UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE MICROESFERAS OCAS DE VIDRO EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO BASE ÁGUA

Monique Costa Mendes

Rio de Janeiro
Agosto 2015

MONIQUE COSTA MENDES

ANÁLISE DO EFEITO DA ADIÇÃO DE MICROESFERAS OCAS DE VIDRO EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO BASE ÁGUA

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc).

Orientador: Profª. Dra. Verônica M. A. Calado

RIO DE JANEIRO
2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Mendes, Monique Costa.

Avaliação do efeito da adição de microesferas ocas de vidro em fluidos de perfuração base água / Monique Costa Mendes - Rio de Janeiro - 2015.
xix, 98 f.

Orientador: Verônica Maria de Araújo Calado.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2015.

1. Fluidos de perfuração. 2. Base água. 3. Microesferas ocas de vidro. 4. Reologia 5. Planejamento experimental – I. Calado, Verônica M.A. (Orient.). II. Avaliação do efeito da adição de microesferas ocas de vidro em fluidos de perfuração base água.

MONIQUE COSTA MENDES

ANÁLISE DO EFEITO DA ADIÇÃO DE MICROESFERAS OCAS DE VIDRO EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO BASE ÁGUA

Dissertação submetida ao Corpo Docente da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Rio de Janeiro, 20 de Agosto de 2015.

Aprovado por:

_____

Prof. Verônica Maria de A. Calado, D.Sc.(orientadora) – EQ/UFRJ

_____

Prof. Carla Reis de Araujo, D. Sc. - EQ/UFRJ

_____

Rosana Fátima Teixeira Lomba, D. Sc.- CENPES/Petrobras

_____

Marcelo Catanoce Gandur, D. Sc. - 3M do Brasil

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Agosto de 2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, que sempre me sustentou e, finalmente, aos meus pais Cristina e Antonio, que continuamente incentivam os meus estudos, me apoiam em todas as dificuldades, amparam em meio às dores e sorriem com as minhas conquistas.

“Não vos preocupeis, pois, com o dia de amanhã: o dia de amanhã terá as suas preocupações próprias. A cada dia basta o seu cuidado.”

(Mt 6,34)

“Esperar significa crer na aventura do amor, ter confiança nas pessoas, dar o salto no incerto e abandonar-se a Deus totalmente.”

(Santo Agostinho)

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos, graças a Deus são muitos, pois o trabalho não teria sido concluído se eu estivesse sozinha nessa missão.

Primeiramente, preciso agradecer à Santíssima Trindade: a Deus Pai, o único capaz de criar, quem me deu a dádiva de viver e tem um zelo eterno comigo; a Seu Filho Jesus Cristo, meu redentor, salvador, Aquele que é meu amigo, "o caminho, a verdade e a vida" e ainda, ao Espírito Santo, que é o amor infinito do Pai e do Filho, quem me defende, anima, fortalece, ensina, aconselha e sempre consola! Sem esse Deus uno e trino, que sempre caminhou comigo, me ama incondicionalmente, eu não conseguiria me deparar com essa página da dissertação. Muito obrigada, Senhor! Ainda aqui, quero agradecer a minha "Mãezinha do céu", a Virgem Maria, na qual sempre encontro o descanso para a alma e a paz quando preciso. Tenho certeza que ela sempre esteve atenta aos meus pedidos de socorro, como faz com todos os seus filhos. Obrigada, Mãe querida!

Aos meus pais, meus grandes amigos, meus exemplos de heróis em meio às suas batalhas diárias, responsáveis pela minha educação e em grande parte, pelo que sou atualmente. Excelentes motivadores ao longo da caminhada e fundamentais na decisão pela continuação dessa dissertação. Obrigada pela vida, por sempre terem palavras de incentivo, mesmo rodeadas de muitas interrogações, mas que continuamente me apoiaram e não me deixaram desistir. Obrigada por aturarem minhas diversas caras feias pelas noites mal dormidas, motivadas pelo medo de não conseguir concluir esse percurso. Agradeço ainda por compreenderem, em silêncio, as minhas ausências nas rotinas dos fins de semana e também, meu mau humor nos eternos dias em que tudo parecia dar errado. Sem dúvida alguma, nada disso teria sido possível sem o amor, carinho, sorrisos, brincadeiras, muitas orações e a enorme paciência de vocês! Muito obrigada, meus "ouros de mina" e espero conseguir retribuir um dia a tudo que vocês merecem! Amo tanto vocês, que nem sei!

Às minhas avós que sempre oram e torcem por mim, às minhas madrinhas de Batismo e de Crisma, aos meus tios, tias, primos e primas de sangue e de coração, obrigada pela enorme preocupação, carinho, palavras otimistas e necessárias durante essa jornada.

À minha prima-irmã Isabelle, que mesmo há quilômetros de distância, do outro lado do oceano, sempre esteve perto, preocupada, disponível independente das quatro

ou cinco horas de diferença de fuso horário, obrigada por tudo prima! Pelo seu amor e por me presentear com o melhor presente que eu poderia ganhar no meio dessa caminhada e da vida, o meu afilhado lindo, o nosso Tobias! Obrigada pelos vídeos dele que muitas vezes me fizeram sorrir e chorar entre um experimento e outro, entre os parágrafos desta dissertação ou no meio dos almoços corridos.

Às minhas primas Renata, Katri, Rebeca e aqui incluo a prima de coração (quase afilhada de casamento) Aline, o meu muito obrigada! Obrigada pelas torcidas de longe ou de perto, pronunciadas ou silenciosas, por me permitirem partilhar as dificuldades e as alegrias nos momentos de danças, patins, brincadeiras e conversas. Obrigada pelas orações e demonstração de orgulho! Aproveito para incluir e agradecer a amiga desde o Jardim de Infância e por isso da família, Juliane, pela preocupação constante, pelo conhecimento compartilhado sobre a vida de mestranda e pelo amor de irmã mesmo do outro lado do oceano nos últimos meses. Muito obrigada por tudo, minhas flores! Agradeço constantemente a Deus por saber que posso contar com vocês.

Aos amigos e amigas (ou irmãos e irmãs) da minha comunidade e segunda casa tão amada, a paróquia São Rafael Arcanjo, presentes de Deus em minha vida, não sei como agradecer. Sempre tão presentes no meu cotidiano puderam acompanhar bem de perto todo esse trajeto, cheio de altos e baixos e nele, as conquistas e também os dias difíceis. Obrigada pelo carinho, apoio do início ao fim, muitas orações, partilhas via *whatsapp*, diversas palavras de encorajamento... Incluo o grande amigo-irmão-seminarista Diego Estevam, quem me deu os amigos desse ano de 2015 da paróquia Santa Rita de Cássia, pelos mesmos motivos mencionados. Obrigada por mesmo estando a alguns (ou muitos) bairros de distância, demonstrarem em tão pouco tempo um carinho e admiração equivalentes aos amigos de anos! Só posso pedir a Deus que abençoe a vocação e o serviço de todos vocês e agradecê-los por estarem por perto! Aproveito e peço à nossa Mãe que os proteja sob seu manto de amor, em todos os dias de suas vidas! #TMJ

Aos amigos e amigas encontrados na UFRJ, nossa primeira casa por muitos anos, preciso agradecer pelo gigantesco apoio pessoal ou *online*, pela motivação, carinho, ajudas pessoais e acadêmicas. Obrigada pelos almoços, conversas, risadas, encontros e até pela ausência deles, que me deixam cheia de saudade, mas não me impedem de desfrutar do incentivo dado por vocês! Acrescento meu grupo de amigos incríveis ganhados no CEFET, onde sempre recebo um mar de carinho e mesmo longe, se faz presente na minha vida desde 2003! Obrigada amigos queridos!

À minha orientadora, professora Verônica, que sempre foi muito mais que isso, sempre mãezona, com seus ombros amigos e ouvidos disponíveis para eu partilhar as angústias e as dificuldades encontradas nos últimos longos meses. Acrescento o agradecimento às centenas de boas respostas dadas às minhas perguntas ocorridas frequentemente, independente do meio pelas quais foram enviadas (*e-mail*, telefone, *whatsapp*) ou mesmo, da hora do dia. Muito obrigada por não ter desistido de mim e pelo marcante congresso no qual tive oportunidade de complementar o meu aprendizado. Obrigada pelos muitos ensinamentos, bom humor, atenção e principalmente professora, por ser a pessoa honesta, batalhadora e exemplar que a senhora é (ok, "senhora é uma pitomba!")! Tenho orgulho de dizer que fui sua aluna na graduação, no mestrado acadêmico e de que foi minha orientadora na obtenção desse grau.

Muito agradeço ao Elessandre Souza, excelente engenheiro do CENPES, por todo o ensinamento, paciência, atenção dados a mim durante esse trabalho e a sua super equipe de técnicas muito gentis, atenciosas e profissionais que cooperaram com os resultados: Cassia Castelo, Priscila Andrade e Paula Dayane Gonçalves. Agradeço ao Deusimar, ótimo técnico do Pólo de Xistoquímica da UFRJ e ser humano, que foi fundamental e muito dedicado na obtenção de grande parte dos resultados apresentados nesta pesquisa.

Aos amigos do LABTeR: Rosana, Felipe, Alfredo, Isabela, Verônica e Nathália por toda a ajuda, força e ensinamentos que me deram. Obrigada por terem sido muitas vezes a "luz no fim do túnel" que eu precisava para prosseguir. Vocês foram extremamente importantes e jamais esquecerei a ajuda e o carinho que recebi. Aos Jovens talentos da ciência Árthur e Eduardo, meus braços esquerdo e direito por cerca de um ano, nem sei o que dizer. Muito obrigada por terem dado continuidade à pesquisa, por me manterem informada sem nem me conhecerem pessoalmente, pela dedicação de vocês, disponibilidade, amizade, enormes admiração e confiança que me transmitiram. Tenho certeza que vocês serão brilhantes engenheiros químicos. Aos estagiários: Filipe, Kevin, Erick, Aline e Joyce por demonstrarem vontade de aprender e pelo auxílio que muito me deram, muito obrigada!

Ao Laboratório de Modelagem, Simulação e Controle de Processos (LMSCP).

Ao CENPES pelo apoio, realização de testes e fornecimentos de materiais.

À 3M do Brasil LTDA pela doação das microesferas ocas de vidro.

RESUMO

MENDES, Monique Costa. **Avaliação do efeito da adição de microesferas ocas de vidro em fluidos de perfuração base água.** Rio de Janeiro, 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

No cenário mundial atual, ocorre a construção de poços cada vez mais profundos, de geometria complexa. Constata-se que, no Brasil, esta realidade também se faz presente nos projetos de exploração na área do pré-sal. Na perfuração de poços verticais é frequente a utilização de fluidos à base de água, visto que os fluidos de base orgânica são comumente tóxicos, causam grandes impactos ao meio ambiente e nem sempre atendem às exigências dos órgãos ambientais. Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento experimental de diferentes fluidos de perfuração base água, a fim de avaliar o efeito das microesferas ocas de vidro, aditivo utilizado como controlador da densidade dos mesmos. A importância do estudo desse tipo de aditivo está relacionada ao uso de fluidos de perfuração base água de baixa densidade, nas formações ricas em sais minerais, a fim de manter controlada a pressão dentro dos poços e a segurança durante a operação de perfuração. As características dos fluidos de perfuração foram avaliadas com e sem as microesferas ocas de vidro, sendo verificadas a densidade dos fluidos, o pH dos mesmos, a lubricidade, os parâmetros de filtração (volume de filtrado e reboco), morfologia da torta de filtração, estabilidade dos fluidos, distribuição de tamanho de partículas e o comportamento reológico dos fluidos de perfuração produzidos. Verificou-se que as microesferas cumpriram sua função como redutoras das densidades dos fluidos, sendo o coeficiente de variação das medidas inferior a 3%. Em relação ao pH, lubricidade, espessura do reboco e estabilidade foi observado que as microesferas ocas de vidro não interferiram diretamente no desempenho dos fluidos. Por outro lado, o volume de filtrado foi prejudicado na presença do aditivo, visto que apenas 12% das formulações apresentaram resultados favoráveis para esse fator. A análise da distribuição de tamanhos de partículas e a morfologia da torta de filtração revelaram a importância do uso de microesferas com tamanhos mais semelhantes aos dos componentes, para que elas possam preencher os diversos canais localizados nos rebocos dos fluidos contendo as microesferas. As propriedades reológicas também não foram plenamente satisfatórias, sendo necessário o desenvolvimento de novos fluidos base água para a obtenção de resultados aceitáveis, na presença das microesferas ocas de vidro.

ABSTRACT

MENDES, Monique Costa. **Effect Evaluation of Hollow Glass Microspheres Addition on Water-Based Drilling Fluids** Rio de Janeiro, 2015. Dissertation (Master in Chemical and Biochemical Process Technology) - School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

In the current global scenario of exploration of ever-deeper wells, complex geometry and in Brazil, this reality is also present in exploration projects in the Pre-Salt area. In the vertical wells drilling it is common to use water-based fluids, whereas the organic based fluids are often toxic, cause great environmental impact and do not always meet the requirements of environmental agencies. This study aimed to the different water-based drilling fluids experimental development in order to evaluate the effect of hollow glass microspheres, additive used as density controller thereof. The importance of studying this kind of the additive is related to the use of low density water-based drilling fluids, at formations rich in minerals, in order to keep the controlled pressure within the wells and safety during the drilling operation. The characteristics of the drilling fluids were evaluated in the absence and presence of the hollow glass microspheres in order to compare them, with the measured of fluid density, the pH, lubricity, filtration parameters (filtrate volume and plastering), filter cake morphology, fluid stability, particle size distribution and rheological behavior of the produced drilling fluids. It was found that the microspheres fulfilled its function as reducing the densities of the fluids and the measures coefficient of variation was less than 3%. Regarding to pH, lubricity, plastering thickness and stability it was observed that the hollow glass microspheres did not interfere directly in the performance of the fluids. On the other hand, the filtrate volume was harmed in the presence of the additive, since 12% of the formulations showed favorable results for this factor. The analysis of the distribution of particle sizes and morphology of the filter cake showed the importance of the use of microspheres with sizes similar to those of the components, so that they can fulfill the several channels located on the plastering of fluids containing the microspheres. The rheological properties were not totally satisfactory, requiring the development of new water-based fluids to find acceptable results in the presence of the hollow glass microspheres.

Keywords: Drilling Fluids. Water-based. Hollow glass Microspheres. Rheology. Design of Experiments.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Motivação 2
1.2. Estrutura do trabalho 3

CAPÍTULO 2. OBJETIVO 4
2.1. Objetivos específicos 4

CAPÍTULO 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
3.1. Definição e funções dos fluidos de perfuração 5
3.2. Breve Histórico 9
3.3. Classificação dos Fluidos de Perfuração 13
3.3.1 Fluidos base água 13
3.3.2 Fluidos base óleo 15
3.3.3 Fluidos sintéticos 16
3.4. Propriedades dos fluidos 16
3.4.1 Densidade 17
3.4.2 Parâmetros de filtração 17
3.5. Aditivos 19
3.5.1 Considerações e Definições 19
3.5.2 Classificação dos aditivos 19
3.5.3 Microesferas ocas de vidro 22
3.6. Reologia 26
3.6.1 Parâmetros reológicos 26

CAPÍTULO 4. Materiais e Métodos 29
4.1. Materiais 29
4.1.1 Microesferas ocas de vidro 30
4.2. Metodologia 30
4.2.1 Planejamento de Experimentos 30
4.2.2 Preparação dos fluidos de perfuração 32
4.2.3 Determinação da densidade dos fluidos de perfuração 33
4.2.4 Determinação da quantidade de microesferas ocas de vidro 34
4.2.5 Verificação do pH 35
4.2.6 Determinação do coeficiente de lubricidade 36
4.2.7 Testes de filtração 37
4.2.8 Determinação da espessura da torta de filtração (reboco) 38
4.2.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da torta de filtração 39
4.2.10 Estabilidade dos fluidos de perfuração base água 39
4.2.11 Distribuição do tamanho das partículas dos componentes do fluido de perfuração 40
4.2.12 Ensaios Reológicos 41
CAPÍTULO 5. Resultados e Discussões 44
5.1. Preparação dos fluidos de perfuração 44

5.2. Estudos das densidades dos fluidos de perfuração e quantidade de microesferas ocas de vidro 46
5.3. Análise das medidas de pH 49
5.4. Distribuição do tamanho de partículas de carbonato de cálcio, amido e goma xantana 49
5.5. Estudo do coeficiente de lubricidade 51
5.6. Resultados do volume de filtrado 59
5.7. Avaliação da espessura de reboco (ER) 69
5.8. MEVe EDS da torta de filtração 72
5.9. Estabilidade dos fluidos de perfuração 78
5.10. Análise reológica 85

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES 92
6.1. Sugestões 94

BIBLIOGRAFIA 95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Percurso dos fluidos de perfuração. 8
Figura 2 - Broca de perfuração e espaço anular. 8
Figura 3 - Microscopia óptica em campo claro das microesferas ocas de vidro 19000 3M (20x). 23
Figura 4 - Curvas de viscosidade x tempo. 28
Figura 5 - Agitador Ultra-Turrax T-25 basic. 32
Figura 6 - Picnômetro de 50 mL. 33
Figura 7 - Balança de lama. 34
Figura 8 - Medidor de pH. 35
Figura 9 - Lubricity Tester. 37
Figura 10 - Filtro prensa HTHP Fann. 38
Figura 11 - Turbiscan Lab Expert – Laboratório da UFRJ. 40
Figura 12 - Princípio de medição do Turbiscan. 40
Figura 13 - Mastersizer 2000 – Malvern, localizado na UFRJ. 41
Figura 14 - Reômetro Thermo Haake Mars I, localizado no CENPES. 42
Figura 15 - (a) Fluido 12; (b) Fluido 13. 44
Figura 16 - Vistas superior (a) e inferior (b) do fluido 17 com microesferas. 49
Figura 17 - Distribuição de tamanho de partículas de goma xantana. 50
Figura 18 - Distribuição de tamanho de partículas de amido (HPA). 50
Figura 19 - Distribuição de tamanho de partículas de $CaCO_3$ (b). 51
Figura 20 - Fluido 6 com microesferas ocas de vidro. 53
Figura 21 - Coeficiente de lubricidade (CL) dos fluidos sem microesferas ocas de vidro. 54
Figura 22 - Coeficiente de lubricidade (CL) dos fluidos contendo microesferas ocas de vidro. 55
Figura 23- Gráfico de Pareto para a variável coeficiente de lubricidade dos fluidos sem microesferas ocas de vidro. 56
Figura 24 - Gráfico de médias para o coeficiente de lubricidade sem microesferas ocas de vidro. 57
Figura 25 - Gráfico de Pareto para a variável coeficiente de lubricidade dos fluidos contendo microesferas ocas de vidro. 57
Figura 26 - Gráfico de médias para o coeficiente de lubricidade com microesferas ocas de vidro. 59

Figura 27 - Comparação entre o volume de filtrado (VF) dos fluidos com e sem microesferas ocas de vidro. A marcação reflete o menor VF para amostras com microesferas em relação às amostras sem microesferas. 64
Figura 28 - Gráfico de Pareto para a variável volume de filtrado dos fluidos sem microesferas ocas de vidro. 65
Figura 29 - Gráfico de médias para o volume de filtrado sem microesferas ocas de vidro. 66
Figura 30 - Curva de níveis para a variável volume de filtrado em função dos componentes HPA e goma xantana. 67
Figura 31 - Gráfico de Pareto para a variável volume de filtrado dos fluidos co .....m microesferas ocas de vidro. 67
Figura 32 - Gráfico de médias para o volume de filtrado com microesferas ocas de vidro. 68
Figura 33 - Espessura dos rebocos de fluidos de perfuração sem e com microesferas ocas de vidro. 70
Figura 34 - Comparação entre as espessuras dos rebocos e as quantidades de microesferas ocas de vidro. 72
Figura 35 - Rebocos dos fluidos de perfuração com microesferas 11 (esquerda) e 12 (direita). 72
Figura 36 - (a) MEV (50x) do fluido 8 com microesferas ocas de vidro; (b) MEV (50x) do fluido 19 com microesferas ocas de vidro; (c) MEV (1000x) do fluido 8 com microesferas ocas de vidro; (d) MEV (1000x) do fluido 19 com microesferas ocas de vidro. 74
Figura 37 - (a) MEV (600x) do fluido 3 sem microesferas ocas de vidro; (b) MEV (600x) do fluido 17 sem microesferas ocas de vidro. 75
Figura 38 - (a) MEV (1000x) do fluido 5 sem microesferas ocas de vidro; (b) MEV (1000x) do fluido 16 sem microesferas ocas de vidro. 75
Figura 39 - MEV do fluido 8 com microesferas (1000x) e análise no EDS. 76
Figura 40 - Diâmetro das microesferas ocas de vidro presentes no fluido 8 (3000x). ... 77
Figura 41 - MEV do fluido 17 sem microesferas (600x) e análise no EDS. 77
Figura 42 - MEV do fluido 16 sem microesferas (600x) e análise no EDS. 78
Figura 43 - (a) Fluido 20 contendo microesferas ocas de vidro (b) Fluido 16 sem microesferas ocas de vidro. 79

Figura 44 - Fluidos sem (SM) e com (CM) microesferas ocas de vidro: (a) Fluido 15; (b) Fluidos 16 e 16'; (c) Fluido 17; (d) Fluido 19. 80
Figura 45 - Variação do retroespalhamento dos fluidos de perfuração sem microesferas ocas de vidro em função do tempo. 81
Figura 46 - Variação do retroespalhamento dos fluidos de perfuração com microesferas ocas de vidro em função do tempo. 82
Figura 47 - Variação da transmissão e do retroespalhamento (*backscattering*) de fluidos com microesferas ocas de vidro..... 83
Figura 48 - Variação da transmissão e do retroespalhamento (*backscattering*) do fluido 19 sem e com microesferas ocas de vidro. 84
Figura 49 - Fluido 19 sem e com microesferas ocas de vidro após 8 dias de teste. 85
Figura 50 - Curvas de tensão dos fluidos com e sem microesferas ocas de vidro..... 86
Figura 51 - Curvas de tensão dos fluidos com e sem microesferas ocas de vidro, em taxa de cisalhamento entre 0 s^{-1} e 150 s^{-1}. 87
Figura 52 - Curvas de viscosidade dos fluidos com e sem microesferas ocas de vidro. 88

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Aditivos dos Fluidos de Perfuração 20
Tabela 2 - Formulação dos Fluidos de Perfuração Base Água 29
Tabela 3 - Características das Microesferas Ocas de Vidro 30
Tabela 4 - Níveis dos Fatores do Planejamento Fatorial 2^4 com Três Pontos Centrais . 31
Tabela 5 - Matriz de Planejamento Experimental 31
Tabela 6 - Critérios Adotados nos Testes Reológicos 43
Tabela 7 - Composição dos Fluidos de Perfuração Base Água (em gramas) – Etapa 1. 45
Tabela 8 - Composição dos Fluidos de Perfuração Base Água (em gramas) – Etapa 2. 46
Tabela 9 - Fração Mássica das Microesferas Ocas de Vidro (HGS 19000) Adicionadas aos Fluidos – Etapa 1 47
Tabela 10 - Fração Mássica das Microesferas Ocas de Vidro (HGS 19000) Adicionadas aos Fluidos – Etapa 2 48
Tabela 11 - Diâmetros máximos de partículas (μm) de goma xantana, amido, $CaCO_3$ (b) e microesferas ocas de vidro 50
Tabela 12 - Coeficientes de lubricidade dos fluidos de perfuração 51
Tabela 13 - Volume de Filtrado dos Fluidos de Perfuração (mL) 59
Tabela 14 - Volume de Filtrado (mL) ordenado para os fluidos de perfuração com microesferas 61
Tabela 15 - Estabilidade de Fluidos de Perfuração Com e Sem Microesferas Ocas de Vidro 78
Tabela 16 - Análise reológica dos fluidos de perfuração 89
Tabela 17 - Resumo dos principais resultados dos fluidos de perfuração com microesferas ocas de vidro 90

LISTA DE SIGLAS

LAOs	Alfa-olefinas lineares
LABs	Alquil-benzenos lineares
API	*American Petroleum Institute*
BS	*Backscattering*
CMC	Carboximetilcelulose
CF	Coeficiente de fricção
CL	Coeficiente de lubricidade
DIFs	*Drill- in fluids*
EDS	*Energy Dispersive System*
ER	Espessura do reboco
FC	Fator de correção
HPA	Hidroxipropilamido
HPHT	*High-Pressure , High-Temperature*
HGS	*Hollow glass spheres*
IADC	*International Association of Drilling Contrators*
Lt	Leitura do torque
LDDIF	*Low-density drill-in fluids*
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
OBM	*Oil based mud*
IOs	Olefinas internas
LPs	Parafinas lineares
PAOs	Poli alfa-olefinas
PHPA	*Partially-hydrolyzed polyacrylamide*
pH	Potencial hidrogeniônico
UBD	*Underbalanced drilling*
VF	Volume de filtrado
WBM	*Water based mud*

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade absoluta, g/cm³
d	Densidade do fluido, g/ml
ρ_{esfera}	Densidade das microesferas ocas de vidro, g/cm³
ρ_{fluido}	Densidade dos fluidos obtidos por picnometria, g/cm³
ρ_{ideal}	Densidade ideal do fluido, g/cm³
d_{10}	Diâmetro máximo de 10% da população total de partículas
d_{50}	Diâmetro máximo de 50% da população total de partículas
d_{90}	Diâmetro máximo de 90% da população total de partículas
ω_{esfera}	Fração mássica de esferas, %
φ_{fluido}	Fração volumétrica do fluido, %
φ_{esfera}	Fração volumétrica de esferas, %
τ_0	Limite de escoamento real (*Yield point*), Pa
m	Massa da substância, g
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação, gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento, 1/s
τ	Tensão de escoamento, Pa
τ_t	Tensão mínima de escoamento, Pa
V	Volume da substância, cm³
V_f	Volume do picnômetro, mL

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

No cenário atual, encontram-se poços cada vez mais profundos e com geometria complexa sendo construídos em todo o mundo. No Brasil, dados do Plano de Negócios e Gestão da Petrobras de 2015-2019 revelam que a empresa pretende investir 83% de 130,3 bilhões de dólares na exploração e produção (E&P), com ênfase no pré-sal. Nesses investimentos de E&P, 86% serão alocados para desenvolvimento da produção, 11% para exploração e 3% para suporte operacional. Aos novos sistemas de produção no Brasil serão destinados US$ 64,4 bilhões, dos quais 91% para o pré-sal. Ainda é previsto que seja alcançada a produção total de óleo e gás (Brasil e internacional) de 3,7 milhões de barris de óleo equivalente por dia em 2020, ano no qual é estimado que o pré-sal representará 66% da produção total de óleo no Brasil (PETROBRAS,2015; MORAIS; JERÔNIMO, 2013).

O método rotativo é um dos procedimentos utilizados para a perfuração de poços e consiste em descer rotacionando uma coluna de perfuração, que apresenta em sua extremidade uma broca de aço. Os cascalhos gerados durante esse processo devem ser levados até a superfície por meio do uso de um fluido de perfuração, que é injetado e passa através da broca e retorna pelo espaço anular existente entre a coluna de perfuração e as paredes do poço. Conforme a rocha vai sendo esmerilhada e os cascalhos gerados são retirados, há o aprofundamento do poço (CHIPALAVELA, 2013). Sendo assim, no intuito de se obter o petróleo da crosta terrestre, um fluido com propriedades especiais, também conhecido como lama de perfuração, deve ser utilizado. Os fluidos de perfuração são definidos geralmente como composições frequentemente líquidas, sendo o sucesso da perfuração dependente do seu bom desempenho (AMORIM, 2003).

Em cada etapa da perfuração deve-se determinar um tipo de fluido, de acordo com as necessidades do poço. As propriedades e as características desejadas do fluido devem ser mantidas dentro de limites específicos que não comprometam o processo de perfuração em quaisquer situações de pressão e temperatura (NASCIMENTO; AMORIM; SANTANA, 2010).

A composição do fluido é selecionada de modo a obter propriedades ideais, como viscosidades, consistência de gel, controle de filtrado, reboco e coeficiente de lubricidade; os aditivos são utilizados nas composições dos fluidos no intuito de manter

as propriedades desejadas, garantindo uma perfuração com segurança e qualidade (NASCIMENTO; AMORIM; SANTANA, 2010).

Na perfuração de poços verticais, frequentemente são utilizados os fluidos à base de água, com exceção de situações onde existem folhelhos sensíveis ao contato com a água. Nesse caso, são usados fluidos de base orgânica que minimizam o processo de inchamento dos folhelhos. Os fluidos com base orgânica são também normalmente utilizados na perfuração com inclinação elevada, onde se faz necessária uma lubricidade maior que a obtida com uso de fluidos de base aquosa (BARROS, 2007).

Muitos fluidos de perfuração apresentam componentes com características tóxicas, corrosivas ou mesmo agressivas ao meio ambiente. No entanto, os fluidos de perfuração comumente são formulados com constituintes capazes de retardar em algum grau a ocorrência de fenômenos indesejáveis, como por exemplo, a formação de hidratos (ROSSI; GUIMARÃES, 2007).

1.1. Motivação

O tipo de fluido de perfuração define o grau de impacto no meio ambiente e ainda as condições ambientais presentes. Em alto-mar, lamas à base de água geralmente são as que causam menores danos em comparação às lamas à base de óleo.

A fim de atender as exigências ambientais que se tornam cada vez mais rigorosas, sendo esse um fator determinante nos cenários da perfuração de poços, há o crescimento do desenvolvimento de fluidos à base de água. Esse desenvolvimento se faz necessário visto que fluidos à base de óleo, conhecidos também como orgânicos ou sintéticos, são tóxicos e de custo mais elevado**.** Sendo assim, há a necessidade de se investir em pesquisas de fluidos mais elaborados, com aditivos que mantenham as características desejadas dos fluidos de perfuração e ainda atendam às legislações ambientais.

Ainda há o desejo pelos cenários em que a formação rochosa a ser perfurada se encontra concentrada em sais (ricas em halita, taquidrita, carnalita). Para que esse processo ocorra é necessário que o fluido base água seja saturado em cloretos, o que provoca o aumento da densidade dos mesmos. Entretanto, durante a perfuração, com o poço inacabado, deve-se operar dentro do limite de pressão da janela operacional, a fim de garantir a segurança da operação, a qual deve ser maior que a pressão dos poros e inferior à pressão de fratura da formação rochosa. Para isso, a pressão hidrostática

relacionada, dependente da densidade dos fluidos, deve ser controlada. Nos casos em que a redução da densidade do fluido for exigida, deve-se diluir os fluidos. Com a diluição, o fluido tende a perder a sua saturação e passa a interagir com as formações salinas, a consumir as paredes do poço, podendo causar desmoronamentos; além disso, o fluido recupera a saturação perdida, aumentando a sua densidade novamente, o que provoca a extrapolação do limite superior da janela operacional. Por esses motivos, se faz importante a utilização de um aditivo para o controle de densidade dos fluidos base água, o qual atenda às características necessárias mencionadas.

1.2. Estrutura do trabalho

Esta dissertação apresenta seis capítulos. No primeiro capítulo, estão apresentadas a introdução e a motivação para o desenvolvimento da pesquisa. O Capítulo 2 apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos abordados, a fim de verificar a influência das microesferas ocas de vidro nos fluidos de perfuração base água. O Capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica sobre fluidos de perfuração por meio do seu histórico de utilização, classificações, suas características, comportamento reológico e diferentes aditivos comumente utilizados. No Capítulo 4, encontram-se os materiais utilizados e a metodologia para o desenvolvimento deste trabalho. A metodologia contém ensaios de caracterização física das amostras em estudo, determinação das propriedades reológicas, análises de microscopia e estabilidade de alguns fluidos de perfuração selecionados. No Capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados encontrados. O Capítulo 6 apresenta as conclusões finais, confronta com os objetivos informados no início deste trabalho e menciona as sugestões para trabalhos futuros a essa pesquisa.

CAPÍTULO 2. OBJETIVO

Este trabalho teve por objetivo a avaliação do comportamento de diferentes fluidos de perfuração base água, formulados na presença e ausência de um aditivo específico. O aditivo específico utilizado nos fluidos foi a microesfera oca de vidro, fornecida pela empresa 3M do Brasil LTDA.

As microesferas ocas de vidro foram utilizadas com a intenção de reduzir a densidade dos fluidos de perfuração de forma que a pressão do poço possa atender à janela operacional, ou seja, esteja entre o limite inferior dado pela pressão dos poros e o limite superior, fornecido pela pressão de fratura. Isso ocorre a fim de garantir a segurança da operação durante o processo de perfuração (THOMAS *et al*., 2001).

2.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão mencionados a seguir. Todos os testes foram feitos sem e com a adição de microesferas ocas de vidro.

