

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

**AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO E DA VELOCIDADE DO SOM EM
SOLUÇÕES E SUSPENSÕES UTILIZADAS EM
FLUIDOS DE PERFURAÇÃO**

DISSERTAÇÃO

LEANDRO LUTTERBACH DE MORAES E MELO

2015



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

**AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO E DA VELOCIDADE DO SOM EM
SOLUÇÕES E SUSPENSÕES UTILIZADAS EM
FLUIDOS DE PERFURAÇÃO**

LEANDRO LUTTERBACH DE MORAES E MELO

Sob a Orientação de
Cláudia Miriam Scheid

E Co-orientação de
Luís Américo Calçada

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

Seropédica, RJ
Janeiro de 2015

622.3381

M528a

T

Melo, Leandro Lutterbach de Moraes e, 1979-

Avaliação da atenuação e da velocidade do som em soluções e suspensões utilizadas em fluidos de perfuração / Leandro Lutterbach de Moraes e Melo. - 2015.

69 f.: il.

Orientador: Cláudia Miriam Scheid.

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

Bibliografia: f. 59-64.

1. Poços de petróleo - Perfuração – Teses. 2. Sólidos – Medição - Teses. 3. Medidas físicas – Teses. 4. Ultrassom – Teses. 5. Engenharia do petróleo – Teses. I. Scheid, Cláudia Miriam, 1968- II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

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

LEANDRO LUTTERBACH DE MORAES E MELO

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM __/__/____

Cláudia Miriam Scheid, D. Sc., DEQ/UFRRJ
(Orientador)

Rui de Goés Casqueira, D. Sc., DEQ/UFRRJ

Erika Dias Cabral, D. Sc., UEZO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde, pela oportunidade de me capacitar a cada dia e pela família que recebi como benção. Agradeço de todo coração aos meus pais pelos inúmeros incentivos à minha formação e ao apoio e dedicação a mim e às minhas filhas, sempre tolerando minha ausência em busca deste ideal.

Agradeço aos meus orientadores Cláudia Scheid e Luís Américo Calçada por compreenderem a minha jornada de trabalho e pelo incentivo a cada etapa deste curso. Aos colegas de laboratório: Fred (*in memoriam*), Deivídson, Sérgio, Eduardo, Euan, Olívio, João, Gabriela, Rafael e Andréia, pelos diversos momentos de estudo e pelas conversas no obrigatório café do seu Elias. Este último, mais que técnico, é um ótimo ouvinte e incentivador.

Apesar de acreditar que o mundo é muito pequeno e que podemos nos encontrar em breve, sentirei saudades do convívio diário.

“Sempre permaneça aventureiro.
Por nenhum momento se esqueça de que
a vida pertence aos que investigam.
Ela não pertence ao estático;
Ela pertence ao que flui.
Nunca se torne um reservatório,
sempre permaneça um rio”

Osho

RESUMO

MELO, Leandro Lutterbach de Moraes e. **Avaliação da atenuação e da velocidade do som em soluções e suspensões utilizadas em fluidos de perfuração. 2015, 81p.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2015.

A perfuração de poços de petróleo é uma etapa essencial para a produção de óleo. Neste processo, existe a necessidade de se medir a quantidade de sólidos nos fluidos para promover a execução da perfuração, garantindo a estabilidade do poço. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a atenuação e a velocidade do som em soluções e suspensões comumente utilizadas em fluidos de perfuração, visando no futuro correlacionar os dados encontrados com a concentração de sólidos totais presentes nestes fluidos. O equipamento ultrassônico utilizado em todos os testes para a avaliação da atenuação do som foi o Rhosonics, modelo 9670. Foram realizados ensaios de atenuação dinâmica em meio aquoso e oleoso para diversos sólidos dispersos no meio. Os sólidos testados são utilizados como adensantes de fluidos de perfuração entre eles barita, bentonita, calcita e cloreto e sódio. Foram testadas também soluções contendo viscosificantes de fluidos de perfuração como goma xantana e caboximetil celulose. Para a realização do estudo foi montada uma unidade experimental para os ensaios com fluidos a base de água e outra para fluidos a base de óleo. Os ensaios com fluidos aquosos adensados com barita, bentonita e calcita mostraram que a atenuação do som tem forte correlação com a presença de sólidos suspensos, entretanto verificou-se que a velocidade do som no meio é pouco afetada pela presença destes sólidos insolúveis. Para soluções formadas apenas com a presença de sólido solúvel (NaCl), verificou-se um aumento da atenuação som com o aumento da concentração do sal, visto que este sólido aumenta a densidade do fluido base e conseqüentemente a velocidade do som. Em fluidos aquosos contendo goma xantana ou carboximetilcelulose (CMC) verificou-se a alteração da reologia do fluido que passou a ter comportamento não-Newtoniano. Nestes casos também houve aumento da atenuação do som, sem alteração significativa da velocidade do som e da densidade da solução. Para suspensões oleosas verificou-se o mesmo tipo de comportamento das suspensões aquosas entretanto os níveis de atenuação do som foram muito superiores devido à elevada viscosidade do óleo.

Palavras chave: Equipamento ultrassônico, concentração de solidos, adensantes.

ABSTRACT

MELO, Leandro Lutterbach de Moraes e. **Evaluation of sound attenuation and velocity in solutions and suspensions used in drilling fluids. 2015, 81p.** Dissertation. (Master Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2015.

Oil Well drilling is an essential stage for an oil field production. In this process, there is the necessity of measuring solids concentration in fluids to promote the drilling process, and guarantee the well stability. The scope of the present work was to evaluate attenuation and sound velocity in solutions and suspensions commonly used in drilling fluids, seeking in the future to correlate the observed data with the total solids concentration present in these fluids. The ultrasonic equipment used in all tests for the evaluation of sound attenuation was Rhosonics, model 9670. Dynamic attenuation tests were performed in aqueous and oil medium to several solids dispersed in the medium. The tested solids were used as thickening agents, among them barite, bentonite, calcite and sodium chloride. It was also tested solutions containing fluid viscosifier, as xanthan gum and carboxymethyl cellulose. Para a realização do estudo foi montada uma unidade experimental para os ensaios com fluidos a base de água e outra para fluidos a base de óleo. To perform the necessary experiments, an experimental units for the tests with water based fluids was mounted and another one for the tests with oil based fluid. Experiments with water based fluids thickened with barite, bentonite and calcite showed that the sound attenuation has a strong correlation with the presence of suspended solids, however it was verified that the sound velocity in the medium is slightly affected by the presence of these insoluble solids. For solutions prepared just using soluble solids (NaCl), it was verified an increase in the sound attenuation with the increase of salt concentration, since this solid increases the fluid density and consequently the sound velocity. In water based fluids containing xanthan gum or carboxymethyl cellulose (CMC) it was verified the change in rheological behavior, which became non-Newtonian. Also, in these cases there was increase in sound attenuation, without significant changing the sound velocity and the solution density. For oil based suspensions it was verified the same type of behaviour as the water based suspensions however the sound attenuation levels were very superior due to high oil viscosity.

Keywords: Ultrasonic equipment, solids concentration, weighting materials.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidades dos sólidos	34
Tabela 2 – Distribuição das partículas por sólidos	36
Tabela 3 – Valores calculados de viscosidade dinâmica para óleo isento de sólidos.....	37
Tabela 4 - Valores calculados de viscosidade dinâmica μ (Pa.s) em 25°C.....	39
Tabela 5 – Valores médios de atenuação e velocidade do som medidos para diferentes fluidos.	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Coluna de perfuração (Adaptado de www.seadril.com).	1
Figura 2 – Camadas geológicas e Pré-Sal. Fonte: http://wikigeo.pbworks.com	4
Figura 3 - Exploração sísmica em mar. Fonte: http://tnpetroleo.com.br/	5
Figura 4 - Plataforma <i>off-shore</i> . Fonte: http://tnpetroleo.com.br/	6
Figura 5 - Estrutura primária da goma xantana. Fonte: Vendruscolo (2005).	11
Figura 6 - Estrutura química do carboximetilcelulose Fonte: Pereira (2005).	12
Figura 7 - Modelos reológicos independentes do tempo. Fonte: Machado (2002).....	13
Figura 8 - Equipamento de <i>mud testing</i> . Fonte: Manual do equipamento	15
Figura 9 - Propagação de ondas: (a) transversais e (b) longitudinais. (Fonte: Sad, 2013).....	18
Figura 10 – Rhosonics. Fonte: Arquivo pessoal	25
Figura 11 - Fluxograma da unidade de ensaio de atenuação dinâmico em água.	26
Figura 12 - Unidade experimental de ensaio de atenuação dinâmico. Fonte: Arquivo pessoal.....	27
Figura 13 - Fluxograma da unidade de ensaio de atenuação dinâmico em óleo. Fonte: Arquivo pessoal.....	28
Figura 14 - Reômetro Fann modelo 35A. Fonte: Catálogo do equipamento.	29
Figura 15 – Balança de lama Fann. Fonte: Catálogo do equipamento.	30
Figura 16 – Analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000. Fonte: Catálogo do equipamento.	30
Figura 17 – Separação de sólidos para adição. Fonte: Arquivo pessoal	31
Figura 18 – Vista interna do tanque com tubo de retorno. Fonte: Arquivo pessoal.	32
Figura 19 – Vista interna do tanque com óleo. Fonte: Arquivo pessoal.	33
Figura 20 - Distribuição granulométrica da: (a) barita, (b) bentonita e (c) calcita.	35
Figura 21 – Tensão de cisalhamento versus taxa de deformação para temperaturas de 25, 30, 35 e 40°C.....	36
Figura 22 - Ensaio reológico de óleo puro e suspensões de bentonita, barita e calcita.	38
Figura 23 - Ensaio reológico de água com goma xantana e CMC.	40
Figura 24 - Ensaio reológico de GX e suspensões com concentrações de barita de 20 a 400 g/L.	41
Figura 25 - Ensaio reológico de CMC e suspensões com concentrações de barita de 20 a 400 g/L.	41
Figura 26 – Valores obtidos de atenuação do som para calcita dispersa em água.	43
Figura 27 – Valores obtidos de atenuação do som para barita dispersa em água.	44
Figura 28 – Valores obtidos de atenuação para bentonita dispersa em água.	45
Figura 29 – Valores de atenuação de cada sólido por concentração.....	46
Figura 30 - Ensaio de atenuação para barita, bentonita e calcita em água.....	47
Figura 31 - Ensaio de atenuação para cloreto de sódio em água.	48
Figura 32 - Ensaio de atenuação para barita, bentonita e calcita em óleo mineral.	50
Figura 33 – Atenuação de barita em água e em óleo.	51

Figura 34- Ensaio de atenuação para goma xantana em água	52
Figura 35 - Ensaio de atenuação para CMC em água.....	53
Figura 36– Atenuação do som frente adições de barita, bentonita e calcita em goma xantana.	54
Figura 37– Atenuação do som frente adições de barita, bentonita e calcita em CMC.	55
Figura 38– Unidade experimental para ensaios de atenuação estática.	64
Figura 39 – Teste de sedimentação de WBM barita 50g/L	66
Figura 40- Teste de sedimentação de OBM barita 50g/L.....	67
Figura 41- Pesagem das amostras.....	67
Figura 42- preparação dos fluidos base água e base óleo.	68

LISTA DE ABREVIÇÕES E SÍMBOLOS

α	Atenuação
φ	Velocidade de rotação
θ	Deflexões
ρ	Densidade
A(x)	intensidade sonora na posição “x”
A ₀	intensidade sonora inicial.
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
c ₀	Coeficiente de sensibilidade
CMC	Carboximetilcelulose
C _p	calor específico
D	diâmetro
EIT	<i>Electrical Impedance Tomography</i>
f	frequência
GX	Goma Xantana
I	intensidade de onda
k	índice de consistência
K	condutividade térmica do meio
LE	Limite de Escoamento
LEF	Laboratório de Escoamento de Fluidos
MRI	<i>Magnetic Resonance Imaging</i>
n	índice de comportamento
P	pressão manométrica
P _a	pressão acústica
P _h	pressão hidrostática
UFRRJ	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
UPDV	<i>Ultrasonic Pulsed Doppler Velocimetry</i>
V	velocidade do som no meio
VP	viscosidade plástica
W	watts
X	distância em relação a x ₀ .
x ₀	posição inicial.
γ	tensor taxa de deformação
η_b	viscosidade aparente;
η_s	força de cisalhamento;
λ	comprimento de onda
μ	viscosidade
μ_∞	viscosidade plástica
σ	coeficiente de atenuação.
τ	tensor tensão cisalhante
τ_0	tensão limite de escoamento
v	velocidade de propagação

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Petróleo.....	3
2.2. Perfuração.....	4
2.3. Fluidos de Perfuração.....	6
2.4. Adensantes Sólidos Utilizados em Fluidos de Perfuração.....	8
2.4.1. Barita.....	8
2.4.2. Calcita	9
2.4.3. Bentonita.....	9
2.4.4. Cloreto de sódio.....	10
2.4.5. Goma Xantana.....	10
2.4.6. Carboximetilcelulose (CMC).....	11
2.5. Tipos de Fluidos.....	12
2.6. Controle de Sólidos no Fluido de Perfuração	14
2.7. Medições por Ultrassom	16
2.7.1. Atenuação em líquidos.....	20
2.7.2. Atenuação em suspensões.....	21
3. Material e métodos	24
3.1. Equipamento Ultrassônico	24
3.2. Unidade Experimental para Ensaio Dinâmico em Fluidos Aquosos	25
3.3. Unidade Experimental para Ensaio Dinâmico com Fluido Oleoso	27
3.4. Caracterização do Óleo	28
3.5. Reologia	29
3.6. Balança de Lama	30
3.7. Granulometria dos Sólidos.....	30
3.8. Pesagem e Separação dos Sólidos.....	31
3.9. Ensaio Dinâmico de Atenuação	31
3.9.1. Ensaio dinâmico de atenuação em óleo	32
4. Resultados e discussão	34
4.1. Densidade dos Sólidos	34
4.2. Granulometria dos Sólidos.....	34
4.3. Reometria	36
4.3.1. Óleo puro	36
4.3.2. Suspensões em óleo	37
4.3.3. Soluções de GX e CMC.....	39

4.3.4. Suspensões de GX e CMC.....	40
4.4. Ensaio de Atenuação Dinâmicos	42
4.4.1. Ensaio em fluidos base água	42
4.4.2. Ensaio com sólidos solúveis.....	47
4.4.3. Ensaio em fluidos base óleo	48
4.4.4. Comparativo de atenuações em fluidos base água e base óleo	50
4.4.5. Fluidos Não Newtonianos.....	51
4.4.6. Suspensões de GX e CMC.....	53
5. CONCLUSÕES	56
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXOS	64
Ensaio estático.....	64
Unidade experimental para ensaios estáticos.....	64
Atenuação de fluidos.....	65
Ensaio estático de atenuação.....	65
Testes de sedimentação de barita em água e em óleo	66
Preparação das amostras.....	68

1. INTRODUÇÃO

A perfuração de um poço de petróleo requer uma atenção especial da indústria petrolífera, devido a sua alta complexidade e custo. Além disso, um poço com erro de perfuração pode produzir precocemente água ou gás levando a novo estudo e novo planejamento de viabilidade operacional e em alguns casos ao abandono, tamponamento do poço e a nova perfuração. Portanto, a perfuração de um poço deve considerar diversos fatores, entre eles os tipos de rochas que serão perfuradas, profundidade da reserva, pressão do reservatório e qual o tipo de fluido de perfuração será empregado.

Atualmente o método de perfuração rotativo é praticamente o único a ser utilizado no mundo e este método só é possível devido à utilização de fluidos que têm diversas funções importantes. Entre elas, a manutenção da pressão do reservatório (evitando a prisão da coluna de perfuração por desmoronamentos da parede do poço e *kicks*), o resfriamento da broca (garantindo assim a vida útil deste equipamento) e a remoção de cascalhos (fragmentação da rocha perfurada). A **Figura 1** ilustra a coluna de perfuração e broca, além do processo de circulação de fluido de perfuração e perfuração da rocha.

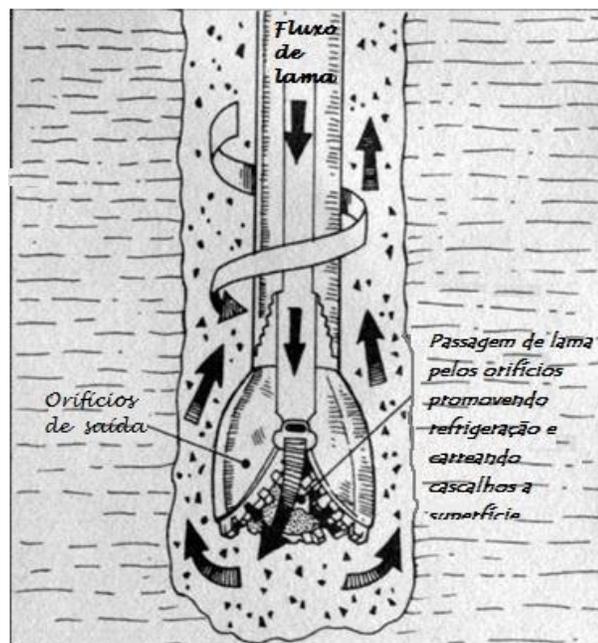


Figura 1– Coluna de perfuração (Adaptado de www.seadril.com).

Uma das variáveis que deve ser medida é a quantidade de sólidos nos fluidos para promover a execução da perfuração, garantindo a estabilidade de paredes do poço, a manutenção da pressão de reservatório, a segurança da operação evitando influxos e promovendo a efetiva remoção de cascalhos e refrigeração da broca.

Dentro deste contexto, estudou-se o comportamento da atenuação e da velocidade do som em soluções e suspensões comumente utilizadas em fluidos de perfuração. Espera-se no futuro estabelecer uma correlação entre essas variáveis e a contração de sólidos em suspensão.

O equipamento ultrassônico utilizado nos teste foi um Rhosonics, modelo 9670, que proporciona medidas em tempo real. Este equipamento já é utilizando para determinação da concentração de sólidos em polpas de minério. Para a confecção das soluções e suspensões estudadas foram utilizados sólidos adensantes e substâncias viscosificantes comuns no preparo de fluidos de perfuração.

O medidor ultrassônico torna-se uma ferramenta muito promissora devido às suas características de fácil instalação, fácil manutenção e relativo baixo custo de reposição.

O presente trabalho foi dividido em cinco capítulos. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica a respeito do processo de perfuração, dos fluidos de perfuração utilizados e suas características físico-químicas e reológicas, e o princípio do uso do ultrassom como ferramenta de medição de concentração de sólidos.

O capítulo 3 detalha a unidade experimental *online* para fluidos base água, uma unidade dinâmica que foi montada para fluidos base óleo e a metodologia utilizada para caracterização dos fluidos, assim como os métodos utilizados para avaliação da atenuação em escoamento de fluidos.

Os resultados e a discussão são expostos no capítulo 4, utilizando como ferramentas gráficos e tabelas a fim de embasar as observações. Conclusões foram reunidas no capítulo 5 e sugestões para trabalhos futuros no capítulo 6. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas e os gráficos e tabelas produzidos ao longo do trabalho nos anexos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Petróleo

O petróleo bruto é uma mistura de hidrocarbonetos e derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados e/ou oxigenados, existente no subsolo em estado líquido ou gasoso. No entanto, sua composição varia amplamente entre diferentes reservatórios para cada região. O gás natural é uma fração de petróleo com composição de cadeias menores de carbono, apresentando-se na forma gasosa. Por outro lado, o óleo cru varia desde um óleo leve e pouco viscoso até um óleo pesado e de alta viscosidade (VILLELA, 2004).

De acordo com Neto & Gurgel (2014), historicamente, o uso comercial do petróleo data do século XVIII, na indústria farmacêutica e na iluminação. No entanto, foi somente na metade do século XIX, que começou-se a cogitar a perfuração de poços petrolíferos.

Ainda segundo o mesmo autor, os primeiros poços foram perfurados nos Estados Unidos, por Edwin L. Drake, que devido à tecnologia da época enfrentou diversas dificuldades técnicas. Após meses de perfuração, Drake encontrou petróleo em 27 de agosto de 1859.

No Brasil, os primeiros poços datam da década de 30, quando foram realizadas as primeiras tentativas de perfuração de poços, principalmente no município de Lobato (BA).

Com o crescimento da exploração de petróleo no Brasil e a criação de novos poços em diversos estados, foi criada a empresa Petróleo Brasileiro S.A (PETROBRAS) pelo presidente Getúlio Vargas, causando o alavancamento da prospecção de petróleo no Brasil.

Da origem geológica do petróleo à etapa de prospecção do mesmo, existem diversos fatores que devem coincidir para o acúmulo satisfatório do óleo a fim de que a perfuração de uma rocha seja economicamente viável.

Inicialmente, é necessária a deposição de matéria orgânica acumulada em rochas sedimentares denominadas de rochas geradoras. Sob condições adequadas de temperatura e pressão, tais formações geológicas geram o petróleo em sub-superfície. Quanto à composição da rocha, são formadas de material detrítico de granulometria muito fina (fração argila), tais como folhelhos, margas ou calcilitos, os quais representam antigos ambientes sedimentares com existência de vida microscópica. Existem ainda fatores importantes para não degradação do óleo

ainda na rocha geradora. É necessário que o ambiente de formação seja redutor, isto é, isento de oxigênio e atóxico, para manutenção da vida microscópica (ABREU, 2007).

Ainda de acordo com Abreu (2007), após a geração, o óleo entra em movimento, dirigindo-se às regiões de pressão mais baixas que a dos arredores, normalmente posicionadas em situações estruturalmente mais elevadas que as vizinhanças. Tal escoamento cessa quando o fluido migratório encontra uma região com conjunto de rochas que não permite a infiltração do óleo, estas regiões selantes são denominadas trapas ou armadilhas. A **Figura 2** ilustra camadas geológicas e profundidades comumente encontradas em reservatórios do pré-sal.

