

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTUDO DA PERMEABILIDADE DE PASTAS DE CIMENTO CONTENDO SÍLICA

AUTORES:

Bárbara Taciana de Vasconcelos Cavalcanti, Maria Roseane de Pontes Fernandes, Petrúcia Duarte da Silva, Antonio Eduardo Martinelli, Dulce Maria de Araújo Melo, Marcus Antonio de Freitas Melo

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. 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 5ºPDPETRO.

ESTUDO DA PERMEABILIDADE DE PASTAS DE CIMENTO CONTENDO SÍLICA

Abstract

Slurry, as shown by Cementing operations are carried out to assure mechanical stability and fluid isolation after each section of oilwells is drilled. To that end, Portland-based slurries must be carefully formulated to account for specific physical-chemical and mechanical properties, both at the fresh and hardened state. This set of properties is determined by field conditions, including drilling depth and geothermic gradient, and production aspects such as type of fluid and advanced recovery methods. In particular, slurries that depict low permeability when hardened are important to reduce the flow of gas through the cement sheath. Different materials have been studied to reduce the permeability of cement slurries. The objective of this study was to formulate 15.6 lb/gal cement slurries with low permeability adding silica flour. The slurries were characterized by physical, rheological and permeability tests. The results showed that the addition of silica significantly reduced the permeability and volume of free water of the slurry, however, the rheological parameters, i.e., plastic viscosity and yield stress increased. This behavior can be corrected by dispersants. The addition of silica reduced the relative concentration of Portlandite in the hardened X-ray diffraction patterns.

Keywords: Permeability, oilwell cementing, silica.

Introdução

A cimentação é uma das operações mais importantes realizadas em um poço de petróleo. Ela ocorre após o término da perfuração de cada seção de um poço, com o objetivo de compor a vedação entre as zonas permeáveis ou até mesmo de um único intervalo permeável. Isto impede a intercomunicação de fluidos da formação que ficam por trás do revestimento, bem como propicia suporte à coluna de revestimento. Denomina-se cimentação primária a cimentação de cada coluna de revestimento, logo após a sua descida no poço. Seu objetivo básico é colocar uma pasta de cimento não contaminada em determinada posição no espaço anular entre o poço e a coluna de revestimento, de modo a se obter fixação e vedação eficiente e permanente deste espaço anular (Hodnea, 2000). As pastas de cimento do tipo Portland são usadas para isolamento de poços de petróleo. Elas consistem de misturas fluidas de cimento, água, aditivos e cargas (Rosquëta, 2004). Esses aditivos modificam o comportamento do sistema cimentício, permitindo o sucesso da colocação da pasta entre o revestimento e a formação rochosa, desenvolvendo rápida resistência compressiva e isolamento adequado de zonas durante o tempo de vida do poço (Nelson, 1990). Ainda assim, em condições específicas de poço, as pastas cimentantes podem se mostrar ineficientes, devido à natureza frágil e alta permeabilidade do cimento. Isto ocorre, particularmente, em poços produtores de gás ou óleo pesado e poços HPHT. Por isso, novas formulações de pastas de cimento têm sido constantemente estudadas. A adição de sílica permite a redução da permeabilidade do cimento, adequando-os a poços produtores de gás (Santos Júnior, 2006; Marinho 2004).

A sílica é uma adição mineral de atuação efetiva na redução da porosidade no cimento, promovendo, assim, melhorias significativas de desempenho das propriedades relacionadas à durabilidade, tais como a redução da permeabilidade a gases (Aïtcin, 2000; Monteiro, 1993). A forma e o tamanho das partículas de sílica favoreceram o empacotamento do cimento em relação à alumina calcinada, que embora possuam dimensões próximas, diferem na morfologia. A sílica ativa exerce um efeito físico (microfíler) no processo de hidratação do cimento. Este efeito é causado pela finura da sílica e pela sua forma esférica. Essas partículas se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam

nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como ponto de nucleação dos produtos de hidratação, o que proporciona um refinamento da estrutura de poros, reduzindo a permeabilidade das pastas de cimento (Fornasier, 1995). Monteiro (1993) relata que a adição de sílica no cimento não reduz a permeabilidade total, mas proporciona um refinamento da estrutura porosa, com diminuição e descontinuidade dos poros capilares. O uso da sílica pode diminuir a relação vazios/volume, o que diminui a permeabilidade da pasta. O objetivo do presente trabalho é estudar a influência da sílica em pastas cimentantes, avaliando sua permeabilidade e algumas propriedades requeridas para poços de petróleo.

