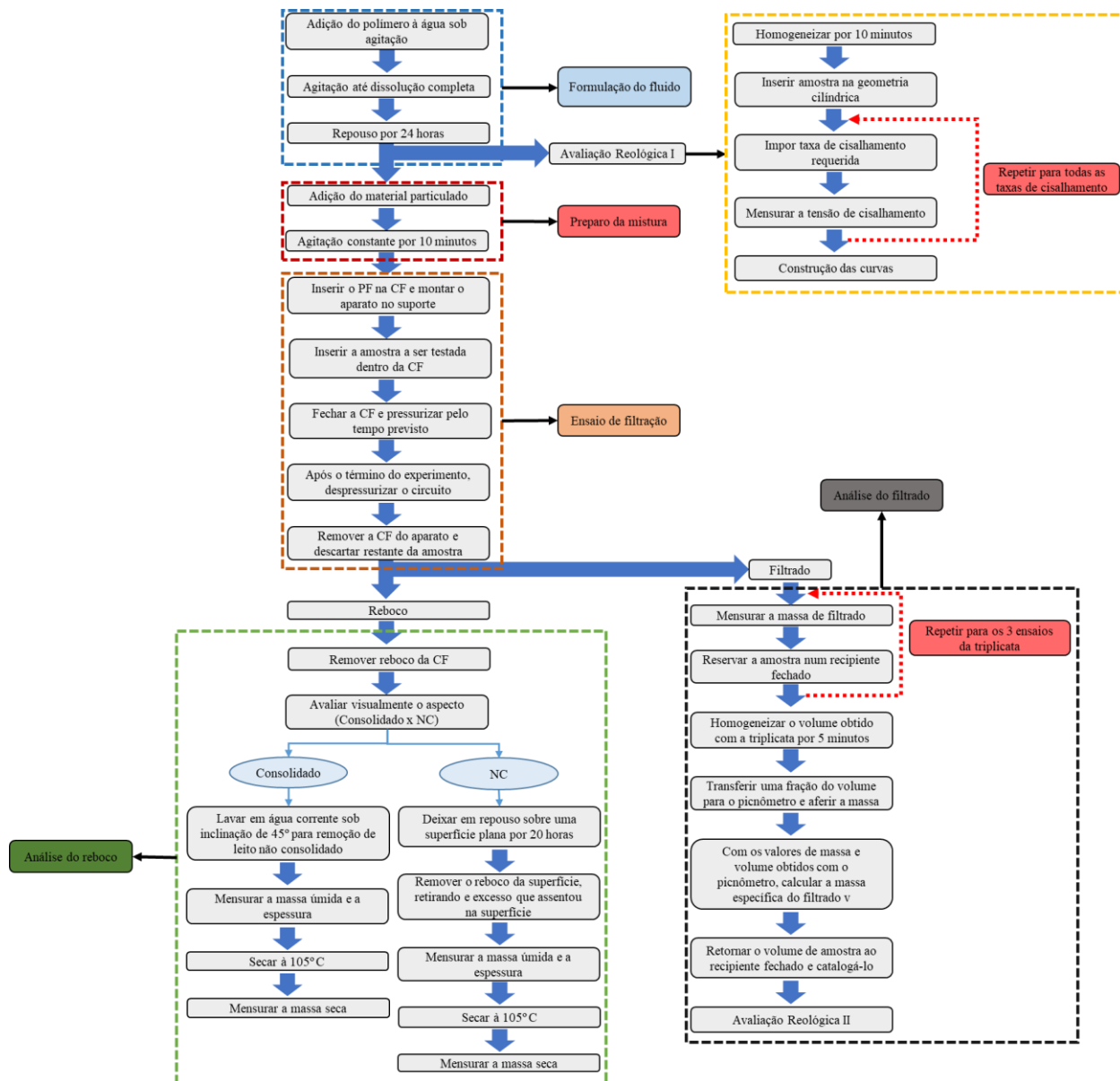


Figura 3.24 – Diagrama experimental completo, integrando diferentes etapas da avaliação experimental.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões dos experimentos de filtração propostos. Inicialmente, experimentos com o objetivo de verificar ou definir algum dos parâmetros do processo são realizados. A Tabela 4.1 apresenta a sequência organizacional deste capítulo.

Tabela 4.1 – Organização dos resultados apresentados.

Seção	Resultado
4.1	Estimativa da permeabilidade dos elementos filtrantes
4.2	Tempo de secagem
4.3	Reologia das formulações
4.4	Determinação da granulometria do material particulado
4.5	Parâmetros de variação
4.6	Influência do elemento filtrante
4.7	Influência do aditivo polimérico
4.8	Influência da concentração de LCM
4.9	Influência do tipo de LCM

4.1 Estimativa da permeabilidade dos elementos filtrantes

Retomando o procedimento experimental apresentado na Seção 3.2, são utilizados três papéis filtro como elementos filtrantes. A Tabela 4.2 apresenta a classificação das três configurações, a espessura e o tamanho de poro para cada.

Tabela 4.2 – Classificação, espessura e tamanho do poro dos PF.

ID	Espessura [μm]	Tamanho do poro [μm]
40	210	2,5
42	200	8,0
50	121	2,7

De maneira a estimar a permeabilidade dos papéis filtro, água é pressurizada através dos elementos filtrantes e a massa de fluido filtrado é monitorada. Estes valores

são posteriormente convertidos em volume e plotados em função do tempo, resultando em uma curva com aspecto linear, portanto uma reta é ajustada aos dados e a inclinação obtida é utilizada como a vazão de filtração. Por fim, os parâmetros são inseridos na Equação (2.19), com a nomenclatura modificada para este experimento, e a permeabilidade do meio é calculada.

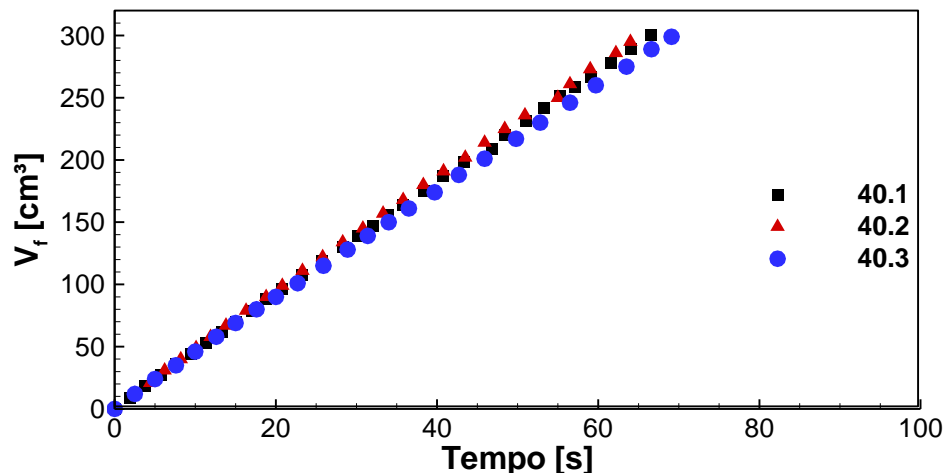
$$K_{PF} = 14700 \frac{q T_{PF} \mu}{\Delta P} \quad (2.19)$$

sendo K_{PF} a permeabilidade do PF [md], q a taxa de filtração [cm/s], T_{PF} a espessura do PF [cm], μ a viscosidade do fluido [cP] e ΔP a queda de pressão [psi].

Este procedimento foi realizado em triplicata e as curvas de volume de filtrado por tempo para os filtros classificação 40, 42 e 50 são apresentadas, respectivamente, na Figura 4.1 (a), (b) e (c) e a Tabela 4.3 organiza os parâmetros e resultados para todos os experimentos.

Para este procedimento, uma pressão de 20 psi foi adotada, pois gradientes maiores aumentam significativamente a velocidade do escoamento, dificultando a obtenção da vazão de maneira precisa e resultando em um regime não darciano. A partir do início do experimento, são necessários alguns instantes para que as magnitudes de pressão e a vazão estabilizem. Quando o experimento se aproxima do término, há a possibilidade de ocorrência do escoamento de ar comprimido concomitantemente com a água, perturbando a medição. Por estes motivos, foram desconsiderados os 50 centímetros cúbicos iniciais e finais para a construção dos gráficos.

(a)



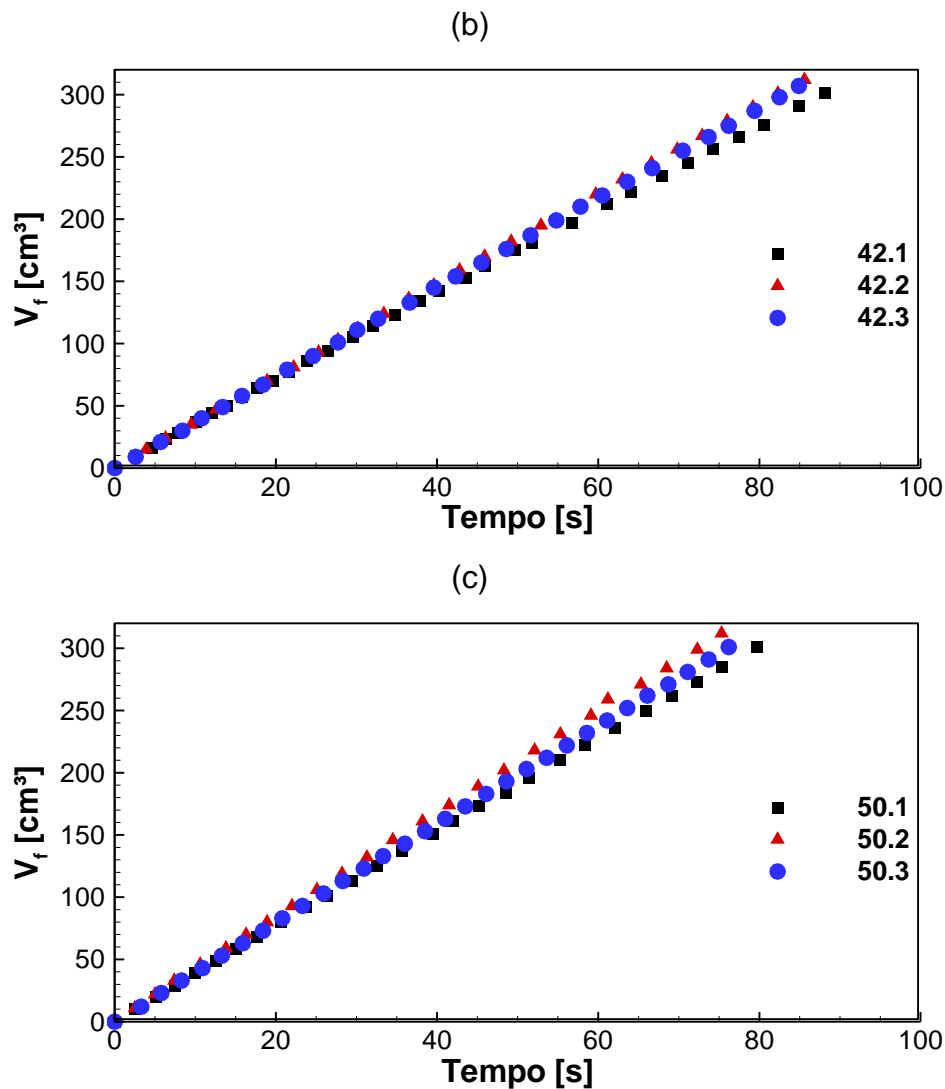


Figura 4.1 – Gráfico mostrando a evolução do volume de filtrado [cm³] ao longo do tempo [s] para filtro de papel do tipo (a) 40, (b) 42 e (c) 50.

Tabela 4.3 – Parâmetros e resultados dos testes de obtenção da permeabilidade do PF.

Classificação	40			42			50		
	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3
Δp [psi]	20			20			20		
μ [cP]	1			1			1		
A_{ef} [cm ²]	45,80			45,80			45,80		
L [μm]	210			200			121		
Q [cm ³ /s]	4,49	4,58	4,30	3,42	3,65	3,61	3,77	4,14	3,95
K_{PF} [md]	1,56	1,58	1,49	1,13	1,20	1,19	0,75	0,83	0,79
$K_{PF\ méd}$ [md]	1,54 \pm 0,05			1,17 \pm 0,04			0,79 \pm 0,04		

Os experimentos apresentaram repetibilidade, com desvios menores que 5% entre os três testes da triplicata, e ainda que o procedimento não possua uma garantia de precisão na estimativa da permeabilidade, é adequado afirmar que os resultados são úteis na determinação da ordem de grandeza da permeabilidade dos substratos.

O PF 40 apresentou a maior permeabilidade dentre os elementos filtrantes, enquanto que o meio que ofereceu maior resistência ao escoamento foi o filtro 50. Destaca-se ainda, que as permeabilidades de todos os filtros apresentaram ordem de grandeza próxima de um. Maiores desenvolvimentos quanto às propriedades do papel filtro serão obtidos com os testes de filtração apresentados na Seção 4.6.

4.2 Tempo de secagem

A influência do tempo de secagem foi avaliada através da utilização de seis rebocos diferentes, todos formados por um processo de filtração estática com as características operacionais apresentadas na Tabela 4.4. Destes fluidos, somente um teve como aditivo particulado as esferas de vidro, enquanto os outros cinco foram formulados com CaCO_3 FC.

Tabela 4.4 – Parâmetros experimentais de filtração para os rebocos utilizados na secagem.

Pressão [psi]	100
Tempo [min]	30
Filtro	50
C_s [g/cm ³]	0,2

Optou-se por manter alguns dos rebocos em contato direto com o ambiente por 10 dias antes de levá-los ao forno à 105° C para a secagem, de maneira a avaliar se o forno seria capaz de remover alguma umidade residual do processo de secagem em temperatura ambiente. Desta maneira, de uma em uma hora, as amostras foram retiradas do equipamento e as massas são mensuradas pela balança semianalítica B2, apresentada na Seção 3.1. Este procedimento é repetido até um tempo de secagem de 5 horas. Um segundo teste de secagem é realizado com amostras poucas horas após o processo de filtração, seguindo o mesmo procedimento apresentado. Ambos os resultados são apresentados na Tabela 4.5 e na Figura 4.2, sendo o subíndice S para

indicar os rebocos secos à temperatura ambiente antes de serem levados à estufa e o subíndice U para representar os rebocos levados ao forno logo após o processo de filtração.

Tabela 4.5 – Massa dos rebocos durante a secagem [g].

Tempo [h]	0	1	2	3	4	5
CMC 1,5g S	35,7	35,4	35,4	35,4	35,3	35,3
GX 1,5g S	28,3	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2
GX 3g S	15,4	15,3	15,2	15,2	15,2	15,2
CMC 3g S	24,5	24,5	24,4	24,4	24,4	24,4
GX 1,5g U	65,5	40,4	34,8	34,8	34,8	34,8
CMC 1,5g U - MEV	52,4	51,0	50,0	50,1	50,0	49,9

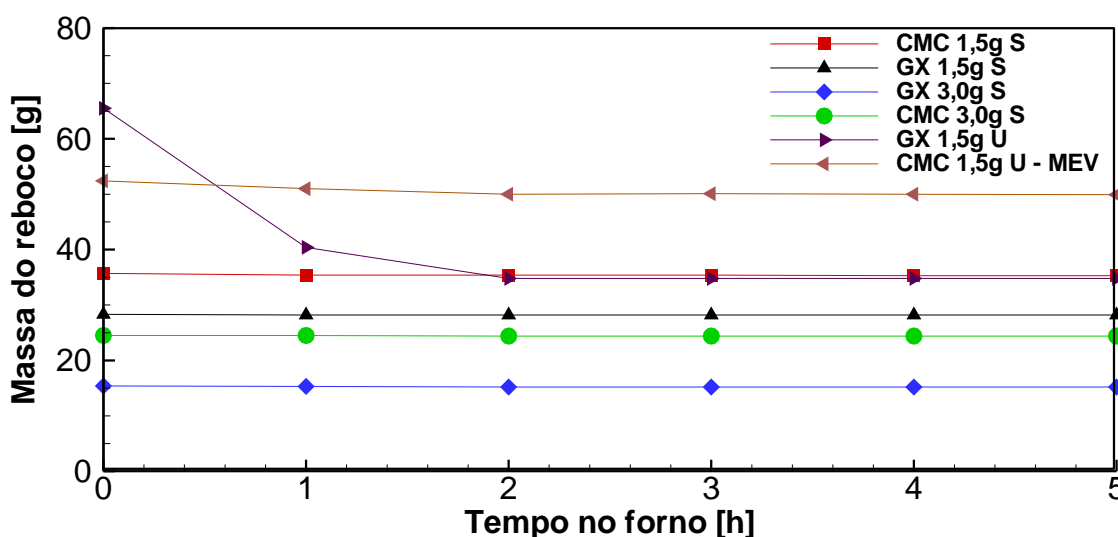


Figura 4.2 – Massa dos rebocos de testes ao longo do processo de secagem em forno.

Para as quatro amostras expostas ao ambiente por 10 dias, não houve variação da massa durante o processo de secagem, indicando que o forno não retira umidade adicional dos rebocos. Para as tortas úmidas, foi detectada a redução da massa durante o processo de secagem, sendo esta queda, mais acentuada para a amostra obtida a partir da filtração de goma xantana com carbonato de cálcio do que para a formada pela carboximetilcelulose e esferas de vidro. Uma explicação para esse fato é a dimensão do CaCO_3 em conjunto com a cadeia polimérica da GX que propicia uma maior retenção de umidade. Ademais, a massa de todas as amostras estabilizou após duas horas de secagem.

Por fim, ao longo dos dias após os experimentos de secagem, a massa dos rebocos foi avaliada com o intuito de observar a possibilidade de absorção de umidade (aumento de massa) devido ao contato com o ambiente, mas tal fenômeno não foi observado para nenhuma amostra.

4.3 Reologia das formulações

Os fluidos não newtonianos formulados com goma xantana, CMC e carbopol são definidos como referência para comparação com os filtrados coletados nos experimentos propostos. Nesta etapa do estudo, tanto o reômetro rotacional quanto o viscosímetro Fann 35A foram utilizados para obtenção da curva de escoamento das formulações. Este procedimento visa observar os desvios entre as duas medições, haja vista que o viscosímetro é um equipamento mais robusto, porém mais impreciso. A Tabela 4.6 apresenta a classificação das formulações realizadas e utiliza como parâmetro de diferenciação a massa de polímero adicionada em 500 cm³ de água.

Tabela 4.6 – Classificação das formulações de referência dos fluidos não newtonianos.

Classificação	Polímero	Massa adicionada em 500 cm ³ de água [g]
GX 1,50g	GX	1,50
GX 3,00g		3,00
CMC 0,75g	CMC	0,75
CMC 1,50g		1,50
CMC 3,00g		3,00
CBP 1,50g	CBP	1,50
CBP 3,00g		3,00
CBP 6,00g		6,00

A adição de 1,50 gramas e 3,00 gramas foi padronizada para todos os experimentos, porém, para o polímero CMC, utilizado como padrão para as configurações de teste, uma concentração adicional de 0,75 gramas em 500 cm³ de água foi utilizada. Não obstante, para o polímero CBP também foi utilizada uma concentração adicional, nesse caso de 6,00 gramas.

Inicialmente uma comparação entre os resultados obtidos com o viscosímetro e com o reômetro foi realizada para a formulação CMC 1,50g, definida como padrão para

os experimentos. A Figura 4.3 apresenta a curva de viscosidade em função da taxa de cisalhamento, ambas em escala logarítmica, obtida para o CMC 1,50 g utilizando o reômetro e o viscosímetro Fann. Os resultados são apresentados em triplicata para cada equipamento, sendo os símbolos cheios referentes ao reômetro e os vazios representam os dados do Fann. Não obstante, a curva média para os dois equipamentos também foi plotada (tracejada para o reômetro e cheia para o viscosímetro).

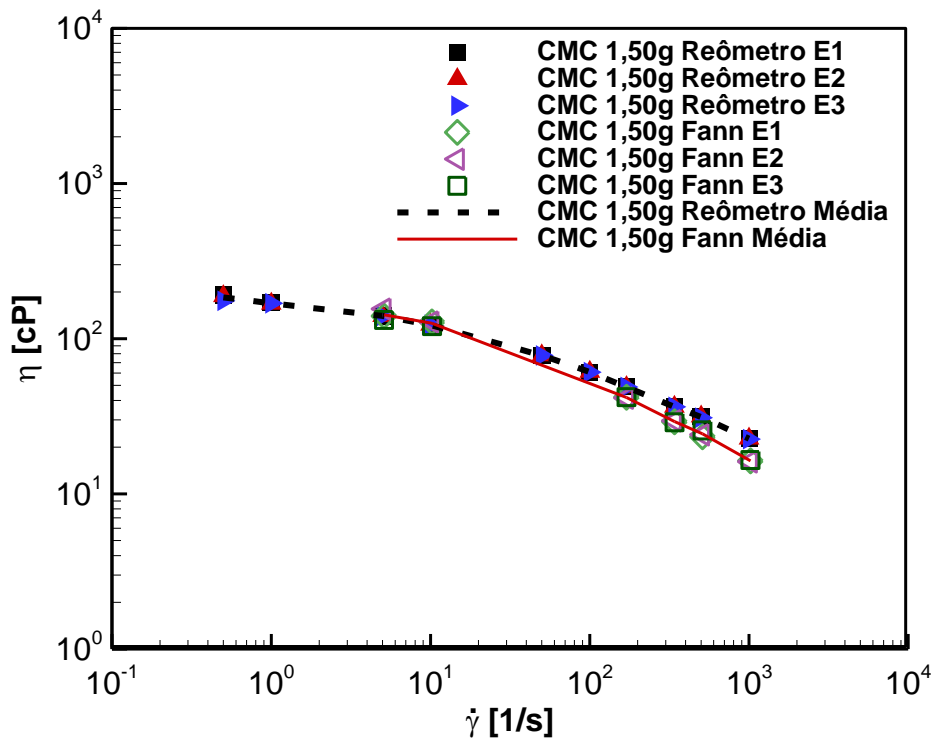


Figura 4.3 – Curvas de viscosidade em triplicata para a formulação de referência CMC 1,50g obtidas no reômetro e no viscosímetro Fann 35A.

A análise das curvas permite concluir que ambas as triplicatas apresentaram pequeno desvio entre si, indicando a repetibilidade da medição. A curva média obtida com o viscosímetro apresentou desvios da ordem de 2% para as taxas de cisalhamento de 5 e 10 s^{-1} , respectivamente. No entanto, o comportamento obtido com o Fann apresentou um decaimento mais acentuado para os valores de viscosidade aparente, resultando em maiores desvios com o aumento da taxa, chegando à ordem de 25% para 1000 s^{-1} .

Esta diferença entre as medições pode indicar a presença de escorregamento à altas taxas no viscosímetro, resultando em uma menor tensão e, por consequência, menor viscosidade. Porém, isto implicaria em uma instabilidade significativa no ângulo de deflexão da mola, fato não observado visualmente.

A possibilidade de erro visual do operador é pouco provável, ainda mais nas rotações mais altas, que apresentaram estabilidade na obtenção do ângulo de deformação. Ainda neste aspecto, a aferição visual é muito mais significativa nas rotações de 3 e 6 rpm (5 e 10 s⁻¹, respectivamente), pois uma variação de 0,5 grau na deflexão da mola pode representar uma variação na viscosidade de até 40 cP, enquanto nas rotações de 300 e 600 rpm (500 e 1000 s⁻¹, respectivamente) esta variação representa aproximadamente 1 cP.

Desta maneira, o controle menos preciso da rotação pelo viscosímetro, diferenças entre as geometrias dos dois equipamentos e o fato do viscosímetro não possuir controle de temperatura contribuem para as diferenças detectadas.

Na Figura 4.4 são apresentadas as curvas de viscosidade comparativas médias entre o reômetro (quadrados) e viscosímetro (triângulos) para as concentrações comuns a todos os polímeros (1,50g - símbolos cheios e 3,00g - símbolos vazios) sendo: (a) GX, (b) CMC e (c) CBP.

Além das seis taxas de cisalhamento permitidas pelo viscosímetro, quatro patamares adicionais (0,5; 1,0; 50 e 100 s⁻¹) foram utilizados com o reômetro de maneira a obter um espectro mais amplo das curvas de viscosidade.

Na Figura 4.4 (a), ambas as concentrações de GX apresentaram comportamento semelhante ao ocorrido para o CMC, apresentando desvios na ordem de 3% para as taxas de 5 e 10 s⁻¹ e chegando à 16% para o patamar de 1000 s⁻¹ para GX 1,50g e de 2% a 25% para GX 3,00g.

Estes resultados indicam que, apesar do viscosímetro subestimar o valor de viscosidade à altas taxas de cisalhamento quando comparado ao reômetro, os resultados seguem o mesmo padrão para diferentes polímeros e concentrações. Este fato é importante para a comparação reológica dos filtrados, que, conforme descrito na Seção 3.4, é efetuada principalmente no viscosímetro.

