

# METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PASTAS DE CIMENTO PARA CIMENTAÇÃO DE POÇOS COM INJEÇÃO DE VAPOR

Ramón Victor Alves Ramalho<sup>1</sup>; Airton Santos Araújo de Souza<sup>2</sup>; Julio Cezar De Oliveira Freitas<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica - [ramonvictor31@hotmail.com](mailto:ramonvictor31@hotmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica - [airton.s.a.souza@gmail.com](mailto:airton.s.a.souza@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Unidade Acadêmica de Química - [juliofreitasj@hotmail.com](mailto:juliofreitasj@hotmail.com)

## RESUMO

Dados e estimativas quantificam que aproximadamente 70% do total de recursos petrolíferos do mundo correspondam a hidrocarbonetos de alta ou altíssima viscosidade. Para efetuar a produção destes óleos, métodos térmicos podem ser utilizados. O método de injeção de vapor é um método térmico consolidado que consiste em submeter o poço a temperaturas da ordem de 300°C, assim, durante o período de injeção do vapor o revestimento metálico e a bainha de cimento sofrem tensões e deformações mecânicas de origem térmica. Como esses materiais possuem propriedades térmicas e mecânicas bem diversas entre si, há o surgimento e a propagação de trincas e fissuras na bainha, comprometendo, assim, o isolamento mecânico, a integridade e a vida útil do poço. Uma forma de contornar esse problema se dá através da modificação das propriedades mecânicas da pasta de cimento. As propriedades são trabalhadas de tal forma que possam garantir o aprimoramento da elasticidade desta, sendo elas o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Para avaliar se as mesmas atendem os esforços e as deformações atuantes para serem corretamente aplicadas nos poços supracitados, foram realizados ensaios de compressão com extensômetros, para determinação do limite de resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de oito pastas cimentícias. Os resultados mostraram que a metodologia consegue avaliar essas propriedades mecânicas de pastas destinadas a cimentação de poços de petróleo.

**Palavras-chave:** Metodologia, Propriedades mecânicas, Pastas de cimento, Cimentação de poços de petróleo.

## 1. INTRODUÇÃO

O petróleo é, atualmente, a principal fonte para produção de energia utilizada no mundo. Apesar dos esforços científico e tecnológico

que vem sendo desenvolvidos nas últimas décadas para aplicar em larga escala fontes alternativas de suprimento energético, as tais não alcançam o nível de rentabilidade financeira e eficiência energética

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

(83) 3322.3222

[contato@conepetro.com.br](mailto:contato@conepetro.com.br)



## II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE  
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS  
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

similares e/ou superiores à do petróleo. Com sua demanda atual, adicionado ao fato do cenário de redução da produção de óleo em reservatórios tradicionais, uma alternativa para obtenção deste recurso foi a exploração e produção em campos com reservatórios contendo óleo pesado.

Com o intuito de poder elevar esse tipo específico de óleo, contido na rocha reservatório, até a superfície, métodos foram criados visando a obtenção dele de maneira economicamente lucrativa. A elevada viscosidade do óleo pesado torna bastante difícil seu escoamento; uma das maneiras de contornar esse problema é o fornecimento de energia ao óleo na forma de calor, proporcionando a diminuição de sua viscosidade e consequentemente, facilitando o seu escoamento.

Vários métodos se utilizam desse mecanismo para recuperação de óleo pesado, podendo ser listados os seguintes: aquecedores de fundo de poço, combustão in situ, injeção de fluidos quentes, injeção de vapor e aquecimento por ondas eletromagnéticas. Em campos onshore brasileiros, o método predominante é o de injeção de vapor, sendo

administrado de duas maneiras: por injeção cíclica ou por injeção contínua.

No caso da injeção cíclica de vapor, este é injetado através de um poço que é, simultaneamente, injetor e produtor. O ciclo se dá em três etapas: injeção do vapor, soaking e produção (ALVAREZ e HAN, 2013 apud DIAS NETO, 2016). O vapor injetado, usualmente com uma temperatura próxima ou igual a 300°C, pode causar danos à bainha de cimento. O cimento possui menores coeficientes de condutividade e expansão térmicos se comparado aos do aço que compõe o revestimento metálico, fazendo com que este se aqueça e expanda radialmente mais rapidamente que aquele, gerando, assim, gradientes de temperatura e tensões mecânicas entre eles. Esses efeitos ocasionam a propagação de trincas e o surgimento de fissuras na bainha, além da perda de aderência entre a bainha e o revestimento, i. e., perda de isolamento mecânico.