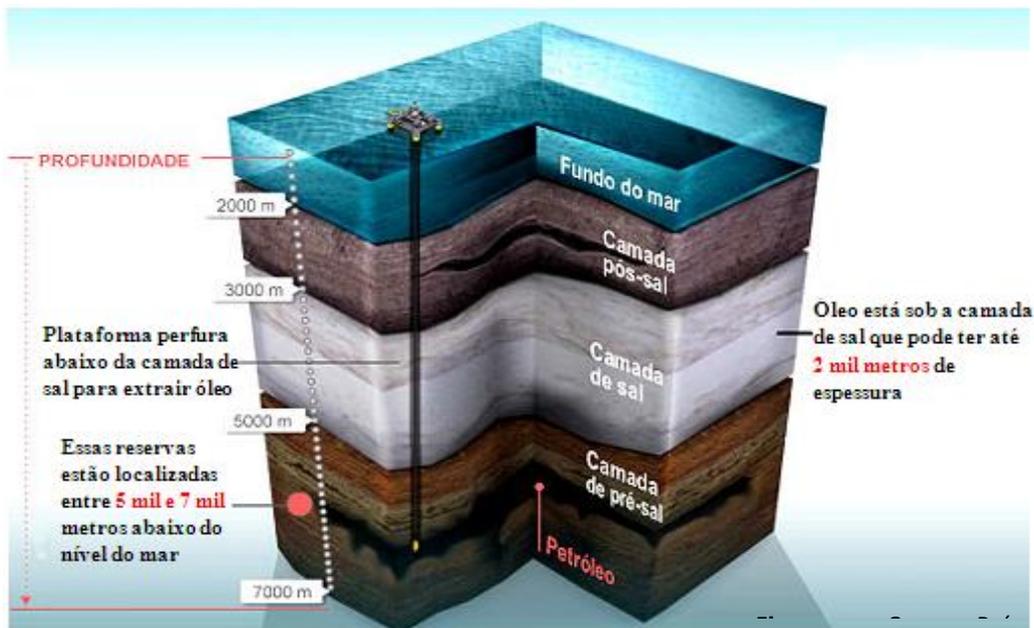


Figura 2– Camadas geológicas e Pré-Sal. Fonte: <http://wikigeo.pbworks.com>.

2.2. Perfuração

A fim de se encontrar regiões de acúmulo de petróleo que sejam economicamente viáveis de se perfurar, é inicialmente feita a etapa de exploração, que consiste em realizar o mapeamento geológico de uma área, com o objetivo de identificar novas reservas petrolíferas. Para este fim, os métodos comumente empregados são: o sísmico, o magnético, o gravimétrico e o aerofotométrico. Este último apenas para reservatórios *onshore* (terrestres). A **Figura 3** ilustra a exploração sísmica em alto mar, utilizando navios que possuem canhões de ar comprimido e hidrofones para captação dos sinais emitidos.

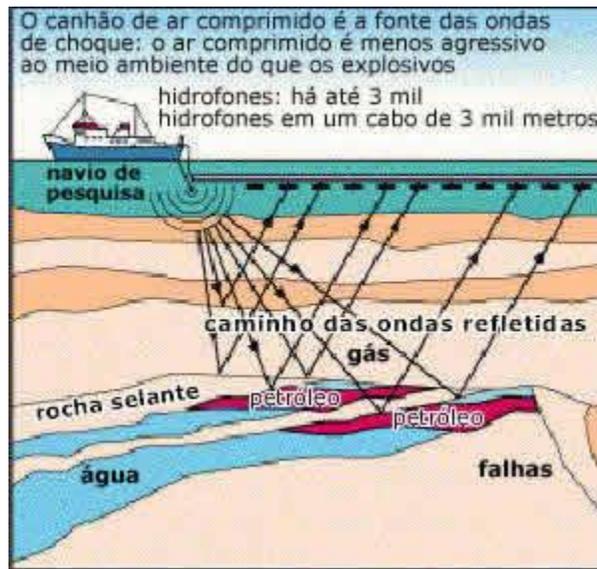


Figura 3- Exploração sísmica em mar. Fonte: <http://tnpetroleo.com.br>

Tendo sido encontrado uma região de acúmulo favorável, inicia-se a etapa de perfuração da rocha. Segundo Thomas (2001), a unidade responsável pela perfuração é chamada de sonda, sendo caracterizada pela locação em que atua como terrestre ou marítima. Para cada tipo, existem legislações pertinentes que envolvem a segurança operacional e preservação ambiental. A Agência Nacional do Petróleo (ANP) é a regulamentadora da atividade de exploração e produção, seja *onshore* (em terra) ou *offshore* (marítima). A **Figura 4** ilustra uma plataforma de prospecção *off-shore*.



Figura 4- Plataforma *off-shore*. Fonte: <http://tnpetroleo.com.br>

Segundo o mesmo autor, no método de perfuração rotativo, uma broca é responsável pela perfuração das rochas através da aplicação de rotação e pelo peso da coluna de perfuração. Tal coluna é composta por comandos e tubos. Os cascalhos gerados pelo processo de perfuração devem ser continuamente removidos pelo *drilling mud* (fluido de perfuração). Tal fluido é bombeado por dentro da coluna de perfuração, saindo em jatos por orifícios na broca e retornando à superfície pelo espaço anular existente entre o tubo e a formação. Após determinadas profundidades, a broca é içada, uma coluna de revestimento é descida e cimentada, sendo a broca substituída por uma de menor diâmetro e uma nova seção de tubo é conectada, a fim de continuamente se aumentar o comprimento do poço, até que se atinja a rocha reservatório.

A previsão de parâmetros mecânicos e hidráulicos de perfuração, tais como torque e peso sobre broca, rotação, vazão de perfuração e pressão de injeção, visam um bom desempenho na operação de perfuração.

Nos dias atuais, durante a perfuração, muitos parâmetros são monitorados de forma contínua nas unidades. Estes dados são essenciais para a detecção de possíveis anormalidades no poço e para garantir a segurança operacional.

2.3. Fluidos de Perfuração

Os fluidos de perfuração são definidos geralmente como composições frequentemente líquidas, destinadas a auxiliar o processo de perfuração dos poços de petróleo (Amorim, 2003).

Cuidadosamente formulados, são preparados com intuito de se obter uma suspensão

bastante estável com determinada viscosidade aparente, pois esse parâmetro é extremamente importante para que o fluido desempenhe de maneira eficiente suas funções, principalmente a de carrear cascalhos gerados no poço durante a perfuração, mantendo uma concentração no poço de cascalhos não muito elevada.

De acordo com Thomas (2001), é desejável que o fluido de perfuração tenha as seguintes características: ser quimicamente estável, estabilizar as paredes do poço tanto mecânica quanto quimicamente, facilitar a separação dos cascalhos na superfície, manter os sólidos em suspensão quando estiver em repouso, apresentar baixo grau de corrosão e abrasão.

A classificação dos tipos de fluido de perfuração é, na maioria dos casos, realizada de acordo com a fase dispersante. Com base neste critério, os fluidos podem ser divididos em fluidos de base aquosa, não aquosa ou gás, podendo este ser ar ou gás natural. Quanto aos fluidos de base não aquosa, podem ainda ser subdivididos de acordo com sua origem e conteúdo de hidrocarbonetos poliaromáticos (THOMAS, 2001).

De acordo com Silva (2003), as medições de características dos fluidos de perfuração mais comuns são as de massa específica (medida em balança densimétrica em pressão ambiente), força gel (medida em viscosímetros rotativos) e salinidade dos dissolvidos no fluido de perfuração (medida através de titulação). Uma variação na salinidade pode indicar indiretamente *kicks* de água doce ou salgada. Alguns parâmetros reológicos também são medidos como a viscosidade plástica (VP), que é dependente da concentração de sólidos no fluido de perfuração (expressa em centipoise) e o limite de escoamento (LE), que é resultado da interação eletroquímica entre os sólidos do fluido. Esses parâmetros são responsáveis pela perda de carga por fricção. Assim, os sólidos desempenham um papel importante na pressão de bombeio e na pressão em um determinado ponto do poço durante a circulação.

De acordo com Thomas (2001), o teor de sólidos no fluido de perfuração deve ser mantido no mínimo possível, pois o seu aumento implica na perturbação de várias outras propriedades (densidade, viscosidade e forças géis), além de aumentar a probabilidade de ocorrência de problemas como desgaste dos equipamentos de circulação, fratura das formações devido à elevação das pressões e redução da taxa de penetração ou ainda prisão da coluna.

Schaffel (2002) ressalta que a formulação dos fluidos de perfuração leva em conta alterar as diversas propriedades físico-químicas dos fluidos, de modo a torná-las mais convenientes para cada ponto ou local de operação.

A fim de adensar o fluido, para controle da pressão hidrostática do poço, são utilizados a barita (BaSO_4), carbonato de cálcio (CaCO_3) e hematita (Fe_2O_3). Como agente viscosificante, é mais comumente utilizada a bentonita, devido este sólido ter característica de inchamento em contato com água. Tal aditivo é utilizado por ser capaz de reduzir o atrito fluido/coluna de perfuração, conseqüentemente diminuindo a perda de carga, e elevar a capacidade do fluido de manter sólidos em suspensão. A fim de aumentar consideravelmente a viscosidade dos fluidos utiliza-se carboximetilcelulose (CMC) e goma xantana (GX), estes viscosificantes são solúveis em água e alteram a reologia do fluido, tornando os Não-Newtonianos.

Há ainda uma diversidade de aditivos comumente utilizados para modificar diferentes propriedades, tais como salinidade, pH, biocidas, entre outros (SCHAFFEL, 2002).

2.4. Adensantes Sólidos Utilizados em Fluidos de Perfuração

Alguns minerais são largamente utilizados na indústria do petróleo, com destaque para seis funções principais: modificador de densidade, promotor de viscosidade, agente anti-espessante, material contra perda de circulação; estabilizadores e lubrificantes. Entre os materiais mais utilizados com tais finalidades podem ser citados a bentonita, barita, atapulgita, sepiolita, vermiculita, magnetita porosa, carbonato de cálcio (calcita), mica, perlita expandida, lignina, mica, grafita, cloreto de sódio, gipsita e gilsonita (CASTELLI, 1994). Neste trabalho, utilizou-se para os adensamentos barita, calcita, bentonita e cloreto de sódio.

2.4.1. Barita

A barita ou sulfato de bário (BaSO_4) é o insumo básico para adensamento de fluidos de perfuração para a indústria petrolífera. Devido ao fato de apresentar elevada densidade ($4,5 \text{ g/cm}^3$), contribui para adensamento da lama de perfuração, ajudando na estabilização do poço. As características da lama de perfuração e da quantidade de barita contida em um fluido de perfuração variam em função do gradiente de pressão dos poços, da profundidade relativa e do tempo de perfuração, todos esses parâmetros visam evitar *kicks* e descontroles de pressão durante a perfuração do poço. De acordo com Silva (2010), a barita possui vantagem para uso na perfuração de poços, quanto ao fato de ser inerte.

As especificações de barita usada em lama de perfuração de óleo e gás são normatizadas internacionalmente pela API (American Petroleum Institute) e OCMA (*Oil Companies Material Association*), e nacionalmente são determinadas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e PETROBRAS (VÉRAS, 2001).

2.4.2. Calcita

A calcita, conhecida popularmente como calcário ou carbonato de cálcio, é adicionada aos fluidos de perfuração durante a etapa de perfuração de poços de petróleo. De acordo com Bessler & Rodrigues (2008), a calcita é uma das modificações minerais do carbonato de cálcio (CaCO_3), sendo a mais comuns entre as 3 modificações minerais existentes. A calcita é o mineral constituinte principal de vastas formações de rochas sedimentares de calcita. Apresenta ainda características atrativas à indústria do petróleo, como ser termodinamicamente estável em qualquer temperatura. A obtenção do particulado de calcita é realizado através do processo de moagem. A escolha deste mineral deve ser criteriosa, pois de acordo com Luz & Lins (2005), diferentes processos de moagem produzem diferentes morfologias e tamanhos de partículas.

Este aditivo é caracterizado como agente obturante (MOREIRA, 2012), pois auxilia na formação de uma camada fina e de baixa permeabilidade denominada reboco. A formação do reboco ocorre na superfície das paredes do poço, auxiliando na redução do influxo de fluido de perfuração para o interior do reservatório (THOMAS, 2001).

2.4.3. Bentonita

O nome bentonita deriva de uma alusão a um depósito de argila na região de *Fort Benton*, Wyoming (EUA). Para perfuração de poços de gás e petróleo, é desejável o uso de uma bentonita sódica de alta qualidade e que não se altere quimicamente. (LUZ & OLIVEIRA, 2005).

O uso de bentonita nos fluidos de perfuração está relacionado à ação lubrificante, sobre a broca e as tubulações, e à formação de uma camada de baixa permeabilidade nas paredes do poço. A bentonita pode ser usada como agente controlador de viscosidade de um fluido de perfuração, de modo a permitir uma maior eficiência no transporte de fragmentos de rochas para a superfície.

A bentonita possui partículas finas (pós moagem), alta capacidade de troca catiônica,

elevada área superficial e inchamento quando em presença de água. De acordo com Balthar & Luz (2003), para fluidos de perfuração à base de água doce, as bentonitas sódica e cálcica ativada são os principais minerais utilizados para conferir viscosidade, porém o mesmo não acontece em lamas com base água salgada, pois a bentonita perde as suas propriedades tixotrópicas. Como alternativas à bentonita são utilizados produtos tais como: amido, carboximetilcelulose (CMC), tanino e lignosulfonato. No entanto, a bentonita ainda apresenta certa vantagem quanto à capacidade de lubrificação da broca.

Quanto às propriedades tixotrópicas, estas são de grande importância, pois a característica de inchamento da bentonita permite que a suspensão assumira uma estrutura gelatinosa quando em repouso, impedindo o retorno dos fragmentos de rochas ao fundo do poço em casos como a paralisação do bombeamento para a troca de broca de perfuração ou na colocação de novas colunas de perfuração (BARBOSA *et al.*, 2007).

2.4.4. Cloreto de sódio

De acordo com Borges (2011), a composição de sais no planeta é de aproximadamente 36,5 g/L, ou 3,65% em peso. Destes, cerca de 97% corresponde ao cloreto de sódio. Sendo assim, o mineral com maior predominância na formação das rochas é a halita. Ainda segundo o autor, a halita possui densidade baixa a moderada, baixa viscosidade e alta condutividade térmica e alta velocidade de penetração de ondas sísmicas.

Segundo Guimarães & Rossi (2007), sais em geral são comumente utilizados em fluidos de perfuração por atuarem como inibidores de formações ativas, pois reduzem a infiltração do fluido de perfuração devido à sua viscosidade, e estimulam o escoamento de água proveniente da formação argilosa para o fluido de perfuração.

2.4.5. Goma Xantana

A Goma xantana é um polissacarídeo extracelular secretado pelo microorganismo *Xanthomonas campestris*. É solúvel em água a baixa temperatura e em solução exibe elevada pseudoplasticidade. Por apresentar elevada viscosidade, possui estabilidade em uma ampla faixa de pH e temperatura, além de apresentar resistência a degradação enzimática (SWORN, 2009) .

Na indústria do petróleo, a goma xantana tem sido aplicada como viscosificante para fluidos de perfuração, para completação ou ainda em técnicas para recuperação de óleo, devido

às suas características reológicas (ALMEIDA & SILVA, 2010).

A **Figura 5** ilustra a estrutura primária da goma xantana. A cadeia principal é estruturalmente igual à celulose, classificada como regular por possuir uma molécula de glicose para cada duas ramificações. O alto grau de acetilação e o baixo grau de piruvatação aumentam a viscosidade, evento atribuído as agregações intermoleculares. O tempo de fermentação pode ser considerado um fator influenciador para o aumento ou diminuição destes radicais, bem como o conteúdo de glicose e a interação entre estes monômeros influenciam diretamente na viscosidade (ALMEIDA, 2010).

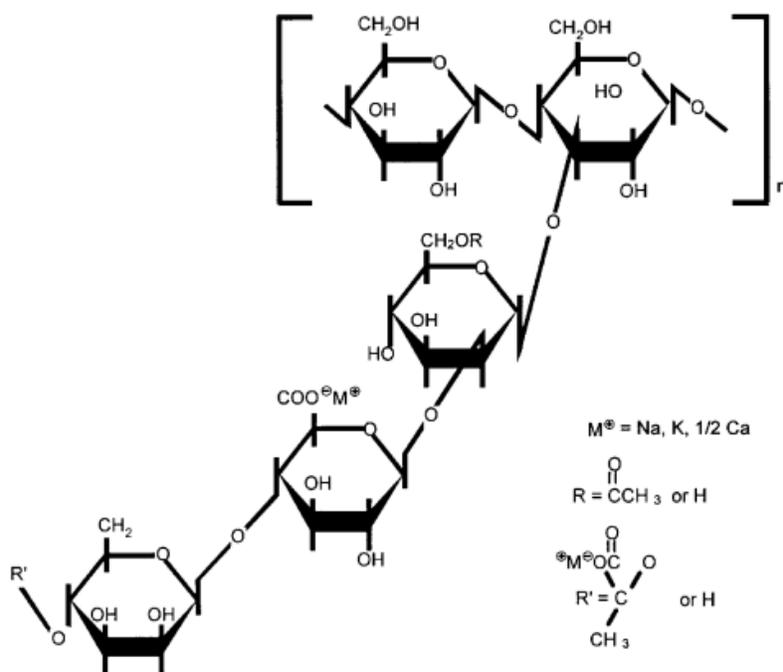


Figura 5- Estrutura primária da goma xantana. Fonte: Vendruscolo (2005).

2.4.6. Carboximetilcelulose (CMC)

A Carboximetilcelulose, normalmente encontrada na forma sódica, como carboximetilcelulose de sódio, é um polímero aniônico derivado da celulose, de baixo custo, que possui cadeia linear e é solúvel em água (NASCIMENTO *et al.*, 2013).

Na indústria do petróleo, o CMC reduz as perdas por filtração e produz rebocos muito finos capazes de impedir o escoamento do fluido para as formações geológicas que estão sendo perfuradas. Os fluidos preparados com CMC apresentaram comportamento Não-Newtoniano, na qual a relação de tensão cisalhante por taxa de cisalhamento não é constante.

A CMC é preparada em duas etapas, a partir da reação entre a celulose e a soda cáustica formando o álcali de celulose, que em seguida reage com o ácido monocloroacético (eterificação), sob condições controladas. A **Figura 5** ilustra a estrutura da CMC. O polímero formado na eterificação é mais flexível, com forças intermoleculares mais fracas e cadeias menos regulares, apresentando propriedades que diferem significativamente da celulose de partida (MACHADO, 2002).

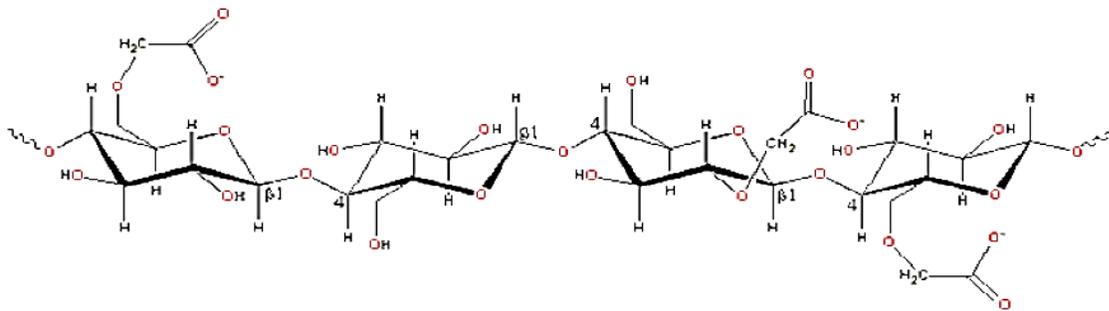


Figura 6- Estrutura química do carboximetilcelulose Fonte: Pereira (2005).

2.5. Tipos de Fluidos

Líquidos ou gases são classificados como fluidos incompressíveis, quando o volume do fluido mantém-se constante, tendo por consequência, massa específica constante. Já os compressíveis são aqueles em que há variação do volume com a variação da pressão.

Quanto ao comportamento reológico, os fluidos podem ser classificados em Newtonianos e Não-Newtonianos.

De acordo com Bird *et al.* (2004), o comportamento Newtoniano de um fluido é descrito por uma relação linear entre o tensor tensão cisalhante (τ) e o tensor taxa de deformação ($\dot{\gamma}$). Tal relação pode ser dada pela Equação 1.

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Observa-se que a proporcionalidade entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação é mantida através de uma constante, chamada viscosidade dinâmica (μ). Para fluidos Newtonianos,

a viscosidade é constante, uma vez que a relação entre a tensão e a taxa de deformação é linear. No entanto, a viscosidade é uma variável dependente da temperatura e pressão. Para líquidos, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura. Já para gases, a viscosidade aumenta com o aumento da temperatura.

De acordo com Ângulo (2012), os fluidos Newtonianos são considerados fluidos inelásticos, que não são capazes de acumular energia interna por deformação de suas moléculas para devolvê-la ao escoamento posteriormente, devido a alguma mudança de características.

Há, no entanto, fluidos que não se comportam como Newtonianos. Para estes, a relação entre a tensão e a taxa de deformação não é linear. Neste caso, os fluidos são chamados de Não-Newtonianos.

De acordo com Bird *et al.* (2004), para os fluidos em que há diminuição da viscosidade aparente ao aumentar a taxa de deformação e da tensão de cisalhamento, são chamados pseudoplásticos. Já os fluidos dilatantes são aqueles em que há aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação. Tais fluidos são ainda classificados como independentes do tempo, uma vez que mantêm a viscosidade permanece inalterada independente do tempo de cisalhamento aplicado.

A **Figura 7** ilustra alguns comportamentos reológicos, tanto newtonianos como não-newtonianos (Herschel-Bulkley, Plástico de Bingham, Pseudoplástico e Dilatante).

