

## ESTUDO PARAMÉTRICO DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DA BAINHA DE CIMENTO EM POÇOS SUBMETIDOS À INJEÇÃO DE VAPOR

Lúcia C. Coelho<sup>1</sup>, Rosenil B. Mendes<sup>1</sup>, José Luís D. Alves<sup>1</sup>,  
Arnaldo R. D’Almeida<sup>2</sup>, Gilson Campos<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Métodos Computacionais para Engenharia - COPPE/UFRJ, Caixa Postal 68552 CEP 21949-900, Rio de Janeiro-RJ, e-mail [jalves@lamce.ufrj.br](mailto:jalves@lamce.ufrj.br)

<sup>2</sup> Cenpes/Petrobras, Cidade Universitária - Quadra 7, s/ No, Prédio 20, sala 1037 Ilha do Fundão, CEP: 21.949 900, Rio de Janeiro/RJ, e-mail [arda@cenpes.petrobras.com.br](mailto:arda@cenpes.petrobras.com.br)

<sup>3</sup> E&P-CORP/Petrobras, Av. República do Chile 65, sala 1703, CEP: 20035-900 Centro, Rio de Janeiro - RJ, e-mail [gilsonc@petrobras.com.br](mailto:gilsonc@petrobras.com.br)

**Resumo** – A técnica de injeção de vapor tem sido utilizada pela Petrobras para melhorar a recuperação de reservatórios de óleos pesados. Este procedimento vem induzindo danos na bainha de cimento com conseqüente perda do isolamento hidráulico, aumentando o BSW dos poços e os custos de produção. Análises de tensões na bainha de cimento submetidas a altos gradientes de temperatura indicam que pastas de cimentos convencionais não são capazes de suportar as tensões induzidas pela expansão térmica do revestimento. Um estudo paramétrico deste fenômeno foi efetuado utilizando-se a técnica dos elementos finitos a fim de avaliar o comportamento mecânico da bainha de cimento submetida a altas variações de temperatura. Concluiu-se que a bainha pode perder sua integridade devido a danos mecânicos, portanto a escolha de um sistema cimentante deve ser projetado de acordo com as solicitações a que o poço será submetido ao longo de sua vida útil. Pastas cimentantes mais flexíveis são mais adequados a poços que serão submetidos a grandes variações de temperatura.

Palavras-Chave: injeção de vapor; cimentação de poços; tensões termomecânicas

**Abstract** – The steam injection technique has been used by Petrobras to improve the recovery from heavy oil reservoirs. This procedure has induced the damage of the cement sheath, resulting in the loss of hydraulic isolation between reservoir zones and increasing the well BSW and production costs. Stress analysis on the cement sheath subject to high temperature gradients has shown that conventional cements slurries are not able to withstand the stress induced by the thermal casing expansion. A parametric study on this phenomenon was conducted using the finite element technique to evaluate the mechanical behaviour of the cement. It concludes that the sheath may lose integrity due to mechanical damage. The choice of the cement system must be engineered according to the efforts the wellbore will be subject during its life. Flexible cement systems are more appropriate to steam injection boreholes.

Keywords: steam injection, borehole cementing, termomechanical stresses

## 1. Introdução

A injeção de vapor em poços de óleo pesado vem sendo utilizada pela Petrobras para melhorar a sua recuperação. Entretanto, tem-se observado a perda do isolamento hidráulico entre as camadas do reservatório, o que aumenta os custos de produção.

Tradicionalmente, a perda do isolamento hidráulico da bainha de cimento é atribuída tanto a problemas de má cimentação quanto à retrogressão das propriedades mecânicas do cimento agravada pelas altas temperaturas. Neste caso, a solução proposta é a utilização de sistemas cimentantes com maior resistência à compressão, conseqüentemente mais rígidos (Noik, Riverau, 1998, Noik, Riverau, 1999, Blanco *et al.*, 1999). Goodwin, Crook (1992) apresentaram um trabalho que analisa o comportamento do cimento em um anular composto por dois tubos concêntricos submetido a alta pressão interna. Este trabalho demonstra que a pasta de cimento convencional não é capaz de suportar a pressão interna transmitida pelo revestimento. A partir de então, outra linha de pesquisa busca investigar o comportamento mecânico da bainha de cimento quando submetido a variações de pressão e temperatura (Thiercelin *et al.*, 1997, Bosma *et al.*, 1999, Bosma, Schwing, 2001).