Então, surge a necessidade da produção de pastas de cimento que atendam essas solicitações, e que possuam propriedades mecânicas, tais como Resistência à Compressão, Módulo de Elasticidade e Coeficiente

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br



## II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE  
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS  
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

de Poisson, compatíveis com as tensões e deformações mecânicas oriundas dos ciclos térmicos inerentes à injeção cíclica de vapor. Além disso, observa-se que essas propriedades devem ser testadas, avaliadas e obtidas através de metodologias, compostas de procedimentos laboratoriais e ensaios, bem definidas, com o intuito de garantir que elas estejam nos padrões requeridos para as devidas aplicações no campo.

Diante de tudo isso, o atual trabalho se propõe a alcançar o seguinte objetivo:

Desenvolver, avaliar e validar uma metodologia experimental que consiga descrever algumas propriedades mecânicas de pastas que serão aplicadas em poços de injeção de vapor.

## 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 Curas das pastas

Depois de preenchidos com as pastas, os moldes foram levados para a cura na temperatura estática de fundo de poço (BHST) e a pressão atmosférica, em um banho ultratermostático Solab, modelo SL 152, com água, que possuía dimensões adequadas à imersão completa dos moldes, uma placa perfurada para elevar o molde do fundo do banho (para propiciar a circulação completa da água por todo o molde) e também um sistema de circulação realizado por uma bomba de água (NBR 9825, 1993).

Os tempos de cura trabalhados foram de 6 e 27 dias. Quatro pastas ficaram por esses tempos unicamente no banho ultratermostático em BHST. Duas ficaram 3 dias em BHST e 3 dias na câmara de cura HPHT a uma temperatura de 572 °F (300 °C) e pressão de 2000 psi (13,80 MPa, cerca de 140 vezes a pressão atmosférica), simulando a temperatura de injeção de vapor. As duas restantes ficaram 24 dias em BHST e 3 dias na câmara HPHT.

Após os dias de cura, os corpos de prova, tanto os que ficaram somente no banho como os que foram para a câmara de cura HPHT, eram desmoldados, e, 45 minutos antes de serem ensaiados, eram colocados em um recipiente, capaz de cobri-los

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

(83) 3322.3222

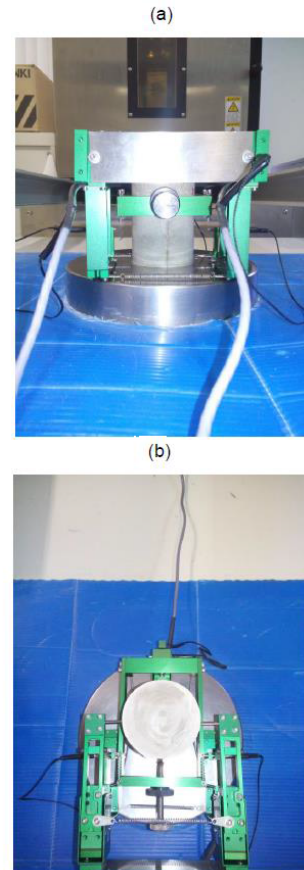
contato@conepetro.com.br

completamente, com água na temperatura ambiente, onde eram resfriados por um período mínimo de 30 minutos.

### 2.3 Ensaio de compressão com auxílio de extensômetros

Foram utilizados Extensômetros Epsilon, modelos 3975-0008-ST (sensor de deslocamento transversal) e 3542RA1-080M-250M-ST (sensor de deslocamento longitudinal) foram conectados ao amplificador de sensor externo Shimadzu, modelo ESA-CU200, como descrito na Figura 2.1.

