

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E REOLÓGICAS DE PASTA DE CIMENTO COM ADIÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO PARA POÇOS DE PETRÓLEO

AUTORES:

MACHADO, L. N. O.; JESUS, E. B.; SILVA, V. S.; SILVA, A. C. M.

INSTITUIÇÃO:

Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia.

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. 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 8º PDPETRO.

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E REOLÓGICAS DE PASTA DE CIMENTO COM ADIÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO PARA POÇOS DE PETRÓLEO

Abstract

This study aimed to verify the influence of the addition of a red ceramic waste on the mechanical strength and rheological properties of cement pastes used in oil wells. The evaluation was made by compressive strength testing, squeeze-flow testing and coaxial cylinder viscometers. The results showed the compressive strength is affected by ceramic waste concentration and curing age of molds, not in a linear and direct relation. The rheological properties of the cement paste were directly affected by the increase of ceramic waste.

Introdução

Define-se como completção um conjunto de atividades realizadas em um poço de petróleo, que tem por finalidade o preenchimento do espaço anular entre os tubos de revestimento e a formação rochosa com uma pasta de cimento a fim de promover um isolamento eficiente entre os diversos intervalos de produção.

A pasta de cimento destinada a atividade de cimentação de poços de petróleo deve apresentar, portanto, certos requisitos físicos e reológicos para atenderem as altas condições de pressão e temperatura durante seu bombeamento para o poço.

Para adequar o desempenho da pasta de cimento a essa variedade de situações a indústria de petróleo faz uso de aditivos a exemplo os materiais com propriedades pozolânicas, que proporcionam características específicas as pastas de cimento, tais como a redução da permeabilidade, diminuição da porosidade, maior resistência a sulfatos e melhoria da resistência à compressão em longo prazo (NELSON, 1990). A motivação principal deste trabalho é avaliar os parâmetros mecânicos e reológicos das pastas de cimento, confeccionada a partir do reaproveitamento do resíduo proveniente da indústria de cerâmica, com o intuito de não gerar um passivo ambiental e promover uma redução no uso de matéria prima na produção de cimento através da substituição por resíduo cerâmico

Metodologia

Inicialmente, o resíduo cerâmico foi obtido a partir da moagem de telhas vermelhas em um britador de rolo da marca Denver, em seguida foi levado a um moinho de bolas cerâmicas para uma redução da granulometria a fim de melhor se adequar a granulometria do cimento. Foi determinado que o resíduo utilizado na mistura e preparo das pastas seria o resíduo passante na peneira de 200 mm, dessa forma, após a retirada do material do moinho, o mesmo foi levado a estufa para secagem e em seguida peneirado. Utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) para a avaliação superficial da amostra de resíduo cerâmico.

Foi utilizado nessa pesquisa o Cimento Portland classe especial (CPP) tipo G, específico para completção de poços de petróleo, doado pela empresa Votorantim Cimentos.

Foram formuladas pastas contendo teores de resíduo cerâmico com valores de 5 a 20%, além de uma pasta de referência contendo somente cimento e água. O peso específico da pasta foi fixado em 1,89 g/cm³ (15.8 lb/gal) de acordo com a API Spec 10 (1988). A Tabela 1 apresenta as massas de cada componente usado, bem como as relações água/cimento das pastas.

Tabela 1 - Formulação das pastas de cimento, água e resíduo cerâmico

Concentração (%)	Composição (g)			A/C
RC	Cimento	Água	RC	
0	782,16	353,54	0,00	0,45
5	746,61	350,00	37,33	0,47
10	716,30	347,90	71,63	0,49
15	687,31	345,51	103,1	0,50
20	657,51	346,71	131,5	0,53

A mistura das pastas foi feita em um misturador mecânico de cuba modelo NJ-160a de acordo com a API 10B-2 (2012). Os corpos de prova foram fabricados em moldes de 5 cm de aresta e imersos em água para cura pelos períodos de 8 horas, 1 dia, 3 dias e 7 dias quando foram rompidos em uma prensa elétrica servocontrolada com capacidade para 20 toneladas da marca Cotenco modelo HD-20T. Em seguida foram realizados os ensaios de reologia das pastas utilizando o viscosímetro coaxial Fann 35A e utilizando o método do squeeze-flow adaptado para pastas de cimento.

