

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Avaliação da Influência da Ordem de Aditivação e da Concentração do Acelerador de Pega no Comportamento Reológico de Pastas de Cimento

AUTORES:

Rodolfo Luiz Bezerra de Araújo Medeiros, Maria Roseane de Pontes Fernandes, Andreza Kelly Costa Nóbrega, Júlio Cezar de Oliveira Freitas, Antonio Eduardo Martinelli, Dulce Maria de Araújo Melo.

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

Avaliação da Influência da Ordem de Aditivação e da Concentração do Acelerador de Pega no Comportamento Reológico de Pastas para Operação de Cimentação

Abstract

The rheological behavior of cement slurries is an important component in the process of cementing. An adequate rheological characterization of cement slurries is needed for several reasons, including the determination of pressure versus depth and pumpability. For most cementing operations, cement slurries should have low viscosity, does not gel when static, keeping its consistency constant as long as possible until setting. To obtain these properties, a great variety of additives is used. This study aims at evaluating the rheological behavior of slurries formulated to cement 1000 m deep on-shore wells with respect to the order of the concentration and order of addition of accelerators. The rheological tests were performed according to API Spec 10A and 10B. Cement slurries were prepared fixing the concentration of the antifoam at 0.020 gpc and dispersant at 0.015 gpc. A filter loss controller (0.7%) and an accelerator (0.6% or 1.2%) were added in different orders. The power law index suggested that the slurries were pseudo-plastic, i.e., increasing the strain rate reduces viscosity, which is helpful for the pumping behavior in the cementing operation. Change the order of addition significantly changed the consistency index for the slurries containing 1.2% accelerator. This behavior seems an interesting alternative when shorter setting times are necessary without compromising the pumpability of the slurry. The increase in the concentration of the accelerator significantly increased the values of plastic viscosity and yield stress.

Introdução

A cimentação é uma das etapas mais importantes na perfuração do poço. O seu principal objetivo é obter uma fixação e vedação suficiente entre o revestimento e a formação (ROSQUOËTA, 2004). A pasta de cimento é um sistema reativo, onde reações químicas entre as fases sólidas e a água de mistura promovem a formação de novas espécies, a partir das reações de hidratação, que promovem alterações no comportamento mecânico da pasta (VLACHOU, 1997). Nesse procedimento de hidratação é observada uma evolução química e microestrutural da pasta nas primeiras horas de hidratação (TAYLOR, 1991; METHA, 1994).

A ampla utilização do cimento Portland permitiu adquirir o conhecimento e a experiência de campo necessária ao desenvolvimento de aditivos químicos que possibilitam sua plena adequação às mais variadas condições de poço, incluindo parâmetros reológicos (limite de escoamento, viscosidade plástica e força gel).

O comportamento reológico das pastas é um componente de grande importância no processo de cimentação. Uma adequada caracterização reológica de pastas cimento é necessária por várias razões, incluindo: determinação da pressão versus profundidade, gradiente térmico, evolução da mistura e bombeabilidade da pasta.

Na indústria do petróleo, os conhecimentos básicos da reologia auxiliam na análise do comportamento reológico dos diversos tipos de fluidos. Entre outras aplicações, a definição de parâmetros reológicos, por sua vez, permite que se estimem as perdas de pressão por fricção (também denominada perda de carga), capacidade de transporte e sustentação de sólidos (MACHADO, 2002).

Os modelos reológicos capazes de descrever o que ocorre em um amplo intervalo entre um sólido elástico e um fluido viscoso deverão ser capazes prever ou prognosticar a deformação da pasta de cimento são examinadas usando-se testes de fluxo baseados na tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento. Das figuras de fluxo também é possível gerar uma relação entre viscosidade e taxa de cisalhamento. Contudo, nenhum modelo está livre de erros estatísticos (LIMA, 2006; NEHDI, 2007).

A reologia da pasta fresca de cimento tem sido controlada pela estrutura tridimensional das partículas de cimento na água. Uma estrutura em “gel” se forma imediatamente após a introdução de água no pó de cimento. A estrutura se origina de uma combinação de forças coloidais (por exemplo, atração de Van der Waals e repulsão eletrostática), forças hidrodinâmicas e reações químicas produzidas pelos hidratos de silicatos de cálcio (LIMA, 2006; SAAK et al, 2001).

Para a maioria das operações de cimentação, a pasta deve apresentar baixa viscosidade, não gelificar quando estática, manter sua consistência o quanto mais constante possível até a ocorrência da pega, ter baixa perda de filtrado, sem o efeito de separação de água livre ou decantação de sólidos (NELSON, 1990). Para obterem-se essas propriedades, é utilizada uma grande variedade de aditivos, no qual se pode incluir: controladores de filtrado, aceleradores, retardadores, dispersantes, dispersantes, estendentes, adensantes e aditivos especiais.

