

FORMULAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PASTA PARA CIMENTAÇÃO DE POÇO ONSHORE

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF PRIMARY PULP FOUNDATION OF ONSHORE WELL

ALMIR MARIANO SOUSA JUNIOR

Doutorando em Ciência e Engenharia de Petróleo (UFRN). Professor da Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Mestre em Engenharia de Petróleo e Gás Natural.
E-mail: almir.mariano@ufersa.edu.br

ANTONIO EDUARDO MARTINELLI

Doutor em Engenharia de Materiais e Metalúrgica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN.
E-mail: aemart@uol.com.br

TANCREDO DANTAS

Mestrando em Ciência e Engenharia de Petróleo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN.
E-mail: tancredo.dts@hotmail.com

MANOEL MARIANO NETO DA SILVA

Graduando em Ciência e Tecnologia. Universidade Federal Rural do Semi-Árido.
E-mail: marianop.paiva2@gmail.com

Envio em: Março de 2015
Aceite em: Março de 2015

RESUMO

A cimentação de um poço de petróleo pode ser definida como um processo que é responsável pelo preenchimento do espaço anular entre as paredes do poço e os tubos de revestimento. Essa etapa de completação é de fundamental importância para evitar a migração de fluidos presentes nas mais diversas áreas permeáveis que são atravessadas pelo poço. Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo formular e caracterizar uma pasta para cimentação primária de um poço *onshore*. Para tanto, foram necessários planejar e executar os processos de formulação, mistura e homogeneização, ensaios reológico e de filtrado da pasta de cimento, bem como os testes de espessamento, água livre, estabilidade e resistência à compressão pelo método ultrassônico. A partir dos experimentos realizados, formulou-se uma pasta de acordo com os padrões da American Petroleum Institute; as análises do filtrado indicam que este se encontra dentro dos limites desejados; determinou-se o tempo de bombeio e o tempo de pega, além de que se constatou que não ocorreu a formação de água livre. Portanto, verifica-se que a pasta formulada ao longo da pesquisa apresenta propriedades específicas nos estados líquido e sólido. No primeiro momento, atende às condições operacionais e às exigências de substituição de fluido de perfuração. Quando em estado sólido, apresenta baixa permeabilidade e resistência às condições de pressão e temperatura do fundo do poço.

Palavras-chave: Cimentação. Poço *onshore*. Pasta para cimentação primária.

ABSTRACT

The cementing of an oil well may be defined as a process that is responsible for filling the annular space between the walls of the borehole and casing tubes. This completion stage is of fundamental importance to prevent migration of fluids present in several permeable areas that are crossed by the well. In this context, this study aims to develop and characterize a primary pulp cementing of an onshore well. To do so, it must plan and implement the processes of formulation, mixing and homogenizing, rheological testing and filtered from the cement paste and the thickening tests, free water, stability and compressive strength by ultrasonic method. From the experiments, a slurry made according to the standards of the American Petroleum Institute, the analysis of the filtrate indicated that this is within the desired limits, determined the pumping time and setting time, and note that there was no formation of free water. Therefore, it appears that the pulp made during the research shows specific properties of liquid and solid states. At first, meets the operational conditions and drilling fluid replacement requirements. When in solid state, it has low permeability and resistance to pressure conditions and downhole temperature.

Keywords: *Cementation. Onshore Well. Primary Pulp Cementing.*

1- INTRODUÇÃO

A cimentação de um poço de petróleo pode ser definida como um processo que é responsável pelo preenchimento do espaço anular entre as paredes do poço e os tubos de revestimento. Conforme Thomas (2001), essa etapa do processo de completação 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 nesse processo é composta por cal, sílica, alumina e óxido de ferro, sendo que essa 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 desse processo, podem-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 nesse procedimento pode desencadear perdas significativas quanto à produção e à manutenção do reservatório.

Mediante tais discussões, o presente trabalho tem por objetivo formular e caracterizar, a partir da avaliação da homogeneização, ensaios reológico e de filtrado da pasta de cimento, bem como os testes de espessamento, água livre, estabilidade e resistência à compressão pelo método ultrassônico para cimentação primária de um poço *onshore*.

