

## AVALIAÇÃO DAS TENSÕES AO REDOR DE POÇOS DE ALTA TEMPERATURA

**José L. Falcão** – jfalcao@ep.petrobras.com.br

Petrobras S.A. – Av. Chile 65 sala 1004D – Rio de Janeiro, RJ, Brasil– RJ - CEP 20035-900.

**Resumo.** *Avaliam-se aqui as tensões ao redor de poços em áreas denominadas HT. As tensões térmicas induzidas pela diferença entre a temperatura da rocha e a do fluido de perfuração, são avaliadas através de um modelo desenvolvido usando uma solução termo elástica transiente não linear. Em seguida, elas são comparadas com as tensões mecânicas, induzidas pela perfuração, de modo a avaliar sua importância. No final, através de dois casos reais, se mostra que não considerar os efeitos térmicos nesses poços leva a erros na avaliação de sua estabilidade.*

**Palavra-chave:** *estabilidade de poços, tensões térmicas, poços de alta temperatura*

### 1. INTRODUÇÃO

Originalmente as formações em subsuperfície estão em equilíbrio térmico e submetidas a um gradiente *geotérmico*. O gradiente normal é de 30°C/Km. Poços perfurados em áreas com gradientes acima do normal ou com temperaturas de fundo (BHT) acima de 150°C, são classificados como HT (High Temperature).

Durante a perfuração, circula-se fluido para remover o cascalho e conter as paredes do poço. Nesse processo ocorre uma troca de calor entre o fluido e a rocha, alterando o equilíbrio original. No fundo do poço, calor é transferido da rocha para o fluido no anular, enquanto na superfície ocorre o oposto. Como resultado, um campo não uniforme de temperaturas será criado ao redor do poço. A depender de se a rocha é aquecida ou resfriada ela sofrerá uma expansão ou contração. Uma vez que esses efeitos são diferentes em cada ponto, um campo de tensões térmicas será gerado. A depender da magnitude dessas tensões, uma condição de instabilidade pode ser criada.

Por tradição, no estudo da estabilidade dos poços tem-se assumido uma condição isotérmica só se considerando os efeitos mecânicos (escavação e pressão interna). Essa condição tem sido suficiente para a maioria dos casos, onde as alterações de temperatura são baixas (<10°C), e os efeitos térmicos podem ser desprezados. Porém, para as mudanças maiores que ocorrem nos poços HT, essa condição precisa ser revista. A depender da magnitude das mudanças, outro fator que também deveria ser considerado é a variação das propriedades da rocha com a temperatura. Essa caso é mais complexo pois torna um problema linear termo elástico em um não linear.

Neste artigo, são avaliadas as temperaturas, na parede e na rocha, em dois poços HT devido a circulação de fluido. São também estimadas as tensões térmicas através de um modelo em

Elementos Finitos representando a solução axisimétrica do problema não linear termo elástico utilizando o método de Galerkin e elementos quadrilaterais com 4 nós (Falcão, 1998). Finalmente, essas tensões são comparadas com as mecânicas, em intervalos de poços não revestidos, de modo a avaliar sua importância.

## 2. ÁREAS HT NO BRASIL

Foram levantados os gradientes geotérmicos das nossas duas bacias HT: Santos e Potiguar. Apresentam-se na Fig. 1 as 49 BHTs de 20 poços da Bacia de Santos em lâminas d'água de até 350m. Por falta de mais dados na parte mais rasa adotou-se o gradiente normal de 30°C/Km. Para os intervalos mais profundos (>3500m) o gradiente obtido foi de 40°C/Km, com BHT máximo de quase 180°C. Nota-se uma *anomalia térmica* entre 3500 e 4000m que é resultado da presença de uma zona de sal na área. Isso ocorre devido ao sal apresentar uma condutividade térmica maior que a das outras litologias influenciando, dessa modo, na temperatura das formações adjacentes.

