



## ANÁLISE DOS ENSAIOS REOLÓGICOS, ESPESSAMENTO E RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO NA CARACTERIZAÇÃO DE PASTA PARA CIMENTAÇÃO DE POÇO ONSHORE

Almir Mariano de Sousa Junior<sup>1</sup>; Antônio Eduardo Martinelli<sup>2</sup>; Tancredo Dantas<sup>3</sup>; Manoel Mariano Neto da Silva<sup>4</sup> Daniela de Freitas Lima<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte e Universidade Federal Rural do Semi-Árido –  
[almir.mariniao@ufersa.edu.br](mailto:almir.mariniao@ufersa.edu.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Campus Natal – [martinelli.ufrn@gmail.com](mailto:martinelli.ufrn@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Campus Natal – [tancredo.dts@hotmail.com](mailto:tancredo.dts@hotmail.com)

<sup>4</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFRSA, Campus Pau dos Ferros –  
[mariano.paiva@ufersa.edu.br](mailto:mariano.paiva@ufersa.edu.br)

<sup>5</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFRSA, Campus Pau dos Ferros –  
[danielafreitas12@hotmail.com](mailto:danielafreitas12@hotmail.com)

### RESUMO

A cimentação é de fundamental importância para evitar uma série de problemas durante o funcionamento e exploração do reservatório de hidrocarbonetos, auxilia inclusive no controle da migração de fluidos presentes nas mais diversas áreas permeáveis que são atravessadas pelo poço. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo estudar a formulação de uma pasta de cimento a partir da análise dos processos de ensaios reológicos, bem como dos testes de espessamento e resistência à compressão pelo método ultrassônico. Para tanto, fez necessário planejar e executar os processos de formulação, ensaio reológico, testes de espessamento e resistência a compressão pelo método ultrassônico. A partir dos experimentos realizados, formulou-se uma pasta de acordo com os padrões da American Petroleum Institute - API, determinou-se o tempo de bombeio e o tempo de pega. Portanto, verifica-se que a pasta formulada ao longo da pesquisa exhibe propriedades específicas, atendendo as condições operacionais e as exigências de substituição de fluido de perfuração, apresentando em estado sólido baixa permeabilidade e resistência as condições de pressão e temperatura do fundo do poço.

**Palavras-chave:** Ensaio Reológico, caracterização de pasta de cimento, ensaio de espessamento, ensaio de resistência à compressão.

### 1. INTRODUÇÃO

A cimentação de um poço de petróleo é o processo responsável pelo preenchimento do espaço anular entre as paredes do poço e os tubos de revestimento. Conforme Thomas (2001), esta etapa do processo é de fundamental importância para evitar a migração de fluidos presentes nas mais diversas áreas permeáveis que são atravessadas pelo poço, além de formar uma espécie de selo no fundo do poço proporcionando dessa forma a correção de desvios provenientes da formação e da

perfuração. Para a execução da cimentação é realizado o bombeamento de cimento e água através dos tubos de revestimento. A pasta de cimento utilizada neste processo é composta por cal, sílica, alumina e óxido de ferro, sendo que esta composição pode ser alterada de acordo com as características físicas e químicas do local perfurado, ressalta-se também que a cimentação pode interferir nas características da formação geológica, bem como na seletividade dos fluidos explorados. Dentro deste processo, pode-se distinguir os tipos de cimentação, Couto (2004), cita a cimentação primária



e a secundária. Assim, faz-se necessário abordar o assunto em questão devido a sua importância para a execução das atividades do poço.

A cimentação primária é uma das etapas mais importantes durante o processo de completação do poço, visto que esta tem como objetivo principal promover a fixação dos tubos de revestimento e assegurar uma maior eficiência durante a execução das etapas seguintes. Além disso, Santos (2013) afirma que por se tratar de um processo delicado, o surgimento de problemas neste procedimento podem desencadear perdas significativas quanto à produção e a manutenção do reservatório.