- ✓ Determinação da densidade dos fluidos a fim de especificar a quantidade de microesferas ocas de vidro que devem ser adicionadas às formulações, de modo a se obter fluidos de perfuração com a densidade requerida;
- ✓ Determinação do pH dos fluidos de perfuração formulados;
- ✓ Determinação da lubricidade dos fluidos de perfuração por meio da obtenção do coeficiente de lubricidade;
- ✓ Determinação do volume de filtrado dos fluidos;
- ✓ Determinação da espessura do reboco obtido após a filtração dos fluidos de perfuração;
- ✓ Avaliação da morfologia da torta de filtração via microscopia eletrônica a fim de compreender os resultados apresentados na filtração;
- ✓ Análise da estabilidade das formulações de fluidos propostas;
- ✓ Obtenção da distribuição do tamanho das partículas de componentes considerados determinantes na formulação dos fluidos;
- ✓ Avaliação do comportamento reológico dos fluidos de perfuração, a fim de identificar os melhores resultados encontrados nas diferentes composições dos fluidos de perfuração elaborados para este trabalho.

CAPÍTULO 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Definição e funções dos fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração, também chamados de lamas, são definidos de diversas formas na literatura, sendo a mais geral observada no livro *Drilling Fluids Processing Handbook* (2005). Nessa referência, o fluido é conceituado como qualquer líquido que é utilizado na operação de perfuração o qual circula, ou é bombeado, da superfície até a broca, por meio da coluna de perfuração e que retorna à superfície pelo espaço anular entre o poço e a coluna.

Conforme exposto por Amorim (2003), os fluidos de perfuração podem ser conceituados como composições frequentemente líquidas e que possuem diversas funções, sendo utilizados para auxiliar no processo de perfuração de poços de petróleo.

Thomas *et al*. (2001) consideram os fluidos de perfuração como misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e possivelmente gases, podendo assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes. Para Farias (2005), os fluidos de perfuração são definidos como uma mistura de água e argila que permanece em suspensão durante tempo considerável.

De uma maneira geral, segundo Darley & Gray (1988), as lamas são sistemas multifásicos, que podem conter água, óleo, sais dissolvidos e sólidos em suspensão nas mais diversas proporções. Do ponto de vista físico, os fluidos de perfuração assumem comportamentos de fluidos não newtonianos, ou seja, a relação entre a taxa de cisalhamento e a taxa de deformação não é constante (ROSSI; GUIMARÃES, 2007).

De acordo com *American Petroleum Institute* – API – o fluido de perfuração é um fluido de circulação usado em perfurações rotativas para desempenhar as funções requeridas durante a operação de perfuração. A partir dessa definição, é impossível a perfuração rotativa sem um fluido de circulação, o que o torna um dos elementos mais importante na operação de perfuração (AMORIM, 2003).

Os fluidos de perfuração são utilizados há centenas de anos, conforme Darley & Gray afirmaram em 1988, e são utilizados nas operações de extração do petróleo *onshore* e *offshore*, nas perfurações de poços artesianos e nas operações de sondagem (AMORIM *et al*., 2005).

Os fluidos possibilitam uma maior vida útil à broca e uma maior eficiência de perfuração, pois exercem uma ação de jato que conserva o fundo do poço e mantém a

broca livre de detritos. Na circulação do fluido pela broca, ocorre o transporte dos detritos do fundo do poço até a superfície. Os cascalhos gerados pela ação da broca entram em contato com o fluido e se dispersam. Além dessa função, os fluidos de perfuração devem resfriar a broca, controlar a pressão exercida pela formação (controle de filtrado), reduzir o atrito entre a coluna de perfuração e as paredes do poço e ainda manter a estabilidade do poço.

Historicamente, a água era utilizada como fluido de perfuração para a remoção de detritos gerados pela broca. Atualmente, sabe-se que há diversas funções para os fluidos de perfuração.

Darley & Gray (1988) relatam como sendo sete as principais funções dos fluidos na perfuração rotatória:

- Transportar os detritos gerados pela broca pelo espaço anular e separá-los na superfície;
- Resfriar e limpar a broca;
- Reduzir o atrito entre a coluna de perfuração e o poço;
- Manter a estabilidade do poço;
- Prevenir o escoamento do fluido – gás, água ou óleo – para o interior das formações rochosas (influxo do fluido);
- Formar um reboco fino e de baixa permeabilidade nas formações penetradas pela broca;
- Auxiliar nas informações sobre os detritos e formações perfuradas.

Thomas *et al* (2001) acrescentam as seguintes características dos fluidos de perfuração:

- Manter os sólidos em suspensão quando estiverem em repouso;
- Aceitar qualquer tratamento físico e químico;
- Ser bombeável;
- Apresentar custo compatível com a operação;
- Resfriar e lubrificar a coluna de perfuração, além da broca.

Além dessas funções, outros autores como Caenn e Chillingar (1996), Serra (2003) e Melo (2008) ressaltam que os fluidos de perfuração não devem ser danosos à

formação produtora, não podem oferecer perigo ao meio ambiente e às pessoas, não devem ser corrosivos aos equipamentos de perfuração e de superfície de sonda e devem controlar as pressões das formações perfuradas. Sendo assim, o fluido de perfuração requer propriedades físico-químicas que possam ser cuidadosamente controladas para se ajustarem a uma grande variedade de condições em subsuperfície (SERRA, 2003). Vale ressaltar que determinadas funções dos fluidos prevalecem sobre outras e variam conforme o ponto em que eles se encontram durante a perfuração. O desempenho dos fluidos está intimamente relacionado às propriedades reológicas, de filtração e lubricidade dos fluidos de perfuração (MEDEIROS; AMORIM; SANTANA, 2008).

Os fluidos de perfuração também evitam que o poço entre em colapso antes que se faça a cimentação do furo. Isso ocorre, porque a pressão do fluido contra as laterais da formação dificulta a desestabilização das paredes da formação e a obstrução do poço.

As diversas funções dos fluidos permitem que eles sejam indispensáveis à indústria de petróleo, sendo o elemento mais importante nas operações de perfuração (BATISTA, 2010). O fluido ou lama é armazenado em tanques de lama, onde são preparados, conforme pode ser observado na Figura 1. Bombas únicas ou combinadas são utilizadas para realizar a circulação dos fluidos, sendo de fundamental importância para o sistema. A bomba conduz o fluido pela linha de descarga até atingir a coluna, por meio da cabeça de injeção e alcançar a broca no fundo do poço.

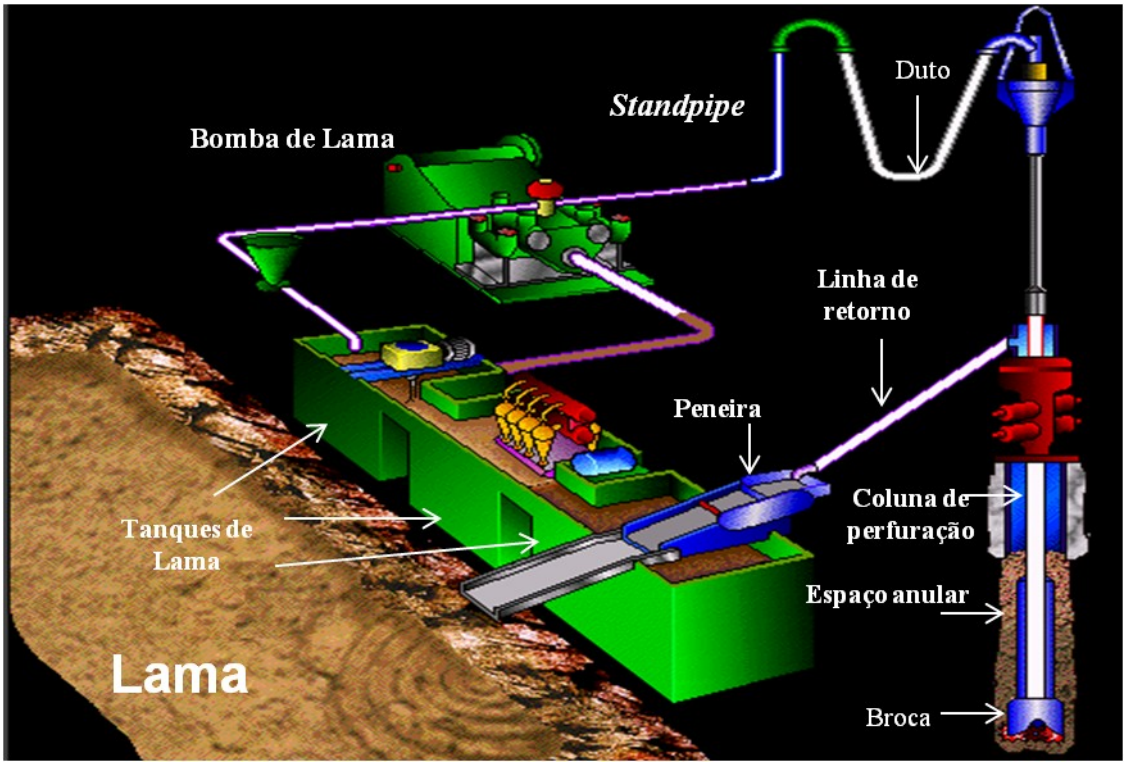


Figura 1 - Percurso dos fluidos de perfuração.
Fonte: Amorim, 2003.

As brocas são responsáveis por promover a ruptura e a desagregação das formações rochosas e possuem orifícios pelos quais os fluidos são liberados, como mostra a Figura 2. Ao passar pela broca, os jatos de fluido removem os cascalhos presentes no fundo do poço por meio da sua ascensão pelo espaço entre a coluna de perfuração e o poço, chamado anular, conduzindo-os até a superfície. Vale ressaltar que a remoção dos detritos situados embaixo da broca constitui uma tarefa difícil, mas extremamente importante para o sucesso da perfuração (AMORIM, 2003).

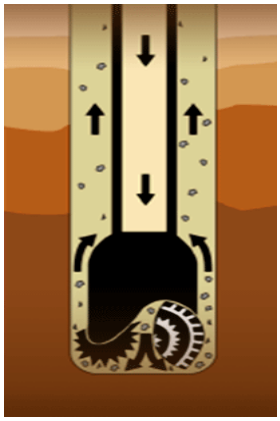


Figura 2 - Broca de perfuração e espaço anular.
Fonte: http://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=291&c_id=24

Após a passagem do fluido pelo espaço anular, o mesmo segue até a superfície, junto aos detritos de perfuração, passa pela linha de retorno para haver a remoção de cascalhos e dos gases antes de voltar ao poço. Os processos de separação dos sólidos inseridos no fluido incluem a passagem por uma peneira que remove os detritos mais grosseiros e por equipamentos onde sólidos menores, gases e partículas finas de areia e argila são removidos. Posteriormente, o fluido segue para os tanques de lama onde aditivos são inseridos de forma que recupere as suas propriedades e o processo de circulação na coluna de perfuração é reiniciado (AMORIM, 2003; SERRA, 2003).

3.2. Breve Histórico

De acordo com Brantly 1961 e 1971 (apud DARLEY; GRAY, 1988), a água foi o primeiro fluido de perfuração a ser utilizado, pois foi empregada para remoção dos detritos gerados durante a operação de perfuração. Estas informações são referentes ao terceiro milênio a.C., em poços de 20 pés de profundidade, perfurados em minas por brocas rotatórias controladas manualmente.

Na Inglaterra, em 1844, Robert Beart apresentou um método de perfuração por meio de hastes giratórias em uma cavidade, ao mesmo tempo em que propôs que um fluido circulante fosse bombeado através dessas hastes para carrear os cascalhos gerados para a superfície. Em 1846, na França, Fauvelle bombeou água em um poço para remover os detritos da perfuração e trazê-los até a superfície (DARLEY; GRAY, 1988). Sweeney, em 1866, consolidou esse método com um equipamento de perfuração rotatória, denominado "*stone drill*", que se mostrou semelhante em muitos aspectos aos equipamentos utilizados atualmente (SERRA, 2003).

Conforme citado por Darley e Gray (1988), entre os anos de 1860 e 1880, várias patentes norte-americanas indicavam os fluidos de perfuração como veículos para remoção dos detritos. Além dessas, em 1887, Chapman, em outra patente, informou que um fluxo de água juntamente ao material argiloso removeriam os detritos e em adição formaria uma parede impermeável ao longo do poço perfurado (Darley & Gray, 1988).

Ainda de acordo com Darley e Gray (1988), diversos poços foram perfurados no Texas e na Louisiana na década de 1890 utilizando fluidos contendo material argiloso. Durante esse período, não se utilizou outro material além da argila, como menciona Brantly em seu livro *History of Oil Well Drilling*, onde apresenta uma revisão sobre o desenvolvimento dos fluidos de perfuração nesse período.

Houve uma grande expansão na perfuração rotativa a partir de 1901 com a descoberta do petróleo na Costa do Golfo e na Califórnia nos EUA. Todavia, devido à fraca estabilização das formações, os poços perfurados eram instáveis, o que demandou maior cuidado na atividade da perfuração. Na Costa do Golfo, os cascalhos resultantes das perfurações apresentavam argilas em quantidade suficiente para serem incorporadas à água utilizada durante a perfuração. Já na Califórnia, as argilas eram provenientes de depósitos na superfície e foram muitas vezes misturadas à água para formar o fluido antes do início da perfuração, garantindo um melhor revestimento e a consequente estabilização do poço (DARLEY; GRAY, 1988).

Lewis e McMurray, 1916, (apud DARLEY; GRAY, 1988) declararam que a lama "carregada" (*laden mud*) era uma mistura de água e qualquer material argiloso que permanecia em suspensão na água por tempo considerável e ainda se apresentavam livres de impurezas como a areia, detritos de perfuração ou outros materiais similares. Além disso, apresentaram vantagens no uso do fluido de perfuração, tais como a redução do número de colunas de revestimento e a proteção do revestimento contra a corrosão.

Stroud, em 1922 (apud DARLEY; GRAY, 1988), destacou que o sucesso ou a falha da perfuração de poços contendo gás na Louisiana dependia do controle da pressão. Para esse controle, foi sugerida a utilização de um tipo de lama "carregada" (*laden mud*). Stroud informou que materiais, como o cimento e o óxido de ferro (Fe_2O_3), foram ensaiados em laboratório para uso como agentes densificantes no fluido de perfuração. Constatou que o óxido de ferro aumentou a massa específica do fluido sem alterar a sua consistência, sendo utilizado em diversos campos. No mesmo ano, a barita passou a ser utilizada para produzir lama com alta densidade e no final da década de 1920, o fluido de perfuração foi reconhecido como uma suspensão coloidal.

Os problemas relacionados ao controle de filtrado das lamas com águas salinas começaram a ser solucionados em 1939, por meio da adição de goma e amido gelatinizado aos fluidos. Os aditivos geraram um reboco com espessura muito fina e solucionaram as dificuldades presentes nos emperramentos dos tubos de perfuração. A disponibilidade e o baixo custo do amido nos Estados Unidos excluíram o uso da goma e o amido se tornou uma solução econômica para os problemas encontrados em perfurações de formações salinas (DARLEY; GRAY, 1988).

Entre os anos de 1943 e 1957, as lamas de alto pH contendo soda cáustica (NaOH) e tanino originaram "as lamas de cal" ou "lamas de cal vermelho" que foram as

mais utilizadas na Costa do Golfo, USA. Nesse período, as lamas à base de óleo eram reconhecidas como as melhores lamas para perfuração e que conduziam o processo de maneira mais rápida. O uso de fluidos base óleo começou a partir de 1920 em operações de completação de poços, sendo essa a sua principal aplicação até 1950. Nesse ano, as experiências favoráveis de campo com as emulsões de óleo levaram o *American Petroleum Institute* (API) a investigar esse tipo de lama, concluindo que as emulsões de óleo cru e de óleo refinado melhoravam o desempenho dos fluidos à base de água por meio do aumento na taxa de perfuração e da vida útil da broca, além da redução dos problemas do poço (DARLEY; GRAY, 1988; SERRA, 2003).

No oeste do Canadá, foram aplicadas lamas com gesso para a perfuração em zonas com anidrita, enquanto as lamas de cal eram utilizadas em perfurações de regiões de folhelhos e formações de alta pressão. As lamas com gesso eram elaboradas pela adição de sulfato de cálcio à bentonita dispersa em água doce e para a redução de filtrado foi utilizado o amido ou a carboximetilcelulose (CMC). Apesar das propriedades das lamas de gesso serem afetadas por pequenas quantidades de anidrita ou sal, estas não estavam adequadas para a perfuração em regiões de folhelhos devido à rápida mudança para o estado gel. Os problemas relacionados ao controle das propriedades das lamas de gesso foram solucionados por King e Adolphson (1960), que desenvolveram os lignosulfonatos de ferro, cromo, alumínio e cobre a partir de sulfito líquido usado. A primeira lama com gesso e lignosulfonato de cromo foi usada com sucesso em 1956 na Louisiana e teve seu uso favorecido nas operações *offshore*, visto que a água do mar possui sais de cálcio e magnésio que contribuem com a estabilização dos folhelhos (DARLEY; GRAY, 1988).

Em 1989, Fisk e Jamison analisaram teorias existentes e equações de predição para viscosidade e filtração dinâmica por meio de dois fluidos: base óleo e base água. O estudo concluiu que os efeitos da temperatura sobre a viscosidade da lama base óleo podem ser previstos por uma equação logarítmica simples. Os gráficos individuais de viscosidade plástica para os fluidos base óleo mostram algumas diferenças para as várias inclinações e interseções com o eixo y, o que causa erros com o cálculo dos valores previstos. Além disso, observaram que a relação viscosidade/temperatura é diferente para os fluidos base água e base óleo, visto que a relação para os fluidos à base de água diminuiu linearmente com a temperatura. Com relação ao filtrado dos fluidos, houve um aumento linear com o tempo da perda de filtrado sob condições de cisalhamento constante e pressão diferencial para todos os sistemas estudados.

De acordo com Caenn e Chillingar (1996), há o desenvolvimento de uma nova geração de fluidos de perfuração com base sintética de éteres, ésteres, polialfaolefinas, glicóis, glicerinas e glicosídeos. O intuito é de produzir lamas com as qualidades dos fluidos de perfuração base óleo com as características de manuseamento e eliminação dos fluidos à base de água. Pesquisas foram feitas para analisar a biodegradabilidade e o tipo de bioacumulação dos fluidos sintéticos.

No ano de 2002, Saasen e Loklingholm analisaram o efeito das propriedades do *cutting bed* (leito de cascalhos) durante a limpeza do orifício do poço, além de demonstrar como as operações de perfuração foram aprimoradas em comparação com as operações utilizando fluidos convencionais. O trabalho foi realizado pelo fato da limpeza do furo do poço estar entre os maiores problemas relacionados às operações de perfuração, devido à dificuldade de remoção do *cutting bed* que forma um gel após a interação com os fluidos de perfuração. Os mesmos concluíram que a limpeza era otimizada pelo uso de fluidos de perfuração com força gel e viscosidades baixas sob as taxas de cisalhamento presentes no fluxo anular. Ainda concluíram que polímeros menores deveriam ser usados com agentes viscosificantes, a fim de evitar a formação de um forte gel de *cutting bed* e que os fluidos com baixo grau de pseudoplasticidade realizaram a limpeza do poço melhor que fluidos com alto grau.

Em 2005, Farias analisou a influência de aditivos dispersantes e umectante aniônico nas viscosidades aparente e plástica, no volume de filtrado e na espessura do reboco de fluidos hidroargilosos para perfuração de poços. O trabalho foi realizado por meio de duas amostras de argilas bentoníticas na forma sódica, três aditivos dispersantes e o umectante aniônico isolado. A preparação dos fluidos e o estudo reológico foram realizados segundo normas da Petrobras, sendo determinadas as viscosidades aparente e plástica e o volume de filtrado. A autora concluiu que a aditivação dos fluidos com dois dos aditivos dispersantes testados e o aumento da concentração desses permitiram a redução da viscosidade aparente, do volume de filtrado e da espessura do reboco.

Em 2010, Batista realizou a caracterização física, mineralógica e ainda o estudo reológico de argilas bentonitas do município de Cubati-PB, visando seu uso como agente viscosificante e tixotrópico em fluidos de perfuração de poços de petróleo à base de água. A partir do estudo reológico, foi possível conhecer as propriedades reológicas e de filtração das suspensões argila-água preparadas com as bentonitas estudadas. O teor ótimo de CMC a ser utilizado variou de acordo com a argila. Concluiu-se, com base nas especificações reológicas previstas pela Petrobrás, que três tipos de amostras

apresentaram elevado potencial para utilização em fluidos de perfuração de poços de petróleo à base de água.

O desenvolvimento dos fluidos de perfuração à base de água foi principalmente estimulado para satisfazer condições de estabilidade, pressão do poço e de remoção de cascalhos. Entretanto, a complexidade das condições de perfuração possibilitou o desenvolvimento dos fluidos à base de óleo (BARROS, 2007).

De acordo com Amorim (2003), a evolução dos fluidos de perfuração no Brasil seguiu a tendência mundial e, nos últimos tempos, os fluidos contendo polímeros e sais são utilizados em algumas fases de perfuração. Os fluidos à base de óleo também continuam sendo utilizados, mas não com a sua formulação original devido à sua alta toxicidade e às restrições ambientais.

3.3. Classificação dos Fluidos de Perfuração

Os fluidos de perfuração são classificados com base no componente principal presente na sua fase contínua. Os componentes podem ser: água, óleo ou gás.

Nos casos em que os fluidos possuem o componente principal da fase contínua como um líquido, o termo lama é aplicado à mistura formada pelos sólidos suspensos nesse líquido e as lamas recebem a subdivisão em lamas à base de água (*water based mud* – WBM) e lamas à base de óleo (*oil based mud* – OBM). Quando ambos os líquidos (óleo e água) permanecem juntos, eles formam uma emulsão, por meio de agitação e da presença de um emulsificante adequado. A natureza química do agente emulsificante determina se o óleo está emulsificado na água (lama de emulsão de óleo – *oil emulsion mud*) ou se a água está emulsificada no óleo (emulsão invertida – *invert emulsion*) (SERRA, 2003).

Os fluidos à base de gás incluem aqueles nos quais o gás é a fase contínua e aqueles onde o gás é a fase descontínua como em espumas. Contudo esses fluidos são utilizados com menores frequências.

3.3.1 Fluidos base água

Fluidos à base de água são classificados como os que apresentam a água sendo o principal componente da fase contínua, podendo ter a natureza de água doce, dura ou salgada. Além disso, outra característica desse fluido são os aditivos químicos empregados na sua composição. A água pode conter diferentes componentes dissolvidos

nela, tais como: sais, surfactantes, polímeros orgânicos no estado coloidal, gotículas de óleo, entre outras substâncias insolúveis como a barita, argila e detritos em suspensão (DARLEY; GRAY, 1988; THOMAS *et al.*, 2001).

A água tem por principal função prover o meio de dispersão para os materiais coloidais. No meio aquoso, há sólidos dispersos ativos que são materiais argilosos, cuja formação principal é viscosificar o fluido e os sólidos inertes que podem se originar da adição de materiais industrializados ou de detritos finos das rochas perfuradas. Os sólidos inertes oriundos das rochas perfuradas são areia, silte e calcário fino. Sendo assim, as argilas e os polímeros são os principais materiais que controlam a viscosidade, limite de escoamento, forças géis e filtrado em valores adequados para conferir ao fluido uma boa taxa de remoção dos sólidos perfurados e capacidade de estabilização das paredes do poço (THOMAS *et al.*, 2001).

As lamas à base de água tendem a ser utilizadas em baixas profundidades. Devido ao baixo impacto ambiental, essa perfuração causa menos danos ao meio ambiente, o que possibilita o descarte de lamas base água diretamente no mar. Apesar do fluido à base de água apresentar baixo impacto ambiental, ele não possui as mesmas características relacionadas à lubricidade, inibição aos folhelhos e de estabilidade térmica dos fluidos à base de óleo de emulsões invertidas. A fim de suprir as carências dos fluidos, aditivos específicos passaram a ser adicionados às suas formulações, o que gerou novas classificações para os fluidos à base de água conhecidas como fluidos não inibidos, inibidos, fluidos com baixo teor de sólidos e emulsionados com óleo (DARLEY; GRAY, 1988).

Os fluidos não inibidos são empregados na perfuração das camadas rochosas superficiais e como essas rochas superficiais são praticamente inertes ao contato com a água doce, os fluidos requerem pouco tratamento químico nessa fase. Por outro lado, os fluidos inibidos são programados para perfurar rochas de elevado grau de atividade na presença de água doce e por isso são adicionados produtos químicos, tais como eletrólitos e/ou polímeros para retardar ou diminuir os efeitos de plasticidade, expansão, dispersão e solubilidade das rochas ativas.

Os fluidos à base de água classificados com baixo teor de sólidos e os emulsionados com óleo são utilizados em casos especiais, como no aumento da taxa de penetração da broca, o que permite a redução do custo total da perfuração. Os fluidos emulsionados com óleos têm o objetivo de reduzir a densidade do sistema para evitar

que ocorram perdas de circulação em zonas de baixa pressão de poros ou baixa pressão de fratura.

Ao longo dos últimos anos, diferentes tipos de substâncias dissolvidas e em suspensão foram sendo incorporadas às formulações dos fluidos à base de água e com isso o desempenho operacional dos fluidos foi sendo testado. Os testes analisaram variáveis operacionais de filtração, de viscosidade, de lubrificação da broca, de toxidade, de densidade e de sua influência na taxa de perfuração. Os resultados permitiram o desenvolvimento de novos fluidos com formulações mais específicas para cada tipo de poço a ser perfurado; ou seja, passaram a desempenhar cada vez melhor as suas funções.

3.3.2 Fluidos base óleo

De acordo com Thomas *et al* (2001), os fluidos de perfuração à base de óleo apresentam a fase contínua ou dispersante constituída por uma fase oleosa, em geral composta de hidrocarbonetos líquidos onde pequenas gotículas de água ou de solução aquosa constituem a fase descontínua desses fluidos. Alguns sólidos coloidais, de natureza inorgânica e/ou orgânica, podem compor a fase dispersa. Os fluidos podem ser emulsões água/óleo propriamente dita (teor de água < 10%) ou emulsão inversa (teor de água de 10% a 45%).

Os fluidos à base de óleo são empregados com menor frequência que os fluidos base água, visto que os fluidos base óleo apresentam dificuldades na detecção de gás no poço devido a sua solubilidade na fase contínua, possuem menores taxas de penetração, maiores graus de poluição, menor número de perfis que podem ser executados, dificuldades no combate à perda de circulação e maior custo inicial que os fluidos base água, sendo esse um dos principais motivos para a substituição de fluidos base óleo pelo de base água, quando a perfuração for compatível com os de base água (THOMAS *et al*., 2001).

Entretanto, conforme exposto por Thomas *et al* (2001), esses fluidos apresentam grau de inibição elevado em relação às rochas ativas, baixíssima taxa de corrosão, baixa solubilidade das formações de sal, resistência a altas temperaturas, graus de lubricidade elevados ou baixos coeficientes de atrito e grandes intervalos de variação de massa específica. Devido às suas características, os fluidos à base de óleo têm conferido excelentes resultados na perfuração de poços HPHT (alta pressão e alta temperatura), de folhelhos argilosos e plásticos, de arenitos produtores danificáveis por fluido à base de

água, em poços direcionais ou delgados (ou de longo afastamento) e na perfuração de formação com baixa pressão de poros ou de fratura.

3.3.3 Fluidos sintéticos

Fluidos de base orgânica sintética podem ser considerados como uma classe especial dos fluidos à base de óleo, onde a fase contínua é constituída de substâncias oleosas produzidas por fluidos orgânicos com características menos poluentes que os fluidos de perfuração base óleo. Os fluidos sintéticos são produzidos com bases ésteres, poliolefinas, acetais e éteres ou purificadas a partir de uma fração de petróleo. Do ponto de vista do desempenho, os fluidos podem ser considerados como similares aos fluidos à base de óleo, além de terem a vantagem de causarem um menor impacto ambiental, uma vez que são menos tóxicos e mais biodegradáveis (BARROS, 2007; DARLEY; GRAY, 1988).

O desenvolvimento dos fluidos sintéticos é relativamente recente, sendo da década de 90 o primeiro poço comercialmente perfurado com um fluido à base de éster, na costa da Noruega. Conforme Friedheim e Conn (1996) relataram, a primeira geração de fluidos sintéticos foi composta por ésteres, éteres, poli alfa-olefinas (PAOs) e acetatos. Na segunda metade da década de 90, pesquisas originaram a segunda geração dos fluidos sintéticos, compostas pelos alquil-benzenos lineares (LABs), alfaolefinas lineares (LAOs), olefinas internas (IOs) e parafinas lineares (LPs).

Os fluidos sintéticos são indicados para aplicações nas quais a utilização dos fluidos de base aquosa não pode ser realizada ou quando não é permitido o descarte marítimo dos fluidos de base oleosa e de seus resíduos, o que já ocorre em diversas partes do mundo.

3.4. Propriedades dos fluidos

O desempenho de um fluido depende basicamente de quatro fatores: reologia, densidade, perda de filtrado e reatividade química, segundo Darley e Gray (1988). As propriedades físicas mais comuns de serem medidas nas sondas são a densidade, os parâmetros de filtração, as propriedades reológicas, o teor de sólidos, concentração hidrogeniônica, alcalinidade, teor de cloretos, bentonita ou salinidade. Há ainda outras propriedades físicas que podem ser avaliadas no comportamento dos fluidos como a

toxicidade, biodegradabilidade, resistividade, a estabilidade elétrica e o coeficiente de lubricidade para o sucesso da perfuração (FÉLIX *et al.*, 2007; MELO, K. C. DE, 2008).

3.4.1 Densidade

A densidade é a propriedade que relaciona a massa por unidade de volume e pode ser expressa em unidades de libras-massa por galão (lbm/gal), em libras-massa por pé cúbico (lbm/ft³) ou em quilogramas por metro cúbico (kg/m³).

A fim de garantir que uma fina camada permeável de reboco seja formada e que seja reduzida a infiltração dos fluidos nas rochas é necessário que a pressão da coluna de perfuração seja maior que a pressão dos poros em, no mínimo, 200 psi (DARLEY; GRAY, 1988).

A pressão dos poros estabelece o limite inferior da densidade. O limite máximo é determinado pela pressão de fratura das formações expostas, medida de pressão na qual a rocha sofre o rompimento (THOMAS *et al.*, 2001). Deve-se operar entre esses limites, estando assim na faixa da janela operacional.

A profundidade do poço é um fator importante para a determinação da densidade da lama, visto que quanto mais profundo for o poço, maior tende a ser o valor da pressão hidrostática, o que interfere nessa propriedade do fluido. Isso ocorre para que a coluna de perfuração possa suportar as pressões estáticas do poço; ou seja, a pressão do fluido no poço é controlada variando a densidade do fluido de perfuração.

Segundo Thomas *et al* (2001), deve-se utilizar a baritina ($BaSO_4$) para aumentar a densidade de um certo fluido, enquanto para reduzir a densidade dos fluidos à base de água, dilui-se com água (densidade 1,00 g/cm³) ou óleo diesel (densidade 0,82 g/cm³).

3.4.2 Parâmetros de filtração

Nascimento *et al.* (2010) informaram que há poucos parâmetros de perfuração que podem ser alterados com o intuito de reduzir a probabilidade de ocorrência de prisão diferencial, fenômeno indesejável, pois, quando presente, pode gerar grandes prejuízos técnicos e econômicos, como por exemplo, a suspensão das atividades da sonda ou até mesmo o abandono do poço.

A geologia regional e as condições de *overbalance* (pressão hidrostática superior à pressão de poros da formação) são, muitas vezes, necessárias para o bom controle do poço, garantindo a sua estabilidade e esses dois fatores são pré-determinantes nas formações rochosas. Contudo, Nascimento *et al* explicam que o parâmetro mais

facilmente ajustado para reduzir o risco de prisão diferencial é o fluido e, mais particularmente, suas propriedades de filtração (volume de filtrado e o reboco).

De acordo com Sherwood e Meentem (1997), uma das propriedades desejadas do fluido de perfuração é que o mesmo deve minimizar a perda de fluido, a partir do furo do poço em direção à formação permeável circundante. Isso é conseguido por meio da criação de uma torta de filtração (reboco) na superfície do poço, sendo essa uma membrana fina de baixa permeabilidade, que garante a estabilidade do poço, bem como evita ou retarda a perda de filtrado continuamente, ou seja, o escoamento da fase líquida do fluido para o interior das formações geológicas (FARIAS, 2005).

De acordo com Darley & Grey (1988), o reboco é formado pela presença no fluido de perfuração de partículas ligeiramente menores que a abertura dos poros da formação rochosa. Essas partículas ficam presas à superfície dos poros enquanto partículas menores que essas invadem os poros. A suspensão de partículas finas que penetram na rocha enquanto o reboco é formado é chamada de *mud spurt* e o líquido que penetra após o aprisionamento dessas partículas é chamado de filtrado.

A perda de circulação pode ser definida como a perda total ou parcial do fluido de perfuração para as formações geológicas e gera um problema devido à elevada taxa de filtração. Pereira 2003 (apud FARIAS, 2005) explica que a perda de circulação é um dos problemas mais antigos e frequentes nas operações de perfuração de poços que pode ocorrer a qualquer profundidade onde a pressão total exercida pelo fluido ultrapassa a pressão total contrária da formação, gerando a fuga da fase contínua do fluido.

