



AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA INFLUÊNCIA DO LÁTEX SBR NAS PROPRIEDADES DE TRAÇÃO E RESISTÊNCIA MECÂNICA EM PASTAS DE CIMENTO

Ramón Victor Alves Ramalho¹; Airton Santos Araújo de Souza²; Salete Martins Alves³;
Julio Cezar De Oliveira Freitas⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica -
ramonvictor31@hotmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica -
airton.s.a.souza@gmail.com

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica -
saletealves@ect.ufrn.br

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Unidade Acadêmica de Química -
juliofreitasj@hotmail.com

RESUMO

A indústria do petróleo frequentemente necessita ultrapassar estágios tecnológicos com o objetivo de manter níveis de exploração ou aumentá-los. Assim, procedimentos inovadores têm sido de suma importância para o sucesso de atividades petrolíferas. Neste trabalho foram realizados ensaios de laboratório padronizados pelo *American Petroleum Institute* com pastas de cimento no estado endurecido. Foi estudado como presença do Látex SBR pode influenciar nas propriedades mecânicas de resistência a compressão e tração por compressão diametral de um componente cimentante, bem como o tempo e o modo de cura. Foram utilizadas pastas ausente de Látex SBR e com 1 gpc (galão por pé cúbico) do mesmo. Os tempos de cura que variaram em 6 e 27 dias, sendo algumas analisada também a utilização das curas com os 3 últimos dias em câmara de HPHT (*High Pressure High Temperature*), simulando condições de injeção de vapor em poços de petróleo. Para a análise fatorial foi utilizada a ferramenta computador *Statistica 7.0*, sendo os resultados experimentais analisados em um planejamento fatorial completo. Os resultados mostraram que as pastas aditivadas com o látex SBR apresentaram melhores valores de resistência mecânica. Também ficou claro que a utilização da câmara de HPHT em pastas para simular condições de injeção de vapor diminui os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade, sendo mais visível nas pastas que continham o Látex SBR.

Palavras-chave: Cimentação petrolífera; Látex SBR; Injeção de vapor; planejamento fatorial; *experimental design*.

1. INTRODUÇÃO

Poços de petróleo são perfurações feitas no solo a fim de criar uma conexão até um reservatório de hidrocarbonetos. Após a perfuração, outros processos ocorrem no entorno e nas perfurações, tornando o poço completamente capaz de produzir. Falando de forma básica, é

necessário perfurar e descer uma coluna de produção para tornar o procedimento estanque. Para garantir o isolamento do poço com a formação rochosa e estabilidade mecânica, é necessário cimentar o poço.

Na cimentação, o cimento é introduzido entre o tubo de revestimento e a parede do poço. Nesta posição, o



cimento atua para isolar hidráulicamente, evitando migração de fluidos de comportamento nocivo ao bom funcionamento do sistema. Ao fim do processo deve haver pasta de cimento em todo espaço entre o revestimento e a formação. A pasta de cimento é bombeada e só deve obter completo endurecimento em local adequado de aplicação. Esta aplicação do cimento é chamada cimentação primária, as demais aplicações com intuito de correção são cimentações secundárias (THOMAS, 2004).

A utilização de uma pasta de cimento adequada em um poço de petróleo é de fundamental importância para o seu ciclo de vida útil, evitando possíveis intervenções futuras no poço, o que acarreta gastos adicionais.

No nordeste brasileiro, por exemplo, há grandes concentrações de reservatórios de óleo pesado, para isso, é necessária a utilização de métodos térmicos de recuperação especial de petróleo. O método mais difundido para óleos pesados e com maiores índices de recuperação é a injeção de vapor, pelo motivo da tecnologia envolvida ser consideravelmente dominada pela região (OLIVEIRA, 2009).

Para determinar a pasta para utilização específica é necessário analisar as condições de poço e reservatório e, posteriormente, adequar a pasta de cimento. De forma geral, esta adequação é feita por intermédio de aditivos químicos.

Os aditivos são componentes químicos frequentemente utilizados na pasta de cimento. A pasta de cimento contendo apenas cimento e água é de rara utilidade na cimentação. Os aditivos interagem quimicamente alterando características que há o desejo de ser mudada na pasta de cimento. É possível acelerar ou retardar a pega do cimento (período de hidratação). É possível, também, evitar que o cimento sofra retrogressão a altas temperaturas

adicionando sílica à formulação. Para tornar a pasta mais fluida, utiliza-se o dispersante. Para diminuir a perda da água da pasta de cimento ao contato com a formação, adiciona-se o controlador de filtrado. (GONÇALVES, 2013).