Metodologia

Pastas de cimento contendo cimento e água de mistura foram preparadas utilizando cimento Portland especial (Cimento Sergipe S.A., Laranjeiras, SE), água potável, sílica e emulsão aquosa de óleo dimetil-polisiloxano para evitar a formação de bolhas. O cálculo das massas dos componentes das pastas de cimento foi feito de acordo com procedimentos adotados no Laboratório de Cimentos da UFRN. Para efetuar a mistura da pasta, utilizou-se um misturador Chandler modelo 80-60. Foram adicionados ao misturador a água e o antiespumante. Em seguida, foi realizada a mistura a uma velocidade de 4000 ± 200 rpm, lançando-se o cimento puro ou com a adição de 40% BWOC de sílica durante 15 s. Após todo cimento ter sido adicionado ao sistema água/aditivos, deu-se continuidade a agitação a alta velocidade (12000 ± 500 rpm) durante 35 s, de acordo com as recomendações práticas da norma API RP 10A.

Os ensaios de água livre (%AL) foram realizados utilizando-se frasco de Erlenmeyer de acordo com a NBR 9831:2006. Durante a realização do ensaio foi transferida a massa de pasta de 760 (± 5) g e após um período de $2h \pm 5$ min, repousando em um local isento de vibrações, a água sobrenadante foi removida por meio de uma seringa. O percentual de água livre foi calculado de acordo com a equação 1:

$$Al = \frac{V_{al}\rho}{m_{\rho}} 100 \quad (1)$$

Onde:

Al - é o conteúdo de água livre da pasta, em porcentagem volumétrica;

V_{al} - é o volume de fluido sobrenadante coletado, em mililitros;

m_{ρ} - é a massa inicial da pasta, em gramas;

ρ - é a densidade da pasta, em gramas por centímetro cúbico.

Para o ensaio de densidade, utilizou-se uma balança de lama Halliburton Modelo 7/22 lb/gal. A pasta para o ensaio foi vertida no copo da balança até a borda (aproximadamente 1/4 pol – 6mm). Verificou-se se a válvula da tampa estava aberta (posição inferior), e ajustou-se a tampa observando a saída de pasta pela válvula. Em seguida, levantou-se a válvula fechando-a. Lavou-se a balança e enroscou-se o anel da tampa. Encheu-se o êmbolo (bomba) com pasta de cimento e injetou-se a pasta, pressurizando-a por meio da válvula no copo. Quando não foi possível injetar mais pasta, liberou-se o êmbolo. Automaticamente, a válvula se fechou, impedindo a saída de pasta. Lavou-se a balança, enxugando-a com papel absorvente. Colocou-se, então, a balança sobre a sua base e deslocou-se o cursor até obter-se o equilíbrio. Colocou-se, então, a balança sobre a sua base e deslocou-se o cursor

até obter-se o equilíbrio. Efetuou-se a leitura na escala desejada, observando a indicação da seta no cursor.

O equipamento utilizado na utilização dos ensaios reológicos foi um viscosímetro rotativo de cilindros coaxiais Chandler modelo 3500. Neste viscosímetro, a pasta contida em um copo é cisalhada entre uma camisa externa rotativa e um cilindro interno, o qual é ligado a um torquímetro de mola. Para a realização deste ensaio utilizou-se a pasta homogeneizada, provinda de consistômetro atmosférico, acondicionada a aproximadamente 27 °C. A pasta foi vertida imediatamente no copo do viscosímetro e efetuou-se as leituras nas rotações de 3, 6, 100, 200 e 300 rpm, de maneira ascendente e descendente, com intervalos de 10 s entre as leituras, calculando-se posteriormente os valores médios das duas medidas. Ao final do teste, determinaram-se o limite de escoamento (LE) e a viscosidade plástica (VP), aplicando-se o modelo matemático de Bingham, o qual relaciona linearmente estes dois parâmetros, segundo a Equação 2.

$$\tau = LE + VP\gamma \quad (2)$$

As amostras para realização do teste de permeabilidade foram curadas em banho termostático por 7 dias a 47 °C. Posteriormente elas foram colocadas em estufa por 24 h a 100 °C para completa secagem. Antes da realização do teste, as amostras foram lixadas nas bases para garantir planicidade das faces. Os ensaios de permeabilidade foram realizados em um permeabilímetro Ultra Perm™ 500 (Core Lab). Neste ensaio, a permeabilidade é medida através do fluxo de nitrogênio através de um corpo cilíndrico de diâmetro 1,5 pol. Pela lei de Darcy, que mede o fluxo de fluidos em meios porosos, pode ser obtido o coeficiente de permeabilidade, k, através da equação 3:

$$Q = -k.A.(dp/dx) / \mu \quad (3)$$

Onde:

Q - fluxo através do corpo;
K - coeficiente de permeabilidade;
A - área da base do cilindro;
dp/ dx - variação de pressão de entrada e saída do fluido
 μ - a viscosidade do fluido.