A perda de circulação pode provocar desmoronamento nas formações sobrejacentes, deposição dos detritos de perfuração sobre a broca e interrupção prolongada da sondagem, além de ser o fator decisivo na elevação dos custos de perfuração. Farias (2005) ainda afirma que os elevados valores de volume de filtrado indicam invasão excessiva de filtrado nas formações geológicas e relata alguns problemas durante o processo de perfuração, tais como: o desmoronamento de formações hidratáveis, avaliações equivocadas da formação que está sendo perfurada e a redução do diâmetro do poço em virtude da formação de rebocos muito espessos.

Darley e Gray (1988) ainda complementaram sobre o controle da espessura do reboco ser importante para evitar diversos problemas durante a perfuração, como: aprisionamentos da coluna de perfuração, danos às formações aquíferas e prisões diferenciais, sendo esse último de grande relevância (apud LEITE; NASCIMENTO; AMORIM, 2011).

3.5. Aditivos

3.5.1 Considerações e Definições

Os aditivos são substâncias químicas com a função de desenvolver uma lama específica para cada tipo de solo a ser perfurado, visto que conferem propriedades especiais à lama. Uma característica importante dos ativos é que eles podem ser inseridos na perfuração ao longo do tempo; ou seja, não é necessário parar a perfuração para que a lama seja substituída, sendo possível adicioná-los de forma contínua (SERRA, 2003).

A formulação do fluido depende das exigências específicas de cada perfuração. Segundo Amorim (2003), para perfurações simples e pouco profundas pode-se utilizar um fluido constituído de água e argila em baixa concentração. No entanto, em situações de difícil perfuração e/ou em grandes profundidades, é necessário um fluido mais elaborado, com introdução de um ou vários aditivos.

3.5.2 Classificação dos aditivos

Segundo Lummus e Azar, 1986 (apud BARBOSA, 2006), os aditivos para fluidos são classificados em viscosificantes, agentes densificantes, redutores de viscosidade (defloculantes), redutores de perda de fluidos, emulsificantes e aditivos especiais. Os viscosificantes possuem a função de aumentar a viscosidade do fluido. Os agentes densificantes aumentam a densidade da lama, os redutores de viscosidade (defloculantes ou dispersantes) e de perda de fluido são adicionados aos fluidos com a função de reduzir a viscosidade e o volume de filtrado, respectivamente. Os emulsificantes facilitam o mecanismo de dispersão de dois líquidos imiscíveis, estabilizando a emulsão.

Os aditivos podem desempenhar uma série de funções na lama de perfuração, como mostrado na Tabela 1. De acordo com o *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering*, há diferentes grupos de aditivos e sua classificação toma por base a Associação Internacional dos Contratantes de Perfuração (IADC – *International Association of Drilling Contrators*) e podem ser visualizados na Tabela 1 (LYONS; PLISGA, 2005).

Tabela 1 - Aditivos dos Fluidos de Perfuração
Fonte: Adaptada de Lyons; Plisga, 2005 e Serra, 2003

Função	Aditivos mais usados	Efeitos do aditivo na lama
Controle de pH	Cal, soda cáustica e outros ácidos.	Controlar o grau de acidez (pH) para diminuir a corrosão dos equipamentos de perfuração.
Bactericidas	Cal, Soda Cáustica e paraformaldeídos.	Reduzir a contagem de bactérias e prevenir a degradação bacteriana de aditivos orgânicos.
Removedores de cálcio	Soda cáustica, bicarbonato de sódio e alguns polifosfatos.	Reduzir o cálcio na água do mar, tratar a contaminação por cimento e sobrepor os efeitos de contaminação da anidrita e gipsita, ambas formas do sulfato de cálcio.
Inibidores de corrosão	Produtos químicos à base de amina e fosfato.	Controlar o pH para impedir a corrosão da broca, por meio da neutralização de gases ácidos de risco.
Emulsificantes	Ácidos graxos e orgânicos, amina, sabões e detergentes.	Criar e manter uma mistura heterogênea de dois líquidos imiscíveis (emulsão, usualmente água/óleo).
Redutores de filtrado	Argilas de bentonita e lignita, CMC, poliacrilato e goma pré-gelatinizada.	Diminuir a perda do fluido, uma medida da tendência da fase líquida da lama de perfuração de passar para dentro da formação.
Floculantes	Salmouras, cal hidratada, sulfato de cálcio hidratado, polímeros a base de acrilamida e tetrafosfato.	Agrupar as partículas sólidas em flocos, aumentando a viscosidade e facilitando a limpeza do poço.
Espumantes	Surfactantes	Permitir a formação de fluidos com ar ou gasosos a partir de produções à base de água.
Agentes para desobstrução do tubo de perfuração	Detergentes, sabões, óleos, surfactantes.	Reduzir a fricção e aumentar a lubrificação em áreas onde o tubo de perfuração está mais sujeito a emperrar.
Lubrificantes	Diversos tipos de óleo, surfactantes, glicóis, glicerina, líquidos	Reduzir o atrito da lama e resfriar os equipamentos de perfuração (broca e coluna).

	sintéticos e grafite.	
Inibidores do inchamento de folhelhos	Fontes de cálcio solúvel e potássio, assim como sais orgânicos.	Reduzir a hidratação de folhelhos para prevenir o alargamento excessivo do poço e o levantamento ou desabamento enquanto folhelhos sensíveis à água estão sendo perfurados.
Tensoativos	Surfactantes e umidificantes.	Reduzir a tensão superficial entre as superfícies de partículas em contato (água/óleo, água/sólidos e etc).
Dispersantes ou defloculantes	Polifosfatos, lignita e lignosulfonatos.	Reduzir a aglomeração das partículas em flocos, diminuindo a viscosidade e a força gel, melhorando com isso a capacidade de bombeamento da lama.
Viscosificantes	Bentonita, argila de atapulgita, goma xantana, CMC.	Aumentar a viscosidade para melhor limpeza do poço e suspensão de *cuttings* e sólidos.
Espessantes (Materiais que adicionam peso)	Barita, compostos de chumbo, óxidos de ferro, carbonatos de cálcio e compostos similares possuindo alta densidade.	Controlar as pressões de formação, por possuírem alta gravidade específica (densidade).
Estabilizadores de temperatura	Diversos tipos de polímeros, copolímeros, lignita e tanino.	Aumentar a estabilidade térmica, reológica e de filtração de fluidos de perfuração em temperaturas elevadas.

Além dos aditivos mencionados, os sais atuam como inibidores das formações ativas, pois reduzem o escoamento hidráulico para a formação rochosa, principalmente devido à viscosidade dos seus filtrados e por estimular o escoamento de água da formação argilosa para o fluido de perfuração. Dessa forma, o escoamento inverso reduz a hidratação da formação e as pressões de poros da formação ao redor do poço, o que gera um aumento da tensão efetiva. Os sais mais comuns utilizados em fluidos de perfuração à base de água são os sais de cloretos (NaCl, KCl e $CaCl_2$) (ROSSI; GUIMARÃES, 2007).

3.5.3 Microesferas ocas de vidro

As microesferas ocas de vidro são descritas pela empresa 3M do Brasil LTDA como produtos *Scotchlite Glass Bubbles*, sendo de parede fina, utilizadas para diversas aplicações como excelente alternativa às cargas e aditivos convencionais, tais como: sílica, carbonato de cálcio, talco, argila entre outros. Essas partículas de baixa densidade são usadas em várias indústrias para redução do peso, custo e atender determinadas propriedades em seus produtos.

Frequentemente, as microesferas são utilizadas em operações de petróleo e gás, incluindo a perfuração com fluidos leves (*lightweight drilling fluids*); são quimicamente estáveis, incompressíveis e praticamente insolúveis em água ou óleo. As microesferas ocas de vidro são especialmente concebidas para uma elevada relação resistência-peso, o que permite a sobrevivência em condições exigentes em poços.

Microesferas ocas de vidro ajudam a reduzir a densidade em fluidos de perfuração à base de água e à base de petróleo. Densidades tão baixas quanto 5,5 lb/gal (0,66 Kg/L) podem ser obtidas quando a base do fluido é um óleo sintético. Lamas de perfuração, formuladas com microesferas oca de vidro 3M, também podem ser potencialmente reutilizadas, proporcionando oportunidades adicionais para redução de custos (3M, 2015).

Em fluidos de perfuração sem as microesferas ocas de vidro (Figura 3), pode ocorrer da coluna de fluido de perfuração exercer uma pressão hidrostática maior que a pressão da formação rochosa que se encontra ao seu redor, o que pode forçar a entrada de fluido de perfuração na formação rochosa. A adição da microesferas 3M *Glass Bubbles* estabelece um equilíbrio entre a pressão hidrostática e a pressão da formação. De acordo com a profundidade do poço, mais leve deve ser o fluido de perfuração para que seja possível manter esse equilíbrio (3M, 2015).

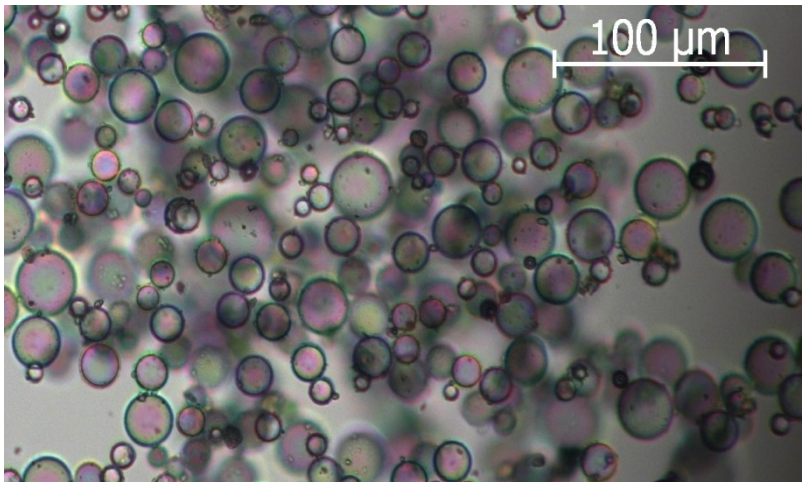


Figura 3 - Microscopia óptica em campo claro das microesferas ocas de vidro 19000 3M (20x).

3.5.3.1 Aplicações das microesferas ocas de vidro

Conforme mencionado anteriormente, há centenas de aplicações atuais e potenciais das microesferas de vidro que fornecem benefícios aos usuários, incluindo redução de peso, a melhoria do rendimento do processo, aumento da estabilidade dimensional e extensores de pigmentos. A seguir, são apresentadas determinadas aplicações atuais ou potenciais paras as microesferas ocas de vidro:

- automóveis: uma ampla variedade de peças moldadas por injeção, como boias de tanques de combustível, acabamentos internos, consoles, refletores de faróis, encostos, painéis e vedações de carroceria.
- materiais de construção: massas corridas, molduras arquitetônicas, massas de vidraceiro, vedação e calafetagem, massas de epóxi e mármore artificial, ferramentas portáteis leves, perfis extrudados de janelas e portas.
- aplicações ao consumidor: embalagens retornáveis, calçados leves, linhas de pesca, materiais esportivos e compostos de madeira.
- eletrônicos: estruturas leves para impressoras.
- marinha: vedantes, lavatórios, isolamento térmico de dutos.
- mineração: aumento do poder de detonação nos explosivos.
- tintas e revestimentos: uso em tinta para interiores e exteriores, tintas refletivas, tintas anticondensação, revestimentos industriais, revestimento de poliuretano para torres de concreto.

3.5.3.2 Trabalhos realizados com as microesferas ocas de vidro

De acordo com a pesquisa de Medley, Garkasi e Maurer (1995) na década de 1960, cientistas na Rússia utilizaram fluidos leves contendo esferas ocas de vidros *(hollow glass spheres* - HGS) como aditivos para reduzir a densidade do fluido em áreas onde ocorriam grandes problemas de perda de circulação, os quais impediam a perfuração. Nesses locais, foram utilizadas nas lamas de perfuração esferas sólidas a fim de aumentar a lubricidade e reduzir os coeficientes de atrito. Nos Estados Unidos, foram utilizadas esferas ocas e outros aditivos leves, por anos, para reduzir a densidade de cimentos em áreas de perda de circulação. Medley, Garkasi e Maurer (1995) ainda mencionam que, dentre as esferas ocas de vidro comercialmente disponíveis, essas eram tipicamente utilizadas como extensores em tintas, colas e outros líquidos. Em seu trabalho, as esferas ocas de vidro foram selecionadas com base em suas propriedades físicas e sua capacidade de manter as propriedades sob pressões e temperaturas elevadas, como as encontradas em poços de petróleo e de gás. As propriedades determinantes para as suas utilizações são a densidade relativa e a força de colapso das esferas. Nessa pesquisa as microesferas ocas de vidro foram utilizadas com interesse em perfurações sub-balanceadas.

As esferas ocas de vidro também são usadas em várias indústrias na área da Engenharia, como compósitos aeroespacial, automotivo e módulo flutuante de espuma sintética nos casos em que há a necessidade de redução de peso, sendo a redução de peso a maior de suas aplicações. Elas são quimicamente inertes, exceto na presença de HF, possuem alta resistência à água, à alta temperatura e à pressão (ARCO *et al*., 2000).

O fato das esferas ocas de vidro exercer papel de redutoras de densidade dos fluidos de perfuração foi a motivação para Khalil, Jan e Raman (2011) desenvolverem a sua pesquisa com fluidos de perfuração super leves. Eles determinaram o melhor modelo reológico dentre oito modelos para o fluido de perfuração base óleo, adicionado de 35% (w/w) de esferas ocas de vidro e ainda avaliaram a influência da temperatura na viscosidade do fluido.

Barboza e de Paoli (2002) utilizaram as microesferas ocas de vidro como aditivo em um polímero, a fim de obter espumas sintéticas, material de baixa densidade. Afirmaram ainda que as microesferas podem ser sólidas ou ocas, sendo as sólidas geralmente de vidro, cerâmica, carbono, grafite, zinco ou do tipo poliméricas (policloreto de vinila, poliestireno). As esferas sólidas são usadas como cargas para

conferir características específicas aos materiais poliméricos os quais são adicionadas. As esferas ocas podem ser de vidro, cerâmica, carbono, resina fenólica, poli (cloreto de vinilideno) ou poliestireno. Foi observado que as microesferas ocas de vidro utilizadas resistiram às condições a que foram testadas, o que confirma sua aplicabilidade na obtenção de compósitos poliméricos nos casos em que a redução de peso ou capacidade de isolamento térmico são fatores importantes.

Em 2003, Chen e Burnett desenvolveram novos *low-density drill-in fluids* (LDDIF) para evitar danos à formação e obter uma maior produtividade nos poços horizontais. Esses fluidos incorporam em sua formulação *hollow glass spheres* (HGS) de baixa densidade a fim de permitir a perfuração próxima do equilíbrio em baixa pressão e em reservatórios depletados. Além disso, os fluidos apresentam o cloreto de potássio (KCl) como fluido base para inibir a hidratação de argila e utiliza baixas concentrações de esferas ocas de vidro (HGS), de modo que essas não alteravam o comportamento reológico do fluido. As variáveis de teste incluíram temperatura, concentração de sólidos gerados pela broca, técnica de limpeza e concentração de HGS. Os resultados dos testes demonstraram que os fluidos novos possuíam maior facilidade de remoção de até 50% que os fluidos de perfuração (*drill-in fluids* – DIFs), a partir das faces de formação do poço e proporcionaram maior produtividade que os fluidos de densidade mais elevada. Os resultados indicaram que poços menos comprometidos e com maior produtividade superavam quaisquer custos adicionais gerados pelo uso das esferas ocas de vidro (HGS) como aditivos nos fluidos.

No ano de 2006 Trofimov e Pleshkov utilizaram as microesferas ocas de vidro como recheio no desenvolvimento de compósitos com dupla camada, resistentes, de baixas densidades e com paredes finas para a aplicação em veículos de submersão profunda. As microesferas ocas apresentaram resultados bastante superiores de resistência em relação ao recheio de espumas, na fabricação de compósitos de paredes finas e de alta resistência.

Silva (2013) utilizou as microesferas ocas de vidro na aditivação de concreto a fim de caracterizar a sua fluidez e propriedades mecânicas. Foi constatado o aumento da facilidade de utilização do concreto com a adição de pequena quantidade de microesferas ocas de vidro (1%, em média). Além disso, foram observadas reduções do uso de superplastificantes e água, o que poderia evitar os danos por retração e proporcionar o maior conformo térmico, gerado pela adição das microesferas ocas de vidro.

Nee *et al.*, neste ano de 2015, divulgaram pesquisa para a otimização de um fluido de perfuração de baixa densidade, em perfurações de poços sub-balanceadas (*underbalanced drilling* - UBD). Foram analisadas as concentrações de argila, goma xantana, amido e esferas ocas de vidro (*glass bubbles*), por meio da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). A análise ocorreu a fim de avaliar as respostas da densidade dos fluidos, viscosidade plástica (VP) e limite de escoamento (*yield point* - YP). Os melhores resultados foram obtidos para concentrações de esferas de vidro, argila, goma xantana e amido de 24,46% p / v, 0,63% p / v, 0,21% p/ v e 2,41% p / v, respectivamente. O estudo concluiu que foi possível prever os três parâmetros de resposta utilizando modelos gerados pelo MSR, com boa concordância com os valores preditos.

3.6. Reologia

De acordo com a literatura há diferentes modelos reológicos para diversos tipos de fluidos, que foram preparados com base em experimentos. No cenário de perfuração em águas profundas e ultraprofundas, os fluidos estarão expostos a temperaturas mais baixas e pressões mais críticas, requerendo assim uma demanda de estudos, artigos e publicações em novos cenários. Determinadas características dos fluidos de perfuração estão relacionadas direta ou indiretamente com as suas propriedades reológicas. Uma característica diretamente relacionada à reologia é a viscosidade dos fluidos que deve ser baixa em altas vazões, para reduzir ao máximo as perdas de carga, e alta em baixas vazões, para não prejudicar a capacidade de carrear os sólidos, mesmo em baixas velocidades (FILHO, 2013).

3.6.1 Parâmetros reológicos

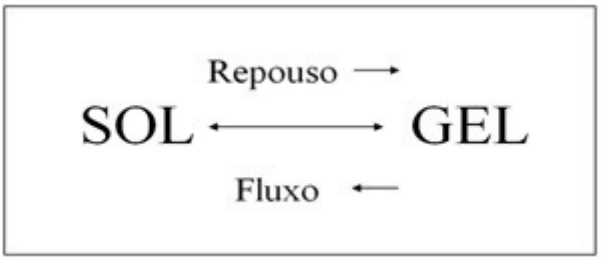
As propriedades reológicas devem ser controladas nos fluidos de perfuração a fim de minimizar os custos com a bomba, maximizar as taxas de penetração, garantir o transporte eficiente dos sólidos obtidos da perfuração, minimizar a erosão no poço (DARLEY; GRAY, 1988).

No campo, as principais propriedades reológicas de interesse, que se encontram vinculadas ao desempenho do fluido, além da viscosidade, são: índice de comportamento; índice de consistência; viscosidade aparente; viscosidade plástica; limite de escoamento e força gel. Em termos reológicos, a viscosidade é o parâmetro

mais conhecido, sendo definida como a resistência que uma substância apresenta ao escoamento (FÉLIX *et al*., 2007). No que se refere aos fluidos de perfuração as propriedades reológicas são dependentes do tempo (reopéticos e tixotrópicos) ou variam com as relações entre velocidade e pressão.

Os fluidos de perfuração são sistemas de comportamento pseudoplástico característico das partículas que compõem o material. Em geral, essas partículas apresentam elevada resistência interna contra o escoamento, demonstrada pela viscosidade. Por outro lado, quando submetidas a maiores taxas de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) as partículas ou macromoléculas que compõem o fluido de perfuração, tendem a se alinhar na direção do fluxo, facilitam o deslizamento e reduzem a viscosidade do fluido (SOUZA, 2012).

Souza (2012) afirma que a tixotropia costuma ocorrer em fluidos com comportamento pseudoplástico, fenômeno este muito desejável aos fluidos de perfuração. De acordo com Darley & Gray (1988) o fenômeno de tixotropia foi originalmente definido por Freundlich, em 1935, como uma transformação isotérmica reversível de um sol coloidal para um gel. Quando os fluidos tixotrópicos são submetidos às condições dinâmicas saem do estado em repouso, sob altas tensões de cisalhamento, e retornam ao estado sol ao recuperarem a sua fluidez, como observado no diagrama, confirmando a definição de Freundlich.



Quando os fluidos tixotrópicos se encontram em repouso ou baixas taxas de cisalhamento uma estrutura tridimensional, conhecida por gel, é formada devido às forças atrativas das moléculas e esta é responsável pela elevação da viscosidade dos mesmos e, ainda, pelo aumento da tensão de cisalhamento (MACHADO, 2002). Essa propriedade permite que os fluidos de perfuração formem um sol com a finalidade de transportar os detritos de perfuração e, por outro lado, um gel para mantê-los em suspensão nos momentos em que a circulação do fluido é interrompida. De acordo com

Alderman *et al.*(1988) os fluidos de perfuração base água alcançam melhores resultados reológicos quando possuem baixa viscosidade para facilitar o bombeamento e com o uso de dispersões de bentonita (BATISTA, 2010).

Nos intervalos em que os fluidos tixotrópicos são deixados em repouso é necessário que a tensão mínima (τ_t) seja atingida e este valor, segundo Machado (2002), é superior ao limite de escoamento real do fluido (τ_0). A diferença entre estes dois valores é denominada como força gel, presente na equação 1.

$$\textbf{Força Gel} = \boldsymbol{\tau_t - \tau_0} \tag{1}$$

A força gel é também um parâmetro reológico que indica o grau de gelificação devido à interação elétrica entre partículas dispersas. A força gel inicial mede a resistência para colocar o fluido em fluxo. A força gel final mede a resistência para reiniciar o fluxo quando este fica certo tempo em repouso. A diferença entre elas indica o grau de tixotropia, sendo denominado por força gel e apesar de ser conhecida como medida de força, a medida é obtida por diferença de tensão, sendo fornecida em unidade de Pascal (THOMAS *et al.*, 2001).

A Figura 4 mostra a formação e a quebra da estrutura gel, fenômenos dependentes do tempo. O primeiro trecho da figura demonstra a etapa em que o gel é desfeito, quando submetido a uma taxa de cisalhamento constante, transformando-se em sol. Em seguida, a estrutura se recupera lentamente quando deixada em repouso ($\dot{\gamma} = 0$), convertendo-se novamente em gel. Dessa forma, fica evidenciado que o estado gel pode se transformar em sol por cisalhamento e este retornar ao gel, quando em condição estática.

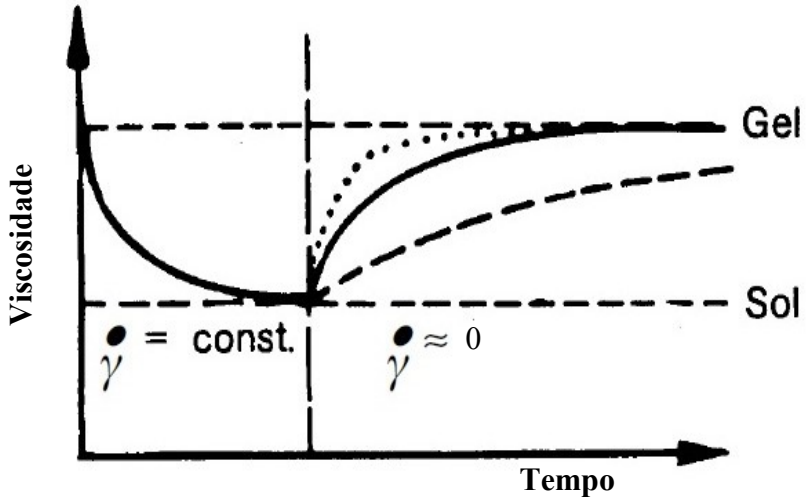


Figura 4 - Curvas de viscosidade x tempo.
Fonte: Adaptado de Schramm, 1994.

CAPÍTULO 4. Materiais e Métodos

Neste capítulo, são apresentados os principais materiais, equipamentos e a metodologia utilizada no desenvolvimento desta dissertação. Alguns experimentos foram realizados no Pólo de Xistoquímica, na UFRJ, no Laboratório de Fluidos, no CENPES, Petrobras.

4.1. Materiais

Foram formulados fluidos de perfuração base água com diferentes aditivos e diversas concentrações, atendendo a critérios de composição padrão, com base em dados fornecidos por empresa petrolífera, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Formulação dos Fluidos de Perfuração Base Água

Formulação	Concentração (g/L)	Função
Água destilada	QSP*	Meio dispersante
NaCl	285,0	Inibidor de formação ativa*
KCl	39,0	Inibidor de formação ativa*
Bicarbonato de Sódio	2,85	Removedores de cálcio
Anti-Espumante	3 gotas	Antiespumante
Goma Xantana	0 – 5,71	Viscosificante
HPA (hidroxipropilamido)	0 – 22,86	Controlador de filtrado
Bactericida	1,43	Manter integridade dos polímeros goma xantana e amido modificado
MgO	4,28	Controlador de pH
$CaCO_3$ 2– 44 µm	0 – 114,29	Obturantes
$CaCO_3$ 1– 10 µm	0 – 114,29	Obturantes
Microesferas ocas de vidro	Suficiente para ajustar a massa específica em 1078 Kg/m³	Controlador de densidade

QSP: Quantidade suficiente para a preparação de 360 mL do fluido

*Formações sujeitas a interações físico-química (SHIROMA, 2012).

4.1.1 Microesferas ocas de vidro

As microesferas ocas de vidro são constituídas por borossilicato de sódio e cálcio, sendo resistente à água e quimicamente estável. O tipo utilizado nesta dissertação foi fornecido pela empresa 3M do Brasil LTDA e são do tipo 3M *Glass Bubbles* 19000. Na Tabela 3, estão presentes as características específicas das mesmas.

Tabela 3 - Características das Microesferas Ocas de Vidro

Características	Medidas
Resistência à compressão	19.000 psi
Densidade	0,46 g/cm³
Tamanho da partícula (μm)	20

Devido ao fato das microesferas possuírem baixíssimas densidades, elas são utilizadas para a redução do peso e custo do material, bem como para atender às propriedades determinadas dos produtos finais. No caso da redução do peso, é necessário utilizar um volume grande de microesferas ocas para se atingir o mesmo peso de uma carga tradicional, visto que elas possuem baixa densidade. Dessa forma, substituindo as cargas por volume de microesferas ocas de vidro 3M, o produto pode ter seu peso reduzido drasticamente (SILVA, 2013).

4.2. Metodologia

4.2.1 Planejamento de Experimentos

No estudo do desenvolvimento de fluidos de perfuração, é importante usar a técnica de planejamento de experimentos por abranger muitas variáveis, sendo necessária a realização de maneira organizada de uma quantidade mínima necessária de experimentos, economizando tempo e recursos financeiros.

Dessa forma, foi realizado o planejamento experimental fatorial 2^4 (dois níveis e quatro fatores), com três experimentos no ponto central, totalizando 19 experimentos. Os quatro fatores presentes no planejamento foram: dois carbonatos de cálcio (a e b), a goma xantana e o amido (HPA). Esses componentes foram utilizados, pelo fato de serem os únicos presentes na formulação dos fluidos os quais apresentam um intervalo de concentração, não possuem valores fixos e comuns a todos os fluidos. A análise do planejamento foi realizada pelo *software* Statistica 12.

Os níveis dos fatores foram propostos pela empresa petrolífera e apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Níveis dos Fatores do Planejamento Fatorial 2^4 com Três Pontos Centrais

Variáveis de entrada (g/cm³)	Nível	Ponto Central	Nível
	-1	0	1
Goma	0	0,00286	0,00571
Amido	0	0,01143	0,02286
$CaCO_3$ (a)	0	0,05714	0,11429
$CaCO_3$ (b)	0	0,05714	0,11429

A matriz do planejamento fatorial contendo a composição sugerida aos fluidos de perfuração, em unidades de g/cm³, está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Matriz de Planejamento Experimental

Fluido	Goma	HPA	$CaCO_3$ (a)	$CaCO_3$ (b)
1	0,000	0,0229	0,000	0,114
2	0,00571	0,000	0,000	0,000
3	0,00571	0,0229	0,000	0,114
4	0,00571	0,0229	0,11429	0,000
5	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,0229	0,000	0,000
7	0,00571	0,000	0,000	0,114
8	0,00286	0,0114	0,0571	0,0571
9	0,000	0,000	0,1143	0,1143
10	0,00286	0,01143	0,05714	0,05714
11	0,000	0,02286	0,11429	0,000
12	0,00571	0,02286	0,000	0,000
13	0,00571	0,000	0,114	0,114
14	0,000	0,0229	0,114	0,114

Fluido	Goma	HPA	$CaCO_3$ (a)	$CaCO_3$ (b)
15	0,00286	0,0114	0,0571	0,0571
16	0,000	0,000	0,000	0,114
17	0,000	0,000	0,114	0,000
18	0,00571	0,0229	0,114	0,114
19	0,00571	0,000	0,114	0,000

4.2.2 Preparação dos fluidos de perfuração

Foram formulados, inicialmente, os fluidos de perfuração propostos pelo planejamento experimental, sendo preparados com auxílio do agitador Ika, modelo Ultra-Turrax T-25 *basic*, apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Agitador Ultra-Turrax T-25 basic.
Fonte: http://jogjas.com/indogama/wp-content/uploads/ika-t25-ultra-turrax.jpg

Para a preparação dos fluidos, foram adicionados sequencialmente a água destilada em volume de 100 mL presente em um béquer de 1000 mL e, em seguida, os aditivos apresentados na Tabela 5, sob agitação progressiva até a velocidade de 17.500 rpm, os quais permaneceram agitados até completa homogeneização por, aproximadamente, 20 minutos. Os aditivos NaCl, KCl, bicarbonato de sódio, antiespumante, bactericida e óxido de magnésio foram utilizados em quantidades constantes em todas as formulações, conforme apresentado na Tabela 2, sendo o restante dos aditivos, variantes das composições conforme apresentadas na Tabela 5.

Posteriormente à adição dos aditivos, os fluidos foram transferidos para uma proveta de 500 mL e a água destilada foi adicionada até o volume necessário para a realização dos testes de análise dos mesmos (cerca de 360 mL).

O mesmo procedimento de preparação ocorreu para os fluidos sem a presença das microesferas ocas de vidro e ainda, para os fluidos contendo a presença desse aditivo. Sendo assim, inicialmente, foram preparados 38 fluidos de perfuração, atendendo aos 19 experimentos propostos pelo planejamento experimental (19 sem microesferas e 19 com as mesmas).

4.2.3 Determinação da densidade dos fluidos de perfuração

Após a preparação dos fluidos de perfuração, foi medida a densidade dos mesmos, sem a presença das microesferas ocas de vidro, por meio de picnômetros de 25 mL e 50 mL (Figura 6). No auxílio da remoção das bolhas presentes nos fluidos, foi utilizado o Banho Ultrassom Branson modelo 2510, por no mínimo 15 minutos, sem aquecimento, quando necessário.

Figura 6 - Picnômetro de 50 mL.
Fonte: http://www.goldlab.com.br/produto-picnometro-sem-entrada-para-termometro-50-ml--103088-6624-1

A densidade absoluta (ρ) de uma substância qualquer de massa m e volume V pode ser definida pela relação:

$$\boldsymbol{\rho} = \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{V}} \tag{2}$$

A determinação da densidade dos fluidos de perfuração por meio de picnometria ocorre da seguinte forma:

- Pesar o picnômetro vazio, previamente limpo e seco, de massa m_1 em balança analítica;

- Adicionar ao picnômetro o volume de fluido de perfuração cuja densidade deseja-se determinar;
- Retirar o excesso de fluido no exterior da vidraria e eliminar a presença de possíveis bolhas no interior do picnômetro;
- Medir a massa do conjunto picnômetro/fluido de massa m_2 em balança analítica;
- Calcular a densidade do fluido (d) pela equação 3, em que V_f representa o volume do frasco do picnômetro a ser utilizado:

$$\mathbf{d} = \frac{\mathbf{m_2 - m_1}}{\mathbf{V_f}} \tag{3}$$

Após a adição das microesferas ocas de vidro, as densidades dos fluidos de perfuração foram medidas em balança de lama da marca Fann (CENPES – Petrobras), presente na Figura 7, a fim de confirmar o valor da densidade desejada.

Figura 7 - Balança de lama.

4.2.4 Determinação da quantidade de microesferas ocas de vidro

O valor de densidade característico de empresas petrolíferas em fluidos de perfuração e utilizado neste trabalho foi inicialmente 1,078 g/cm³ (9,0 lb/gal) e, posteriormente de 1,138 g/cm³ (9,5 lb/gal). No intuito de encontrar a proporção ideal fluido-microesfera de modo a atingir esses valores de densidade, foram adicionadas microesferas ocas de vidro, cujas quantidades foram calculadas pela equação 4:

$$\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{esfera}} = \frac{\boldsymbol{\rho}_{\mathbf{esfera}}}{\boldsymbol{\rho}_{\mathbf{esfera}} + \boldsymbol{\rho}_{\mathbf{fluido}}\left(\frac{\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{fluido}}}{\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{esfera}}}\right)} \tag{4}$$

sendo,

ω_{esfera} – fração mássica de esferas (%);

ρ_{esfera} – densidade das microesferas ocas de vidro (g/cm³);

ρ_{fluido} – densidade dos fluidos obtidos por picnometria (g/cm³);

Φ_{fluido} – fração volumétrica do fluido (%);

Φ_{esfera} – fração volumétrica de esferas (%).