De acordo com NELSON, 1990, O uso do látex como aditivo em pastas de cimento para cimentação petrolífera teve início em 1957, anos depois do início da utilização na construção civil. Os pioneiros, Rollins e Davidson, concluíram que a presença do Látex na água de mistura da pasta incorporou ao produto diminuição da taxa de perda de filtrado, melhorou a durabilidade e potencializou propriedades reológicas. Desde então, o Látex nunca deixou de ser utilizado na cimentação petrolífera, sendo frequentemente utilizado em poços com variação de temperatura.

Este trabalho tem como objetivo analisar através de ferramenta estatística a influência da presença de Látex SBR no comportamento mecânico (propriedades mecânicas de resistência à compressão (API) e tração por compressão diametral) de pastas de cimento para poços petrolíferos. Analisar também a influência da mudança de tempos de cura e o comportamento das pastas quando submetidas às condições de injeção de vapor. Todas as variáveis podem ser capazes de alterar a superfície de resposta.

2. METODOLOGIA

2.1. Norma API RP 10A

A norma API RP 10A contém especificações de procedimentos e condições para aplicação e pesquisa relacionadas à cimentação de poços petrolíferos. Dentre eles, definimos alguns parâmetros, como: Densidade da pasta, Temperatura de circulação (BHCT, *Bottom Hole Circulation Temperature*) e Temperatura de circulação estática (BHST, *Bottom Hole Static Temperature*).



2.2. Preparação das pastas

Para a preparação das pastas foi utilizada uma calculadora padrão de formulação de pasta de cimento. Foram utilizados valores padrões da Norma API RP 10A. Após ter estes obter a formulação e fazer as devidas coletas de materiais pesados, as pastas foram batidas em *Mixer* elétrico. O procedimento padrão foi seguido, o qual designa: Primeiro mistura-se água e aditivos à baixa rotação e em seguida aumenta a rotação a 4000 rpm por 15 segundos e despeja o conteúdo sólido restante. Por fim, aumenta novamente a rotação a 12000 rpm por 35 segundos para homogeneização.

A cura das pastas ocorreram em banho térmico à 38°C. A cura em câmara HPHT foram feitas a 572°C de temperatura e à 2000MPa de pressão.

2.3. Ensaio de Resistência à compressão e ensaio de Tração por compressão diametral

Um estudo adequado de propriedades mecânicas de pastas de cimento devem conter ensaios de resistência mecânica. Os ensaios de resistência mecânica para esta este trabalho foram Ensaio de resistência à compressão (Figura 1) e o Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Figura 2), como pode ser visto nas figuras abaixo. Ambos foram realizados em prensas hidráulicas *Shimadzu- AG-1* onde são submetidas a uma pressão uniaxial até a ruptura.

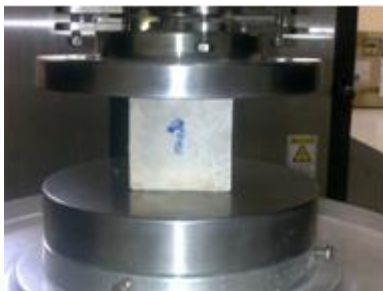


Figura 1: Ensaio de resistência à compressão

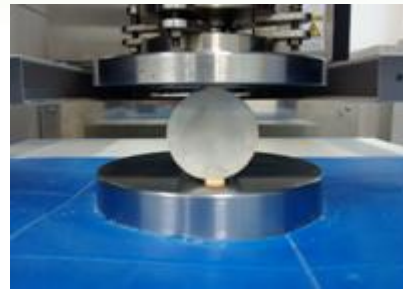


Figura 2: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

2.4. Câmara de Cura HPHT

A *câmara de HPHT Chandler modelo 1910* foi utilizada para cura das pastas a alto valor de temperatura e de pressão. Esta câmara é utilizada para simular as condições de poço em uma operação de injeção de vapor.

2.5. Planejamento fatorial

Este trabalho utilizou um planejamento fatorial completo 2^3 , sem repetições no ponto central e em ensaios axiais, com o objetivo de determinar a configuração de maximização das propriedades mecânica, bem como a viabilidade do uso do Látex SBR.

A abordagem experimental desde trabalho constitui em variar todas as variáveis ao mesmo tempo. Isso é feito para analisar a influência das variáveis entre si, ou seja, o valor ideal para uma variável é intimamente dependente do valor da outra. Este processo ocorre com frequência, uma vez que estando dentro do mesmo sistema, as variáveis na maioria das vezes assumem comportamento de dependência. Este fenômeno é chamado de interação entre variáveis.