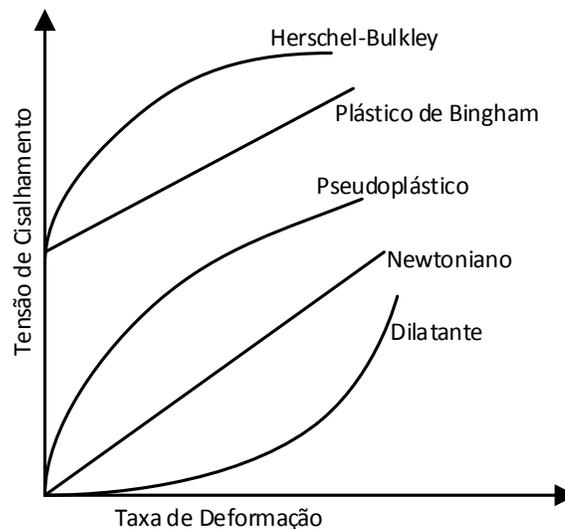


Figura 7 - Modelos reológicos independentes do tempo. Fonte: Machado (2002)

Os fluidos Não-Newtonianos podem ser descritos por diversos modelos reológicos. O modelo de potência, ou *power law* estabelece uma relação de potência entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação, conforme pode ser visto na Equação 2.

$$\tau = k\gamma^n \quad (2)$$

onde:

τ = tensão cisalhante;

k = índice de consistência;

γ = taxa de deformação;

n = índice de comportamento;

Já o modelo de Bingham (Equação 3) descreve comportamento linear entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação, porém há necessidade de uma tensão mínima para que o fluido escoe. Trata-se da viscosidade plástica (μ_∞) e o limite de escoamento (τ_0).

$$\tau = \tau_0 + \mu_\infty\gamma \quad (3)$$

O modelo de Heschel Buckley integra tanto características do modelo de Bingham quanto do modelo da potência, conforme Equação 4.

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (4)$$

2.6. Controle de Sólidos no Fluido de Perfuração

Através dos equipamentos de tratamento de resíduos (peneiras, dessiltadores e hidrociclones) é realizado o controle dos sólidos no fluido de perfuração, sempre com objetivo de manter o teor de sólidos dentro de uma faixa de operação. A não correção do teor de sólidos pode ocasionar a redução da taxa de penetração, adensamento ou diluição do fluido de perfuração, formação de reboco de baixa qualidade, maior densidade equivalente de circulação,

danos a formação, prisão da coluna, desgaste de equipamentos, grande volume de resíduos gerados e maior custo global (MELO, 2009).

Entre os testes para determinação do conteúdo de sólidos em fluido de perfuração, há o *mud testing*, também chamado de teste de retorta. O teste consiste em destilar um volume conhecido de lama em uma câmara de aquecimento, sendo o condensado recolhido numa proveta graduada. Apenas os líquidos são destilados, todos os sólidos da lama e sal são deixados na câmara da retorta. O equipamento para tal teste é ilustrado na **Figura 8**. No entanto, tal teste possui a desvantagem de ser realizado *off-line*, sendo necessário retirar uma amostra de fluido da linha de escoamento para realizar o teste, o que pode ocasionar atrasos no processo operacional e na tomada de decisão. O controle de sólidos *online* torna-se ferramenta de grande utilidade ao informar em tempo real a concentração de sólidos em fluxo caracterizando assim a qualidade da retirada de sólidos pelos equipamentos convencionais.



Figura 8 - Equipamento de *mud testing*. Fonte: Manual do equipamento

Outro método possível para caracterização de sólidos em fluidos é a utilização de sinais acústicos de ultra-som. Conforme descrito por Han *et al.* (2004), dados como velocidade do som e atenuação do sinal podem ser utilizados para obter informações tanto qualitativas quanto quantitativas a respeito da composição do fluido, incluindo natureza das partículas sólidas, compressibilidade, ponto de bolha e proporção óleo/água.

Segundo Powell (2008), são usados normalmente cinco métodos de medição não invasivos para determinar parâmetros de um sistema multifásicos:

- MRI (*Magnetic Resonance Imaging*): É uma técnica capaz de fornecer medidas para uma ampla faixa de concentração, velocidade, constituintes químicos, e difusão. Apresenta desvantagens por ser de alto custo e difícil transporte, além da necessidade de mão-de-obra altamente especializada para sua operação

- UPDV (*Ultrasonic Pulsed Doppler Velocimetry*): oferece as mesmas vantagens que o MRI, porém com um custo bem menor em termos de equipamentos usados e de mão de obra especializada;

- EIT (*Electrical Impedance Tomography*): Pioneiro em estudos de escoamentos multifásicos, com equipamentos de fácil configuração, porém apresentam algumas dificuldades na interpretação dos dados. Utilizado para estudar a distribuição da concentração de particulados em tubulações;

- Difração de Raios-X: Usada em estudos de escoamentos multifásicos;

- Difração de Nêutrons: Para estudo de sistemas multifásicos envolvendo metais e líquidos.

Dessas técnicas, a utilização do ultrassom vem ganhando um enorme interesse para monitoramento de escoamentos multifásicos. Comparado aos métodos citados acima, o ultrassom apresenta maior facilidade de ser manuseado e preço relativamente mais barato.

2.7. Medições por Ultrassom

Os ultrassons são ondas mecânicas com frequência maior que 16kHz que se propagam em ciclos sucessivos de compressão e rarefação através de qualquer meio material e que não podem ser sentidas pelo homem (MASON & LORIMER, 1988).

O ultrassom já é muito utilizado na medicina para diagnósticos e acompanhamentos médicos como também na engenharia na detecção de falhas de materiais sólidos. Os transdutores ultrassônicos e outros equipamentos necessários, estão disponíveis comercialmente com baixos custos comparados a outras técnicas de medição. Além da facilidade e o relativo baixo custo, possuem vantagens como robustez, tamanho, alta sensibilidade e versatilidade em aplicações (Paiva, 2011).

Ainda segundo Paiva (2011), o sinal ultrassônico não é retido por barreiras sólidas nem líquidas, além de permanecer sem qualquer degradação pelas condições dos processos, e pode ser monitorado em tempo real e no local de operação. No entanto, o ultrassom precisa ser calibrado a fim de correlacionar os níveis de atenuação acústica com as concentrações das fases dispersas.

O transdutor de ultrassom é um dispositivo que contém um ou mais elementos piezoelétricos que, submetidos a um pulso de tensão elétrica, vibram em suas frequências de ressonância emitindo o ultrassom. Em um transdutor ultrassônico o elemento ativo básico é um disco de cerâmica piezoelétrica, com eletrodos metálicos depositados nas faces paralelas que, quando opera como transmissor, converte uma excitação elétrica em campo acústico, e quando opera como receptor converte a pressão do ultrassom em sinal elétrico.

A caracterização de um transdutor ultrassônico consiste em determinar parâmetros nos domínios do tempo e da frequência que determinam a interação da energia acústica gerada com o meio de transmissão (Mann, 2008).

De acordo com Luz (1998), o comportamento do ultrassom pode ser dividido em duas grandes áreas: alta potência e baixa potência. As ondas ultrassônicas de alta potência (entre 1 W.cm⁻² e milhares de W.cm⁻²) caracterizam-se pela elevada frequência (superior a 1 MHz), deslocamentos pequenos, velocidade moderada e alta aceleração. Já ondas de baixa potência caracterizam-se pela baixa amplitude de propagação, e frequências superiores a 20 kHz. Materiais podem sofrer alterações químicas ou físicas permanentes quando sob ação de ondas ultrassônicas de alta potência. Já ondas de baixa potência possuem maior aplicação em testes e diagnósticos no campo da medicina e engenharia.

Os principais parâmetros acústicos utilizados no monitoramento, controle e medição de processos multifásicos através do ultrassom são intensidade da pressão, atenuação da energia e tempo de trânsito. As alterações no sinal ocorrem devido aos efeitos combinados da atenuação do sinal e os fenômenos de reflexão, refração e espalhamento do feixe acústico. Estas alterações, por sua vez, dependem da concentração e da distribuição do tamanho das fases dispersas (bolhas, gotas de óleo ou partículas sólidas). Por fim, o sinal resultante do escoamento multifásico normalmente é comparado com um sinal de referência. Essa referência geralmente é o sinal na fase contínua em escoamento monofásico e a mesma temperatura (BOND, 2003).

Para que haja propagação da onda ultrassônica é necessário a existência de um meio

físico, seja este sólido, líquido ou gasoso. Além disso, é necessário que o meio possua propriedades elásticas. Isto porque a propagação da onda se dá pela vibração a nível molecular, em que há transmissão contínua da vibração de molécula para molécula. Tal movimento oscilatório gera regiões no material de compressão e rarefação (LUZ, 1998).

Segundo Sad (2013), as ondas podem ainda ser classificadas quanto ao sentido de propagação das mesmas. Em ondas transversais, há vibração das partículas na direção perpendicular à direção de propagação da onda. Para ondas longitudinais, as partículas vibram na mesma direção da propagação da onda. A **Figura 9** ilustra os dois modos de propagação da onda.

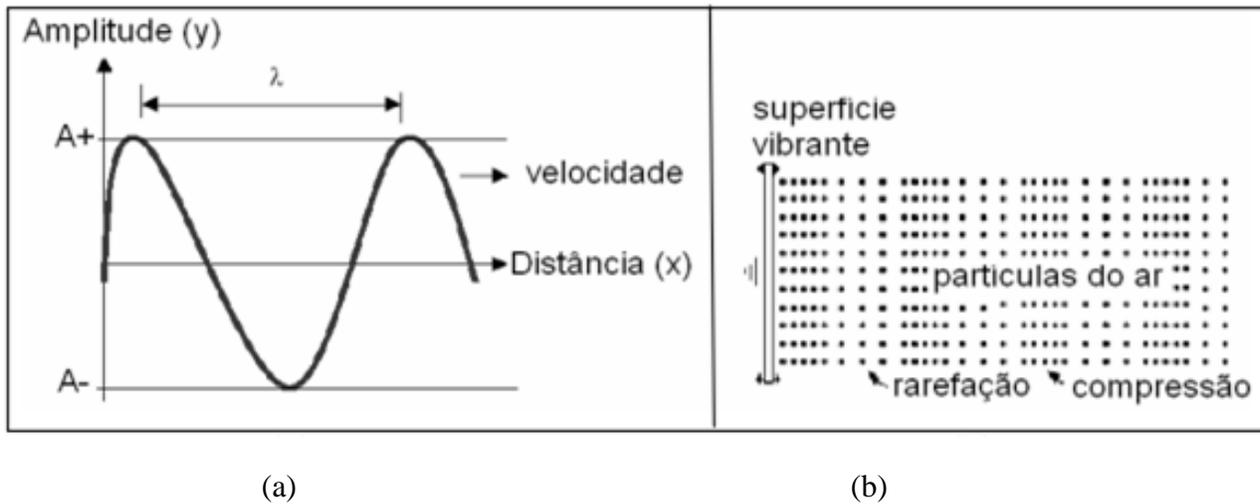


Figura 9 - Propagação de ondas: (a) transversais e (b) longitudinais. (Fonte: Sad, 2013)

As ondas acústicas são classificadas por três parâmetros: frequência, velocidade e comprimento de onda. A frequência (f) é definida por Halliday *et al.* (2008), como o número de ondas que passam por segundo de um referencial, normalmente conhecida como Hertz (Hz).

Já a velocidade de propagação (v) é definida por Andreucci (2008), como sendo a distância percorrida pela onda sônica por unidade de tempo. Vale ressaltar que a velocidade de propagação é uma característica do meio, independente da frequência.

Halliday *et al.* (2008) define o comprimento de onda (λ) como a distância entre duas cristas consecutivas de uma onda. A relação entre os três parâmetros é dado pela Equação 5.

$$v = \lambda \cdot f \quad (5)$$

De acordo com Luz (1998), a aplicação de campo acústico em líquidos gera um incremento na pressão hidrostática (P_h), denominado pressão acústica (P_a). A soma de ambas fornece a pressão manométrica (P) do líquido, conforme Equação 6.

$$P = P_a + P_h \quad (6)$$

O mesmo autor ainda demonstra a dependência da pressão acústica com o tempo. Tal pressão possui comportamento oscilatório, uma vez que é dependente da frequência da onda de modo senoidal, conforme é demonstrado na Equação 7.

$$P_a = P_A \cdot \text{sen}2\pi\nu.t \quad (7)$$

Outro fator importante a ser considerado na avaliação de medições de ondas ultrassônicas é a intensidade de onda. Halliday *et al.* (2008) definem a intensidade de uma onda sonora como a taxa média da energia contida na onda que atravessa ou é absorvida pelo material. Tal intensidade é demonstrada por Lorimer & Mason (1987) conforme Equação 8.

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho\nu} \quad (8)$$

onde:

ρ = densidade do meio

ν = velocidade do som no meio

Ao atravessar determinado meio, parte da energia contida na onda é transformada em energia mecânica (vibração de moléculas), causando o fenômeno chamado atenuação sonora. Tal atenuação é importante na caracterização de fluidos, especialmente para identificação do conteúdo de sólidos dispersos em determinado meio.

2.7.1. Atenuação em líquidos

Ao percorrer determinado material, a onda ultrassônica sofre efeitos de dispersão e absorção, o que resulta em perda de energia para o material. A dispersão ocorre devido à heterogeneidade do material, principalmente devido à anisotropia, ou mudanças em características elásticas do material. A absorção ocorre sempre que a onda percorre um meio elástico, transferindo energia na forma de vibração molecular (ANDREUCCI, 2008).

A perda de energia por atenuação (α) pode ser definida para fluidos puros conforme a Equação 9. Observa-se a viscosidade do meio, velocidade do som no meio, a frequência do equipamento e a densidade do meio como variáveis influentes da atenuação.

$$\alpha = \frac{2\eta^2 f^2}{3\rho v^3} \quad (9)$$

α = atenuação

η = Coeficiente de viscosidade

f = Frequência

v = Velocidade do som no meio

ρ = Densidade

Para fluidos compostos e suspensões, outros parâmetros como condutividade térmica, capacidade calorífica e força de cisalhamento fazem-se necessários, conforme Equação 10 (MARTINES *et al.*, 2000)

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho v^3} \left[\eta_b + \frac{4}{3}\eta_s + \frac{(\gamma - 1)K}{C_p} \right] \quad (10)$$

η_b – viscosidade aparente;

η_s – força de cisalhamento;

K – condutividade térmica do meio;

C_p – calor específico;

γ – capacidade calorífica;

ρ - densidade do meio

v - velocidade do som no meio

Porém, a atenuação acústica é função não apenas do material mas também da distância percorrida pela onda. Martins (2011) demonstra tal decaimento através da Equação 11.

$$A(x) = A_0 \cdot \exp(-\sigma(x - x_0)) \quad (11)$$

Onde:

$A(x)$ – intensidade sonora na posição “x”

A_0 – intensidade sonora inicial.

σ - coeficiente de atenuação.

x – distância em relação a x_0 .

x_0 – posição inicial.

2.7.2. Atenuação em suspensões

Escoamentos que possuem partículas sólidas como fases dispersas tendem apresentar deposições destas partículas no fundo da tubulação, ou até mesmo não acompanhar a direção do escoamento. Estas deposições e acúmulos de partículas sólidas nas tubulações dão origem a três diferentes classificações de escoamentos (DORON & BARNEA, 1996).

Para estes escoamentos que possuem como fase dispersa partículas sólidas a definição dos padrões baseia-se principalmente em observações visuais, que levam em conta as velocidades de transição entre os padrões, os quais podem ser divididos em escoamento inteiramente suspenso, escoamento com leito móvel e escoamento com leito fixo.

Em escoamento inteiramente suspenso, há altas taxas de misturas devido aos altos valores do escoamento das partículas. Este se subdivide em suspensão homogênea e suspensão com escoamento heterogêneo. Na suspensão homogênea, as partículas sólidas são distribuídas de forma homogênea em toda seção da tubulação. Para este, as velocidades de mistura são muito altas em geral não são encontrados na prática. Já na suspensão com escoamento heterogêneo, a concentração de partículas é maior na parede da tubulação e diminui seguindo na direção interna da tubulação.

No escoamento com leito móvel, devido à baixa velocidade do escoamento, existe pouca mistura das partículas sólidas. Essas partículas sólidas tendem a se acumular na parte inferior da tubulação. Estas camadas acumuladas formam um leito com um aglomerado de partículas.

Por fim, no escoamento com leito fixo: com a velocidade do escoamento muito baixa a mistura das partículas também é muito baixa. Não há como todas as partículas se movimentarem, e neste caso ocorre deposição de partículas no fundo da tubulação. Na parte superior existem partículas que se desprendem deste leito fixo de partículas, ou seja, somente as partículas acima deste leito fixo se movimentam, e seguem o sentido do escoamento, devido ao cisalhamento causado pela passagem do fluido.

A partir desta diferenciação entre os tipos de escoamentos, que apresentam partículas sólidas dispersas em uma suspensão, é possível, com a técnica ultrassônica, fazer correlações com as concentrações de partículas em um dado padrão de escoamento, pois a formação de suspensões causam reflexão, refração e espalhamento do feixe acústico, atenuando o sinal emitido proporcionalmente a concentração destas partículas em suspensão.

Urick (1947) realizou experimentos com xileno e água e água adensada com caulim, observando redução da velocidade do som com aumento da emulsão de xileno em água e aumento da velocidade do som com aumento da concentração de sólidos. Pode-se observar a influência da formação de emulsões na atenuação do sinal ultrassônico e paralelo a isso, o comportamento crescente da velocidade do som com o aumento da densidade do meio aquoso.

Xu *et al.* (1988) mencionam que uma das dificuldades da técnica ultrassônica é o mal acoplamento entre os sensores e que as impedâncias acústicas das fases, como por exemplo, em escoamentos água-ar alteram diretamente o sinal.. Outra dificuldade é o complexo campo acústico provocado pelos transdutores que gera erro devido à superposição ou múltiplas reflexões dos sinais.

Vaz (1997) realizou avaliações granulométricas de solos e avaliou a influência do tamanho das partículas nos seus resultados de atenuação, onde o aumento da partícula influencia diretamente no aumento da atenuação.

Bond (2003) menciona em seus trabalhos, alta atenuação do som por fenômenos de reflexão, refração e espalhamento do feixe acústico devido presença de bolhas.

Zheng & Zhang (2004), ao estudarem técnicas de ultrassom para medir escoamentos multifásicos, observaram que flutuações na velocidade do som e atenuação ocorrem de forma

bem-definida, sendo possível modelar tal comportamento tanto para escoamentos de sólido em gás, quanto em para escoamentos sólidos/ líquido e gás/ líquido. Este mesmo autor, corroborando com Bond (2003), menciona que a presença de bolhas interferem no sinal de ultrassom medido.

Chen *et al.* (2007) avaliaram a correlação da atenuação acústica com o aumento do teor de sólidos suspensos em meio líquido, utilizando amostras de caulim em meio aquoso. Foram utilizadas duas técnicas para medição do teor de sólidos: Transformada Rápida de Fourier (FFT), e gradiente do coeficiente de atenuação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos empregados no estudo da atenuação do som em fluidos contendo sólidos. Foram estudados fluidos a base de água com suspensões de barita, calcita, bentonita e soluções cloreto de sódio. Foram realizados testes com soluções Não-Newtonianas de goma xantana e carboximetilcelulose, adensadas com os mesmos sólidos insolúveis e fluidos a base de óleo com suspensões de barita, calcita e bentonita. Serão abordados os procedimentos experimentais para os ensaios de atenuação dinâmica em meio aquoso e em óleo para diversos sólidos dispersos no meio.

Foram utilizadas três unidades para os testes, sendo as medidas realizadas sempre no mesmo equipamento ultrassônico. Para ensaios dinâmicos em água foi utilizada a unidade *online* do Laboratório de Escoamento de Fluidos, para os ensaios dinâmicos em óleo, foi montada outra unidade de teste de atenuação e para testes estáticos preliminares, foi montada uma unidade experimental (no anexo).

3.1. Equipamento Ultrassônico

Foi utilizado o equipamento Rhosonics modelo 9670, responsável pela medição de atenuação do som nos fluidos estudados. De acordo com o Manual de Operação, o equipamento possui faixa de medição de densidade entre 0,5 e 3 g/cm³ com precisão de 10⁻³ g/cm³, operando entre -10 e 150 °C.

Tem como princípio de funcionamento a emissão e recepção de pulsos ultra-sônicos e a atenuação e a velocidade do som são utilizadas para cálculo de concentração. Os sensores (emissor e receptor) são alinhados no centro do flange e são ligados à central através de cabos de igual comprimento. Sua geometria simples permite a aplicação do mesmo em pontos do processo em que há fluidos estáticos, assim como em linhas de processo, para medições em fluxo. O equipamento foi instalado na unidade *online* do Laboratório de Escoamento de Fluidos, LEF, do Instituto de Tecnologia da UFRRJ. Podemos observar na **Figura 10** o equipamento e seu monitor.

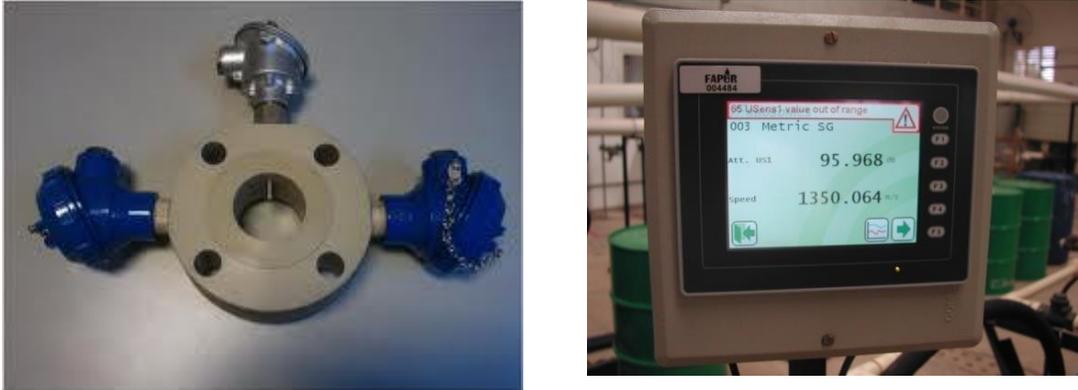


Figura 10 – Rhosonics. Fonte: Arquivo pessoal

3.2. Unidade Experimental para Ensaio Dinâmicos em Fluidos Aquosos

Todos os experimentos com fluidos base água foram realizados na unidade “*online*” de preparação e avaliação de fluidos do Laboratório de Escoamento de Fluidos, LEF, do Instituto de Tecnologia da UFRRJ. Esta unidade tem um completo sistema de monitoração de diversas variáveis importantes ao controle de características do fluido produzido e foi utilizada em diversos trabalhos de controle de escoamento e automação.