**Figura 2.1 - Posicionamento do extensômetro longitudinal no corpo de prova: (a) vista frontal e (b) vista superior**



O corpo com os extensômetros devidamente posicionados era centralizado no prato inferior. Os extensômetros eram zerados no amplificador, e o prato superior da máquina era abaixado até a iminência do toque com a face superior do corpo. Uma pré-carga de 0,5 kN era aplicada através do ajuste fino da máquina de ensaios. A altura de referência na máquina era zerada, para então se dar o início ao ensaio apertando o botão Start no painel de controle da máquina. O ensaio era finalizado ao apertar o botão STOP

**[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)**

**(83) 3322.3222**

**[contato@conepetro.com.br](mailto:contato@conepetro.com.br)**

(quando o corpo de prova rompia). Após todos os corpos de prova uma pasta serem ensaiados, os dados obtidos da máquina eram salvos em arquivo de planilha eletrônica.

A partir desde ensaios foi possível adquirir variáveis de Resistência à compressão e Módulo de elasticidade de cada formulação.

### 2.4 Formulações utilizadas

Para validar a metodologia proposta, foram elaboradas 8 pastas variando as seguintes configurações: dois tempos de cura (6 e 27 dias), duas temperaturas de cura (44,4°C (BHST) e 300°C (HPHT)) e duas concentrações do copolímero látex SBR – borracha de estireno e butadieno (0 e 1 gal/pé3 (1 gpc)). Os dois tempos de cura tiveram a finalidade de averiguar o ganho de resistência à compressão com o tempo. As temperaturas utilizadas simulavam a pasta de cimento sendo submetida à temperatura do poço e à temperatura de injeção do vapor em um poço de injeção. A utilização do látex foi necessária para fins de comparação das propriedades elásticas. Na Tabela 2.1 encontram-se as designações de cada pasta.

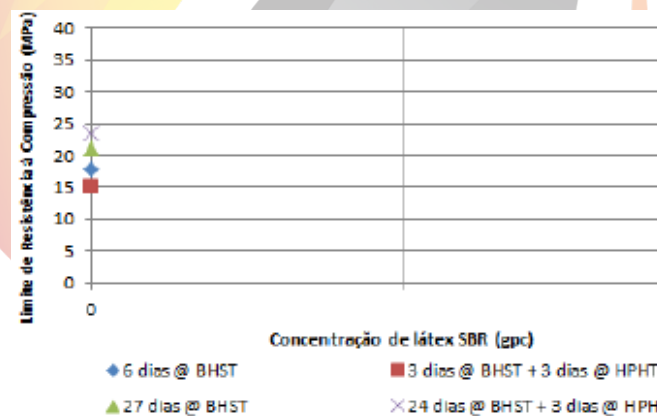
**Tabela 2.1 – Designação das pastas**

Designação da pasta	Concetração de látex SBR (gpc)	Tempo de cura no banho ultratermostático em BHST (dias)	Tempo de cura na câmara em HPHT (dias)
cont_6d_RC	0	6	–
cont_27d_RC	0	27	–
cont_3+3d_RC	0	3	3
cont_24+3d_RC	0	24	3
sbr_6d_RC	1	6	–
sbr_27d_RC	1	27	–
sbr_3+3d_RC	1	3	3
sbr_24+3d_RC	1	24	3

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir apresenta a variação do limite de resistência à compressão das pastas em função da concentração do SBR.

**Figura 3.1 - Limite de resistência à compressão versus concentração de SBR**





**II CONEPETRO**

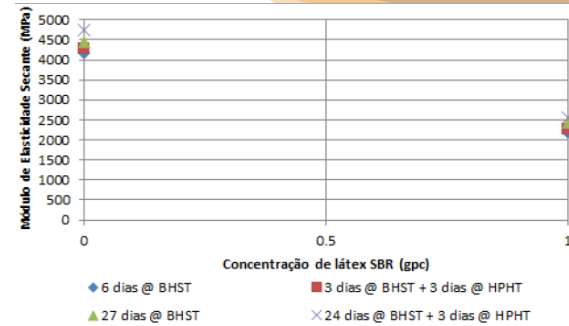
II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE  
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS  
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

A maior perda de resistência comparando com as pastas de controle (as pastas que não contém SBR) se deu com a pasta com cura de 6 dias em BHST, que foi de 39,24%. A segunda em perda foi a pasta com cura de 3 dias em BHST e 3 dias em HPHT (34,66%). Em seguida vem a pastas com cura de 27 dias em BHST (29,01%). Por último, a pasta com cura de 24 dias em BHST e 3 dias em HPHT (22,65%).