Este trabalho apresenta um estudo paramétrico do comportamento termomecânico da bainha de cimento utilizando dados medidos ou disponíveis na literatura. Foram feitas variações paramétricas do módulo elástico da formação, da geometria de diferentes diâmetros de poço, da temperatura de injeção, dos estados de tensão inicial na bainha e do módulo elástico do cimento.

Verificou-se que a resposta mecânica da bainha de cimento depende da rigidez do sistema revestimento-bainha-formação. O contraste entre as propriedades térmicas do aço e dos demais materiais, associado a uma expansão térmica que é o dobro da do cimento na temperatura de injeção induz altas solicitações na bainha para o cimento Portland convencional. Conclui-se assim que sistemas cimentantes mais flexíveis são mais adequados em poços que serão submetidos à injeção de vapor, devendo-se intensificar pesquisas de materiais com esta finalidade.

## 2. Modelo de Análise

Foi utilizado o simulador AEEPECD desenvolvido pela Petrobras. O modelo numérico de análise consiste de elementos finitos isoparamétricos quadráticos com regra de integração de Gauss 2x2. Para tirar proveito da simetria radial das tensões, um quarto do poço é discretizado. Admite-se um raio de influência de 10 metros do eixo do poço, sendo que nesta fronteira a temperatura é a da formação (neste caso 109°F - 43°C) e os deslocamentos são nulos. O detalhe da malha na vizinhança do poço é apresentado na figura 1. Estudos anteriores<sup>1</sup> indicam que o processo de ruptura da cimentação durante a injeção de vapor é condicionado pelas tensões tangenciais. Por simplificação, apenas tensões radiais e tangenciais foram consideradas, desprezando-se as tensões na direção vertical.

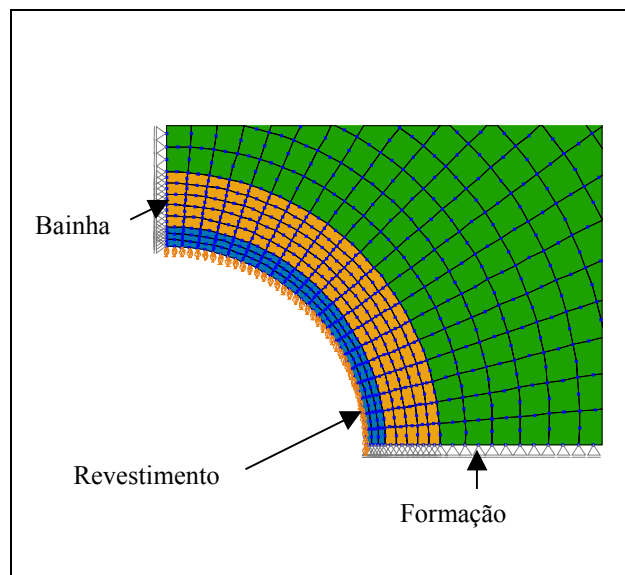


Figura 1 Detalhe da Malha na Vizinhança do Poço

A condição de carregamento consiste na aplicação da temperatura de injeção de vapor na face interna do revestimento, gerando um gradiente de temperatura que provoca a expansão do material. Admite-se que a transferência de calor ocorre por condução e o campo de temperaturas é definido pela solução numérica da equação da difusão 1:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho C}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

sendo  $T$  a temperatura,  $\rho$  a densidade,  $C$  o calor específico e  $k$  a condutividade térmica.

O estado de tensões gerados pelo campo de temperaturas é definido pelas equações da termoelasticidade (2) a

(5):

$$\varepsilon_r - \alpha T = \frac{\sigma_r}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_\theta + \sigma_z) \quad (2)$$

$$\varepsilon_\theta - \alpha T = \frac{\sigma_\theta}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_r + \sigma_z) \quad (3)$$

$$\varepsilon_z - \alpha T = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (4)$$

$$\gamma_{rz} = \frac{1}{G} \tau_{rz} \quad (5)$$

onde:  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \gamma_{rz}, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  e  $\tau_{rz}$  são, respectivamente, as deformações e tensões nas direções radial, tangencial, vertical e no plano  $rz$  e  $E$  o módulo de Young,  $G$  o módulo de cisalhamento,  $\nu$  o coeficiente de Poisson e  $\alpha$  o coeficiente de expansão térmica.