Possui capacidade de produzir até 1000 litros de fluido por batelada e sistema de bombeio para os fluidos produzidos e para limpeza das tubulações. A unidade possui ainda sensores de pressão, de temperatura, de vazão e sensores de nível nos tanques. Para garantir a manutenção das condições do experimento, possui um trocador de calor para aquecimento e resfriamento, e válvulas automáticas para direcionamento de fluxo. Além destes, abriga os sensores específicos para leitura das propriedades de interesse dos fluidos preparados, que são: sensor para reologia, para densidade, para condutividade elétrica e ainda para estabilidade elétrica.

Todos estes componentes são monitorados pelo supervisório construído em linguagem Labview. O supervisório é capaz de receber todos os dados gerados pelos instrumentos, realizar conversões dos sinais analógicos nas variáveis de interesse e possui um banco de dados para armazenar dados de testes. Deste, pode-se realizar controle das bombas e agitadores. A **Figura 11** ilustra a unidade *online* e seus equipamentos. Devido à complexidade da unidade, restringimos por válvulas alguns trechos e utilizamos apenas os seguintes equipamentos: tanque (1), a bomba (2), os medidores de pressão (4), temperatura (6) e vazão volumétrica (7), o Rhosonics (17), o contador de partículas (18) e o densímetro de processo (14).

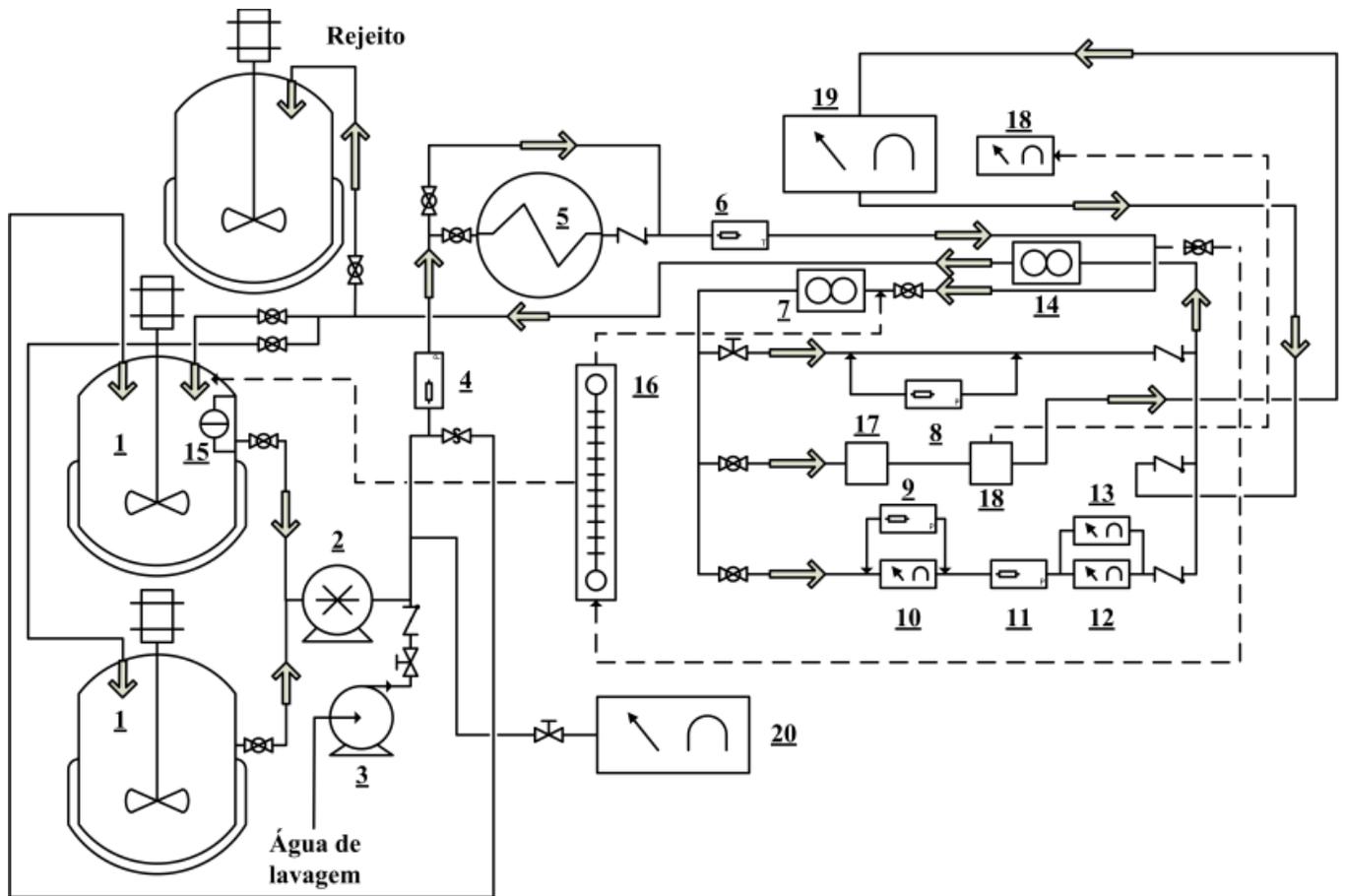


Figura 11 - Fluxograma da unidade de ensaio de atenuação dinâmica em água.

Fonte: Scheid *et al.* (2013)

Legenda dos equipamentos:

- | | | |
|-----------------------------------|--|---|
| 1. Tanques de mistura | 8. Medidores de pressão diferencial | 16. Simulador de fraturas |
| 2. Bomba helicoidal | 9. Medidores de pressão diferencial | 17. Medidor de concentração de sólidos (Rhosonics) |
| 3. Bomba centrífuga | 10. Reômetro de processo | 18. Analizador de tamanhos e contador de partículas de processo |
| 4. Medidores de pressão | 11. Medidor de pressão | 19. Medidor de teor de água em óleo de processo |
| 5. Trocadores de calor | 12. Condutivímetro de processo | 20. Célula de filtração de processo. |
| 6. Medidores de temperatura | 13. Medidor de estabilidade elétrica de processo | |
| 7. Medidores de vazão volumétrica | 14. Densímetro de processo | |
| | 15. Medidor de nível | |

3.3. Unidade Experimental para Ensaios Dinâmicos com Fluido Oleoso

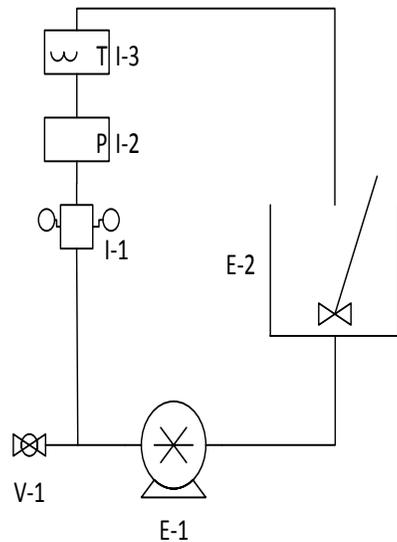
Para os ensaios de atenuação em fluxo de óleo (ensaios dinâmicos), foi montado um aparato experimental no LEF, ficando independente da unidade *online* a fim de evitar comprometer outros trabalhos do laboratório e causar interferências nos resultados, visto que nesta etapa trabalhou-se com óleo. Tal unidade está ilustrada na **Figura 12**. Para o projeto da unidade, considerou-se minimizar as perdas de carga e evitar entupimentos em equipamentos da unidade *online* e minimizar a formação de eventuais bolhas em tubulação, as quais poderiam alterar resultados obtidos de atenuação no Rhosonics.



Figura 12 - Unidade experimental de ensaio de atenuação dinâmico. Fonte: Arquivo pessoal

A unidade consiste de tanque de armazenamento de 100L, modelo Grabe, conectado à jusante de bomba Weatherford de 1,5 cv, pressão de recalque mantida em aproximadamente 1,5 kgf/cm². A bomba foi instalada sem uso de inversor, pois a vazão de operação foi a vazão máxima proporcionada pela bomba (7,0 m³/h). A montante foram instaladas válvulas esferas, a fim de possibilitar a purga de fluidos na unidade ao fim de cada experimento. O equipamento Rhosonics, responsável pela medição da atenuação dos fluidos em escoamento, foi instalado mantendo-se trecho reto a montante e jusante, conforme orientação do fabricante. A unidade ainda possui termômetro e manômetros instalados em linha.

A **Figura 13** ilustra o fluxograma da unidade experimental de ensaio dinâmico. A fim de manter a concentração de sólidos homogênea em todo o tanque, foi acoplado um agitador, marca WEG, de 0,75 cv e rotação manipulada por inversor de frequência da marca WEG modelo CFW08. Foi realizada parametrização do inversor e manteve-se a rotação em 300 RPM, nas mesmas condições empregadas na unidade online.



Legenda dos equipamentos:

E-1: Bomba de deslocamento positivo.

E-2: Tanque de armazenamento.

I-1: Medidor ultrassom

I-2: Manômetro.

I-3: Termômetro.

V-1: Válvula esfera.

Figura 13 - Fluxograma da unidade de ensaio de atenuação dinâmico em óleo. Fonte: Arquivo pessoal

3.4. Caracterização do Óleo

Utilizou-se óleo mineral com anti-espumante marca Castrol Hyspin AWS 68, caracterizado pelo fabricante (apresentada no anexo desta dissertação), com densidade $0,853\text{g/cm}^3$ e viscosidade $8,78\text{ cP}$ a 40°C . Este óleo já havia sido utilizado em outras análises do LEF e foi empregado devido à sua característica mineral próxima à composição dos fluidos de perfuração base óleo.

3.5. Reologia

Foram realizados ensaios de reologia em viscosímetro Fann modelo 35A, para caracterização de fluidos e suspensões Newtonianas e Não-Newtonianas (Figura 14). Para cada amostra, foram realizadas medições de ângulo de deflexão para velocidade angular ascendente de 3 a 600 rotações por minuto (RPM). Foram realizados ensaios com amostras dos fluidos isentos de sólidos, e posteriormente realizaram-se ensaios em fluidos com concentrações de sólidos determinadas.



Figura 14 - Reômetro Fann modelo 35A. Fonte: Catálogo do equipamento.

O viscosímetro rotaciona um cilindro padrão em que está contida a amostra em velocidades pré-determinadas. A resistência viscosa exercida pelo fluido nas paredes do cilindro gera um torque, que é transmitido a mola a qual é medida sua deflexão (deformação angular). A geometria do viscosímetro permite relacionar a velocidade angular do cilindro externo e o torque gerado pelo fluido com a taxa de deformação (γ) e a tensão cisalhante (τ), sendo calculadas com a velocidade de rotação (φ) e as deflexões lidas (θ), conforme Equações (12) e (13), SHIROMA (2012).

$$\gamma = 1,7023.\varphi \quad (12)$$

$$\tau = 0,511.\theta \quad (13)$$

3.6. Balança de Lama

Para medição da densidade das amostras preparadas, foi utilizada uma balança de lama da marca Fann (**Figura 15**). A metodologia de aferição do equipamento consiste em se colocar a amostra a ser medida em um lado da balança, onde há um recipiente. Ajustando-se a régua móvel com auxílio de um nível de bolha, obtêm-se o peso específico da amostra no ponto de equilíbrio da régua.



Figura 15 – Balança de lama Fann. Fonte: Catálogo do equipamento.

3.7. Granulometria dos Sólidos

Foi realizada análise da granulometria dos sólidos (barita, bentonita e calcita) no analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000 (**Figura 16**). Estas análises estão descritas no capítulo 4.



Figura 16 – Analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000. Fonte: Catálogo do equipamento.

3.8. Pesagem e Separação dos Sólidos

Os sólidos foram pesados e separados (**Figura 17**), levando em consideração sua densidade e contribuição ao novo volume no tanque, para alcançar a concentração desejada. Conseguiu-se assim padronizar os degraus de concentração e consequentemente aferir no equipamento a atenuação gerada.



Figura 17 – Separação de sólidos para adição. Fonte: Arquivo pessoal

3.9. Ensaios Dinâmicos de Atenuação

Para fluidos Newtonianos, utilizou-se a unidade *online* e foram preparadas amostras de água e amostras isentas de sólidos e dispersões de barita, bentonita e calcita a fim de avaliar a atenuação da amostra sob escoamento. Para tal, as amostras foram preparadas *in situ*, isto é, inicialmente a unidade de ensaio de atenuação dinâmico foi abastecida apenas com o fluido no tanque e iniciou-se o bombeio com vazão constante e agitação. Aguardou-se a estabilização da atenuação e coletou-se seu valor. Posteriormente, adicionou-se quantidade de sólido suficiente para se atingir a concentração desejada para cada etapa, aguardando-se novamente a estabilização do sinal de atenuação e coletando-se o dado. Este procedimento foi repetido até ser atingir a concentração desejada para cada sólido. Em alguns casos de suspensões em água, chegou-se a adicionar 900g/L.

Para fluidos Não-Newtonianos, foram preparadas separadamente bateladas de goma xantana (GX) e carboximetilcelulose (CMC), que são completamente solúveis em água e ambas foram preparadas na concentração de $4,3 \text{ kg/m}^3$ (1,5lb/bbl). A adição foi feita gradativamente, aguardando a estabilização da viscosidade para nova adição. Após a dissolução, foi iniciada adição dos sólidos insolúveis, seguindo receitas de preparação de fluidos fornecidas pelo centro de pesquisa da Petrobras (CENPES).

3.9.1. Ensaio dinâmico de atenuação em óleo

Para ensaios com óleo, utilizou-se a unidade de ensaio de atenuação dinâmica nas mesmas condições de pressão e vazão da unidade *online* e iniciou-se a medição da atenuação com óleo isento de sólidos. Para evitar formação de bolhas que aumentam diretamente a atenuação (BOND *et al.* 2003), foi instalado um novo tubo de retorno ao tanque de amostra (**Figura 18**), para ficar abaixo da linha de nível de óleo. Em todos os experimentos foi observada a temperatura do fluido, a pressão, a densidade do material e o aumento do volume causado por nova adição.



Figura 18 – Vista interna do tanque com tubo de retorno. Fonte: Arquivo pessoal.

Cada nova adição foi feita seguindo o planejamento experimental e em vigorosa agitação e vazão constante. Aumentava-se a concentração de sólidos em 20g/L chegando a concentração máxima de 400g/L. A **Figura 19** ilustra o tanque, em agitação constante, durante os testes.



Figura 19 – Vista interna do tanque com óleo. Fonte: Arquivo pessoal.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentadas a análise granulométrica dos sólidos e a caracterização reológica dos fluidos estudados. Em seguida, os resultados obtidos para os experimentos de atenuação em fluidos base aquosa e oleosa com suspensões.

4.1. Densidade dos Sólidos

A escolha dos sólidos foi baseada na densidade, solubilidade, tamanho da partícula e aplicação em fluidos de perfuração. As especificações de uso dos sólidos requerem minério de granulação fina e homogênea, alta densidade e inércia química. A densidade dos sólidos foi determinada experimentalmente com o auxílio de um picnômetro. A **Tabela 1** demonstra a densidade calculada dos sólidos utilizados.

Tabela 1 – Densidades dos sólidos

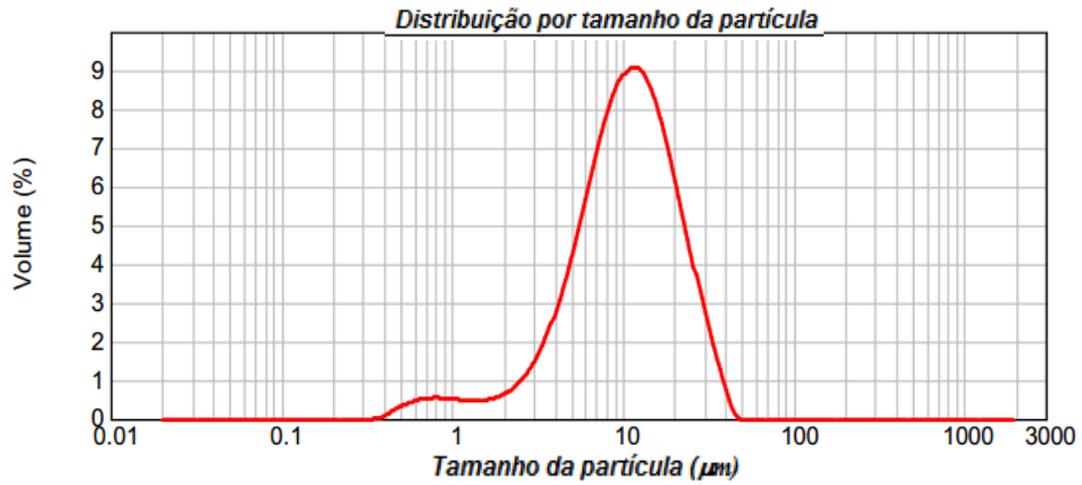
Sólido	Densidade (g/cm ³)
Barita	4,27
Bentonita	0,95
Calcita	1,43
Cloreto de sódio	2,16

4.2. Granulometria dos Sólidos

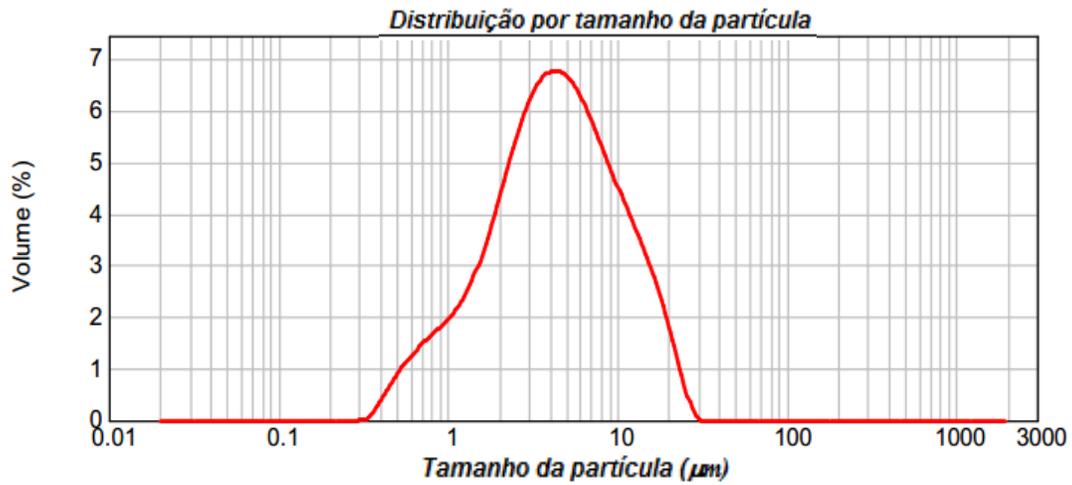
A análise granulométrica dos sólidos barita, bentonita e calcita, foi realizada no equipamento Malvern MasterSizer 2000 a fim caracterizar os diferentes sólidos.

Na **Figura 20**, é possível observar os resultados obtidos para análise granulométrica de barita (a), bentonita (b) e calcita (c).

(a)



(b)



(c)

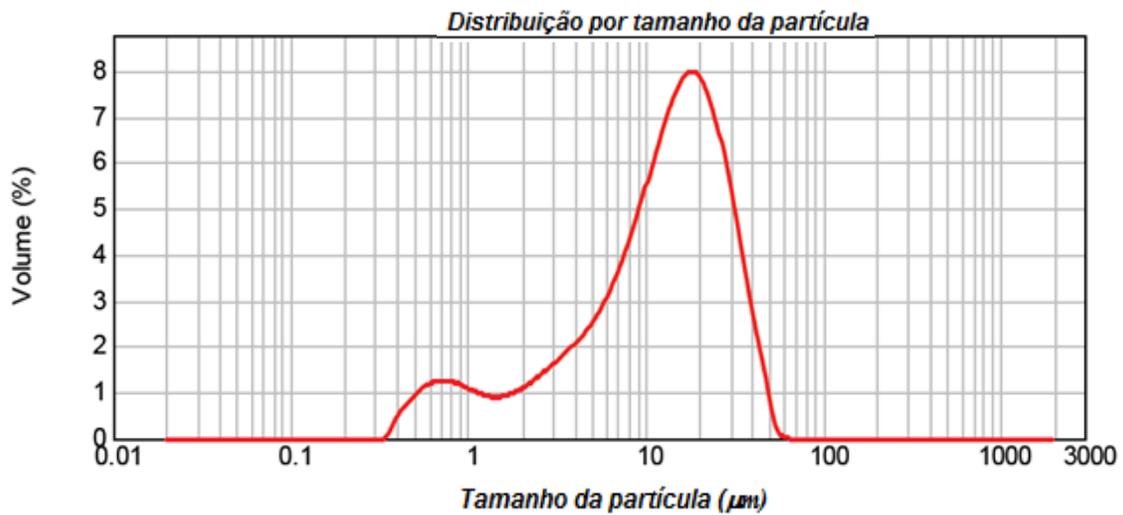


Figura 20- Distribuição granulométrica da: (a) barita, (b) bentonita e (c) calcita.

Podemos observar pelos resultados apresentados na **Tabela 2** que a bentonita tem a menor granulometria média, seguida da barita e calcita.

Tabela 2 – Distribuição de tamanhos dos sólidos utilizados

Sólido / Tamanho da partícula	d 0,1(μm)	d 0,5(μm)	d 0,9(μm)
Barita	3,72	10,54	23,26
Bentonita	1,18	4,28	13,09
Calcita	2,24	20,85	49,79

4.3. Reometria

4.3.1. Óleo puro

O ensaio de reometria permitiu observar o comportamento reológico das amostras preparadas. A **Figura 21** ilustra o teste de reometria realizado com óleo isento de sólidos para temperaturas de 25, 30, 35 e 40°C. Os dados obtidos foram tratados a fim de se obter parâmetros reológicos do fluido. Como era esperado, observou-se comportamento newtoniano para todas as amostras e redução da viscosidade com o efeito da temperatura.