As análises de difração de raios X pelo método do pó foram realizadas em um difratômetro XDR-600 (Shimadzu) com tubo de cobre ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). A varredura foi realizada com valores de 2θ entre 5 e 70°. Esta técnica foi utilizada para avaliar as fases cristalinas que compõe as pastas de cimento endurecidas, bem como a possível influência da adição da sílica nas fases de hidratação das pastas.

Resultados e Discussões

Com relação aos resultados de reologia, observou-se um aumento na viscosidade plástica e no limite de escoamento da pasta contendo sílica. A viscosidade plástica passou de 34,22 cP para 69,41 cP e o limite de escoamento de 31,24 lbf/100 pé² para 48,48 lbf/100pé², ambas realizadas na temperatura ambiente. A NBR 9831 admite os seguintes valores limites para VP e LE, à temperatura ambiente, 27 °C: viscosidade plástica de 0,055 Pa.s (55cP) e limite de escoamento de 14,4 a 33,5 Pa (30 a 70 lbf/100pés²). Isto significa dizer que a pasta contendo sílica ficou dentro da faixa especificada por norma.

O volume de água livre obtido da pasta com água e cimento foi de 6,73%, comparado com 3,25% obtido da pasta com sílica. Isto significa que a sílica, em virtude de sua granulometria inferior a do cimento, absorve melhor a água da pasta. A pasta com sílica ficou dentro do valor especificado (5,9%) pela norma NBR 9831:2006. Os valores de densidade de ambas as formulações alcançaram os valores exigidos por norma 15,6 lb/gal ($\pm 0,5$) (Tabela 1).

Tabela 1 – Densidade das pastas.

Concentração de Sílica (%)	Densidade (lb/gal)	
	Balança de Lama	Balança Pressurizada
0	15,2	15,4
40	15,4	15,8

Os resultados de permeabilidade (Tabela 2) mostraram que com a adição de sílica na pasta de cimento, houve significativa redução da mesma, pois à medida que a sílica reage com o hidróxido de cálcio, o produto da reação (C-S-H) tampona os vazios dos capilares do cimento, reduzindo sua permeabilidade. Pode-se observar no comparativo dos difratograma de raios-X (Figuras 1e 2) que a adição da sílica proporcionou redução da fase Portlandita.

Tabela 2 – Permeabilidade das pastas formuladas

Permeabilidade (mD)	Concentração de Sílica (%)	
	0	40
Ensaio 1	0,296	0,132
Ensaio 2	0,297	0,136
Ensaio 3	0,296	0,138
Média	0,296	0,135
Desvio Padrão	$5,77 \times 10^{-4}$	$3,05 \times 10^{-3}$