As avaliações dos parâmetros reológicos das pastas de cimento por meio do viscosímetro coaxial Fann 35 A, se deu conforme os procedimentos descritos na norma NBR 9830/1993 – Cimento Portland Destinado a Cimentação de poços petrolíferos – Determinação das Propriedades Reológicas.

As leituras de deflexão feita no viscosímetro foram realizadas para as velocidades de rotação de 100, 200, 300 e 600 rpm em tempos determinados pela norma. As medidas da máxima deflexão foram observadas para o cálculo do gel inicial e fim da pasta.

A partir das leituras obtidas e da Equação 1, pode-se determinar e analisar o comportamento de gel inicial e final das pastas formuladas com diferentes teores de resíduo.

$$\text{Gel} = \theta \times 0,511 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

θ = Leitura do viscosímetro em graus.

As equações para determinação da tensão de cisalhamento e taxa de deformação foram obtidas por meio do modelo do viscosímetro utilizado.

De acordo com MIRANDA (2008), o viscosímetro com configuração de rotor R1, bob B1, que apresentam raios de 1,84515 e 1,7245 centímetros, respectivamente, e mola do tipo F1, utiliza-se das Equações 2 e 3 para converter a rotação em rpm para taxa de deformação em s^{-1} e para conversão de torque para tensão de cisalhamento em Pa, respectivamente.

$$\gamma = 1,703 \times \Omega \quad (\text{Equação 2})$$

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

Onde:

γ = Taxa de cisalhamento (s^{-1});

τ = Tensão de cisalhamento (Pa);

Ω = Velocidade de rotação do viscosímetro (rpm);

θ = Leitura do viscosímetro em graus.

Através do método de regressão linear, aplicado sob os valores de tensão versus taxa de cisalhamento, pode-se determinar o limite de escoamento, viscosidade plástica, e as correlações existentes entre o modelo de Bingham e Ostwald de Waale (Potência) para pastas com diferentes concentrações de resíduo cerâmico em sua composição.

O método squeeze-flow adaptado para pastas de cimento consiste na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas com o uso de uma prensa universal que possua um medidor de deformação axial. O resultado do ensaio se dá em uma forma de gráfico força x deslocamento, no qual podem se observar 3 regiões (I, II, III) bem distintas que representam o comportamento da pasta. Na região I o material possui um comportamento semelhante a um elástico linear, na II ocorre deformação plástica, na qual o material se deforma consideravelmente sem um aumento de carga aplicada e na III ocorre um aumento exponencial da carga necessária para prosseguir a deformação do material (MIN *et al.*, 1994).

Como a identificação dessas 3 regiões nem sempre ocorre tão nitidamente usou-se um índice chamado de módulo de escoamento que seria um indicador da plasticidade do material. Esse módulo é o quociente entre a carga e o deslocamento que ficam na transição entre as regiões I + II e III. Esse módulo de escoamento é um indicador do enrijecimento por deformação da pasta no estado fresco, quanto maior o seu valor, mais rígida é a pasta avaliada (SILVA 2015)

Resultados e Discussão

Os resultados da resistência mecânica a compressão são apresentados na Figura 1. Percebe-se que apesar do aumento da relação a/c, a resistência manteve-se bem próxima para os corpos de prova com adição do resíduo. Isso indica uma possível ação *filler* ou reação pozolânica por parte do resíduo cerâmico. Contudo a avaliação mecânica não é um bom parâmetro para justificação dessa propriedade do resíduo. Verificou-se visualmente nos corpos de prova rompidos, que houve um retardo do tempo de pega do cimento adicionado com resíduo, de forma que os corpos de prova rompidos com 8h apresentavam ruptura parcial ou total conforme adição de resíduo, fato que não se verificou para os corpos de prova de referência

Após os ensaios de resistência mecânica foram avaliadas as propriedades reológicas das pastas. Analisando a Figura 2, observou-se que o aumento da concentração de resíduo nas pastas de cimento provocou uma elevação nos valores de gel inicial e final, o que não é um indicativo satisfatório, pois o aumento nas forças dos géis indica uma resistência maior para a pasta ou fluido sair do repouso e iniciar ou reiniciar seu movimento.