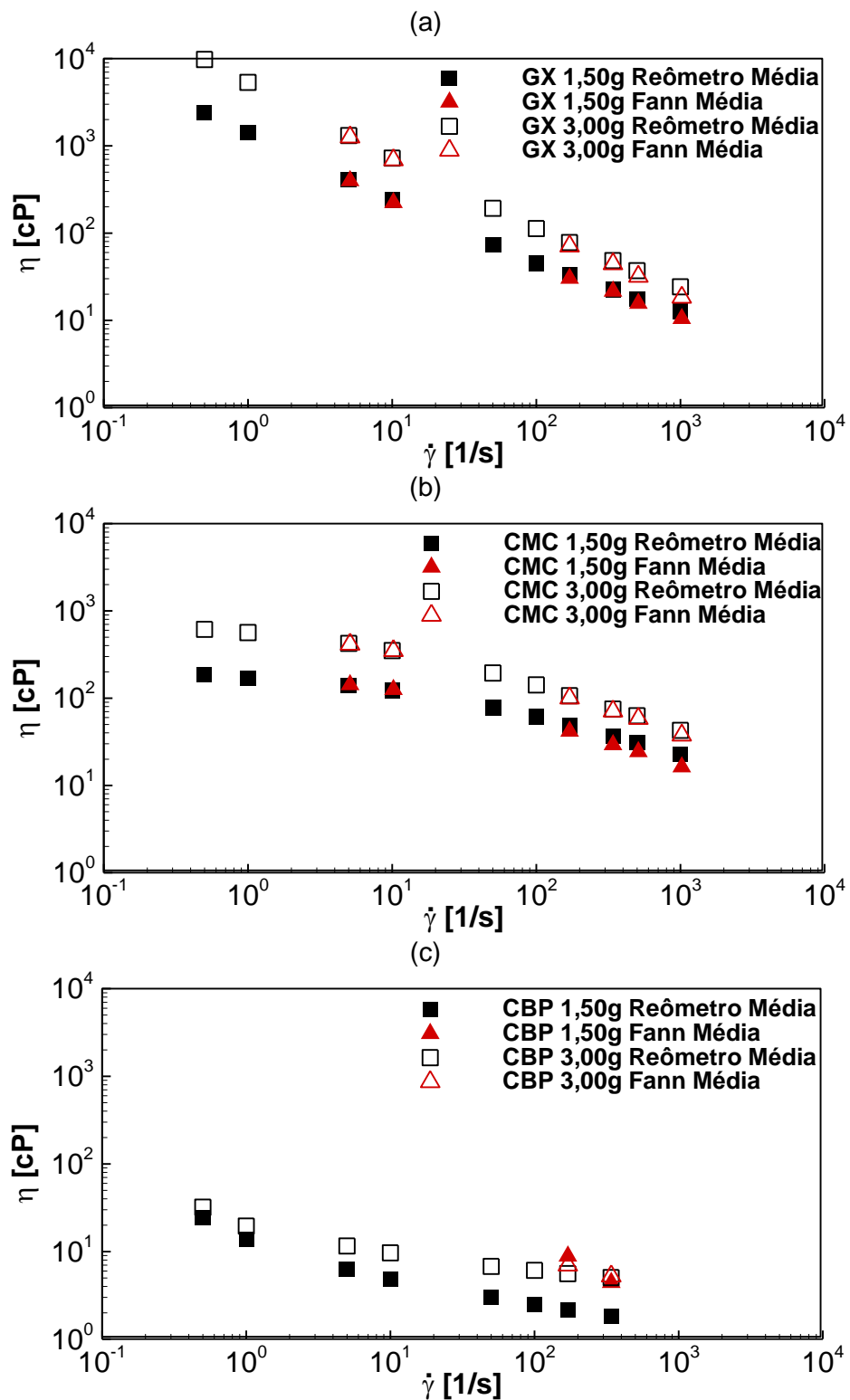


Figura 4.4 – Curvas de viscosidade média comparativas entre reômetro e viscosímetro para as concentrações de 1,50g e 3,00g sendo: (a) GX, (b) CMC e (c) CBP.

Para a formulação CMC 3,00g, apresentada na Figura 4.4 (b), o comportamento apresentado é semelhante, porém, desvios menores foram detectados entre as medições, sendo estes da ordem de 2% para a rotação de 3 rpm e 11% para a rotação de 600 rpm.

Na Figura 4.4 (c) são apresentadas as curvas médias de viscosidade para as formulações CBP 1,50g e 3,00g obtidas com o reômetro e o viscosímetro. Para este polímero ocorreram alguns problemas tanto na formulação quanto no procedimento de avaliação reológica.

O primeiro problema foi o pH do fluido. Todas as formulações de GX, CMC e CBP apresentaram pH pouco superior à 7, indicando um caráter levemente básico. Neste contexto, o comportamento não newtoniano das formulações é intrinsicamente relacionado ao pH, sendo que cada polímero possui um intervalo ideal para trabalho. Para os polímeros GX e CMC, o valor mensurado encontra-se dentro do intervalo recomendado (4 - 9), porém, o intervalo recomendado para utilização do CBP tem início com pH de aproximadamente 9, superior ao valor mensurado para este polímero (Benchabane e Bekkour, 2008; Whitcomb et al., 1977). Os dados de pH para as formulações são apresentados no Apêndice B.

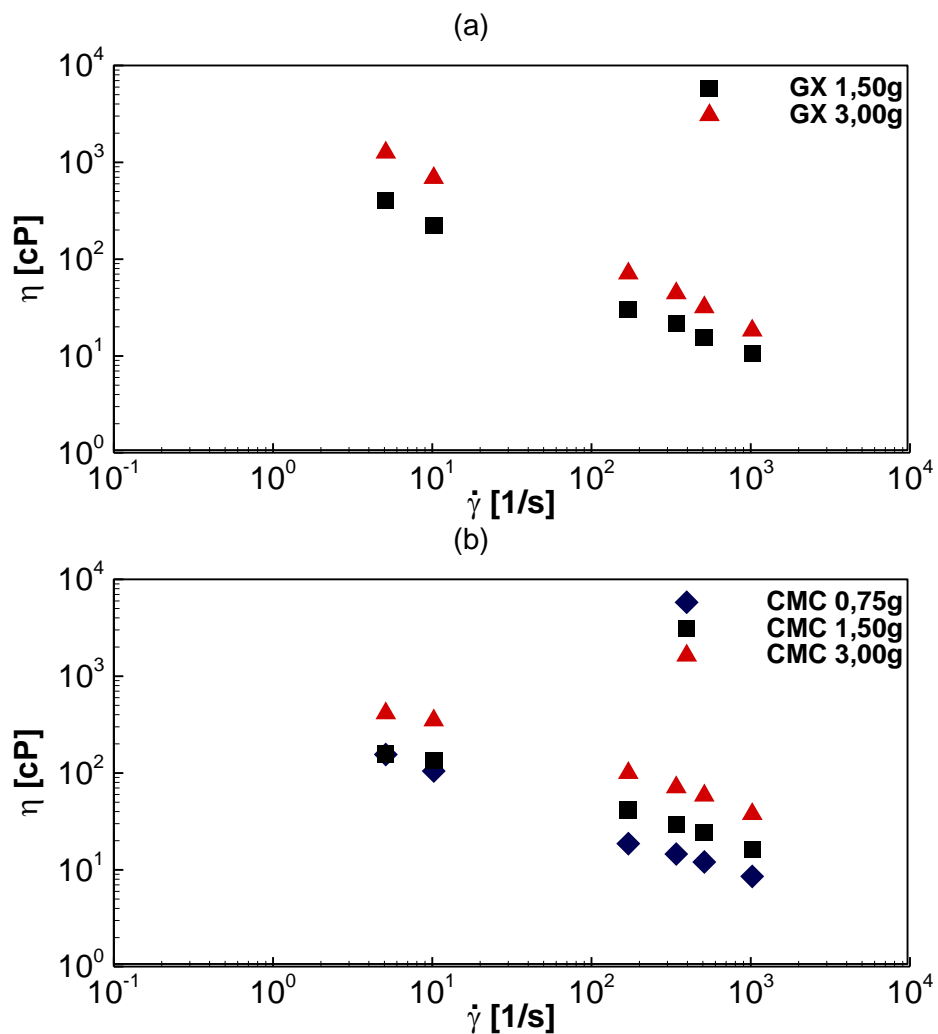
A medição da tensão de cisalhamento das formulações de CBP apresentou problemas de instabilidade. Nas rotações de 3 e 6 rpm no viscosímetro, para as duas concentrações não foi possível precisar um valor para a deformação da mola devido à variação intensa da medição.

Outro fenômeno detectado nestes testes foi o aumento da viscosidade com a taxa de cisalhamento para as rotações de 300 e 600 rpm. Este fato foi detectado também no reômetro rotacional. Cruz (2012), em um relatório interno, investigou o comportamento da viscosidade de água e de óleos newtonianos utilizando um viscosímetro e um reômetro rotacional e também reportou este comportamento. Neste estudo, Cruz detectou que a partir de uma determinada taxa de cisalhamento crítica, que depende das propriedades geométricas do aparato e de parâmetros do fluido, efeitos turbulentos começam a interferir na medição de tensão.

Desta maneira, para as curvas obtidas com o viscosímetro, foram desconsiderados os pontos para as duas rotações iniciais (3 e 6 rpm) devido à instabilidade e os dois

pontos finais (300 e 600 rpm) devido à turbulência. Para os dados do reômetro, optou-se por manter os dados à baixas taxas e excluir para 500 e 1000 s^{-1} , pois foi detectada turbulência. Neste sentido, as curvas do viscosímetro foram plotadas com somente dois pontos, impossibilitando a análise de tendência e dificultando a comparação com o reômetro e com as curvas para outras concentrações.

Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas de viscosidade obtidas com o Fann para as oito formulações de referência, sendo: (a) GX 1,50 e 3,00g; (b) CMC 0,75; 1,50 e 3,00g e (c) CBP 1,50; 3,00 e 6,00 g.



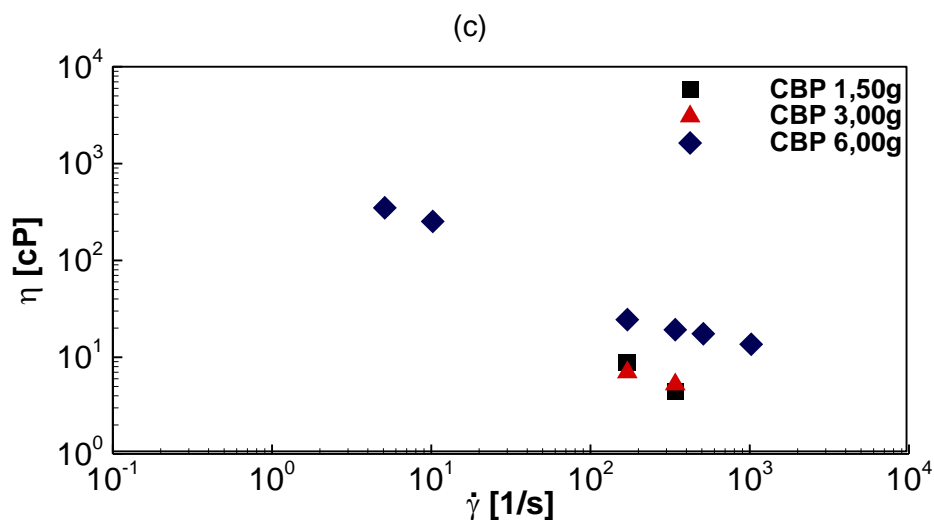


Figura 4.5 - Curvas de viscosidade média obtidas com o viscosímetro para as formulações: (a) GX 1,50g e 3,00g; (b) CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g e (c) CBP 1,50g; 3,00g e 6,00g.

Os valores de viscosidade obtidos com o viscosímetro foram colocados no Apêndice B.

Analisando a Figura 4.5 (a) percebe-se que ambas as concentrações apresentaram o mesmo comportamento e que os valores de viscosidade para GX 1,50 g são inferiores que para a formulação GX 3,00g, como esperado.

Na Figura 4.5 (b), as curvas para CMC 1,50g e 3,00g apresentam comportamento idêntico ao descrito para as formulações de GX. Para as rotações de 3 e 6 rpm, o fluido CMC 0,75g obteve resultados próximos à concentração de 1,50g. Contudo, com o aumento da taxa de cisalhamento, a tendência observada foi a mesma que para as duas concentrações superiores.

Na Figura 4.5 (c) são apresentadas as curvas para as formulações de CBP. Identifica-se que a concentração de 6,00g apresentou maior viscosidade quando comparada às concentrações inferiores e que o problema de instabilidade na medição não foi detectado. Contudo o pH do fluido também está fora do intervalo ideal.

Desta maneira, ajustes de lei de potência, Equação (2.7), e de Herschel-Bulkley, Equação (2.9), são efetuados para os fluidos de GX e CMC. Devido aos problemas com a formulação e medição dos fluidos com CBP, optou-se por não realizar os ajustes para este polímero. A Figura 4.6 apresenta as curvas de tensão por taxa de cisalhamento, ambos em escala logarítmica, para: (a) GX 1,50g e 3,00g e (b) CMC 0,75g; 1,50g e

3,00g. Neste sentido, os pontos representam os dados obtidos com o viscosímetro, as linhas cheias o ajuste de lei de potência (PL) e as linhas pontilhadas o ajuste Herschel Bulkley (HB).

$$\tau = \eta_c \dot{\gamma}^n \quad (2.7)$$

$$\tau = \tau_0 + \eta_c \dot{\gamma}^n, \tau > \tau_0 \quad (2.9)$$

sendo τ a tensão obtida através da deflexão da mola [Pa], η_c o índice de consistência, $\dot{\gamma}$ a taxa de cisalhamento imposta pelo viscosímetro [1/s], n o índice de lei de potência e τ_0 a tensão limite de escoamento para o ajuste HB [Pa].

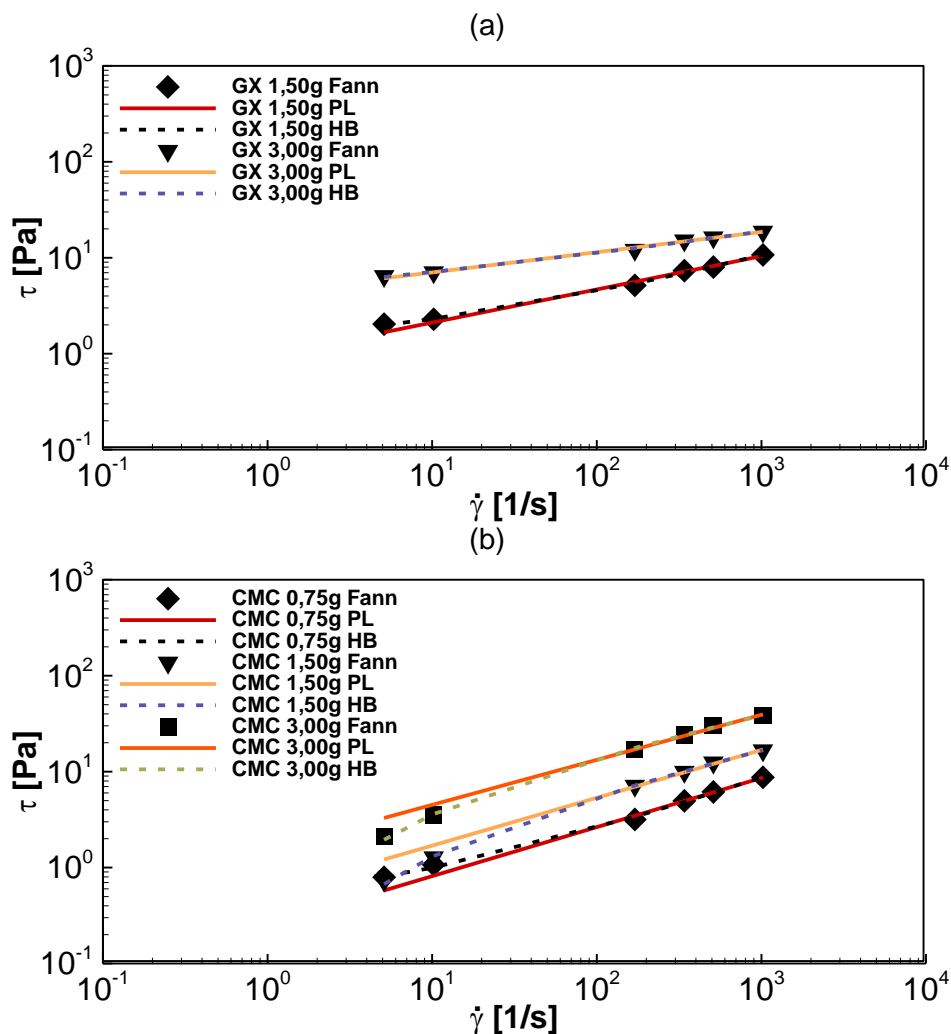


Figura 4.6 – Curvas de tensão comparativas entre os valores obtidos com o Fann e os ajustes PL e HB, sendo: (a) GX 1,50g e 3,00g e (b) CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g.

Analisando a Figura 4.6 (a), ambos os ajustes apresentaram concordância com os dados experimentais. Os valores de tensão experimentais e dos ajustes são apresentados na Tabela 4.7 para as duas concentrações de GX, enquanto na Tabela 4.8 são informados os parâmetros de ajuste obtidos para cada equação.

Tabela 4.7 – Comparação entre as tensões medidas e calculadas pelos ajustes PL e HB para as formulações GX 1,50g e 3,00g.

GX						
1,50g			3,00g			
$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ_{med} [Pa]	τ_{PL} [Pa]	τ_{HB} [Pa]	τ_{med} [Pa]	τ_{PL} [Pa]	τ_{HB} [Pa]
5,11	0,60	1,67	1,99	6,44	6,12	6,32
10,21	0,87	2,13	2,31	7,05	7,08	7,14
170,23	2,98	5,64	5,39	12,11	12,81	12,58
340,46	4,09	7,16	6,97	15,15	14,83	14,68
510,69	5,36	8,24	8,15	16,27	16,15	16,10
1021,38	8,14	10,48	10,73	18,72	18,69	18,93
Emáx (%)	-	17,8	5,1	-	5,8	3,9
Eméd (%)	-	6,9	2,5	-	2,4	2,1

Tabela 4.8 – Parâmetros de ajuste PL e HB para as formulações GX 1,50g e 3,00g.

GX				
Parâmetros	1,50g		3,00g	
	PL	HB	PL	HB
τ_0	-	1,1131	-	2,3322
η_c	0,9518	0,4195	4,3380	2,5719
n	0,3462	0,4521	0,9943	0,2691
R²	0,9915	0,9962	0,9943	0,9957

Analisando o parâmetro R², informado na Tabela 4.8, tanto o ajuste PL quanto o HB apresentaram fator de concordância de 0,99 para ambas as concentrações. Contudo, analisando o erro obtido, a equação de Herschel Bulkley apresentou menores valores de erro máximo e de erro médio. Desta maneira, esta equação se ajustou melhor aos dados experimentais. Somente com estes resultados não é correto afirmar que as formulações com GX são viscoplásticas, pois para verificar esta hipótese, testes reológicos adicionais, como teste de fluência devem ser realizados. Contudo, estes são indícios de que as formulações com GX apresentam comportamento viscoplástico.

Desta maneira, conclui-se que para as formulações GX 1,50g e 3,00g o melhor ajuste foi o de HB, com τ_0 de 1,1 e 2,3 Pa, respectivamente.

Na Figura 4.6 (b) nota-se que o ajuste PL se distancia dos dados experimentais nas duas taxas mais baixas (3 e 6 rpm). Os valores de tensão para as formulações CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g são apresentados na Tabela 4.9, enquanto os parâmetros de ajuste das equações são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.9 - Comparação entre as tensões medidas e calculadas pelos ajustes PL e HB para as formulações CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g.

$\dot{\gamma}$ [1/s]	CMC								
	0,75g			1,50g			3,00g		
	τ_{med} [Pa]	τ_{PL} [Pa]	τ_{HB} [Pa]	τ_{med} [Pa]	τ_{PL} [Pa]	τ_{HB} [Pa]	τ_{med} [Pa]	τ_{PL} [Pa]	τ_{HB} [Pa]
5,11	0,79	0,58	0,81	0,73	1,21	0,67	2,12	3,29	1,95
10,21	1,07	0,82	1,00	1,28	1,71	1,32	3,57	4,56	3,63
170,23	3,18	3,47	3,39	7,12	6,96	7,19	17,07	17,07	17,70
340,46	4,96	4,95	4,85	9,95	9,83	10,07	24,21	23,63	24,22
510,69	6,15	6,10	6,03	12,44	12,04	12,18	29,90	28,59	28,93
1021,38	8,73	8,69	8,80	16,67	17,00	16,76	38,50	39,59	38,91
Emáx (%)	-	27,2	6,7	-	66,7	7,5	-	55,4	7,8
Eméd (%)	-	10,2	3,4	-	18,1	2,6	-	15,4	2,9

Tabela 4.10 - Parâmetros de ajuste PL e HB para as formulações CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g.

Parâmetros	CMC					
	0,75g		1,50g		3,00g	
	PL	HB	PL	HB	PL	HB
τ_0	-	0,4200	-	-1,2359	-	-3,5059
η_c	0,2509	0,1518	0,5383	0,9568	1,5302	2,9038
n	0,5116	0,5788	0,4983	0,4235	0,4695	0,3870
R²	0,9965	0,9983	0,9972	0,9995	0,9957	0,9985

Inicialmente o ajuste HB aparenta se adequar melhor aos pontos experimentais, pois apresenta menores erros. Contudo, o parâmetro τ_0 apresentou valores negativos para todas as concentrações de CMC, o que não possui significado físico. Desta maneira, conclui-se que o ajuste HB não foi adequado para representar as formulações de CMC e que, apesar de apresentar erros consideráveis para 3 e 6 rpm, próximos a 60%, o ajuste PL se adequou melhor aos dados experimentais.

De maneira semelhante, somente estes resultados não permitem afirmar que as formulações de CMC são pseudoplásticas, mas levantam indícios de tal comportamento.

Por fim, uma comparação entre os polímeros é efetuada. Na Figura 4.7 são plotadas as curvas de viscosidade para as formulações GX e CMC nas concentrações de (a) 1,50g e (b) 3,00g.

Para ambas as concentrações um comportamento idêntico foi detectado. Para as rotações de 3 e 6 rpm, os fluidos com GX apresentaram maior valor de viscosidade, contudo, o decaimento deste parâmetro com o aumento da taxa de cisalhamento é menos acentuado para os fluidos com CMC. Desta maneira, há um ponto a partir do qual ocorre a inversão e as formulações de CMC apresentam maior viscosidade. Para ambas as concentrações, a taxa de cisalhamento crítica é de aproximadamente 50 s^{-1} .

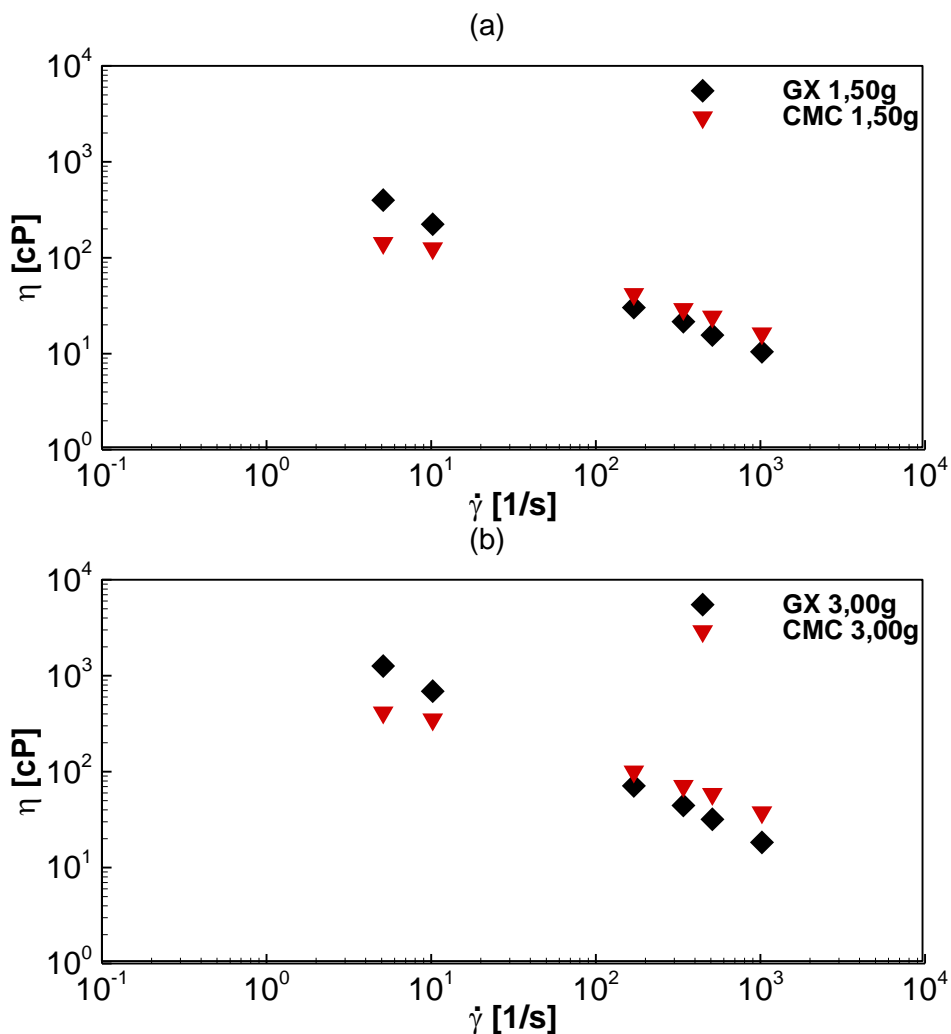


Figura 4.7 – Curvas de viscosidade comparativas entre as formulações de GX e CMC para concentrações de: (a) 1,50g e (b) 3,00g.

Nesta seção foram apresentadas as curvas de viscosidade e de tensão para as formulações propostas. Ajustes de lei de potência e Herschel-Bulkley foram efetuados para os fluidos com GX e CMC e os valores de tensão medidos e estimados foram comparados. Na sequência deste capítulo, as curvas de viscosidade dos filtrados, obtidas com o viscosímetro Fann, são comparadas com as formulações de referência apresentadas.