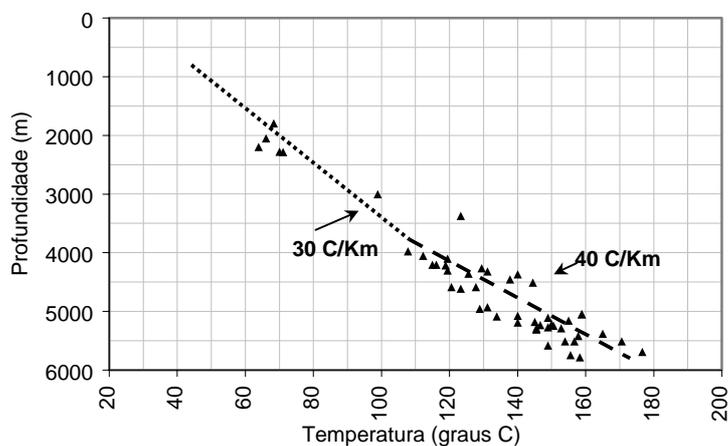


Figura 1 – Temperaturas Extrapoladas versus Profundidade da Bacia de Santos

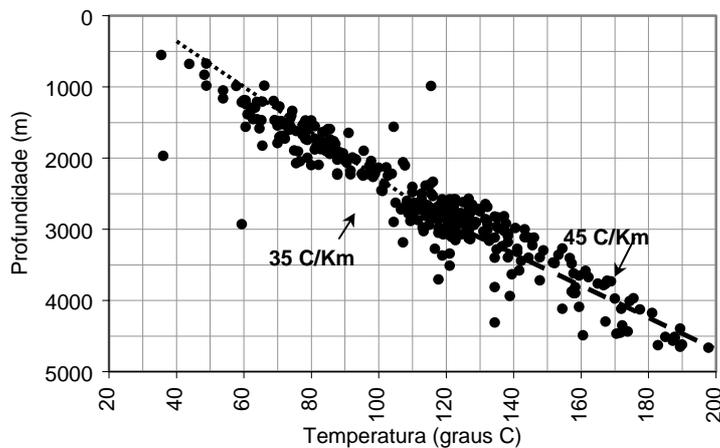


Figura 2 – Temperaturas Extrapoladas versus Profundidade na Bacia Potiguar

São mostrados na Fig. 2 as 329 BHTs de 126 poços da Bacia Potiguar (RN) em lâmina d'água de até 70m. Observa-se também a ocorrência de uma anomalia em torno de 3000m. Tal fato pode ser explicado pela existência de um grande número de camadas argilosas na área que agem como agentes conservadores de calor. O gradiente na parte mais rasa é de 35°C/Km, enquanto na mais profunda (>3000m) foi estimado em 45°C/Km com BHT máximo de quase 200°C. Estudo de Souto & Penna (1984) confirma esses valores.

### 3. ALTERAÇÕES DE TEMPERATURA NO POÇO

Através do simulador térmico WellTemp<sup>®</sup> (\_\_\_,1996) que utiliza a solução *analítica da condução do calor em regime transiente*, e dos gradientes obtidos, foi avaliado o perfil de temperatura ao redor do poço devido a circulação do fluido em projetos HT típicos (Fig. 3). Assumiu-se que o fluido e a rocha estavam em equilíbrio térmico antes do início da circulação.

Deve-se salientar que este simulador não considera trocas de calor por *convecção* nem por *radiação*. Isto porém, não invalida o estudo, uma vez que durante a perfuração de rochas com baixa permeabilidade, como folhelho (litologia predominante nessas áreas), ou quando se utiliza fluido não penetrante (fluido de perfuração), *condução* é o processo dominante (Wang, 1996).

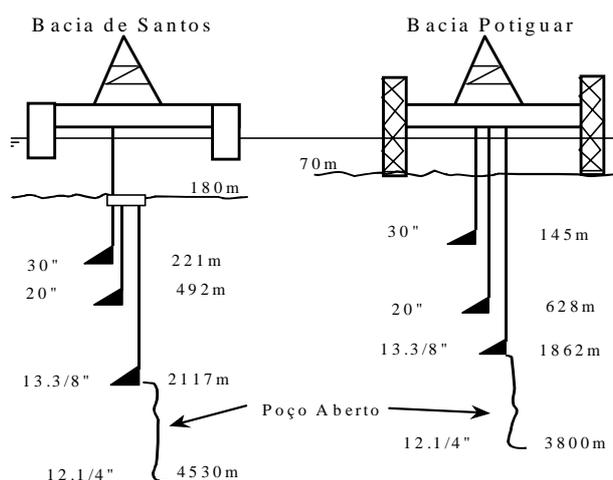


Figura 3 – Projeto Básico até a Fase 4 de Poços Típicos nas duas em áreas HT

Por não se ter as propriedades térmicas das rochas locais, usaram-se valores médios obtidos da literatura (Tabela 1). Sendo  $k$  a condutividade,  $c_p$  a capacidade calorífica e  $\rho$  a densidade.