Dessa forma, tendo obtido a densidade dos fluidos e conhecendo pelo fabricante a densidade das microesferas ocas de vidro como 0,46 g/cm³, pode-se obter a fração mássica de microesferas ocas de vidro. Ainda, a fim de obter o valor em massa de microesferas a serem adicionadas ao fluido, utiliza-se o conceito de densidade ideal do fluido (ρ_{ideal}) e o volume total de fluido produzido (V_{total}) da seguinte forma:

$$\mathbf{m_{total\ de\ fluido}} = \boldsymbol{\rho}_{\mathbf{ideal}} \times \mathbf{V_{total}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{m_{total\ de\ esferas}} = \boldsymbol{\omega_{esfera}} \times \boldsymbol{m_{total\ de\ fluido}}$$

4.2.5 Verificação do pH

A verificação do pH foi realizada após a adição das microesferas ocas de vidro por meio do método eletrométrico, com medidor de pH da marca Tecnopon. Há diferentes tipos de eletrodos de pH, porém o eletrodo combinado (Figura 8) é o mais usado para medições em amostras de água (PINTO, 2007).

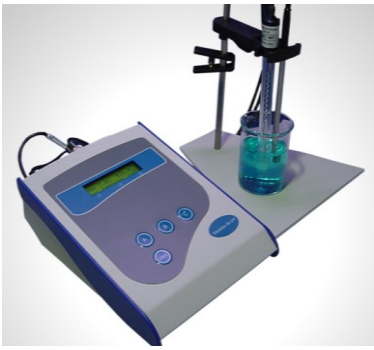


Figura 8 - Medidor de pH.
Fonte: http://www.tecnopon.com.br/mpa-210/

Os fluidos de perfuração apresentam valores da concentração hidrogeniônica, ou seja, o pH dessas substâncias, geralmente mantidos no intervalo alcalino (7-10) para evitar problemas de corrosão dos equipamentos e dispersão das formações argilosas

(FÉLIX *et al*., 2007). De acordo com Souza (2012), um pH entre 9,5 e 10,5 é suficiente para mitigar a maior parte dos processos de corrosão e, ainda, altos valores de pH (> 10,5) podem neutralizar os gases ácidos. Porém nesses casos, o pH elevado torna-se prejudicial para ligas de alumínio, que estão sujeitas à corrosão extrema em ambientes alcalinos.

4.2.6 Determinação do coeficiente de lubricidade

A lubricidade, segundo Gomes e Filho (apud MEDEIROS; AMORIM; SANTANA, 2008), é um termo qualitativo que descreve a habilidade de um fluido no processo de evitar a fricção e o desgaste entre superfícies metálicas, durante o movimento relativo a cargas. Nos casos em que o fluido não apresenta lubricidade adequada, a redução do atrito entre as superfícies em contato é prejudicada. A função principal dos aditivos lubrificantes é formar uma película, quando entre duas superfícies, a fim de reduzir o atrito, o desgaste, auxiliar no controle da temperatura, proporcionando a limpeza do equipamento, protegendo contra a corrosão decorrente dos processos de oxidação, podendo também, ser agente de transmissão de força e movimento.

A fim de obter a lubricidade do fluido, seu coeficiente de lubricidade foi calculado. A medição ocorreu com o equipamento Lubricity Tester da marca Fann, localizado no Laboratório de Fluidos de Perfuração e Material Poliméricos (FLUMAT) do Pólo de Xistoquímica (Figura 9), por meio de torque inicial zero e velocidade do anel giratório a 60 RPM, sendo aplicada lentamente uma força de 150 in.lbf (16,9 N.m), durante 5 minutos, efetuando-se a leitura do torque exercido pelo fluido, visto que pelo contato de um bloco com o anel giratório, verifica-se a capacidade lubrificante do fluido entre essas duas partes. Vale ressaltar que é importante que os fluidos de perfuração possuam uma alta lubricidade; para isso, lubrificantes são adicionados de forma a facilitar a penetração da broca e da coluna na formação.

Figura 9 - Lubricity Tester.
Fonte: http://www.globaldrilling-s.com/en/products/fann-laboratory-equipment/drilling-fluids-testing/ep-lubricity-tester.html.

O cálculo do coeficiente de lubricidade requer o conhecimento do coeficiente de fricção (CF) do bloco e do anel, por meio da leitura do torque (Lt) no equipamento, de acordo com a equação 6:

$$\mathbf{CF} = \frac{\boldsymbol{Lt}}{\mathbf{100}} \tag{6}$$

O valor 100 representa a pressão exercida entre as parte, quando o equipamento está a 60 RPM, sendo calculada pela seguinte relação:

$$\frac{150\ in.lbf\ (Leitura\ do\ torque\ na\ chave)}{1.5\ in\ (Torque\ aplicado\ pelo\ braço)} = 100\ lbf \tag{7}$$

Dessa forma, deve-se calibrar o equipamento por meio da leitura do torque da água e, sendo necessário, calcular o fator de correção (FC) dado pela equação 8. O coeficiente de lubricidade (CL), que é adimensional, pode ser obtido pela equação 9:

$$\mathbf{FC} = \frac{\mathbf{34\ (Lt\ padrão\ da\ água)}}{\mathbf{Lt\ real\ da\ água}} \tag{8}$$

$$\mathbf{CL} = \frac{\mathbf{Lt\ obtida\ x\ FC}}{\mathbf{100}} \tag{9}$$

Na análise dos fluidos de perfuração, o ideal é encontrar valores de CL menores que o valor padrão da água, ou seja, CL menores que 0,34.

4.2.7 Testes de filtração

O filtrado e a espessura do reboco são dois parâmetros medidos rotineiramente para definir o comportamento do fluido quanto à filtração. As propriedades de filtração

de diversos fluidos podem ser avaliadas medindo-se o volume de filtrado acumulado em um tempo padrão e sob condições padrões (normas API).

Foram realizados em todos os fluidos formulados os testes de filtração em filtro prensa HTHP, da marca Fann, observado na Figura 10, com volume de 175 mL e papel de filtro tipo Baroid, com diâmetro de 63,5 mm (2,5 in). O volume de filtrado é determinado por meio de ensaio padronizado, no qual é inserido o fluido e recolhido o filtrado durante o período de 30 minutos após a aplicação de uma pressão de 690 kPa ± 35 (100 psi ± 5 psi), em temperatura ambiente conforme a norma API 13B-1. Após o período de tempo, o volume de filtrado foi coletado, medido em uma proveta e atendendo à norma API 13B-1 que recomenda o uso de papel de filtro de 90 mm. O volume encontrado é metade do recomendado pela mesma, devido ao tamanho da área do papel de filtro utilizado (63,5 mm) ser a metade do indicado pela norma. Sendo assim, os resultados foram multiplicados por dois a fim de atendê-la, sendo esse um procedimento comum nesse tipo de teste. Para esse teste, foi adotado como limite máximo o valor de filtrado igual a 6 mL, sendo um critério empírico indicado pelo estudo de fluidos de perfuração.

Figura 10 - Filtro prensa HTHP Fann.

4.2.8 Determinação da espessura da torta de filtração (reboco)

Inicialmente, foi coletado o papel de filtro com o reboco após a realização do ensaio de filtração. Em seguida, o papel de filtro juntamente ao reboco foi deixado ao ar livre sobre placa de petri, por 24 horas, para que secassem totalmente. Após esse período, foi medida a espessura do papel de filtro com o reboco (ER), com o auxílio de

um paquímetro digital Mitutoyo (com precisão de 0,01 mm), por meio de cinco medidas, em pontos distintos. O valor final do reboco foi obtido por meio de média aritmética das cinco determinações, em unidades de milímetros.

4.2.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da torta de filtração

A apreciação da morfologia da torta de filtração de alguns fluidos de perfuração foi efetuada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em microscópio eletrônico MEV JSM6460LV, de marca Jeol disponível no Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica e Microanálise da COPPE – UFRJ.

Foram feitas as análises morfológicas nos fluidos sem microesferas 3, 5, 16 e 17 e nos fluidos com microesferas 8 e 19. Os fluidos foram analisados nos módulos elétrons secundários, elétrons retroespalhados no qual os níveis de cinza são proporcionais ao peso atômico médio dos elementos excitados pelo feixe de elétrons durante a varredura. Essas são, portanto, imagens composicionais com os tons mais claros representando as fases de peso atômico médio mais elevado e as com tons mais escuros, as de peso atômico médio menos elevado. Ainda foi realizada a espectroscopia de dispersão de energia (EDS – *Energy Dispersive System*) nos cortes das tortas de filtração dos fluidos de perfuração sem microesferas 16 e 17 e dos fluidos com as microesferas ocas de vidro de números 8 e 19. De maneira geral, os testes no MEV e EDS apresentaram ampliações de 50x, 600x, 1000x e 3000x.

4.2.10 Estabilidade dos fluidos de perfuração base água

A estabilidade dos fluidos de perfuração base água foi observada após 24 horas em repouso, visualmente. Além disso, foram analisadas as estabilidades de determinados fluidos no equipamento Turbiscan Lab Expert da marca Formulaction, presente na Figura 11, sendo quatro deles sem microesferas ocas de vidro e outros quatro, nas mesmas composições, contendo as microesferas. Esse equipamento pode ser utilizado para verificar a ocorrência de fenômenos de cremagem, sedimentação, coalescência e ainda a homogeneidade das amostras (SIQUEIRA, 2008).

Figura 11 - Turbiscan Lab Expert – Laboratório da UFRJ.

A aquisição de dados foi realizada com o equipamento operando no modo de transmitância e retroespalhamento de luz, simultaneamente, com uma fonte de infravermelho próximo e por meio dos dois detectores presentes no mesmo, os quais medem a intensidade da luz transmitida e ou refletida após atingir a amostra, conforme procedimento indicado na Figura 12. A análise no Turbiscan ocorreu em temperatura ambiente, por 6 horas, com intervalo entre duas medidas consecutivas de 30 minutos e ainda, três medições realizadas até completar 24 horas do início da análise.

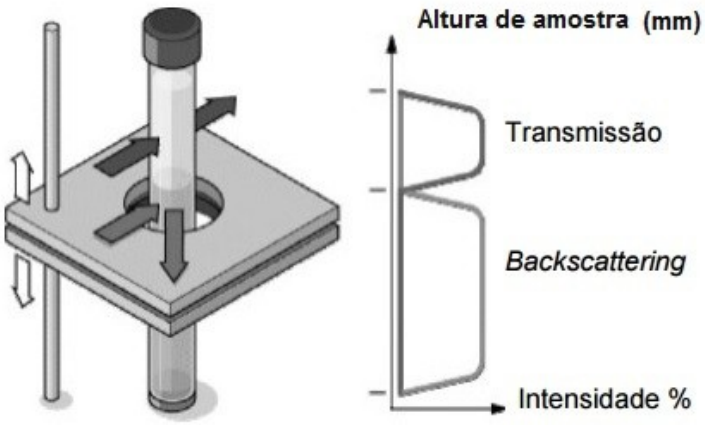


Figura 12 - Princípio de medição do Turbiscan.
Fonte: Adaptado de Buron *et al.*, 2004

4.2.11 Distribuição do tamanho das partículas dos componentes do fluido de perfuração

A análise da distribuição de tamanhos de partículas foi realizada no equipamento analisador de tamanho de partículas conhecido como Mastersizer 2000, da marca Malvern, apresentado na Figura 13. O equipamento é utilizado para medir a distribuição dos diferentes tamanhos de partículas em uma amostra, por meio de difração de raio laser, realizando uma medição rápida e confiável com alta resolução. O equipamento possui unidade de dispersão aquosa e a seco.

Foram analisados os diâmetros de três componentes dos fluidos de perfuração: goma xantana, amido e carbonato de cálcio (b). Essas partículas foram observadas por meio dos percentis D(v; 0,1); D(v; 0,5) e D(v; 0,9) que são utilizados também como medidas estatísticas de tamanho de partículas. Essa etapa ocorreu no intuito de colaborar com a compreensão dos resultados apresentados pelos volumes de filtrados e da torta de filtração, após a adição das microesferas ocas de vidro.

Figura 13 - Mastersizer 2000 – Malvern, localizado na UFRJ.

4.2.12 Ensaios Reológicos

O estudo reológico ocorreu em determinados fluidos, antes e após a aditivação das microesferas ocas de vidro, sendo operado no reômetro de tensão controlada Thermo Haake Mars I, presente na Figura 14.

Figura 14 - Reômetro Thermo Haake Mars I, localizado no CENPES.

O ensaio reológico ocorreu em geometria de placas planas ranhuradas, com diâmetro de 60 mm e *gap* igual a 1,5 mm. Os testes realizados no equipamento seguiram as etapas propostas por estudos do setor petrolífero. As etapas foram:

- Homogeneização da dispersão por aproximadamente cinco minutos em agitador mecânico IKA na velocidade de 10.000 RPM;
- Inserção do fluido de perfuração no reômetro sobre a placa plana inferior;
- Cisalhamento do fluido entre as taxas de 0,1 s^{-1} e 1000 s^{-1};
- Obtenção nessa faixa da tensão de cisalhamento (Pa) e da viscosidade (cP) dos mesmos;
- Cisalhamento na taxa de 100 s^{-1} por 1 minuto;
- Fluido em repouso por 10 segundos;
- Cisalhamento na taxa igual a 5 s^{-1} e determinação do pico de tensão de rompimento da microestrutura formada (força gel inicial), obtido após o repouso, como medida próxima do limite de escoamento após 10 segundos;
- Cisalhamento na taxa de 100 s^{-1} por 1 minuto;
- Fluido em repouso por 10 minutos;
- Cisalhamento na taxa igual a 5 s^{-1} e determinação do pico de tensão de rompimento da microestrutura formada (força gel final), obtido após o repouso, como medida próxima do limite de escoamento após 10 minutos de repouso.

Dessa forma, foram obtidos os valores de tensão de cisalhamento, de viscosidade e de força gel durante os ensaios reológicos. O limite dos valores de tensão de cisalhamento (τ), para as taxas de 1000 s^{-1} e 5 s^{-1}, e para a força gel, com 10 segundos de repouso e 10 minutos de repouso, são apresentados na Tabela 6, sendo esses critérios padrões fornecidos pela Petrobras – CENPES.

Tabela 6 - Critérios Adotados nos Testes Reológicos

Critérios	Valores
Tensão de cisalhamento em 1000 s^{-1}	$\tau < 47,5$ Pa
Tensão de cisalhamento em 5 s^{-1}	$4 < \tau < 7,5$ Pa
Força gel inicial	$4,6$ Pa $< \tau < 7,7$ Pa
Força gel final	$7,2$ Pa $< \tau < 10,2$ Pa

CAPÍTULO 5. Resultados e Discussões

Neste capítulo, estão apresentadas as formulações dos fluidos de perfuração base água preparadas durante este trabalho, as respectivas densidades, as quantidades de microesferas ocas de vidro adicionadas em cada formulação e ainda os resultados dos testes de coeficiente de lubricidade, de filtração e dos ensaios reológicos.

5.1. Preparação dos fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração base água foram preparados em volume equivalente a 360 mL. As Tabelas 2 e 5 apresentam as suas composições, com as quantidades necessárias para as formulações analisadas neste trabalho. Na Figura 15, estão presentes dois fluidos (a e b) formulados sem a presença das microesferas ocas de vidro. A diferença na cor entre eles está diretamente relacionada à presença de carbonato de cálcio, presente apenas no fluido 13 (Figura 15 (b)).

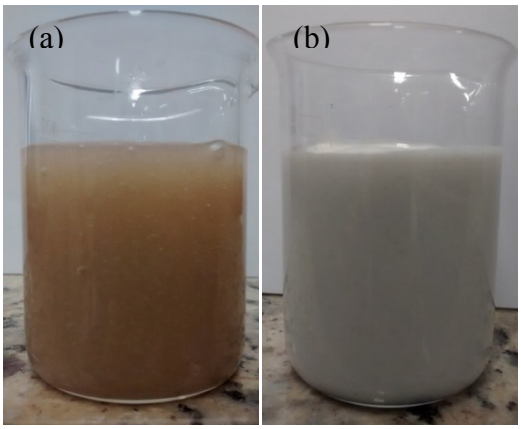


Figura 15 - (a) Fluido 12; (b) Fluido 13.

Inicialmente, foram preparados os 19 fluidos propostos pelo planejamento fatorial e apresentados na Tabela 7, em valor duplicado, totalizando 38 fluidos de perfuração, devido ao fato de que foram analisados os fluidos de mesma composição com e sem microesferas ocas de vidro, a fim de comparar os resultados dos testes de coeficiente de lubricidade e de filtração.

Após a realização dessa primeira etapa de testes, e com base nos resultados fornecidos por eles, os fluidos de número 20 ao número 24, além do 1', 3' e 16' foram elaborados sem seguir a proposta fornecida pelo planejamento, conforme disposto na Tabela 8. As concentrações dos componentes desses últimos fluidos foram

determinadas com base nos resultados apresentados pelos 19 fluidos iniciais, no intuito de encontrar uma formulação que apresentasse melhores resultados nos testes de filtração e de reologia.

Tabela 7 - Composição dos Fluidos de Perfuração Base Água (em gramas) – Etapa 1

Nº	NaCl	KCl	Bicarb.	Antiesp.	Goma	HPA	Bac	MgO	$CaCO_3$a (1/10)	$CaCO_3$b (2/44)
1	102,6	14,364	1,026	0,0513	0	8,208	1,026	1,539	0	41,04
2	102,6	14,364	1,026	0,0513	2,052	0	1,026	1,539	0	0
3	102,6	14,364	1,026	0,0513	2,052	8,208	1,026	1,539	0	41,04
4	102,6	14,364	1,026	0,0513	2,052	8,208	1,026	1,539	41,04	0
5	102,6	14,364	1,026	0,0513	0	0	1,026	1,539	0	0
6	102,6	14,364	1,026	0,0513	0	8,208	1,026	1,539	0	0
7	102,6	14,364	1,026	0,0513	2,052	0	1,026	1,539	0	41,04
8	102,6	14,364	1,026	0,0513	1,026	4,104	1,026	1,539	20,52	20,52
9	102,6	14,364	1,026	0,0513	0	0	1,026	1,539	41,04	41,04
10	102,6	14,364	1,026	0,0513	1,026	4,104	1,026	1,539	20,52	20,52
11	102,6	14,364	1,026	0,0513	0	8,208	1,026	1,539	41,04	0
12	102,6	14,364	1,026	0,0513	2,052	8,208	1,026	1,539	0	0
13	102,6	14,364	1,026	0,0513	2,052	0	1,026	1,539	41,04	41,04
14	102,6	14,364	1,026	0,0513	0	8,208	1,026	1,539	41,04	41,04
15	102,6	14,364	1,026	0,0513	1,026	4,104	1,026	1,539	20,52	20,52
16	102,6	14,364	1,026	0,0513	0	0	1,026	1,539	0	41,04
17	102,6	14,364	1,026	0,0513	0	0	1,026	1,539	41,04	0
18	102,6	14,364	1,026	0,0513	2,052	8,208	1,026	1,539	41,04	41,04
19	102,6	14,364	1,026	0,0513	2,052	0	1,026	1,539	41,04	0

Tabela 8 - Composição dos Fluidos de Perfuração Base Água (em gramas) – Etapa 2

Nº	NaCl	KCl	Bicarb.	Antiesp.	Goma	HPA	Bacter.	MgO	CaCO3a (1/10)	CaCO3b (2/44)
20	102,6	14,364	1,026	0,0513	0	4,104	1,026	1,539	0	41,04
21	102,6	14,364	1,026	0,0513	2,052	4,104	1,026	1,539	0	41,04
3’	102,6	14,364	1,026	0,0513	2,052	8,208	1,026	1,539	0	41,04
16’	102,6	14,364	1,026	0,0513	0	0	1,026	1,539	0	41,04
1’	102,6	14,364	1,026	0,0513	0	8,208	1,026	1,539	0	41,04
22	102,6	14,364	1,026	0,0513	0,616	8,208	1,026	1,539	0	41,04
23	102,6	14,364	1,026	0,0513	1,026	8,208	1,026	1,539	0	41,04
24	102,6	14,364	1,026	0,0513	1,642	8,208	1,026	1,539	0	32,832

Vale ressaltar que as Tabelas 7 e 8 não apresentam os valores de microesferas ocas de vidro adicionadas às composições e ainda, que os fluidos de números 3’, 16’ e 1’ (Etapa 2) são idênticos aos de números 3, 16 e 1 (Etapa 1), respectivamente, alterando neles o conteúdo das microesferas. Devido à semelhança entre esses fluidos, os mesmos não foram formulados em duplicata (com e sem microesferas), visto que os testes sem a presença das microesferas ocas de vidro já haviam sido realizados nos fluidos presentes na Tabela 7. Da mesma forma, os últimos três fluidos formulados (22 a 24) só foram reproduzidos em únicas formulações, avaliando diretamente neles o efeito da presença das microesferas ocas de vidro, objetivo principal deste trabalho.

Outro ponto observado na Tabela 8 é que nenhum fluido foi formulado na presença de $CaCO_3$ (a), devido à dificuldade encontrada na aquisição deste componente e por isso, a impossibilidade da sua reposição.

5.2. Estudos das densidades dos fluidos de perfuração e quantidade de microesferas ocas de vidro

Os resultados encontrados para as densidades dos 27 fluidos de perfuração base água, obtidos por meio de picnometria, bem como a fração mássica (% em massa) a ser obtida de microesferas ocas de vidro a fim de atingir as densidades dos fluidos (1,078 g/cm³ e 1,138 g/cm³), encontram-se respectivamente na Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9 - Fração Mássica das Microesferas Ocas de Vidro (HGS 19000) Adicionadas aos Fluidos – Etapa 1

Fluido	Densidade do fluido sem esferas (g/cm³)	Fração mássica de esferas (% em massa) para 1,078 g/cm³ (9,0 lb/gal)
1	1,349	13,01%
2	1,224	8,14%
3	1,189	6,51%
4	1,326	12,23%
5	1,241	8,88%
6	1,260	9,70%
7	1,444	15,88%
8	1,344	12,85%
9	1,442	15,82%
11	1,291	10,93%
12	1,223	8,11%
13	1,386	14,18%
14	1,208	7,39%
16	1,375	13,86%
17	1,356	13,23%
18	1,276	10,35%
19	1,285	10,71%

Inicialmente, foram preparados e testados os fluidos de perfuração de 1 a 19 conforme apresentados na Tabela 9, nos quais as densidades desejadas foram iguais a 1,078 g/cm³ (9,0 lb/gal), valor recomendado pelas indústrias petrolíferas. Entretanto, dentre os fluidos com melhores resultados de filtração (próximo a 6 mL), os parâmetros reológicos não foram plenamente satisfatórios e muitas formulações não atingiram o critério adotado neste trabalho para os volumes de filtrado. A fim de encontrar melhores resultados na análise reológica, foram formulados fluidos na Etapa 2 (Tabela 10) com menores quantidades de microesferas ocas de vidro, ou seja, fluidos com densidades

iguais a 1,138 g/cm³ (9,5 lb/gal), sendo esse valor ainda utilizado nos campos de perfuração.

Tabela 10 - Fração Mássica das Microesferas Ocas de Vidro (HGS 19000) Adicionadas aos Fluidos – Etapa 2

Fluido	Densidade do fluido sem esferas (g/cm³)	Fração mássica de esferas (% em massa) para 1,138 g/cm³ (9,5lb/gal)
10	1,333	9,04%
15	1,349	9,60%
20	1,142	0,24%
21	1,270	6,60%
3’	1,206	3,68%
16’	1,253	5,88%
1’	1,216	4,15%
22	1,373	10,40%
23	1,249	5,67%
24	1,346	9,47%

Na Tabela 10, observa-se a presença dos fluidos de números 10 e 15, que foram pontos centrais no planejamento fatorial, juntamente ao fluido 8 e, por isso, de mesma composição. Entretanto, as quantidades de microesferas ocas de vidro nos fluidos 10 e 15 foram menores que a do fluido 8, a fim de obter melhores resultados no teste de filtração (adicionadas para atingir densidades de 1,138 g/cm³).

Após a formulação, a densidade dos fluidos foi medida por meio de balança de lama a fim de confirmar a densidade dos mesmos. Foi verificado que a densidade de todos os fluidos se manteve na faixa entre 1,078 g/cm³ e 1,138 g/cm³, com coeficiente de variação abaixo de 3%. Isso valida os dados experimentais, visto que dados com coeficientes de variação menores de 10% são considerados excelentes.

Nas Figuras 16 (a) e (b), estão presentes um exemplo de fluido, o de número 17, contendo as microesferas ocas de vidro.

(a) (b)

Figura 16 - Vistas superior (a) e inferior (b) do fluido 17 com microesferas.

5.3. Análise das medidas de pH

A análise do pH dos fluidos de perfuração, contendo microesferas ocas de vidro, revelou valores de pH na faixa entre 8,5 e 9,9, não sendo necessário o uso de qualquer aditivo de caráter básico para controle dessa medida, atendendo às características ideais dos fluidos de perfuração, conforme exposto em **4.2.5**.

5.4. Distribuição do tamanho de partículas de carbonato de cálcio, amido e goma xantana

As análises da distribuição de tamanho das partículas pelo equipamento Mastersizer 2000 foi realizada em duplicata para os três componentes, sendo os resultados das médias das duas medidas apresentados nos respectivos gráficos. Foram obtidos os diâmetros máximos em que se encontram 10% (d_{10}), 50% (d_{50}) e 90% (d_{90}) da população total de partículas, sendo valores medidos em relação à base volumétrica da amostra analisada.

A distribuição granulométrica dos componentes goma xantana e amido modificado (HPA) é mostrada nas Figuras 17 e 18, respectivamente, em que se pode ver entre eles, tamanhos na mesma ordem de grandeza para as três faixas de diâmetros, conforme valores demonstrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Diâmetros máximos de partículas (μm) de goma xantana, amido, $CaCO_3$ (b) e microesferas ocas de vidro

Diâmetros	Goma xantana	Coef. de Variação	Amido	Coef. de Variação	$CaCO_3$b	Coef. de Variação	Microesferas 19000
d_{10}	64,472 ± 7,294	11,3%	39,648 ± 0,174	0,4%	2,344 ±0,123	5,2%	31,21
d_{50}	248,687 ± 7,294	8,1%	170,525 ±- 73,250	1,9%	20,376 ± 0,161	0,8%	20,54
d_{90}	817,5855 ± 7,294	14,9%	420,471 ± 1,568	0,4%	48,000 ± 0,384	0,8%	13,14

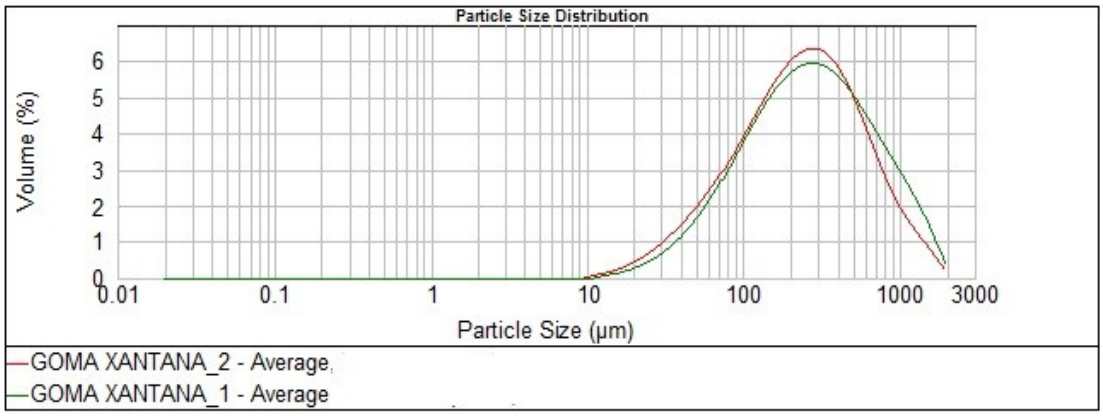


Figura 17 - Distribuição de tamanho de partículas de goma xantana.

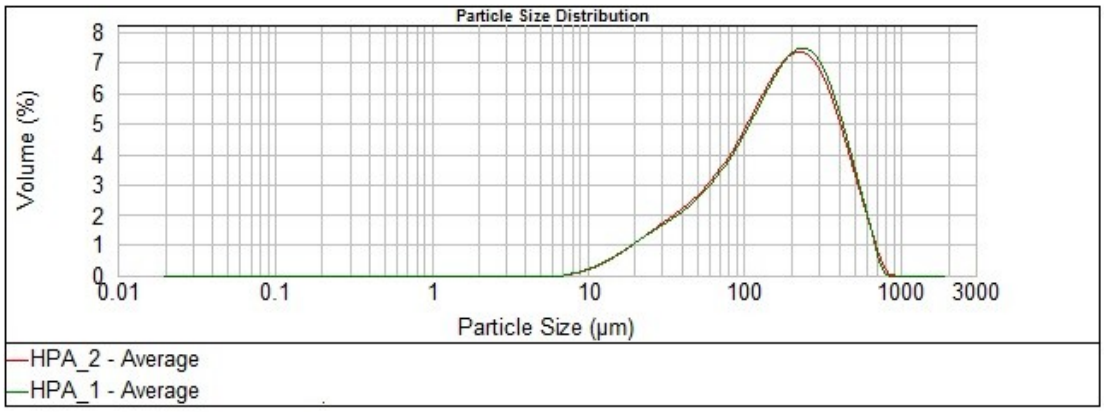


Figura 18 - Distribuição de tamanho de partículas de amido (HPA).

Analisando as curvas de distribuição nas Figuras 17 e 18 pode-se afirmar que houve uma boa repetitividade de resultados, com coeficientes de variação em torno de 15% para a goma xantana e de 2% para o HPA. A distribuição de partículas do $CaCO_3$ (b) pode ser observada na Figura 19 e o tamanho das mesmas, na Tabela 11. Pode-se observar um baixo valor do coeficiente de variação (em torno de 5%) para este componente.

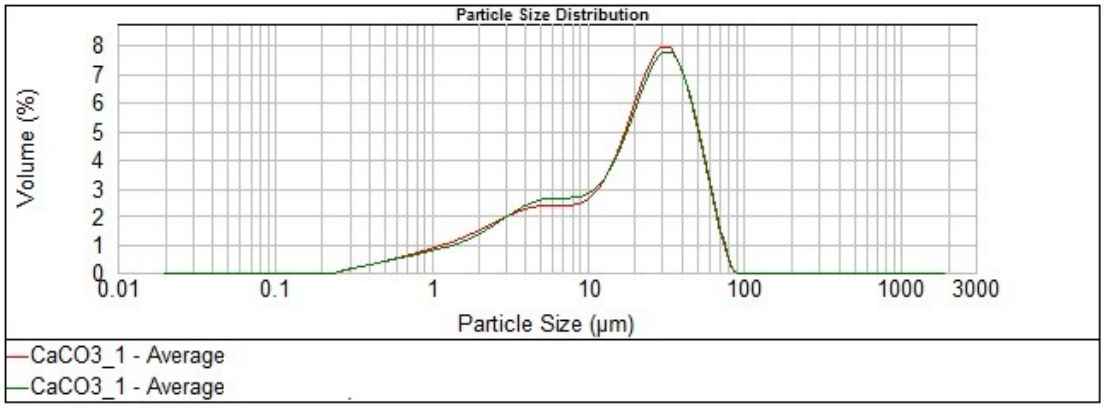


Figura 19 - Distribuição de tamanho de partículas de $CaCO_3$ (b).

Comparando-se os tamanhos médios de partículas (d_{50}) do carbonato de cálcio com a goma xantana e o amido, pode-se concluir que o primeiro está mais próximo ao tamanho das microesferas ocas de vidro, conforme tamanho médio de 20 µm especificado pelo fabricante das microesferas, 3M do Brasil LTDA e presente na Tabela 11. Vale ressaltar que neste trabalho foram utilizados dois tipos de carbonato de cálcio (a e b) e que apenas o componente que possuía maiores diâmetros foi analisado, ou seja, o carbonato de cálcio 2-44 ($CaCO_3$ (b)), visto que não foi possível obter novas amostras de carbonato de cálcio 1-10. Acredita-se que o carbonato de cálcio 1-10 ($CaCO_3$ (a)) apresente tamanho médio de partículas inferior ao d_{50} do $CaCO_3$ (b) (tamanho de partículas abaixo de 20,376 µm) e que elas tenderiam a preencher mais adequadamente as lacunas criadas pela adição das microesferas ocas de vidro, reduzindo o volume de filtrado dos fluidos de perfuração formulados com esse composto.

5.5. Estudo do coeficiente de lubricidade

Os coeficientes de lubricidade (CL, adimensional) dos fluidos de perfuração sem e com microesferas ocas de vidro estão presentes na Tabela 12, tendo sido obtidos em medições únicas, ou seja, sem duplicatas.