Considera-se que o estado inicial de tensões na formação é dado pelo estado de tensões da formação em repouso. Como o interesse da análise consiste na verificação do comportamento mecânico da bainha, o efeito da redistribuição de tensões no maciço devido à perfuração do poço é desprezado. Admite-se ainda que o poço é estável, ou seja, esta redistribuição gera uma configuração de equilíbrio, não havendo transferência de tensões da formação para o poço. Por simplificação, considera-se que há continuidade no campo de deslocamentos e tensões nos contatos entre o revestimento e a bainha e entre esta e a formação. A convenção de sinais utilizada aqui é a da mecânica dos sólidos, segundo a qual as tensões de tração são positivas.

Tabela 1 Dados do Poço

Temperatura Estática de Fundo de Poço	Diâmetro do Poço	Revestimento Produtor	Temperatura da Injeção
43°C	8 3/4"	7" - 23 lb/pé - K55	300°C

Tabela 2 Parâmetros Físicos dos Materiais

Propriedade	Formação	Cimento	Revestimento
Nome/Tipo	Arenito Friável	Convencional com 35% de Sílica	7", K55 - 23 lb/pé
Módulo Elástico	3,43 GPa	14,5 GPa	200 GPa
Coeficiente de Poisson	0,28	0,21	0,28
Resistência à Compressão	-	27,2 MPa	-
Resistência à Tração	1,13 MPa	2,4 MPa	366 000 lbf
Coesão	3,1 MPa	1 000 psi	-
Ângulo de Atrito	34° C	30° C	-
Condutividade Térmica	0,92 btu/h-ft-°F	0,60 btu/h-ft-°F	26,1 btu/h-ft-°F
Calor Específico	0,30 btu/lb-°F	0,20 btu/lb-°F	0,11 btu/lb-°F
Densidade	2,22 g/cm <sup>3</sup>	15,8 lb/gal	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Coeficiente de Expansão Térmica	10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>	1,11 x 10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>	2,46 x 10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>

Como condição padrão para as análises a partir da qual os parâmetros sofrem variação, considerou-se que o poço é escavado em um arenito friável, com geometria e parâmetros dos materiais descritos nas tabelas 1 e 2. A variação paramétrica contempla os seguintes fatores: módulo elástico da formação, espessura da bainha, temperatura de injeção de vapor, estado inicial de tensões na bainha e módulo elástico da pasta.

### 3. Resultados

A figura 2 apresenta a história de temperatura na bainha para os primeiros 30 minutos na condição padrão no poço de 8 3/4". Observe-se que o ponto mais próximo ao revestimento aquece muito mais rapidamente que o ponto mais distante. Isto se deve à alta condutividade térmica do aço em relação à do cimento. Esta diferença no aquecimento, associada ao fato de que o coeficiente de expansão térmica do aço é o dobro do do cimento provoca grandes deformações diferenciais, e conseqüentemente altas tensões na bainha.

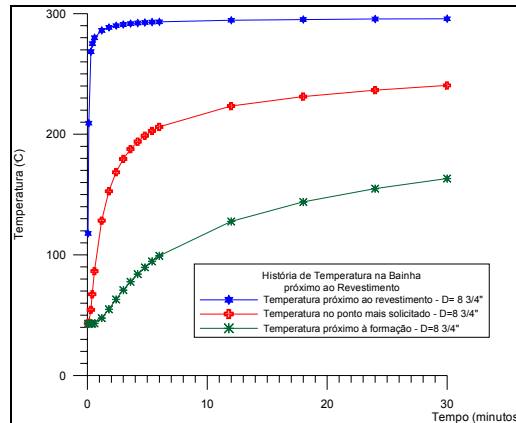
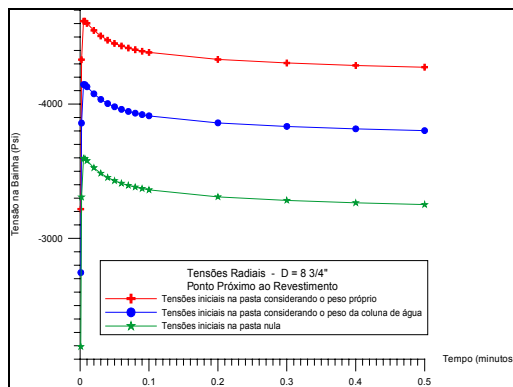


Figura 2 Variação da Rigidez da Formação Temperatura nos Pontos Representativos da Bainha