Tendo em vista a necessidade de se adequar às propriedades de uma determinada pasta de cimento, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento reológico de uma formulação de pasta para uma operação de cimentação para 1000 m *on-shore* sob dois aspectos: a ordem de aditivação e a concentração do aditivo acelerador de pega.

Metodologia

Os ensaios reológicos foram realizados de acordo com a norma API, segundo API Spec 10: API SPEC 10A – Specifications for Cements and Materials for Well Cementing e API SPEC 10B – Recommended Practice for testing Well Cements.

O comportamento reológico das pastas frescas de cimento Portland foi avaliado pelo ensaio de reologia, através da determinação dos parâmetros reológicos (viscosidade plástica, limite de escoamento, gel inicial e gel final, índice de comportamento e índice de consistência), de acordo com as normas M-1 Determinação das Propriedades Reológicas e da Força Gel de Pasta de Cimento através de um Viscosímetro Rotativo (API SPEC 10A, 1995) e NBR 9830 (1993).

As pastas providas do consistômetro atmosférico foram homogeneizadas e acondicionadas à temperatura de 31°C (87°F). As mesmas foram vertidas imediatamente para o copo do viscosímetro onde se efetuou as leituras na rotação de 3, 6, 10, 20, 60, 100, 200 e 300 rpm, de maneira ascendente e descendente, com intervalo de 10 s, calculando-se posteriormente os valores médios das duas medidas.

Após a leitura de 3 rpm, aumentou-se a velocidade do rotor para 300 rpm, mantendo-a por 1 minuto. Em seguida, o motor foi desligado e após 10 s, o mesmo foi novamente acionado, registrando-se a deflexão máxima observada (gel inicial: Gi). Desligou-se mais uma vez o motor por 10 min, no fim dos quais o motor foi religado a 3 rpm e registrou-se a deflexão máxima observada (gel final: Gf). Cada leitura no mostrador foi efetuada imediatamente antes de cada redução de velocidade. As medidas de gel foram realizadas para se ter conhecimento do grau de tixotropia das pastas formuladas. O programa de teste do viscosímetro, descrito anteriormente encontra-se ilustrado na Figura 1 (LIMA, 2006).

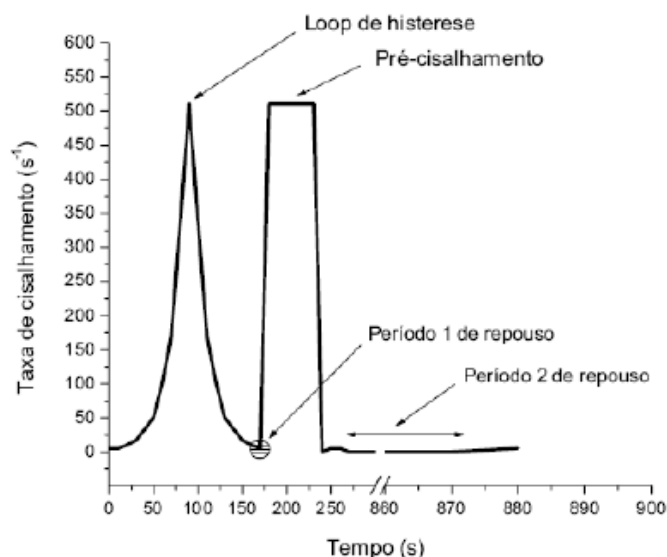


Figura 1. Programa de teste do viscosímetro.

Foram formuladas pastas de cimento fixando-se a concentração do aditivo antiespumante em 0,020 gpc e o aditivo dispersante em 0,015 gpc. Ao adicionar os aditivos controlador de filtrado (0,7%) e o acelerador, mudou-se a ordem de adição, somente para as concentrações de 0,6% e 1,2%. Ainda, foi preparado formulações com o aditivo acelerador de pega com concentração desde 0,6% até 1,2%.

Resultados e Discussão

Os valores dos parâmetros reológicos de índice de comportamento e índice de consistência do modelo de potência podem ser observados na tabela 1, em que, também, estão presentes os índices de correlação das pastas para o modelo de Bingham e para o modelo de Ostwald de Waale. Em todas as formulações pode-se observar que o modelo que melhor se ajustou foi o modelo de Ostwald de Waale ou modelo de potência, uma vez que o índice de correlação para a maioria das composições foram maiores do que o índice de correlação para o modelo de Bingham. Em geral, os coeficientes de correlação estão muito próximos de um, mostrando coerência no modelo.

Os índices de comportamento apresentam valores inferiores a um, o que indicam que as pastas possuem caráter pseudoplástico e não dilatante. Assim, pode-se afirmar que o aumento da taxa de deformação reduz a viscosidade, facilitando o bombeio das pastas na operação de cimentação.