Tabela 12 - Coeficientes de lubricidade dos fluidos de perfuração

Fluido	CL sem microesferas	CL com microesferas
1	0,32	0,33
2	0,34	0,35
3	0,33	0,31

Fluido	CL sem microesferas	CL com microesferas
4	0,38	0,28
5	Estourou a escala	0,31
6	0,44	Teste não realizado*
7	0,37	Teste não realizado*
8	0,40	0,32
9	0,38	0,29
10	0,29	0,30
11	0,35	0,28
12	0,31	0,33
13	0,36	Teste não realizado*
14	0,31	0,37
15	0,40	0,25
16	0,43	0,36
17	0,31	0,43
18	0,25	0,34
19	0,28	0,37
20	0,28	0,33
21	0,27	0,33
3’	0,33	0,28
16’	0,43	0,39
1’	0,32	0,30
22	-	0,30
23	-	0,27
24	-	0,27

*Fluidos formulados que formaram gel, não sendo possível efetuar a leitura.

A coluna de resultados de CL dos fluidos 6, 7 e 13 com microesferas ocas não apresentou resultados visto que, após 24 horas da formulação, esses fluidos apresentaram um aspecto “solidificado”, sem escoamento conforme Figura 20, o que

impossibilitou a leitura do coeficiente de lubricidade, intimamente relacionado ao torque aplicado pelo fluido no equipamento, conforme descrito na seção **4.2.6**.

Figura 20 - Fluido 6 com microesferas ocas de vidro.

Os fluidos 3', 16' e 1' possuem as mesmas formulações dos fluidos 3, 16 e 1, respectivamente, como mencionado no item **5.1**. Sendo assim, foram considerados apenas os fluidos contendo as microesferas para a nova análise do coeficiente de lubricidade. Os fluidos 22 a 24 foram unicamente formulados contendo as microesferas ocas de vidro, conforme comentado em **5.1** e, por esse motivo, os resultados de CL na coluna sem microesferas não foram apresentados na Tabela 12.

Medeiros, Amorim e Santana (2008) mencionam a presença de sólidos nos fluidos como fator correlacionado inversamente à lubricidade dos mesmos. Amorim, L. V. *et al.* (2011) informam que fluidos de perfuração base óleo apresentam as maiores lubricidades com CL próximos a 0,1, ou seja, quanto menor o valor de CL, maior será a lubricidade do fluido.

A lubricidade é um fator importante visto que tende a reduzir o torque, o arraste que existe durante as operações de perfurações e, além disso, contribui na redução do enceramento de brocas e nos problemas causados, como a influência na taxa de penetração no poço. Ainda Nascimento, Amorim e Santana (2010) fornecem dados da literatura para fluidos de perfuração base água com valores de CL na faixa de 0,35 e 0,50.

A análise da lubricidade dos fluidos sem microesferas ocas de vidro (Figura 21) revelou que os melhores fluidos foram: fluido 18 (CL = 0,25) e o fluido 21 (CL = 0,27). Na mesma imagem, verifica-se que 10 fluidos formulados apresentaram valores de CL

inferiores ao da água (CL = 0,34), sendo esses resultados melhores que os fornecidos pela literatura.

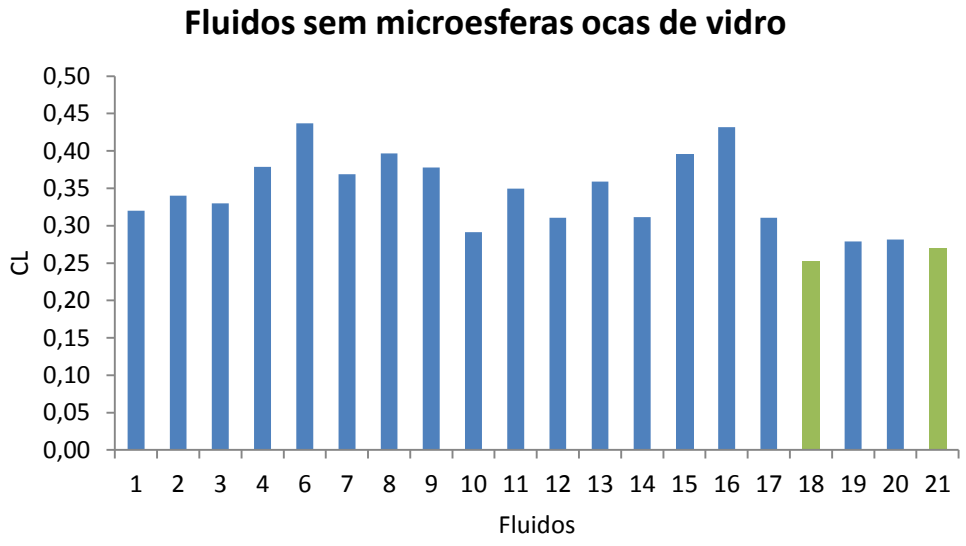


Figura 21 - Coeficiente de lubricidade (CL) dos fluidos sem microesferas ocas de vidro.

A presença das microesferas ocas de vidro neste trabalho, apesar de serem materiais sólidos, não provoca, necessariamente, o aumento do coeficiente de lubricidade dos fluidos de perfuração, conforme observado na Tabela 12. Essa característica pode ser verificada no fluido 5: o mesmo sem as microesferas ocas de vidro ultrapassou o limite da escala do equipamento Lubricity Tester, ou seja, apresentou leitura para o CL acima de 0,50. Entretanto, na presença desse aditivo, teve seu coeficiente de lubricidade igual a 0,31, valor esse inferior ao da água (0,34), o que caracteriza uma maior lubricidade do fluido em relação à água.

Na Figura 21 e Figura 22 ficou constatado que para o fluido 15, a adição das microesferas ocas de vidro permitiu que o valor de CL fosse reduzido e com isso, a lubricidade do fluido aumentasse. O mesmo fato ocorreu após a adição de microesferas ocas para outros fluidos, tais como: fluido 4 (CL = 0,38, sem microesferas, para CL = 0,28, com microesferas) e fluido 9 (CL = 0,38, sem microesferas, para CL = 0,29, com microesferas).

De acordo com a Figura 22, os fluidos de perfuração contendo microesferas com os menores valores de CLs foram o fluido 15 (CL = 0,25) e, logo em seguida, os fluidos 23 e 24 (CL = 0,27). Esses valores encontram-se abaixo dos fornecidos pela literatura (entre 0,35 e 0,50), indicando que a formulação de fluidos base água com microesferas apresentaram lubricidades adequadas para a utilização.

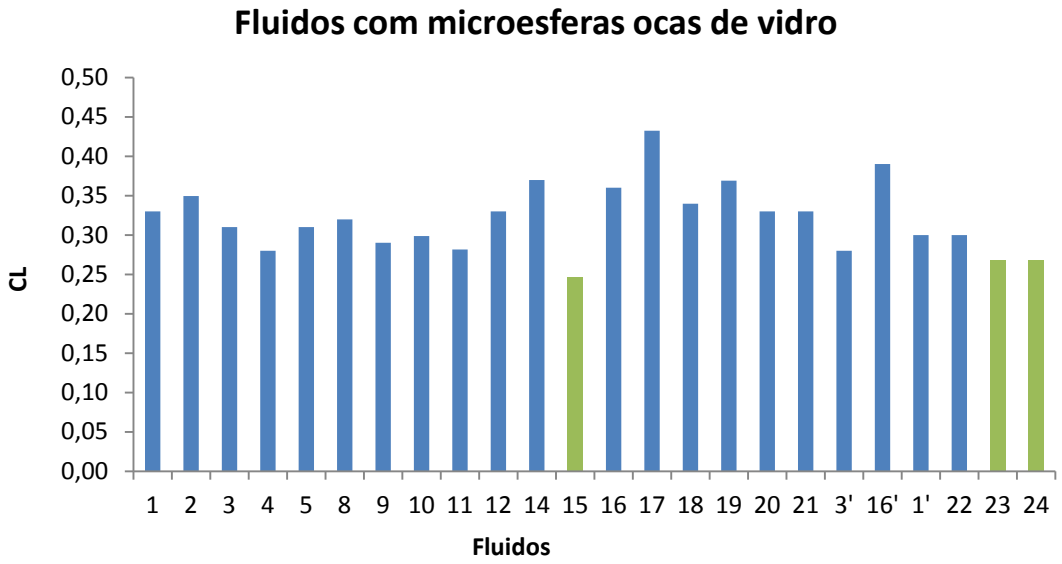


Figura 22 - Coeficiente de lubricidade (CL) dos fluidos contendo microesferas ocas de vidro.

Em percentual, 45% dos fluidos sem microesferas apresentaram valores de CL inferiores ao da água (0,34) e cerca de 63% dos fluidos contendo as microesferas revelaram-se abaixo do padrão da água e da literatura, características de fluidos base água com bons resultados para as lubricidades. Sendo assim, constata-se que a presença das microesferas ocas de vidro, em grande parte, não prejudicou as lubricidades dos fluidos formulados e, inclusive, melhorou essa variável resposta. Esse fato pode ter ocorrido pelo material liso e fino das microesferas ocas de vidro, além do tamanho das mesmas, que podem ter contribuído para o aumento do efeito lubrificante nesses fluidos.

Em relação aos fluidos sem microesferas ocas de vidro, o gráfico de Pareto disposto na Figura 23, em função dos valores da estatística do teste *t* de *Student*, mostra que nenhum fator principal e suas interações foram estatisticamente significativos (valores de encontrados de *p*-level > 0,05). Isso significa que, para os fluidos sem microesferas, os componentes analisados não foram relevantes na variação do coeficiente de lubricidade dos fluidos, dentro da faixa de níveis adotada neste trabalho.

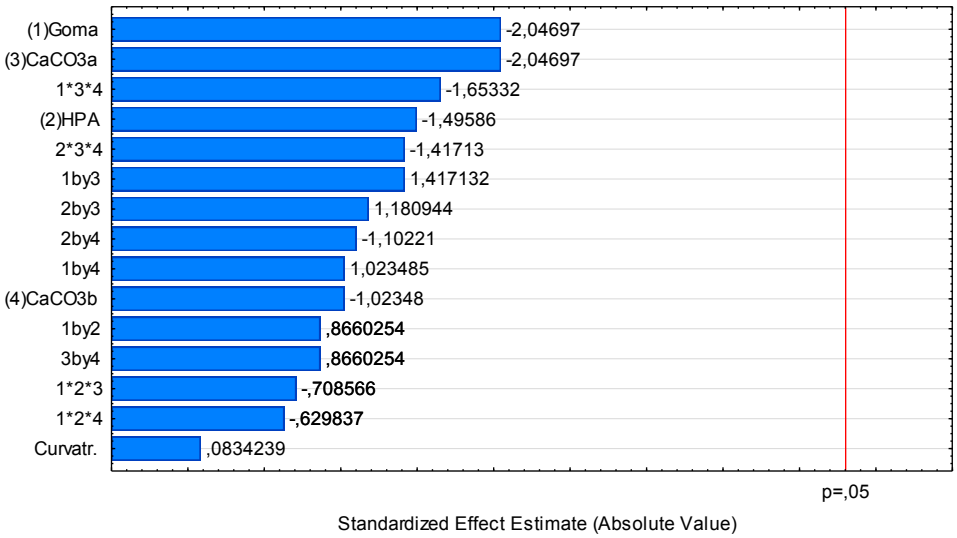


Figura 23- Gráfico de Pareto para a variável coeficiente de lubricidade dos fluidos sem microesferas ocas de vidro.

A Figura 24 apresenta o gráfico das médias para os fluidos sem microesferas, em que o fator $CaCO_3$ (b) foi considerado no valor central. Observa-se que a melhor condição, a que corresponde ao menor valor de CL, é atingida para teores de $CaCO_3$ (a) sendo 41,04, de goma = 2,052 e de HPA = 8,208. Por meio da Tabela 12 de resultados, verifica-se que o melhor resultado para lubricidade (fluido 18) contém na sua formulação teor de goma igual a 2,052 g, teor de HPA igual a 8,208 g e teor de ambos os carbonatos de cálcio igual a 41,04 g. Além disso, pela Figura 24, nota-se que o $CaCO_3$ (a) apresenta grande efeito sobre o CL, na ausência de goma e de HPA. Esse resultado é razoável uma vez que a goma xantana tende a aumentar, naturalmente, a lubricidade dos materiais compostos por ela.

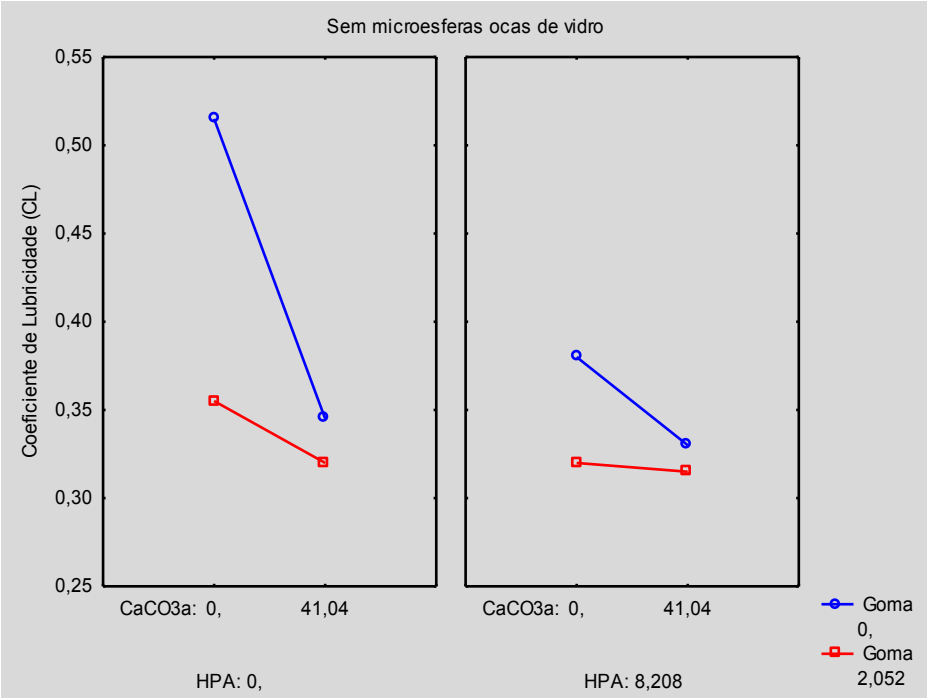


Figura 24 - Gráfico de médias para o coeficiente de lubricidade sem microesferas ocas de vidro.

O gráfico de Pareto, disposto na Figura 25 para os fluidos com as microesferas ocas de vidro, mostra que apenas o componente principal $CaCO_3$ (a) foi estatisticamente significativo (p-level $\leq$ 0,05), assim como alguns fatores de interação de segunda e terceira ordens (ver Figura 25). Isso significa que existe uma probabilidade menor que 0,05 de errar ao afirmar que esses fatores são relevantes para a análise do coeficiente de lubricidade. A curvatura do plano não foi estatisticamente significativa, o que significa que o modelo matemático não deve ter termos quadráticos.

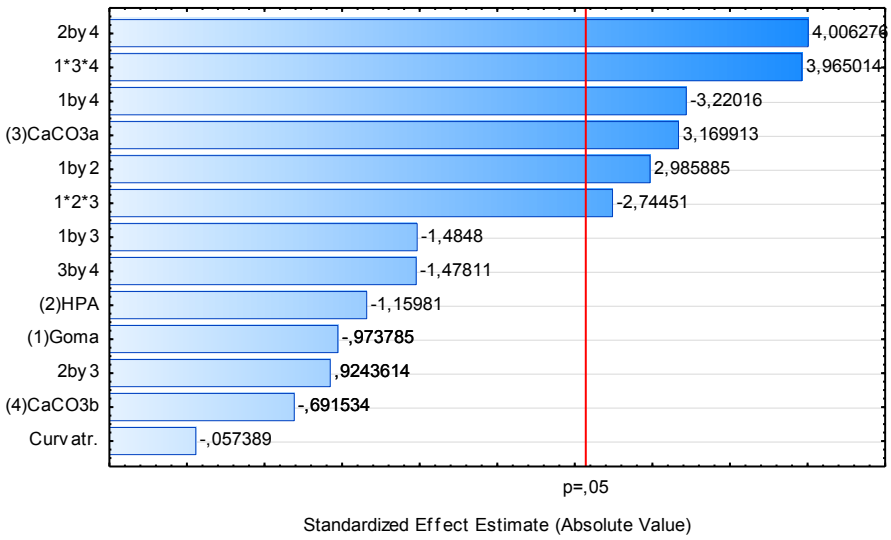


Figura 25 - Gráfico de Pareto para a variável coeficiente de lubricidade dos fluidos contendo microesferas ocas de vidro.

Três termos de interação de segunda ordem foram estatisticamente significativos: HPA e $CaCO_3$ (b) (2 *by* 4) – o efeito mais importante –, goma xantana com o $CaCO_3$ (b) (1 *by* 4) – efeito negativo, o que contribui para uma redução da variável de resposta (CL), o que é desejado – e goma com HPA (1 *by* 2). Dois efeitos de interação de terceira ordem foram estatisticamente significativos: goma xantana com ambos os carbonatos de cálcio (1*3*4) e goma xantana com HPA e $CaCO_3$ (a) (1*2*3). Essa última interação formou uma mistura antagônica, o que implica na redução do valor de CL. Assim, conclui-se que embora só um efeito principal tenha sido estatisticamente significativo (fator $CaCO_3$ (a)), vários efeitos de interação foram importantes, o que implica dizer que todos os fatores devem ser considerados no estudo do coeficiente de lubricidade.

A Figura 26 apresenta o gráfico das médias para os fluidos contendo microesferas, em que o fator $CaCO_3$ (b) foi considerado no valor central. Observa-se que a melhor condição, que corresponde ao menor valor de CL, é atingida para teores de $CaCO_3$ (a) = 41,04 g, de HPA = 8,208 g e goma = 2,052 g. O inconveniente desse gráfico é o fato de ele não mostrar o ponto central. Analisando então, a tabela de resultados (Tabela 12), percebe-se que o menor coeficiente de lubricidade (fluido 15) foi obtido quando o teor de goma foi igual a 1,026 g, o de HPA foi 4,104 g, o de $CaCO_3$ (a) foi 20,52 g e o de $CaCO_3$ (b) foi 20,52 g. Dessa forma, fica demonstrada a importância do HPA e da goma xantana na presença das microesferas ocas, visto que os melhores resultados para o CL foram encontrados nos fluidos formulados com ambos os componentes.

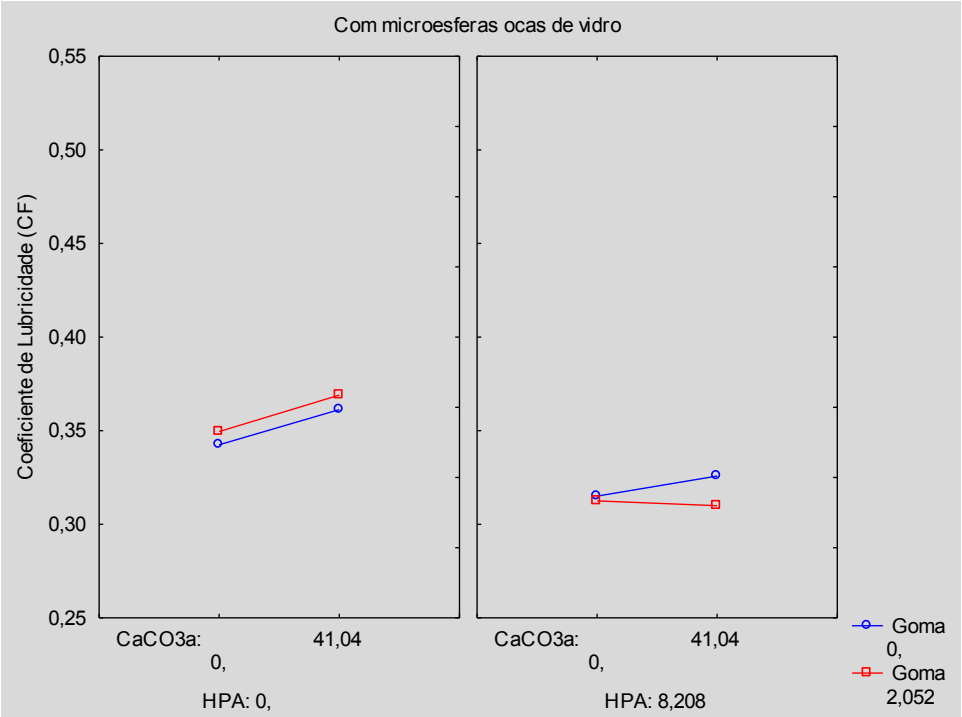


Figura 26 - Gráfico de médias para o coeficiente de lubricidade com microesferas ocas de vidro.

Comparando-se os gráficos de médias dos fluidos sem e com microesferas ocas de vidro (Figuras 24 e 26), observa-se que os fluidos contendo microesferas ocas apresentaram uma tendência a fornecer menores valores de CL em relação aos fluidos sem as microesferas, nas formulações compostas por HPA. Ainda vale ressaltar que o melhor fluido com as microesferas foi obtido no ponto central (fluido 15) e que sem elas (fluido 18), o fluido mais lubrificante (de menor CL) precisou do dobro da composição dos aditivos utilizados. Nota-se assim, que a presença das microesferas ocas contribuiu para a formação de fluidos mais lubrificantes.

5.6. Resultados do volume de filtrado

O volume de filtrado (VF) foi encontrado por meio da filtração no filtro prensa, conforme norma API e os volumes obtidos estão presentes na Tabela 13.

Tabela 13 - Volume de Filtrado dos Fluidos de Perfuração (mL)

Fluido	VF Sem Microesferas (mL)	VF Com Microesferas (mL)	Fração Mássica de Esferas (% em massa)
1	**2,8**	165,0	13,01%
2	11	38,6	8,14%

Fluido	VF Sem Microesferas (mL)	VF Com Microesferas (mL)	Fração Mássica de Esferas (% em massa)
3	**2,4**	12,4	6,51%
4	**3,6**	13,6	12,23%
5	340,0	23,6	8,88%
6	22,0	Teste não realizado*	9,70%
7	10,0	Teste não realizado*	15,88%
8	13,6	139,6	12,85%
9	340,0	150,0	15,82%
10	8,8	300,0	9,04%
11	7,8	11,0	10,93%
12	**3,6**	61,0	8,11%
13	27,4	Teste não realizado*	14,18%
14	26,0	230,0	7,39%
15	12,8	300,0	9,60%
16	300,0	232,0	13,86%
17	285,0	**3,6**	13,23%
18	8,0	30,8	10,35%
19	50,4	**2,0**	10,71%
20	10,8	300,0	0,24%
21	**3,8**	110,0	6,60%
3’	2,4	**3,2**	3,68%
16’	300,00	238,0	5,88%
1’	2,8	67,2	4,15%
22	-	166,4	10,40%
23	-	124,0	5,67%
24	-	155,0	9,47%

*Fluidos formulados que formaram blocos, não sendo possível efetuar a leitura do teste de filtração.

Os fluidos 22 a 24 foram unicamente formulados contendo as microesferas ocas de vidro, conforme comentado em **5.1** e, por esse motivo, os resultados de VF na coluna sem microesferas não foram apresentados na Tabela 13.

Dentre os fluidos sem microesferas ocas de vidro, encontram-se cinco (em negrito na Tabela 13) que apresentaram volume de filtrado abaixo do critério (6 mL) utilizado para fluidos de perfuração neste trabalho. Os fluidos contendo microesferas ocas de vidro que apresentaram resultados aceitáveis para o volume de filtrado foram três: 17, 19 e 3' (em negrito na Tabela 13).

A Tabela 14 apresenta os resultados dos volumes de filtrado, ordenados de forma crescente em relação aos fluidos que contêm microesferas ocas de vidro. Observa-se que o menor resultado de VF foi encontrado no fluido 19, listado na primeira posição da Tabela 14. Logo em seguida, encontram-se os fluidos 3' e 17. Em relação à composição, não há nenhum fator comum aos três fluidos e as quantidades das microesferas ocas de vidro variaram entre eles. Essa análise revela a importância da realização de repetições dessas três formulações, a fim de ratificar os resultados, e da investigação de diferentes formulações, a fim de verificar a influência dos componentes e das microesferas ocas de vidro sobre o volume de filtrado. A etapa de repetição dos testes de filtração não foi possível devido à ausência de $CaCO_3$ (a), conforme mencionado anteriormente.

Na análise dos melhores resultados para os fluidos sem microesferas, temos os fluidos 1, 3, 4, 12 e 21 os quais possuem o amido (HPA) em sua composição (Tabela 14). Outro fator a ser observado, com exceção do fluido 1, os outros quatro apresentavam a goma xantana, utilizada como viscosificante, nas suas formulações.

Tabela 14 - Volume de Filtrado (mL) ordenado para os fluidos de perfuração com microesferas

Fluido	Goma	HPA (amido)	CaCO3a (1/10)	CaCO3b (2/44)	VF Sem microesferas (mL)	VF Com microesferas (mL)	Fração mássica de esferas (% em massa)
19	2,052	0	41,04	0	50,4	2,0	10,71%
3'	2,052	8,208	0	41,04	2,4	3,2	3,68%
17	0	0	41,04	0	285,0	3,6	13,23%
11	0	8,208	41,04	0	7,8	11,0	10,93%
3	2,052	8,208	0	41,04	2,4	12,4	6,51%

Fluido	Goma	HPA (amido)	CaCO3a (1/10)	CaCO3b (2/44)	VF Sem microesferas (mL)	VF Com microesferas (mL)	Fração mássica de esferas (% em massa)
4	2,052	8,208	41,04	0	3,6	13,6	12,23%
5	0	0	0	0	340,0	23,6	8,88%
18	2,052	8,208	41,04	41,04	8,0	30,8	10,35%
2	2,052	0	0	0	11	38,6	8,14%
12	2,052	8,208	0	0	3,6	61,0	8,11%
1’	0	8,208	0	41,04	2,8	67,2	4,15%
21	2,052	4,104	0	41,04	3,8	110,0	6,60%
26	1,026	8,208	0	41,04	-	124,0	5,67%
8	1,026	4,104	20,52	20,52	13,6	139,6	12,85%
9	0	0	41,04	41,04	340,0	150,0	15,82%
27	1,642	8,208	0	32,832	-	155,0	9,47%
1	0	8,208	0	41,04	2,8	165,0	13,01%
25	0,616	8,208	0	41,04	-	166,4	10,40%
14	0	8,208	41,04	41,04	26,0	230,0	7,39%
16	0	0	0	41,04	300,0	232,0	13,86%
16’	0	0	0	41,04	300,0	238,0	5,88%
10	1,026	4,104	20,52	20,52	8,8	300,0	9,04%
15	1,026	4,104	20,52	20,52	12,8	300,0	9,60%
20	0	4,104	0	41,04	10,8	300,0	0,24%
6	0	8,208	0	0	22,0	Teste não realizado*	9,70%
7	2,052	0	0	41,04	10,0	Teste não realizado*	15,88%
13	2,052	0	41,04	41,04	27,4	Teste não realizado*	14,18%

*Fluidos formulados que formaram blocos, não sendo possível efetuar a leitura do teste de filtração.

Os resultados da Tabela 14 permitiram concluir que o HPA contribuiu, vigorosamente, para a redução do volume de filtrado nos fluidos sem microesferas, sendo bom aditivo a ser utilizado como controlador de filtrado. Esse componente

contribui para formar um reboco nas paredes do poço, dificultando a infiltração da fase líquida do fluido na rocha. Ademais, foi verificado que os fluidos formulados com a goma xantana, porém sem HPA, apresentaram volumes de filtrados entre 10 e 50 mL, aproximadamente. Entretanto, as mesmas conclusões não estão relacionadas aos fluidos com as microesferas, visto que o fluido 17 não apresenta nenhum desses componentes e ficou dentro do critério adotado como aceitável para o volume de filtrado (6 mL). Dessa forma, devem-se realizar mais experimentos com fluidos que contenham o $CaCO_3$ (a), visto que em 4 fluidos (4, 11, 17 e 19) a sua presença parece ter contribuído para o controle da filtração, possivelmente devido a uma interação desse material com as microesferas ocas de vidro.

Em relação ao fluido 3' verifica-se que a redução da quantidade de microesferas ocas de vidro de 6,51% para 3,68% gerou uma redução no volume de filtrado em 74% (de 12,4 mL para 3,2 mL). No fluido 1' a redução na quantidade de microesferas de 13,01% para 4,15% também gerou um melhor resultado no volume de filtrado, de 165,0 mL para 67,2 mL; ou seja uma redução de 52% no valor de volume de filtrado.

De maneira geral, foi verificado que a presença das microesferas ocas de vidro facilita a infiltração dos fluidos, aumentando assim o volume de filtrado obtido pelos testes usando os procedimentos API. Essa constatação ocorre devido aos aumentos significativos dos volumes de filtrado em 15 dos 21 fluidos de perfuração analisados, quando as microesferas ocas de vidro foram utilizadas. Apenas os seis fluidos destacados na Figura 27 apresentaram menores valores de volumes de filtrado após a adição das esferas, resultado esse que se deseja para todos os fluidos de perfuração. Em relação à formulação, quatro desses seis fluidos destacados não apresentam em sua composição a goma xantana e o amido. Esse ponto será explorado na discussão dos resultados das micrografias.

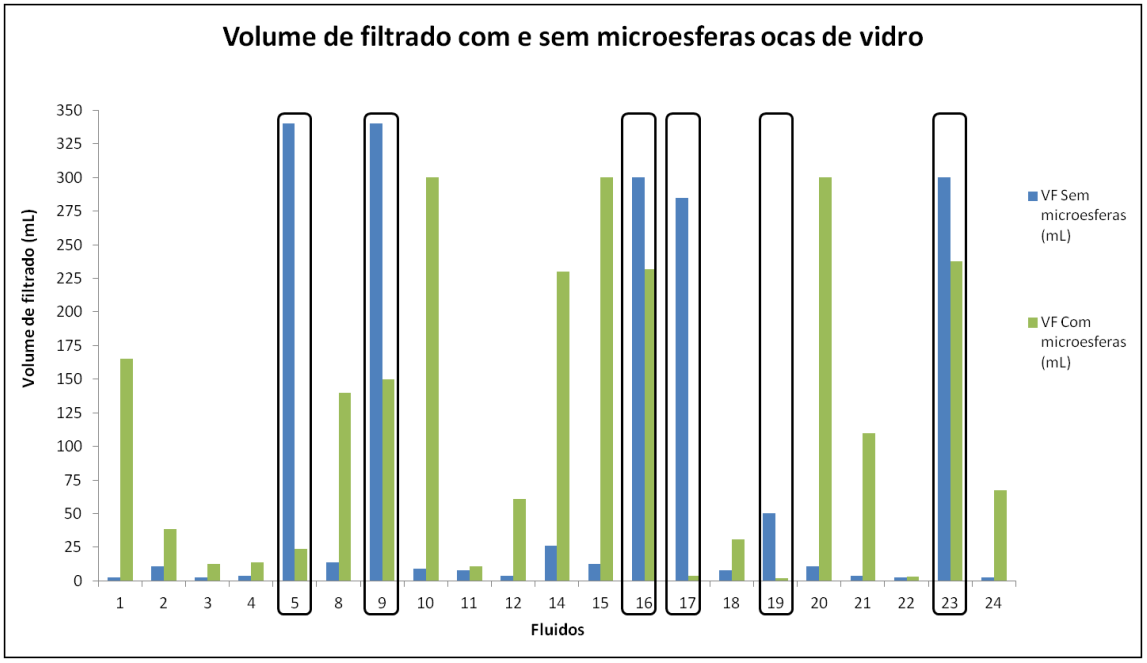


Figura 27 - Comparação entre o volume de filtrado (VF) dos fluidos com e sem microesferas ocas de vidro. A marcação reflete o menor VF para amostras com microesferas em relação às amostras sem microesferas.

O gráfico de Pareto, disposto na Figura 28 para os fluidos sem microesferas ocas de vidro, em função dos valores da estatística do teste *t* de *Student*, mostra que os componentes principais HPA (2) – efeito mais significativo – e goma (1), assim como o fator de interação de segunda ordem (HPA e goma) e a curvatura do plano foram estatisticamente significativos (p-level $\leq$ 0,05). A interação de terceira ordem, envolvendo goma xantana e ambos os carbonatos de cálcio (1*3*4), foi marginalmente significativa (0,05 < *p-level* < 0,1). Esse resultado implica dizer que todos os quatro fatores devem ser considerados no estudo do volume de filtrado nos fluidos sem as microesferas ocas de vidro. A curvatura do plano ter sido estatisticamente significativa implica que algum termo quadrático deve ser importante. Para essa determinação, mais pontos experimentais devem ser obtidos em um futuro planejamento.