A Figura 3.2 mostra os valores dos módulos de elasticidade das pastas contendo látex SBR.

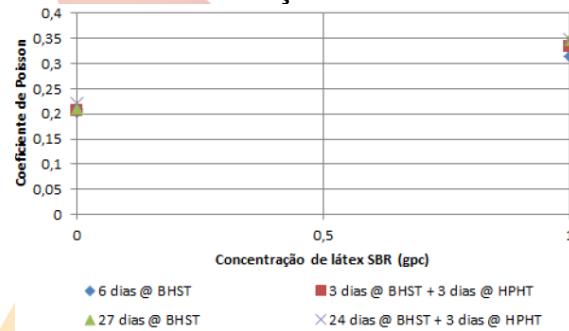
A maior queda no módulo de elasticidade, ou seja, o maior ganho de elasticidade em comparação com as pastas de controle, se deu com a pasta com cura de 6 dias em BHST, que foi de 47,52%. Em segundo lugar ficou a pasta com cura de 3 dias em BHST e 3 dias em HPHT (46,90%). Em seguida vem a pasta com cura de 24 dias em BHST e 3 dias em HPHT (46,11%). Por último, a pasta com cura de 27 dias em BHST (44,80%).

**Figura 3.2 - Módulo de elasticidade versus concentração de SBR**



Na Figura 3.3 se encontra o gráfico que representa os coeficientes de Poisson das pastas com látex SBR.

**Figura 3.3 - Coeficiente de Poisson versus concentração de SBR**



O maior ganho percentual no coeficiente de Poisson, em comparação com as pastas de controle, se deu com a pasta com cura de 27 dias em BHST, com o valor de 63,90%. O segundo maior ganho foi o da pasta com cura de 3 dias em BHST e 3 dias em HPHT (61,47%). Em seguida vem a pasta com cura de 24 dias em BHST e 3 dias em HPHT (58,18%). Por último, a pasta com cura de 6 dias em BHST (54,52%).

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou desenvolver uma metodologia que

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br



## II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE  
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS  
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

fosse capaz de avaliar algumas propriedades mecânicas, limite de resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, de pastas cimentícias para aplicação em poços de injeção de vapor. Isso se deu através da comparação de pastas com e sem o copolímero látex SBR, material que já vem sendo utilizado com a finalidade de melhorar as propriedades elásticas da bainha de cimento dos poços citados anteriormente. Os resultados obtidos mostram que a metodologia desenvolvida é capaz de mensurar e analisar essas propriedades.

A presença do látex nas pastas fez com que o limite de resistência à compressão fosse reduzido, mas ao mesmo tempo trouxe uma melhora das propriedades elásticas, isso comprovado ao ser observada uma diminuição do módulo de elasticidade e um aumento nos valores do coeficiente de Poisson, isto é, houve um incremento nos valores das deformações, tanto transversais como longitudinais, com a aplicação da tensão uniaxial de compressão das pastas aditivadas com o copolímero.

Sugere-se novos estudos que verifiquem e validem, através do uso da metodologia desenvolvida, a

aplicabilidade de materiais com propriedades elásticas interessantes em pastas de cimento para fins de cimentação de poços de injeção de vapor.

### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, J.; HAN, S. *Current Overview of Cyclic Steam Injection Process*, 2013. In: DIAS NETO, J. M. *Utilização de látex do tipo SBR e microesferas expansíveis para o desenvolvimento de pastas de cimento flexíveis para poços de petróleo submetidos à injeção de vapor*. Natal, RN: 2016. 106 f.

Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Instituto de Química. Programa de Pós Graduação em Química.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE / AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE – ANSI/API. RP 10B–4: *Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure*. Washington, D.C., 2004. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 9825: extração e preparação de amostras para classificação de cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos*. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 9831: Cimento*

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

***Portland Destinado à Cimentação de Poços Petrolíferos.*** Rio de Janeiro, 2006.

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.

DIAS NETO, J. M. ***Utilização de látex do tipo SBR e microesferas expansíveis para o desenvolvimento de pastas de cimento flexíveis para poços de petróleo submetidos à injeção de vapor.*** Natal, RN: 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Instituto de Química. Programa de Pós Graduação em Química.

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