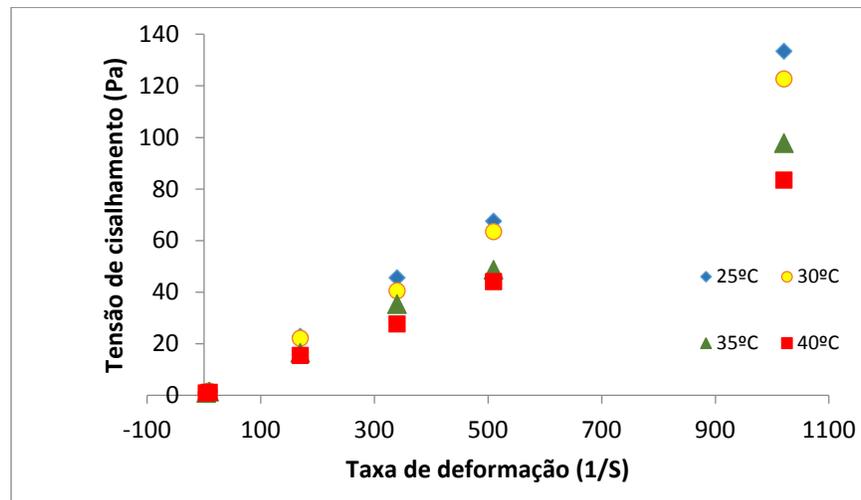


Figura 21– Tensão de cisalhamento versus taxa de deformação para temperaturas de 25, 30, 35 e 40°C.

Foi realizada regressão linear do modelo de Newton nos dados de tensão e taxa de cisalhamento, com auxílio do *software* MSEExcel®, a fim de se obter a viscosidade dinâmica do fluido para cada temperatura avaliada, conforme a **Tabela 3**.

Tabela 3 – Valores calculados de viscosidade dinâmica para óleo isento de sólidos.

Temperatura (°C)	μ (Pa.s)	(R ²)
25	0,1312	(0,99)
30	0,1209	(0,99)
35	0,0961	(0,99)
40	0,0825	(0,99)

4.3.2. Suspensões em óleo

Foram obtidos dados de viscosidade dinâmica para as suspensões de óleo e sólidos. O ensaio foi realizado para suspensões de bentonita, barita e calcita em óleo nas concentrações de 20, 40 e 80 g/L e temperatura de controlada em 25°C, e tais resultados foram comparados com os obtidos para óleo puro (isento de sólidos) conforme ilustrado na **Figura 22**. Podemos observar em todos os gráficos, aumento na tensão de cisalhamento com adição de sólidos ao óleo. Como esperado, na faixa de concentração estudada, não houve mudanças na reometria do óleo com adição destes sólidos insolúveis

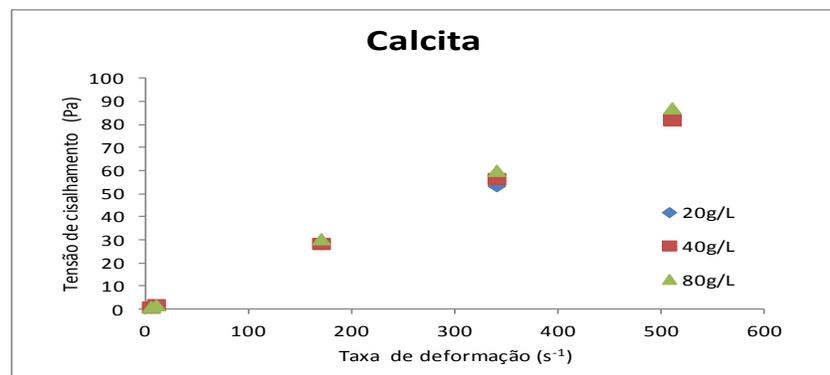
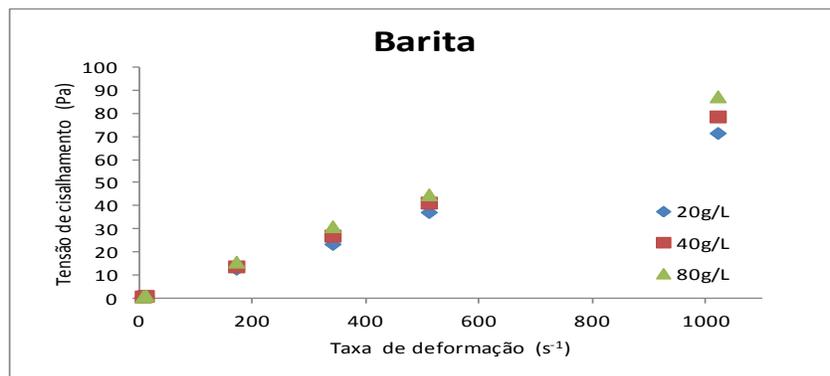
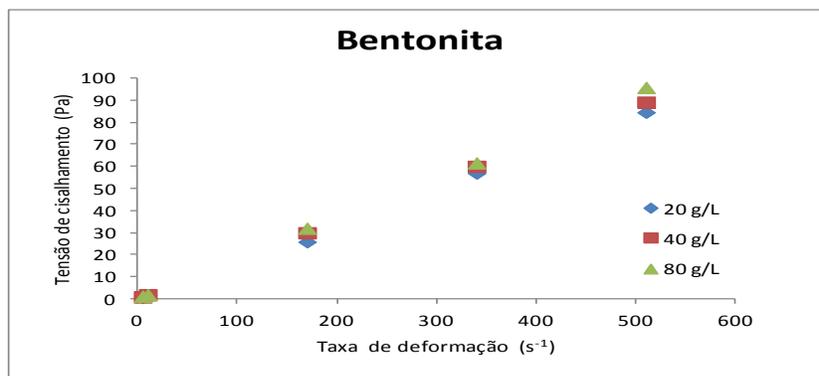
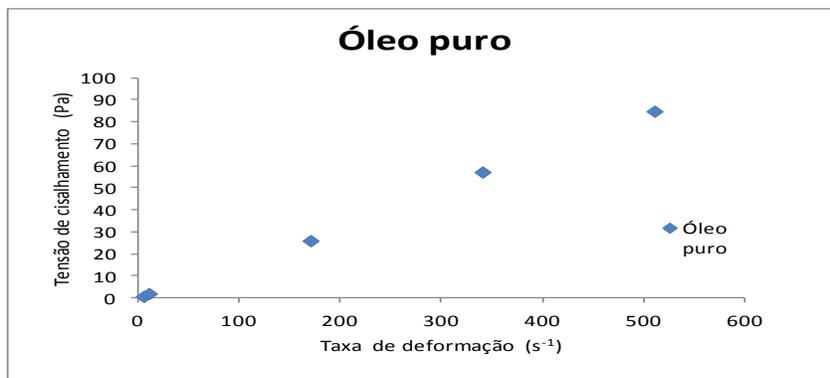


Figura 22- Ensaio reológico de óleo puro e suspensões de bentonita, barita e calcita.

Foi realizada regressão linear do modelo de Newton para cada concentração de sólido, a fim de se obter a viscosidade dinâmica da suspensão. Os valores podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores calculados de viscosidade dinâmica μ (Pa.s) em 25°C.

Concentração (g/L)	Bentonita	Calcita	Barita
20	0,16	0,16	0,13
40	0,17	0,16	0,13
80	0,19	0,17	0,13

Podemos observar que não houve variação significativa da viscosidade para fluido com calcita e barita, com um pequeno aumento da viscosidade do fluido produzido para bentonita. Como esperado, mesmo em baixas concentrações, a bentonita tem valores superiores aos demais devido a sua menor granulometria e mesmo em óleo, propriedade de inchamento (BARBOSA *et al.*, 2007). Em função desta característica, este sólido tem larga utilização como viscosificante de fluidos de perfuração.

4.3.3. Soluções de GX e CMC

A **Figura 23** ilustra o teste de reometria realizado com soluções de goma xantana e CMC em água. São plotados resultados de tensão de cisalhamento por taxa de deformação, ambos realizados em temperatura controlada em 25°C e com concentrações de 4,3kg/m³ (1,5lb/bbl).

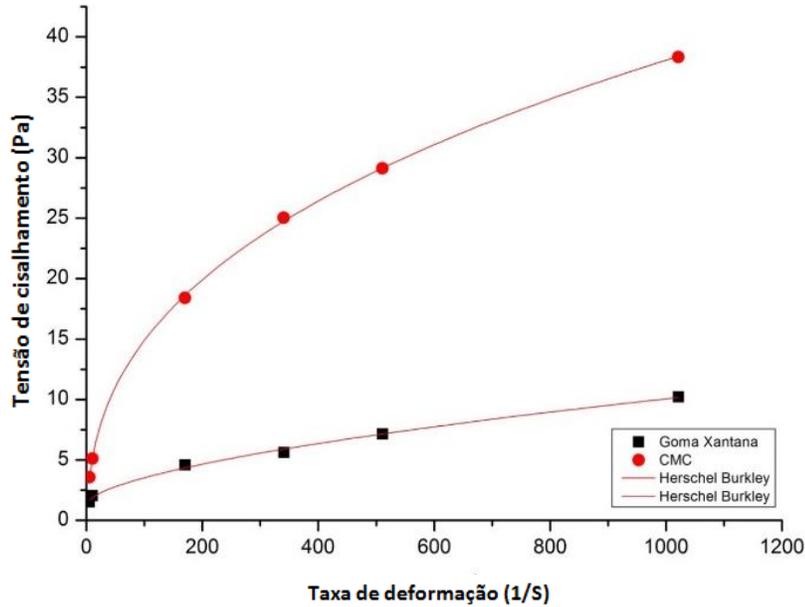


Figura 23- Ensaio reológico de água com goma xantana e CMC.

Observou-se comportamento Não-Newtoniano para ambas as soluções, sendo a não-linearidade mais preponderante na suspensão com CMC. Os dados obtidos ajustam-se ao modelo de Herschel-Burkley.

4.3.4. Suspensões de GX e CMC

Afim de avaliar o comportamento reológico das amostras de goma xantana e carboximetilcelulose, frente a adição de sólidos, foram preparadas suspensões de GX e CMC com barita nas concentrações de 20, 40, 80, 100, 200 e 400 g/L. Estas amostras foram testadas no viscosímetro Fann 35A e os resultados foram plotados em gráficos que estão apresentados nas **Figuras 24 e 25**.

Pode-se observar nas Figuras 25 e 26 o aumento da taxa de cisalhamento com aumento da concentração de sólidos. Constatam-se que as adições destes sólidos contribuem com o aumento da viscosidade do fluido em altas concentrações, porém tal fato não foi observado para baixas concentrações.

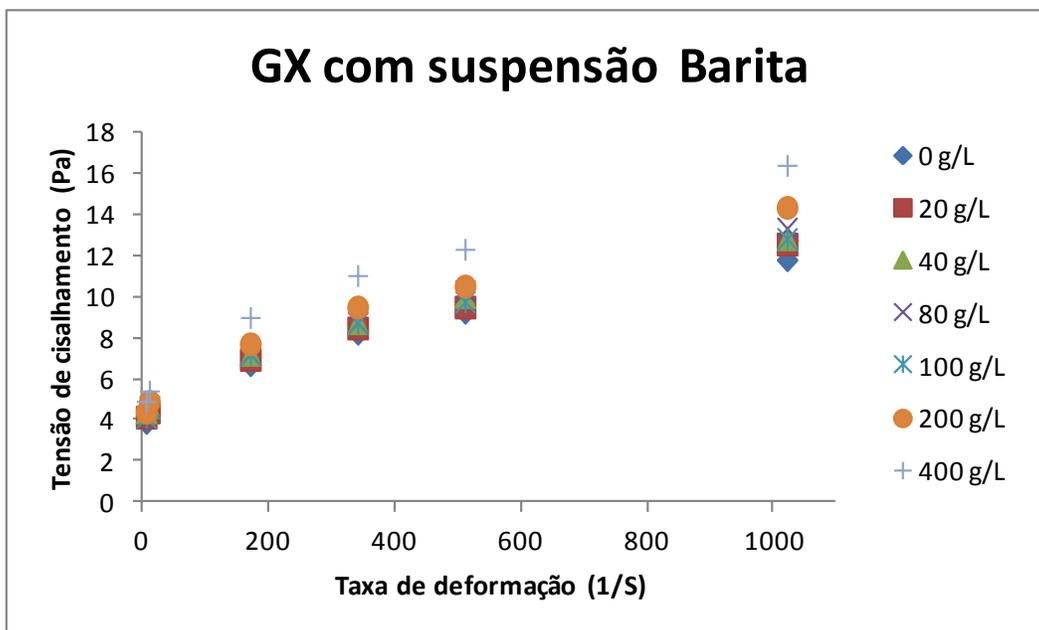


Figura 24- Ensaio reológico de GX e suspensões com concentrações de barita de 20 a 400 g/L.

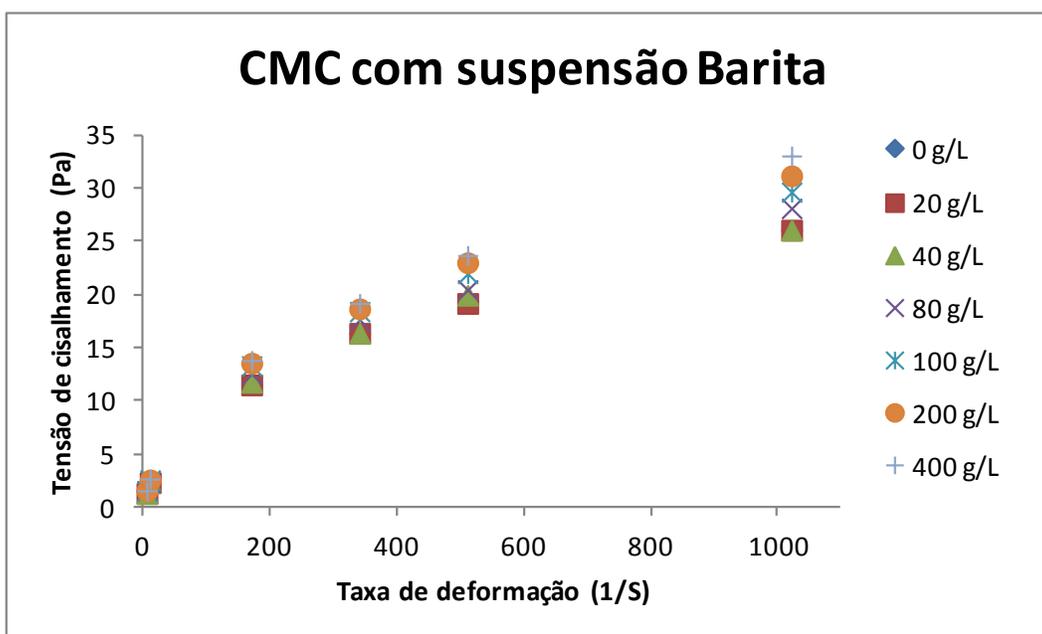


Figura 25- Ensaio reológico de CMC e suspensões com concentrações de barita de 20 a 400 g/L.

4.4. Ensaio de Atenuação Dinâmicos

Neste item são apresentados os resultados obtidos no estudo da relação entre a atenuação do som em suspensões aquosas e oleosas, durante o escoamento. Para realizar tais experimentos, utilizou-se a unidade *online* para fluidos base água e a unidade experimental para fluidos base óleo.

4.4.1. Ensaio em fluidos base água

Foram realizados ensaios em fluxo da atenuação do som para barita, bentonita e calcita em fluidos base água. A medição em fluxo da atenuação do som para água com concentração crescente de sólidos foi iniciada a fim de avaliar o valor máximo de atenuação possível de ser medido pelo Rhosonics em fluidos base água.

Foram produzidas suspensões com diferentes concentrações, partindo de fluido isento de sólido, até atingir cerca de 800g/L, com medição contínua da atenuação, velocidade do som no meio e viscosidade aparente. A **Figura 26** ilustra o ensaio de atenuação realizado com água e calcita, um sal insolúvel.

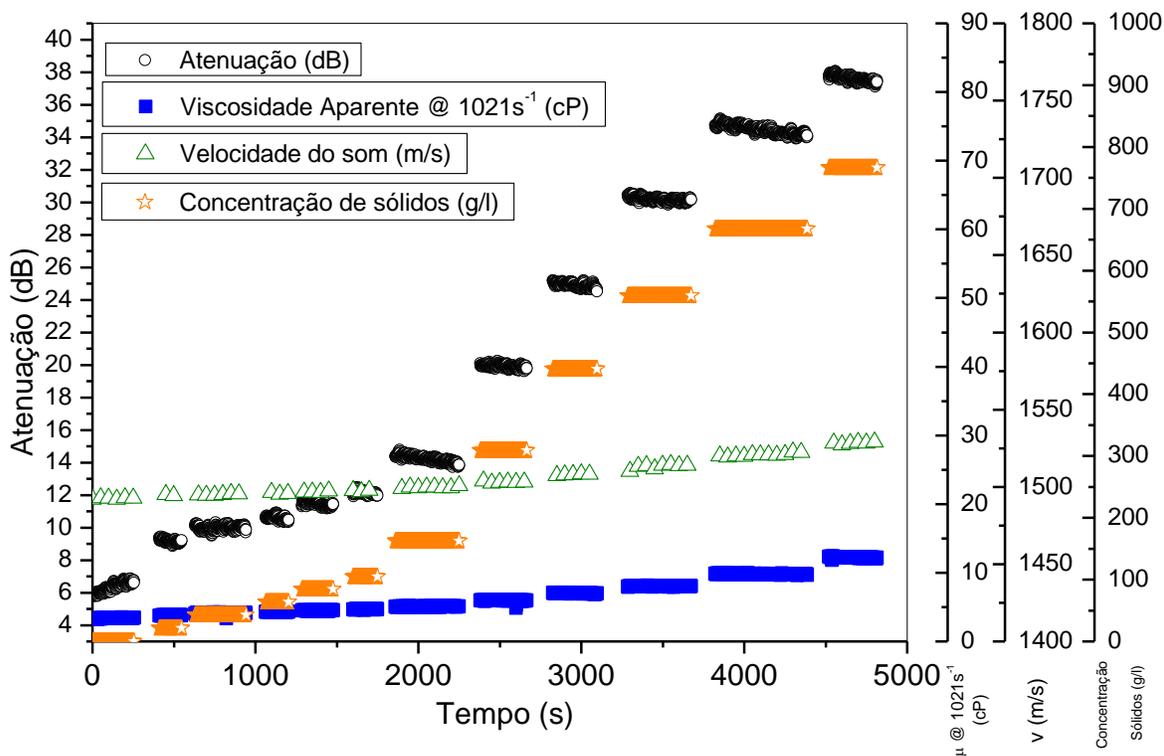


Figura 26– Valores obtidos de atenuação do som para calcita dispersa em água.

Observou-se neste gráfico a variação de 6dB até a atenuação máxima de 38dB para a concentração final de sólidos de 800g/L, pode-se ainda observar variação significativa da viscosidade aparente (saindo de 5cP para apenas 10Cp ou aumento de 100%) e variação não significativa da velocidade do som (iniciando em 1500m/s e alcançando 1525m/s ou em torno de 2%).

É possível constatar que, mesmo para elevadas concentrações de sólidos, o equipamento conseguiu medir sem atingir a saturação de escala, de modo que a cada acréscimo de concentração de sólidos, houve aumento de atenuação do som.

Foi realizado ensaio de atenuação de barita em água. Seguindo os mesmos parâmetros da calcita, partiu-se de água isenta de sólidos e a concentração de barita foi aumentada continuamente, com medição contínua da atenuação, velocidade do som no meio e viscosidade aparente. A **Figura 27** ilustra o ensaio de atenuação para suspensão de barita em água.

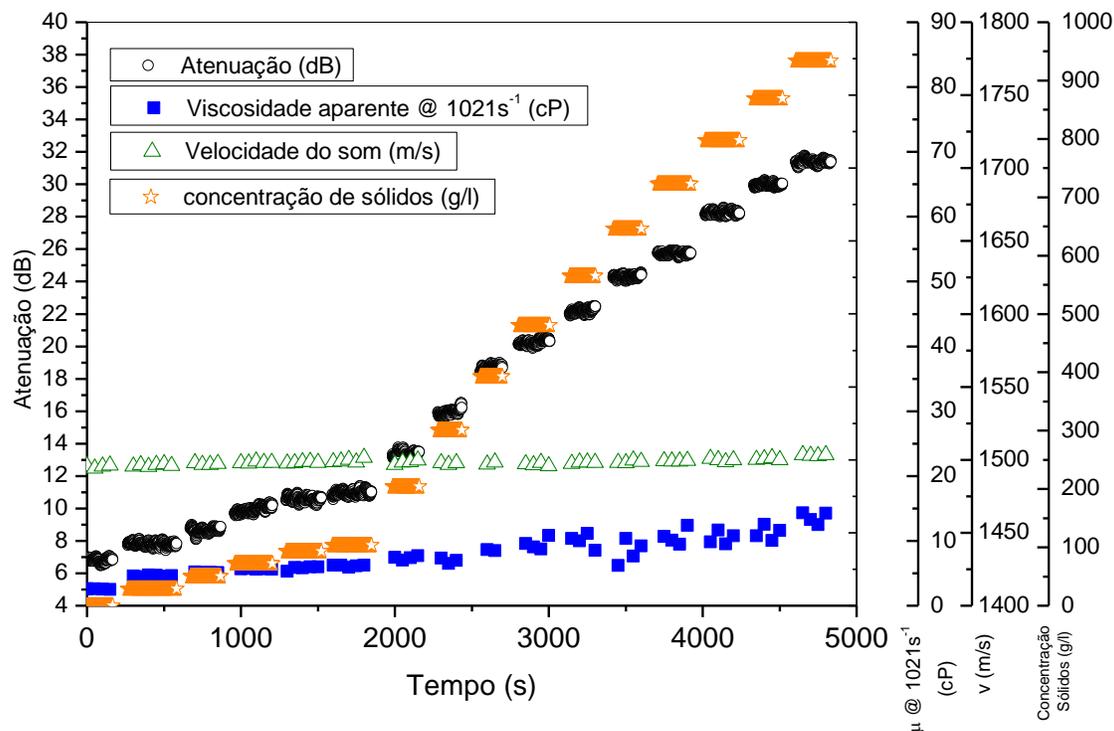


Figura 27– Valores obtidos de atenuação do som para barita dispersa em água.