4.4 Determinação da granulometria do material particulado

Foram realizados testes para comprovar a dimensão das partículas informadas pelo fabricante. Além disso, os experimentos também permitem obter a distribuição granulométrica e o tamanho médio do material. Esta avaliação foi efetuada nas dependências do GrMaTS (Grupo de materiais, tribologia e superfícies) da UTFPR utilizando o equipamento Microtrac Flex (Microtrac, 2006). Este aparato utiliza a dispersão de raios laser direcionados à amostra em conjunto com propriedades óticas do particulado para determinar a distribuição granulométrica. Não obstante, o dispositivo permite que a medição seja realizada via úmida, quando as partículas estão suspensas em algum líquido, ou via seca. Considerando que, neste trabalho, todos os fluidos de trabalho são suspensões dos particulados em fluidos com base água, optou-se por utilizar soluções de água destilada com cada aditivo sólido. Ademais, esta metodologia diminui o risco de erros provenientes da aglomeração do material.

A Tabela 4.11 compila os parâmetros de entrada dos testes (índice de refração) e compara os resultados obtidos com os informados pelos fabricantes. Vale destacar que são dois carbonatos finos, um comercial e outro operacional, um carbonato médio operacional, microesferas de vidro e um abrasivo plástico de urea.

Tabela 4.11 – Comparação entre a granulometria informada e a verificada para os materiais particulados.

Particulado	CaCO ₃ FO	CaCO ₃ FC	CaCO ₃ MO	MEV	APU
Índice de Refração	1,59	1,59	1,59	1,52	1,55
Aspecto	Granular	Granular	Granular	Esférico	Granular
Granulometria Fabricante [µm]	2 - 44	2 - 44	44 - 106	180 - 300	250 - 420
Granulometria Experimento [µm]	0,4 - 44	0,4 - 44	0,4 - 498	88 - 1400	220 - 450
D ₅₀ [µm]	9,17	3,85	11,00	244,90	343,50

A análise isolada dos valores apresentados pode levar a conclusões errôneas haja vista que somente as dimensões máxima e mínima do particulado foram consideradas. De maneira a complementar os resultados, faz-se necessária a utilização das curvas de distribuição granulométrica, apresentadas na Figura 4.8 para o CaCO_3 FO (a), CaCO_3 FC (b), CaCO_3 MO (c), esferas de vidro (d) e abrasivo plástico (e). Nestas figuras, o eixo das abscissas representa o diâmetro do particulado, plotado em escala logarítmica e o eixo principal das ordenadas é o percentual total de particulado, curva com círculos.

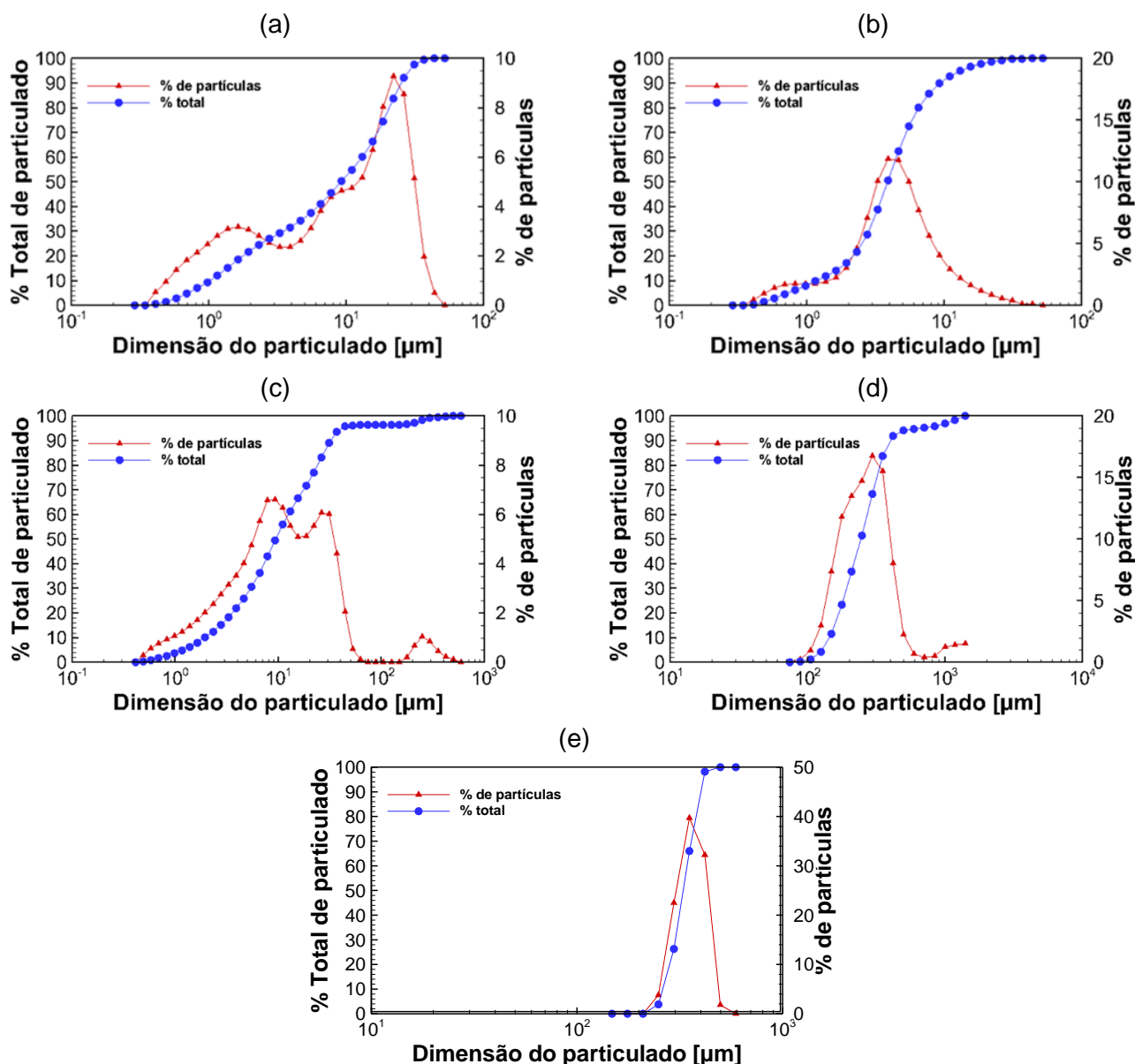


Figura 4.8 – Distribuição granulométrica para: (a) CaCO_3 FO, (b) CaCO_3 FC, (c) CaCO_3 M, (d) MEV e (e) APU.

A ordenada secundária é a fração parcial de partículas para cada intervalo granulométrico, cujo resultado está representado pelos triângulos. Ainda com relação às figuras, os dados fornecidos pelo equipamento são apresentados no Apêndice A.

Com estas informações, verifica-se que as duas variantes de carbonato de cálcio fino são similares, com uma diferença no diâmetro médio, sendo este três vezes maior para o material comercial. Ambas as amostras estão dentro do intervalo granulométrico esperado, sendo a distribuição do CaCO_3 FC mais uniforme.

Para o CaCO_3 médio, o particulado apresentou um diâmetro médio menor que o esperado, pouco superior ao material mais fino. Uma das explicações para esta diferença entre os valores verificados experimentalmente e os informados pelo fornecedor é o fato de que o carbonato pode ser obtido a partir de rochas com composições químicas diferentes, modificando assim o índice de refração. Outro fenômeno que pode ser responsável por este resultado é a quebra de aglomerações de partículas quando o material é adicionado à água, tendo como resultado partículas menores. Ainda é possível perceber a presença de sólidos maiores, com aproximadamente 300 micrometros, fato este, condizente com o verificado visualmente pois nota-se a presença de outros materiais, em pequena concentração, no particulado fornecido, resultado também detectado para as esferas de vidro.

Na Figura 4.8 (d), denota-se que o material apresenta um comportamento uniforme, com apenas uma pequena quantidade apresentando dimensão fora dos espectros informados, provavelmente devido à presença de agentes estranhos no particulado fornecido.

Por fim, as partículas plásticas apresentaram um intervalo de dimensões em concordância com o esperado com um diâmetro médio de 343 micrometros.

Conclui-se que os resultados obtidos apresentam pequenas variações em relação ao esperado, porém, de maneira geral, estão em concordância com os dados informados, salvo o carbonato de cálcio com granulometria média. Destaca-se que foi observada a presença de agentes externos com diferentes dimensões no CaCO_3 MO e nas esferas de vidro.

Posteriormente à esta análise granulométrica, experimentos foram realizados para comparar a eficiência no combate à perda de circulação dos dois carbonatos de cálcio

finos. O procedimento de teste utilizado foi descrito na Seção 3.2 e a configuração de teste utilizada foi a padrão, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 4.12. A Figura 4.9 apresenta o volume de filtrado obtido para os dois aditivos particulados.

Tabela 4.12 – Parâmetros utilizados para os testes de filtração para comparação entre o CaCO_3 FC e FO.

Pressão [psi]	100
Temperatura [°C]	20
Tempo [min]	30
PF	50
Aditivo polimérico	CMC
C_p [lb/bbl]	1,05
m_p [g/0,5L]	1,50
C_s [g/cm ³]	0,2

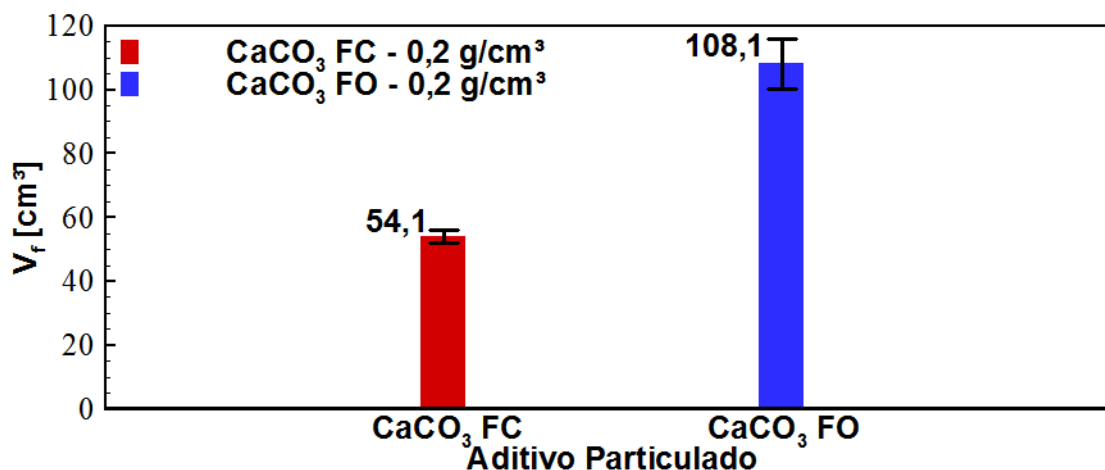


Figura 4.9 – Volume de filtrado para as configurações com CaCO_3 FC e CaCO_3 FO.

A configuração com particulado operacional apresentou um volume de filtrado quase 100% superior ao material comercial, apesar de possuírem faixa granulométrica semelhante. Contudo, o diâmetro médio do CaCO_3 FC é quase três vezes menor, o que pode ter ocasionado o maior volume de filtrado. Também é possível que o CaCO_3 FO possua uma composição diferente do particulado comercial, influenciando na deposição do reboco. Desta maneira, o reboco formado pelo particulado operacional é mais espesso e com maior massa, conforme os dados apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Resultados da filtração para os fluidos com CaCO_3 FC e CaCO_3 FO como aditivo particulado.

Aditivo particulado	CaCO_3 FC	CaCO_3 FO
Aspecto do reboco	Consolidado	
V_f [cm^3]	$54,10 \pm 2,00$	$108,10 \pm 7,81$
M_{wc} [g]	$58,45 \pm 4,36$	$94,12 \pm 5,51$
M_{dc} [g]	$26,40 \pm 1,39$	$67,80 \pm 4,22$
E_m [mm]	$8,65 \pm 0,18$	$10,83 \pm 0,35$
T_{mc} [mm]	$9,21 \pm 0,77$	$14,23 \pm 0,80$

O reboco formado pelo particulado CaCO_3 FO apresentou uma maior espessura (E_m), porém esta foi inferior à estimativa calculada (T_{mc}), o que pode significar que a massa específica utilizada para o cálculo é inferior a real. Vale lembrar que a estimativa da espessura é realizada através da Equação (2.20), que utiliza a massa específica do filtrado e do particulado, a área de filtração efetiva e a massa do reboco antes e após a secagem para estimar T_{mc} .

As curvas de viscosidade obtidas para ambos os filtrados em comparação com o fluido de referência formulado com CMC são apresentadas na Figura 4.10.

Ambos os filtrados apresentaram resultados deslocados da curva de referência, sendo esta discrepância um pouco maior para o carbonato adquirido comercialmente. Os dados para construção das curvas são resumidos na Tabela 4.14.

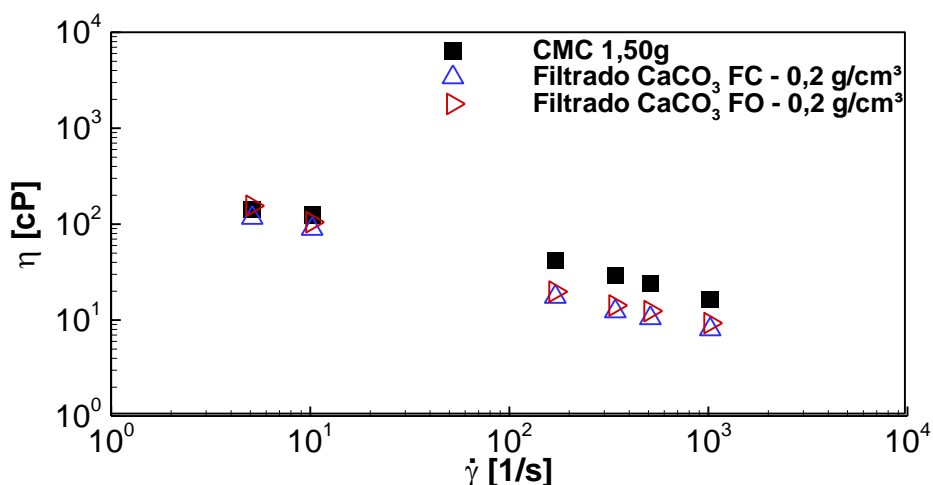


Figura 4.10 - Curva de viscosidade para os filtrados de CaCO_3 FC e CaCO_3 FO em comparação com o fluido CMC 1,5g.

Tabela 4.14 - Dados de tensão e viscosidade para os filtrados de CaCO₃ FO e FC obtidos com o Fann 35A.

$\dot{\gamma}$ [1/s]	CaCO ₃ FO		CaCO ₃ FC	
	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]
5,11	0,79	155,44	0,60	116,58
10,21	1,07	104,92	0,91	89,38
170,23	3,37	19,82	2,98	17,49
340,46	4,84	14,22	4,21	12,36
510,69	6,35	12,43	5,36	10,49
1021,38	9,53	9,33	8,18	8,00

4.5 Parâmetros de variação

Os experimentos propostos são divididos em quatro grupos: avaliação da influência do elemento filtrante, do aditivo polimérico, da concentração de LCM e da distribuição granulométrica das partículas. Para cada análise, um fluido padrão é formulado e somente as propriedades de interesse são alteradas. Ressalta-se que os procedimentos experimentais atendem às recomendações da API (2014a) para o gradiente de pressão e duração do experimento. Os parâmetros fixos para todos os grupos são organizados na Tabela 4.15, enquanto a Tabela 4.16 apresenta a classificação utilizada para os quatro grupos de experimentos.

Tabela 4.15 – Parâmetros de filtração fixos para todos os experimentos.

Pressão [psi]	100
Temperatura [°C]	20
Tempo [min]	30
Volume da célula [cm ³]	400
A_{ef} [cm ²]	45,80

Tabela 4.16 – Critérios de classificação dos experimentos.

Classificação	Parâmetro de variação
A	Elemento filtrante
B	Aditivo polimérico
C	Concentração de particulado
D	Granulometria do particulado

A primeira configuração diz respeito à variação do elemento filtrante, apresentados na Seção 3.1, e tem os parâmetros descritos na Tabela 4.17. Esta categoria utiliza como

configuração padrão um fluido com CMC 1,5g (1,5 grama em 500 cm³ de água) e CaCO₃ FC 0,2 g/cm³ como LCM.

Tabela 4.17 – Formulações para a avaliação da influência do elemento filtrante.

Configuração	PF	Água [cm ³]	Polímero	Particulado
			CMC [g]	CaCO ₃ FC [g]
A1	40			
A2	42	500	1,50	100
A3	50			

A próxima configuração objetiva avaliar o efeito do aditivo polimérico. Para tanto, o material particulado utilizado foi o CaCO₃ FC 0,2 g/cm³ e tanto o tipo, quanto a concentração de polímero são alterados, conforme indicado na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Formulações para a avaliação da influência do aditivo polimérico.

Configuração	PF	Água [cm ³]	GX [g]	Polímero	Particulado
				CMC [g]	CBP [g]
B1			1,50		
B2			3,00		
B3				0,75	
B4	50	500		1,50	100
B5				3,00	
B6					1,50
B7					3,00
B8					6,00

Com a finalidade de avaliar a influência da concentração de material particulado, o fluido formulado com CMC 1,5g foi definido como padrão com CaCO₃ FC como LCM. A Tabela 4.19 apresenta as configurações contemplando a variação da concentração do material particulado.

Tabela 4.19 – Formulações para a avaliação da influência da concentração de particulado.

Configuração	PF	Água [cm ³]	Polímero	Particulado
			CMC [g]	CaCO ₃ FC [g]
C1				50
C2				75
C3	50	500	1,50	100
C4				150
C5				200

Por fim, a Tabela 4.20 apresenta as configurações propostas para avaliar o efeito da distribuição granulométrica do material particulado, utilizando CMC 1,5g e concentração de sólidos de 0,3 g/cm³ como parâmetros fixos.

Tabela 4.20 – Formulações para a avaliação da influência granulometria do particulado.

Configuração	PF	Água [cm ³]	Polímero	Particulado			
			CMC [g]	CaCO ₃ FC [g]	CaCO ₃ MO [g]	MEV [g]	APU [g]
D1				150	-	-	-
D2				-	150	-	-
D3				-	-	150	-
D4	50	500	1,50	-	-	-	150
D5				75	-	75	-
D6				75	-	-	75
D7				-	-	75	75
D8				50	-	50	50

Na sequência deste capítulo, os resultados para as quatro variações propostas (A, B, C e D) são apresentados.

4.6 Influência do elemento filtrante

A primeira avaliação apresentada é a da influência do elemento filtrante. Os experimentos realizados com esta finalidade foram categorizados com a letra A. As principais características de cada um dos filtros são apresentadas na Tabela 4.21, enquanto a Tabela 4.22 lista os parâmetros utilizados para a realização dos testes.

Tabela 4.21 – Principais características dos elementos filtrantes

Configuração	PF	Espessura [μm]	Tamanho do poro [μm]	Permeabilidade estimada [md]
A1	40	210	2,5	1,54
A2	42	200	8,0	1,17
A3	50	121	2,7	0,79

Conforme discutido anteriormente, os elementos filtrantes não apresentam grande distinção entre eles, portanto não é esperado uma diferença significativa entre os resultados obtidos para os diferentes filtros.

Tabela 4.22 – Parâmetros utilizados para os experimentos com fluidos categoria A.

Pressão [psi]	100
Temperatura [°C]	20
Tempo [min]	30
Aditivo polimérico	CMC
C_p [lb/bbl]	1,05
m_p [g/0,5L]	1,50
Particulado	CaCO ₃ FC
C_s [g/cm ³]	0,2

O volume de filtrado obtido é apresentado na Figura 4.11. O resultado representa a média aritmética dos três testes realizados para cada papel filtro e o desvio padrão obtido com a triplicata.

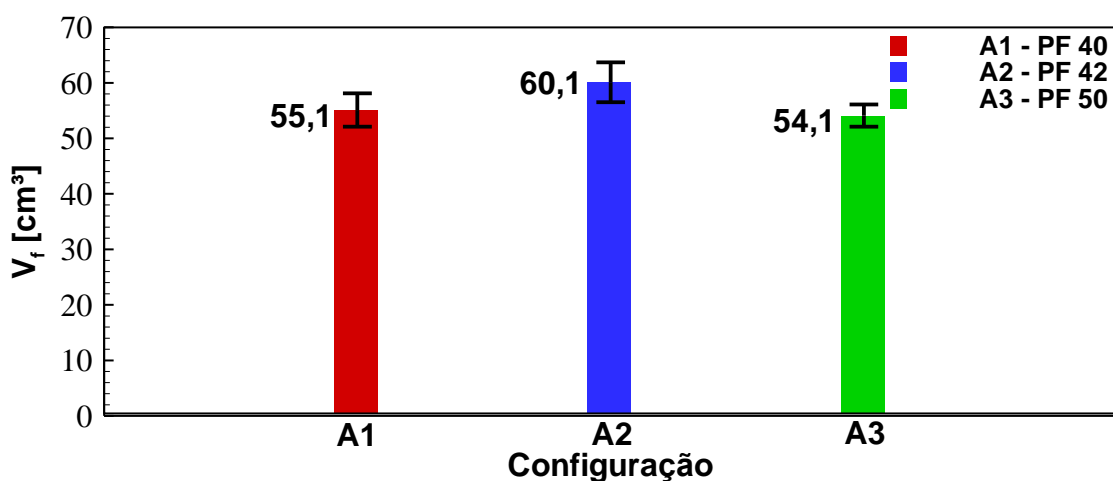


Figura 4.11 – Volume de filtrado obtido para as configurações A1, A2 e A3.

Na Figura 4.11 percebe-se que não há grande diferença entre os volumes obtidos para os três filtros. A maior quantidade de filtrado foi detectada para a configuração A2, que utilizou o PF com o maior tamanho de poro, porém não é possível afirmar que o aumento das dimensões do poro provoque um maior volume de filtrado, haja vista a pequena diferença detectada entre os experimentos. De maneira a avaliar tal influência, a utilização de uma maior variedade de substratos porosos seria necessária.

A razão entre o diâmetro do poro e do material particulado é importante na formação do reboco particulado. Com o aumento desta razão, a tendência é de que as partículas invadam o substrato de maneira mais severa, gerando uma torta interna mais espessa. No entanto, o aparato experimental utiliza substratos porosos com pequena espessura

para estudar o fenômeno de filtração, impossibilitando análises deste viés nos experimentos propostos.

A revisão da literatura revela que, dentre as propriedades do substrato, a permeabilidade é crítica na quantidade de filtrado obtida, sendo que quanto mais permeável o meio poroso, maior a fuga de fluido detectada. Conforme discutido na seção 4.1, todos os filtros apresentaram a mesma ordem de grandeza para a estimativa da permeabilidade, portanto nenhuma análise pode ser efetuada sobre a influência desta propriedade nos resultados apresentados. O desenvolvimento de uma célula de teste que permita a utilização de substratos mais espessos, e a confecção/utilização de substratos com permeabilidade controlada são sugestões para trabalhos futuros.

De maneira semelhante ao observado para o volume de filtrado, as características do reboco obtido para cada um dos filtros não devem variar significativamente. Ao término do experimento, o fluido em excesso é retirado da célula e então o reboco é removido e analisado.

A Tabela 4.23 apresenta os resultados obtidos, incluindo o volume de filtrado, para os experimentos de filtração realizados com os três substratos apresentados. Os resultados individuais de cada experimento da triplicata realizada para cada substrato estão disponíveis no Apêndice C. Neste sentido, vale destacar que no Apêndice C também são apresentados os valores de massa específica de cada filtrado. Optou-se por inseri-los somente no apêndice devido à pequena variação apresentada, sendo todos muito próximos de 1 g/cm³.

Tabela 4.23 – Resultados de filtração para as configurações A1, A2 e A3.

Configuração	A1	A2	A3
Aspecto do reboco		Consolidado	
V_f [cm³]	55,10 ± 3,00	60,10 ± 3,61	54,10 ± 2,00
M_{wc} [g]	60,00 ± 3,61	61,23 ± 6,56	58,45 ± 4,36
M_{dc} [g]	26,87 ± 1,46	27,73 ± 2,65	26,40 ± 1,39
E_m [mm]	9,05 ± 0,30	9,13 ± 0,68	8,65 ± 0,18
T_{mc} [mm]	9,49 ± 0,59	9,64 ± 1,08	9,21 ± 0,77

Os experimentos apresentaram repetibilidade, evidenciada pelo pequeno desvio padrão calculado para a triplicata de cada experimento proposto. Conforme era esperado, não houve grande variação entre os dados para os três elementos filtrantes,

no entanto vale destacar que a configuração A3, que resultou num menor volume de filtrado, também formou o reboco menos espesso. Tal resultado condiz com o esperado, pois quanto menos fluido é perdido para a formação, menos partículas são retidas pelo reboco e menor é o crescimento.

A espessura mensurada para cada experimento foi comparada com o valor calculado através da Equação (2.20), proposta por Dewan e Chenevert (2001):

$$T_{mc} = \frac{m_{dc}}{A(1-\phi_c)\rho_s} \quad (2.20)$$

Os resultados ficaram próximos dos valores calculados, com desvios da ordem de 5%. Os autores também propõem uma equação para estimar a permeabilidade do reboco, Eq. (2.19), mas esta depende da taxa de filtração ao final do experimento. De maneira a estimar este parâmetro, é necessário acompanhar a evolução do volume de filtrado ao longo do experimento, contudo, a balança utilizada não permitia detectar a variação da massa de filtrado ao final do experimento, pois esta era menor que a resolução da balança, o que resultaria em uma taxa de filtração calculada de aproximadamente zero.

