

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de P&D em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTUDO DE VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND CP IV EM
CIMENTAÇÃO DE POÇOS PETROLÍFEROS

AUTORES:

Geniffer Stefany de Oliveira Martins¹, Gustavo Arruda Ramalho Lira²

INSTITUIÇÃO:

¹Departamento de Energia, Divisão de Ciências e Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, ²Departamento de Engenharia de Petróleo, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. 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 9º PDPETRO.

ESTUDO DE VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND CP IV EM CIMENTAÇÃO DE POÇOS PETROLÍFEROS

Abstract

The cementing of oil wells aims to fix the coating and mechanical support to promote the well being performed after lowering the casing string. The most common material used in general to fill the annular space between the casing and the rock formation is Portland cement. Despite their qualities and its widespread use, new challenges have been proposed with regard to cost. In the oil industry, often uses cement G or H class, being the classes that meet virtually all the conditions for application in wells. However, its manufacturing process is rigorous involving the production and sale costs. This study aims to identify of Portland cement CP IV in the application in oil wells. Thus, the study consisted of specification tests on cement pastes Portland CP IV, according to the methods proposed by NBR 9831. It was first performed Normal water content of slurry to determine the ideal density of the slurry and to choose the best formulations. Then, it was submitted to four tests: rheology, free water, thickening time and compressive strength. After several trials, it was possible to determine whether the formulations fit in the acceptance criteria of NBR 9831, which establish the minimum requirements of physical properties. Finally, it concluded that it is feasible to apply the Portland cement CP IV with a specific weight of 13.5 lb/gal in the cementing of oil wells, since some additives are used to improve the efficiency of compressive strength and rheological properties.

Introdução

A cimentação de poços é uma das principais etapas da Engenharia de Poço. É a área responsável por formular pastas de cimentos com densidade apropriada para ser bombeada internamente pela coluna e ascender pelo anular até o ponto desejado.

Uma das finalidades da cimentação consiste na fixação do revestimento para impedir a passagem de fluidos das zonas permeáveis para o poço e prevenir o desmoronamento da formação, evitando o fechamento do poço.

A perfuração de poços petrolíferos pode ocorrer em várias fases. Cada fase é determinada de acordo com a profundidade, e sendo assim, o revestimento é classificado de acordo com a ordem de descida das colunas. São divididos em revestimento condutor, superficial, intermediário (podendo ser mais de uma fase) e produtor.

O material mais utilizado para cimentação de poços em geral é o cimento Portland. Apesar de suas qualidades e de seu uso generalizado, novos desafios têm sido propostos aos pesquisadores da área cimenteira, particularmente no que diz respeito ao custo. Na indústria do petróleo, comumente se utiliza o cimento da classe G ou H, por serem as que atendem praticamente todas as condições previstas de poços para as classes A até E (COSTA et al., 2011). Contudo, seu processo de fabricação é rigoroso o que incrementa o seu custo de produção e revenda.

Devido a isso, motivou-se o interesse em buscar novas alternativas para diminuição do custo gasto com o cimento durante a cimentação de poços. Dessa forma, este trabalho tem como principal objetivo analisar a viabilidade da aplicação do cimento Portland CP IV (Pozolânico), no qual possui

adições de 15 a 50% de pozolana, clínquer e gesso, como alternativa de uso ao cimento Portland CPP (classe especial e classe G) em poços de petróleo.

Metodologia

O cimento utilizado foi o Cimento Portland do Tipo IV, fabricado pela empresa Nassau. As pastas de cimentos foram formuladas de acordo com as composições de cimento e água doce conforme o PROCELAB (2003).

As pastas de cimentos foram formuladas com a finalidade de serem testadas e avaliadas para, se aprovadas, serem utilizadas em poços de petróleo. Foram elaboradas pastas variando o Fator Água/Cimento (FAC) para que se adequassem ao Ensaio de Água Normal, ou seja, que se alcançassem uma consistência de aproximadamente 11 Uc.