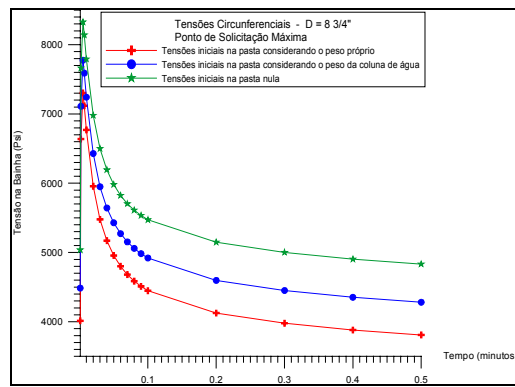
#### 3.1. Variação do Módulo Elástico da Formação

Foram adotados valores típicos de três tipos de formação para variação do módulo elástico da rocha: um arenito friável, com módulo elástico de 3,4 GPa, um arenito consolidado (20 GPa) e uma rocha rígida (basalto ou calcário), com 60 GPa

A figura 3 (a) apresenta a variação da história de tensões radiais para a variação da rigidez da formação no ponto próximo ao revestimento, onde estas tensões são máximas. A figura 3 (b) apresenta a variação da história de tensões circunferenciais no ponto de máximo, que ocorre no interior da bainha próximo ao revestimento. Observe-se que formações mais rígidas tornam a bainha mais comprimida, reduzindo as tensões circunferenciais e aumentando as radiais. Verifica-se que para as formações consolidada e rígida, as tensões radiais superam a resistência à compressão.



(a) Tensões Radiais



(b) Tensões Circunferenciais

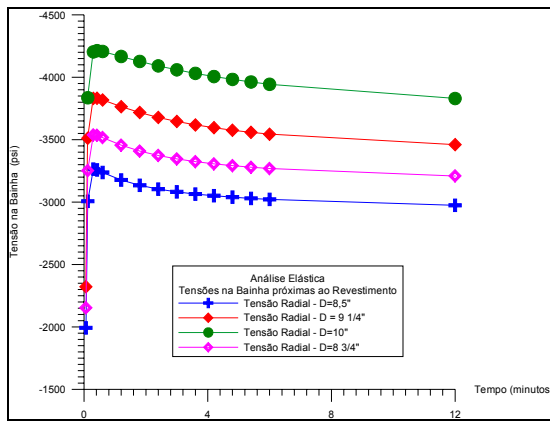
Figura 3 Variação da Rigidez da Formação

#### 3.2. Variação da Espessura da Bainha

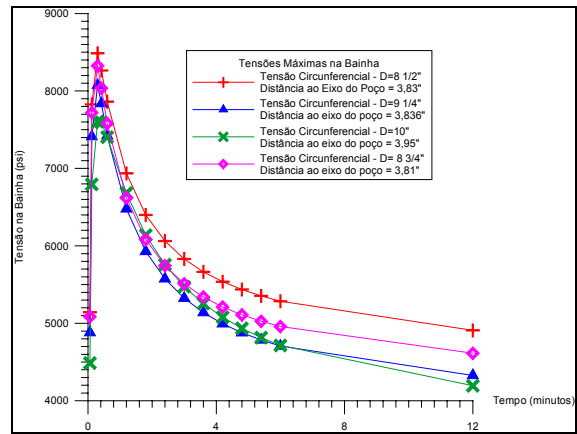
Na análise da influência da espessura no comportamento da bainha utiliza-se malhas com diâmetro de poço aberto de 8 1/2", 8 3/4", 9 1/4" e 10", discretizadas conforme descrito no item anterior (figura 2): A figura 4 apresenta os resultados em termos de tensões radiais e tangenciais. Observe-se que o aumento da espessura corresponde a um aumento na rigidez da bainha, com conseqüente acréscimo nas tensões radiais e redução nas tensões circunferenciais. Entretanto, a redução nas tensões circunferenciais não é muito significativa para a magnitude das tensões alcançadas pelo cimento.

#### 3.3. Variação da Temperatura de Injeção de Vapor

Para avaliação do efeito da temperatura de injeção de vapor admitiu-se temperaturas de 200°C, 250°C, 300°C e 350°C. A figuras 5 ilustra a resposta em termos de tensões radiais e circunferenciais na bainha de cimento para cada valor de temperatura de injeção. O aumento da temperatura de injeção eleva significativamente as tensões na bainha.