Tabela 1 – Valor Médio das Propriedades Térmicas do Folhelho Utilizadas no Simulador

	Closmann (1978)		Wang (1996)	MacGilvray (1998)			Média
<b>k</b> (BTU/(°F.ft.h))	0.64	1	-	2.6-3.9	3.0-3.4	2.3-2.9	<b>2.14</b>
<b><math>\rho</math></b> (lbm/ft <sup>3</sup> )	130	130	-				<b>130</b>
<b><math>c_p</math></b> (BTU/(lbm°F))	0.22	0.22					<b>0.22</b>
<b>Folhelho Tipo</b>	Oil	Oil	?	Manco	Queenston	Pierre	-

No poço HT da Bacia de Santos, perfurou-se o intervalo 2117/4530m com diâmetro de 0.311m (12 1/4”), vazão de 0.022 m<sup>3</sup>/s (350 gpm) e fluido com densidade 1.2 (10 lb/gal). Mostra-se na Fig. 4 o perfil de temperaturas após 3 horas de circulação. Verifica-se que para o intervalo de poço aberto, as temperaturas nas paredes do poço são alteradas, com máximos a 3470 e 4530m.

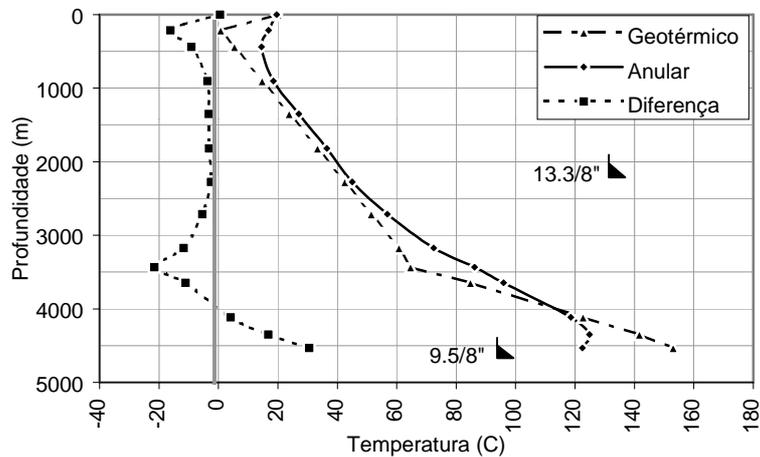


Figura 4 – Perfil de Temperaturas após 3 horas de circulação – B. Santos

Na Fig. 5 mostra-se a evolução da temperatura do fluido no anular nas profundidades onde as maiores alterações ocorreram. A 3500m ocorre um aquecimento de 23°C enquanto a 4530m ocorre um resfriamento de 45°C após 3 e 5 horas de circulação respectivamente.

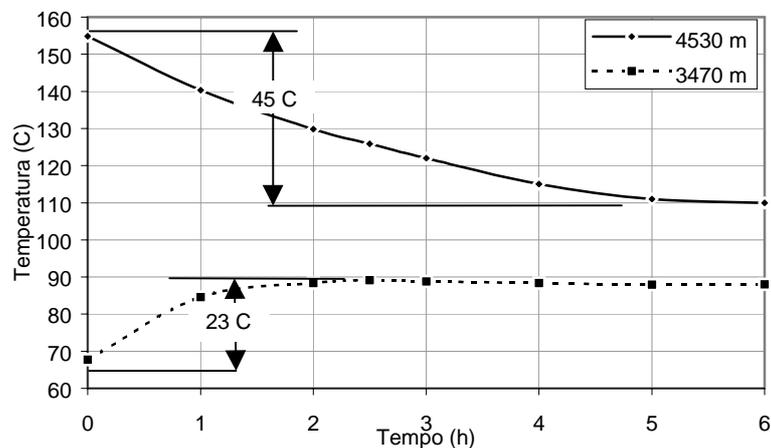


Figura 5 – Variação da Temperatura no Anular com o Tempo a 3470 e 4530 m – B. Santos

Repetiu-se o procedimento para obter o perfil de temperaturas no intervalo 1862/3800m perfurado com diâmetro 0.311m (12. 1/4”), vazão de 0.023 m<sup>3</sup>/s (360gpm) e fluido com densidade de 1.15 (9.6lb/gal) do poço HT da Bacia Potiguar. Apresenta-se na Fig. 6 o perfil de temperaturas após três horas de circulação. Nota-se que no intervalo analisado a temperatura também sofre alterações apreciáveis, similar ao caso anterior. As máximas alterações ocorrem à 3047 e 3800m.