Logo após a medida da consistência de todas as pastas em um consistômetro atmosférico, foram escolhidas as formulações que atendessem ao Teor de Água Normal. Em seguida, com o auxílio de uma balança de lama pressurizada, foi realizada a medição da massa específica.

Posteriormente, foram realizados os ensaios de especificação, no qual têm a função de simular, com as devidas condições de poço, o comportamento da pasta de cimento. Foi analisado o desempenho da pasta submetida a temperaturas e pressões de moderadas a elevadas, além de observar o tempo de fluidez para ser bombeada até a profundidade prevista e o regime de fluxo durante o deslocamento do fluido. Tais ensaios de especificação de cimento seguindo todos os requisitos e métodos descritos na Norma Brasileira nº 9831. Dessa maneira, os testes realizados foram:

- a) Água Livre
- b) Reologia
- c) Resistência à compressão (método destrutivo)
- d) Tempo de espessamento

TESTE DE ÁGUA LIVRE

Após a homogeneização das pastas de cimento, houve a transferência para um *Erlenmeyer* de 500 mL, e em seguida, feito a pesagem em uma balança e anotada a massa da pasta.

O frasco foi levado para uma mesa plana livre de vibrações e deixado por 2 horas. O volume de água que ficou sobrenadante à pasta endurecida, foi retirado com a ajuda de uma pipeta, colocado em um *Becker*, pesado e anotado. O valor da massa foi utilizado para calcular o teor de água livre A_t , através da equação abaixo, onde V_{al} corresponde ao volume de água sobrenadante, ρ é a densidade da pasta e m_p a massa da pasta de cimento.:

$$A_t = \frac{V_{al} \cdot \rho}{m_p} 100 \quad (\text{Equação 1})$$

TESTES REOLÓGICOS

Dentre os vários modelos empíricos e teóricos que têm sido utilizados para determinar o comportamento reológico das pastas de cimento, o utilizado nesse trabalho foi o Modelo de Bingham. A NBR 9831 o utiliza para simplificação dos cálculos das taxas de cisalhamento sofridas pela pasta e considera que as mesmas se comportam como um fluido newtoniano no espaço entre o rotor e o cilindro. Dessa forma, assumindo uma relação linear entre a tensão de cisalhamento τ e a taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$, o modelo de Bingham é descrito matematicamente da seguinte maneira:

$$\tau = LE + VP \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde LE é o Limite de escoamento, em Pascal, e VP é a Viscosidade plástica, em Pa.s. Para calcular a taxa e a tensão de cisalhamento foram efetuados os seguintes cálculos, utilizando os valores medidos das deflexões θ , em graus, e das velocidades de rotação Ω (300, 200, 100 e 3), em rpm:

$$\tau = 0,511 \cdot \theta \quad (\text{Equação 3})$$

$$\gamma = 1,7023 \cdot \Omega \quad (\text{Equação 4})$$

TESTE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para dar início ao próximo teste, os moldes foram levados para curar por 8 horas em um banho úmido, um dos moldes foi submetido à temperatura de 38 °C, e o outro, a uma temperatura de 60 °C. Os corpos de prova foram retirados do equipamento 45 minutos antes do rompimento, e levados para um banho de resfriamento. Dado o tempo, os corpos foram desmoldados, medido as dimensões com o auxílio de um paquímetro e os valores foram anotados no *software* do equipamento.

Os cubos foram colocados, um a um, na prensa eletromecânica *Shimadzu Autograph*, modelo AG-I, numa sequência pré-definida pelo programa. Com o rompimento dos corpos de prova, foi possível medir a máxima resistência à compressão.

TESTE DE CONSISTOMETRIA

Por fim, a pasta de cimento foi colocada em uma célula composta por um conjunto de eixo-palheta estacionário, com uma tampa de fundo que é conectada à mesa rotativa, e um diafragma na parte superior por onde é transmitida a pressão (NBR 9831, 2006).