2 METODOLOGIA

2.1 FORMULAÇÃO DAS PASTAS DE CIMENTO

Para atender a exigências da operação de cimentação,

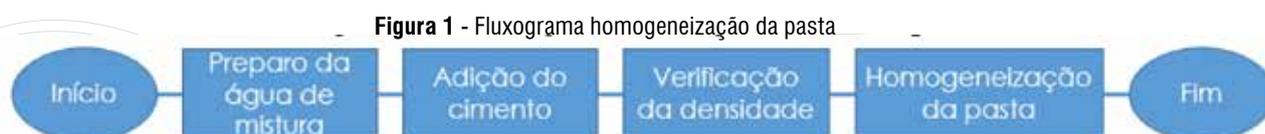
as pastas de cimento devem ser projetadas para apresentar propriedades específicas, tanto durante o estado líquido, quanto no estado sólido. Por isso, dentre os aditivos químicos utilizados, têm-se os aceleradores, estes são aditivos químicos utilizados para reduzir o tempo de espessamento de pastas 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, esses 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 MISTURA E HOMOGENEIZAÇÃO DA PASTA

Inicialmente, preparou-se a água de mistura (água e aditivos) com a seguinte sequência: água, antiespumante, dispersante, controlador e retardador, com uma porcentagem de erro de, mais ou menos, 0,01. O controlador foi adicionado, aos poucos, à mistura, no misturador com rotação de 1000 rpm; já que é um polímero (geralmente derivado da celulose), precisa de um certo tempo para se expandir, portanto, ficou 3 minutos nessa rotação. Em seguida, o cimento foi adicionado através de um funil, sob uma taxa uniforme com uma rotação de 4000 rpm, durante 15 segundos. Sem interrupção (controlado pelo temporizador do misturador), a velocidade de rotação aumentou para 12000 rpm e a pasta foi agitada durante 35 segundos.

Antes do condicionamento da pasta, foi garantido, através da balança de lama pressurizada, que a sua densidade era realmente de 15,6 lb/Gal. Após essa verificação, fez-se a homogeneização da pasta, a qual foi realizada em uma célula de consistômetro atmosférico Chandler (modelo 1200), à temperatura ambiente 74°F até a temperatura de teste 99°F, durante 20 minutos (tempo padrão), simulando o deslocamento do cimento. Após o condicionamento, as pastas foram destinadas aos ensaios. A Figura 01 apresenta o fluxograma do processo de homogeneização da pasta:



Fonte - Autoria própria, 2014

2.3 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. Concluíram-se as leituras após 10 segundos na velocidade de teste em ordem

decrecente 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 acondicionamento da pasta por 1 minuto a 300 rpm, para determinação dos géis da pasta de cimento. Desligou-se o viscosímetro por 10 segundos, ajustando-o para uma rotação de 3 rpm. Foi registrada 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 02 mostra o fluxograma desse processo:

Figura 2 - Fluxograma de ensaio reológico



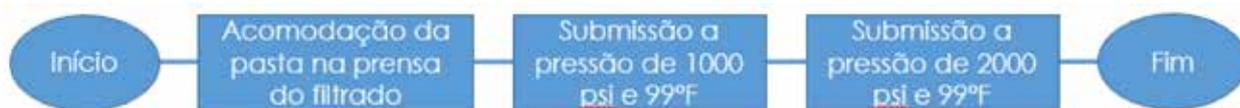
Fonte - Autoria própria, 2014

2.4 ENSAIO FILTRADO

Nesta etapa, a pasta foi colocada em uma célula do filtro prensa, seguindo as normas API, a uma temperatura de 99°F. Submissão a uma diferença de pressão de 1000

psi, durante período de 30 minutos. Após esse procedimento, multiplica-se o valor por 2, pois a célula específica é o dobro da que é utilizada no laboratório. O fluxograma, apresentado pela figura 03, apresenta as etapas desenvolvidas no processo de filtrado:

Figura 3 - Fluxograma de ensaio do filtrado



Fonte - Autoria própria, 2014

2.5 TESTE DE ESPESAMENTO

Após a preparação da pasta, houve a lubrificação e a montagem da 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*, 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 04 apresenta o fluxograma do processo:

Figura 4 - Fluxograma do ensaio de espessamento



Fonte - Autoria própria, 2014

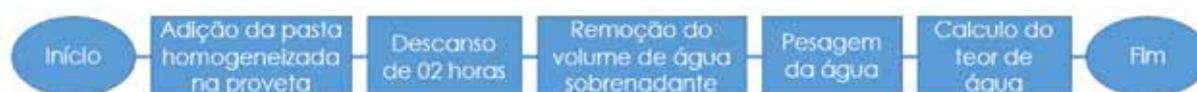
2.6 TESTE DE ÁGUA LIVRE

A pasta foi colocada em uma proveta até o nível de 250 ml e foi tampada para evitar a evaporação. A proveta foi assentada sobre o apoio de vidro e colocada em um

local isento de vibrações. Após duas horas de repouso, o volume da água sobrenadante, desenvolvido na proveta, é retirado e pesado em uma balança analítica. Para calcular o teor de água (%AL), utilize-se a equação 01; a figura 05 expõe o fluxograma desse ensaio:

$$\%AL = \frac{V_{AL}}{250ml (pasta)} \times 100 \quad (\text{Equação 01})$$

Figura 5 - Fluxograma do ensaio de água livre



Fonte - Autoria própria, 2014

2.7 TESTE DE ESTABILIDADE

Colocou-se a pasta dentro de três tubos decantadores previamente engraxados e vedados. Bateu-se, levemente, no interior do cilindro, com um bastão de vidro,

com o objetivo de eliminar as bolhas de ar aprisionadas. Completou-se o volume até o recipiente transbordar. Por fim, enroscou-se a tampa superior vazada, para levar o cilindro à câmara de cura com a água (tubo em banho Maria) à temperatura de poço estático (BHST), durante 24 horas.

$$BHST = (GG \times \text{Profundidade do poço}) + T_{\text{ambiente}} \quad (\text{Equação 02})$$

Após o resfriamento, retirou-se a tampa superior do cilindro, eliminando-se os fluidos existentes no topo do cilindro e, com o auxílio de uma pipeta, injetou-se um volume de água, até completar o volume total do cilindro. Portanto, com o valor convertido em mm, obteve-se o "rebaixamento do Topo".

Em seguida, houve a retirada da pasta endurecida do molde. Fez-se, então, o corte do material em quatro partes iguais, identificando-as da seguinte forma: (I)

Topo, (II e III) Intermediários e (IV) Fundo. Baseando-se no princípio de Arquimedes, cada seção foi presa a um suporte com garra, garantindo melhor precisão e estabilidade; depois, foram imersas em água em um béquer. E, então, registrou-se o "peso da seção na água". Logo após, cada seção foi rebaixada e apoiada no fundo do béquer, de modo que o fio não ficasse tensionado, e, então, foi obtido o "peso da seção no ar". A figura 06 apresenta o fluxograma do teste de estabilidade:

Figura 6 - Fluxograma do teste de estabilidade



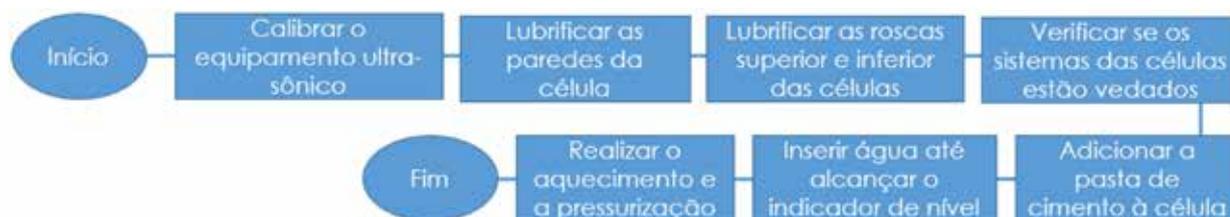
Fonte - Autoria própria, 2014

2.8 TESTE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PELO MÉTODO ULTRASSÔNICO (UCA)

Para a realização do teste de resistência à compressão, 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, engraxaram-se as rosas 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 a pressurização. A resistência mecânica foi obtida em tempos de cura 8h, 12h e 24h. A figura 07 mostra o fluxograma das etapas do ensaio de resistência à compressão pelo método ultrassônico:

Figura 7 - Fluxograma do teste de resistência à compressão pelo método ultrassônico



Fonte - Autoria própria, 2014

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERÍSTICAS DA PASTA

Esta seção irá discutir os resultados obtidos, tendo em

vista a preparação da pasta, a interação entre os aditivos utilizados e a análise dos testes realizados, verificando se eles atingiram as condições de poço exigidas. As caracterizações do poço e da pasta estão apresentadas nas tabelas 01 e 02:

Tabela 1 – Características do poço

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

Fonte: Autoria própria, 2014

Tabela 2 – Características do 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: Autoria própria, 2014

3.2 FORMULAÇÃO DA PASTA

Os aditivos que utilizamos para esta 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 de 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, foi preciso aumentar o dispersante, para diminuir ainda mais a vis-

cosidade da pasta. Para os outros aditivos, não houve necessidade 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 em uma menor densidade e o antiespumante deveria ser variado). E, por fim, também não houve necessidade de variar o retardador de pega, pois, neste trabalho, é necessário apenas reportar o tempo de bombeabilidade. Os dados referentes à nova formulação estão dispostos na tabela 03:

Tabela 3 – Formulação da pasta

Aditivo	Vol. Esp.	CAMPO		LABORATÓRIO	
	(gal/lb)	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. (lb/gal)	15,6	Vol. pasta (ml)	600,0	1121,6	598,0
PROPRIEDADES CALCULADAS					
Massa especif. (lb/gal):	15,6	Água de mistura (gpc):		5,1825	
Fator água-cimento (%):	44,76	Rendimento (pé3/pé3):		1,1728	

Fonte: Autoria própria, 2014

3.3 TESTES REOLÓGICOS

De acordo com o Modelo de Bingham, com os dados obtidos através do teste de reologia, foram

adotadas as equações 1 e 2 para determinar as propriedades e os parâmetros reológicos da pasta de cimento formulada. Os dados obtidos estão presentes na tabela 04:

Tabela 4 – Leituras ascendentes e descendentes da deflexão do viscosímetro com rotação variando de 3 a 300 rpm.

REOLOGIA			
T (oF)	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: Autoria própria, 2014

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, o valor obtido é menor do que o valor estimado de 180 cP. Isso implica dizer que o aumento da concentração do dispersante (comparando à 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 FILTRADO

O teste de filtrado permitiu observar que a formulação utilizada também é satisfatória para tal condição. Pois, como mostra a tabela 5, o valor de filtrado foi de 90 ml/30 min, dentro, portanto, do valor desejável (entre 60 e 100 ml/30 min). Tal fator mostra que a concentração do controlador está adequada e que ele está sendo eficiente em sua função, uma vez que ajuda a reter a perda de água da pasta para a formação.

Tabela 5 – Resultados obtidos através do teste de filtrado e condições do teste.

FILTRADO	
Temperatura (oF)	180
Pressão (psi)	1000
Volume (ml)	45
Tempo (min)	30
Filtrado (ml/30min)	90

Fonte: Autoria própria, 2014

3.5 ESPESSAMENTO

Os dados de consistometria da pasta em uso estão descritos na tabela 6. Como este trabalho tinha como

objetivo a determinação do tempo de bombeio e pega (gráfico 1), não foi necessário variar o aditivo retardador de pega, uma vez que não precisou reduzir a cinética de reação de hidratação.

Tabela 6 – Resultados obtidos através do teste de Espessamento

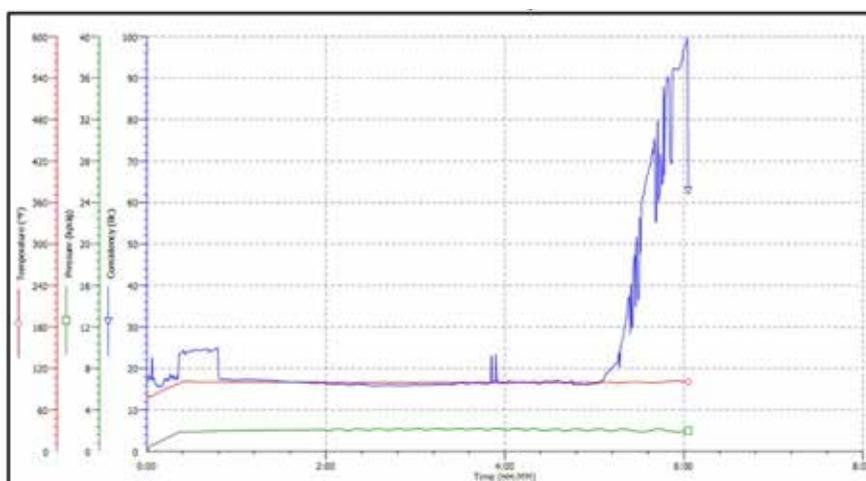
Bombeabilidade	0%	25%	50%	75%
Consistência(UC)	17	17	16	17
TE(min)	0	90	180	270

Fonte: Autoria própria, 2014

Através do gráfico, 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 que se saiba 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.