Algumas informações de características relevantes para montar o planejamento podem ser citadas. Temos que a variáveis independentes são: Presença do Látex SBR, Tempo de cura e cura parcela do tempo de cura em câmara HPHT (*High Temperature and High*



Pressure). Já as reações independentes são a Resistência à compressão e a Resistência à tração por compressão diametral. Além de nível de confiança de 95% e Termo de erro: SS residual.

Tabela 1: Valores utilizados no DCCR para três fatores

Variáveis	-1	+1
Presença do Látex SBR (SBR)	0 gpc	1 gpc
Tempo de cura (T)	6 dias	27 dias
Parcela do tempo de cura em câmara HPHT (HPHT)	0 dia	3 dias

A matriz de experimentos levou em consideração as variáveis independentes nos níveis máximos (+1) e nos níveis mínimos (-1), como visto na Tabela 1. Este tipo de planejamento fatorial, em dois níveis, resultou na estratégia experimental para um planejamento fatorial para três variáveis ($2^3 = 8$) totalizando, somente, oito ensaios, pois não foram feitos ensaios em pontos centrais e axiais. As variáveis dependentes são: Resistência à compressão (RC) e Resistência a tração por compressão diametral (TCD).

Tabela 2: Geratriz do planejamento fatorial 2^3

Ensaio	HPHT	Tempo	Látex SBR
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

2.6. Ferramenta de análise estatística

O software utilizado para processamento estatístico dos resultados

foi o programa **Statística® 7.0** da Stat Soft (NORIEGA, et al., 2005).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados ensaios de resistência compressão e resistência à tração por compressão diametral variando três aspectos, sendo eles: quantidade presente do látex (0% e 1gpc), tempo de cura (6 dias ou 27 dias) e exposição à altas temperaturas e pressão de três dias nos últimos dias de cura (0 dia ou 3 dias) para as pastas 15,0 lb/Gal.

Tabela 3: Resultados de cada ensaio

Ensaio Mecânico	RC (MPa)	TCD (MPa)
0 gpc; 6 dias; com HPHT	22,8	24,1
0 gpc; 6 dias; sem HPHT	20,8	17,4
0 gpc; 27 dias; com HPHT	43,3	35,3
0 gpc; 27 dias; sem HPHT	28,1	21,5
1 gpc; 6 dias; com HPHT	14,9	25,8
1 gpc; 6 dias; sem HPHT	11,7	16,6
1 gpc; 27 dias; com HPHT	22,1	30,5
1 gpc; 27 dias; sem HPHT	21,5	20,2

Os resultados da tabela acima indicam a redução da resistência à compressão dos módulos elásticos com a presença do látex SBR. Isso ocorre porque o látex aumenta a maturidade da pasta ao dificultar a formação do componente etringita na cura do cimento. Aumenta, também, a quantidade de água na microestrutura. O aumento do tempo de cura promove a maior formação de C-S-H e assim a resistência é aumentada. Outro fator interessante foi observado ao comparar pastas idênticas que curaram em HPHT ou não. A alta temperatura e a alta pressão influencia nos valores de resistências a partir da micro desintegração. Este fenômeno se tornou menor quando se levou em consideração as pastas com mais tempo de cura em banho térmico. Foi observado também que a presença do látex diminuiu a resistência à tração por compressão



diametral, bem como o módulo de elasticidade.

3.1. Análise estatística

3.1.2 Ensaio de Resistência à compressão

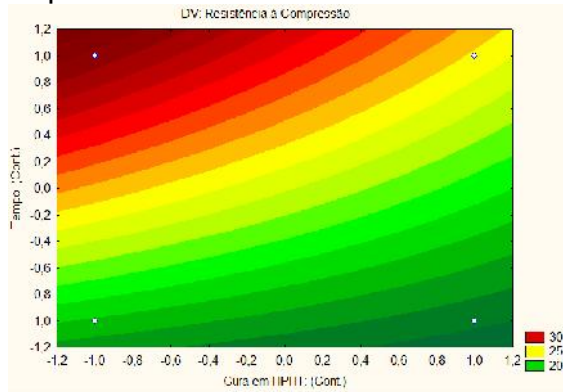


Figura 4: Valores de Resistência à compressão analisando a interação entre Concentração de Látex SBR e Cura em HPHT

De acordo com a figura 4, os melhores valores de resistência à compressão apareceram para os maiores valores de tempo de cura. É indicado que ao aumentar o período de hidratação do cimento ele retorna melhores valores maiores de resistência à compressão. Devido ao comportamento da superfície de resposta a cima, é possível perceber que a ausência de cura em HPHT resulta em melhores valores em comparação à presença de cura em HPHT.