Mediante a tais discussões, o presente trabalho tem por objetivo estudar a formulação de uma pasta de cimento a partir da análise dos processos de ensaios reológicos, bem como dos testes de espessamento e resistência a compressão pelo método ultrassônico para cimentação primária de um poço *onshore*.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Formulação da pasta de cimento

Para atender as exigências da operação de cimentação, as pastas de cimento devem ser projetadas para apresentar propriedades específicas tanto durante o estado líquido, quanto no estado sólido. Por isso, dentre os aditivos químicos utilizados tem-se os aceleradores, estes são aditivos químicos utilizados para reduzir o tempo de espessamento de pastas de cimento. O acelerador mais comum é o cloreto de cálcio, mas outros sais de cloreto também agem como acelerador de pastas de cimento, assim como carbonatos, silicatos e aluminatos.

Constantemente, são utilizados os retardadores, estes aditivos são empregados para aumentar o tempo de espessamento, de modo a permitir que

toda a pasta seja bombeada para a posição programada. A classe mais comum de retardadores são os sais derivados do ácido ligninossulfônico. Há também a aplicação de dispersantes, visto que as pastas de cimento são dispersões bastante concentradas de sólidos em água. Outros aditivos muito importantes são os controladores de filtrado, são adicionados a pastas de cimento para reduzir o volume de líquido que é perdido para formações geológicas permeáveis.

### 2.2. Ensaio Reológico

Após homogeneizadas, as pastas foram colocadas em copo térmico e cisalhadas em viscosímetro aplicando-se várias taxas de velocidade, de acordo com a Norma API. Nessas condições, e com a temperatura de 99°F, foram feitas leituras ascendentes e descendentes da deflexão do viscosímetro. Após 10 segundos de rotação a 3 rpm, efetuamos a leitura inicial. E em seguida todas as leituras restantes após 10 segundos na velocidade de teste em ordem crescente de rotação até o limite de 300 rpm. Concluiu-se as leituras após 10 segundos na velocidade de teste em ordem decrescente de rotação até o limite de 3 rpm. A mudança para a próxima velocidade deve ser feita imediatamente após a tomada de cada leitura.

Em seguida, realiza-se o condicionamento da pasta por 1 minuto a 300 rpm para determinação dos géis da pasta de cimento. Desligou-se o viscosímetro por 10 segundos e o ajustou-o para uma rotação de 3 rpm. Registrando a deflexão máxima observada imediatamente após o início da rotação do aparelho (gel inicial - Gi). Para finalizar, o aparelho foi desligado por 10 minutos registrando a deflexão máxima observada imediatamente após o início da rotação do aparelho (gel final - Gf). A figura 01 mostra o fluxograma deste processo:



Figura 01: Fluxograma de ensaio reológico

Fonte: Autores, 2015

### 2.3. Teste de Espessamento

Após a preparação da pasta, lubrificou-se e montou a célula cilíndrica para recebê-la. A pasta então, foi vertida na célula, a qual foi fechada e em seguida colocada sobre a mesa rotativa dentro da câmara de pressão. Em seguida, colocou-se o termopar e programou-se o consistômetro pressurizado de acordo com as condições de teste pré-determinadas pelo simulador *Schedule*, a

qual foi feita baseando-se no gradiente gel térmico e de profundidade do poço.

O teste começou em 350 psi e foi realizado até atingir a temperatura de 99°F e uma pressão final de 1900 psi, por um período de 22 minutos. Os parâmetros foram mantidos constantes até a pasta de cimento atingir uma consistência de 100 Uc. A figura 02 apresenta o fluxograma do processo:

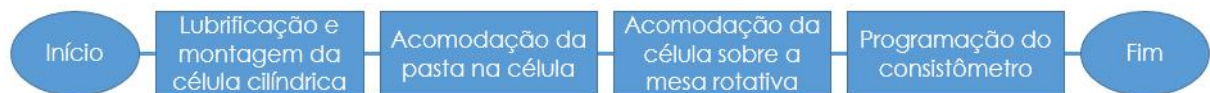


Figura 02: Fluxograma do ensaio de espessamento

Fonte: Autores, 2015

### 2.4. Teste de resistência à compressão pelo método ultrassônico (UCA)

Para a realização desse teste, fez-se primeiramente a calibração do equipamento *Ultrasonic Cement Analyzer* (UCA), em seguida, lubrificaram-se as paredes da célula com uma camada fina de graxa (à base de silicone), e também engraxou-se a rosca superior e inferior da célula, certificando-se que todos os sistemas da célula estavam firmemente

vedados. A partir disso, verteu pasta de cimento na célula de teste. Preencheu-se com água desde o topo da pasta de cimento em teste até o indicador de nível, posicionado no topo da célula. A partir dos dados simulados obtidos pelo *Schedule* foram realizados o aquecimento e pressurização. A resistência mecânica foi obtida em tempos de cura 8h, 12h e 24h. A figura 03 mostra o fluxograma das etapas do ensaio de resistência à compressão pelo método ultrassônico:

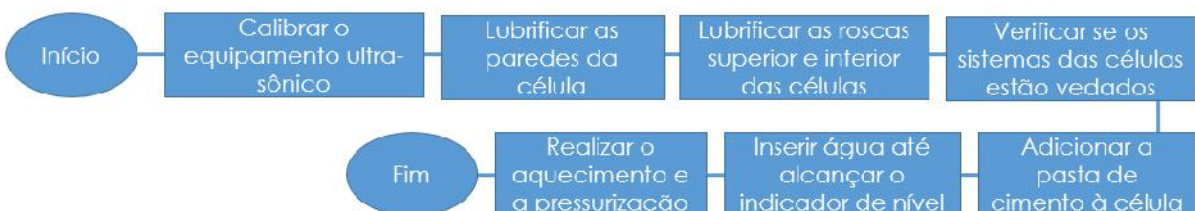


Figura 03: Fluxograma do teste de resistência a compressão pelo método ultrassônico

Fonte: Autores, 2015



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Características da Pasta

Essa seção irá discutir os resultados obtidos com relação a preparação da

pasta, interação entre os aditivos utilizados e análise dos testes realizados, verificando se eles atingiram as condições de poço exigida. A caracterização do poço e da pasta estão apresentadas nas tabelas 01 e 02:

Tabela 01: Características do poço

Profundidade vertical	1000 metros
Gradiente geométrico (GG)	1,7 °F/100 ft
Densidade da pasta	15,6 lb/gal

Fonte: Autores, 2015

Tabela 02: Características da Pasta

Reologia	L300<180 cP
Filtrado	Entre 60 e 100 ml em 30 minutos
Água livre	Nula
Estabilidade	API RPI10B
Tempo de corte e da resistência	24h por UCA

Fonte: Autores, 2015

#### 3.2. Formulação da Pasta

Os aditivos que utilizamos para essa formulação foram: antiespumante, controlador, dispersante e retardador de pega. Na primeira formulação obteve-se o valor de densidade aparente de 275 Cp (300>180 cP) e de filtrado aproximadamente 46 ml (abaixo do valor desejado). Ou seja, para a reformulação da pasta foi necessário diminuir o controlador, com o objetivo de controlar menos a pasta (e com uma função secundária de redução de viscosidade) e também precisava-se aumentar o dispersante, para diminuir ainda mais a viscosidade da pasta. Para os outros

aditivos não houveram necessidades de variações, pois o antiespumante foi eficiente na sua função uma vez que a densidade deu 15,6 lb/galão (se houvesse muito ar aprisionado dentro do material, haveria uma redução na quantidade de massa, e aumentaria o volume, resultando portanto em uma menor densidade e o antiespumante deveria ser variado). E por fim, também não houve necessidade de variar o retardador de pega pois nesse trabalho é necessário apenas reportar o tempo de bombeabilidade. Os dados referentes à nova formulação estão dispostos na tabela 03:

Tabela 03: Formulação da pasta

Aditivo	Vol. Esp. (gal/lb)	CAMPO		LABORATÓRIO	
		Concentração	(gpc ou %)	Massa (g)	Volume (ml)
Cimento	0,0382	68,4	% em peso	767,69	244,7
Água	0,1202	5,0418	gpc	343,63	343,6
Antiespumante	0,1223	0,015	gpc	1,00	1,0
Dispersante	0,1130	0,060	gpc	4,34	4,1
Controlador	0,1997	0,350	%	2,69	4,5
Retardador	0,1099	0,030	gpc	2,23	
Massa especif.	15,6	Vol. pasta (ml)	600,0	1121,6	598,0



(lb/gal)

PROPRIEDADES CALCULADAS			
Massa específ. (lb/gal):	15,6	Água de mistura (gpc):	5,1825
Fator água-cimento (%):	44,76	Rendimento (pé3/pé3):	1,1728

Fonte: Autores, 2015

### 3.3. Testes Reológicos

De acordo com o Modelo de Bingham, com os dados obtidos através do teste de reologia, determinou-se as

propriedades e os parâmetros reológicos da pasta de cimento formulada. Os dados obtidos estão presentes na tabela 04:

Tabela 04: Leituras ascendentes e descendentes da deflexão do viscosímetro com rotação variando de 3 a 300 rpm.