É possível verificar que a presença da barita em suspensão causa um aumento proporcional na atenuação conforme é aumentada a concentração. Semelhante à calcita, a velocidade do som não registrou mudanças significativas, porém para a viscosidade houve visível aumento. Observa-se a velocidade do som aparentemente constante em 1500m/s e uma viscosificação aparente aumentando de 6 cP para a máxima de 14 cP (aumento de 133%). Pode-se ainda observar que para barita a atenuação não ultrapassou 32dB mesmo alcançando a concentração de 950g/L e comparado com a calcita que alcançou 38dB para concentrações de sólidos próximas a 800g/L, temos assim a barita como um sólido que contribui menos que a calcita para atenuação do som.

Tais resultados obtidos para a atenuação do som corroboram com os resultados obtidos por Carvalho (2013), o qual observou comportamento linear entre a atenuação do som e o aumento na concentração de sólidos. Porém o mesmo observou que tal correlação pode não necessariamente linear, variando conforme diversas características do sólido e do fluido testado.

O experimento realizado com a bentonita foi acompanhado com maiores intervalos após as adições devido ao tempo de hidratação e inchamento apresentado por este sólido. A **Figura 28**

ilustra o resultado obtido para experimento realizado com adição de bentonita em meio aquoso.

A bentonita é um viscosificante largamente empregado na indústria petrolífera por ter como característica o inchamento, este sólido se expande em contato com a água, aumentando consideravelmente a viscosidade do fluido, mesmo em baixas concentrações. Foi realizado ensaio, porém com tempo total superior aos anteriores, devido ao tempo de inchamento e foi observado aumento expressivo da viscosidade aparente, mesmo em concentração máxima de 180g/L, a suspensão alcançou 40cP. Deve-se ressaltar que a barita com concentração de sólidos próxima a 950g/L alcançou apenas 14cP e a calcita com concentração de sólidos próxima de 800g/L alcançou somente 10cP .

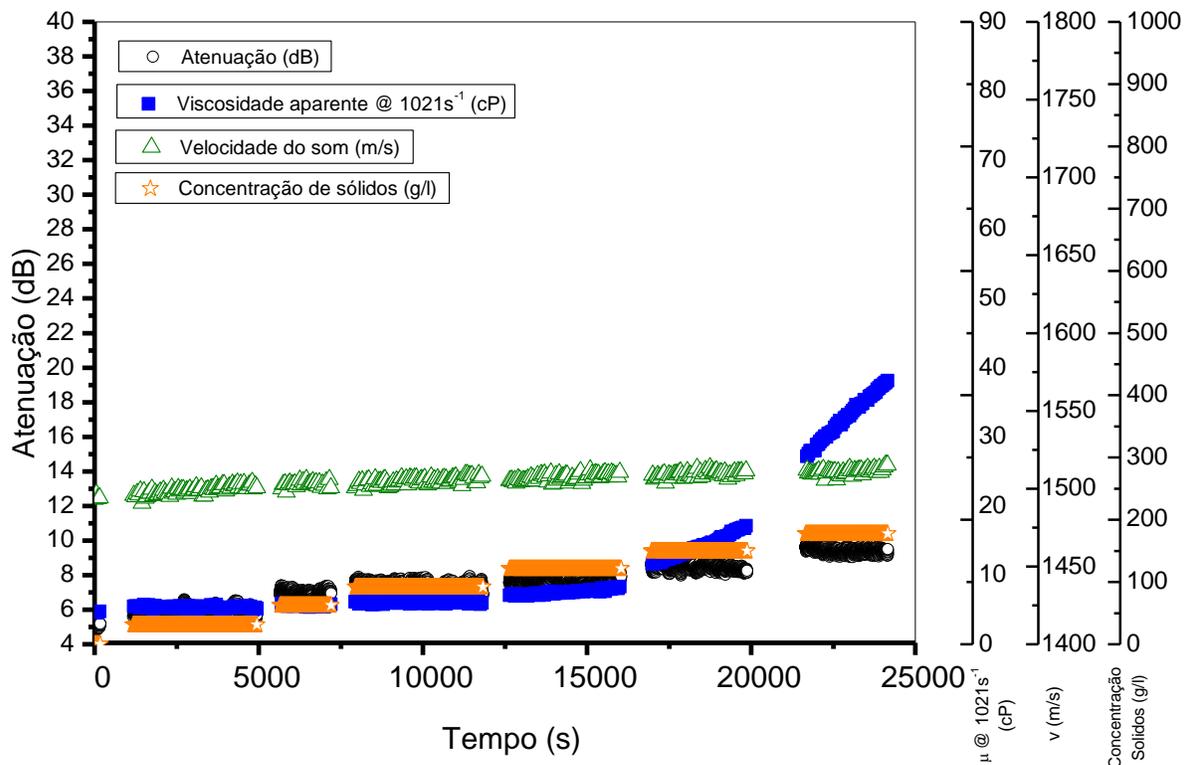


Figura 28– Valores obtidos de atenuação para bentonita dispersa em água.

Foram realizadas apenas seis adições de bentonita, alcançando a concentração máxima de 180g/L, e observou-se que a viscosidade também interfere na medição do equipamento, o que explica em parte a obtenção de valores inferiores quando comparados com os da calcita e da barita, que não possuem essa característica. Constatou-se ainda, o aumento da atenuação do som com a concentração e aumento da viscosidade aparente após tempo de hidratação e inchamento. Houve interrupção do teste devido dificuldade de bombeio da suspensão em função da alta

viscosidade adquirida. Similar aos testes anteriores, não houve aumento significativo da velocidade do som (manteve-se em torno de 1520 m/s).

Para avaliar a influência de cada sólido e aferir a atenuação do som pelo equipamento, foi plotado gráfico reunindo todos os valores de atenuação do som por concentração de sólido para cada mineral estudado. Podemos observar na **Figura 29**, que o calcita tem grande e proporcional participação na atenuação do ultrassom, seguido da barita e por último da bentonita. Estes resultados corroboram com resultados apresentados por VAZ (1995), que correlaciona o aumento da atenuação do som com o aumento do tamanho da partícula. Considera-se que para sólidos insolúveis, em mesma concentração e mesmo meio, obtém-se atenuações diferentes em função da maior área de reflexão de cada sólido.

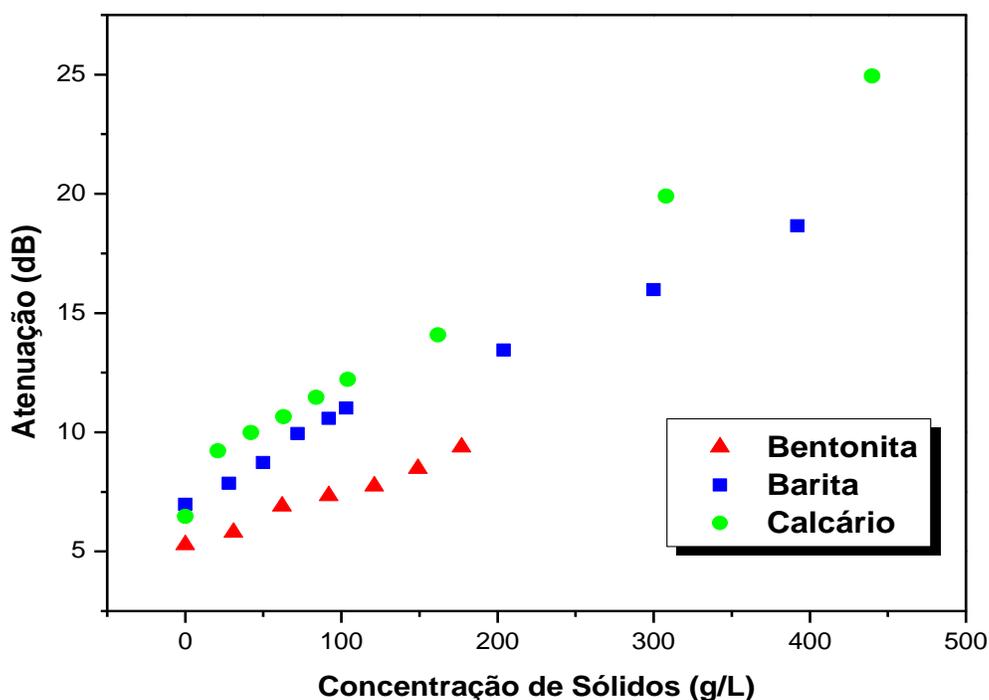


Figura 29– Valores de atenuação de cada sólido por concentração.

Na **Figura 30** são comparados os resultados de atenuação do som obtidos para suspensões de barita, bentonita e calcita. Neste gráfico pode-se observar a concentração de sólidos, o tempo inicial das adições e a atenuação do som causada pelas adições. Observou-se através do tempo de experimento a resposta do equipamento frente à nova concentração de sólidos e que existe uma pequena redução na atenuação do som após alguns segundos.

Pode-se observar esta redução na inclinação dos pontos do gráfico, que ficam mais

evidentes nas maiores concentrações com calcita em aproximadamente 3500 segundos. Este fenômeno de estabilização do sinal pode ser observado em todos os testes realizados e atribui-se a reflexão inicial do som, havendo uma posterior estabilização e corroboram com os estudos de Zheng & Zhang (2004).

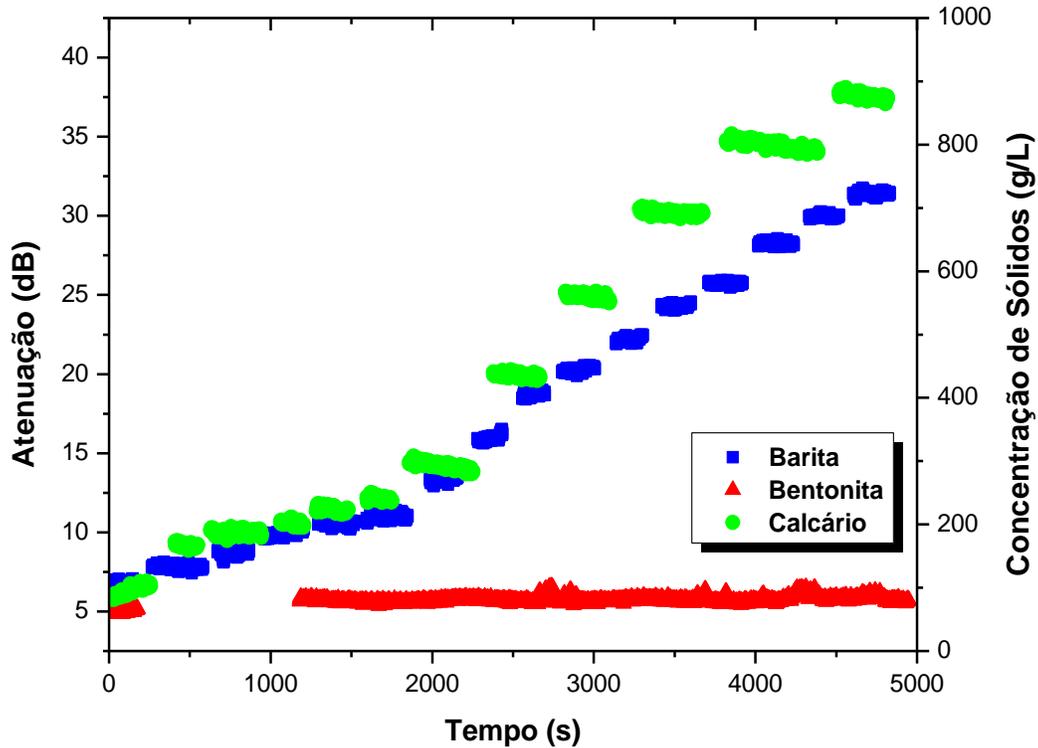


Figura 30- Ensaio de atenuação para barita, bentonita e calcita em água.

As curvas obtidas pela atenuação do som, para adições de barita e calcita foram coincidentes apenas até aproximadamente 33 minutos (2000 segundos). Fato atribuído às baixas concentrações de sólido (até 250g/L). Observa-se ainda que a bentonita encontra-se constante, pois sua adição teve intervalos maiores que 5000 segundos, constando somente uma adição neste período apresentado.

4.4.2. Ensaio com sólidos solúveis

Através dos experimentos com cloreto de sódio em meio aquoso (Figura 31) avaliou-se a influência de sólidos solúveis na atenuação do som, velocidade do som e viscosidade aparente do fluido. As concentrações expressas no gráfico (25, 125, 225 e 300 g/L) estão plotadas apenas

para identificar em que momento foram introduzidas e quanto em gramas estava na solução, não sendo realmente uma concentração de sólidos, visto que todo o sal foi dissolvido.

Observou-se neste ensaio, aumento considerável da velocidade do som, frente aos outros experimentos com sólidos insolúveis. Neste experimento iniciando em 1500m/s e alcançando 1750m/s para a adição de apenas 300 gramas de cloreto de sódio por litro de água. Atribui-se este aumento a variação de 80% na densidade do fluido, que foi medida através do densímetro de processo da unidade *online*. Neste teste, observa-se uma leve redução da atenuação do som sob viscosidade constante. Segundo LUZ (1998), quanto mais denso for o fluido, maior a velocidade do som e conseqüentemente menor a atenuação do ultrassom no meio.

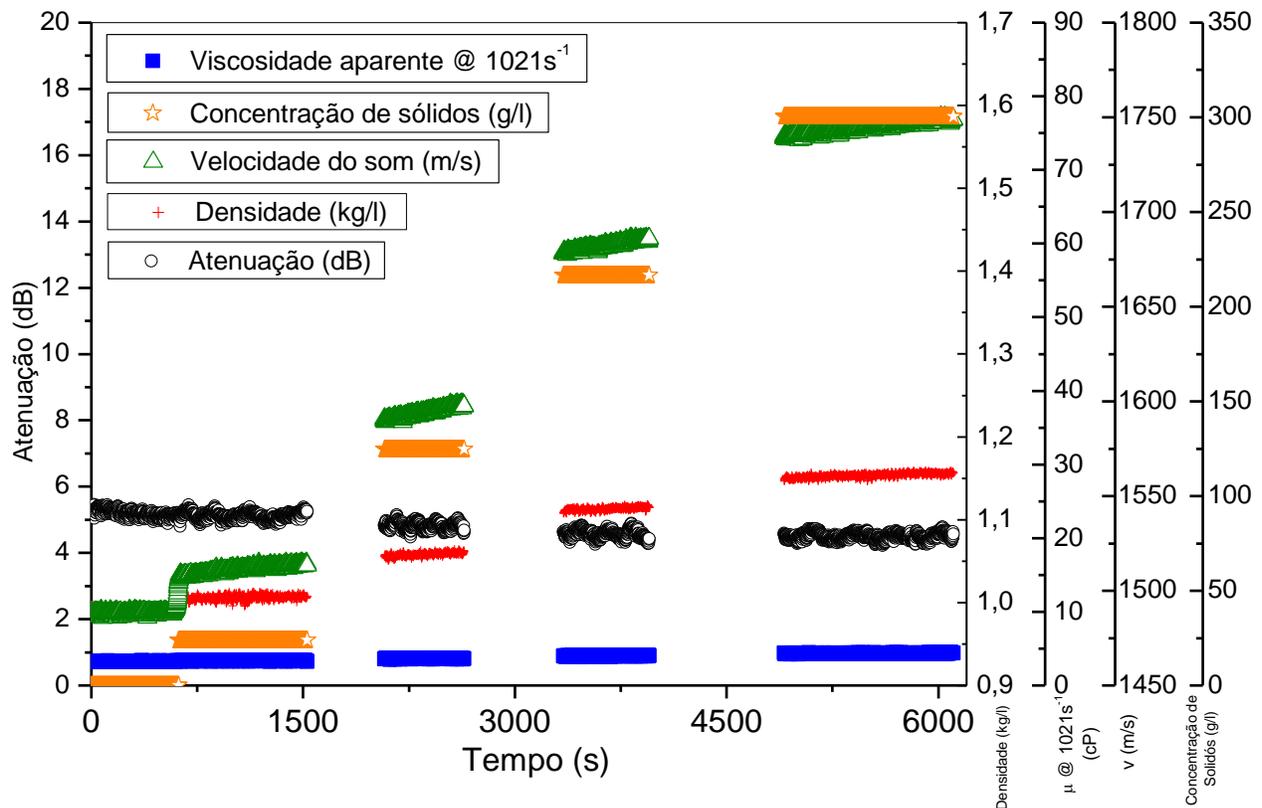


Figura 31- Ensaio de atenuação para cloreto de sódio em água.

4.4.3. Ensaio em fluidos base óleo

A fim de avaliar o comportamento da atenuação do som em fluidos base óleo, utilizou-se óleo mineral com anti-espumante. Os experimentos foram realizados com aumento gradativo da concentração de sólidos insolúveis assim como nos fluidos base água, foram produzidos três

experimentos com os sólidos (barita, bentonita e calcita), iniciando com óleo isento de fluidos e adensando-os gradativamente até a estabilização do sinal de atenuação. Os dados foram aquisitados e tratados separadamente durante cada experimento e estão representados juntos para explicitar a diferença de interação e atenuação de cada sólido com o meio oleoso.

Observa-se que a atenuação som inicialmente já se encontrava com 20dB (devido a maior viscosidade deste fluido) e que em óleo, não é possível alcançar as mesmas concentrações de sólidos realizadas nos experimentos base água. As adições de sólidos em óleo têm uma maior atenuação quando comparado com as mesmas adições em fluidos base água. Observa-se que em fluidos base óleo na concentração de 100g/L para bentonita existe um acréscimo na atenuação inicial de 15dB, e para a barita, na mesma concentração, esse acréscimo chega a 35dB. Porém, para as mesmas concentrações em fluidos base água, as variações se encontram próximas de 6dB e 7dB (**Figura 29**), respectivamente. Como observado anteriormente, em suspensões de fluidos base água, a bentonita e a barita têm curvas parecidas. A bentonita novamente alcança menor atenuação, devido ao menor tamanho da partícula. A suspensão de calcita apresentou saturação da leitura de atenuação do som desde a primeira adição do sólido, impossibilitando a medição em qualquer concentração. O calcita é considerado um obturante eficiente em adição de óleo (Moreira, 2012). Tal fato pode ter contribuído para o comportamento observado, embora seja possível a ocorrência de aderências dentro do equipamento, o que pode ter causado saturação do equipamento. A **Figura 32** ilustra o ensaio de atenuação realizado com óleo mineral na unidade experimental de atenuação dinâmica, com concentrações iguais para cada sólido com incremento de 20g/L.

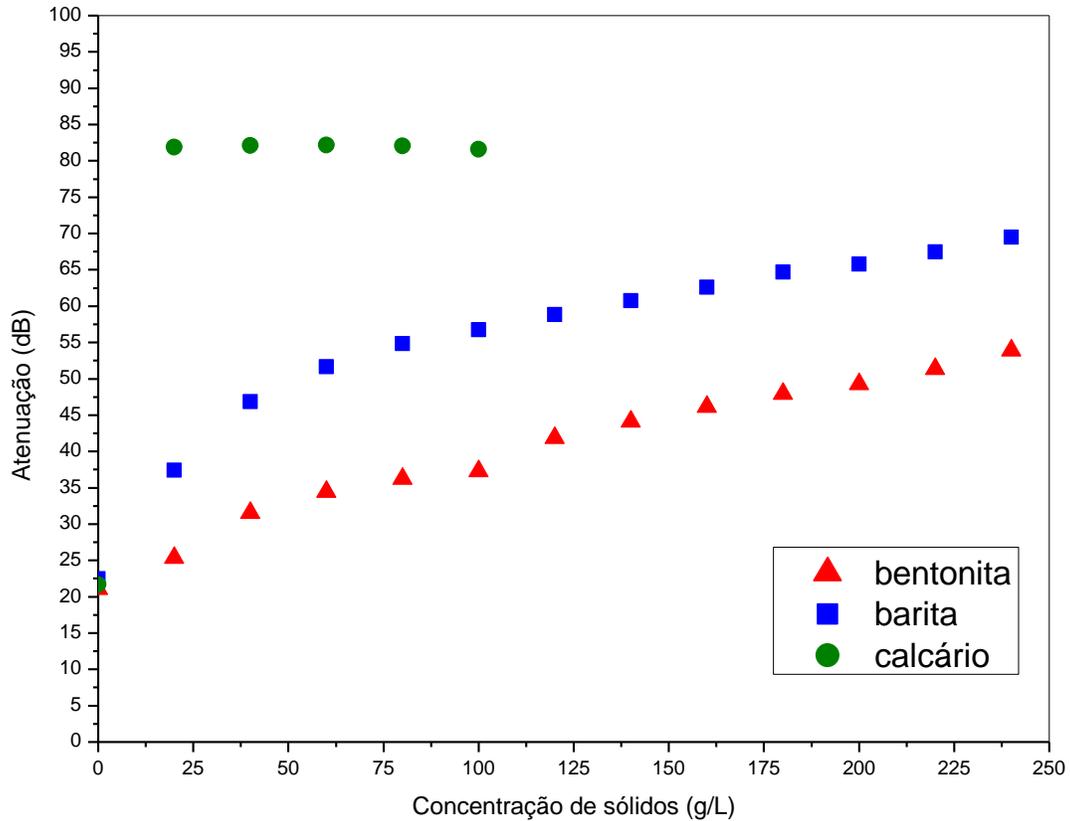


Figura 32- Ensaio de atenuação para barita, bentonita e calcita em óleo mineral.

4.4.4. Comparativo de atenuações em fluidos base água e base óleo

A fim de avaliar a resposta de atenuação do som para fluidos diferentes com o mesmo sólido, foi utilizado o ensaio de barita em óleo com aumento de 20g/L e foi comparado com o que foi realizado em água. Os testes foram plotados para fins de comparação, conforme pode ser observado na **Figura 33**.