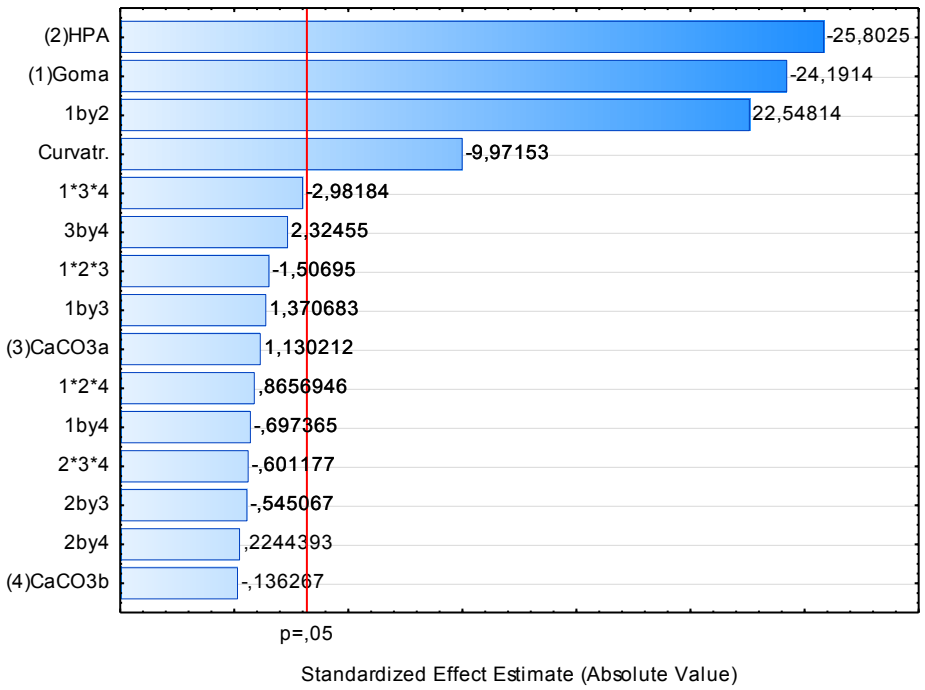


Figura 28 - Gráfico de Pareto para a variável volume de filtrado dos fluidos sem microesferas ocas de vidro.

A influência do HPA, do $CaCO_3$ (a) e da goma xantana no resultado do filtrado dos fluidos de perfuração, sem microesferas ocas de vidro, é mostrada na Figura 29 considerando o $CaCO_3$ (b) em seu valor no ponto central. O melhor resultado para o volume de filtrado é encontrado usando um teor de goma = 2,052 g, de $CaCO_3$ (a) = 0 e de HPA = 8,208 g. Por meio da Tabela 14, percebe-se que o menor volume de filtrado foi obtido para teor de goma igual a 2,052 g, HPA igual a 8,208 g, $CaCO_3$ (a) igual a 0 e $CaCO_3$ (b) igual a 41,040 g (fluido 3).

Nota-se, ainda, que o maior efeito negativo (aumento no volume de filtrado) do teor de $CaCO_3$ (a) sobre o VF ocorre quando não há goma e HPA na formulação. Esse resultado era esperado, uma vez que o HPA é utilizado como aditivo controlador de filtrado.

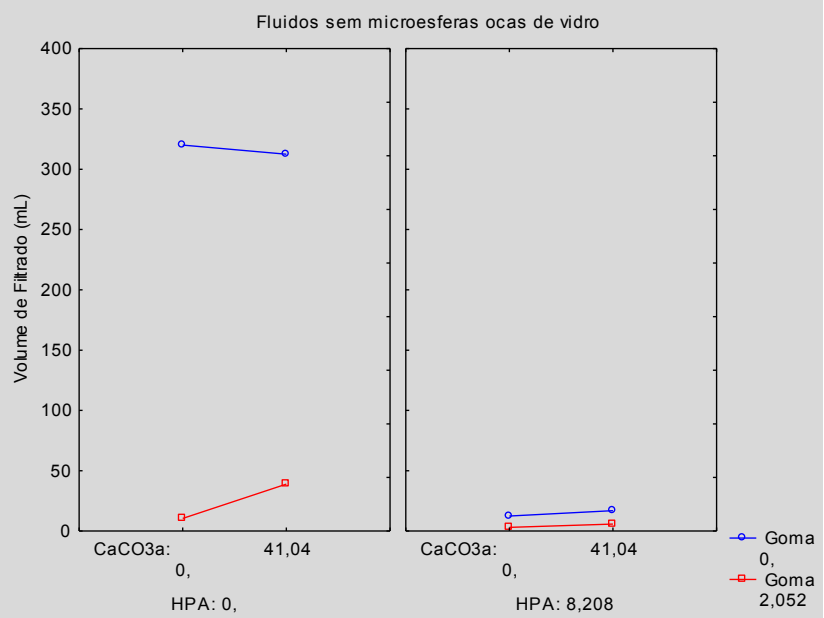


Figura 29 - Gráfico de médias para o volume de filtrado sem microesferas ocas de vidro.

Por meio da curva de níveis presente na Figura 30, pode ser observada a relação entre goma xantana e amido (HPA), interação estatisticamente significativa, conforme o gráfico de Pareto. Observa-se que os menores volumes de filtrado encontram-se nas regiões com os maiores valores de goma e de HPA. Também pode ser afirmado que valores baixos de volume de filtrado podem ser obtidos trabalhando-se com maiores e menores teores de HPA e de goma, respectivamente, ou o contrário. Vale ressaltar a região de elevadas concentrações de goma e pouca quantidade de HPA. Isso significa que mesmo na ausência de HPA é possível encontrar volumes de filtrado aceitáveis desde que haja goma xantana presente na formulação.

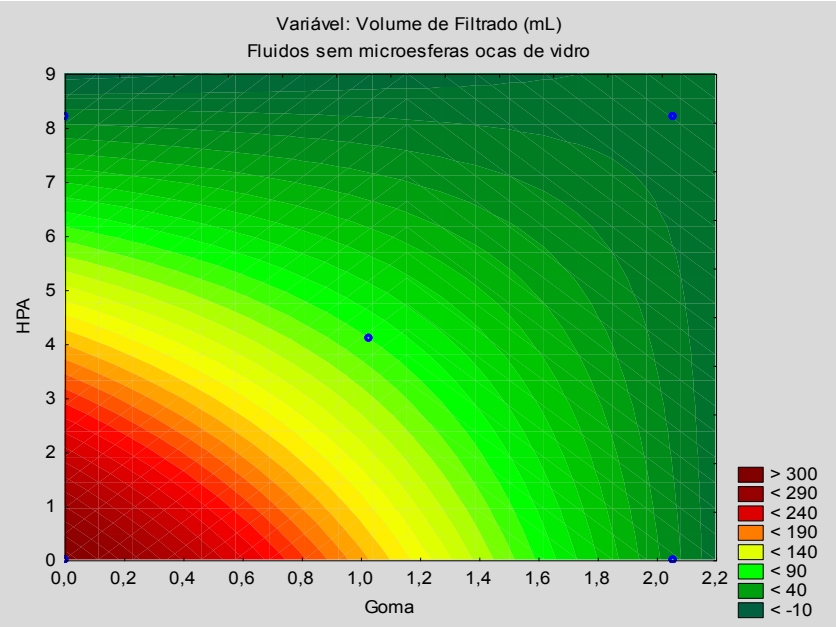


Figura 30 - Curva de níveis para a variável volume de filtrado em função dos componentes HPA e goma xantana.

A Figura 31 apresenta o gráfico de Pareto para os fluidos com microesferas ocas de vidro, revelando que apenas a curvatura foi estatisticamente significativa na variável volume de filtrado. Por ANOVA, foi visto que a interação de segunda ordem entre goma xantana (1) e o $CaCO_3$ (b) (4) foi um fator marginalmente significativo, pois 0,05 < *p-level* < 0,1. Como dito antes, a significância estatística da curvatura do plano implica dizer que pelo menos um termo quadrático deve existir no modelo matemático.

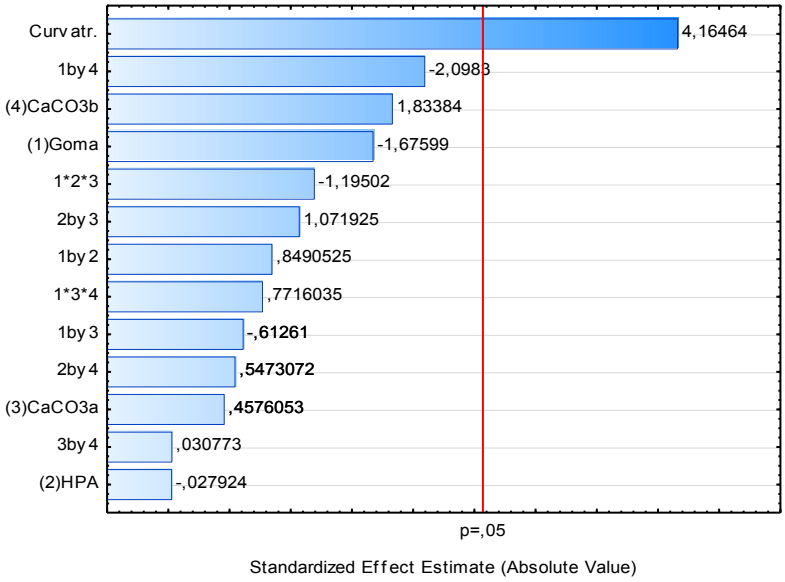


Figura 31 - Gráfico de Pareto para a variável volume de filtrado dos fluidos co m microesferas ocas de vidro.

Analisando os resultados, observa-se que o menor volume de filtrado para os fluidos contendo microesferas ocas (fluido 19) é encontrado para teor de goma igual a 2,052 g, de HPA igual a 0, de $CaCO_3$ (a) igual a 41,040 g e $CaCO_3$ (b) igual a 0. O objetivo da Figura 32 foi evidenciar o efeito dos fatores apresentados sobre o volume de filtrado, considerando o quarto fator, $CaCO_3$ (b), em seu valor central. Verifica-se o grande efeito do teor de $CaCO_3$ (a) sobre o VF, quando não há HPA na formulação. Esse resultado é esperado, visto que os fluidos foram formulados sem o controlador de filtrado, que poderia ter contribuído para melhorar o resultado na filtração.

Nota-se então, que a presença de HPA como controlador de filtrado foi mais relevante nos fluidos sem as microesferas ocas de vidro, conforme Figura 32. Esse fato, possivelmente indica que, na utilização das microesferas ocas de vidro, outros componentes, como o $CaCO_3$ (a), contribuem mais para a redução do volume de filtrado que o próprio aditivo utilizado para esse fim (HPA), revelando uma possível maior interação das microesferas com o carbonato, do que com o amido (HPA).

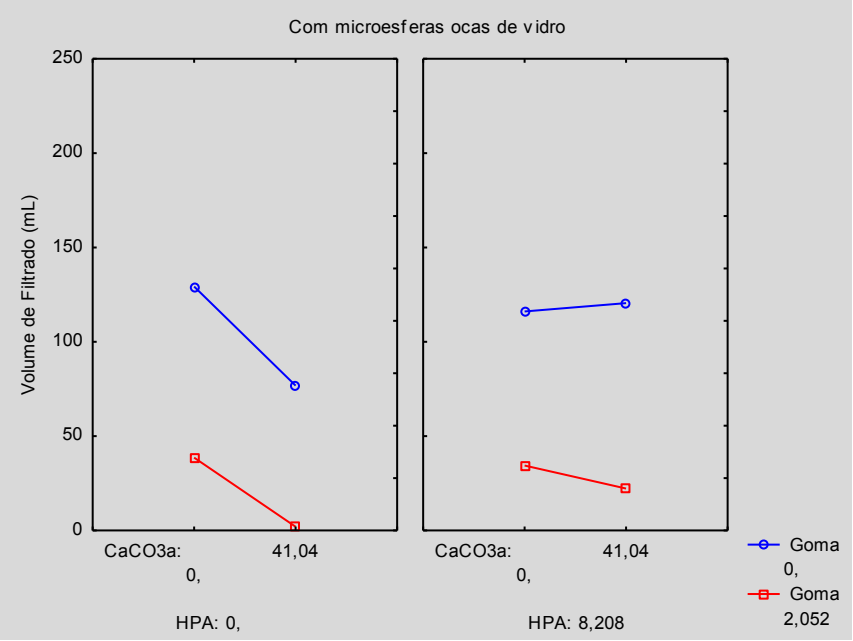


Figura 32 - Gráfico de médias para o volume de filtrado com microesferas ocas de vidro.

De acordo com a literatura, Medley,Garkasi e Maurer em 1995 divulgaram uma pesquisa com o uso de microesferas ocas de vidro para a perfuração de poços em que a pressão hidrostática (pressão dentro do poço) encontra-se menor que a pressão da formação rochosa, condição contrária à situação normal, conhecida como perfuração sub-balanceada (*underbalanced drilling*). As microesferas utilizadas apresentavam

densidades relativas iguais a 0,38 e foram utilizadas em fluidos base água na presença de poliacrilamida parcialmente hidrolisada (*partially-hydrolyzed polyacrylamide* – PHPA). Seus resultados para perda de filtrado revelaram que, na faixa entre 0 e 50% em volume de esferas, houve uma redução de 8,3 cm³ para 6,5 cm³ em teste de filtração pelo procedimento padrão API. Esses valores estão próximos aos três melhores fluidos de perfuração contendo microesferas ocas de vidro, formulados neste trabalho, em que o volume de filtrado no teste API variou entre 2,0 cm³ e 3,6 cm³, com faixa volumétrica de microesferas ocas de vidro entre 9,1% (fluido 22) e 31% (fluido 17).

5.7. Avaliação da espessura de reboco (ER)

A formação do reboco ocorre pela deposição de sólidos presentes no fluido nas paredes do poço, à medida que a água desses fluidos (à base de água) penetra nos seus poros. O aumento da espessura do reboco se dá pela transferência da água às formações geológicas com as quais está em contato, até impermeabilizar o envoltório do poço, impedindo a perda de água por filtração. Fatores que contribuem nesse processo são o teor de sólidos e a aptidão selante dos materiais que compõem o fluido de perfuração, visto que é importante ter rebocos pequenos para não impedir a circulação dos fluidos de perfuração e ainda serem resistentes (NASCIMENTO *et al*., 2010).

Foi observado, por meio da Figura 33, que os fluidos 16 e 17 (sem microesferas), ausentes de goma xantana e amido, apresentaram os maiores valores de ER, 5,95 mm e 10,31 mm, respectivamente, quando comparados com os demais fluidos. Também foi observado que os menores valores de ER foram obtidos para os fluidos 5, 12, 3 e 2, em ordem crescente de espessura. O fluido 5, além de não apresentar goma xantana e controlador de filtrado (amido), também foi formulado sem carbonato de cálcio, utilizado como obturante. O fluido 12 também não apresentou carbonato de cálcio de nenhum tipo, contudo tinha goma xantana e amido. O fluido 2 possuía a goma xantana e fluido 3 foi formulado na presença de goma xantana, de amido e de carbonato de cálcio (b). Dessa forma, conclui-se que a ausência do HPA e da goma xantana simultaneamente (fluidos 16 e 17) seria favorável às formações de maiores rebocos. Contudo, o fluido 5 foge a essa regra, sendo necessária a realização de novas formulações, a fim de analisar a influência dos componentes na espessura do reboco.

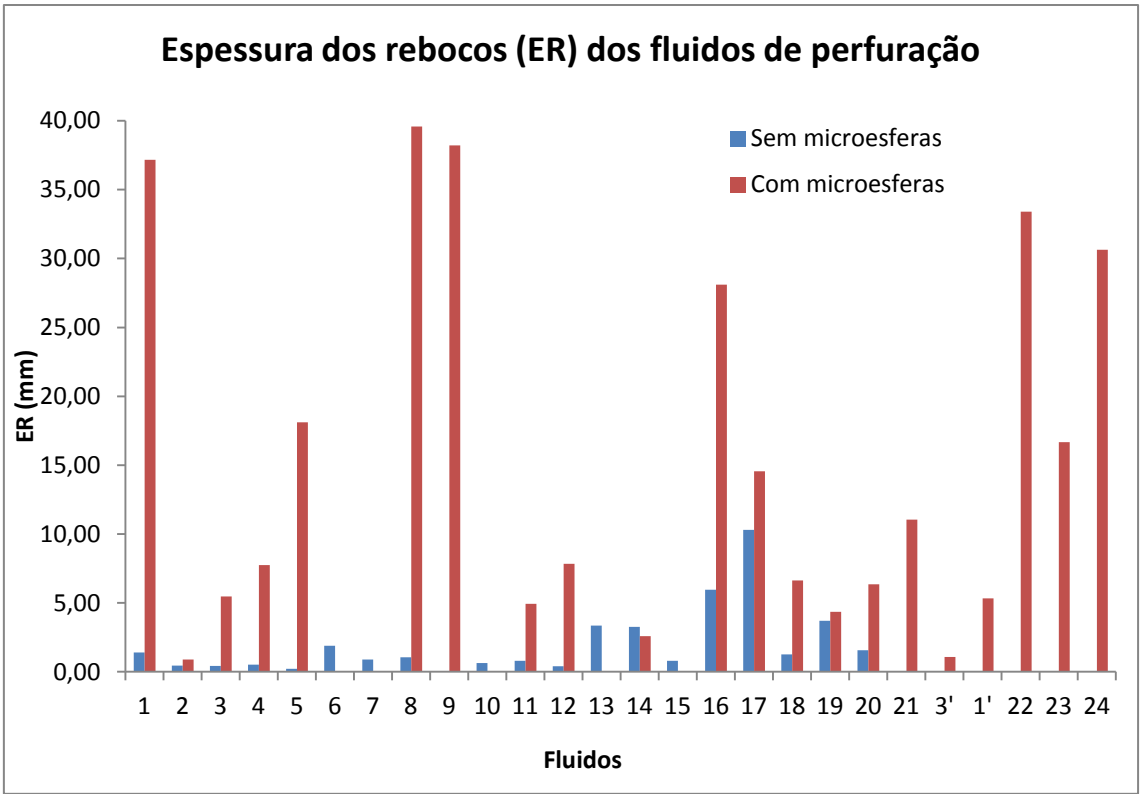


Figura 33 - Espessura dos rebocos de fluidos de perfuração sem e com microesferas ocas de vidro.

Conforme mencionado anteriormente neste trabalho (item **5.5**), os fluidos 6, 7 e 13 com microesferas não foram testados, devido à obtenção de fluidos com características de géis, sem escoamento. Os fluidos 9 e 21 sem microesferas foram prematuramente descartados e por isso não estão presentes na Figura 33. Da mesma forma, o fluido 16' (que não foi formulado sem microesferas ocas de vidro), e os fluidos 10 e 15, com microesferas, foram previamente descartados por não terem sido retirados do filtro-prensa inteiramente, sendo impossibilitados de terem suas espessuras medidas integralmente. Em relação aos últimos fluidos (3', 1', 22, 23 e 24), eles foram formulados apenas contendo as microesferas ocas de vidro (além dos demais componentes), conforme comentado em **5.1**.

Na análise da espessura do reboco dos fluidos compostos por microesferas ocas de vidro, observa-se, por meio da Figura 33, que o fluido 2 foi o de menor espessura (0,892 mm). Esse fluido também se destacou entre os menores valores de reboco nos fluidos formulados sem microesferas. Sendo assim, nessa formulação, as microesferas ocas de vidro não estimularam o processo de perda de água para as formações, caracterizado pelo aumento da espessura do reboco. Logo em seguida, o fluido 3'

destaca-se entre as menores espessuras (1,074 mm), sendo um fluido de mesma composição que o fluido 3 (entre os melhores destacados na Figura 33) diferenciando-se pela quantidade das microesferas ocas de vidro. A ausência de $CaCO_3$ (a), aditivo utilizado como obturante, foi comum aos fluidos 2 e 3'. Em princípio, o fato desses fluidos com microesferas ocas de vidro apresentarem as menores espessuras não indica que a ausência de $CaCO_3$ (a) seja favorável, visto que outros fluidos foram formulados sem esse componente e apresentaram alturas elevadas (fluido 16, por exemplo). Diferentes investigações são necessárias a fim de definir a melhor composição e quantidade de microesferas ocas, de modo a obter rebocos poucos espessos.

Em contrapartida, os fluidos 8, 9 e 1 apresentaram as maiores espessuras de reboco em ordem decrescente, apresentadas na Figura 33. Na análise das composições desses três fluidos, o amido esteve ausente apenas no fluido 9, fluido formulado também sem a presença de goma xantana. Nos fluidos 8 e 1, o amido esteve presente em diferentes concentrações, sendo o primeiro a metade do segundo (4,104 g e 8,208 g, respectivamente). Dessa forma, constata-se que a presença de amido, exclusivamente, como controlador de filtrado não contribuiu para redução da torta de filtração. Em relação ao carbonato de cálcio ($CaCO_3$ (a) e $CaCO_3$ (b)), eles estiveram presentes nos fluidos 8 e 9, sendo no primeiro a metade do segundo e apenas o $CaCO_3$ (b) utilizado na composição do fluido 1. Observa-se que não se devem avaliar as espessuras das tortas de filtração com base na presença ou ausência de determinados componentes e sim, na interação entre eles.

Além disso, na literatura, Farias *et al.* (2006) fornecem valores de espessuras de reboco em fluidos de perfuração hidroargilosos abaixo de 3 mm. Isso significa que os fluidos 2 e 3' apresentaram espessuras aceitáveis, todavia todas as outras formulações com microesferas ocas estiveram acima desse valor.

A Figura 34 relaciona a quantidade de microesferas ocas de vidro com as espessuras dos rebocos obtidos com a filtração, a fim de avaliar o efeito da presença dos sólidos sobre a altura das tortas de filtração. Foi verificado que o percentual de microesferas não é o único fator determinante na análise dessa resposta (ER), visto que para fluidos com elevada quantidade de microesferas ocas de vidro, ou seja, maior volume de sólidos, como nos fluidos 11, 18 e 19 (10,93%, 10,35% e 10,71% em massa), foram encontradas espessuras de rebocos abaixo de 7 mm. A afirmação é ainda confirmada pelo resultado do fluido 2, em que se observa a menor espessura (abaixo de

1 mm para um percentual de 8,14% de microesferas ocas de vidro) encontrada para o reboco dentre todos os fluidos analisados.

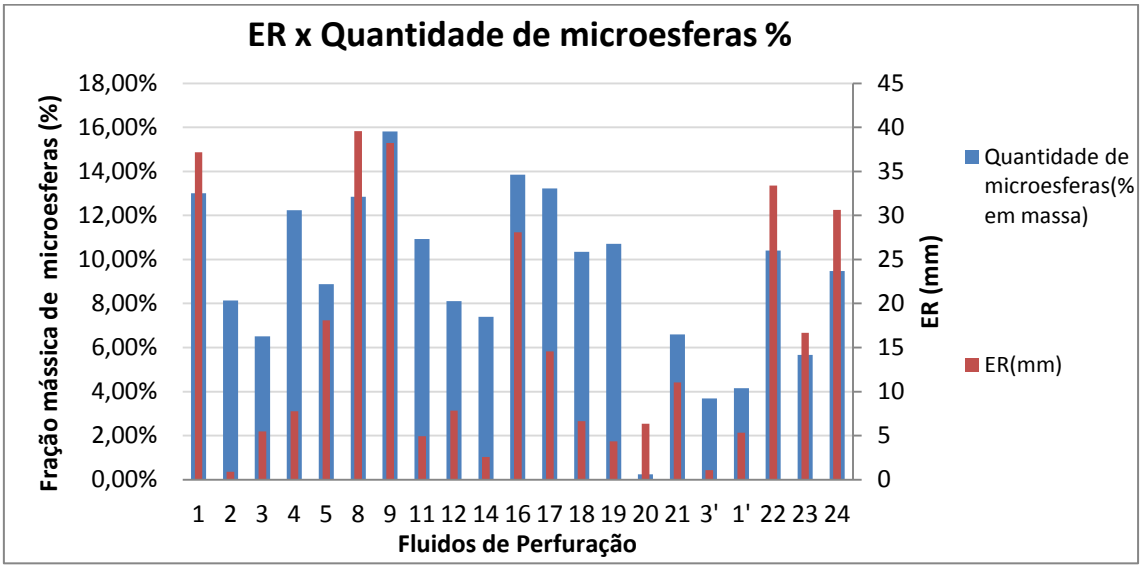


Figura 34 - Comparação entre as espessuras dos rebocos e as quantidades de microesferas ocas de vidro.

A Figura 35 apresenta imagens de dois rebocos quaisquer, dos fluidos 11 e 12, respectivamente, com espessuras iguais a 4,94 mm e 7,83 mm, logo após a realização dos testes de filtração.

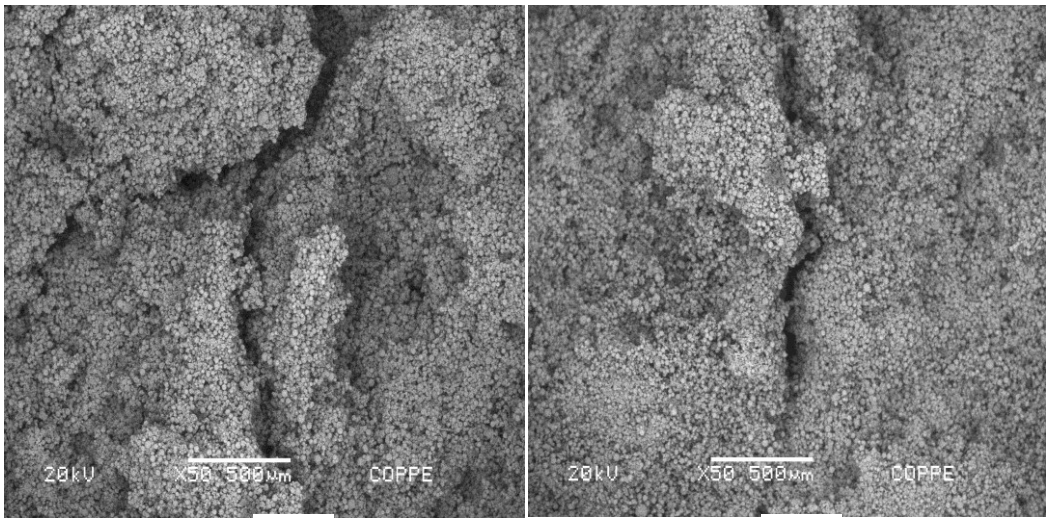
Figura 35 - Rebocos dos fluidos de perfuração com microesferas 11 (esquerda) e 12 (direita).

5.8. MEVe EDS da torta de filtração

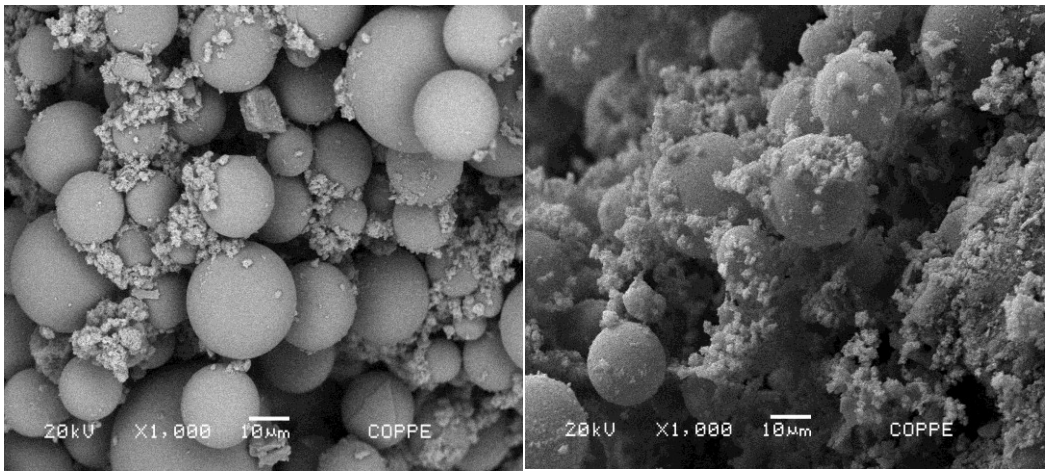
As Figuras 36, 37 e 38 apresentam as microscopias realizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das tortas de filtração de fluidos com e sem microesferas, em resoluções de 50x, 600x, 1000x e 3000x. Foram escolhidos fluidos sem microesferas (fluidos 5, 16 e 17) e com as mesmas (fluido 8), os quais apresentaram resultados de volume de filtrado não aceitáveis e ainda, um fluido sem as

microesferas (fluido 3) e outro com as microesferas (fluido 19), tendo resultados aceitáveis na filtração.

Foi observado que as tortas de filtração contendo microesferas ocas de vidro (Figura 36) apresentaram aglomerados dessas partículas em ampliação de 50x (a e b), o que permitiu o surgimento de fendas entre os blocos formados pelas microesferas ocas de vidro. O surgimento das fendas verificadas nas Figuras 36 (a) e (b) pode ter contribuído para o aumento do volume de filtrado desses fluidos de perfuração, conforme apresentado na Tabela 13. Ainda nas Figuras 36 (c) e (d), as microesferas ocas de vidro podem ser observadas, em ampliação de 1000x, interagindo com os outros componentes dos fluidos de perfuração. Além disso, verifica-se que há espaçamento entre elas e, assim, a torta de filtração não se manteve fortemente compactada. Possivelmente isso ocorreu devido ao formato das microesferas ocas de vidro ser altamente regular, bastante esférico conforme imagem presente na Figura 36 (c) e, mesmo que tenha uma variação de tamanhos, a esfericidade parece dificultar no empacotamento do reboco, facilitando na filtração. Seria uma alternativa a utilização de aditivos que em vez de possuírem formato esférico, apresentassem estrutura lamelar. Todavia, a fabricação desse tipo de estrutura certamente é menos simples que as esferas, o que aumentaria o custo na utilização desse tipo de material. Sugere-se, então, o uso de microesferas de menor diâmetro ou até mesmo nanoesferas.



(a) (b)

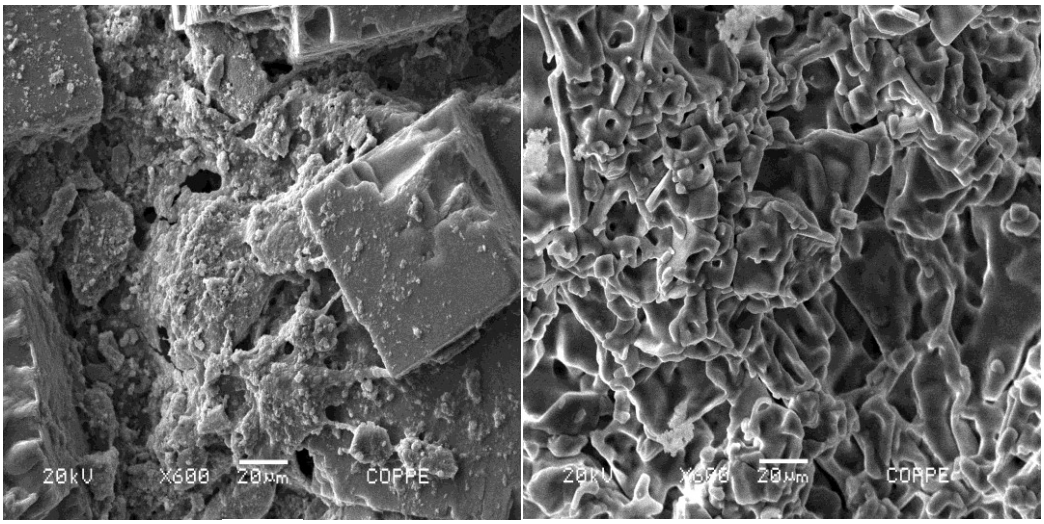


(c) (d)

Figura 36 - (a) MEV (50x) do fluido 8 com microesferas ocas de vidro; (b) MEV (50x) do fluido 19 com microesferas ocas de vidro; (c) MEV (1000x) do fluido 8 com microesferas ocas de vidro; (d) MEV (1000x) do fluido 19 com microesferas ocas de vidro.

A análise dos fluidos de perfuração na ausência de microesferas ocas de vidro não revelou a presença dos aglomerados apresentados na Figura 36. Nessas microscopias apresentadas nas Figuras 37 e 38, independentemente da ampliação de 600x ou 1000x, houve a distribuição não homogênea dos sólidos presentes nos fluidos, devido ao fato de apresentarem diferentes tamanhos.

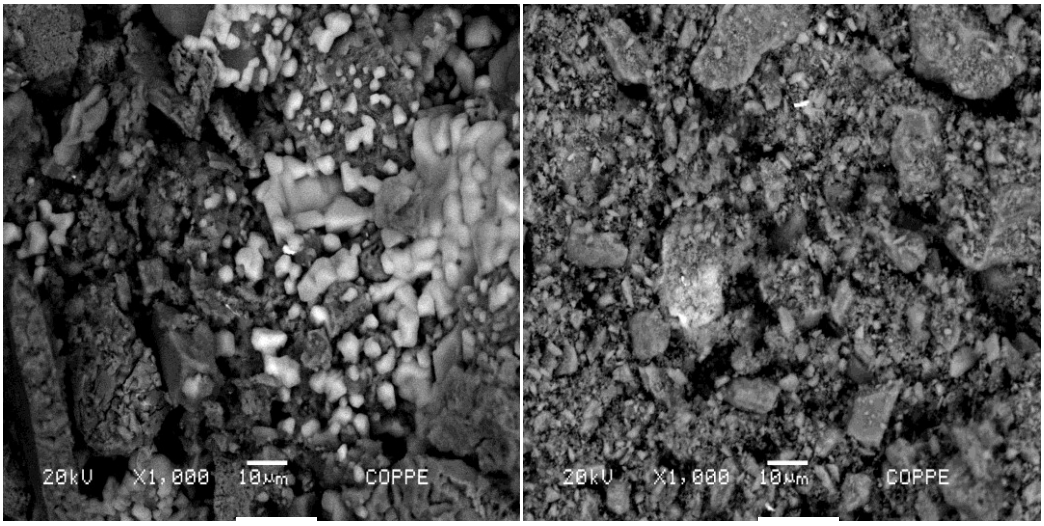
Apenas o fluido 3 (Figura 37 (a)) teve a sua microscopia obtida por meio da varredura na superfície da torta de filtração devido ao fato de possuir espessura insuficiente para a realização da análise nessa região (possui volume de filtrado aceitável e reboco pequeno). Os fluidos 5, 16 e 17 foram analisados ao longo da altura do reboco. Observa-se uma maior compactação da estrutura das tortas de filtração nesses três fluidos (Figura 37 e Figura 38) comparando-as com as estruturas dos fluidos contendo microesferas ocas de vidro (Figura 36).