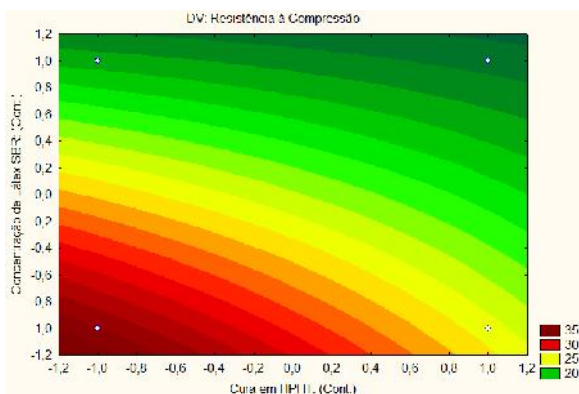


Figura 5: Valores de Resistência à compressão analisando a interação entre Concentração de Látex SBR e Cura em HPHT

O comportamento da relação entre as concentrações de Látex SBR com a presença da cura em HPHT (Figura 5) demonstra que os maiores valores de resistência à compressão estão em um cenário de menores valores do látex SBR e a ausência de cura em HPHT. A medida que a concentração do látex aumenta, ocorre uma diminuição da resistência à compressão da pasta. Isso ocorre porque o Látex atua aumentando a quantidade de estrutura amorfa e maior quantidade de poros da pasta.

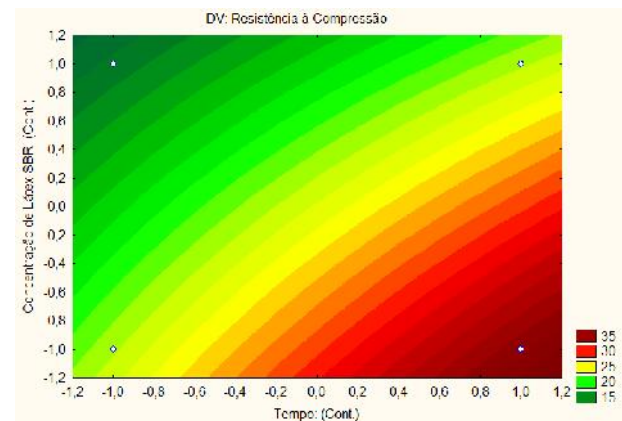


Figura 6: Valores de Resistência à compressão analisando a interação entre Concentração de Látex SBR e Tempo de Cura

O módulo de elasticidade é um parâmetro que indica a resistência à deformação que um material pode suportar (Figura 6), ou seja, quanto menor o módulo de elasticidade, maior é a capacidade do material se deformar. O valor do módulo de elasticidade é proporcional ao módulo de resistência à compressão.

Pode-se concluir que o aumento da concentração do látex e os menores tempos de cura dão as pastas de cimento maior capacidade de deformação.

3.1.2 Ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral

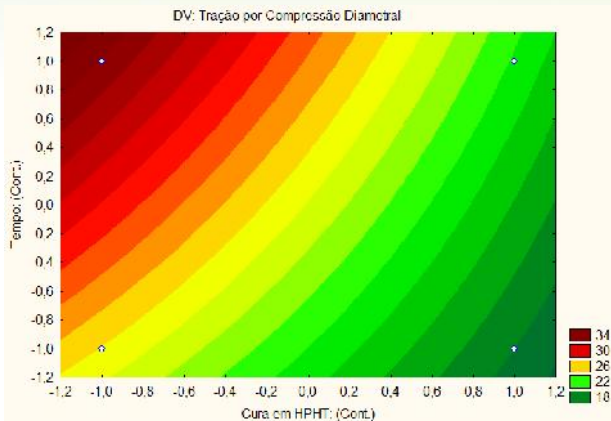


Figura 7: Valores de Resistência à Tração por compressão diametral analisando a interação entre Tempo de Cura e a Cura em HPHT

De acordo com a figura 7, similarmente aos resultados para o ensaio de Resistência à compressão, os valores de resistência à tração por compressão diametral também apontaram para maiores tempo de cura e a ausência da cura em HPHT interferem para o aumento dos resultados.

O aumento da temperatura na câmara HPHT pode ser explicado pela formação de silicatos de cálcio hidratados do tipo Xonitlina e Tobermorita que são responsáveis pela manutenção das resistências à compressão em níveis aceitáveis (OLIVEIRA, 2009).