A equação proposta pelos autores também utiliza a viscosidade do filtrado para estimar a permeabilidade, sendo que muitos estudos consideram que somente água é recolhida na saída da seção teste, portanto utilizam a viscosidade como um (1) cP, porém os próximos resultados deste trabalho evidenciam que o filtrado para os experimentos propostos é de fato um fluido não newtoniano.

O equipamento FANN 35A foi utilizado para determinar a curva de viscosidade das amostras de filtrado logo após os experimentos de filtração. As curvas plotadas são apresentadas na Figura 4.12 e comparadas com o resultado para o fluido de referência preparado sem a presença de material particulado, pois o filtrado também não apresenta suspensão de material sólido.

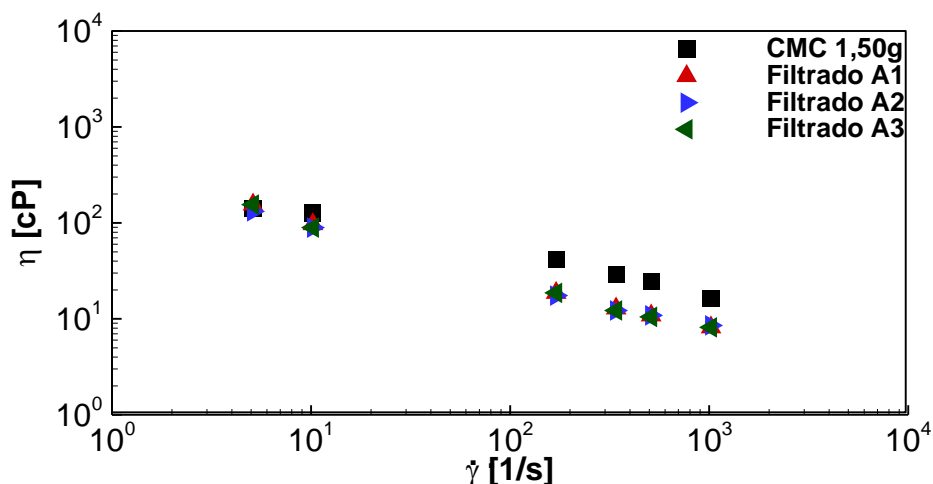


Figura 4.12 – Curva de viscosidade por taxa de cisalhamento para os filtrados A1, A2 e A3 em comparação com a formulação CMC 1,50g.

A partir do resultado fica evidenciado que os filtrados apresentam comportamento não newtoniano semelhante ao fluido base, porém os valores de viscosidade obtidos estão deslocados da curva original. Este fenômeno indica que uma quantidade do aditivo polimérico é retida pelo reboco, provocando uma redução na viscosidade do filtrado.

Ainda é possível observar que as curvas obtidas para os três filtrados são muito próximas, resultado esperado devido à pequena variação entre os filtros utilizados. Considerando que esta análise tem um viés mais qualitativo do comportamento reológico do filtrado, nenhum ajuste foi realizado para as curvas de viscosidade dos filtrados. Os resultados de tensão e viscosidade para cada medição são apresentados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Dados de tensão e viscosidade para os filtrados A1, A2 e A3 obtidos com o Fann 35A.

Filtrado	A1		A2		A3	
	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]
5,11	0,60	116,58	0,64	124,35	0,60	116,58
10,21	0,87	85,49	0,83	81,60	0,91	89,38
170,23	2,98	17,49	2,98	17,49	2,98	17,49
340,46	4,09	12,01	4,13	12,12	4,21	12,36
510,69	5,36	10,49	5,36	10,49	5,36	10,49
1021,38	8,14	7,97	8,26	8,08	8,18	8,00

O conhecimento do comportamento do filtrado é de suma importância quando as regiões afetadas possuem potencial de produção de petróleo, pois em etapas futuras será necessário remover o reboco e deslocar o fluido aprisionado para iniciar a produção, e, tanto a composição química quanto comportamento reológico irão influenciar o processo.

Tendo observado o efeito do papel filtro nos principais parâmetros de análise da filtração e na viscosidade do filtrado, a próxima análise realizada é a do aditivo polimérico utilizado. Um último detalhe a ser pontuado nesta seção é que o Apêndice D apresenta imagens dos rebocos para todos os testes, enquanto no capítulo de resultados são inseridas somente as imagens destinadas a explicar algum resultado ou procedimento.

4.7 Influência do aditivo polimérico

Os experimentos realizados com a finalidade de determinar a influência do aditivo polimérico foram categorizados com a letra B seguida por um numeral de um a oito, cujo significado é apresentado na Tabela 4.25. Os parâmetros mantidos constantes para todos os experimentos são descritos na Tabela 4.26.

Tabela 4.25 – Classificação dos fluidos para avaliação da influência do aditivo polimérico.

Configuração	Polímero	Massa adicionada em 500 cm ³ de água [g]
B1	GX	1,50
B2		3,00
B3	CMC	0,75
B4		1,50
B5		3,00
B6	CBP	1,50
B7		3,00
B8		6,00

Tabela 4.26 – Parâmetros utilizados para os experimentos com fluidos categoria B.

Pressão [psi]	100
Temperatura [°C]	20
Tempo [min]	30
PF	50
Particulado	CaCO ₃ FC
C _s [g/cm ³]	0,20

O aumento da concentração de aditivo polimérico aumenta a viscosidade do fluido, como apresentado na Seção 4.3. Portanto, a expectativa é que as configurações com maior quantidade de polímero apresentem menor quantidade de filtrado. A Figura 4.13 apresenta o volume de filtrado obtido para as oito configurações analisadas.

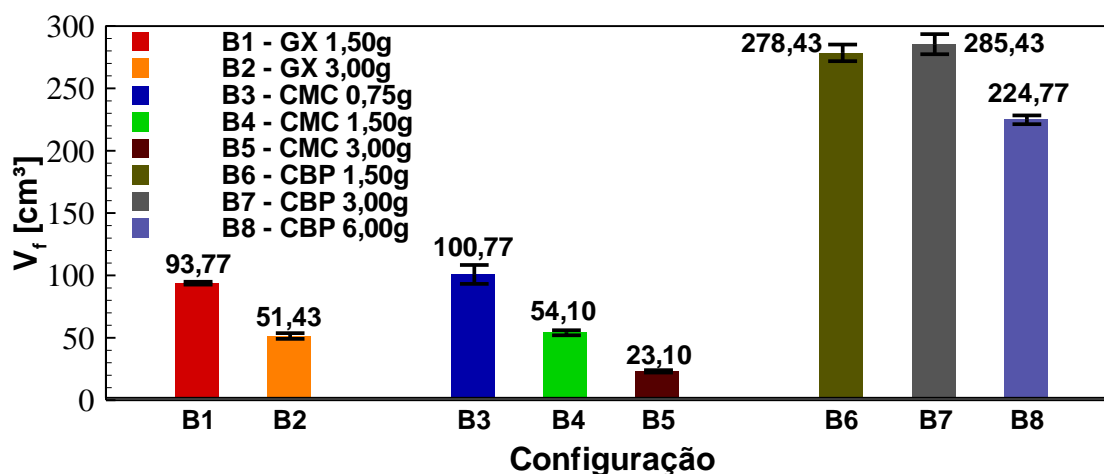


Figura 4.13 – Volume de filtrado para as configurações B1 a B8, variando a concentração e o aditivo polimérico.

Iniciando a análise pelas configurações com carbopol como polímero, B6, B7 e B8. Estes experimentos foram os únicos que precisaram ser encerrados antes dos trinta minutos previstos, pois toda a mistura contida na célula de teste foi esgotada rapidamente, tendo sido necessário pouco mais de um minuto para as configurações B6 e B7 e dois minutos para B8. Este fenômeno pode ser explicado pelo comportamento da solução de carbopol em água, que não apresenta características não newtonianas na faixa de pH testado, conforme discutido na Seção 4.3. A interação entre o CaCO₃ FC e o fluido preparado com CBP também pode ter influenciado este resultado, pois a mistura não apresentou uniformidade, com a formação de aglomerados de partículas e aspecto pastoso.

Enquanto os resultados para o carbopol se mostraram inconclusivos devido ao preparo da solução polimérica, tanto as configurações com GX (B1 e B2) e CMC (B3, B4 e B5) apresentaram um menor volume de filtrado com o aumento da concentração do polímero.

Tanto a goma xantana quanto o CMC são agentes viscosificantes, que modificam o comportamento reológico do fluido adicionado, porém, o polímero carboximetilcelulose também é utilizado como redutor de filtrado. Neste contexto, analisando o volume de filtrado na Figura 4.13, é observado que, quando comparado à configuração com mesma concentração de GX, as misturas de carbonato de cálcio em CMC obtiveram melhores resultados no combate à perda de circulação, reduzindo o volume de filtrado. Esse comportamento, da mesma maneira que o comportamento reológico do fluido, é influenciado pelas diferenças entre as cadeias poliméricas de cada aditivo.

A Tabela 4.27 apresenta os resultados de filtração para as configurações à base de goma xantana. O aumento da concentração do aditivo polimérico resultou num menor volume de filtrado, o que implicaria num menor acúmulo de partículas e, portanto, numa menor espessura do reboco formado. Tal conclusão é verificada pelos resultados apresentados.

O aumento da concentração de GX provocou uma redução na espessura do reboco, uma vez que menos fluido percola o substrato poroso e, por consequência, menos partículas são retidas para formar a torta de filtração. Ainda no que concerne à espessura, é possível perceber que, para B1, as espessuras medida (E_{mc}) e calculada (T_{mc}) apresentaram concordância nos resultados. Porém, com o aumento da concentração (B2), o valor mensurado foi superior ao estimado. É possível que a equação utilizada seja inadequada para representar pequenas espessuras. Outro efeito que também pode ter ocorrido é a deposição não uniforme do material particulado ou até mesmo uma tendência de assentamento das partículas em repouso, provocando o aumento da espessura nas extremidades da torta.

Tabela 4.27 – Resultados de filtração para as configurações preparadas com GX.

Configuração	B1	B2
Aspecto do reboco	Consolidado	
V_f [cm ³]	93,77 ± 1,15	51,43 ± 2,31
M_{wc} [g]	57,78 ± 1,53	35,45 ± 1,00
M_{dc} [g]	26,00 ± 0,44	15,27 ± 0,60
E_m [mm]	9,32 ± 0,23	7,02 ± 0,15
T_{mc} [mm]	9,12 ± 0,38	5,69 ± 0,26

Analisando a razão entre a massa seca e a úmida do reboco, observa-se que, para as duas concentrações, esta razão apresenta valor próximo de 43~44%. Isto pode ser uma indicação que o aumento da quantidade de polímero não modifique de maneira significativa a quantidade de água percentual em cada torta formada.

As configurações preparadas com CMC (B3, B4 e B5) também obtiveram razão entre as massas na faixa de 40 a 45%. Os resultados de filtração para estas amostras são apresentados na Tabela 4.28. O fato do percentual de água aprisionado no reboco ser semelhante para os dois experimentos levanta a hipótese desta razão ser quase independente do polímero utilizado ou da concentração de aditivo polimérico. Esta mesma análise será realizada nos experimentos com classificação C (concentração do aditivo particulado) e D (material das partículas) de maneira a avaliar se algum desses parâmetros influencia de maneira mais significativa a quantidade de água retida.

Tabela 4.28 - Resultados de filtração para as configurações preparadas com CMC.

Fluido	B3	B4	B5
Aspecto do reboco		Consolidado	
V_f [cm³]	100,77 ± 7,57	54,10 ± 2,00	23,10 ± 1,00
M_{wc} [g]	94,05 ± 4,41	58,45 ± 4,36	19,78 ± 1,53
M_{dc} [g]	49,20 ± 5,41	26,40 ± 1,39	8,13 ± 0,76
E_m [mm]	15,93 ± 0,29	8,65 ± 0,18	4,37 ± 0,52
T_{mc} [mm]	13,92 ± 0,71	9,21 ± 0,77	3,23 ± 0,23

Semelhante ao observado para goma xantana, o aumento da concentração de CMC resultou num reboco de menor espessura. Não obstante, para a configuração B4 a espessura estimada apresentou concordância com o valor mensurado, porém, a estimativa da espessura para B3 e B5 obteve-se um valor inferior ao experimental.

Comparativamente às configurações com GX, pode-se afirmar que as misturas preparadas com CMC são mais eficientes no combate à perda de circulação para uma formação porosa, pois apresentaram menores volumes de filtrado e, por consequência, rebocos mais finos. No que diz respeito ao percentual de água retida pela torta, nenhuma influência significativa dos polímeros foi detectada.

A Tabela 4.29 apresenta os resultados de filtração para as configurações preparadas com carbopol.

Tabela 4.29 - Resultados de filtração para as configurações preparadas com CBP.

Fluido	B6	B7	B8
Aspecto do reboco		Consolidado	
V_f [cm ³]	278,43 ± 6,66	285,43 ± 8,02	225,10 ± 3,51
M_{wc} [g]	168,78 ± 4,16	168,78 ± 4,04	188,45 ± 9,17
M_{dc} [g]	78,23 ± 1,56	84,20 ± 3,40	77,83 ± 3,36
E_m [mm]	26,02 ± 0,25	24,43 ± 0,63	31,43 ± 1,54
T_{mc} [mm]	26,34 ± 1,08	25,54 ± 0,91	30,69 ± 1,56

A análise da influência se limita à estimativa da espessura e a quantidade de água retida pelo reboco, pois todas as formulações foram ineficientes no combate à perda de circulação. A razão entre as massas do reboco apresentou valores entre 45 e 50% e a estimativa da espessura concordou com o valor medido para todas as concentrações de CBP.

Na sequência desta seção são apresentadas as curvas de viscosidade para os filtrados em comparação com os fluidos preparados sem adição de material particulado. Com o objetivo de não poluir demasiadamente a imagem, os dados são plotados para cada aditivo polimérico individualmente. Na Figura 4.14 são apresentadas as curvas de viscosidade para os fluidos formulados com GX, sendo os pontos cheios as formulações de referência e os símbolos vazios referentes aos filtrados. Os quadrados são utilizados para representar a concentração de 1,50g, enquanto os triângulos indicam os dados para a concentração de 3,00g. Este padrão será utilizado na análise para os outros dois aditivos poliméricos.

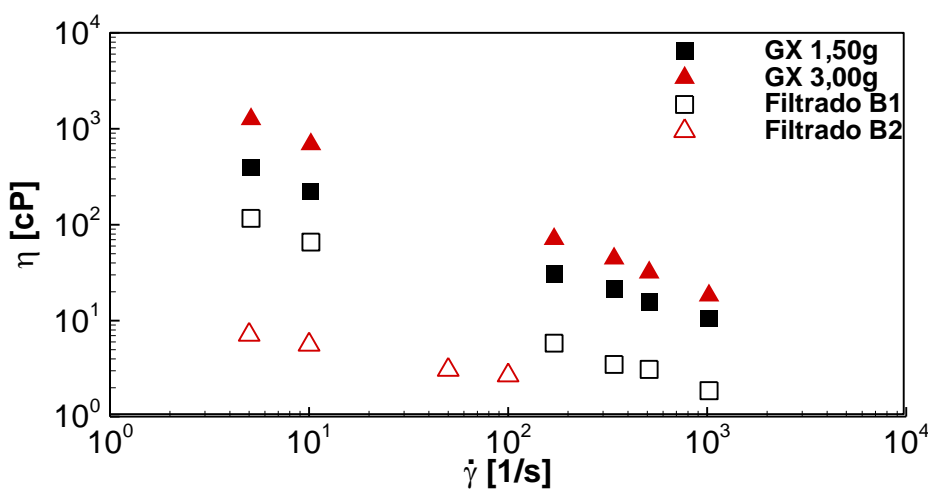


Figura 4.14 – Curva de viscosidade para as configurações B1 e B2 em comparação com os fluidos GX 1,50g e GX 3,00g.

Comparando os resultados para a menor concentração de polímero é notável que o filtrado apresenta comportamento não newtoniano, porém a curva de viscosidade foi deslocada da original, indicação de que apenas uma fração do polímero está sendo retido. Uma explicação para esta queda é que nos momentos iniciais de filtração, o reboco ainda não está consolidado, permitindo a passagem de uma fração significativa das moléculas do polímero. Porém, com o passar do tempo, a torta vai se tornando mais eficiente em reduzir a taxa de filtração e em reter o aditivo polimérico.

O filtrado B2 apresentou um resultado diferente dos outros fluidos, pois a curva foi deslocada, porém não apresenta mais um comportamento claramente não newtoniano. Esta amostra também foi testada no reômetro rotacional, comprovando o resultado obtido. O comportamento observado foi muito próximo de um fluido newtoniano, com a viscosidade sendo pouco alterada com o aumento da taxa de cisalhamento. Não obstante, turbulência na medição de tensão foi detectada para taxas mais altas, como reportado na Seção 4.3. Este resultado indica uma alta taxa de filtração do polímero adicionado que pode estar relacionado com a hipótese do fluido preparado com 3,00 gramas de goma xantana possuir características viscoplásticas. As partículas e as cadeias poliméricas formam um reboco pouco permeável, que é eficiente em reter o aditivo polimérico. Os dados de tensão e viscosidade obtidos nos experimentos estão organizados na Tabela 4.30.

Tabela 4.30 - Dados de tensão e viscosidade para os filtrados B1 e B2 obtidos com o Fann 35A e com o reômetro rotacional.

Filtrado B1			Filtrado B2		
$\dot{\gamma}$ [1/s]	Tensão [Pa]	η [cP]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	Tensão [Pa]	η [cP]
5,11	0,60	116,58	5	0,036	7,13
10,21	0,67	66,06	10	0,056	5,63
170,23	0,99	5,83	50	0,15	3,08
340,46	1,19	3,50	100	0,27	2,69
510,69	1,59	3,11	500	-	-
1021,38	1,91	1,87	1000	-	-

Este comportamento para a maior concentração de aditivo polimérico também é esperado quando CMC é utilizado, pois este também foi eficiente na formação de um reboco pouco permeável. As curvas de viscosidade para as configurações formuladas com carboximetilcelulose são apresentadas na Figura 4.15. O modelo do gráfico

apresentado segue o mesmo que para os fluidos à base de GX (símbolos cheios para formulações de referência e vazados para filtrados, quadrados para 1,50g, delta para 3,00g e gradiente para 0,75g).

Os resultados são muito semelhantes aos observados para os filtrados B1 e B2. Para a concentração mais baixa de CMC, o filtrado continuou com comportamento pseudoplástico, porém com menores valores de viscosidade. Para o filtrado B5, a variação da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento imposta é consideravelmente inferior, semelhante ao detectado para o filtrado B2, contudo não foi detectada turbulência na medição da viscosidade para B5. Vale ressaltar que, tanto para o filtrado B2 quanto para o B5, o reômetro rotacional foi utilizado para obtenção dos dados devido ao baixo volume disponível para realização dos experimentos no Fann. Os dados de tensão e viscosidade obtidos nos testes são apresentados na Tabela 4.31.

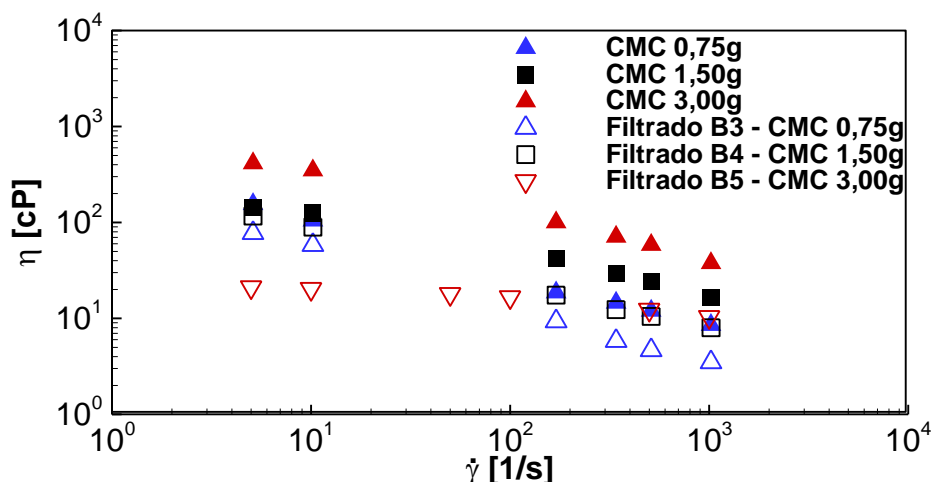


Figura 4.15 - Curva de viscosidade para os filtrados B3, B4 e B5 em comparação com as formulações CMC 0,75g, 1,50g e 3,00g.

Tabela 4.31 - Dados de tensão e viscosidade para os filtrados B3, B4 e B5 obtidos com o Fann 35A e com o reômetro rotacional.

$\dot{\gamma}$ [1/s]	Filtrado B3		Filtrado B4		Filtrado B5		
	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	Tensão [Pa]	η [cP]
5,11	0,40	77,72	0,60	116,58	5	0,11	21,20
10,21	0,60	58,29	0,91	89,38	10	0,20	20,36
170,23	1,59	9,33	2,98	17,49	50	0,90	17,98
340,46	1,98	5,83	4,21	12,36	100	1,67	16,67
510,69	2,38	4,66	5,36	10,49	500	6,16	12,33
1021,38	3,57	3,50	8,18	8,00	1000	10,36	10,36

As curvas de viscosidade obtidas para os filtrados B6, B7 e B8 são apresentadas na Figura 4.16. Da mesma maneira que foi efetuado para os dados apresentados na Seção 4.3, os pontos de instabilidade de medição foram observados. Os dados mostram uma pequena variação na viscosidade do filtrado, porém isto não necessariamente significa que uma pequena fração do polímero foi retida pelo reboco. Considerando que a filtração destas configurações é muito rápida e que a formulação do carbopol apresentou problemas não é possível avaliar os desvios apresentados entre as curvas.

Os dados de tensão e viscosidade obtidos para os filtrados B6, B7 e B8 são apresentados na Tabela 4.32.

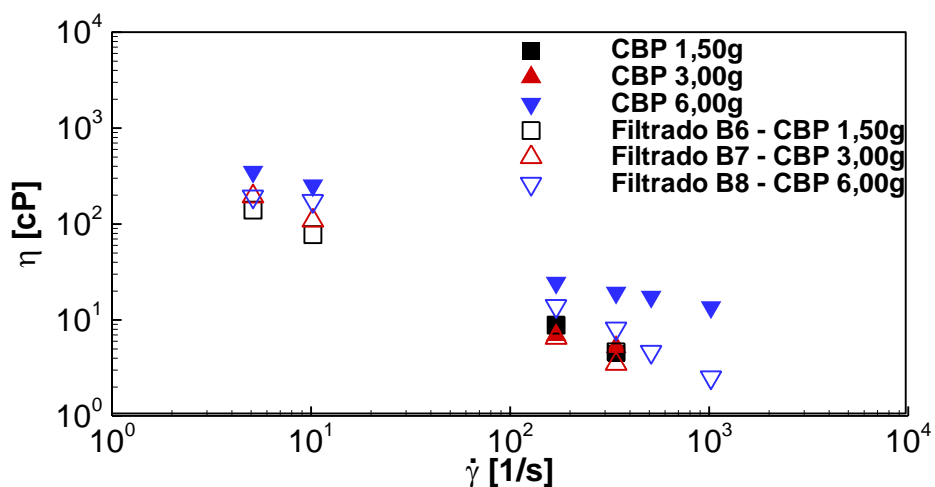


Figura 4.16 - Curva de viscosidade para os filtrados B6, B7 e B8 em comparação com as formulações CBP 1,50g, 3,00g e 6,00g.

Tabela 4.32 - Dados de tensão e viscosidade para os filtrados B6, B7 e B8 obtidos com o Fann 35A.

$\dot{\gamma}$ [1/s]	Filtrado B6		Filtrado B7		Filtrado B8	
	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]
5,11	0,71	139,89	0,99	194,30	0,99	194,30
10,21	0,79	77,72	1,11	108,81	1,79	174,87
170,23	1,51	8,86	1,11	6,53	2,38	13,99
340,46	1,59	4,66	1,19	3,50	2,78	8,16
510,69	-	-	-	-	2,38	4,66
1021,38	-	-	-	-	2,58	2,53

A próxima seção deste trabalho é dedicada a avaliar a influência da concentração do material particulado no processo de filtração.

4.8 Influência da concentração de LCM

Os experimentos realizados com a finalidade de determinar a influência da concentração do aditivo particulado foram categorizados com a letra C seguida por um numeral de um a cinco, cujo significado é apresentado na Tabela 4.33. Os parâmetros mantidos constantes para todos os experimentos são descritos na Tabela 4.34.

Tabela 4.33 – Configurações para avaliação da influência da concentração do aditivo particulado.

Configuração	Concentração [g/cm ³]
C1	0,10
C2	0,15
C3	0,20
C4	0,30
C5	0,40

Tabela 4.34 – Parâmetros utilizados para os experimentos com objetivo de avaliar o efeito da concentração de LCM.

Pressão [psi]	100
Temperatura [°C]	20
Tempo [min]	30
Elemento filtrante	50
Aditivo polimérico	CMC
C _p [lb/bbl]	1,05
m _p [g/0,5L]	1,50
Particulado	CaCO ₃ FC

O aumento da concentração de material particulado aumenta a disponibilidade de material para constituir o reboco, porém é possível que uma grande quantidade de partículas dificulte a deposição, resultando em um reboco mais espesso e mais permeável e, por consequência, num maior volume de filtrado. A Figura 4.17 apresenta o volume de filtrado obtido para as cinco configurações analisadas.