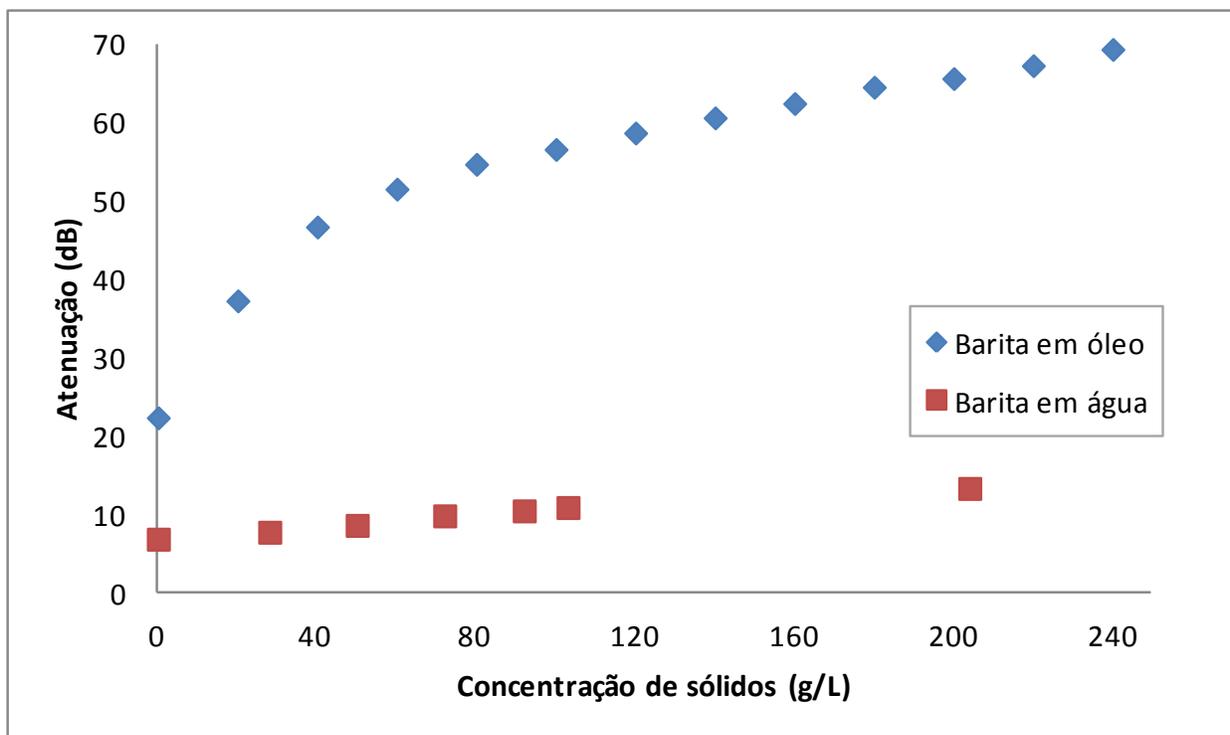


Figura 33– Atenuação de barita em água e em óleo.

Constatou-se, que na adição de barita em óleo, um adensamento de 80g/L equivale a um aumento de mais de 200% na atenuação. Por outro lado, esse adensamento de 80g/L na água apresentou-se menos expressivo, elevando apenas 25% a atenuação do som, podendo-se atribuir essa diferença a mudança de viscosidade do meio. Novamente observamos um aumento brusco da atenuação próximo a 250g/L na curva de barita em óleo e acredita-se que este comportamento observado seja devido à limitação de potência do aparelho para fluidos base óleo visto que houve total atenuação do sinal gerado em concentrações acima de 250g/L.

4.4.5. Fluidos Não Newtonianos

Para avaliar a influência da mudança de reologia na atenuação e velocidade do som, foram realizados separadamente ensaios de atenuação de fluidos com goma xantana e CMC (Carboximetilcelulose) em meio aquoso. Ambos são totalmente solúveis em água são largamente utilizados como viscosificantes em diversos processos industriais e são praticamente indispensáveis na perfuração de poços de petróleo. A **Figura 34** ilustra o ensaio de atenuação de goma xantana à água isenta de sólidos. Assim como no ensaio com cloreto de sódio, na cor

laranja estão representados apenas os momentos das adições, permitindo assim a avaliar o aumento da atenuação do som, em função do tempo, desde o acréscimo de GX.

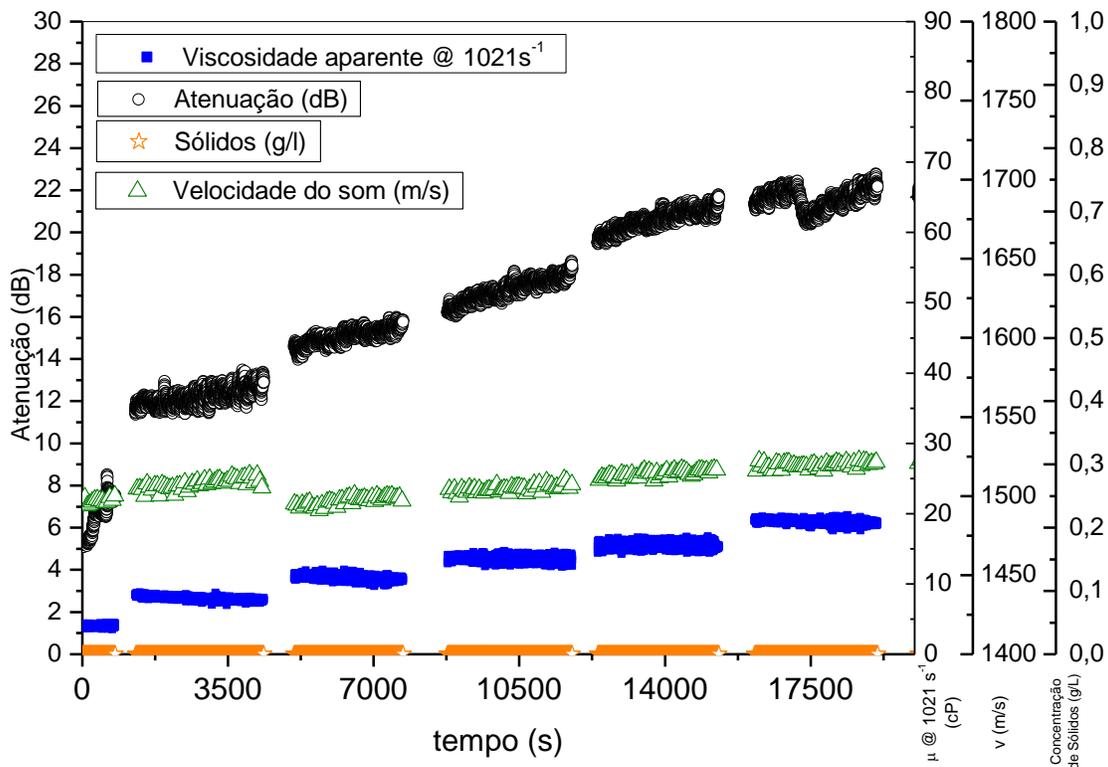


Figura 34- Ensaio de atenuação para goma xantana em água

Observou-se aumento significativo da viscosidade aparente aumentando de 5cP para aproximadamente 20cP e da atenuação do som, iniciando em 5dB e alcançando 22 dB. Assim como observado com o cloreto de sódio, toda a goma xantana adicionada foi dissolvida. Porém no cloreto de sódio, tratando-se um sólido solúvel, pode-se observar aumento da velocidade do som e redução da atenuação do som, visto que aumentou-se a densidade do meio.

O mesmo teste de atenuação do som foi realizado com CMC em meio aquoso, (**Figura 355**). Conforme esperado, houve variação da atenuação para diferentes valores de concentração de carboximetilcelulose. Assim como ocorreu com o aumento de densidade inferida pelo cloreto de sódio, o equipamento mostrou-se sensível também à viscosidade e o comportamento da atenuação e velocidade do som mantiveram-se sob a mesma tendência desde o início das adições.

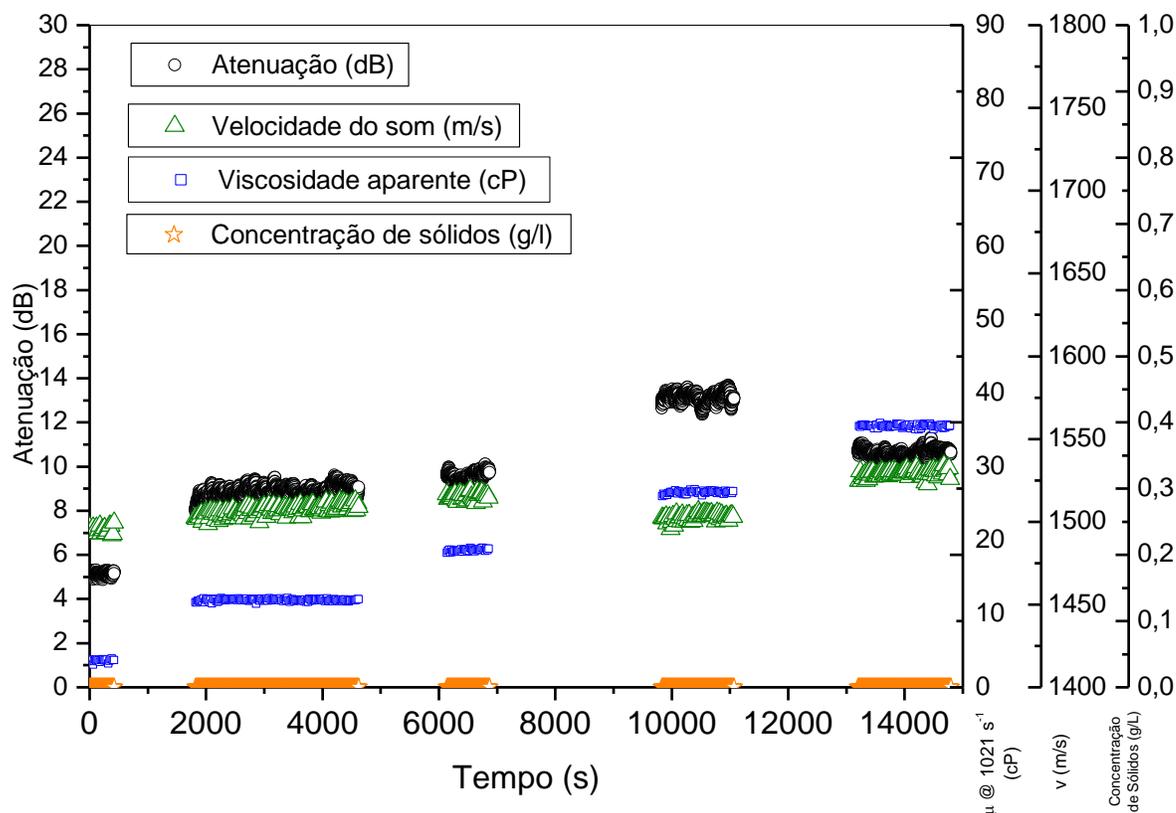


Figura 35 - Ensaio de atenuação para CMC em água

Em 10000 segundos, observou-se aumento da atenuação e queda na velocidade do som. Tal fato pode ser atribuído à formação de grumos de CMC que demoraram nesta adição a dissolver-se. Após a dissolução, houve normalização da atenuação acompanhando a tendência das adições. Observou-se uma variação de atenuação do som menor com esse viscosificante, que alcançou 14dB frente a 22dB alcançados pela GX, demonstrando que a natureza do polímero também pode influenciar na atenuação do som.

4.4.6. Suspensões de GX e CMC

Os fluidos viscosificados com GX e CMC foram utilizados em testes de atenuação do som com adição de barita, bentonita e calcita seguindo formulação de fluidos de perfuração cedida pelo CENPES a fim de avaliar a atenuação do som frente ao adensamento de fluido Não-Newtoniano.

Foi iniciada a adição de sólidos primeiramente no fluido viscosificado com GX e observa-se que o aumento nos degraus de atenuação do som e viscosidade aparente a cada

aumento de concentração de sólidos, que alcançou concentrações próximas a 900g/L, conforme Figura 366.

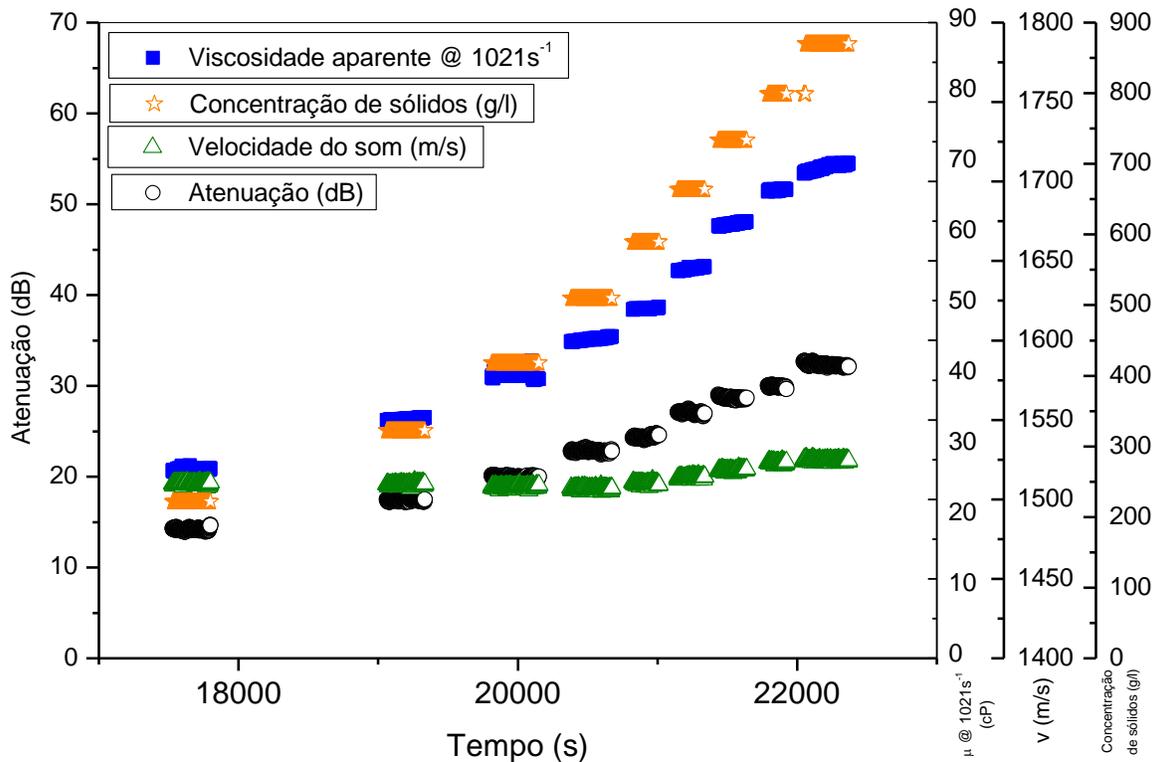


Figura 36– Atenuação do som frente adições de barita, bentonita e calcita em goma xantana.

A atenuação do som aumentou de 15dB para 30dB, a viscosidade do fluido iniciou em 18cP e atingiu 42cP, as adições chegaram de 900g/L, a velocidade do som permaneceu praticamente inalterada e também não observou-se variação da densidade, uma vez que não houve a adição de sólido solúvel.

Sob as mesmas condições, realizou-se teste utilizando o fluido viscosificado com CMC a fim de avaliar a diferença entre a adição de sólidos a este outro polímero. Na **Figura 37** estão ilustrados os resultados após estabilização do CMC. A atenuação e a viscosidade sofrem um constante aumento à medida que os sólidos entram no sistema. Já a velocidade do som permanece constante.

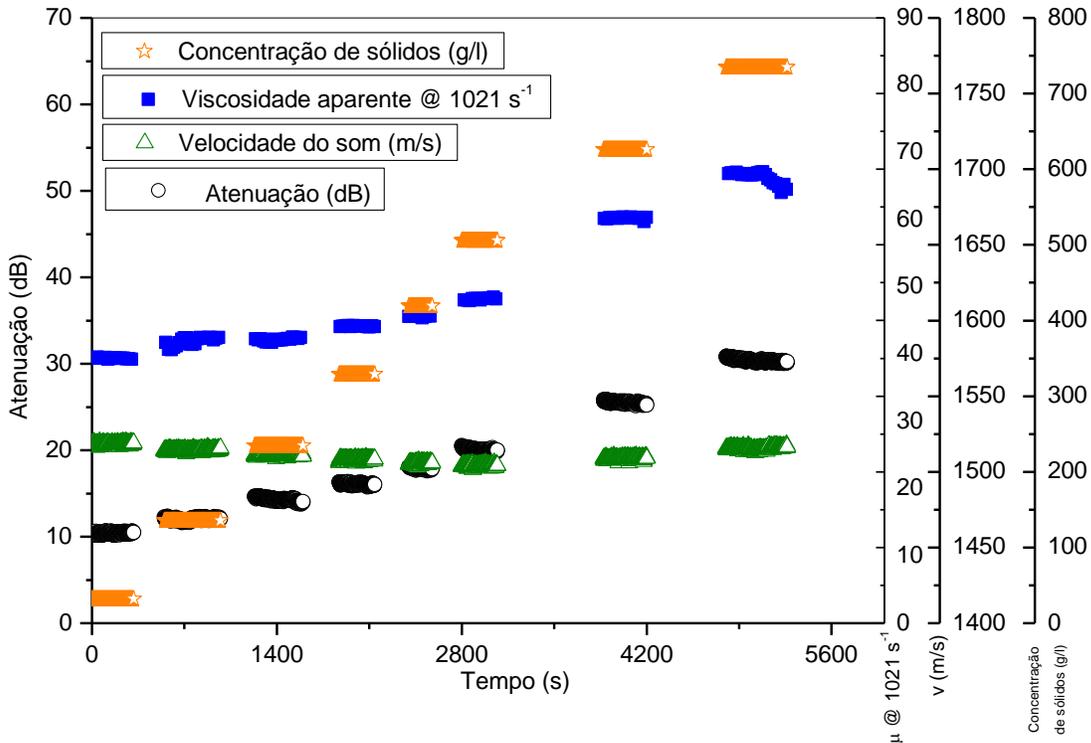


Figura 37–Atenuação do som frente adições de barita, bentonita e calcita em CMC.

Neste caso, observou-se que os sólidos presentes tiveram um menor impacto no aumento de viscosidade em comparação a suspensão de GX., pois apesar de atingirem valores próximos a 70cP, a viscosidade aparente da GX encontrava-se em 20cP e a viscosidade do CMC já estava em 30cP (o fluido com CMC já se encontrava mais viscoso). A atenuação do som final não apresentou diferença considerável na comparação entre os polímeros, alcançou 33dB para GX e 32dB para o CMC. Porém, observa-se uma redução na velocidade do som no experimento com CMC durante o adensamento, possivelmente causado pelo aumento da densidade da suspensão.

Portanto, todos os resultados obtidos registram aumento da atenuação do som frente à adição de sólidos insolúveis devido à formação de suspensões que causam reflexão, refração e espalhamento do feixe acústico, atenuando o sinal emitido.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se confirmar que tanto em meio aquoso quanto em meio oleoso a atenuação ultrassônica tem forte correlação com os sólidos em suspensão. De maneira geral, quanto maior a concentração de sólidos presentes maior a atenuação do som. Por outro lado, a velocidade do som no meio é pouco afetada pela presença destes sólidos insolúveis.

A adição de bentonita em água provoca forte alteração da reologia da suspensão quando comparada aos outros sólidos adicionados. Neste caso, haverá grande aumento da viscosidade aparente da suspensão. Desta forma, o aumento da atenuação do som nestas suspensões ocorrerá tanto pelo aumento da concentração de sólidos como pelo aumento da viscosidade da suspensão provocada pelo inchamento do material.

A adição de viscosificantes como goma xantana e carboximetil celulose em água provocam o aumento da viscosidade aparente do fluido e conseqüentemente aumento da atenuação do ultrassom. Desta forma, os viscosificantes, apesar de serem solúveis, podem ser interpretados erroneamente como aumento da concentração de sólidos. Este fato deve ser levado em consideração no estabelecimento de uma futura correlação entre atenuação do som e concentração de sólidos.

Diferente dos sólidos em suspensão, na presença de sólidos solúveis (NaCl), a atenuação do som foi diminuída, pois estes sólidos ao se dissolverem provocam aumento da densidade do líquido e conseqüentemente aumentam a velocidade do som.

No caso de suspensões oleosas, pode-se concluir que o carbonato de cálcio ocasiona atenuação do som máxima no aparelho, mesmo em baixas concentrações, inviabilizando medidas em fluidos de perfuração que contenham este material.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuro pode-se estabelecer uma correlação empírica entre a atenuação e concentração de sólidos suspensos. A base da correlação poderia ser a equação 9 estabelecida para fluidos puros.

Como proposta para utilização do equipamento na obtenção da concentração de sólidos em escoamentos de fluidos de perfuração, sugere-se confeccionar diversas formulações de fluidos, a fim de a cada nova concentração de sólidos adicionada, acumular dados de atenuação do som durante a preparação. Deste modo, as incertezas de medições da atenuação e velocidade do som (causadas pelas diversas características dos componentes de cada fluido preparado) estariam intrinsecamente consideradas.

Obter-se-ia, tabelas de atenuação do som por concentração de sólidos para cada formulação preparada e por comparação, a cada preparação já tabelada, existiria uma aproximação da concentração de sólidos do fluido tabelado em escoamento através da atenuação causada por este.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L. O. Petróleo: caracterização, identificação situação atual e perspectivas. Monografia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, 2007.

ALMEIDA, M. S. Avaliação e caracterização de goma xantana sintetizada a partir de resíduos aquícolas e de glicerol como fonte de carbono. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em saúde e ambiente. Universidade Tiradentes. Aracaju, 2010.

ALMEIDA, R. F. D. SILVA, W. G. A. L. Avaliação de fluidos de perfuração de base aquosa contendo poliglicóis modificados. Projeto de Final de Curso. Escola Politécnica. UFRJ. Rio de Janeiro, 2010. 62 p.

ANDREUCCI, R. Ensaio por Ultra- Som. Ed. Jul. / 2008. Apostila do Curso de Qualidade–FATEC-SP.