(a) (b)

Figura 37 - (a) MEV (600x) do fluido 3 sem microesferas ocas de vidro; (b) MEV (600x) do fluido 17 sem microesferas ocas de vidro.

Em relação à composição, os fluidos 5 e 16 (Figura 38) não apresentam goma xantana, amido e carbonato de cálcio (a). O fluido 17 (Figura 37 (b)) não apresentou goma xantana, nem o amido, contudo foi formulado com o carbonato de cálcio (a) e sem $CaCO_3$ (b). Acredita-se que a estrutura entrelaçada e a possível maior compactação, unicamente presente no fluido 17, ocorreu devido à presença exclusiva do $CaCO_3$ (a), ausente nas demais tortas de filtração analisadas pelo MEV. Entretanto, a formulação deste fluido não incluiu aditivos importantes, sendo essa considerada inapropriada para a utilização como fluido de perfuração.



(a) (b)

Figura 38 - (a) MEV (1000x) do fluido 5 sem microesferas ocas de vidro; (b) MEV (1000x) do fluido 16 sem microesferas ocas de vidro.

Acoplado ao MEV, encontrava-se o EDS (*Energy Dispersive System*) que permitiu a determinação qualitativa do fluido 8 com microesferas, apresentado na Figura 39, do fluido 17 sem microesferas, na Figura 41 e fluido 16 sem microesferas na Figura 42.

Na Figura 39, foram marcados 3 pontos a fim de determinar as composições presentes no fluido 8 contendo microesferas ocas de vidro, em resolução de 1000x, sendo apresentada a composição do fluido registrada no ponto 1. Foi observada nos pontos 1 e 2, em maiores quantidades, a presença de cálcio, silício e cloro. Ainda foram registrados picos de potássio, sódio, magnésio, oxigênio e carbono. Esses componentes confirmam os aditivos utilizados na formulação do fluido 8, sendo o silício o composto característico das microesferas ocas de vidro, produzidas com borossilicato de sódio e cálcio. O ponto 3 também foi semelhante aos pontos 1 e 2, sendo que nele não houve a identificação do magnésio e do potássio. Acredita-se que no ponto 3 seja refletida a caracterização de um fragmento das microesferas ocas de vidro, não revelando a possível interação dos componentes MgO e KCl demonstradas nos pontos 1 e 2.

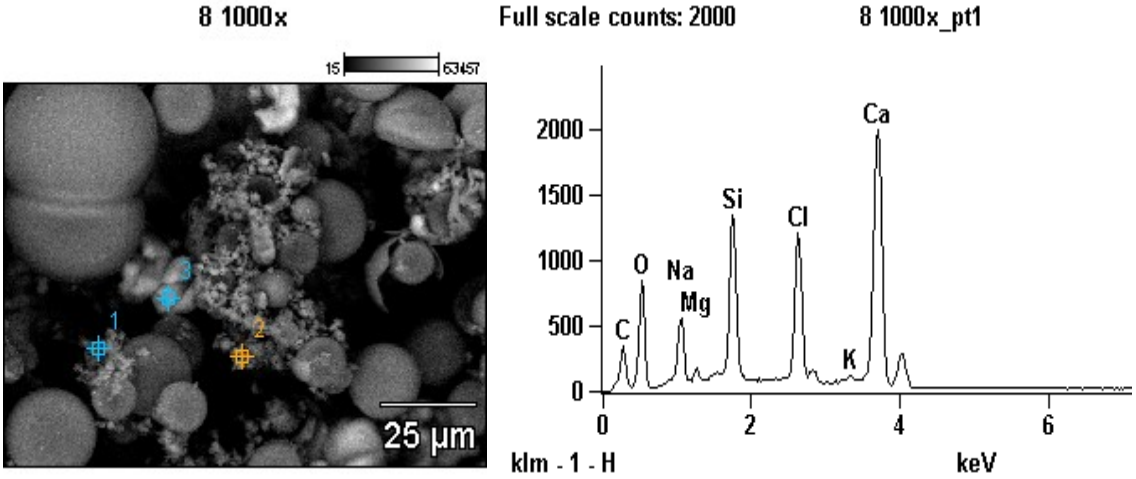
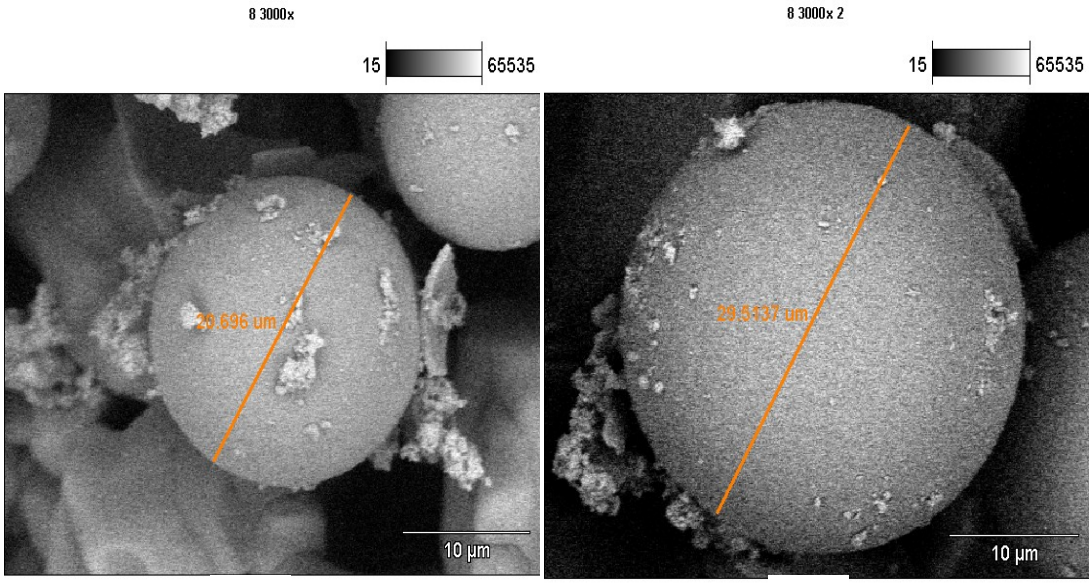


Figura 39 - MEV do fluido 8 com microesferas (1000x) e análise no EDS.

A técnica de EDS foi ainda utilizada para medir o diâmetro de algumas microesferas ocas de vidro presentes no fluido 8 e apresentadas nas Figuras 40 (a) e (b). Observa-se que os valores encontrados estão na faixa do diâmetro médio fornecido pelo fabricante, equivalente a 20 µm (Tabela do item **4.1.1**).



(a) (b)

Figura 40 - Diâmetro das microesferas ocas de vidro presentes no fluido 8 (3000x).

Na Figura 41, foram determinados 5 pontos para a análise do EDS no fluido 17 e encontra-se apenas o resultado do ponto 1, visto que todos os outros apresentaram os mesmos componentes que esse, ou seja, predominância de cloro em relação ao potássio, sódio e carbono, átomos presentes nos componentes do fluido. Os maiores cristais são característicos dos sais presentes nas formulações de todos os fluidos deste trabalho, exemplificado pela Figura 38(b), com o fluido 16.

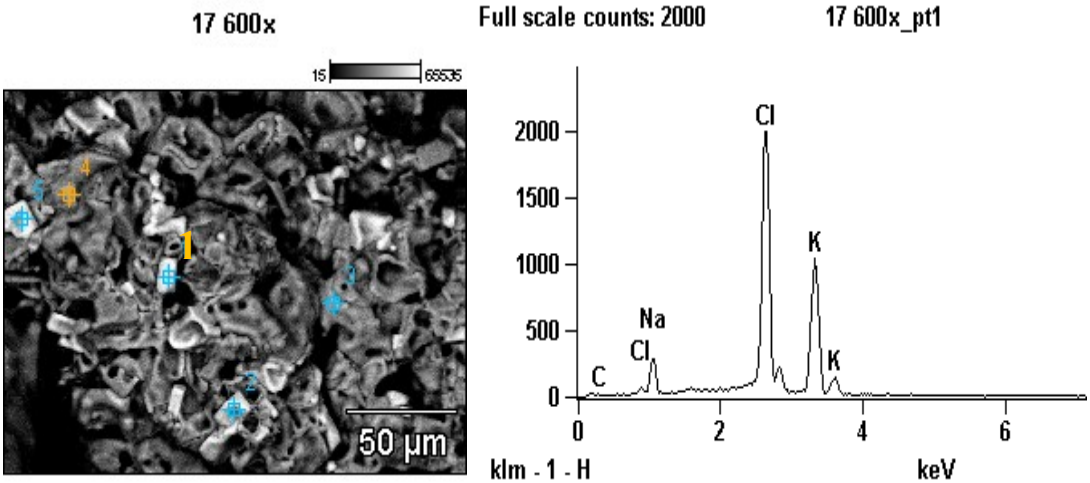


Figura 41 - MEV do fluido 17 sem microesferas (600x) e análise no EDS.

No ponto 3 presente na Figura 42, observa-se a maior presença de cloro, composto presente em ambos os sais utilizados na formulação dos fluidos base água.

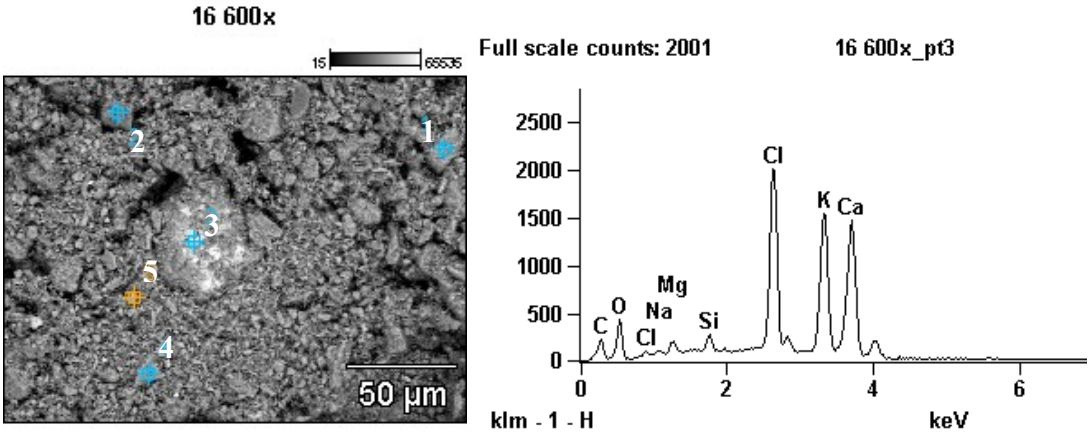


Figura 42 - MEV do fluido 16 sem microesferas (600x) e análise no EDS.

5.9. Estabilidade dos fluidos de perfuração

A estabilidade de todas as formulações foi observada após 24 horas de repouso das mesmas. Alguns fluidos mantiveram-se estáveis, enquanto outros apresentaram uma separação entre as fases. Os fluidos contendo microesferas apresentaram maior tendência à separação, conforme mostrado na Tabela 15, o que não é desejado para os fluidos de perfuração. Vale mencionar que é importante que a estabilidade dos fluidos se mantenha, ao menos por duas horas, durante as operações de perfuração.

Tabela 15 - Estabilidade de Fluidos de Perfuração Com e Sem Microesferas Ocas de Vidro

	Sem microesferas	Com microesferas
Estável	38%	33%
Fluidos	2,4,7,11,12,13, 18,19	3,4,14,18,19,21, 3',1'
Instável	62%	67%
Fluidos	1,3,5,6,8,9,10,14 15,16,17,20,21	1,2,5,8,9,10,11,12, 15,16,17,20,16',22,23,24

A não estabilidade pode ser verificada em dois fluidos diferentes nas Figuras 43 (a) e (b), com e sem microesferas ocas de vidro, respectivamente, demonstrando que a instabilidade dos fluidos existe independente da presença de microesferas ocas de vidro.

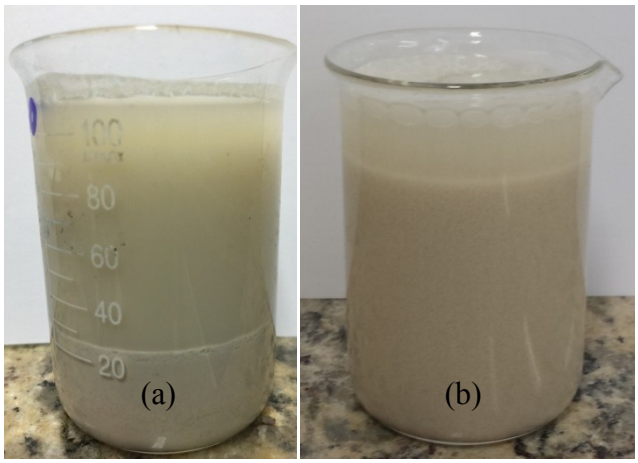
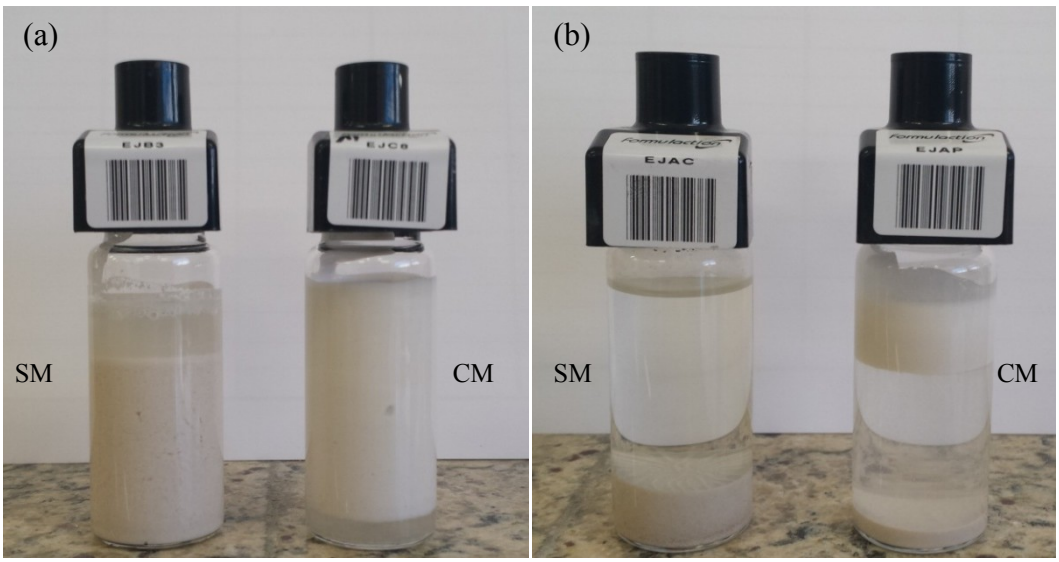


Figura 43 - (a) Fluido 20 contendo microesferas ocas de vidro (b) Fluido 16 sem microesferas ocas de vidro.

Além do fluido 20, a estabilidade dos fluidos 15, 16, 17 e 19 sem microesferas e dos fluidos 15, 17, 19 e 16' com microesferas foi analisada no Turbiscan LabExpert e os resultados dos mesmos, após 24 horas, estão apresentados na série de imagens na Figura 44, com os recipientes da esquerda contendo fluidos sem microesferas e os da direita, os fluidos com as microesferas.

Foram escolhidos para a análise no Turbiscan LabExpert os melhores e os piores resultados dos fluidos contendo as microesferas ocas de vidro, encontrados no teste de filtração. Sendo assim, os fluidos com melhores resultados foram os fluidos 17 e 19 e os fluidos 15 e 16 escolhidos por apresentarem grande afastamento do critério adotado para essa medida (até 6 mL).



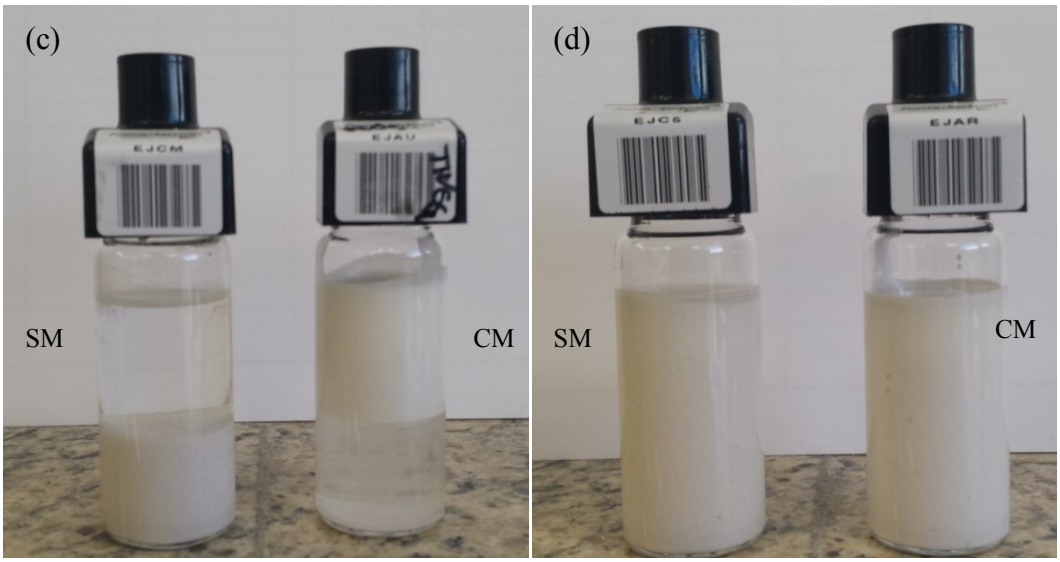


Figura 44 - Fluidos sem (SM) e com (CM) microesferas ocas de vidro: (a) Fluido 15; (b) Fluidos 16 e 16'; (c) Fluido 17; (d) Fluido 19.

Apenas pela análise visual, observa-se que o fluido 19 (Figura 44(d)) apresentou maior estabilidade durante o período de realização do teste.

Na análise realizada no Turbiscan, é necessário referir que um dos parâmetros necessários para avaliar a estabilidade de um fluido é a variação do retroespalhamento da luz na amostra, o qual está relacionado com fenômenos de migração das partículas, os quais favorecem uma separação de fases (SERRA, 2013).

O equipamento Turbiscan fornece a análise do fluxo de radiação retroespalhada (*backscattering* – BS) em percentual (ou a transmitância), em função do tempo de análise. Os resultados dos três fluidos menos estáveis, sem microesferas ocas de vidro, estão apresentados no gráfico da Figura 45.

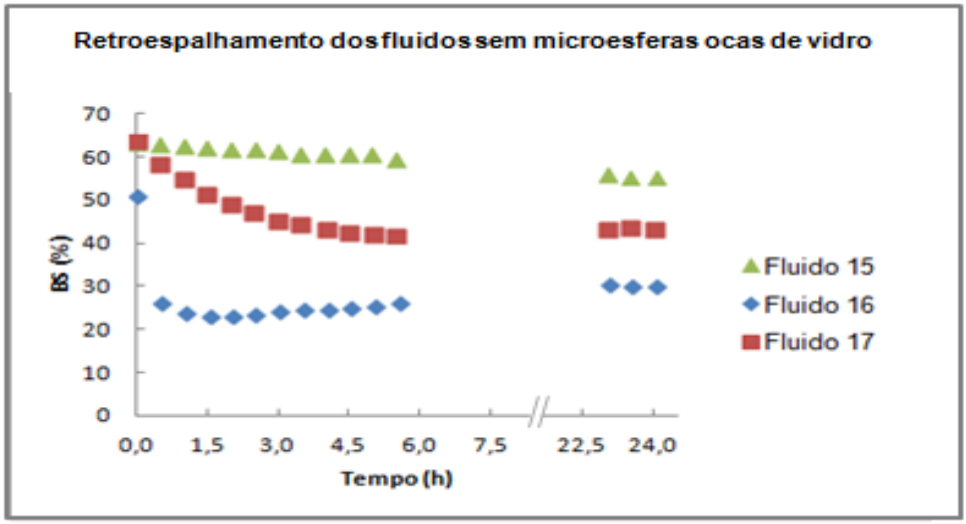


Figura 45 - Variação do retroespalhamento dos fluidos de perfuração sem microesferas ocas de vidro em função do tempo.

Os fluidos 15, 16 e 17 apresentaram estabilidades diferenciadas demonstradas pelo comportamento das curvas de retroespalhamento na Figura 45. A análise apresentada ocorreu ao longo de toda a altura dos recipientes nos quais estavam as amostras (cerca de 50 mm), por 24 horas. Os fluidos mais estáveis são os que apresentaram as menores variações de retroespalhamento (BS), ou seja, as menores inclinações das curvas no gráfico da Figura 45. Sendo assim, verifica-se que o fluido 15 foi o de maior estabilidade, seguido pelo fluido 17 e fluido 16, com estabilidades semelhantes.

Os mesmos fluidos na presença de microesferas ocas de vidro, presentes na Figura 46, expressaram comportamento semelhantes aos formulados sem microesferas. Isso significa que a estabilidade do fluido 15 foi a maior, seguida pelo fluido 17 e 16. Observa-se ainda na Figura 46 que o retroespalhamento inicial destes fluidos foram superiores ao apresentado pelos fluidos sem o aditivo de controle de densidade. A indicação para esse fato se deve à maior quantidade de partículas sólidas nos fluidos, devido à adição das microesferas ocas de vidro, as quais aumentaram o efeito do retroespalhamento detectado na análise.

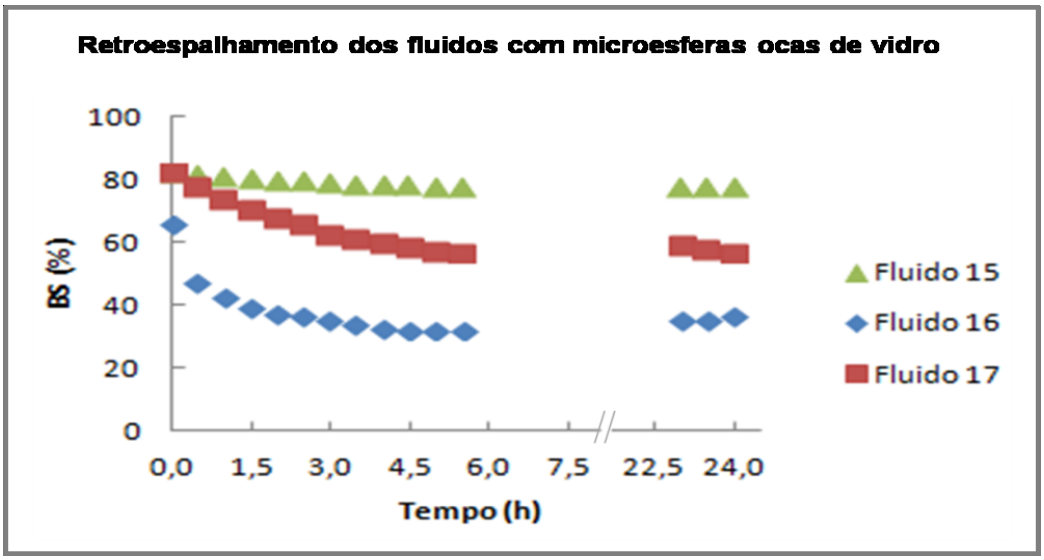


Figura 46 - Variação do retroespalhamento dos fluidos de perfuração com microesferas ocas de vidro em função do tempo.

Os resultados obtidos de transmitância (parte superior das imagens no gráfico) e retroespalhamento (parte inferior das imagens no gráfico), para os fluidos 15, 16 e 17 contendo as microesferas ocas de vidro, podem ser observados na Figura 47. Os eixos das ordenadas representam os valores de transmitância e retroespalhamento, enquanto as abscissas indicam a escala de altura da cubeta a ser medida no teste. A parte esquerda das abscissas representa o fundo da célula de análise e a da direita, o topo da mesma. A curva de cor vermelha representa a última leitura realizada pelo equipamento. Os fenômenos de instabilidade como sedimentação, floculação ou coalescência são determinados ao longo da altura da célula, por meio da elevação ou redução do *backscattering*. A migração de partículas é um fenômeno detectado pelos dispositivos ópticos do Turbiscan por serem característicos da variação de fração volumétrica de partículas, que é um dos parâmetros relacionados à intensidade do retroespalhamento medido pelo equipamento (O'DONNELL; BOKSER, 2009).

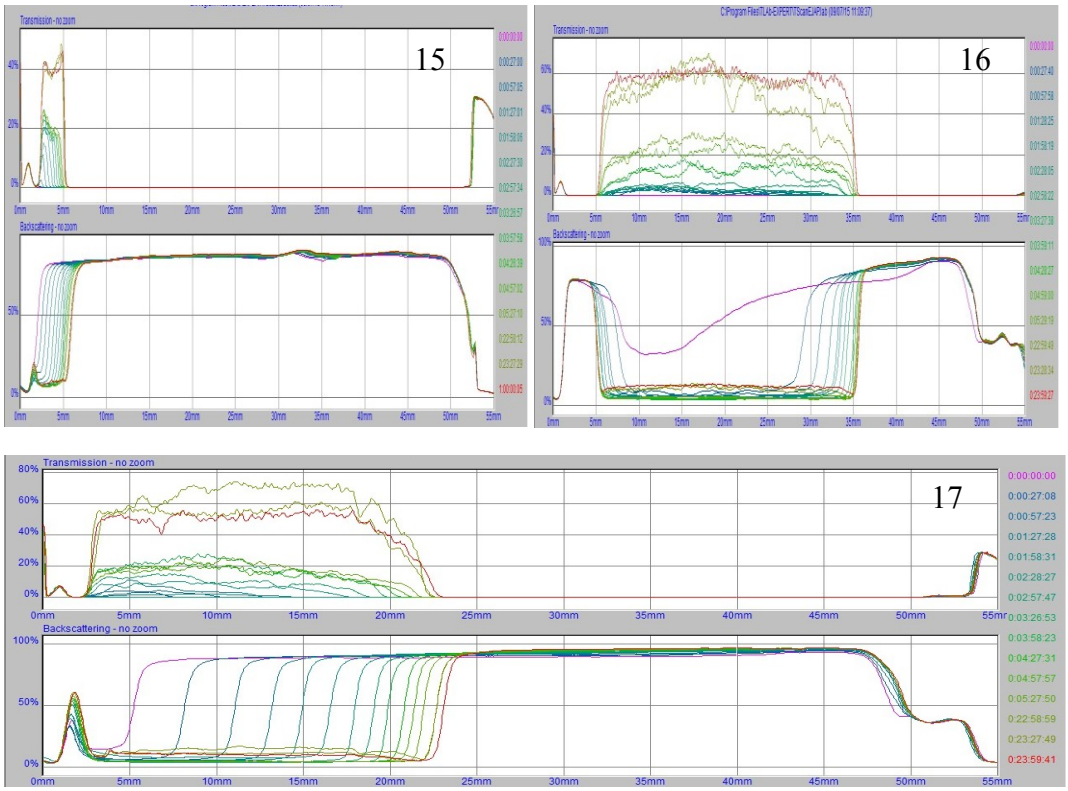


Figura 47 - Variação da transmissão e do retroespalhamento (*backscattering*) de fluidos com microesferas ocas de vidro.

A variação registrada entre as curvas do fluido 15 nos diferentes intervalos de tempo confirmou que o mesmo foi instável, com uma região clarificada no fundo da cubeta indicada ao lado esquerdo do primeiro gráfico da Figura 47; porém, esse fluido apresentou maior estabilidade na fase de maior concentração de partículas, pouco acima de 5 mm de altura do fluido.

O fluido 16 teve a sua instabilidade provada por meio de três diferentes regiões: a primeira, caracterizada pela concentração de sólidos ao fundo da cubeta; segunda região que foi clarificada (no meio da altura da cubeta analisada) e no topo, uma nova região com maior concentração de sólidos que a primeira. A fase clarificada foi notada pelo aumento da transmissão entre 5 e 35 mm e ao topo, a região com maior concentração de sólidos, foi comprovada pelo leve aumento no retroespalhamento em relação aos valores da região de fundo.

O resultado do fluido 17 apresentou comportamento similar ao fluido 16 em relação às três diferentes regiões observadas, porém em diferentes concentrações. Ao fundo da cubeta foi observado um pico estreito no gráfico de retroespalhamento, caracterizado por partículas menores que as presentes na mesma região do fluido 16.

Em seguida, verifica-se uma região de grande instabilidade caracterizada pelos

deslocamentos das curvas de retroespalhamento, revelando o processo de clarificação por meio do aumento no eixo de transmissão. Por fim, tem-se a camada acima de 25 mm, com elevada concentração de sólidos e mais estável. Ainda é possível verificar que, possivelmente, houve um processo de coalescência de partículas da região localizada na parte superior da cubeta, devido à redução da transmissão na curva vermelha, que foi a última leitura após 24h de análise.

O fluido 19 foi analisado em um intervalo de tempo maior que 24h, que foi o tempo estipulado para as outras três formulações, devido à maior estabilidade desse fluido de perfuração. O intuito foi acompanhar em um maior período, em total de 8 dias, a alteração no comportamento da estabilidade do fluido 19, sem e com as microesferas ocas de vidro. A Figura 48 revela que a estabilidade do fluido 19, sem microesferas ocas de vidro e após a adição das mesmas, praticamente, não foi alterada. Essa estabilidade do fluido foi revelada por meio da constância das curvas registradas pelo Turbiscan, em quase toda a altura do fluido (aproximadamente 47 mm), ao longo dos 8 dias de teste. Verifica-se que no fluido sem microesferas ocas (Figura 49), próximo à parte superior da cubeta, houve uma pequena fase clarificada, registrada pelas variações das curvas de transmissão e pelo decaimento nas curvas de *backscattering* na Figura 48.

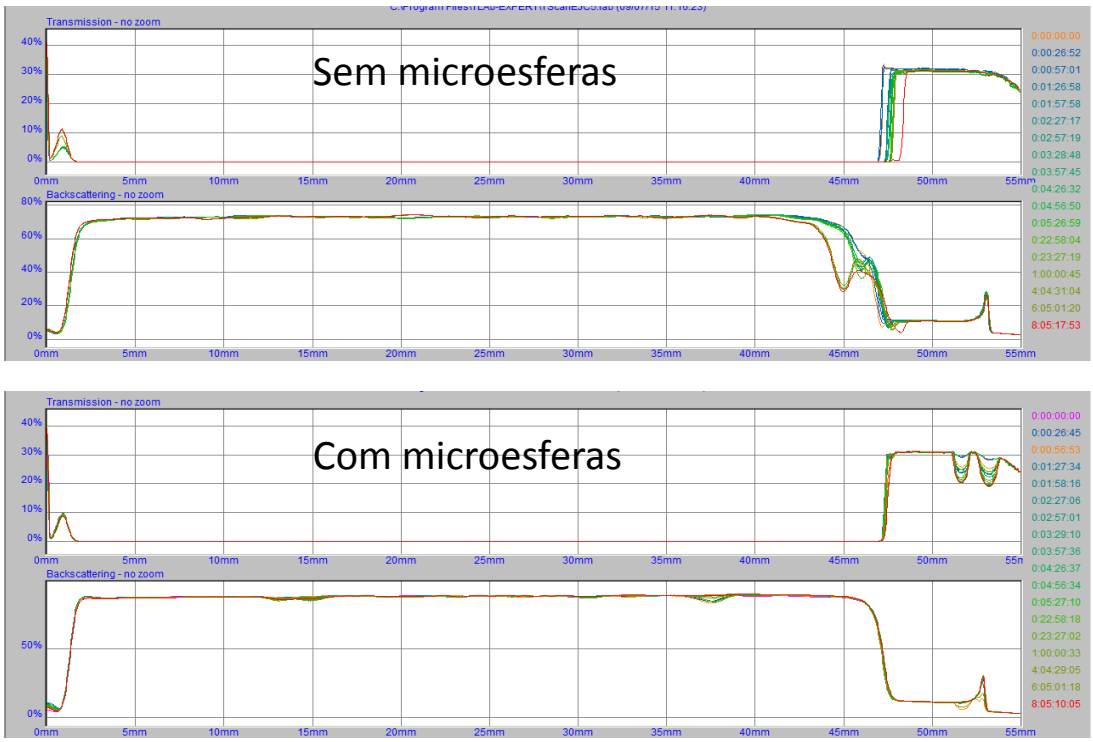


Figura 48 - Variação da transmissão e do retroespalhamento (*backscattering*) do fluido 19 sem e com microesferas ocas de vidro.

Figura 49 - Fluido 19 sem e com microesferas ocas de vidro após 8 dias de teste.