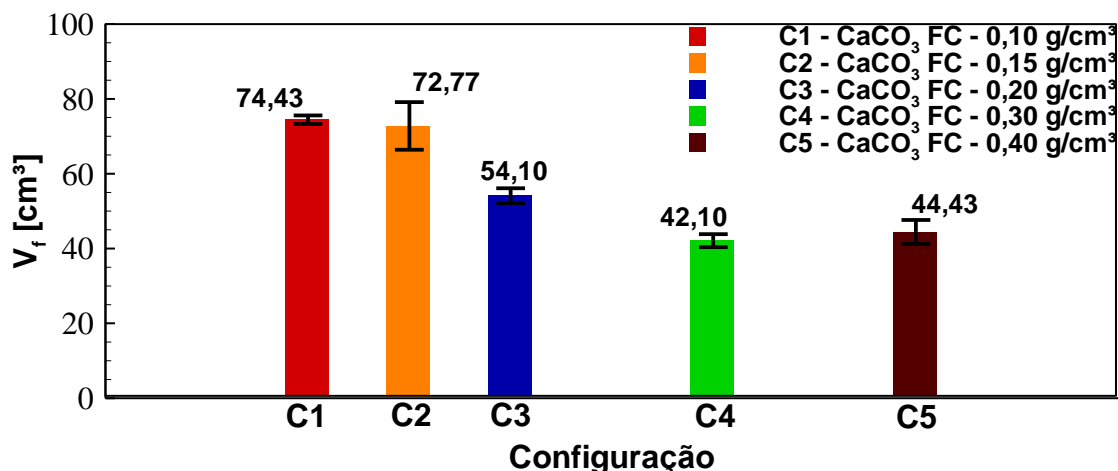


Figura 4.17 – Volume de filtrado para as configurações C1 a C5, todas utilizando o LCM CaCO₃ FC.

Não foi detectada uma variação significativa do volume de filtrado entre as configurações C1 e C2, porém, com o aumento gradual da concentração do material particulado (C3 e C4), uma tendência de redução no volume de fluido coletado começa a aparecer. A maior disponibilidade de material para constituir o reboco favorece a deposição, permitindo a consolidação da torta de filtração de maneira mais rápida.

No entanto, a configuração C5 (maior concentração de LCM) não apresentou o menor volume de filtrado. Contrariando a expectativa, houve um pequeno aumento no valor mensurado, que pode significar a existência de uma concentração crítica, a partir da qual o aumento da concentração de sólidos tem pouca influência no combate à perda de circulação. Neste contexto, mais experimentos com concentrações intermediárias e superiores são necessários para verificar qual a tendência de comportamento. Porém, a concentração de 0,4 g/cm³ (C5) é superior a valores normalmente utilizados no combate à perda de circulação e, devido ao teor muito elevado de aditivo, a agitação da suspensão pode não ser efetiva na homogeneização da mistura.

A Tabela 4.35 apresenta os resultados de filtração para todas as cinco configurações. Com exceção de C5, a espessura medida (E_{mc}) e a estimada (T_{mc}) apresentaram boa aproximação, com valores próximos e pequena variação, porém, a evolução da massa e espessura dos rebocos com o aumento da concentração de aditivo particulado não foi uniforme.

Tabela 4.35 – Resultados de filtração para as configurações C1 a C5.

Configuração	C1	C2	C3
Aspecto do reboco		Consolidado	
V_f [cm³]	74,43 ± 1,15	72,77 ± 6,35	54,10 ± 2,00
M_{wc} [g]	60,45 ± 5,20	71,12 ± 2,31	58,45 ± 4,36
M_{dc} [g]	25,90 ± 2,95	30,83 ± 0,75	26,40 ± 1,39
E_m [mm]	9,92 ± 0,73	11,27 ± 0,58	8,65 ± 0,18
T_{mc} [mm]	9,72 ± 0,74	11,38 ± 0,51	9,21 ± 0,77
Configuração	C4	C5	
Aspecto do reboco		Consolidado	
V_f [cm³]	42,10 ± 1,73	44,43 ± 3,21	
M_{wc} [g]	63,78 ± 2,52	95,78 ± 7,51	
M_{dc} [g]	30,37 ± 1,63	46,43 ± 5,78	
E_m [mm]	9,67 ± 0,35	12,50 ± 0,83	
T_{mc} [mm]	9,85 ± 0,54	14,67 ± 0,86	

Analisando os dados da Tabela 4.35, é possível perceber que, entre C3 e C5, ocorreu o aumento da massa e da espessura do reboco, apesar da redução do volume de filtrado. Este é um indicativo de que mesmo com a formação de uma torta menos permeável, a alta concentração de particulado favorece a deposição, resultando em maiores valores para a massa e espessura. Estes resultados corroboram a hipótese levantada da existência de um intervalo de concentração crítica, pois, analisando C4 e C5, não há uma variação significativa do volume de filtrado coletado, porém o reboco formado é mais espesso e contém uma maior quantidade de material particulado.

Analisando os resultados para os rebocos formados por C2 e C3, o comportamento esperado foi detectado, haja vista que o incremento na concentração resultou em um menor volume de filtrado, e, portanto, em menores taxas de filtração, formando tortas menos espessas e mais leves. Porém, a configuração C1, que apresentou volume de filtrado semelhante à C2, formou um reboco mais fino e mais leve que este. Este resultado pode ter sido ocasionado por um elevado volume de filtrado nos momentos iniciais do experimento, antes da formação e consolidação do reboco. A menor concentração do aditivo reduz a taxa de deposição do material particulado, propiciando uma maior vazão de fuga nos momentos iniciais. De maneira a verificar este fenômeno, o acompanhamento do volume de filtrado ao longo de toda a duração do experimento é recomendado.

Os diferentes comportamentos e tendências detectados evidenciam a complexidade do fenômeno. Ao contrário dos resultados analisados para as configurações A e B, os dados obtidos não apresentaram um padrão nítido, indicando que as interações fluido-partícula, partícula-partícula, parede-partícula e substrato-partícula sofrem intensa influência da concentração deste aditivo, dificultando a análise deste parâmetro.

Por fim, a razão entre as massas do reboco seco e úmido permaneceram na faixa de 40 a 50%, sendo este quociente um pouco maior para as configurações C4 e C5.

Na Figura 4.18 são apresentadas as curvas de viscosidade para os filtrados C1 a C5 em comparação com a formulação de referência CMC 1,50g.

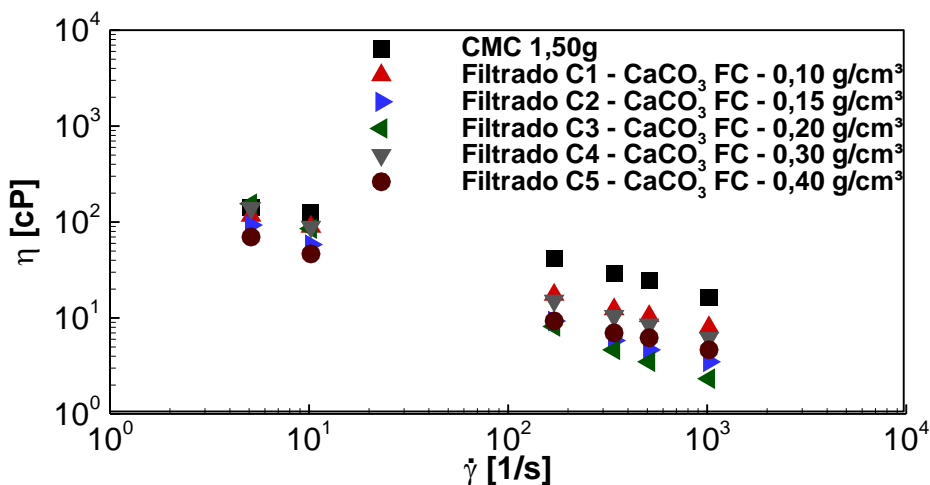


Figura 4.18 – Curva de viscosidade para os filtrados C1 a C5 em comparação com a formulação de referência CMC 1,50g.

Todos os filtrados apresentaram comportamento não newtoniano e tiveram as curvas deslocadas devido à retenção de material polimérico pelo reboco formado. Nenhuma tendência quanto ao deslocamento apresentado foi detectada. O fluido com comportamento mais próximo da formulação CMC 1,50g foi o filtrado C1, indicando a menor retenção de aditivo polimérico. De maneira semelhante à análise realizada para os parâmetros do reboco, identifica-se que com o aumento da concentração de C1 para C2, a curva de viscosidade se afasta significativamente da formulação de referência. Porém, tal comportamento não é detectado para os filtrados C3 e C4. Os dados de

tensão e viscosidade obtidos para a construção das curvas são apresentados na Tabela 4.36.

Tabela 4.36 – Dados de tensão e viscosidade para os filtrados C1 a C5 obtidos com o Fann 35A.

Filtrado	C1		C2		C3	
	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]
5,11	0,60	116,58	0,48	93,26	0,79	155,44
10,21	0,91	89,38	0,60	58,29	0,87	85,49
170,23	2,98	17,49	1,59	9,33	1,39	8,16
340,46	4,21	12,36	1,98	5,83	1,59	4,66
510,69	5,36	10,49	2,38	4,66	1,79	3,50
1021,38	8,18	8,00	3,57	3,50	2,38	2,33

Filtrado	C4		C5	
	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]
5,11	0,71	139,89	0,36	69,95
10,21	0,91	89,38	0,48	46,63
170,23	2,58	15,16	1,59	9,33
340,46	3,57	10,49	2,38	6,99
510,69	4,37	8,55	3,18	6,22
1021,38	6,35	6,22	4,76	4,66

A próxima seção é dedicada a avaliar a influência do tipo de aditivo particulado utilizado, mantendo a concentração constante.

4.9 Influência do tipo de LCM

Os experimentos realizados com a finalidade de determinar a influência da natureza do aditivo particulado foram categorizados com a letra D seguida por um numeral de um a oito, cujo significado é apresentado na Tabela 4.37. Os parâmetros mantidos constantes para todos os experimentos são descritos na Tabela 4.38.

Tabela 4.37 – Configurações D1 a D8 para avaliação da influência do tipo de aditivo particulado.

Configuração	Particulado
D1	CaCO ₃ FC
D2	CaCO ₃ MO
D3	MEV
D4	APU
D5	CaCO ₃ FC (75g) + MEV (75g)
D6	CaCO ₃ FC (75g) + APU (75g)
D7	MEV (75g) + APU (75g)
D8	CaCO ₃ FC (50g) + MEV (50g) + APU (50g)

Tabela 4.38 – Parâmetros fixos para as configurações D1 a D8.

Pressão [psi]	100
Temperatura [°C]	20
Tempo [min]	30
Elemento filtrante	50
Aditivo polimérico	CMC
C_p [lb/bbl]	1,05
m_p [g/0,5L]	1,50
C_s [g/cm ³]	0,30

Nas configurações D1 a D4 objetiva-se avaliar a eficiência de cada partícula no combate à perda de circulação, enquanto os experimentos de D5 a D8 visam comparar as misturas de diferentes materiais. Na Figura 4.19 estão representados os volumes de filtrado obtidos para cada uma das oito configurações utilizadas.

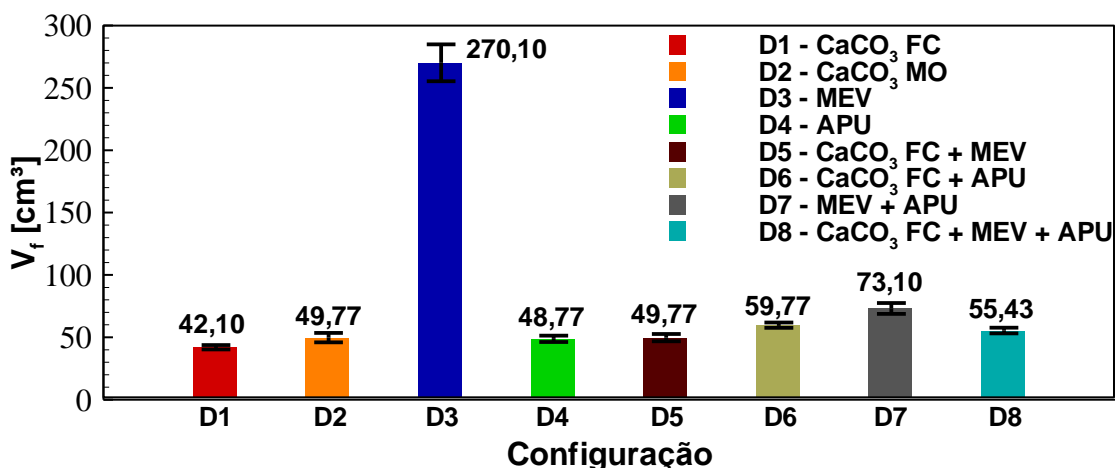


Figura 4.19 – Volume de filtrado para as configurações D1 a D8.

Analisando, inicialmente, somente as configurações contendo um único particulado (D1 a D4), o menor volume de filtrado foi obtido para o fluido com o carbonato de cálcio fino comercial como aditivo particulado (D1), porém, os resultados para o carbonato médio (D2) e as partículas de Urea (D4) foram semelhantes entre si e próximos de D1. Por outro lado, a configuração contendo somente microesferas de vidro (D3) foi a menos eficiente no combate à perda de circulação.

As partículas de vidro, por apresentarem elevada esfericidade, sedimentam de maneira organizada. Contudo, este material depositado forma um reboco com espaços vazios significativos que não são preenchidos devido ao aditivo ser incompressível e de

formato regular. Este fenômeno ocasiona uma torta com alta permeabilidade e, por consequência, um maior volume de filtrado, resultado não observado para D4, configuração que utilizou APU com faixa granulométrica aproximada, porém com formato irregular.

Neste contexto, os particulados com formato irregular foram mais eficientes no combate à perda de circulação. Ao longo do experimento, as partículas constituintes do reboco podem sofrer uma acomodação secundária devido ao gradiente de pressão, à nova camada de material depositado e à morfologia. Esse assentamento ao longo do tempo auxilia na redução da permeabilidade do reboco e é muito menos incidente no caso de partículas esféricas. Porém, uma ressalva deve ser feita, em especial para o LCM APU, pois estas sedimentam mais rapidamente que os outros aditivos. A Figura 4.20 apresenta instantes de tempo de experimentos contendo os particulados CaCO_3 FC, MEV e APU, de maneira a comparar a sedimentação destes materiais.

Enquanto nas suspensões de carbonato de cálcio, nenhuma sedimentação significativa foi detectada, o particulado de Urea sedimenta totalmente com um pouco menos de sete minutos de experimento. Desta maneira, o leito de partículas que deve ser percolado pelo fluido é muito mais espesso, e, portanto, tem uma maior resistência ao escoamento, reduzindo o volume de fluido coletado. Porém, este leito não se consolida e só é formado desta maneira para o caso de um processo de filtração vertical, que não representa as situações de perda de circulação normalmente encontradas na perfuração de poços de petróleo. Por estes motivos, a utilização deste particulado em filtrações radiais e na presença de cisalhamento não deve propiciar um combate à perda de circulação tão eficiente.

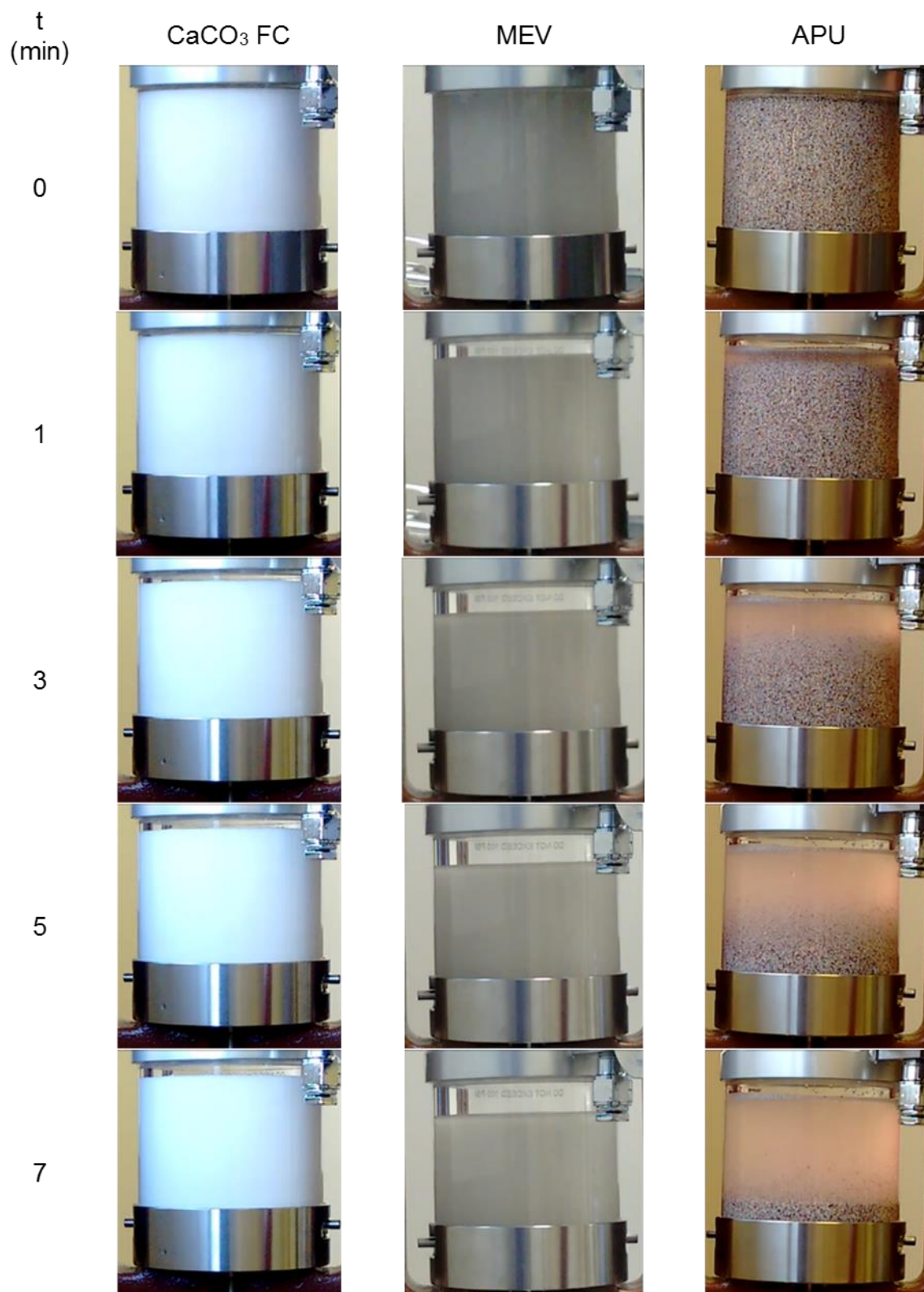


Figura 4.20 - Comparação entre a deposição dos particulados CaCO₃ FC, MEV e APU.

Um dos principais motivos para a mistura de diferentes particulados no mesmo fluido é a tentativa de reduzir a dimensão dos poros do reboco, de maneira a auxiliar na retenção de mais material e de dificultar o escoamento de fluido. Consultando a Figura 4.19 e comparando os resultados para as configurações D3 e D5, cuja única diferença é a adição de CaCO_3 FC, é observado que o volume de filtrado foi reduzido para os mesmos patamares de D1, D2 e D4.

Comparando D4 e D6, um fenômeno contrário foi detectado, pois o volume de fluido coletado foi levemente superior com a adição de CaCO_3 FC. Neste caso, a interação das partículas de carbonato com as partículas de Urea afetou a sedimentação e deposição do LCM e propiciou uma maior fuga de fluido. Uma discussão mais aprofundada desse resultado é realizada quando os parâmetros dos rebocos formados são apresentados.

Destaca-se ainda, que dentre as 4 misturas de material particulado, o maior volume de filtrado foi obtido para a configuração D7, a única sem carbonato de cálcio, corroborando a eficiência deste material no combate à perda de circulação. Contudo, dentre todos os 8 experimentos, a menor quantidade de filtrado foi obtida por D1, que utilizou somente CaCO_3 FC como aditivo particulado, indicando que a adição de outros materiais concomitantemente com o carbonato piorou o desempenho deste aditivo. Porém, analisando sobre outro ponto de vista, a adição de carbonato comercial à particulados menos eficientes no combate à perda de circulação e formação do reboco melhorou o desempenho destes materiais, reduzindo o volume de filtrado e formando tortas mais consolidadas, como será discutido em sequência.

Os resultados de filtração para as configurações com somente um aditivo particulado (D1 a D4) são apresentados na Tabela 4.39.

Tabela 4.39 – Resultados de filtração para configurações com somente um aditivo particulado (D1 a D4).

Configuração	D1	D2	D3	D4
Aspecto do reboco	Consolidado		Não consolidado	
V_f [cm³]	42,10 ± 1,73	49,77 ± 3,79	270,10 ± 14,73	48,77 ± 2,52
M_{wc} [g]	63,78 ± 2,52	81,78 ± 1,53	79,78 ± 3,06	47,78 ± 7,02
M_{dc} [g]	30,37 ± 1,63	54,47 ± 2,15	52,87 ± 6,21	21,10 ± 1,97
E_m [mm]	9,67 ± 0,35	7,55 ± 0,22	8,40 ± 0,30	6,77 ± 0,81
T_{mc} [mm]	9,85 ± 0,54	10,54 ± 0,42	10,32 ± 0,48	13,17 ± 3,09

O reboco formado por D2, apesar de ter apresentado volume de filtrado próximo de D1, resultou em uma camada de partículas com maior massa, porém mais fina. Este fato é um indicativo de compactação da torta, mas também indica que o CaCO_3 MO é mais denso que o carbonato fino. Neste contexto, outra indicação desta diferença é a estimativa da espessura, a qual utiliza a massa específica no cálculo e que, para o resultado apresentado, foi considerada igual à $2,60 \text{ g/cm}^3$, mesmo valor que para o carbonato comercial. Com o aumento da magnitude desta propriedade, a estimativa (T_{mc}) se aproxima do valor mensurado (E_{mc}).

Outro diferencial entre os dois carbonatos utilizados é a razão entre as massas do reboco, sendo esta aproximadamente 45% para o fluido D1 e 65% para D2. Este é o primeiro resultado no qual uma variação significativa nesta razão foi detectada, levantando a hipótese de que, dentre os parâmetros abordados, a composição do aditivo particulado é o parâmetro que mais influencia a umidade retida. Neste caso, a torta de filtração formada por D2 é menos espessa com menor retenção de fluido, indicando a formação de uma camada com menor porosidade.

As configurações D3 e D4 formaram rebocos não consolidados, fenômeno que dificulta a análise, haja vista que alguns dos procedimentos utilizados não podem ser efetuados da mesma maneira. Neste contexto, a Figura 4.21 apresenta tortas não consolidadas formadas pelo processo de filtração de D3 em diferentes etapas do procedimento. Inicialmente é realizada a remoção da camada depositada da célula de teste, que é então colocada em repouso sobre uma superfície plana, como ilustrado na Figura 4.21 (a). Este repouso, com duração aproximada de 20 horas, tem como função permitir que o particulado se assente e adquira um formato mais estável, situação representada na Figura 4.21 (b). Após este processo, a torta é removida para separar o excesso de material que se acomodou fora do papel filtro, ilustrado na Figura 4.21 (c). Por fim, o particulado depositado é levado ao forno para secagem, tendo como resultado o reboco apresentado na Figura 4.21 (d).

Durante este processo, qualquer mudança no procedimento, assim como nos fatores externos, pode provocar mudanças significativas nas características do reboco, em especial, na massa e espessura. Portanto, a análise da massa de particulado depositado, fração de água retida e comparação da espessura mensurada com a

calculada não permite nenhuma análise confiável, pois não há confiabilidade na obtenção destes parâmetros e com isto em mente, não será realizada para rebocos não consolidados.

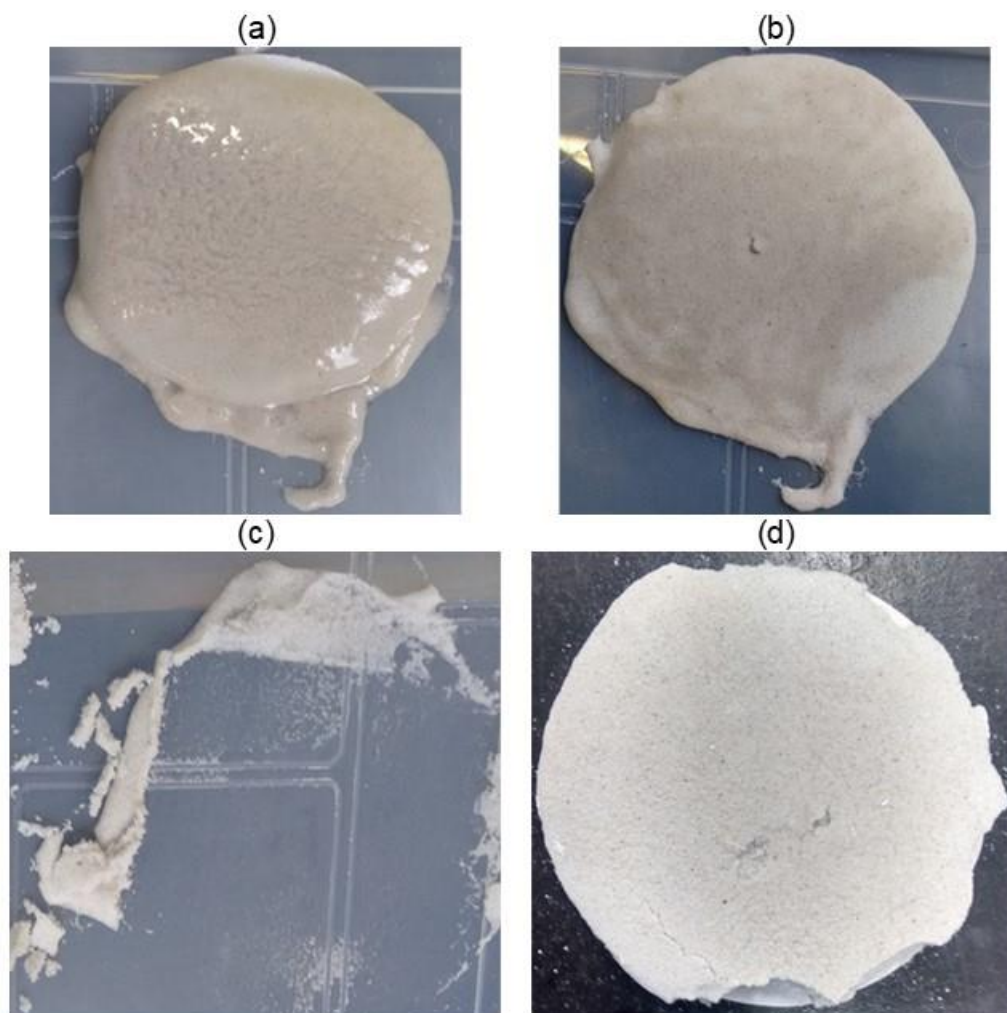


Figura 4.21 - Reboco formado pela configuração D3: (a) minutos após ser retirado da célula de teste, (b) após repouso de aproximadamente 20 horas, (c) resquício do particulado do reboco e (d) após secagem no forno.