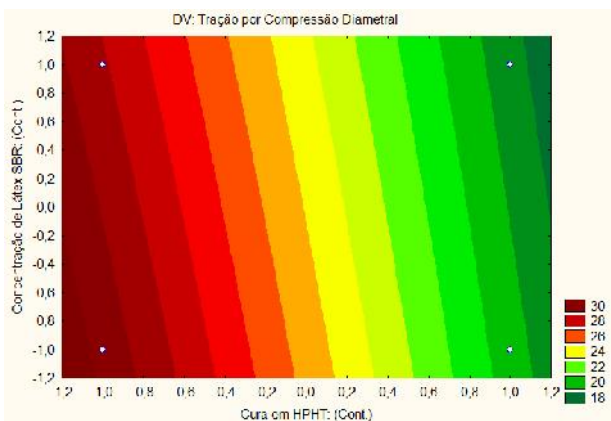


Figura 8: Valores de Resistência à Tração por compressão diametral analisando a interação entre Concentração de Latex SBR e a Cura em HPHT

Para os resultados de Tração por compressão diametral da figura 8, o intervalo estudado de concentração do Látex não apresentou significativa alteração nos resultados. Contudo, o aumento da concentração do polímero atua na retardação das formações de cristais de Etringita o que aumenta a maturidade da pasta e a quantidade de água.

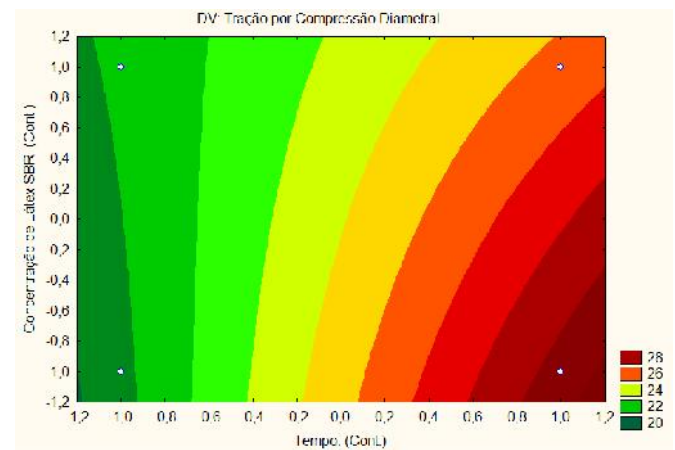


Figura 9: Valores de Resistência à Tração por compressão diametral analisando a interação entre Concentração de Latex SBR e o Tempo de Cura

O comportamento gráfico da Figura 9 indica que a variável tempo teve influência pequena à resistência a tração, as alterações não foram grande dentro do intervalo utilizado. Contudo, há sempre maiores valores de resistência a tração em ao aumentar o período de tempo relativos a melhor cura do cimento.

4. CONCLUSÕES

O Látex SBR visivelmente atua diminuindo os valores de resistência à compressão. Desta forma, torna as pastas aditivadas com ele mais elásticas, promovendo uma melhor resistência a eventuais esforços físicos na bainha de cimento.

Quando expostas às condições de injeção de vapor os valores de



Resistência a compressão e Resistência à tração por compressão diametral aumentam, concluindo-se que a câmara HPHT atuou acelerando a hidratação do cimento, chegando a níveis mínimos de resistência. De modo semelhante, o tempo de cura atuou de forma paralela à hidratação do cimento.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Laboratório de Cimentos da UFRN pelo apoio intelectual e material. Agradeço também ao Programa de Recursos Humanos – ANP 14 (PRH 14) por financiar esta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livro :

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

THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Interciência, 2004.

Artigo de periódico:

NORIEGA, Pky ; RÖPKE, C.D. ; CAMILO, C.M. ; CHANEL, Paulo ; BARROS, S.B. M . *Avaliação por análise fatorial das condições da extração do 4-nerolidilcatecol de P. umbellata (L). Miq.*. RBCF. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas (Cessou em 2008. Cont. ISSN 1984-8250 Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences), São Paulo, v. 41, n.2, p. 261-269, 2005.

Tese/dissertação:

GONÇALVES, C. S. *Aproveitamento de resíduo agroindustrial para formulação de pastas de cimento para poços de petróleo*. 2013. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo).

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

OLIVEIRA, F. S. D., *Desenvolvimento de pastas de cimento flexíveis para poços de petróleo submetidos à injeção de vapor utilizando látex do tipo SBR*. 2011. Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.