Embora a API SPEC 10A (1995) indique a adoção do modelo de potência em detrimento do modelo de Bingham, para os casos em que a diferença entre os seus coeficientes de correlação seja inferior a 0,05, a avaliação das pastas foi realizada através do modelo de Bingham, em função da norma NBR 9831 especificar limites para a viscosidade plástica e o limite de escoamento, que são os parâmetros deste modelo (Fernandes, 2008; Bezerra, 2006).

Para a concentração de 0,6% de acelerador de pega não se observou mudanças significativas nos parâmetros reológicos quando mudou a ordem de aditivização. Já para a concentração de 1,2% de acelerador de pega podem-se observar as alterações nos índices de comportamento e de consistência. Para o índice de comportamento o valor aumentou de 0,6503 para 0,7495 no momento em que efetuou a mudança na ordem de aditivização, ou seja, adição de acelerador antes do controlador. Pode-se

observar que o valor de índice de comportamento está próximo dos valores de índice de comportamento para 0,6% de acelerador. Com relação ao índice de consistência, o valor diminuiu de 0,0298 para 0,0178 com a alteração da ordem de aditivação. Isso significa dizer que a adição do acelerador de pega antes do controlador conseguiu diminuir a tensão de cisalhamento das pastas, possibilitando uma melhor bombeabilidade no ato da cimentação.

Tabela 1: Parâmetros reológicos das pastas formuladas alterando a ordem de aditivação para 0,6 e 1,2% de acelerador de pega.

Formulações	Índice de comportamento (n)	Índice de consistência (k)	Correlação (R ²) <u>Ostwald de Waale</u>	Correlação (R ²) <u>Bingham</u>
0,7% de controlador e 0,6% acelerador	0,7463	0,0127	0,9998	0,9975
0,6% de acelerador e 0,7% de controlador	0,7457	0,0141	0,9986	0,9985
0,7% de controlador e 1,2% de acelerador	0,6503	0,0298	0,9980	0,9977
1,2% de acelerador e 0,7% de controlador	0,7495	0,0178	0,9996	0,9965

Os resultados dos parâmetros reológicos do Modelo de Bingham estão mostrados nas Figuras 2 e 3. Os resultados obtidos mostraram que, em geral, com o aumento da concentração do acelerador de pega, houve um aumento da viscosidade plástica, do limite de escoamento, do gel inicial e do gel final da pasta.

O expressivo aumento na viscosidade plástica com o aumento da adição do acelerador de pega, observado principalmente entre as concentrações de 0,6 e 0,8%, se deve ao aumento da taxa de hidratação do cimento, por meio do aumento do carácter iônico da fase aquosa, fazendo com que os principais componentes do cimento seco (C_3S , C_2S e C_3A) se hidratem e liberem o $Ca(OH)_2$ mais rapidamente, resultando, assim, numa rápida formação do CSH gel, que é responsável pela pega do cimento, (Lima, 2006; Nelson 1990).

À viscosidade plástica de todas as concentrações ficaram fora do especificado (55 cP), no entanto, esse comportamento pode ser facilmente compensado por aditivos do tipo dispersante. Os valores de gel inicial e final sofreram um acréscimo com o aumento da concentração de acelerador de pega. Os valores de géis final sempre são maiores que os valores de géis inicial, isso se deve ao prosseguimento do processo de hidratação das partículas de cimento com o tempo.

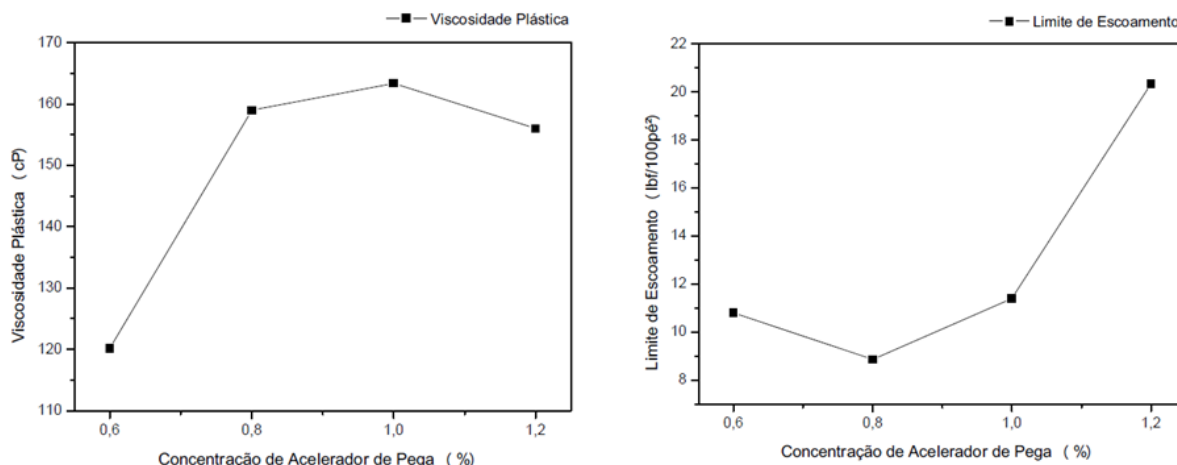


Figura 2. Curva de Viscosidade plástica (a) e Limite de Escoamento (b) em função da concentração de poliuretano adicionada à pasta.