De maneira semelhante ao apresentado para D3, a Figura 4.22 ilustra o processo para um reboco formado pela filtração de D4, sendo (a) o reboco logo após ser retirado da célula de teste, (b) após o período de repouso e (c) após a secagem. É possível perceber a separação de um filme de líquido do reboco, situação que não foi detectada quando as microesferas de vidro foram utilizadas.

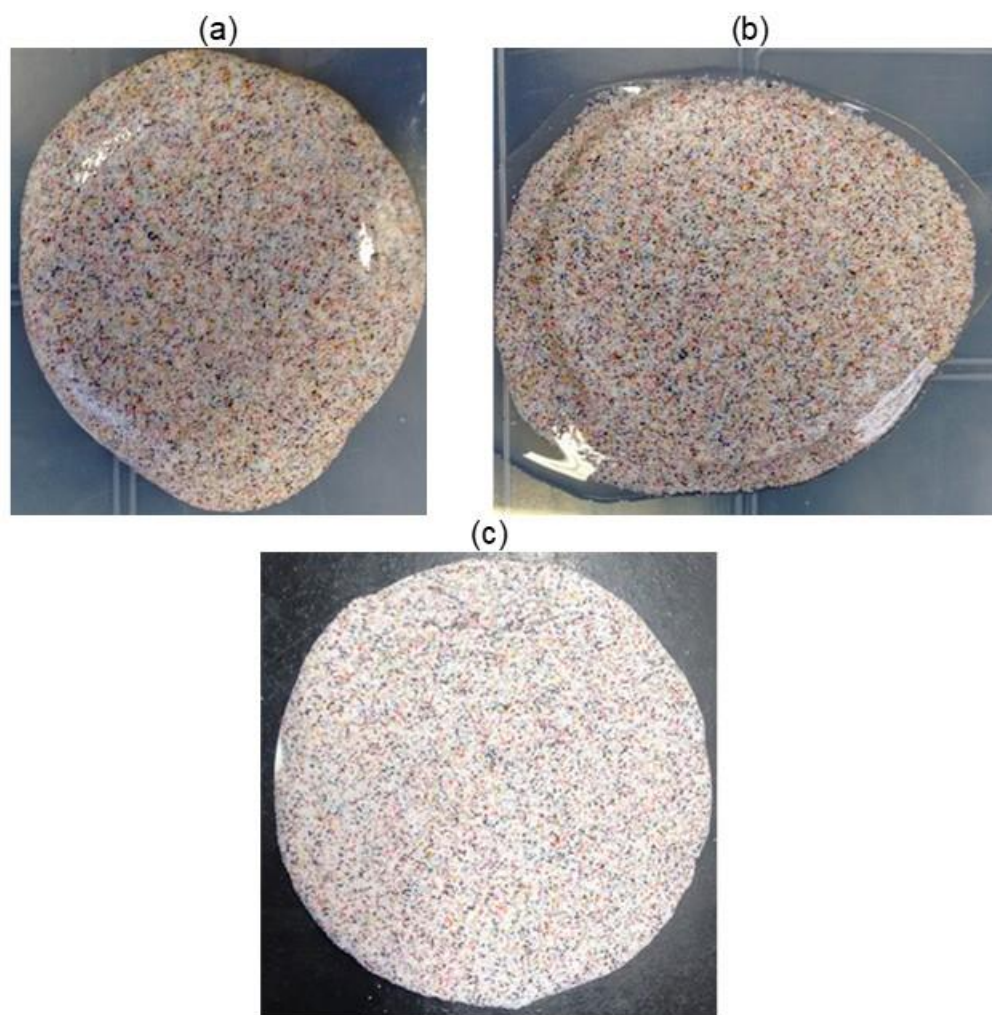


Figura 4.22 - Reboco formado pela configuração D4: (a) minutos após ser retirado da célula de teste, (b) após repouso de aproximadamente 20 horas e (c) após secagem no forno.

Antes de apresentar os resultados de filtração para as configurações com mais de um particulado (D5 a D8), uma ressalva deve ser feita quanto à estimativa da espessura do reboco, pois, conforme explicado anteriormente, este cálculo depende da massa específica do particulado. Considerando a mistura de diferentes aditivos, uma média ponderada das massas específicas de cada componente, representada pela Equação (4.1), foi realizada com o objetivo de obter um dado equivalente da mistura.

$$\rho_{eq} = \frac{m_t}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i}} \quad (4.1)$$

sendo ρ_{eq} a massa específica equivalente do aditivo particulado [g/cm^3], m_t a massa total de particulado adicionado [g], m_i a massa de cada aditivo e ρ_i a massa específica de cada constituinte particulado [g/cm^3].

Contudo, as tortas formadas não contem frações iguais de cada particulado constituinte, resultando em uma massa específica diferente da calculada e, por consequência, numa estimativa imprecisa da espessura. As massas específicas de cada particulado e o valor calculado para cada mistura são apresentados na Tabela 4.40.

Tabela 4.40 – Massa específica dos materiais particulados e estimada para as formulações com mais de um aditivo.

Particulado/configuração	ρ_{eq} estimada [g/cm^3]
CaCO ₃ FC	2,60
MEV	2,60
APU	1,50
D5	2,60
D6	1,90
D7	1,90
D8	2,09

Com esta aproximação, os resultados dos experimentos de filtração para as configurações D5 a D8 são apresentados na Tabela 4.41.

Tabela 4.41 - Resultados de filtração para as configurações com mais de um aditivo particulado (D5 a D8).

Fluido	D5	D6	D7	D8
Aspecto do reboco	Consolidado		Não consolidado	Consolidado
V_f [cm^3]	49,77 ± 2,89	59,77 ± 2,08	73,10 ± 4,36	55,43 ± 2,31
M_{wc} [g]	43,45 ± 1,00	38,12 ± 1,53	39,12 ± 9,07	24,45 ± 1,00
M_{dc} [g]	29,03 ± 0,55	20,43 ± 0,46	21,97 ± 4,82	14,20 ± 0,75
E_m [mm]	6,53 ± 0,25	6,48 ± 0,28	5,27 ± 0,57	4,40 ± 0,26
T_{mc} [mm]	5,59 ± 0,29	6,21 ± 0,29	6,27 ± 1,90	3,72 ± 0,18

Os dados apresentados na Tabela 4.41 mostram que a estimativa da espessura subestimou o valor para D5 e D8, contudo, valores próximos do mensurado foram obtidos para a configuração D6.

Apesar de D6 ter propiciado uma maior fuga de filtrado que D5, o reboco formado apresentou massa de menor magnitude e espessura semelhante. Ambas as formulações contêm a mesma quantidade de carbonato de cálcio, porém D5 também utiliza esferas de vidro como aditivo particulado, que são mais densas que o aditivo plástico adicionado em D6. Isto, em conjunto com a diferença de formato dos materiais e a interação com o carbonato modifica a relação entre o volume de filtrado e os parâmetros do reboco.

O pior desempenho no combate à perda de circulação entre as quatro misturas de particulados foi detectado para a configuração D7, único sem CaCO_3 , além de ser a única mistura que formou um reboco não consolidado. Em comparação com D1, na qual foi utilizado somente o carbonato como aditivo particulado, todas as misturas contendo este aditivo (D5, D6 e D8) formaram rebocos mais finos e leves sem provocar uma alteração de grande magnitude no volume de filtrado. A combinação com esferas de vidro (D5), as quais possuem massa específica informada semelhante ao carbonato, formou uma torta com massa seca semelhante, porém menos espessa.

O reboco mais leve e menos espesso dentre todos os experimentos foi observado para a configuração com os três aditivos particulados (D8), cuja razão entre as massas do reboco teve valor de, aproximadamente, 58%, enquanto D5 e D6 obtiveram fração de 66% e 53%, respectivamente.

Analisando somente o volume de filtrado, D1 foi a configuração mais efetiva no combate à perda de circulação. Com a mistura do aditivo utilizado em D1 com outros aditivos, uma maior perda de fluido foi detectada, sendo este aumento de, aproximadamente, 18% quando combinado com esferas de vidro, 42% com o aditivo plástico e 32% quando os três particulados foram utilizados. No entanto, os parâmetros do reboco foram significativamente modificados. De maneira geral, todas as misturas formaram rebocos mais leves, com menor espessura e com menos água retida quando comparadas com a configuração D1. Conclui-se então que, embora a mistura de outros aditivos com o carbonato de cálcio resulte numa perda de circulação superior, os

parâmetros do reboco são modificados, resultando em menores espessuras e massa de água retida.

A análise da influência do material particulado na curva de viscosidade do filtrado também são divididas entre as configurações com somente um aditivo particulado e as misturas. Desta maneira, na Figura 4.23 são apresentadas as curvas de viscosidade para os filtrados D1 a D4 em comparação com o fluido de referência CMC 1,50g.

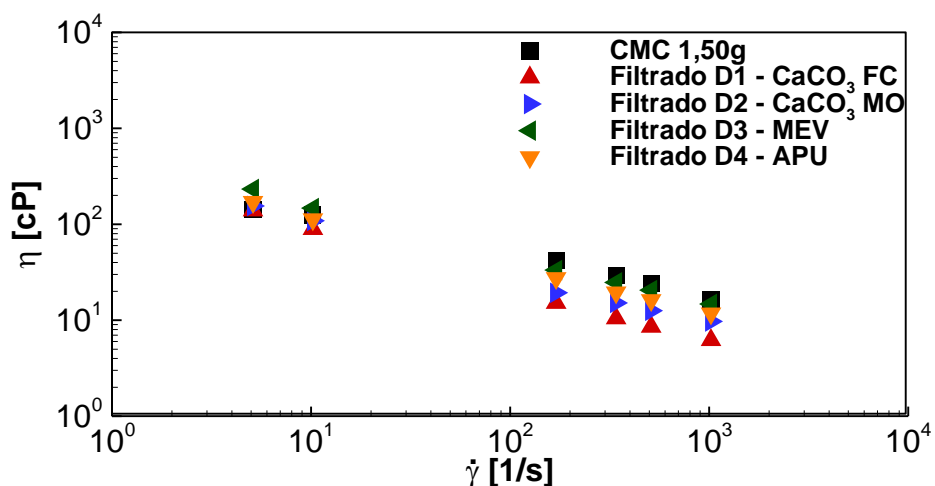


Figura 4.23 – Curva de viscosidade para as configurações com um aditivo particulado (D1 a D4) em comparação com o fluido de referência CMC 1,50g.

Ambas as configurações sem carbonato de cálcio (D3 e D4) apresentaram resultados muito semelhantes ao fluido de referência, indicando que os rebocos formados pelas esferas de vidro e pelo aditivo plástico são pouco eficientes na retenção do polímero em solução.

Ao contrário do observado para D3 e D4, ambas as curvas obtidas para os filtrados D1 e D2 desviaram da solução de CMC, sendo este afastamento mais significativo para D1, que formou um reboco mais espesso e menos permeável, favorecendo a retenção do aditivo polimérico. Os dados de tensão e viscosidade para os filtrados D1 a D4 são apresentados na Tabela 4.42.

Tabela 4.42 – Dados de tensão e viscosidade para os filtrados D1 a D4 obtidos com o Fann 35A.

Filtrado	D1		D2		D3		D4	
	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]
5,11	0,71	139,89	0,79	155,44	1,19	233,16	0,87	170,98
10,21	0,91	89,38	1,11	108,81	1,51	147,66	1,15	112,69
170,23	2,58	15,16	3,29	19,35	5,68	33,34	4,68	27,51
340,46	3,57	10,49	5,16	15,16	8,45	24,83	6,63	19,47
510,69	4,37	8,55	6,43	12,59	10,52	20,60	8,26	16,17
1021,38	6,35	6,22	9,92	9,71	15,08	14,77	12,03	11,77

As curvas de viscosidade para os filtrados das configurações D5 a D8 são apresentadas na Figura 4.24, comparativamente à formulação de referência CMC 1,50g e ao filtrado D1.

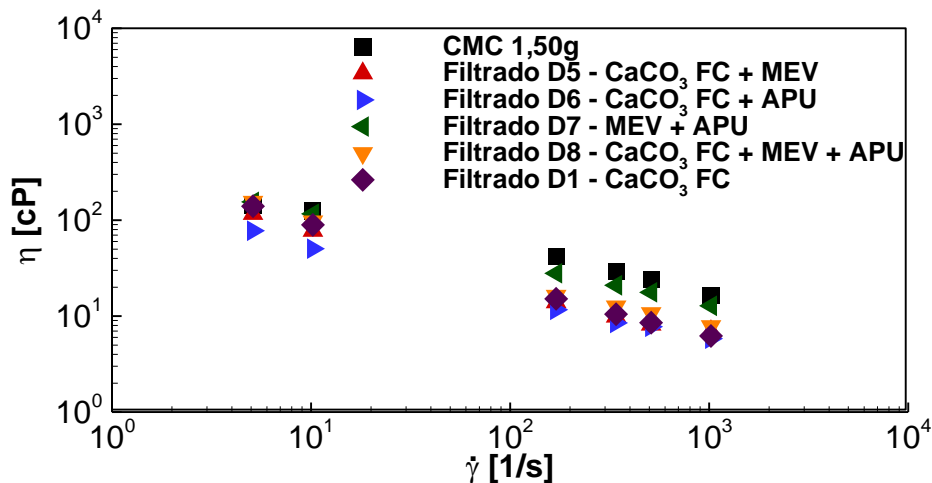


Figura 4.24 – Curva de viscosidade para os filtrados D5 a D8 em comparação com a formulação de referência CMC 1,50g e ao filtrado D1.

A configuração sem carbonato de cálcio (D7) foi a única que apresentou resultados quase idênticos ao fluido de referência, corroborando a observação anterior de que os rebocos formados com carbonato retêm parte do aditivo polimérico. O afastamento detectado para as outras configurações tem menor intensidade nas taxas de cisalhamento mais baixas e sofre influência da combinação de particulados utilizadas.

O filtrado que apresentou o maior afastamento foi obtido a partir da configuração D6, que combinou carbonato de cálcio com o aditivo plástico. Os filtrados D1, D5 e D8 possuem comportamentos muito semelhantes, apresentando curvas quase sobrepostas.

Os dados de tensão e viscosidade para os filtrados D5 a D8 são apresentados na Tabela 4.43.

Tabela 4.43 – Dados de tensão e viscosidade para os filtrados D5 a D8 obtidos com o Fann 35A.

Filtrado	D5		D6		D7		D8	
	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]	Tensão [Pa]	η [cP]
5,11	0,60	116,58	0,40	77,72	0,79	155,44	0,79	155,44
10,21	0,79	77,72	0,52	50,52	1,19	116,58	0,99	97,15
170,23	2,38	13,99	1,98	11,66	4,76	27,98	2,78	16,32
340,46	3,37	9,91	2,90	8,51	7,14	20,98	4,29	12,59
510,69	4,17	8,16	3,97	7,77	9,05	17,72	5,48	10,73
1021,38	7,14	6,99	5,95	5,83	13,10	12,82	8,02	7,85

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi investigada experimentalmente a formação de reboco em condições de filtração estática para o combate da perda de circulação em formações permeáveis.

Os experimentos foram realizados num aparato de filtração API, sendo o substrato poroso representado por um filtro de papel (PF) no fundo da célula de filtração. Uma amostra de fluido contendo material particulado é pressurizada contra o PF, forçando a passagem de fluido através do papel filtro e a retenção do material particulado.

As amostras dos ensaios de filtração foram misturas de fluidos não newtonianos com LCM's. A formulação dos fluidos foi efetuada pela adição de materiais poliméricos (GX, CMC e CBP) em água seguindo o procedimento desenvolvido na Seção 3.3.3. Foram utilizados cinco particulados (LCM's) para formação do reboco, sendo: CaCO₃ FC, CaCO₃ FO, CaCO₃ MO, MEV e APU. Destaca-se que o polímero CMC e o LCM CaCO₃ FC foram adotados como padrão para os experimentos.

A permeabilidade dos elementos filtrantes foi estimada com base no escoamento de água através do fluido e o monitoramento da vazão. Os três papéis filtro, apesar de possuírem tamanhos de poros diferentes (2,5; 2,7 e 8 µm) apresentaram permeabilidade com mesma ordem de grandeza. Ressalta-se que este procedimento é somente uma estimativa para auxiliar na análise da influência do PF na filtração.

Outro teste preliminar realizado teve como objetivo determinar o tempo de secagem ideal para rebocos. A partir dos ensaios, concluiu-se que um tempo de 5 horas à 105 ° C suficiente para remover a umidade do reboco e que após esta secagem, não houve absorção significativa de umidade da atmosfera, evidenciada pela invariância da massa do reboco ao longo de alguns dias. Contudo, também foi observado que a secagem a temperatura ambiente é possível, porém são necessários até 10 dias para evaporação de toda a umidade.

A execução de testes reológicos evidenciou que há uma discrepância entre os dados experimentais obtidos com o reômetro e com o viscosímetro Fann 35A, sendo maior para as taxas de cisalhamento mais altas. Todavia, os desvios foram semelhantes para todos os polímeros. Os fluidos com CMC apresentaram comportamento pseudoplástico e quando GX foi utilizada, os fluidos aparentaram ser viscoplásticos. As

formulações com CBP apresentaram problemas de estabilidade e medição, devido ao pH fora do intervalo de trabalho ideal. De maneira geral, as soluções preparadas com CMC apresentaram menor valor de viscosidade aparente que aquelas com GX em taxas de cisalhamento inferiores à 50 s^{-1} , a partir do qual ocorre a intersecção das curvas e a viscosidade dos fluidos com CMC é superior.

A granulometria dos aditivos particulados foi verificada com auxílio de um equipamento de difração de raios laser. Observa-se a inclusão de agentes estranhos, fora das granulometrias informadas, para os particulados CaCO_3 MO e MEV, porém em quantidade inferior à 5% da amostra. Os intervalos obtidos para o CaCO_3 FC e FO foram semelhantes entre si e com a granulometria informada, sendo o diâmetro médio do particulado fino comercial aproximadamente três vezes menor que o particulado fino operacional.

Desta maneira, foram estudadas as influências do elemento filtrante, do tipo e da concentração do aditivo polimérico, da concentração e da granulometria do LCM no processo de filtração estática e formação do reboco. A eficiência no combate à perda de circulação foi avaliada com base em parâmetros do filtrado (volume e curva de escoamento) e do reboco (espessura, massa úmida e após secagem).

Considerando que os PF utilizados não apresentam grande variação nas propriedades, a influência do elemento filtrante na formação do reboco não foi observada, pois nenhuma diferença significativa entre os volumes de filtrado e espessura para os três filtros diferentes foi detectada.

A influência do aditivo polimérico está associada ao comportamento reológico do fluido e à interação do polímero com o LCM. Para uma mesma concentração de aditivo polimérico, o CMC foi o mais eficiente no combate à perda de circulação, resultando no menor volume de filtrado. De maneira geral, o aumento da concentração de aditivo polimérico proporcionou uma redução no volume de filtrado e na espessura do reboco. Isto foi verificado para a GX e CMC, contudo não foi possível estender essa conclusão para o CBP, devido aos problemas de formulação.

O efeito da concentração de LCM está associado a maior quantidade de material particulado disponível para a constituição do reboco. O aumento da concentração de LCM reduziu o volume de filtrado, todavia uma tendência de estabilização foi detectada,

o que indica a existência de uma concentração crítica a partir da qual o volume de filtrado não varia significativamente, contrariando ao observado quanto à espessura do reboco.

A influência do tipo de LCM está relacionada com a mecânica de deposição e dos espaços intersticiais entre as partículas (poros do reboco). Dentre todos os particulados utilizados, o CaCO_3 FC obteve o menor volume de filtrado e as MEV o maior. O APU apresentou resultados satisfatórios, contudo sedimentação deste LCM foi detectada durante os ensaios, indicando que em situações dinâmicas, a eficiência em reduzir a perda de circulação seria menor.

Quando adicionados mais de um tipo de LCM ao mesmo fluido, os resultados evidenciaram que particulados ineficientes na formação de um reboco consolidado para reduzir a perda de circulação (MEV e APU) apresentaram melhor desempenho quando misturados com CaCO_3 FC. De maneira geral, os rebocos formados pela mistura de LCM's foram menos espessos, contudo o volume de filtrado, quando comparado ao CaCO_3 FC, não foi alterado de maneira significativa. A razão entre a massa do reboco seco e úmido foi estimada para todos os experimentos e apresentou valor entre 40 e 50% para a grande maioria. Contudo, o único parâmetro que influenciou esta razão de maneira significativa foi o tipo de LCM, modificando este valor para até 65% quando o reboco foi formado por mais de um LCM. Este fato, em conjunto com a menor espessura, indicou uma menor retenção de líquido, que pode ser atribuída à uma menor porosidade do reboco.

A análise reométrica evidenciou que, na maioria dos casos, o filtrado apresentou comportamento não newtoniano análogo à formulação de referência. Somente os filtrados obtidos com GX 3,00g (B2) e CMC 3,00g (B5) apresentaram comportamento próximo de um fluido newtoniano. Todos os filtrados obtidos a partir da filtração de misturas contendo CaCO_3 FC resultaram em uma curva de escoamento deslocada da formulação de referência, apresentando uma menor viscosidade para uma mesma taxa de cisalhamento, enquanto as curvas obtidas quando MEV e APU foram utilizados foram semelhantes às dos fluidos de referência.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do fato do presente trabalho ser o primeiro desenvolvido pelo LaMP - CERNN para a avaliação experimental de reboco, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

A revisão bibliográfica evidenciou que as propriedades permo-porosas do substrato influenciam significativamente a filtração, contudo, os resultados mostraram que os filtros de papel utilizados neste estudo são muito semelhantes. O prosseguimento deste trabalho pode ser efetuado pela confecção de substratos mais complexos, com controle da porosidade e permeabilidade dos elementos filtrantes.

A pressão é outro parâmetro experimental que influencia na formação do reboco, principalmente na compactação das partículas. Desta forma, estudar um intervalo maior para a pressão absoluta e para o gradiente aplicado é recomendado. Contudo, para este caso, a aquisição/confecção de uma célula de teste que permita maiores magnitudes deve ser realizada.

Outras variações que também podem ser testadas que são relevantes ao processo de perfuração são:

- fluidos não newtonianos mais complexos (e.g., viscoelásticos, tixotrópicos e fluidos de perfuração);
- diferentes morfologias de LCM;
- adaptação da célula de filtração para permitir o cisalhamento da mistura ao longo do experimento;
- monitoramento do volume de filtrado ao longo de todo o experimento.

REFERÊNCIAS

AADNOY, B. S.; LOOYEH, R. **Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design**. 1. ed. Oxford, UK: Gulf Professional Publishing, 2011.

ABRAMS, A. Mud Design To Minimize Rock Impairment Due To Particle Invasion. **Journal of Petroleum Technology**, v. 5713, p. 586–592, 1977.

ALMAGRO, S. P. B.; FRATES, C.; GARAND, J.; MEYER, A. Sealing fractures: Advances in lost circulation control treatments. **Oilfield Review Autumn**, v. 26, n. 3, p. 4–13, 2014.

ALSABA, M.; NYGAARD, R. Review of Lost Circulation Materials and Treatments with an Updated Classification. **AADE Fluids Technical Conference and Exhibition**, n. August, p. 1–9, 2014.

API. **Recommended Practice for Field Testing for Water-Based Drilling Fluids**, 2014a.

API. **Recommended practice for field-testing oil-based drilling fluids**, 2014b.

ARAÚJO, C. A. O. **Estudo da filtração cruzada em geometria cilíndrica**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, 2010.

BA, B. S.; ARAMCO, S.; MAHMOUD, M. A. SPE 163960 Different Techniques for Characterizing the Filter Cake. **SPE**, n. January, p. 28–30, 2013.

BARKMAN, J. H.; DAVIDSON, D. H. Measuring Water Quality and Predicting Well Impairment. **Journal of Petroleum Technology**, v. 24, n. 7, p. 865–873, 1972.

BENCHABANE, A.; BEKKOUR, K. Rheological properties of carboxymethyl cellulose (CMC) solutions. **Colloid and Polymer Science**, v. 286, n. 10, p. 1173–1180, 2008.