Logo após, a cápsula foi levada para um consistômetro pressurizado, modelo Chandler Engineering 8040D10, programado para operar inicialmente com a pressão a 500 psi. Em seguida, foi programado para temperatura atingir 52 °C em 28 minutos e depois, no mesmo tempo para a pressão chegar a 5200 psi. O teste foi acompanhado por um *software*, que criou curvas de temperatura, pressão, consistência e temperatura da parede em função do tempo. Quando a consistência atingiu 100 Uc, o teste foi finalizado e definido o tempo de pega da pasta.

CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO

A NBR 9831 estabelece os requisitos físicos e químicos necessários para classificação e aceitação do cimento Portland utilizado na cimentação de poços petrolíferos, designados por CPP - classe G de alta resistência a sulfato (ARS) - e CPP - classe especial de moderada resistência a sulfato (MRS). Para analisar e identificar a viabilidade do cimento Portland CP IV, será utilizado como critérios de aceitação os resultados que se enquadrarem ou se aproximarem dos requisitos físicos impostos pela norma.

Resultados e Discussão

A análise dos resultados se deu com a divisão do trabalho em duas etapas. A primeira realizou-se o Ensaio de Água Normal, sendo feita a escolha das melhores formulações em função da consistência. E a segunda etapa consistiu da realização dos Ensaio de Especificação do cimento estabelecidos pela NBR 9831, na qual utiliza as propriedades físicas do cimento Portland CPP (classe G e classe especial) como parâmetros para os critérios de aceitação na cimentação de poços.

TEOR DE ÁGUA NORMAL

Como já descrito, as pastas de cimento que realizaram os Ensaio de Especificação foram escolhidas pelos valores de consistência que se aproximassem de 11 Uc. Os resultados obtidos no consistômetro atmosférico estão mostrados na Tabela 1 logo abaixo.

Tabela 1 – Valores da consistência alterando o FAC

Consistência (Uc)	Peso específico (lb/gal)
9	13,5
9	13,6
11	13,7
11	13,8
11	13,9
15	14,0

Para obter uma faixa de intervalo de pelo menos 0,5 lb/gal no peso específico e para que se pudesse observar uma maior diferença nas propriedades físicas das formulações, foram escolhidas apenas duas pastas, a de 13,5 lb/gal e 14,0 lb/gal.

TEOR DE ÁGUA LIVRE

Ao fim da realização do ensaio de água livre, pode-se constatar a massa da água sobrenadante ao cimento endurecido. Abaixo, a Tabela 2 mostra os valores observados para ambas as formulações.

Tabela 2 – Resultado do teste de água livre para as duas pastas formuladas

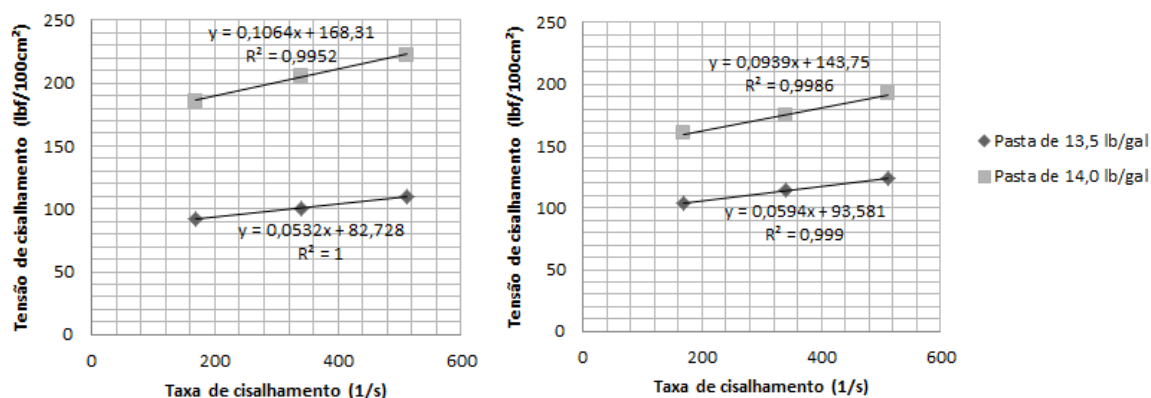
	Massa de água livre	Água livre
NBR 9831	$\geq 23,6$ g	$\geq 5,90\%$
Pasta de 13,5 lb/gal	3,43 g	0,86%
Pasta de 14,0 lb/gal	1,35 g	0,34%