Gráfico 1 - Teste de Espessamento



Fonte - Autoria própria, 2014

3.6 ÁGUA LIVRE

água livre da pasta formulada.

Como mostra a figura 08, não houve a formação de

Figura 8 - Inexistência de água livre



Fonte - Autoria própria, 2014

3.7 ESTABILIDADE

Conforme indica a norma API, se a diferença entre as seções (fundo menos o topo) for maior ou igual que 0,5

lb/Gal e o rebaixamento do topo da pasta for maior > 5mm, a pasta é dita instável e deve ser reformulada. Os resultados de estabilidade para a pasta formulada encontram-se na tabela 07:

Tabela 7 – Resultados da medida de estabilidade da pasta formulada

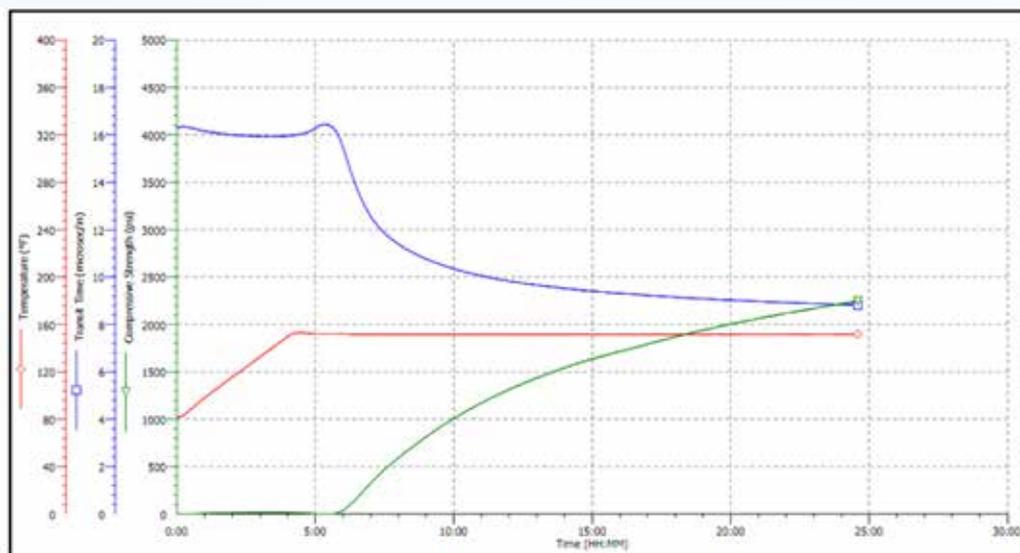
	ESTABILIDADE		
	Seco	Imerso	(lb/gal)
Topo	45,8	24,21	15,79
Interm. I	47,36	24,73	15,98
Interm. II	47,63	24,61	16,15
Fundo	48,9	24,34	16,77
Rebaixamento			
Vol. (ml)	0,96	Altura (mm)	1,96

Fonte: Autoria própria, 2014

3.8 TESTE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉTODO ULTRASSÔNICO (UCA)

O tempo de trânsito é continuamente monitorado. A resistência à compressão é calculada internamente, através das correlações de tempo de trânsito do processado.

Gráfico 2 - Comportamento da resistência à compressão



Fonte - Autoria própria, 2014

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das características do poço trabalhado durante o estudo de caso, foi formulada e caracterizada uma pasta de cimentação de acordo com os padrões do American Petroleum Institute, de modo que se adequasse às características da formação rochosa, bem como às condições de pressão e temperatura do interior do poço, garantindo, assim, maior segurança para os procedimentos posteriores.

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), controle da perda de água para a formação (90 ml/30 minutos), boa estabilidade (1,96 mm de rebaixamento) e inexistência de água livre.

REFERÊNCIAS

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: ensaios 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**, 2. Ed: Rio de Janeiro, 2001.