BENNION, D. B.; THOMAS, F. B.; BENNION, D. W.; BIETZ, R. F. Underbalanced Drilling and Formation Damage-Is it a Total Solution? **Journal of Canadian Petroleum Technology**, v. 34, n. 9, 1993.

BIRD, R. B.; ARMSTRONG, R. C.; HASSAGER, O. **Dynamics of polymeric liquids**. New York: John Wiley & Sons, 1987.

BOURGOYNE JR, A. T.; MILLHEIM, K. K.; CHENEVERT, M. E.; YOUNG JR, F. S. **Applied Drilling Engineering**. 2. ed. Richardson, TX: SPE, 1991.

BRANDRUP, J.; IMMERGUT, E. H.; GRULKE, E. A. **Polymer Handbook**. John Wiley & Sons, 1999.

CAENN, R.; CHILLINGAR, G. V. Petroleum Drilling fluids : State of the art. 1996.

CALABREZ, N. D. **Filtração e Invasão de Fluidos de Perfuração: Estudo Comparativo, Caracterização da Torta e Modelagem**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, 2013.

CALÇADA, L.; SCHEID, C.; DE ARAUJO, C.; WALDMANN, A. T.; MARTINS, A.; FOLSTA, M. A Theoretical and Experimental Analysis of Dynamic Filtration in Drilling Operations. **Proceedings of SPE International Symposium and Exhibiton on Formation Damage Control**, p. 1–14, 2010.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. Non-Newtonian flow in the process industries : fundamentals and engineering applications. p. xiii, 436, 1999.

CIVAN, F. **Reservoir formatoin damage - fundamentals, modeling, assessment, and mitigation**. 2. ed. Gulf Professional Publishing, 2007.

COLESTINO, S. M. C. Princípios de secagem de alimentos. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, n. 2176–5081, p. 50, 2010.

COOK, J.; GROWCOCK, F.; HODDER, M. Stabilizing the Wellbore to Prevent Lost Circulation. **Oilfield Review**, v. 23, n. 4, p. 26–35, 2012.

COSTA, C. M. **Caracterização Reológica De Fluidos Complexos**. Relatório interno, Puc Rio, Rio de Janeiro – RJ, 2017.

CRUZ, A. C. B. **Testes de viscosidade com óleos e com água**. Relatório interno, UTFPR, Curitiba – PR, 2012.

DEWAN, J. T.; CHENEVERT, M. E. A Model For Filtration Of Water-base Mud During Drilling: Determination Of Mudcake Parameters. **Petrophysics**, v. 42, n. 3, p. 237–250, 2001.

DI GIUSEPPE, E.; CORBI, F.; FUNICIELLO, F.; MASSMEYER, A.; SANTIMANO, T. N.; ROSENAU, M.; DAVAILLE, A. Characterization of Carbopol® hydrogel rheology for experimental tectonics and geodynamics. **Tectonophysics**, v. 642, n. 1, p. 29–45, 2015.

DICK, M. A.; HEINZ, T. J.; SVOBODA, C. F.; ASTON, M. **Optimizing the selction of bridging particles for reservoir drilling fluids 2000 SPE International Symposium**

on Formation Damage. Lafayette, LA: 2000

ELKATATNY, S.; NASR-EL-DIN, H. Properties of Filter Cake of Water-Based Drilling Fluid under Dynamic Conditions Using Computer Tomography. n. 2010, 2012.

ERNST, E. A.; HOOK, F. E. The Effect of Additives , Squeeze on the Slurry Pressure , Dehydration and Formation Permeability Rate of a Squeeze Cementing. 1969.

FANN. **Drilling Fluids Testing Oil Well Cement Testing Industrial Products Contents**, 2012.

FERGUSON, C. K.; KLOTZ, J. A. Filtration from mud during drilling. **Transactions of the AIME**, v. 201, p. 30–43, 1954.

FERRAZ, A. S. F. . **Efeito da Distribuição Granulométrica de Partículas Sólidas e de Polímeros Aniônicos na Formação da Torta de Filtração e no Volume de Filtrado**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, 2014.

GALA, D. M.; TORALDE, J. S. Managed Pressure Drilling 101: Moving Beyond “It’s Always Been Done That Way”. **The Way Ahead**, v. 7, n. 1, p. 12–14, 2011.

GAO, C. Factors affecting particle retention in porous media. **Emirates Journal for Engineering Research**, v. 12, n. 3, p. 1–7, 2007.

GROWCOCK, F.; HARVEY, T. Drilling fluids. In: COMMITTEE, A. S. S. (Ed.). . **Drilling fluids processing handbook**. Oxford, UK: Gulf Professional Publishing, 2005.

HASSEN, B. R. New Technique Estimates Drilling Filtrate Invasion. **SPE-8791, Presenting at the SPE Formation Damage Symposium, Bakersfield, California, 28-29 January**, v. SPE-8791-M, n. 2, 1980.

HE, W.; STEPHENS, M. **Bridging particle size distribution in drilling fluid and formation damage SPE European Formation Damage Conference**. Noordwijk, NE: 2011

JIAO, D.; SHARMA, M. Investigation of dynamic mud cake formation: The concept of minimum overbalance pressure. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, v. 26323, n. 5, 1993a.

JIAO, D.; SHARMA, M. M. Formation damage due to static and dynamic filtration of water-based muds. **SPE Formation Damage Control Symposium**, n. 3, p. 491–501, 1992a.

JIAO, D.; SHARMA, M. M. Formation Damage Due to Static and Dynamic Filtration

of Water-Based Muds. n. 3, p. 491–501, 1992b.

JIAO, D.; SHARMA, M. M. Mechanism of cake build up in crossflow filtration of colloidal suspensions. **Journal of Colloid And Interface Science**, v. 162, n. 454–462, 1993b.

KAVIANY, M. Principles of Heat Transfer in Porous Media. **Mechanical Engineering Series**, v. 53, n. 9, p. 726, 1995.

KRUEGER, R. F. Evaluation of Drilling-Fluid Filter-Loss Additives Under Dynamic Conditions. **Journal of Petroleum Technology**, p. 90–98, 1962.

KUMAR, A. Fluid Loss as a Function of Position around the Wellbore. **American Association of Drilling Engineers**, 2010.

LAVROV, A. **Lost Circulation: Mechanisms and Solutions**. Gulf Professional Publishing, 2016.

LI, W.; KISER, C.; RICHARD, Q. **Development of A Filter Cake Permeability Test Methodology American Filtration & Separations Society**. 2005

LIMA, G. H. D. E. **Modelagem e Simulação Numérica de Escoamento Sólido-Fluido Sobre Meio Poroso Heterogêneo**. Universidade Tecnol[ogica], 2016.

MARTINS, A. L.; MASSARANI, G.; WALDMANN, A. T. A.; COSTA, F. G. On the Rheological Mechanisms Governing Drill-in Fluid Invasion into Reservoir Rocks. **Annual Transactions of the Nordic Rheology Society**, v. VOLUME 11, p. 123–130, 2003.

MARTINS, L. F. **Estudo da formação e estabilidade de tortas de filtração na perfuração de poços de petróleo**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, 2013.

MICROTRAC. Microtrac FLEX Software Operations Manual. 2006.

NIELD, D. A; BEJAN, A. **Convection in Porous Media**. Third ed. .Springer, 2006.
v. 24

OFITE. HTHP Filter Press for Cement Testing. v. 5, n. 115 V, p. 0–11, 2014.

OFITE. Bench-Mount Filter Press With Hose and Regulator. n. 140, p. 0–8, 2016.

PENG, S. J. **Filtration properties of water based drilling fluids by**. [s.l: s.n.].

PROKOP, C. L. Radial Filtration of Drilling Mud. **Journal of Petroleum Technology**, v. 4, n. 1, p. 5–10, 1952.

ROCHA, L. A. S.; AZUAGA, D.; ANDRADE, R.; VIEIRA, J. L. B.; SANTOS, O. L. A.

Perfuração direcional. Rio de Janeiro, Brasil: Editora Interciência, 2011.

SPE. **The SI Metric System of Units and SPE Metric Standard.** Richardson: [s.n.].

TAGHIYEV, F.; HODNE, H.; SAASEN, A. **Using drill cuttings waste as resource for spud mud IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition.** London, UK: 2015

VAFAI, K. **Handbook of porous media.** Marcel Dekker, 2005.

VAUSSARD, A.; MARTIN, M.; KONIRSCH, O.; PATRONI, J. M. **An experimental study of drilling fluids dynamic filtration 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers.** New Orleans, LA: 1986

WALDMANN, A.; MARTINS, A.; ARAGAO, A.; LOMBA, R. Predicting and Monitoring Fluid Invasion in Exploratory Drilling. **SPE Drilling & Completion**, v. 20, n. 4, p. 18–20, 2005.

WALDMANN, A. T. A.; DE SOUZA, E. A.; D'ALMEIDA, ARNALDO, R.; DE LIMA, V. A. R. M. P.; DE MIRANDA, C. R.; DE ARAUJO, L. D. S. **Avaliação em campo de possíveis soluções para o combate a perda de circulação VI Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás.** Termas do Rio Quente, GO: 2015

WHITCOMB, P. J.; MACOSKO, C. W.; EK, B. J. Rheology of Xanthan Gum Solutions. **Extracellular Microbial Polysaccharides**, p. 160–173, 1977.

WHITE, F. M. **Viscous Fluid Flow.** Second ed. .McGraw-Hill, 1991.

WILLIAMS, M. Radial Filtration of Drilling Muds. **Transactions of the AIME**, v. 136, n. November, p. 57–70, 1939.

APÊNDICE A. RESULTADOS DOS TESTES PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PARTICULADO

A Tabela A.1 apresenta os percentuais parciais e cumulativos para os intervalos granulométricos utilizados pelo equipamento de medição.

Tabela A.1 – Percentual parcial e cumulativo de particulado para os intervalos granulométricos do equipamento analisador de particulado Microtrac Flex.

Tamanho (μm)	% Parcial					% Cumulativa				
	CaCO ₃ F	CaCO ₃ Q	CaCO ₃ M	Vidro	Plástico	CaCO ₃ F	CaCO ₃ Q	CaCO ₃ M	Vidro	Plástico
0,289	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,344	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,409	0,54	0,46	0	0	0	0,54	0,46	0	0	0
0,486	0,97	0,94	0,28	0	0	1,51	1,4	0,28	0	0
0,578	1,45	1,44	0,58	0	0	2,96	2,84	0,86	0	0
0,688	1,84	1,71	0,76	0	0	4,80	4,55	1,62	0	0
0,818	2,15	1,75	0,92	0	0	6,95	6,3	2,54	0	0
0,972	2,47	1,74	1,07	0	0	9,42	8,04	3,61	0	0
1,156	2,81	1,78	1,25	0	0	12,23	9,82	4,86	0	0
1,375	3,09	1,92	1,47	0	0	15,32	11,74	6,33	0	0
1,635	3,19	2,28	1,72	0	0	18,51	14,02	8,05	0	0
1,945	3,07	3,07	2,02	0	0	21,58	17,09	10,07	0	0
2,312	2,82	4,61	2,38	0	0	24,40	21,70	12,45	0	0
2,750	2,54	7,12	2,77	0	0	26,94	28,82	15,22	0	0
3,270	2,36	10,05	3,15	0	0	29,30	38,87	18,37	0	0
3,890	2,36	11,87	3,53	0	0	31,66	50,74	21,90	0	0
4,620	2,61	11,77	4,02	0	0	34,27	62,51	25,92	0	0
5,500	3,13	10,03	4,76	0	0	37,40	72,54	30,68	0	0
6,540	3,82	7,71	5,74	0	0	41,22	80,25	36,42	0	0
7,780	4,39	5,63	6,59	0	0	45,61	85,88	43,01	0	0
9,250	4,64	4,05	6,62	0	0	50,25	89,93	49,63	0	0
11,000	4,76	2,95	6,27	0	0	55,01	92,88	55,90	0	0
13,080	5,18	2,18	5,55	0	0	60,19	95,06	61,45	0	0
15,560	6,29	1,63	5,10	0	0	66,48	96,69	66,55	0	0

18,500	8,05	1,19	5,11	0	0	74,53	97,88	71,66	0	0
22,000	9,29	0,85	5,53	0	0	83,82	98,73	77,19	0	0
26,160	8,55	0,60	6,09	0	0	92,37	99,33	83,28	0	0
31,110	5,16	0,43	6,01	0	0	97,53	99,76	89,29	0	0
37,000	1,96	0,13	4,43	0	0	99,49	99,89	93,72	0	0
44,000	0,51	0,11	2,07	0	0	100	100	95,79	0	0
52,330	0	0	0,53	0	0	100	100	96,32	0	0
62,230	0	0	0,11	0	0	100	100	96,43	0	0
74,000	0	0	0	0	0	100	100	96,43	0	0
88,000	0	0	0	0,23	0	100	100	96,43	0,23	0
104,700	0	0	0	0,94	0	100	100	96,43	1,17	0
124,500	0	0	0	3,00	0	100	100	96,43	4,17	0
148,000	0	0	0	7,35	0	100	100	96,43	11,52	0
176,000	0	0	0,20	11,80	0	100	100	96,63	23,32	0
209,300	0	0	0,67	13,52	0	100	100	97,30	36,84	0
248,900	0	0	1,06	14,75	0	100	100	98,36	51,59	0
296,000	0	0	0,84	16,75	0	100	100	99,20	68,34	0
352,000	0	0	0,45	15,55	0	100	100	99,65	83,89	0
418,600	0	0	0,22	8,05	0	100	100	99,87	91,94	0
497,800	0	0	0,13	2,24	0	100	100	100	94,18	0
592,000	0	0	0	0,70	0	100	100	100	94,88	0
704,000	0	0	0	0,40	0,39	100	100	100	95,28	0,39
837,200	0	0	0	0,51	2,91	100	100	100	95,79	3,30
995,600	0	0	0	1,26	26,18	100	100	100	97,05	29,48
1184,000	0	0	0	1,43	38,38	100	100	100	98,48	67,86
1408,000	0	0	0	1,52	32,14	100	100	100	100	100

APÊNDICE B. PH E VISCOSIDADE DAS FORMULAÇÕES

Neste apêndice são apresentados na Tabela B.1 os valores de pH mensurados para as formulações GX 1,50g e 3,00g, CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g e CBP 1,50g; 3,00g e 6,00g e na Tabela B.2 são apresentados os dados de viscosidade utilizados para a construção das curvas apresentadas no Capítulo 4.

Tabela B.1 – pH das formulações de GX, CMC e CBP.

GX	pH
1,50g	7,4 ± 0,1
3,00g	7,5 ± 0,2
CMC	
0,75g	7,3 ± 0,2
1,50g	7,5 ± 0,1
3,00g	7,5 ± 0,2
CBP	
1,50g	7,7 ± 0,3
3,00g	7,6 ± 0,2
6,00g	7,7 ± 0,4

Tabela B.2 - Dados de viscosidade para as formulações de referência GX 1,50g e 3,00g; CMC 0,75g; 1,50g e 3,00g e CBP 1,50g; 3,00g e 6,00g.

$\dot{\gamma}$ [1/s]	η [cP]							
	GX		CMC			CBP		
	1,50g	3,00g	0,75g	1,50g	3,00g	1,50g	3,00g	6,00g
5,11	398,95	1261,63	155,44	142,48	414,50	-	-	349,73
10,21	224,09	690,40	104,92	125,64	349,73	-	-	252,58
170,23	30,31	71,11	18,65	41,81	100,26	8,86	6,99	24,48
340,46	21,57	44,49	14,57	29,22	71,11	4,43	5,25	19,24
510,69	15,67	31,86	12,05	24,35	58,55	-	-	17,49
1021,38	10,49	18,33	8,55	16,32	37,69	-	-	13,60

APÊNDICE C. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE FILTRAÇÃO

Neste apêndice são apresentados os resultados individuais para cada um dos experimentos de filtração.

A comparação entre as variáveis reposita para os carbonatos de cálcio fino comercial e operacional é apresentada na Tabela C.2. Nas Tabelas C.3, C.4, C.5 e C.6 são apresentados os resultados (em triplicata teste 1, 2 e 3) das variáveis resposta deste trabalho, respectivamente para as variações do elemento filtrante – A (Tabela 4.17), do aditivo polimérico – B (Tabela 4.18), da concentração de particulado – C (Tabela 4.19) e da granulometria de particulado – D (Tabela 4.20).

Tabela C.1 - Parâmetros de variação do processo de formação do reboco e organização das variáveis resposta.

ID	Parâmetro de variação	Tabela da configuração correspondente	Tabela correspondente
A	Elemento filtrante	4.17	C.3
B	Aditivo polimérico	4.18	C.4
C	Concentração de particulado	4.19	C.5
D	Granulometria do particulado	4.20	C.6

Tabela C.2 - Variáveis resposta para os ensaios de filtração comparando CaCO₃ FC e FO.

Parâmetro	Teste	M _f [g]	ρ_f [g/cm ³]	V _f [cm ³]	M _{wc} [g]	M _{dc} [g]	E _m [mm]	T _{mc} [mm]
CaCO ₃ FC	1	52,36	1,005	52,10	55,45	25,50	8,50	8,68
	2	56,27	1,003	56,10	56,45	25,70	8,60	8,87
	3	53,99	0,998	54,10	63,45	28,00	8,85	10,09
CaCO ₃ FO	1	117,45	1,003	117,10	99,45	72,20	11,20	14,94
	2	104,31	1,002	104,10	94,45	67,40	10,50	14,39
	3	103,62	1,005	103,10	88,45	63,80	10,80	13,36

Tabela C.3 - Variáveis resposta para os ensaios de filtração considerando a influência do elemento filtrante.

Parâmetro	Teste	M _f [g]	ρ_f [g/cm ³]	V _f [cm ³]	M _{wc} [g]	M _{dc} [g]	E _m [mm]	T _{mc} [mm]
A1	1	58,27	1,003	58,10	63,00	27,90	9,20	10,01
	2	54,99	0,998	55,10	56,00	25,20	8,70	8,84
	3	52,15	1,001	52,10	61,00	27,50	9,25	9,62
A2	1	61,22	1,002	61,10	68,23	30,40	9,80	10,82
	2	63,42	1,005	63,10	60,23	27,70	9,15	9,43
	3	55,93	0,997	56,10	55,23	25,10	8,45	8,69
A3	1	52,36	1,005	52,10	55,45	25,50	8,50	8,68
	2	56,27	1,003	56,10	56,45	25,70	8,60	8,87
	3	53,99	0,998	54,10	63,45	28,00	8,85	10,09

Tabela C.4 - Variáveis resposta para os ensaios de filtração considerando a influência do aditivo polimérico.

Parâmetro	Teste	M _f [g]	ρ_f [g/cm ³]	V _f [cm ³]	M _{wc} [g]	M _{dc} [g]	E _m [mm]	T _{mc} [mm]
B1	1	93,38	1,003	93,10	59,45	25,70	9,10	9,53
	2	95,58	1,005	95,10	57,45	25,80	9,30	9,08
	3	92,91	0,998	93,10	56,45	26,50	9,55	8,76
B2	1	50,30	1,004	50,10	35,45	15,90	7,15	5,60
	2	49,95	1,005	50,10	34,45	15,20	6,85	5,48
	3	54,15	1,001	54,10	36,45	14,70	7,05	5,98
B3	1	106,10	1,000	106,10	98,25	50,10	16,15	14,72
	2	104,41	1,003	104,10	94,45	54,10	16,05	13,35
	3	92,56	1,005	92,10	89,45	43,40	15,60	13,70
B4	1	52,36	1,005	52,10	55,45	25,50	8,50	8,68
	2	56,27	1,003	56,10	56,45	25,70	8,60	8,87
	3	53,99	0,998	54,10	63,45	28,00	8,85	10,09
B5	1	23,17	1,003	23,10	18,45	7,60	3,95	3,01
	2	22,19	1,004	22,10	19,45	7,80	4,20	3,20
	3	24,24	1,006	24,10	21,45	9,00	4,95	3,47
B6	1	270,56	0,998	271,10	173,45	76,60	25,75	27,58
	2	278,98	0,996	280,10	167,45	79,70	26,05	25,85
	3	283,82	0,999	284,10	165,45	78,40	26,25	25,59
B7	1	286,39	1,001	286,10	169,45	80,50	24,20	26,18
	2	276,55	0,998	277,10	164,45	84,90	23,95	24,50
	3	294,57	1,005	293,10	172,45	87,20	25,15	25,94
B8	1	221,98	1,004	221,10	186,45	77,60	33,10	30,28
	2	229,01	1,004	228,10	198,45	81,30	30,05	32,41
	3	226,45	1,006	225,10	180,45	74,60	31,15	29,38

Tabela C.5 - Variáveis resposta para os ensaios de filtração considerando a influência da concentração de particulado.

Parâmetro	Teste	M _f [g]	ρ_f [g/cm ³]	V _f [cm ³]	M _{wc} [g]	M _{dc} [g]	E _m [mm]	T _{mc} [mm]
C1	1	72,88	0,997	73,10	57,45	24,10	9,25	9,31
	2	74,80	0,996	75,10	66,45	29,30	10,70	10,57
	3	75,02	0,999	75,10	57,45	24,30	9,80	9,28
C2	1	68,75	0,995	69,10	68,45	30,80	10,60	10,81
	2	80,02	0,999	80,10	72,45	30,10	11,55	11,57
	3	69,17	1,001	69,10	72,45	30,10	11,65	11,77
C3	1	52,36	1,005	52,10	55,45	25,50	8,50	8,68
	2	56,27	1,003	56,10	56,45	25,70	8,60	8,87
	3	53,99	0,998	54,10	63,45	28,00	8,85	10,09
C4	1	42,97	0,997	43,10	66,45	31,50	9,70	10,28
	2	43,23	1,003	43,10	61,45	31,10	9,30	9,24
	3	40,26	1,004	40,10	63,45	28,50	10,00	10,02
C5	1	43,19	1,002	43,10	91,45	42,90	13,10	14,20
	2	42,14	1,001	42,10	91,45	43,30	12,85	14,15
	3	48,00	0,998	48,10	104,45	53,10	11,55	15,67

Tabela C.6 - Variáveis resposta para os ensaios de filtração considerando a influência do tipo de LCM.

Parâmetro	Teste	M _f [g]	ρ_f [g/cm ³]	V _f [cm ³]	M _{wc} [g]	M _{dc} [g]	E _m [mm]	T _{mc} [mm]
D1	1	42,97	0,997	43,10	66,45	31,50	9,70	10,28
	2	43,23	1,003	43,10	61,45	31,10	9,30	9,24
	3	40,26	1,004	40,10	63,45	28,50	10,00	10,02
D2	1	47,19	1,002	47,10	81,45	52,00	7,30	10,80
	2	54,26	1,003	54,10	80,45	55,90	7,70	10,05
	3	48,24	1,003	48,10	83,45	55,50	7,65	10,76
D3	1	279,10	1,000	279,10	82,45	60,00	8,40	9,94
	2	277,27	0,997	278,10	76,45	48,70	8,10	10,15
	3	252,09	0,996	253,10	80,45	49,90	8,70	10,86
D4	1	46,19	1,002	46,10	40,45	22,70	7,50	10,02
	2	51,00	0,998	51,10	48,45	21,70	6,90	13,28
	3	49,05	0,999	49,10	54,45	18,90	5,90	16,21
D5	1	53,15	1,001	53,10	43,45	29,00	6,50	5,59
	2	48,20	1,002	48,10	44,45	28,50	6,30	5,88
	3	48,00	0,998	48,10	42,45	29,60	6,80	5,29
D6	1	62,41	1,005	62,10	36,45	19,90	6,25	7,23
	2	59,16	1,001	59,10	38,45	20,70	6,40	7,68
	3	58,22	1,002	58,10	39,45	20,70	6,80	7,98
D7	1	78,18	1,001	78,10	47,45	26,50	5,90	9,30
	2	69,89	0,997	70,10	29,45	22,50	4,80	4,66
	3	71,31	1,003	71,10	40,45	16,90	5,10	8,97
D8	1	54,26	1,003	54,10	23,45	13,40	4,50	4,13
	2	54,21	1,002	54,10	24,45	14,90	4,60	4,15
	3	58,33	1,004	58,10	25,45	14,30	4,10	4,52

APÊNDICE D. IMAGENS DOS REBOCOS DE FILTRAÇÃO PARA TODOS OS EXPERIMENTOS

Neste apêndice são apresentados os rebocos formados nos ensaios de filtração. Inicialmente a Figura D.1 apresenta a comparação entre os rebocos formados por CaCO_3 FC e FO, relativos aos ensaios apresentados na Seção 4.4.