Como se pode observar, as duas formulações tiveram o teor de água livre menor que o critério de aceitação da NBR 9831. Além disso, os baixos valores se deram devido às propriedades do cimento Portland CP IV que possui reação de hidratação lenta.

Outra observação a ser feita é que quanto maior o FAC, maior será a quantidade de água sobrenadante, decorrente da floculação das partículas de cimento e que devido à ação da gravidade, deslocam-se para baixo, movimentando as partículas de água para cima. Essa água livre pode ser prejudicial às propriedades mecânicas do cimento, por alterar a homogeneidade da pasta e aumentar a quantidade prevista de fluido a ser bombeada (BEZERRA, 2006).

RESULTADOS DOS ENSAIOS REOLÓGICOS

Seguindo o Modelo de Bingham, e aplicando o método de regressão linear, foram traçadas curvas para o fluxo observando o comportamento de cada pasta na temperatura de 27 °C e 52 °C (Figura 1).

**Figura 1** – Curva de fluxo para as duas pastas formuladas a 27 °C (à esquerda) e 52 °C (à direita)

Para simplificar os cálculos da taxa de cisalhamento, foi considerado o comportamento do fluido como um fluido newtoniano no anular entre rotor e cilindro. Logo é feita aproximações para as taxas de cisalhamento assumindo valores de 551 s^{-1} , 340 s^{-1} e 170 s^{-1} . Com as tensões de cisalhamento em função das taxas de cisalhamento, obtiveram-se as equações da reta, a qual foi possível obter os valores do coeficiente linear A (LE) e o coeficiente angular B (VP).

Admitindo os valores de cisalhamento expressos em $\text{lbf}/100\text{ft}^2$ e os da taxa de deformação em s^{-1} , podemos calcular a viscosidade plástica e o limite de escoamento com:

$$VP = 478,8 \times B \quad (\text{Equação 5})$$

$$LE = A \quad (\text{Equação 6})$$

Após as devidas substituições, encontraram-se os valores da viscosidade plástica e limite de escoamento. A Tabela 3 demonstra os valores referentes às leituras do ensaio reológico.

Tabela 3 – Leitura do ensaio reológico das formulações

		VP ($\text{lbf}/100\text{ft}^2$)	LE ($\text{lbf}/100\text{ft}^2$)	GI ($\text{lbf}/100\text{ft}^2$)	GF ($\text{lbf}/100\text{ft}^2$)
NBR 9831		≥ 55	Entre 30-80	≥ 25	≥ 35
Pasta de 13,5 lb/gal	27 °C	25,47	82,728	24,541	32,01
	52 °C	28,44	93,58	22,407	59,752
Pasta de 14,0 lb/gal	27 °C	50,94	168,31	46,948	59,752
	52 °C	44,95	143,75	39,479	97,097

Devido às características do cimento Portland CP IV, pode-se observar na tabela acima que apenas a pasta de 13,5 lb/gal submetida a uma temperatura de 27°C, teve as propriedades reológicas aceitável em quase todos os requisitos que determina a NBR 9831. Já a pasta de 14,0 lb/gal obteve valores de viscosidade plástica dentro da faixa de aceitação, porém as leituras de limite de escoamento, gel inicial e gel final foram muito além dos parâmetros da norma.