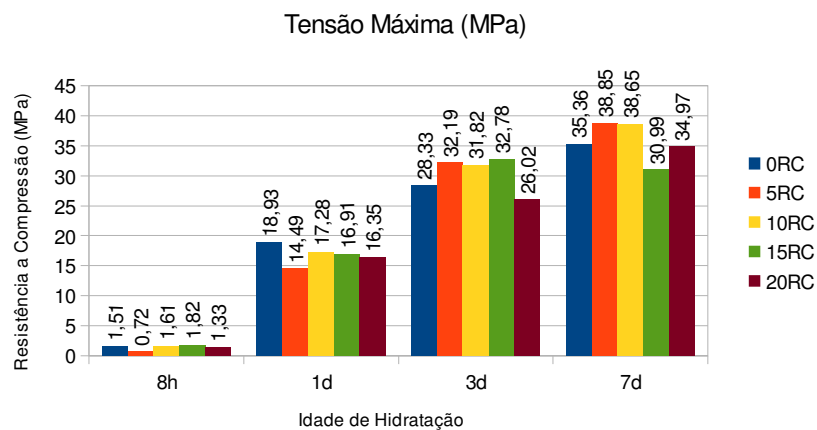


Figura 1 - Resultado ensaio a compressão

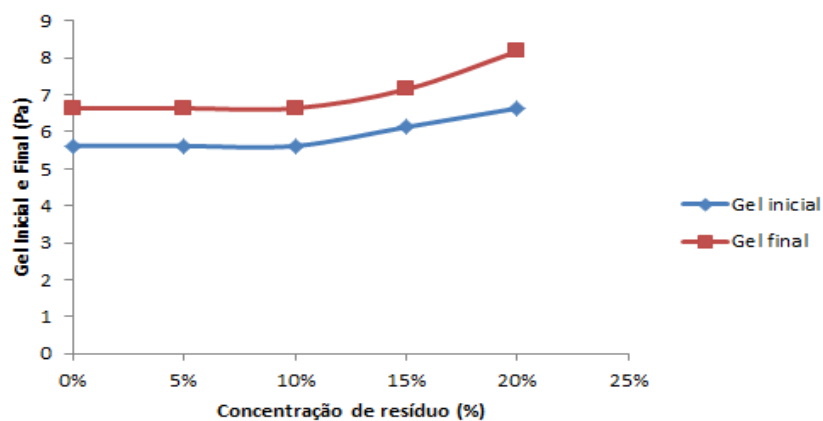


Figura 2. Força gel inicial e final das pastas com diferentes concentrações de resíduo cerâmico.

A Tabela 2 mostra os dados de viscosidade plástica e do limite de escoamento para as diferentes concentrações de resíduo utilizado.

Tabela 2. Viscosidade Plástica e Limite de Escoamento das Pastas de Cimento

Resíduo (%)	Viscosidade Plástica (Pa)	Limite de escoamento (Pa.s)
0	0,16	10,49
5	0,17	14,39
10	0,18	15,26
15	0,24	15,29
20	0,27	16,00

Analisando a Tabela 2, verificasse que o aumento da concentração de resíduo cerâmico na formulação das diferentes pastas de cimento, influenciou no aumento da tensão de cisalhamento, viscosidade plástica e limite de escoamento. As pastas contendo 10 e 15% de resíduo cerâmico apresentaram um comportamento praticamente estável para o limite de escoamento.

De acordo com Machado (2002), o aumento da tensão limite de escoamento acontece devido às interações entre as partículas e esta propriedade pode ser diretamente relacionada com a superfície específica. Logo quanto maior a concentração de resíduo maior a interação entre suas partículas com as do cimento e por consequência maior será a tensão limite de escoamento, por tal motivo se observa os altos valores correlacionados as pastas confeccionadas com 5%, 10%, 15% e 20% de resíduo cerâmico quando comparado a pasta referência. Apesar do valor do limite de escoamento ter aumentado em relação à pasta referência o mesmo se encontra dentro da faixa requerida pela NBR 9831 (2006).

Rolim (2014) explica que, quando as pastas de cimento sofrem uma mudança brusca na tensão de cisalhamento, tendem a aumentar sua viscosidade ao longo do tempo. Embora a redução da viscosidade plástica seja um dado positivo em termos operacionais, facilitando o bombeamento e o transporte da pasta até o local de aplicação. Isso pode ser um indício de que a pasta estudada necessita de reformulação para que possa ser usada na cimentação de poços de petróleo.