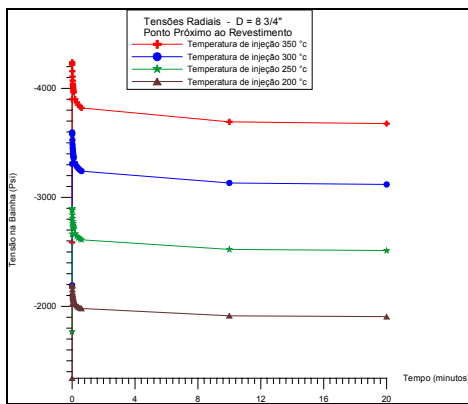


(a) Tensões Radiais

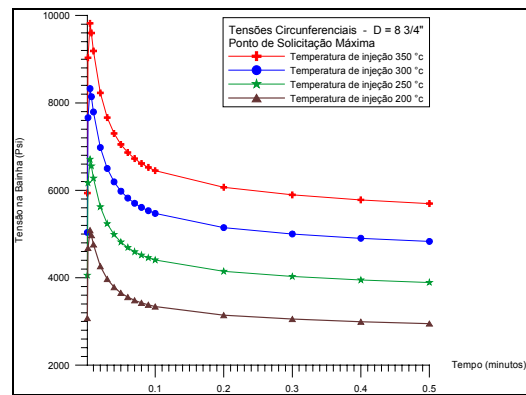


(b) Tensões Circunferenciais

Figura 4 Variação da Espessura da Bainha



(a) Tensões Radiais

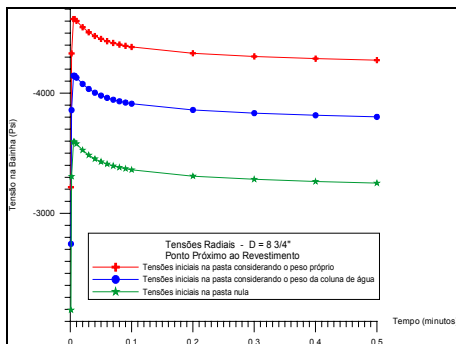


(b) Tensões Circunferenciais

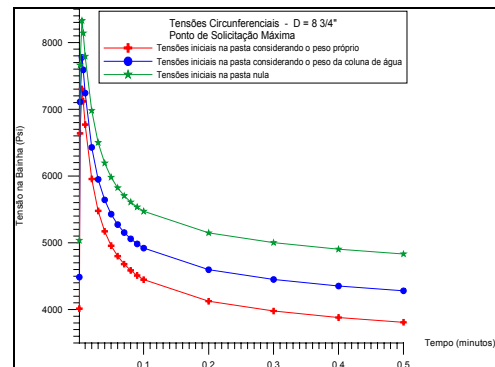
Figura 5 Variação da Temperatura de Injeção

### 3.4. Variação da Tensão Inicial na Pasta:

No caso da tensão inicial na pasta, considera-se que a variação de tensão deve ocorrer entre zero e o peso próprio da coluna da pasta no estado líquido. Foram efetuadas análises com estes valores e um valor intermediário, adotado como o peso da coluna de água. Os resultados estão apresentados na figuras 6. Considerando-se um estado de tensões iniciais na pasta, verifica-se a ocorrência de um estado mais compressivo na bainha de cimento, reduzindo a tensão circunferencial de tração e aumentando a compressão. Entretanto, esta redução não é suficiente para que se atinjam valores compatíveis com a resistência do material.



(a) Tensões Radiais



(b) Tensões Circunferenciais

Figura 6 Variação da Tensão Inicial na Pasta

### 3.4. Variação do Módulo Elástico do Cimento:

Os resultados para a variação elástica da pasta estão apresentados na figura 7. Observe-se que sistemas mais flexíveis reduzem o nível de tensões atuantes na bainha, sendo mais adequados para aplicação em poços sujeitos a alta variação de temperatura ou pressão.