REOLOGIA			
T (°F)			99°F
rpm	Asc.	Desc.	Média
300	173		173
200	112	116	114
100	62	62	62
60	35	36	35,5
30	22	19	20,5
20	17	15	16
10	10	6	8
6	7	4	5,5
3	4	2	3

Fonte: Autores, 2015

Sabendo-se que a viscosidade aparente é dada diretamente através do L300, tem-se que a pasta apresentou reologia fluída pois L300 resultou em 173 cP, como é possível observar na tabela 04. Portanto, obteve um valor menor do que o valor estimado de 180 cP. Isso implica dizer que o aumento da concentração do dispersante (comparando a pasta hipotética com a formulação utilizada) influenciou positivamente para o sucesso da pasta, uma vez que a sua função é reduzir a viscosidade da pasta de cimento, provocando a separação de partículas. Outro fator que ajudou foi a redução da

concentração do controlador, pois esse aditivo também tem como função (secundária) reduzir a viscosidade da pasta e portanto aumentando a sua fluidez.

### 3.4. Espessamento

Os dados de consistometria da pasta em uso estão descritos na tabela 5. Nesse trabalho tinha como objetivo a determinação do tempo de bombeio e pega (gráfico 1). Por esse motivo, não foi necessário variar o aditivo retardador de pega uma vez que não precisou reduzir a cinética de reação de hidratação.



Tabela 05: Resultados obtidos através do teste de Espessamento

Bombeabilidade %	0%	25%	50%	75%
Consistência(UC)	17	17	16	17
TE(min)	0	90	180	270

Fonte: Autores, 2015

Através da Figura 01 pode-se observar que o Tempo de Bombeabilidade (50Uc) foi de 5 horas e 28 minutos enquanto que o tempo de espessamento (100Uc) foi de 6 horas e 2 minutos. Esses valores são muito importantes para saber a margem de tempo para trabalhar com a pasta em campo. Nota-se que para adquirir 50 Uc levou muito tempo (5h horas e 28 min.),

porém de 50 Uc para 100 Uc que é o tempo de pega foi rápido (34 minutos), a partir de 50 Uc a consistência é elevada e a bombeabilidade vai sendo dificultada, de 50 Uc até 100 Uc consegue-se bombear mas com alta resistência. Chegando em 100 Uc não há mais trabalhabilidade uma vez que a pasta passa do estado fluído para o estado sólido.

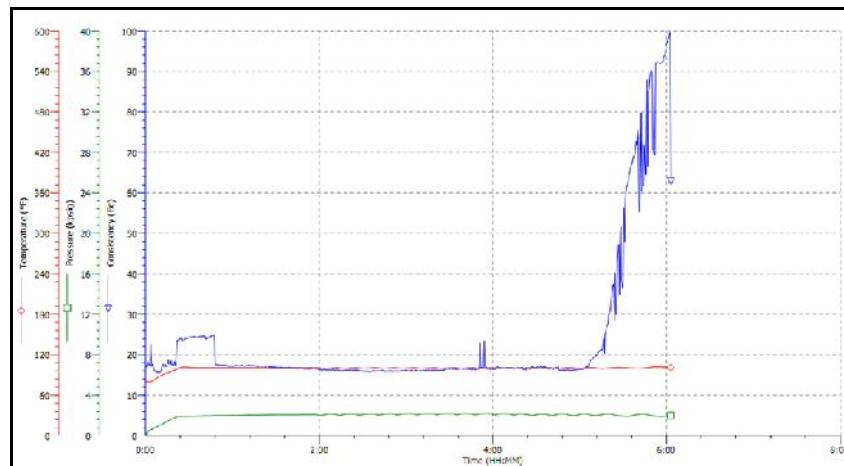


Figura 01: Teste de Espessamento

Fonte: Autores, 2015

### 3.5. Teste De Resistência a Compressão Método Ultra-Sônico (UCA)

O tempo de trânsito é continuamente monitorado. A resistência a compressão é

calculada internamente através das correlações de tempo de trânsito do processados. A Figura 02 apresenta o comportamento da resistência da pasta à compressão:

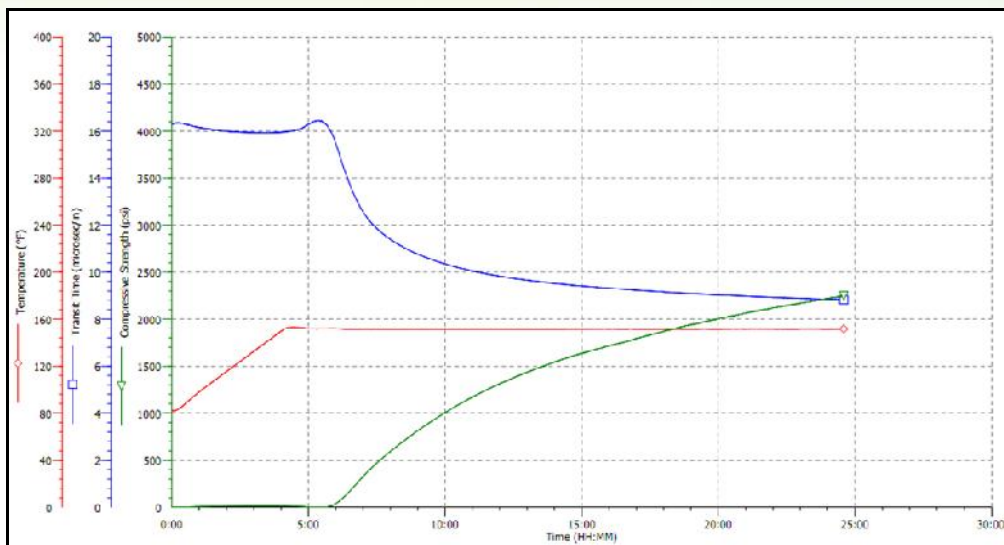


Figura 02: Comportamento da resistência à compressão

Fonte: Autores, 2015

#### 4. CONCLUSÕES

A partir das características do poço trabalhado durante o estudo de caso, foi estudada e caracterizada uma pasta de cimentação a partir da análise dos testes reológicos, espessamento e resistência a compressão.

A pasta preparada ao longo da pesquisa apresenta características específicas que variam junto à mudança do estado físico. No primeiro momento, verifica-se que a pasta atende às condições operacionais e às exigências de substituição de fluido de perfuração. Já no estado sólido, é possível assegurar a baixa permeabilidade, além de alta resistência às condições de pressão e temperatura presentes no fundo do poço.

Tais resultados foram obtidos devido a uma série de fatores diretamente relacionados à formulação. Dentre eles, a viscosidade e densidade (173 cP), redução do tempo de bombeabilidade a partir de 50 Uc e boa resistência à compressão.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARTAXO, C. R. **Análises de pastas de cimento para aplicação em poços de**

**petróleo.** Monografia. Universidade Federal da Paraíba: João Pessoa, 2014

COUTO, João Carlos. **Cimentação de poços de petróleo.** Petrobrás: Rio de Janeiro, 2005.

LIMA, F. M. **Avaliação do comportamento reológico de pastas de cimento para poços de petróleo com adição de plastificantes.** Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Natal, 2006.

NÓBREGA, A. K. C. **Formulação de pastas cimentícias com adição de suspensões de quito-sana para cimentação de poços de petróleo.** Natal/RN: 2009. 135 p. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, PPGCEM, 2009.

NÓBREGA, D. R. S. **Relatório de Aulas Práticas: Ensaio Laboratoriais com Pasta de Cimento Aditivada com Sílica.** Natal/RN: 2013. 31 p. Relatório. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, PPGCEP, 2013.

SANTOS, H.T. **Desenvolvimento de pastas leves utilizando incorporadores de ar para aplicação em poços de**



**petróleo.** 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** Interciência, 2º Ed: Rio de Janeiro, 2001.