As Figuras 3 e 4 mostram a influência do teor de resíduo cerâmico no comportamento reológico das pastas de cimento avaliadas pelo método do *squeeze-flow*.

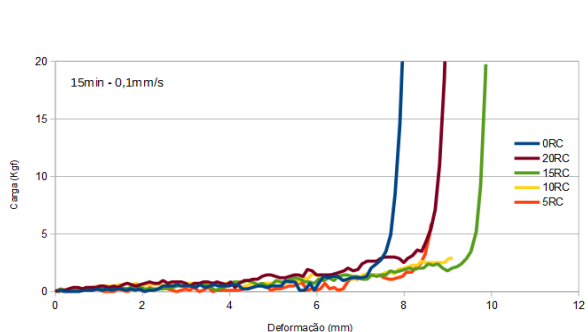


Figura 3: Influência do teor de resíduo cerâmico das pastas de cimento em função do tempo inicial (15 min), em ensaios de *squeeze flow* realizado com velocidade de 0,1 mm/s.

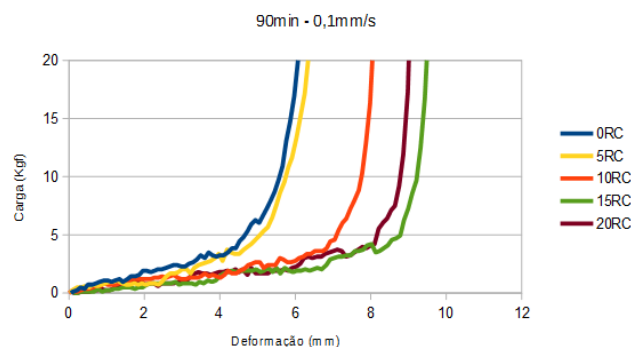


Figura 4: Influência do teor de resíduo cerâmico das pastas de cimento em função do tempo final (90 min), em ensaios de *squeeze flow* realizado com velocidade de 0,1 mm/s.

Analisando a Figura 3 na região de transição das fases I + II para a fase III, observamos que no tempo inicial de 15 minutos o aumento do teor de resíduo cerâmico provoca um aumento da carga necessária para provocar a deformação das pastas, exceto para a pasta com 10% de resíduo que não chegou a romper nas condições do ensaio. Comportamento esperado, pois a incorporação do resíduo cerâmico provoca o aumento da viscosidade da pasta e diminuição da fluidez. Enquanto que nos ensaios a 90 minutos (Figura 4) nota-se uma diminuição das fases I + II e uma inversão de comportamento reológico em relação a composição. O aumento do teor de resíduo cerâmico tornou a pasta menos viscosa, foram necessárias cargas menores para provocar a mudança de fase. As maiores deformações foram observadas para as pastas mais concentradas.

Na Figura 5 são mostrados os valores do módulo de escoamento das pastas de cimento contendo resíduo cerâmico, em função do tempo de hidratação.