5.10. Análise reológica

A análise reológica ocorreu com os fluidos que obtiveram os melhores resultados na filtração com e sem microesferas ocas de vidro. Dessa forma, foram estudados os comportamentos dos fluidos 1 (filtrado de 2,8 mL), 3 (filtrado de 2,4 mL), 4 (filtrado de 3,6 mL) e 11 (filtrado de 7,8 mL), sem microesferas, e dos fluidos 3 (filtrado de 12,4 mL), 4 (filtrado de 13,6 mL), 11 (filtrado de 11,0 mL), 19 (filtrado de 2,0 mL), 3' (filtrado de 3,2 mL) e 1' (filtrado de 67,2 mL), com microesferas. Não foi realizada a análise estatística para o estudo da reologia por ser esta, de forma geral, medida de forma qualitativa (aceitável ou não), o que dificultaria a verificação analítica no *software* utilizado nesta dissertação.

As Figuras 50 e 52 apresentam, respectivamente, as curvas de tensão e de viscosidade dos fluidos sem e com microesferas ocas de vidro.

Os fluidos de perfuração analisados apresentaram comportamento não Newtoniano, devido à ausência de linearidade nas curvas de tensão e ainda, nas curvas de viscosidade. Nas Figuras 50 e 52 foi verificado que os fluidos sem microesferas e com as mesmas apresentaram comportamento de fluido pseudoplástico, caracterizado pela redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, presentes na Figura 52.

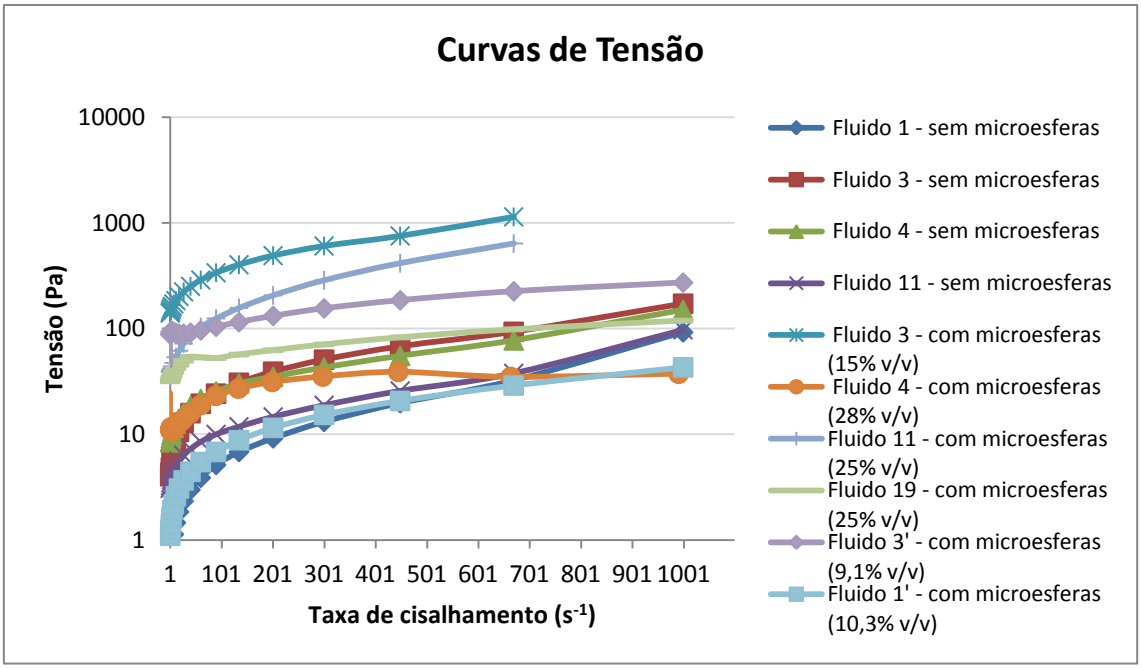


Figura 50 - Curvas de tensão dos fluidos com e sem microesferas ocas de vidro.

As curvas de tensão exibiram tensão mínima de escoamento (*yield stress*) para a todos os fluidos, sendo que para algumas formulações a tensão inicial foi consideravelmente baixa. A fim de verificar mais adequadamente a presença da tensão inicial de escoamento, foi realizada uma aproximação nas curvas de escoamento presentes na Figura 51 em taxas de cisalhamento entre 0 e 50 s^{-1}. A imagem revela que apenas o fluido 1 sem microesferas ocas de vidro e o fluido 1' com microesferas apresentaram tensão inicial abaixo de 1 Pa. Isso significa que todos os outros fluidos apontaram resistência ao escoamento inicial do fluido. Não houve nenhuma semelhança entre as composições dos fluidos que apresentaram resistências ao escoamento inicial, a fim de justificar esse comportamento apresentado pelas curvas de tensão.

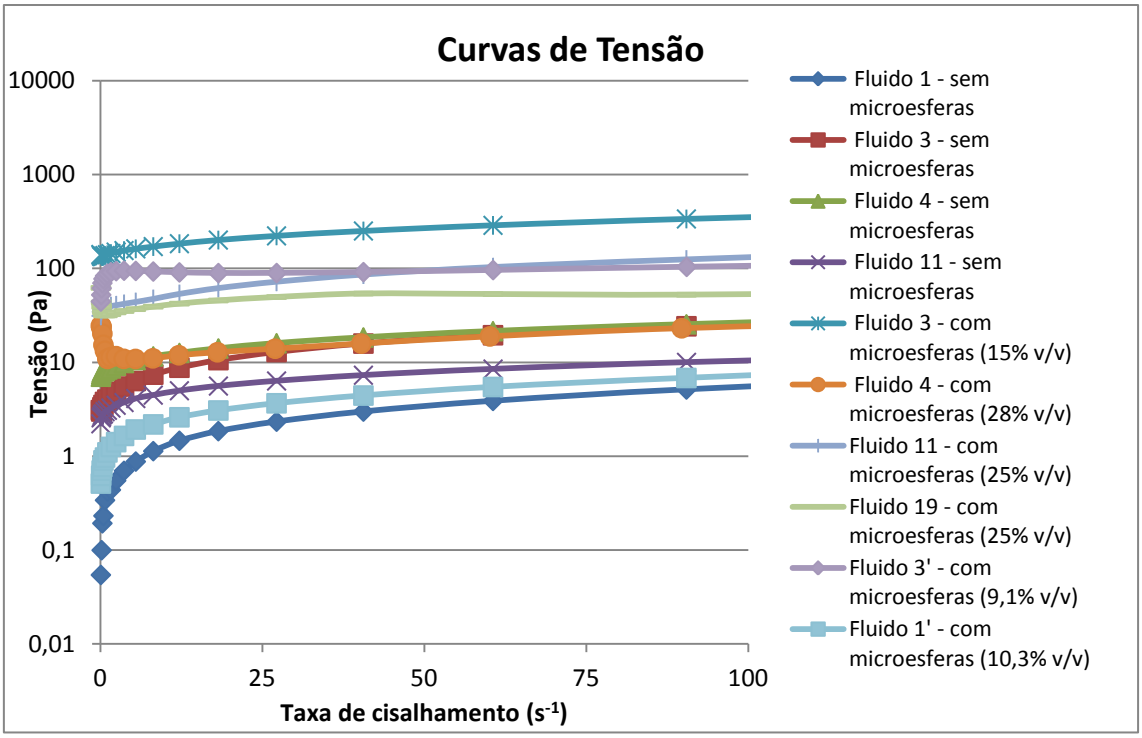


Figura 51 - Curvas de tensão dos fluidos com e sem microesferas ocas de vidro, em taxa de cisalhamento entre 0 s^{-1} e 150 s^{-1}.

As viscosidades dos fluidos analisados sem as microesferas variaram entre 10^2 cP e 10^5 cP, conforme Figura 52. Os fluidos contendo microesferas ocas de vidro apresentaram maiores viscosidades após o aumento da quantidade de sólidos nas suas composições, tornando-se mais viscosos, com valores entre 10^3 cP e 10^7 cP.

Deseja-se que os fluidos de perfuração tenham um comportamento pseudoplástico, uma vez que para maiores taxas de cisalhamento a viscosidade diminui. É importante que nas regiões mais próximas às paredes, de altas taxas de cisalhamento, a viscosidade do fluido seja menor a fim de reduzir a perda de carga no transporte dos sólidos até à superfície.

A análise reológica revelou que o percentual em massa de microesferas não influenciou diretamente no aumento da viscosidade dos fluidos, visto que o fluido 3 com 15% v/v desse aditivo apresentou viscosidades ao longo do teste maiores que o fluido 4, por exemplo, formulado com 28% v/v deste material.

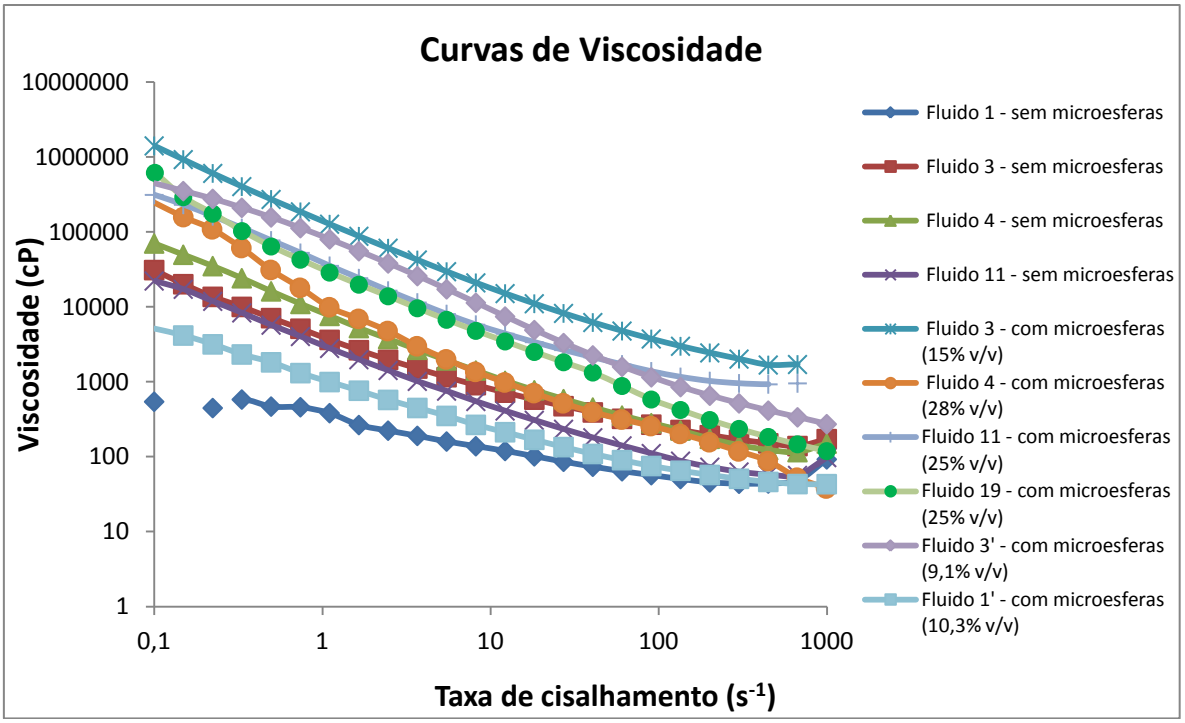


Figura 52 - Curvas de viscosidade dos fluidos com e sem microesferas ocas de vidro.

Foi observado por meio das curvas de viscosidade dos fluidos 3 e 11 com microesferas ocas de vidro que a presença da goma xantana no fluido 3, aditivo utilizado como viscosificante, adicionada às microesferas (15% v/v) elevou consideravelmente a viscosidade do fluido 3, sendo a sua curva composta pelos maiores valores de viscosidade, conforme apresentado pela Figura 52. O fluido 11, mesmo sendo formulado com maior teor de microesferas ocas de vidro (25% v/v) que o fluido 3, na ausência de goma de xantana apresentou viscosidades pouco menores que o fluido 3. Sendo assim, a fim de obter valores de tensão e viscosidades aceitáveis na presença das microesferas ocas de vidro, vale desconsiderar a utilização de goma xantana nas formulações ou a sua redução, uma vez que as próprias microesferas tendem a aumentar as viscosidades dos fluidos.

Além disso, o estudo reológico dos fluidos 1 e 11 sem microesferas ocas de vidro permitiu concluir que a presença de $CaCO_3$ (a) elevou as viscosidades dos fluidos, visto que um dos componentes que os diferenciam foi a presença de $CaCO_3$ (a) no fluido 11, com viscosidade inicial acima de 10^4 cP e ausência desse componente no fluido 1, com viscosidade inicial abaixo de 10^3 cP. Portanto, na utilização das microesferas ocas de vidro recomenda-se que a concentração de $CaCO_3$ (a) seja reduzida ou evitada, a fim de controlar mais eficazmente a viscosidade dos fluidos.

O estudo reológico revelou que nenhum dos fluidos analisados atendeu simultaneamente aos critérios necessários dos fluidos de perfuração (Tabela 6), porém o fluido 4 contendo microesferas ocas foi o que apresentou valores aceitáveis para a utilização do mesmo, após algumas modificações reológicas. Além deste, o fluido 3 sem microesferas ocas também apresentou comportamento aceitável para a utilização. Os valores encontrados na análise reológica destes fluidos estão presentes na Tabela 16.

Tabela 16 - Análise reológica dos fluidos de perfuração

Fluido	Tensão em 1000 s^{-1} (Pa)	Tensão em 5 s^{-1} (Pa)	Gel inicial (Pa)	Gel final (Pa)
Fluido 4 (com microesferas)	85,89	12,83	12,83	12,83
Fluido 3 (sem microesferas)	147,16	7,08	7,08	7,08
Valor ideal	$\tau < 47,5$	$4 < \tau < 7,5$	$4,6 < \tau < 7,7$	$7.2 < \tau < 10.2$

De acordo com os critérios definidos na Tabela 6, o fluido 3 sem microesferas apresentou valores aceitáveis de tensão em taxa de cisalhamento de 5 s^{-1} e da força gel inicial, estando as outras medidas fora do intervalo ideal adotado pelo CENPES. Por outro lado, a adição das microesferas ocas de vidro nesse mesmo fluido elevou excessivamente a sua viscosidade, demonstrada pela Figura 52 e as também, as tensões medidas na Figura 50 extrapolaram os limites dos critérios estabelecidos na pesquisa. O fluido 4, contendo microesferas, não atende a nenhum critério reológico corretamente. Contudo, dentre todas as curvas de tensão dos fluidos analisados contendo microesferas ocas de vidro, o fluido 4 foi o que mais se aproximou do padrão esperado pelos fluidos de perfuração base água. Assim, torna-se necessário modificar a composição desse fluido a fim de atender plenamente aos critérios reológicos. Algo que poderia ser feito neste fluido, o qual apresenta boa lubricidade e limite de filtrado pouco acima do critério (13,6 mL), seria a redução da goma xantana e do $CaCO_3$ (a) a fim de obter melhores resultados reológicos. Entretanto, não é recomendada a total remoção de goma, pois essa foi a composição do fluido 11 com microesferas, o qual ultrapassou muito o limite de tensões, sendo esse próximo ao fluido 3 com microesferas comentado no parágrafo anterior.

Além dos fluidos apresentados nas Figuras 50 e 52 acima, os fluidos 5 e 17 com microesferas foram analisados reologicamente porém, esses não apresentaram os comportamentos esperados nas curvas de escoamento e viscosidade, sendo necessária a repetição dos testes para uma melhor interpretação dos resultados. O fluido 5 apresentou

viscosidades entre 1 e 4300 cP e faixa de tensão entre 0,1 e 3,5 Pa. O fluido de 17, com as menores viscosidades dentre todos os fluidos contendo microesferas, variou entre 7,5 e 125,0 cP e apresentou tensões entre 0,008 e 20,50 Pa. Mesmo que os valores de viscosidade e tensão tenham sido próximos aos ideais (Tabela 6), as curvas de escoamento e viscosidade para esses dois fluidos requerem novos testes, visto que seus desempenhos oscilaram frequentemente durante a aplicação das taxas de cisalhamento.

A Tabela 17 apresenta o resumo conclusivo dos resultados dos fluidos de perfuração com microesferas ocas de vidro, das principais variáveis estudadas.

Tabela 17 - Resumo dos principais resultados dos fluidos de perfuração com microesferas ocas de vidro

Fluidos	Lubricidade	Volume de Filtrado	Estabilidade	Comportamento reológico
1	Boa	Ruim	Ruim	Teste não realizado
2	Ruim	Ruim	Ruim	Teste não realizado
3	Boa	Bom	Boa	Ruim
4	**Boa**	**Bom**	**Boa**	**Aceitável**
5	Boa	Bom	Ruim	Ruim
6	Teste não realizado	Teste não realizado	Teste não realizado	Teste não realizado
7	Teste não realizado	Teste não realizado	Teste não realizado	Teste não realizado
8	Boa	Ruim	Ruim	Teste não realizado
9	Ótima	Ruim	Ruim	Teste não realizado
10	Boa	Ruim	Ruim	Teste não realizado
11	Ótima	Bom	Ruim	Ruim
12	Boa	Ruim	Ruim	Teste não realizado
13	Teste não realizado	Teste não realizado	Teste não realizado	Teste não realizado
14	Ruim	Ruim	Boa	Teste não realizado
15	Ótima	Ruim	Ruim	Teste não realizado
16	Ruim	Ruim	Ruim	Teste não realizado
17	Ruim	Ótimo	Ruim	Aceitável
18	Ruim	Ruim	Boa	Teste não realizado
19	Ruim	Ótimo	Boa	Ruim
20	Boa	Ruim	Ruim	Teste não realizado
21	Boa	Ruim	Boa	Teste não realizado
3’	Ótima	Ótimo	Boa	Ruim
16’	Ruim	Ruim	Ruim	Teste não realizado
1’	Boa	Ruim	Boa	Aceitável
22	Boa	Ruim	Ruim	Teste não realizado
23	Ótima	Ruim	Ruim	Teste não realizado
24	Ótima	Ruim	Ruim	Teste não realizado

Critérios Lubricidade – Ruim: $CL \geq 0,34$; Boa: $0,30 \leq CL < 0,34$; Ótima: $CL < 0,30$.
Critérios Volume de Filtrado (VF) – Ruim: $VF \geq 30$ mL; Bom: $6 \leq VF < 30$ mL; Ótimo: $VF \leq 6$ mL.

De acordo com os dados informados pela Tabela 17 o fluido 4, dentro dos critérios adotados para as variáveis lubricidade, volume de filtrado, estabilidade e comportamento reológico foi o que apresentou os melhores resultados nos testes realizados. Em sua formulação foram utilizados goma xantana igual a 2,052 g, de amido 8,208 g, de $CaCO_3$ (a) 41,04 g, nenhuma quantidade de $CaCO_3$ (b) e 12,2% v/v de microesferas ocas de vidro , sendo esta a composição mais indicada ao uso deste aditivo, conforme critérios adotados nessa pesquisa.

Vale ressaltar que não foram obtidos valores ótimos em nenhuma variável, o que significa que outras modificações devem ser realizadas, conforme as sugestões apresentadas ao longo dessa dissertação.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho teve por objetivo avaliar o efeito das microesferas ocas de vidro utilizadas como aditivo de controle de densidade em fluidos de perfuração base água. No desenvolvimento deste trabalho, foram formulados 21 fluidos base água sem microesferas ocas de vidro e 27 fluidos preparados com microesferas, para realizar a comparação entre os comportamentos dos fluidos e a possível modificação das suas composições.

A utilização das microesferas ocas de vido como aditivo controlador de densidade atingiu o objetivo deste trabalho na obtenção de fluidos de perfuração, inicialmente, com 1,078 g/cm³ (9,0 lb/ gal) e posteriormente, em fluidos com 1,138 g/cm³ (9,5 lb/gal), apresentando coeficiente de variação das medidas finais de densidade abaixo de 3%.

A avaliação do pH dos fluidos de perfuração revelou que todas as formulações, sem e com microesferas ocas de vidro, atenderam à natureza de caráter básico destinada aos mesmos. Sendo assim, a adição das microesferas não alterou significativamente os valores de pH, ao ponto de ser necessário o uso adicional de aditivo controlador de pH.

A adição de microesferas ocas de vidro gerou um aumento de 40% de fluidos formulados com coeficiente de lubricidade abaixo do valor da água. Isso significa que a presença das microesferas ocas de vidro contribuiu para o aumento da lubricidade, fator importante para reduzir o atrito e resfriar os equipamentos de perfuração (broca e coluna). Pela análise estatística, foi constatado que a componente goma xantana na presença do $CaCO_3$ (b) contribuíram para a formulação de fluidos com maiores teores lubrificantes (menores valores de CL), na presença das microesferas ocas de vidro.

Em relação ao volume de filtrado (VF), o qual é uma das variáveis mais importantes na caracterização dos fluidos de perfuração, as microesferas ocas de vidro apresentaram efeito contrário ao desejado. Dentre os 27 fluidos de perfuração analisados, apenas 3 fluidos (17, 19 e 3') com microesferas ocas de vidro encontraram-se dentro do critério adotado para este trabalho (abaixo de 6 mL de filtrado). Observou-se também que nenhum fator principal (goma xantana, amido e os carbonatos) teve influência estatisticamente significativa sobre essa variável de resposta, sendo mais relevante os efeitos de interação entre eles, como o da goma xantana com o carbonato de cálcio (2-44) ($CaCO_3$ (b)).

A espessura do reboco obtido após os testes de filtração dos fluidos não foi diretamente prejudicada pela adição das microesferas ocas de vidro, o que significa que mesmo após o aumento da quantidade de sólidos nos fluidos por esse tipo de material, algumas tortas de filtração formadas estiveram controladas, sendo as melhores apresentadas pelos fluidos 2 e 3', abaixo de 2 mm de espessura. Dessa forma, as microesferas não seriam causadoras de problemas como, por exemplo, a redução de diâmetro do poço e o aprisionamento da coluna de perfuração.

A microscopia eletrônica de varredura da espessura do reboco, composta pela filtração de dois fluidos com microesferas, foi essencial para a compreensão do efeito negativo das microesferas no volume de filtrado. As avaliações revelaram a presença de canais gerados por aglomerações das microesferas, os quais poderiam ser os facilitadores para o aumento da permeabilidade das tortas de filtração, favorecendo a transferência da fase contínua do fluido em direção à formação rochosa, aumentando o volume de filtrado. Assim, o tamanho relativo das partículas dos componentes é um critério relevante que deve ser considerado, de modo a não permitir a formação desses canais.

Cerca de 62% dos fluidos formulados sem as microesferas ocas apresentaram instabilidade após 24 horas de análise. A adição das microesferas ocas contribuiu para a instabilidade de algumas formulações como também forneceu estabilidade a outros, conforme apresentados pela Tabela 15. Sendo assim, a estabilidade não se torna um fator agravante no uso das microesferas como aditivo nos fluidos de perfuração base água visto ser possível a obtenção de fluidos estáveis.

Os experimentos reológicos revelaram um comportamento pseudoplástico para os fluidos de perfuração analisados. Os fluidos formulados não atenderam, simultaneamente, a todos os critérios reológicos característicos e exigidos para as suas utilizações em campos de perfuração de petróleo.

Dessa forma, verifica-se que maiores estudos com as microesferas ocas de vidro em fluidos de perfuração base água são necessários, tendo por base a composição do fluido 4, conforme apresentado na Tabela 17. Acredita-se que a utilização de $CaCO_3$ (b) em diferentes concentrações das fornecidas pelo planejamento experimental, poderia contribuir para melhores resultados de lubricidade e filtração na presença de goma xantana. Contudo, a goma xantana deve ser utilizada como viscosificante controladamente quando acompanhadas das microesferas, no intuito de atender

simultaneamente aos parâmetros de filtração e reológicos, considerados os principais nesse estudo.

6.1. Sugestões

A fim de dar continuidade a este trabalho de dissertação, seguem algumas sugestões para novos estudos:

- ✓ Analisar a compressibilidade da torta de filtração e permeabilidade a fim de verificar a influência das microesferas ocas de vidro no reboco formado;
- ✓ Utilizar o planejamento de misturas Simplex-Centroide, com pontos interiores, de modo a determinar a composição ótima dos fluidos, no intuito de minimizar os volumes de filtrado e atender ao estudo reológico simultaneamente;
- ✓ Considerar o uso de nanoesferas ocas de vidro para que o menor tamanho contribua para o bloqueio do filtrado. Entretanto, essas nanoesferas devem ter resistência a altas taxas de cisalhamento, como as aplicadas neste trabalho;
- ✓ Adicionar carboximetilcelulose (CMC) como nova opção de controlador de filtrado, conforme sugerido por Lucena (2014);
- ✓ Verificar os fenômenos de superfície entre os componentes por meio das interações caracterizadas pelo potencial zeta.

BIBLIOGRAFIA

ALDERMAN, N. J. *et al*. The rheological properties of water-based drilling fluids chemistry in the oil industry. Anais RSC, 1988.

AMORIM, L. V. Melhoria , proteção e recuperação da reologia de fluidos hidroargilosos para uso na perfuração de poços de petróleo, 2003.

AMORIM, L. V. *et al*. Estudo reológico de fluidos de perfuração à base de água: influência do teor de sólidos,velocidade e tempo de agitação. v. 1, p. 75–85, 2005.

AMORIM, L. V. *et al*. Evaluation of the behavior of biodegradable lubricants in the differential sticking coefficient of water based drilling fluids. Brazilian Journal of Petroleum and Gas, v. 5, n. 4, p. 197–207, 2011.

ARCO, M. J. *et al*. Field application of glass bubbles as a density-reducing agent. Society of Petroleum engineers, v. SPE 62899, p. 1–12, 2000.

BARBOSA, M. I. R. Bentonitas aditivadas com polímeros para aplicação em fluidos de perfuração. p. 98, 2006.

BARBOZA, A. C. R. N.; DE PAOLI, M. A. Polipropileno carregado com microesferas ocas de vidro (Glass Bubbles): obtenção de espuma sintática. Polímeros, v. 12, n. 2, p. 130–137, 2002.

BARROS, A. O. D. E. Estabelecimento de correlações estrutura propriedades de acetais para fluidos de perfuração, 2007.

BATISTA, A. P. DA S. Caracterização de argilas de bentonitas de Cubati-PB visando sua aplicação em fluidos de perfuração base água. Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

BURON, H. *et al*. Optical characterization of concentrated dispersions: applications to laboratory analyses and on-line process monitoring and control. Polymer International, v. 53, n. 9, p. 1205–1209, 2004.

CAENN, R.; CHILLINGAR, G. V. Drilling fluids: state of the art. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 14, n. 3-4, p. 221–230, 1996.

CHEN, G.; BURNETT, D. SPE 82276 Improving performance of low density drill in fluids with hollow glass spheres. Society of Petroleum engineers, v. SPE 82276, p. 1–10, 2003.

CHIPALAVELA, A. F. Análise e discussão das operações de perfuração e completação em poços petrolíferos Engenharia Geológica e de Minas, 2013.

DARLEY, H.C.H; GRAY, G.R. Composition and properties of drilling and completion fluid*s*. Gulf Publishing Company, Fifth Edition, 1988.

FARIAS, K. V. Influência de umectante aniônico. Universidade Federal de Campina Grande, 2005.

FARIAS, K. V. *et al*. Estudo da reologia e espessura do reboco de fluidos de perfuração: influência de dispersantes e umectante aniônicos. Cerâmica, v. 52, n. 324, p. 307–314, 2006.

FÉLIX, T. D. F. *et al*. Desenvolvimento de fluidos de perfuração à base de água com alta capacidade de inibição e alta lubricidade. 4º Pdpetro, 2007.

FILHO, F. J. V. DA C. Obtenção de microemulsão, utilizando nonilfenoletoxilado, empregada na preparação de um fluido de perfuração base óleo: avaliação das Propriedades Reológicas. UFRN, 2013.

FISK, J. V.; JAMISON, D. E. Physical properties of drilling fluids at high temperatures and pressures. SPE Drilling Engineering, v. 4, n. 4, p. 341–346, 1989.

FRIEDHEIM, J. E.; CONN, H. L. Second generation synthetic fluids in the North Sea: are they better society of petroleum engineers, v. IADC/SPE 3, p. 215–228, 1996.

KHALIL, M.; JAN, B. M.; RAMAN, A. A. A. Rheological and statistical evaluation of nontraditional lightweight completion fluid and its dependence on temperature. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 77, n. 1, p. 27–33, 2011.

LEITE, R. S.; NASCIMENTO, R. C. ALVES M.; AMORIM, L. V. Fluidos de perfuração envelhecidos: influência da ação de dispersantes no coeficiente de prisão diferencial.6º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Anais, 2011.

LUCENA, D. V. DE. Efeitos de aditivos poliméricos nas propriedades reológicas e de filtração de fluidos de perfuração. p. 66–73, 2014.

LYONS, W. C.; PLISGA, G. J. Standard Handbook of Petroleum and natural gas engineering. Second ed.Elsevier, 2005.

MACHADO, J. C. V. Reologia e Escoamento de Fluidos. Rio de Janeiro, Interciência, pg. 1-40, 2002.

MEDEIROS, R. C. A; AMORIM, L. V; SANTANA, L. N. L. Avaliação de aditivos lubrificantes em fluidos aquosos para perfuração de poços de petróleo. v. 3, p. 56–64, 2008.

MEDLEY, G. H.; GARKASI, A. Y.; MAURER, W. C. Use of hollow glass spheres for underbalanced drilling fluids. Society of Petroleum engineers, v. SPE 30500, p. 511–520, 1995.

MELO, K. C. DE. Avaliação e modelagem reológica de fluidos de perfuração base água, 2008.

MORAIS, C. S. P.; JERÔNIMO, C. E. M. Perspectivas da exploração de petróleo no Brasil. Scientia Plena, v. 9, n. 8, p. 1–14, 2013.

NASCIMENTO, R. C. A. M. *et al*. O fenômeno de prisão diferencial: uma revisão da literatura. v. 2, p. 76–87, 2010.

NASCIMENTO, R. C. A. M.; AMORIM, L. V; SANTANA, L. N. L. Desenvolvimento de fluidos aquosos com bentonita para perfuração de poços de petróleo onshore. Cerâmica, v. 56, n. 338, p. 179–187, 2010.

NEE, L. S. *et al*. Lightweight biopolymer drilling fluid for underbalanced drilling: an optimization study. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 129, p. 178–188, 2015.

O'DONNELL, P. B.; BOKSER, A. D. Stability of pharmaceutical products remington: the science and practice of pharmacy 21st Edition, 2009.

PETROBRAS. Plano de Negócios e Gestão prevê investimentos de US$ 130,3 bilhões para período de 2015 a 2019. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/confira-nosso-plano-de-negocios-e-gestao-2015-2019.htm> Acesso em: 04 ago. 2015

PINTO, M. C. F. CPRM – Serviço Geológico do Brasil Superintendência Regional de Belo Horizonte – SUREG-BH Laboratório de Sedimentometria e Qualidade das Águas - LSQA Manual Medição in loco : Temperatura , pH , Condutividade Elétrica e Oxigênio Dissolvido Versão maio 2007CPRM, , 2007.

ROSSI, L. F. S.; GUIMARÃES, I. B. Estudo dos constituintes dos fluidos de perfuração : proposta de uma formulação otimizada e ambientalmente correta. 4o PDPETRO, Campinas, SP, p. 1–8, 2007.

SAASEN, A; LØKLINGHOLM, G. The effect of drilling fluid rheological properties on hole cleaning. Proceedings of IADC/SPE Drilling Conference, p. 1–5, 2002.

SCHRAMM, G. A Practical approach to rheology and rheometry. Second ed.Karlsruhe, 1994.

SERRA, A. A influência de aditivos de lama de perfuração sobre as propriedades geoquímicas de óleos, 2003.

SERRA, C. S. R. Controlo de reacções de polimerização em miniemulsão através de técnicas de espectroscopia NIR e Raman, 2013.

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

SHIROMA, P. H. Estudo do comportamento reológico de suspensões aquosas de bentonita e CMC : influência da concentração do NaCl. USP, 2012.

SILVA, L. Utilização de microesferas ocas de vidro na aditivação de concreto. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2013.

SIQUEIRA, N. M. Desenvolvimento tecnológico e avaliação da penetração cutânea de benzofenona-3 a partir de nanocápsulas revestidas com quitosana. UFRGS, 2008.

SOUZA, M. R. DE. Avaliação do ciclo de vida dos constituintes dos Fluidos de perfuração de poços de petróleo. UFRJ, 2012.

THOMAS, J. E. *et al*. Fundamentos de Engenharia de Petroleo. 2ª edição ed.Rio de Janeiro: Interciência/Petrobras, 2001.

TROFIMOV, A.; PLESHKOV, L. Hollow glass microspheres for high strength composite cores. Reinforced Plastics, v. 50, n. 7, 2006.

3M. Fluídos leves de perfuração feitos com o 3M™ Glass Bubbles série HGS. Disponível em: <http://solutions.3m.com.br/wps/portal/3M/pt_BR/Oil-Gas_LA/3M-Oil-and-Gas/oil-and-gas-Solutions/upstream-oil-and-gas-exploration/upstream-oil-and-gas-drilling/upstream-drilling-fluids/> Acesso em: 17 mar.2015.