Na análise das Forças gel inicial e final, verifica-se que com o aumento da densidade, tanto o Gi como o Gf também aumentam. Como consequência, isso gera uma dificuldade do fluido em entrar em movimento após um período de pausa durante a operação de cimentação. Assim, ao reiniciar a operação, os equipamentos de bombeio irão requerer maiores tensões para quebrar o estado gel quanto maior for a viscosidade da pasta. Portanto, para evitar algum problema na operação, recomenda-se utilizar alguns aditivos à pasta, como os dispersantes.

RESULTADOS DO TESTE DE COMPRESSIBILIDADE

Os resultados gerados pelo *software* do equipamento estão expostos na Tabela 4, na qual é apresentada qual a tensão máxima suportada pelo cimento, após a cura úmida de 8 horas. Pode-se observar que quanto maior a densidade, melhor será a resistência à compressão, devido à menor quantidade de água contida na estrutura.

Tabela 4 - Resultados dos testes de resistência à compressão das formulações

	Resistência à compressão a 38 °C	Resistência à compressão a 60 °C
NBR 9831	$\leq 2,1 \text{ MPa}$ (300 psi)	$\leq 10,3 \text{ MPa}$ (1500 psi)
Pasta de 13,5 lb/gal	3,08 Mpa (446,57 psi)	4,87 MPa (706,33 psi)
Pasta de 14,0 lb/gal	4,7 MPa (681,46 psi)	5,77 MPa (836,77 psi)

Os cubos que foram submetidos a uma temperatura de 38 °C obtiveram resultados acima do estabelecido pela NBR 9831, que é de no mínimo 2,1 MPa (300 psi) para a dada temperatura. Enquanto que as pastas curadas a 60 °C não atingiram a resistência à compressão mínima de 10,3 Mpa (1500 psi).

Uma das causas para esse tipo de cimento ter baixa compressão inicial comparado aos cimentos CPP, usados frequentemente na cimentação de poços, é a baixa concentração de silicato tricálcico (C_3S) na composição. Além disso, o FAC é muito alto em ambas as pastas, em torno de 68% a 78%, prejudicando ainda mais a resistência mecânica do cimento curado. Pois, com o processo de endurecimento da pasta, a água interfere nas forças de adesão dos cristais, diminuindo, dessa maneira, a resistência mecânica.

Dessa forma, podemos concluir que é aconselhado usar esse tipo de cimento, com essas densidades, apenas na cimentação de poços de pequenas profundidades, onde a temperatura é próxima a 38 °C, visto que, quanto mais fundo for o poço, maiores serão as temperaturas e pressões.

DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE ESPESSAMENTO

A partir desse teste pode-se determinar o tempo que o cimento endurece e impossibilita o seu bombeio. Ao observar a Figura 2, a curva de consistência (em azul) cresce ao longo do tempo até que cai bruscamente indicando o fim do ensaio.