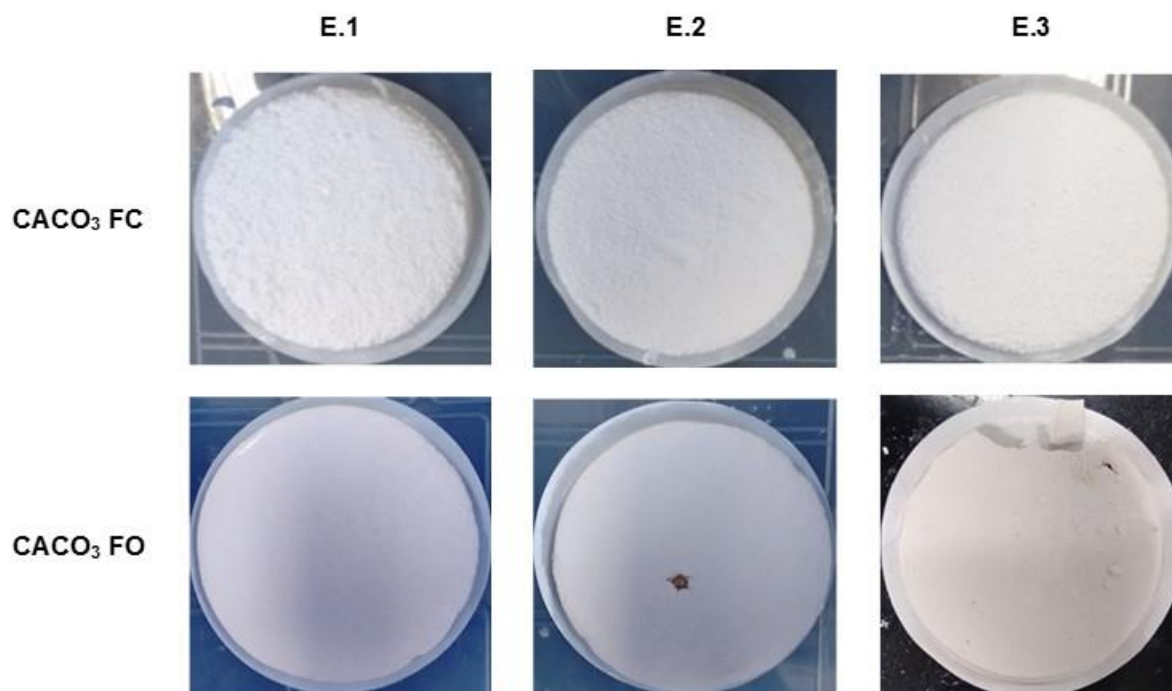


Figura D.1 - Comparação dos rebocos formados com CaCO_3 FC e FO.

Nas Figuras D.2, D.3, D.4 e D.5 são apresentados os resultados (em triplicata E.1, E.2 e E3) das tortas de filtração, respectivamente para as variações do elemento filtrante - A (Tabela 4.17), do aditivo polimérico - (Tabela 4.18), da concentração de particulado - C (Tabela 4.19) e da granulometria do LCM - D (Tabela 4.20). A Tabela D.1 apresenta o resumo dos parâmetros de variação, as tabelas correspondentes e as respectivas imagens para cada parâmetro.

Tabela D.1 - Parâmetros de variação do processo de formação do reboco e organização das imagens dos rebocos.

ID	Parâmetro de variação	Tabela da configuração correspondente	Figura correspondente
A	Elemento filtrante	4.17	D.2
B	Aditivo polimérico	4.18	D.3
C	Concentração de particulado	4.19	D.4
D	Granulometria do particulado	4.20	D.5

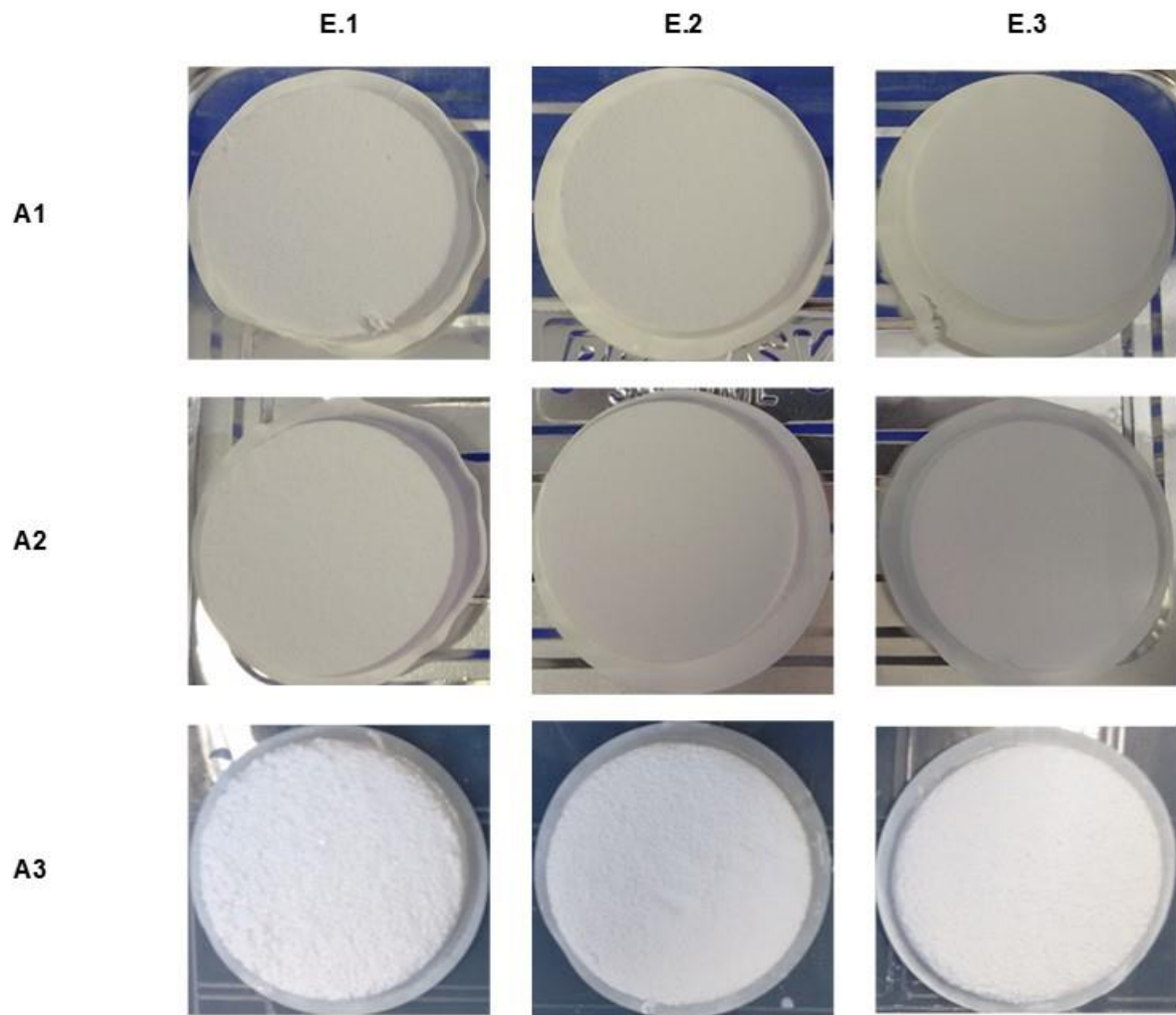


Figura D.2 - Rebocos formados na configuração A – Avaliação da influência do elemento filtrante.

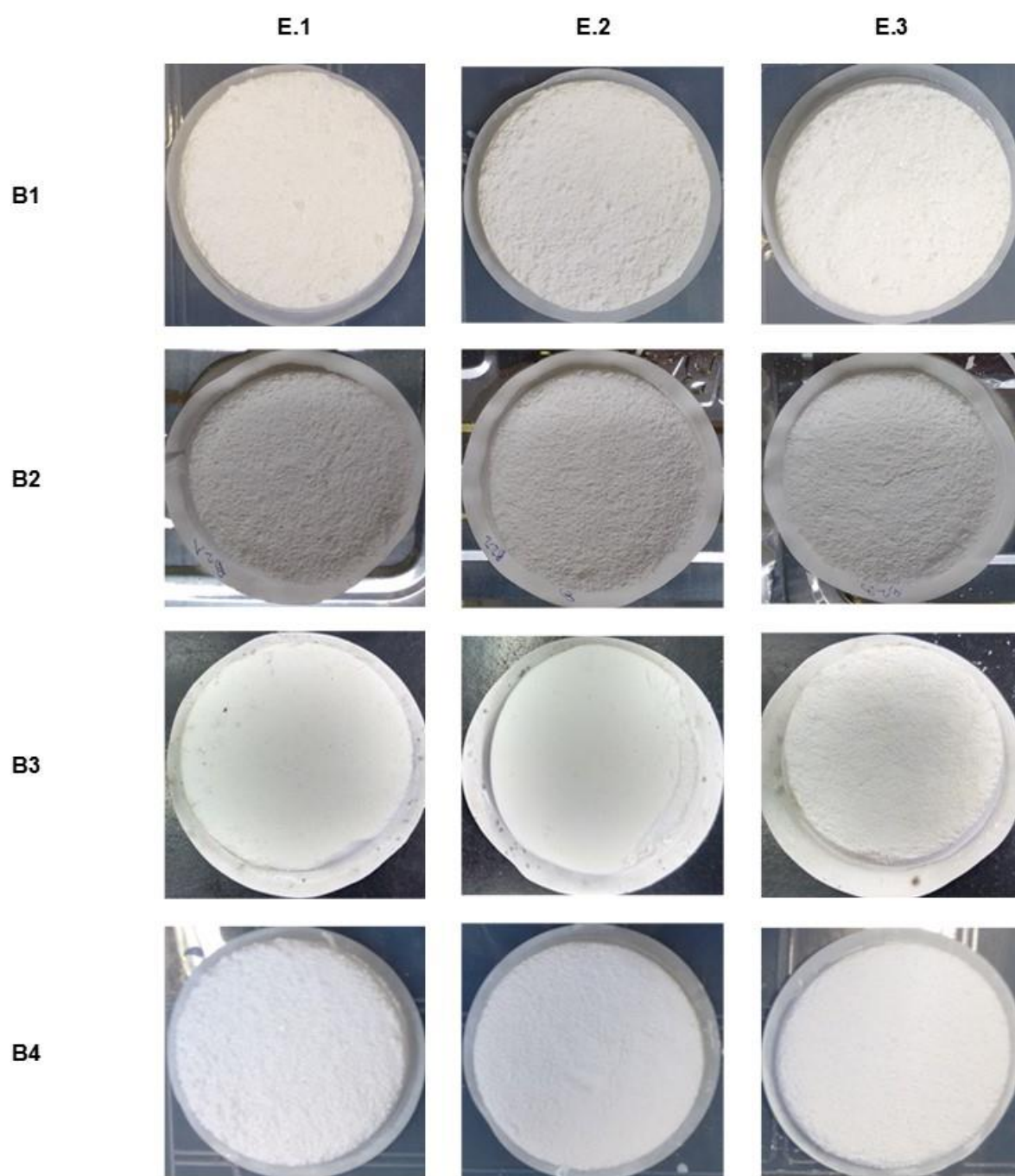


Figura D.3 - Rebocos formados na configuração B – Avaliação da influência do aditivo polimérico.

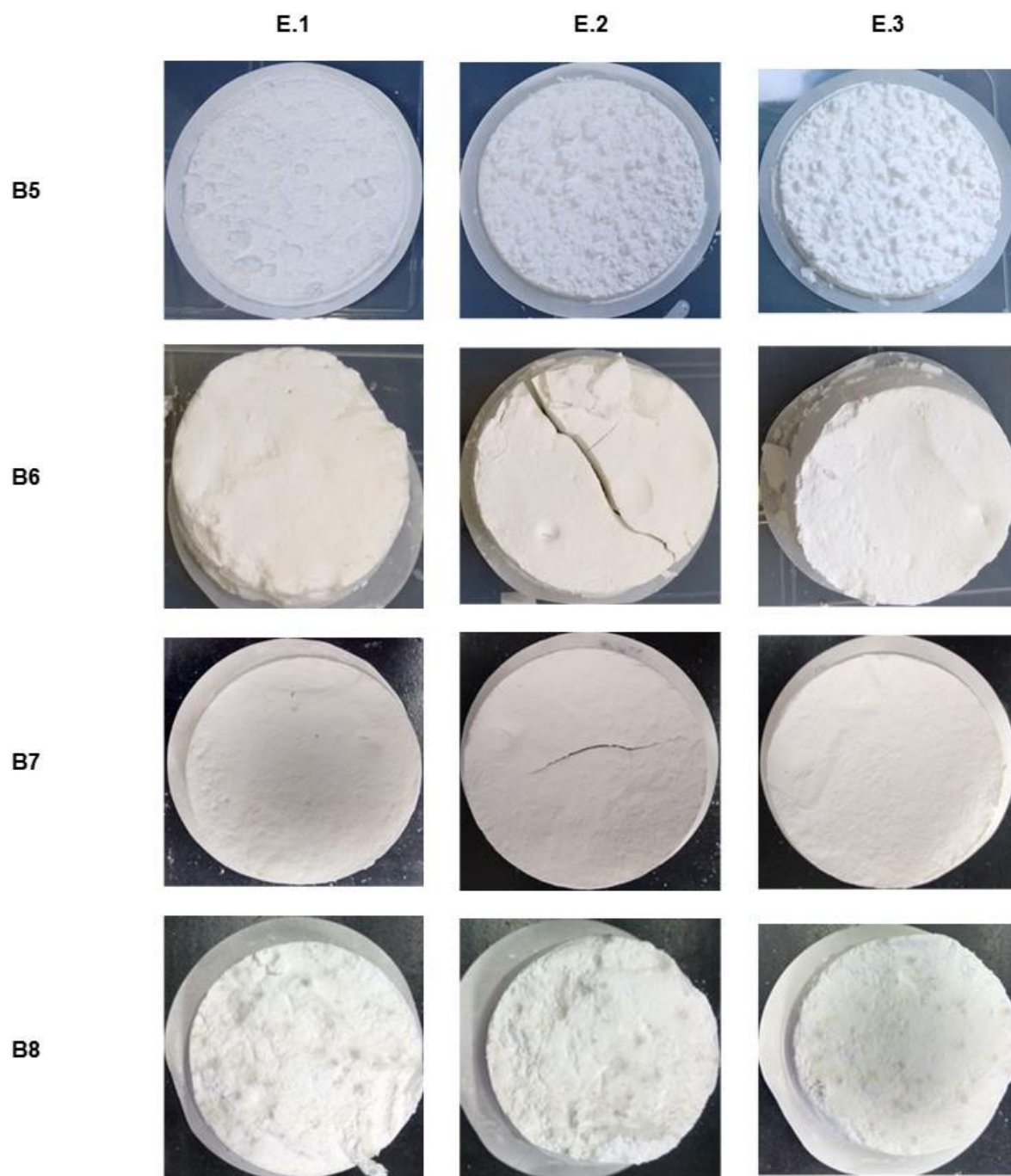


Figura D.3 - Rebocos formados na configuração B – Avaliação da influência do aditivo polimérico (continuação).

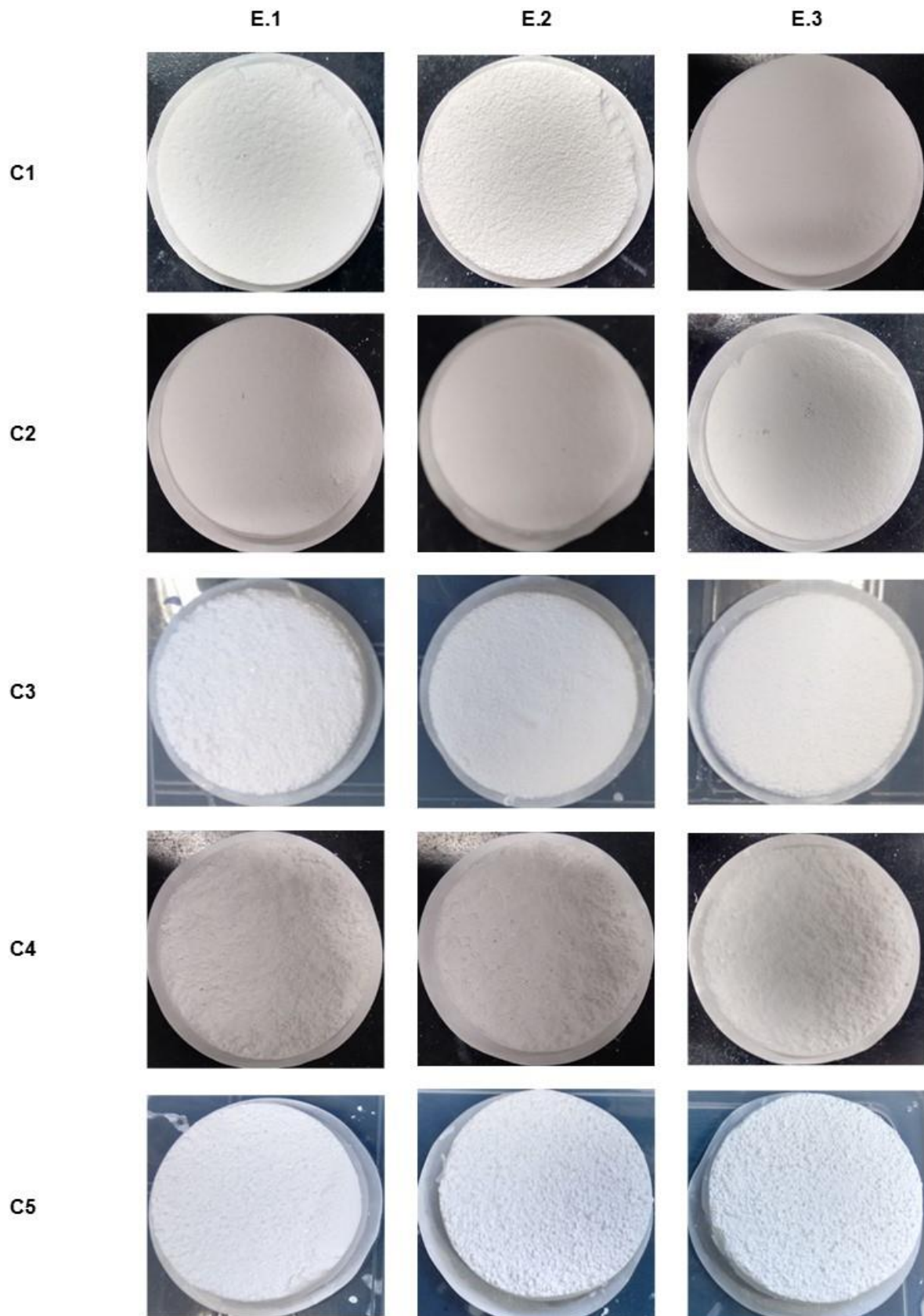


Figura D.4 - Rebocos formados na configuração C – Avaliação da influência da concentração de particulado.

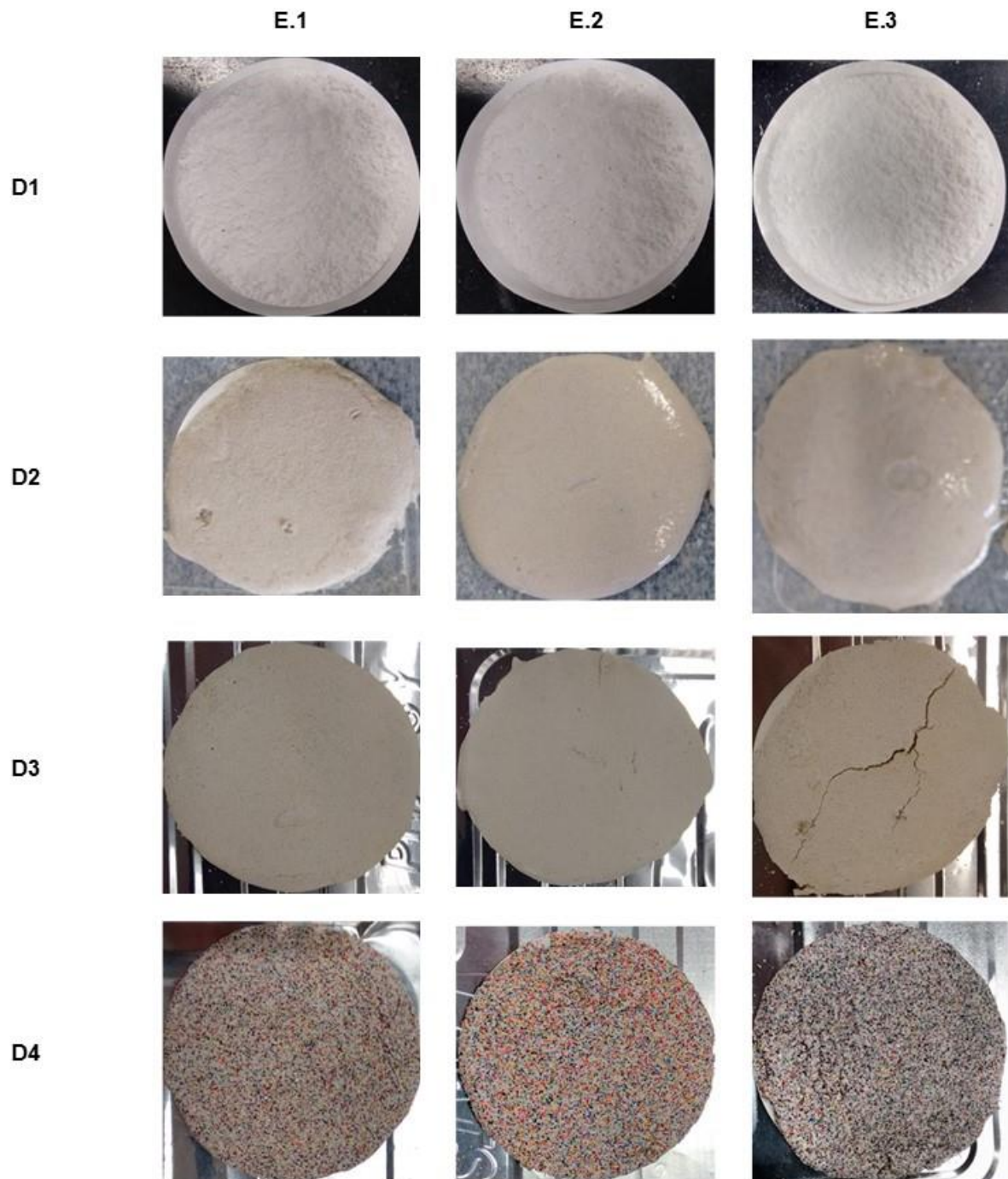


Figura D.5 - Rebocos formados na configuração D – Avaliação da influência da granulometria e do tipo de LCM.

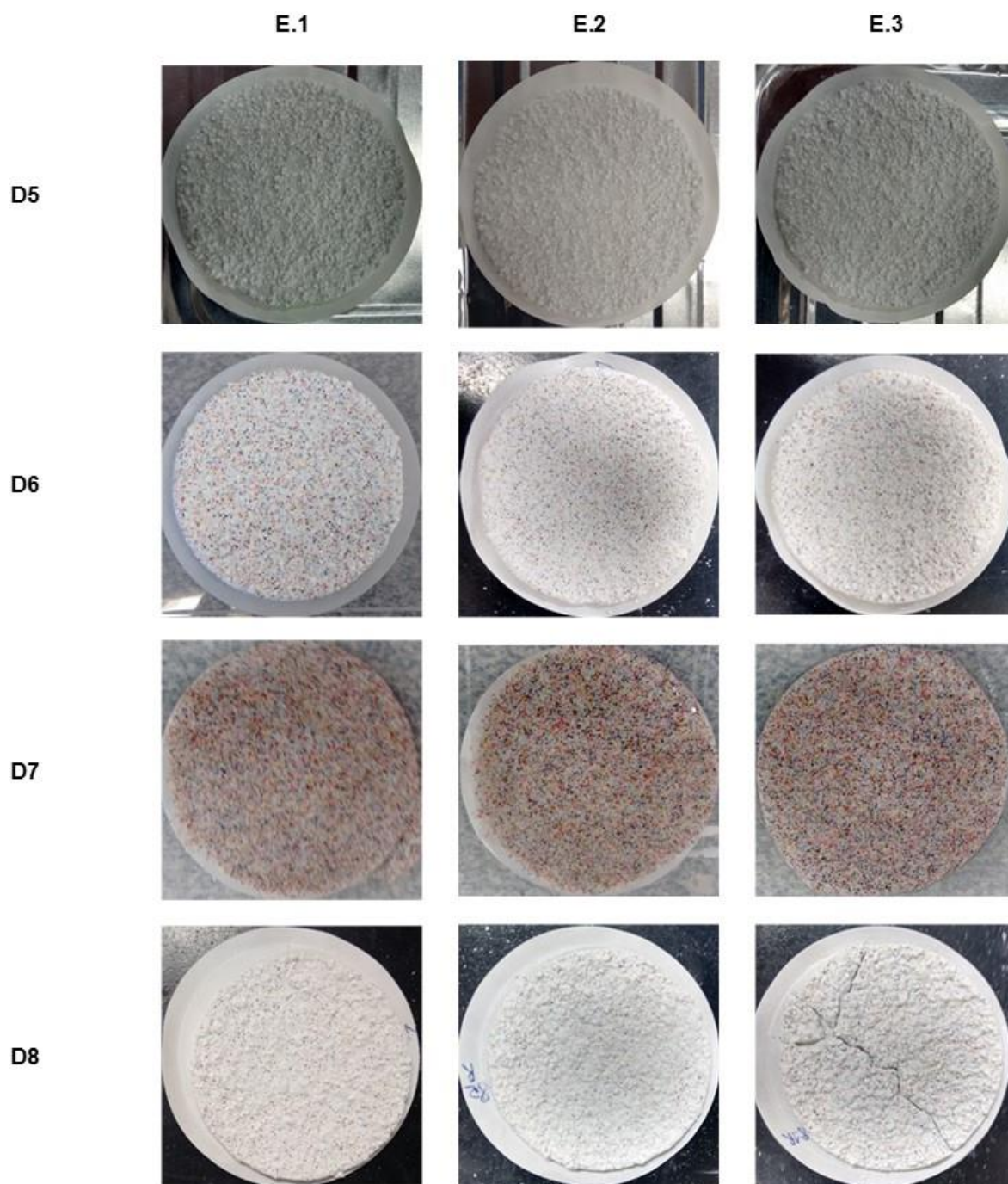


Figura D.5 - Rebocos formados na configuração D – Avaliação da influência da granulometria e do tipo de LCM (continuação).