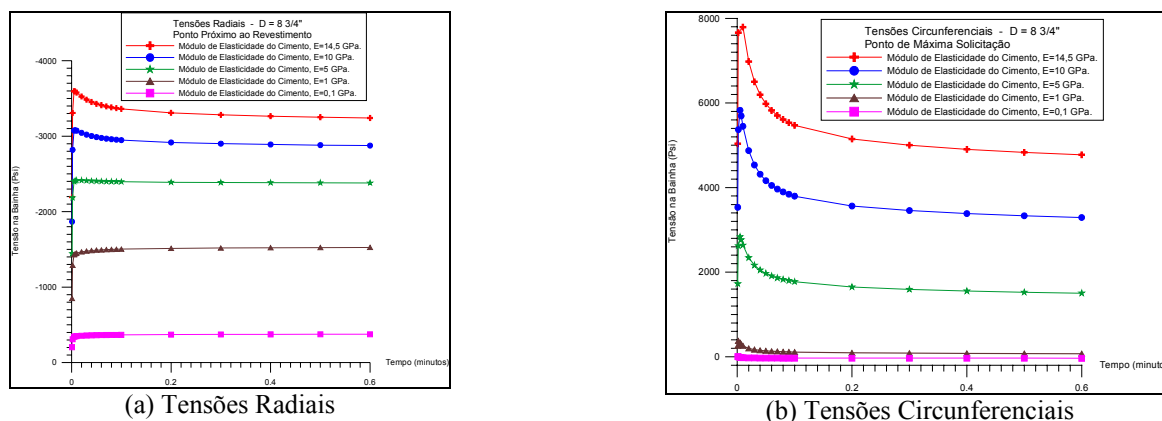


Figura 7 Variação do Módulo Elástico da Pasta

## 4. Conclusões

Em todas as análises paramétricas, a região mais crítica em termos de solicitação máxima na bainha ocorre na vizinhança do revestimento. Isto pode ser atribuído a dois fatores: A difusividade térmica muito alta do aço em relação ao cimento faz com que haja um aquecimento muito rápido desta região enquanto que o interior da bainha ainda não sofreu variação térmica, gerando altos diferenciais de temperatura. Além disto, o coeficiente de expansão térmica do aço a altas temperaturas é duas vezes o do cimento, o que faz com que a expansão térmica seja muito superior à deste material para a mesma temperatura. Estes fatores provocam o rápido aquecimento do aço e sua conseqüente expansão na direção radial em um instante de tempo em que ainda não ocorreu o aquecimento nem a expansão do cimento, gerando uma grande solicitação na bainha. A resposta da bainha depende da flexibilidade do sistema.

Para as condições simuladas (revestimento: 7", K-55, 23 lb/pé, poço: 8 3/4", formação: arenito friável (3,4 GPa) pasta de cimento: convencional (14,5 GPa) e temperatura de injeção de vapor: 300°C), pode-se concluir que:

- (1) Os parâmetros **diâmetro do poço** e **tensão inicial na pasta** pouco influenciam no nível de tensões geradas na bainha de cimento;
- (2) Os parâmetros **módulo de elasticidade da formação e da pasta** e **temperatura de injeção de vapor** influenciam muito no nível de tensões geradas na bainha de cimento;
- (3) Quanto menor for o módulo elástico da pasta cimentante, menor será a tensão aplicada à bainha de cimento;
- (4) A análise numérica mostra que pastas com módulo elástico menor que 1 GPa são tensionadas a um nível de tensão compatível com os parâmetros de resistência da pasta convencional.

Observa-se que o nível de tensões gerados na bainha de cimento pelo choque térmico é tão elevado, que as variações paramétricas efetuadas adotando a pasta de cimento convencional não fornecem cenários favoráveis à redução das tensões circunferenciais a níveis compatíveis com a resistência do material. Portanto, as análises numéricas indicam que pastas de cimento convencional não são adequadas para bainhas de poços de injeção de vapor. Pastas mais flexíveis podem representar uma solução para cimentação em poços que serão submetidos a grandes variações de temperatura. Estudos de resistência química, térmica e mecânica de novos materiais cimentantes flexíveis é recomendada para atender a esta aplicação.

## 5. Referências

- BOSMA M., RAVI, K., VAN DRIEL, W., SCHREPPERS, G. (1999): "Design Approach to Sealant for the Life of The Well", SPE paper 56536.
- BOSMA, M., SCHWING, A. (2001): "Improved Experimental Characterization of Cement/Rubber Zonal Isolation Materials", SPE paper 64762.
- GOODWIN, K. J., CROOK, R. J. (1992): "Cement Sheath Stress Failure", SPE paper 20453.
- NOIK, C., RIVEREAU, A., VERNET, C. (1998): "Novel Cements Materials for High Pressure/High Temperature Wells", SPE paper 50589.
- NOIK, C., RIVEREAU, A. (1999): "Oil Well Cement Durability", SPE paper 56538.
- THIERCELIN, M. J., DARGAUD, B., BARET, J. F., RODRIGUEZ, W. J. (1997): "Cement Design based on Cement Mechanical Response", SPE paper 38598.