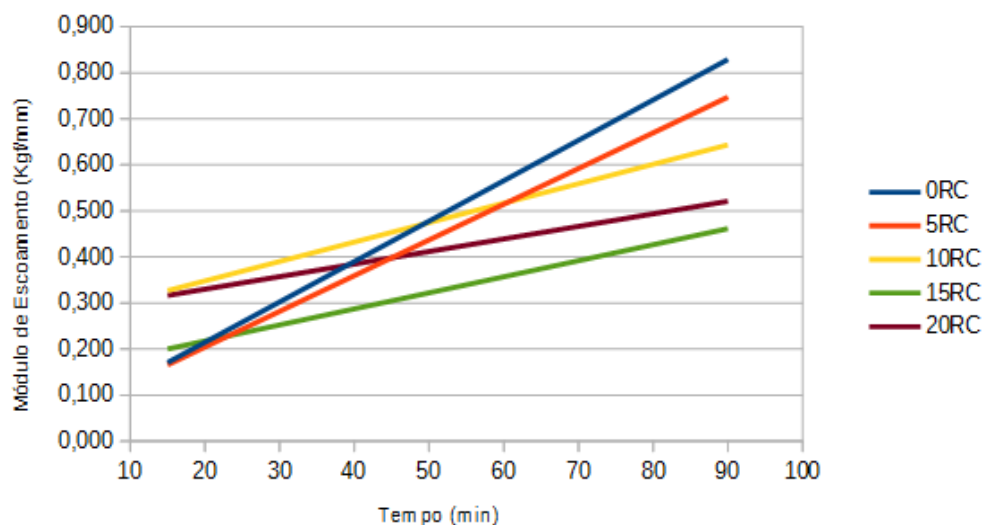


Figura 5: Influência do teor de resíduo cerâmico no módulo de escoamento, em ensaios de *squeeze flow* realizado com velocidade de 0,1 mm/s

Os valores do módulo de escoamento apresentados na Figura 5 mostram que, de modo geral o aumento do teor de resíduo cerâmico nas pastas de cimento diminui o módulo de escoamento com relação ao tempo. Como consequência a um aumento na fluidez das pastas avaliadas.

Conclusões

Os resultados do ensaio de compressão mostraram que a resistência com a adição do resíduo possuiu pequena variação ou até mesmo uma melhora, mesmo aumentando-se o fato a/c. Mostrou também que há uma influência do resíduo no tempo de pega do cimento, visto que os melhores resultados foram obtidos com períodos maiores de cura dos corpos de prova. Para o teor de 20% a pasta teve os resultados mais baixos, provavelmente devido a não ocorrência do efeito filler do resíduo na pasta.

Observou-se que o aumento da concentração de resíduo nas pastas de cimento provocou uma elevação nos valores de gel inicial e final, o que não é um indicativo satisfatório, pois o aumento nas forças dos géis indica uma resistência maior para a pasta ou fluido sair do repouso e iniciar ou reiniciar seu movimento. O aumento da concentração de resíduo cerâmico na formulação das diferentes pastas de cimento também influenciou no aumento da tensão de cisalhamento, viscosidade plástica e limite de escoamento. As pastas contendo 10 e 15% de resíduo cerâmico apresentaram um comportamento praticamente estável para o limite de escoamento.

Os resultados obtidos com o método do squeeze-flow estão em consonância com os obtidos pelo viscosímetro Fann 35 A. Com o aumento do teor de resíduo verificou-se um aumento do módulo de escoamento, ou seja, a pasta perdeu fluidez, ganhou resistência interna ao cisalhamento devido a compactação entre os grãos de cimento e de resíduo e a pasta tornou-se mais densa. Provavelmente a absorção de água por parte dos grãos de argila que possuem formato lamelar e, portanto, requerem mais água para a saturação de sua superfície molhada, impedindo assim que ocorra a hidratação do cimento CPG, que é o elemento que garante a fluidez da pasta.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FABESP e ao CNPq pelas bolsas concedidas, ao CETA e ao DCTM e demais laboratórios da UFBA que ajudaram na realização da pesquisa.

Referências Bibliográficas

NBR 9830:1993. Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos - Determinação das propriedades reológicas - Método de ensaio.

MACHADO, J. C. V. Geologia Escoamento de Fluidos: Ênfase na Indústria do petróleo. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS 2002. MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: estruturas, propriedades e matérias. São Paulo: PINI, 1994.

MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H. M. Rheological behaviour of fresh cement paste as measured by squeeze flow. Journal of Materials Science, 29, 1374-1381, 1994

MIRANDA, C. R. PASTAS DE CIMENTO DE ALTA COMPACIDADE PARA POÇOS DE PETRÓLEO - PROCESSO DE FORMULAÇÃO, PROPRIEDADES REOLÓGICAS, RESISTÊNCIA MECÂNICA E QUÍMICA. Tese de Doutorado em Ciência de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008

NELSON, E. B. Well Cementing, Dowell Schlumberger Ed. Serv., Houston, USA (1990).

ROLIM, C. C. Analise de Pastas de Cimento para Aplicação em Poços de Petróleo. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba. Relatório de Estágio, 2014.

SILVA, F. G. S. ESTUDO DO USO DE RESÍDUO CATALÍTICO DO REFINO DE PETRÓLEO NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Universidade Federal da Bahia, Doutorado em Energia e Ambiente Salvador, Bahia, 2015.