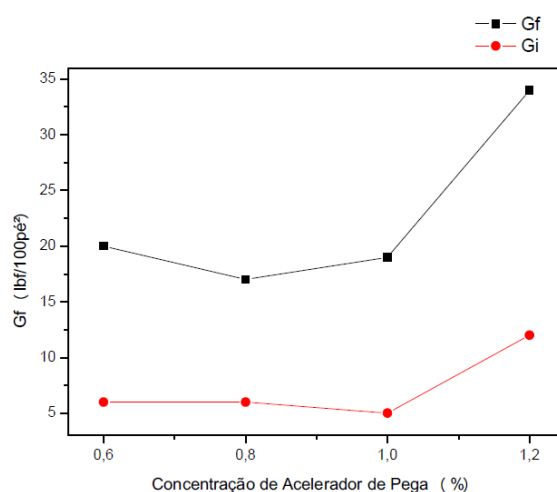


Figura 3. Curvas dos géis iniciais e finais da reologia.

Conclusões

- A mudança da ordem de adição alterou significativamente o índice de consistência para a concentração de 1,2% do acelerador de pega. No entanto não se observou mudança relevante para a concentração de 0,6% do acelerador. Esse comportamento mostrou uma interessante alternativa para o uso dessas pastas em operações de cimentação em que é necessário acelerar o processo de pega e, ao mesmo tempo, ter uma boa bombeabilidade da pasta.
- A adição do acelerador de pega em diferentes concentrações nas pastas de cimento alterou o comportamento reológico.
- O modelo reológico de Ostwald de Waale ou modelo de potência foi o que melhor se ajustou, significando dizer que o aumento da taxa de deformação reduz a viscosidade e, consequentemente, facilita o bombeio das pastas no ato da cimentação.

- O aumento na concentração do acelerador de pega aumentou expressivamente os valores de viscosidade plástica e de limite de escoamento, conforme esperado. Esse aumento pode-se ser melhor observado nas concentrações entre 0,6 e 0,8% para a viscosidade plástica e entre 1,0 e 1,2% para o limite de escoamento.
- À viscosidade plástica de todas as concentrações ficaram fora do especificado (55 cP), no entanto, esse comportamento pode ser facilmente compensado por aditivos do tipo dispersante.
- Os valores de gel inicial e final sofreram um acréscimo com o aumento da concentração de acelerador de pega, no qual se atribui ao processo de hidratação das partículas de cimento com o tempo.

Agradecimentos

À Agência Nacional do Petróleo (PRH30/ANP/MCT/PETROBRAS) pelo suporte financeiro e à Companhia CIMESA-SE pelo fornecimento de cimento utilizado no trabalho.

Referências Bibliográficas

LIMA, F.M. Avaliação do comportamento reológico de pastas de cimento para poços de petróleo com adição de plastificantes. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais – UFRN, 2006.

MACHADO, J.C.V. *Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo*. Editora Interciência: Petrobras. Rio de Janeiro, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.M. *Concreto, estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini. P. 573, 1994.

NEHDI, M. RAHMAN, M.-A. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 1993 – 2007, fev. 2004.

NELSON, E.B. *Well Cementing*. Houston: Schlumberger Educational Services, 1990.

ROSQUOËTA, F., ALEXISB, A., KHELIDJB, A., PHELIPOTB, A. Experimental study or cement grout: Rheological behavior and sedimentation. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 713-722, out. 2004.

SAAK, A.W., JENNINGS, H.M>, SHAH, S.P. The Influence of Wall Slip on Yield Stress and Viscoelastic Measurements of Cement Paste. *Cem. Concr. Res.* V.31, p.205- 212, 2001.

SAKAI, E. et al. Mechanisms of superplastification. *Mater. Sci. Concr.* n. 4, p. 91 – 111, 1995.

TAYLOR, H.F.W., *Cement Chemistry*, Academic Press, London, 1991.

VLACHOU, P.V., PIAU, J.M. The influence of the shear field on the microstructural and chemical evolution of an oil well cement slurry and its rheometric impact. *Cement and Concrete Research*, vol 27, n. 6, p. 869-881, 1997.