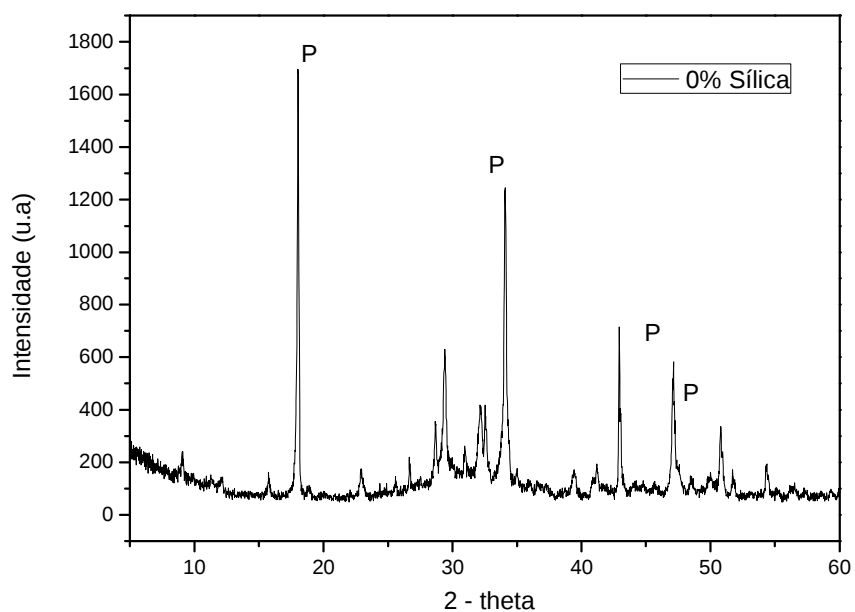


Figura 1 - Difratoograma de Raio – X da pastas de cimento com 0% de sílica

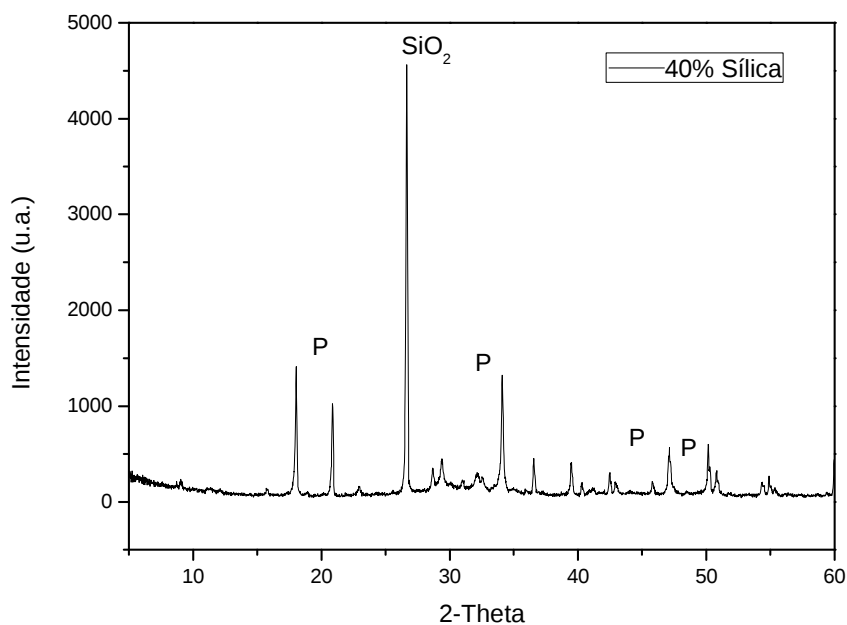


Figura 2 - Difratoograma de Raio – X da pastas de cimento com 40% de sílica

Nas pastas com adição de sílica observou-se a redução acentuada da quantidade de CH (portlandita), atribuído ao efeito filler e às reações pozolânicas da sílica na matriz de cimento. O efeito de preenchimento da sílica reduz a quantidade de vazios da matriz de cimento, diminuindo e limitando, assim, a precipitação do hidróxido de cálcio em grandes cristais. A reação pozolânica que se desenvolve pela reação entre a sílica e o CH, produzindo silicato de cálcio hidratado, reduz a quantidade de CH livre na matriz de cimento (Aïtcin, 2000; Monteiro, 1993).

Conclusões

A adição da sílica diminui a permeabilidade de pastas de cimento Portland e a concentração relativa da fase Portlandita. Além disso, a densidade e a água livre mantiveram-se dentro do estabelecido por norma para aplicação de cimentos de poços de petróleo. As propriedades reológicas que não mantiveram o valor estabelecido pela norma podem ser ajustadas com a adição de dispersante.

Agradecimentos

O Petróleo Brasileiro S/A e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e B combustíveis (ANP), pelo suporte financeiro e a companhia CIMESA-SE pelo fornecimento de cimento utilizado no trabalho.

Referências Bibliográficas

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Spec 10: API SPEC 10A – Specification for Cements and Materials for Well Cementing

AÏTCIN, P.C. *Concreto de alto desempenho*, Ed. PINI, São Paulo, 2000

HODNEA, H., SAASENB, A., O'HAGANA, A.B., WICKA, S.O. Effects of time and shear energy on rheological behaviour of oilwell cement slurries. *Cement and Concrete Research*, v. 30, p. 1759 – 1766, ago.2000.

MARINHO, E.P.M., Desenvolvimento de pastas geopoliméricas para cimentação de poços de petróleo, Tese de Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2004.

MONTEIRO, P.J.M., “Caracterização da Microestrutura do Concreto: Fases e Interfaces; Aspectos de Durabilidade e de Microfissuração”, M.Sc. Tese, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1993.

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

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

SANTOS JUNIOR, B.F., Modificações morfológicas e estruturais de pastas de cimento aditivadas com termofixos a base de epóxi para utilização em poços de petróleo, Dissertação de Mestrado em Física, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2006.

FORNASIER, R.S. Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com sílica. 1995, 129p. Dissertação (mestrado em engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de pós-graduação em engenharia civil, Porto Alegre.

Normas ABNT

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Normas destinadas à cimentação de poços de petróleo: Cimento Portland destinado a Cimentação de Poços de Petróleo (NBR-9831). Rio de Janeiro, 2006.