ÂNGULO, J. A. P. Escoamentos de fluido newtoniano generalizado através de dutos com paredes permeáveis. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em engenharia mecânica. Escola de engenharia. Universidade federal fluminense. 2012. 94 p.

AMORIM, L. V. Melhoria, proteção e recuperação da reologia de fluidos hidroargilosos para uso na perfuração de poços de petróleo, Tese Dr., CCT, UFCG, Campina Grande, PB (2003).

BALTAR; C. A. M.; LUZ, A. B. Insumos minerais para perfuração de poços de petróleo. Rio de Janeiro. CETEM/UFPE, 2003.

BARBOSA, M. I. R.; AMORIM, L. V.; BARBOZA, R. A.; FERREIRA, H. C. Desenvolvimento de compósitos bentonita/polímeros para aplicação em fluidos de perfuração. Matéria (Rio J.), Rio De Janeiro, v. 12, n.2, (2007). Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151770762007000200015&lng=pt&nr m=iso. Acessado em 11 dezembro 2014. doi: 10.1590/S1517-70762007200015.

BESSLER, K. E.; RODRIGUES, L. C. Os polimorfos de carbonato de cálcio: uma síntese fácil de aragonita. Quím. Nova, São Paulo, v.31, nº. 1, 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422008000100032&lng=en&nrm=iso>. Acessado em 13/12/2014.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Fenômeno de Transporte. 2ª edição, Editora LTC, 2004. 905p

BOND, L. J., MORRA, M., GREENWOOD, M. S., BAMBERGER, J. A., AND PAPPAS, R. A., Ultrasonic Technologies for Advanced Process Monitoring, Measurement, and Control. Vail, CO, USA. 2003, 20th IEEE Instrumentation and Measurement Technology, pp. 1288-1293.

CARVALHO, R. M. Avaliação da utilização da espectroscopia acústica na análise de sistemas multifásicos de petróleo. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

CASTELLI, A. V. Well Drilling Materials .In: Industrial Mineral and Rocks – 6a Ed. p. 1113 - 1118, Donald C. Carr, 1994.

CHEN, A. Q. FREEAR, S. COWELL, D. M. J. Measurement of Solid in Liquid Content Using Ultrasound Attenuation. 5th World Congress on Industrial Process Tomography. 2007.

DORON, P., BARNEA, D., Flow Pattern Maps for Solid-Liquid Flow in Pipes.Int. J. Multiphase Flow, 1996, Vol. 22, pp. 273-283.

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

HALLIDAY, D. Fundamentos de Física Volume 2 - Gravitação, ondas e termodinâmica. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

HAN, W.; BIRCHAK, J. R.; STORM, B. H.; RITTER JR., T. E. Acoustic sensor for fluid characterization. US6672163 B2. Publicado em 6/01/2004.

JAMES, O. O., M. ADEDIRAN MESUBI, F. A. ADEKOLA, E. O. ODEBUNMI, J. I. D. ADEKEYE. Beneficiation and characterization of a bentonite from north-eastern Nigeria. Journal of the North Carolina Academy of Science. 124 (4). 2008. pp. 154-158.

KAI, L., TAINING, Y. Experimental study on ultrasonic propagation in water based bentonite slurry. Global Geology, 12 (3) (2009).

LORIMER, J. P.; MASON, T. J. Sonochemistry part I – the physical aspects; Chem. Soc. Rev. 1987, 16, 239.

LUZ, L. P. Estudo do Ultra-Som como técnica de extração de carvões e caracterização de hidrocarbonetos poliaromáticos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Química. Curso de Pós-Graduação em Química. 1998.

LUZ, A. B.; OLIVEIRA, C. H. Bentonita. In: LUZ, A. B.; LINS, F. F. Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.

MACHADO, J.C.V. Reologia e escoamento de fluídos – ênfase na indústria de petróleo. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002, p. 21-43.

MAGALHÃES, S.; SCHEID, C.; CALÇADA, L. A.; FOLSTA, M.; MARTINS, A. L.; SÁ, C. H. M. Development of on-line sensor for automated measurement of drilling fluid properties. IADC/SPE-167978-MS. 2014

MARTINES, M. A. U.; DAVOLOS, M. R.; JAFELICCI JÚNIOR, M. O efeito do ultra-som em reações químicas. Quím. Nova vol.23 n.2 São Paulo Mar./Apr. 2000

MASON, T. J.; LORIMER, J.P. Sonochemistry: Theory, Applications and Uses of Ultrasound in Chemistry. Editora Ellis Horwood Limited. Chichester, UK, 1988.

MATHIAS, C. A. S. BARROS, J. C. SANTOS, D. A. Características das rochas selantes e armadilhas. Universitário do Norte – UNINORTE; Laureate International Universities. Manaus, 2011.

MELO, K. C. Monitoramento das propriedades químicas e físicas dos fluidos de perfuração. Monografia de Graduação. UFRN. Natal, 2009;

MELO, K. C. DANTAS, T. N. C. BARROS NETO, E. L. Influência da temperatura na reologia de fluidos de perfuração preparados com carboximetilcelulose, goma xantana e bentonit. HOLOS, Ano 29, Vol. 5. 2013.

MOREIRA, B. A.; AROUCA, F. O.; DAMASCENO, J. J. R. Avaliação da permeabilidade de meios porosos constituídos por carbonato de cálcio utilizado como agente obturante em processos de perfuração de poços de petróleo. Exacta, vol. 10, núm. 3, pp. 341-348 Universidade Nove de Julho. São Paulo, 2012.

NGUYEN, T. Predicting Dynamic Barite Sag in Oil Based Drilling Fluids, The University of Tulsa, Drilling Research Projects. Tulsa-Oklahoma, 2006.

NASCIMENTO, R. A. de M. *et al.* Degradação térmica de fluidos de perfuração argilosos aditivados com polímeros e lubrificante Thermal degradation of clay drilling fluids with polymers and lubricant additives. Matéria, v. 18, n. 2, p. 1329–1339, 2013.

PAIVA, Aplicação de técnicas ultra-sônicas para análise de escoamentos multifásicos do tipo líquido-sólido e líquido-sólido-gás. Universidade Federal de Itajubá. Dissertação de Mestrado. Itajubá, junho de 2011.

PEREIRA L., FARIAS, K. V. E, AMORIM V., FERREIRA H. C. “Influência de Aditivos Dispersantes na Reologia e Espessura do Reboco de Fluidos de Perfuração hidro argilosos”, C3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador, 2005.

POWELL, R. L. Experimental Techniques for Multiphase Flows. Physics of Fluids, 2008, Vol. 20, pp. 1-20.

SAD, C. M. dos S. Desenvolvimento de Metodologia de Extração de Cloretos em Petróleos por Aplicação Indireta de Ultrassom. Universidade Federal Do Espírito Santo. Dissertação de Mestrado. Vitória, 2013.

SCHAFFEL, S. B. A. Questão Ambiental na Etapa da Perfuração de Poços Marítimos de Óleo e Gás no Brasil. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2002.130p

SCHEID, C. M; MAGALHÃES, S. C; NORONHA, E. V. N. Determinação da Concentração de Sólidos Suspensos em Fluidos de Perfuração Base Água por Meio de Ultrassom - X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica. Universidade Severino Sombra. Vassouras-RJ, 2013

SILVA, C. T. Desenvolvimento de fluidos de perfuração a base de óleos vegetais. Monografia. UFRN. Natal, 2003.

SILVA, W. G. A. L. Avaliação de fluidos de perfuração de base aquosa contendo poliglicóis modificados. Projeto de Graduação. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

SWORN, G. Xanthan Gum. In PHILLIPS, G. O. WILLIAMS, P. A. Handbook of hydrocolloids. CRC Press. Capítulo 6. New York, 2000.

THOMAS, J. E. Fundamentos de engenharia de petróleo. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência,

2001.

URICK R.J. A sound velocity method for determining the compressibility of finely divided substances, J. Appl. Phys. 18, 983-987 (1947).

VAZ, C.M.P.; MACEDO, A.; INAMASU, R.Y.; MONTAGNOLI, A.N. Analisador granulométrico de solos por atenuação de raios gama. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Viçosa –MG, 1995.

VENDRUSCOLO. W. C.; Goma Xantana e (M. Scabrella): desenvolvimento de matrizes hidrofílicas para liberação modificada de teofilina. Dissertação (mestrado). Universidade do Vale do Itajaí, Programa de mestrado acadêmico em ciências farmacêuticas. Itajaí, 2005.

VÉRAS, A. M. Balanço Mineral Brasileiro, (2001) Acessado em: 10 dezembro 2014 Disponível em <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/barita.pdf>

VILLELA, M. J. R. Análise do comportamento da temperatura em sistemas de produção de petróleo: comparação entre completação seca e molhada. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro, 2004. 152 f.

WANG, Y. MIN LIT, GONG, C. Effect of on-line Ultrasound on the Properties of Activated Sludge Mixed Liquor in a Membrane Bioreactor. 2011 International Conference on Agricultural and Biosystems Engineering Advances in Biomedical Engineering Vols. 1-2. Beijing Forestry University, 2011.

XU, L. A., GREEN, R. G., PLASKOWSKI, A., BECK, M. S. The Pulsed Ultrasonic Cross-Correlation Flowmeter for Two-Phase Flow Measurements. J. Phys. E.: Sci. Instrum. 1988.

ZHENG, Y., ZHANG, Q., Simultaneous Measurement of Gas and Solid Holdups in Multiphase Systems Using Ultrasonic Technique. Chemical Engineering Science, 2004, Vol. 59, pp. 3505.

ANEXOS

Ensaio estático

Unidade experimental para ensaios estáticos

A fim de iniciar os experimentos de atenuação estática, foi montada uma unidade experimental no Laboratório de Escoamento de Fluidos, LEF, do Instituto de Tecnologia da UFRRJ. A unidade, conforme ilustrada na **Figura 388** consistia em um trecho de tubo PVC conectado ao equipamento Rhosonics, seguido por uma válvula gaveta e galão de 200L, utilizado como purga após finalização de cada experimento. Nestes testes, avaliamos a calibração dos fluidos estáticos (sem fluxo) e coletamos informações de atenuação e velocidade do som. Na Tabela 5 serão apresentados esses dados.



Figura 38– Unidade experimental para ensaios de atenuação estática.

Através da conexão de um trecho de tubo PVC foi possível prolongar a coluna de fluido, de modo a eliminar possíveis efeitos de borda passíveis de ocorrer devido à interface fluido – ar estar muito próxima dos transdutores do Rhosonics.

Atenuação de fluidos

O estudo da atenuação em fluidos isentos de sólidos foi realizado a fim de realizar a calibração do equipamento Rhosonics, a fim de identificação da atenuação em diferentes fluidos.

Ensaio estático de atenuação

A metodologia de ensaio consistiu em realizar medições de atenuação obtidos pelo equipamento Rhosonics na unidade experimental para ensaios de atenuação estática. Ao final de cada experimento, o fluido foi purgado para um galão e o equipamento, rinsado.

Foram realizados ensaios em triplicata tanto para as amostras isentas de sólido quanto para as dispersões avaliadas. Os dados obtidos foram tratados, a fim de se correlacionar a atenuação obtida com a concentração de sólidos dispersos.

Posterior a primeira análise, foi realizado testes de sedimentação, que consistiram na seguinte metodologia.

- a) Preparo e homogeneização da emulsão;
- b) Inserção da emulsão na unidade de ensaio de atenuação estático;
- c) Medição de atenuação até atingir estabilização do sinal.

A Tabela 5 ilustra os valores médios de atenuação para seis fluidos. Paralelamente, foi monitorada a velocidade do som, para fins de comparação.

Tabela 5 – Valores médios de atenuação e velocidade do som medidos para diferentes fluidos.

Componente	Atenuação média (dB)	Velocidade do som (m/s)
Ar	96,37	1728,10
Água	5,85	1497,00
Água de descarte de plataforma	5,67	1539,90
Petróleo bruto	19,57	1483,60
Petróleo de exportação	15,25	1445,67
Óleo mineral	10,08	1446,27

Testes de sedimentação de barita em água e em óleo

A fim de realizar testes de sedimentação de barita em água e óleo foram preparadas amostras de 25g em 500mL de água e óleo. A suspensão era agitada até que não existisse corpo de fundo nos beckers para posteriormente ser analisada. A **Figura 3939** ilustra o resultado obtido para teste de sedimentação de WBM com barita 50g/L. O gráfico à direita representa uma correção linear gerada pelo próprio equipamento Rhousonics.

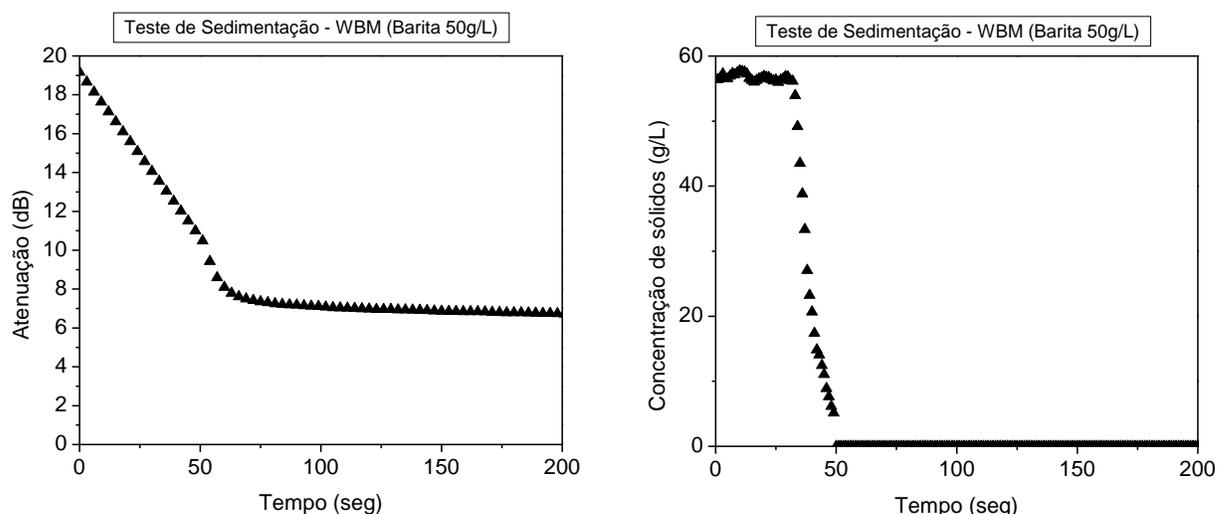


Figura 39 – Teste de sedimentação de WBM barita 50g/L

Observou-se que, para uma concentração inicial de 50g/L de barita em água, o sinal de atenuação foi de 19,1 dB. Após 75 segundos de teste, a atenuação estabiliza-se em torno de 5,8 dB, mantendo uma diferença próxima de 0 (zero) em relação à água isenta de sólidos. Tal resultado também pode ser observado no gráfico de concentração x tempo, embora no início a concentração calculada encontra-se em torno de 56 g/L (diferença de 6 g/L ou 12% da concentração real), após 50 segundos o equipamento já calcula concentração de 0 (zero)g/L no seio da suspensão. Não sendo possível prever a concentração deste sólido em água sem escoamento.

O teste de sedimentação também foi realizado para barita 50g/L em óleo. Com os dados obtidos construiu-se gráfico de atenuação por tempo e velocidade do som por tempo, conforme pode ser observado na **Figura 40**.

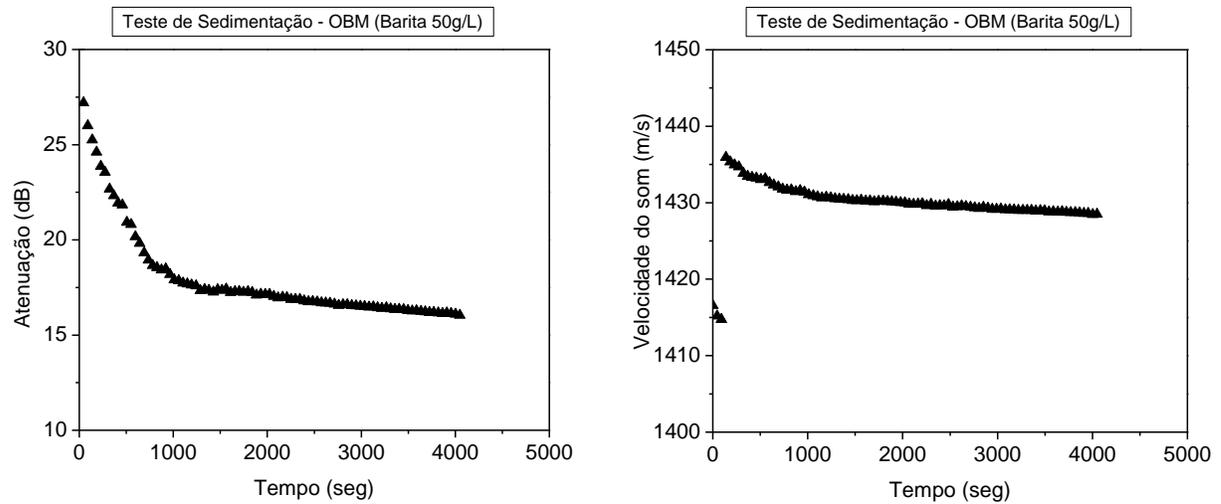


Figura 40-Teste de sedimentação de OBM barita 50g/L.

Constatou-se que, para uma concentração inicial de 50g/L de barita em óleo, foi medida uma atenuação de 30,3 dB, decaindo até se estabilizar em torno de 3000 segundos (ou 50 minutos) em pouco acima de 15dB, sendo a atenuação para óleo isento de sólidos de 10 dB, permanecendo assim uma diferença de 5dB entre a emulsão sedimentada e o óleo isento de sólidos. As **Figuras 41 e 42** ilustram a preparação das amostras.



Figura 41-Pesagem das amostras.



Figura 42- preparação dos fluidos base água e base óleo.

Preparação das amostras

A fim de obter dados de atenuação para fluidos isentos de sólidos, foram preparadas amostras dos seguintes fluidos: água de rede pública, água de descarte de plataforma, petróleo bruto (até 30% água), petróleo de exportação (até 0,5% de água) e óleo mineral. Posteriormente foram preparados fluidos água (WBM – *water based mud*) e fluidos base óleo (OBM – *oil based mud*), tendo como sólidos dispersos barita, bentonita e calcita, separadamente, nas concentrações de 20 a 400 g/L.



Linha Hyspin AWS

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Linha de fluidos hidráulicos de base mineral, com elevada propriedade antidesgaste.

APLICAÇÕES

Recomendados para uso em sistemas hidráulicos operando sob condições severas e altas pressões, utilizando bombas de palhetas e de engrenagens. Atende às exigências da norma DIN 51524, parte 2 (HLP) e ISO LHM.

Siga a recomendação do fabricante do equipamento, na escolha do grau de viscosidade.

CARACTERÍSTICAS

Alta aditivação antidesgaste

Elevado índice de viscosidade

Aditivação antioxidante, anticorrosiva e antiespumante

Graus ISO 10 ao 150

Rápida separação da água (demulsibilidade)
Compatibilidade com metais, tintas e vedações de borracha

BENEFÍCIOS

Assegura longa vida útil das bombas e comandos hidráulicos, reduzindo o atrito entre as partes móveis, minimizando o desgaste.

Permite a utilização segura do produto mesmo sob altas temperaturas, pois garante mínima variação de viscosidade contra a variação de temperatura.

Previne a tendência à formação de borras e depósitos indesejáveis no sistema, aumentando a sua vida útil e prolongando os períodos de troca.

Assegura total proteção das partes do sistema hidráulico contra a corrosão (ferrugem). Evita o desenvolvimento de espuma excessiva, garantindo a formação da película lubrificante uniforme.

Permite a racionalização do número de lubrificantes em estoque; Pode ser utilizado como fluido hidráulico ou como lubrificante em compressores de ar, caixas de engrenagens, etc.

Evita a corrosão do sistema, geralmente provocada pela contaminação por água.

Não ataca os materiais comumente empregados nos sistemas hidráulicos (inclusive selos e gaxetas), eliminando a possibilidade de vazamentos.





Linha Castrol Hyspin AWS

ESPECIFICAÇÕES E APROVAÇÕES

Aprovado pelos fabricantes :
Cincinnati Milacron, Abex Denison, Vickers, Rexnord Racine, Rexroth.

Castrol Hyspin AWS 68 é recomendado pela Schwing Stetter para uso em seus equipamentos hidráulicos.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS PRINCIPAIS ⁽¹⁾

Grau ISO VG		10	15	22	32	46	68	100	150
FZG	estágios	11	11	11	11	12	12	12	12
Densidade 20/4°C	kg/dm ³	0,853	0,859	0,869	0,876	0,877	0,880	0,883	0,886
Viscosidade a 40°C	cSt	10,30	14,11	22,70	30,76	45,30	66,66	97,30	150,0
Viscosidade a 100 °C	cSt	2,600	3,280	4,340	5,140	6,610	8,860	11,20	14,88
Índice de Viscosidade	-	95	97	98	99	107	107	96	99
Ponto de fulgor	°C	170	174	180	205	236	236	232	260

(1) Dados típicos, que não constituem especificações.

PRAZO DE VALIDADE Indeterminado, desde que armazenado tampado, em local limpo e seco.

Revisado em 08/03

Cuidados no uso :

Evite o contato prolongado ou repetido com a pele. Se ocorrer, lave com água e sabão.

Produto reciclável : Não despeje o produto em esgotos, cursos d'água ou na terra. Entregue-o em um posto autorizado (conforme resolução CONAMA).

Embalagem reciclável : Não a descarte no solo, cursos d'água ou em qualquer local não previsto pelo órgão municipal de limpeza pública.

Mantenha o produto fora do alcance de crianças e animais.

Em caso de emergência, contacte nossa Central de Emergência 24 horas : 0800 265544

Maiores informações sobre a aplicação deste e dos demais produtos Castrol, assim como Folhetos de Saúde e Segurança, podem ser obtidas através do nosso Call Center – DDG 0800 7040720 ou diretamente no site da Castrol no Brasil <http://www.castrol.com.br>.