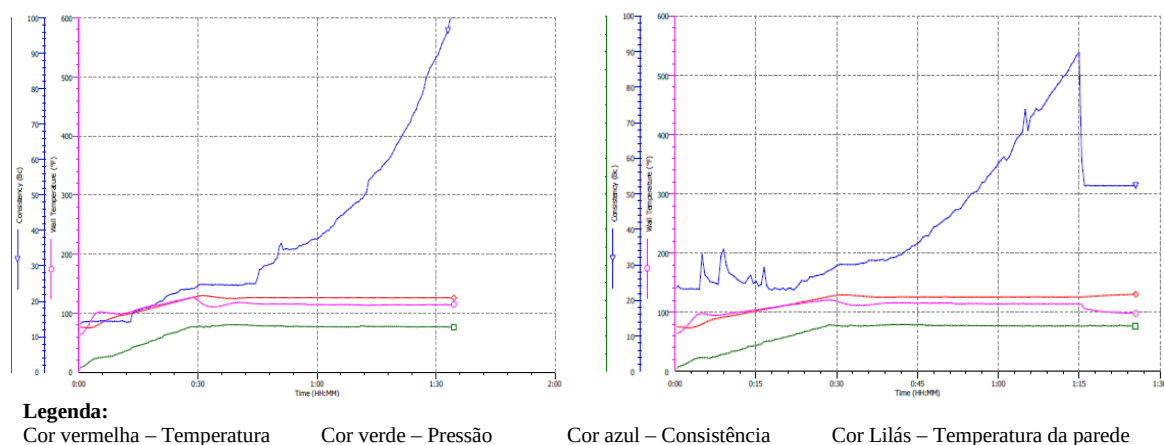


Figura 2 – Curvas referentes à temperatura, pressão, consistência e temperatura da parede em função do tempo para a pasta com densidade 13,5 lb/gal e 14lb/gal, respectivamente.

Para a pasta de 13,5 lb/gal, o tempo de pega foi de 94 minutos. Já a pasta de densidade 14,0 lb/gal teve um tempo de espessamento de apenas 75 minutos, na qual nota-se ao olhar a Figura 2, que mesmo sem atingir a consistência de 100 Uc, o teste já havia finalizado.

Para a NBR 9831, o tempo exigido para que uma pasta sem aditivos endureça varia de 90 a 120 minutos. Dessa maneira, pode-se concluir que apenas a pasta de 13,5 lb/gal está dentro dos parâmetros da norma. Mesmo que com apenas 15 a 30 minutos de teste, ambas as pastas não ultrapassaram a consistência de 30 Uc, como estabelecido nos requisitos físicos dos cimentos CPP.

Conclusões

Dessa forma, pode-se concluir que o objetivo geral do trabalho foi atendido, pois após a análise do cimento Portland CP IV sem aditivos com peso específico de 13,5 lb/gal, verificou-se que o mesmo apresentou propriedades exigidas pela NBR 9831 para os testes de água livre e tempo de

espessamento e propriedades bem próximas às requisitadas pela norma para os testes de reologia e resistência à compressão. Assim, acredita-se que há a viabilidade na aplicação dessa pasta para a cimentação de poços petrolíferos, desde que sejam utilizados alguns aditivos, o que não foi objeto desse trabalho.

Visto que, o uso de aditivos, como os retardadores de pega, dispersantes e os de aumento da resistência à compressão, potencializará a eficiência do cimento endurecido. Recomendando-se, dessa maneira, a formulação de novas pastas com peso específico a 13,5 lb/gal com aditivos e a avaliação de suas propriedades.

Agradecimentos

À equipe do Laboratório de Cimentação da UFRN (LabCim), ao Prof. Júlio Freitas e à Paulo Henrique, pela disponibilidade e o auxílio na realização dos ensaios de especificação.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo: [s.d.], 2002. 28p. (BT-106)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9831**: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API SPEC 10B**: Recommended Practice for Testing Well Cements. 22. ed. Washington, DC: API Publishing Services, 1997.

BEZERRA, Ulisses Targino. **Compósitos Portland-biopolímero para cimentação de poços de petróleo**. 2006. 287 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

BOURGOYNE JUNIOR, Adam T. et al. **Applied drilling engineering**. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1986. 2 v.

COSTA, Bruno Leonardo de Sena et al. Avaliação das propriedades físicas do cimento Portland composto do tipo CP II-F para aplicação em cimentação de poços petrolíferos. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 6., 2011, Florianópolis. **Anais... 6.PDPETRO**. Florianópolis: ABPG, 2011. p. 1 - 8.

NELSON, E.B., **Well cementing**. Saint-Etienne: Schulumberger Educational Services, 1990.

_____. Procedimentos e Métodos de Laboratório Destinados à Cimentação de Poços Petrolíferos (PROCELAB). Rio de Janeiro: [s.d.], 2003.