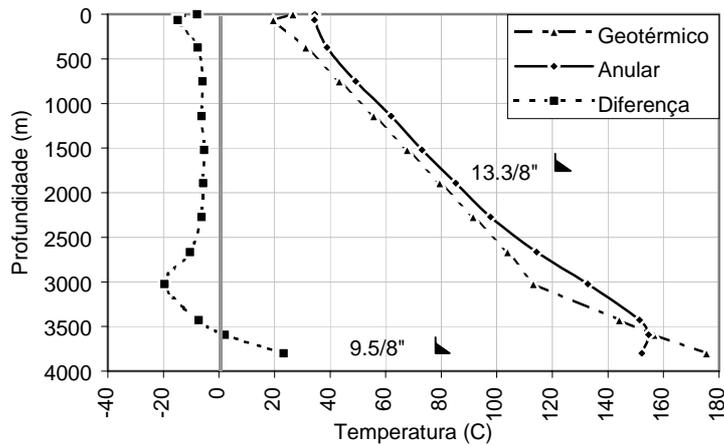


Figura 6 – Perfil de Temperaturas após 3 horas de circulação – B. Potiguar

Na Fig. 7 apresenta-se a evolução da temperatura do fluido no anular com o tempo para as profundidades onde a alteração é máxima. Observa-se um aquecimento de 20°C à 3047m é de um resfriamento de 40°C à 3800m que ocorrem após 1,5 e 5,5 horas de circulação respectivamente.

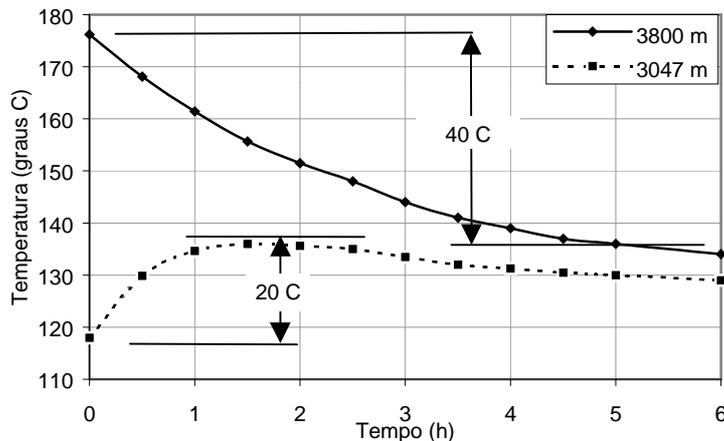


Figura 7 – Variação da Temperatura no Anular com o Tempo a 3047 e 3800 m – B. Potiguar

#### 4. AVALIAÇÃO DAS TENSÕES TÉRMICAS

Através de um modelo em *elementos finitos* (Falcão, 1998), são avaliadas as tensões térmicas e mecânicas para os poços descritos. Por não se ter as propriedades dos folhelhos locais, utilizaram-se os valores médios do módulo de Young ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) (Tabela 2) e do coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ ) (Tabela 3). Em ambas as áreas assumiu-se: pressão de poros de 9.79 kPa/m (0.433 psi/ft); sobrecarga de 22,6 kPa/m (1 psi/ft); e área relaxada ( $\sigma_{hmax} = \sigma_{hmin}$ ). Nas figuras seguintes apresenta-se temperatura versus distância radial normalizada ( $r/r_w$ ), onde  $r_w$  é o raio do poço, comparando as tensões radial e tangencial dos efeitos mecânicos

e térmicos para dois tempos de circulação (0.17 e 1.7 h). As tensões de tração são negativas.

Tabela 2 – Valor Médio das Propriedades Mecânicas do Folhelho Utilizadas (Cammichael, 1989)

Folhelho Tipo	Quartzozo, AZ	Silícios, UT	Calcáreos, NB	Média
$\nu$	0.08	0.12	0.32	<b>0.17</b>
<b>E (GPa)</b>	16.5	68.1	19.7	<b>34.8</b>

Tabela 3 – Valor Médio do Coeficiente de Expansão Térmica do Folhelho Utilizado

Folhelho Tipo	?	Queenston	Manco	Média
$\alpha$ ( $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ )	20	8.87 – 12.2	13.2 – 15.4	<b>14.9</b>
Referência	Wang (1996)	MacGillvray (1998)		

### Bacia de Potiguar

**Resfriamento.** Notar que a 3800m (Fig. 8) as tensões térmicas radiais geradas são tração e as mecânicas compressão. Aqui, o efeito térmico atua de modo a reduzir a compressão induzidas pelos efeitos mecânicos, aumentando a estabilidade ao colapso. Neste caso, o efeito térmico é máximo (5,4MPa) à distância de 2 raios ( $t=1,7h$ ) e está restrito a menos de 10 raios. A tensão radial térmica nas paredes é, em módulo, 7% da mecânica, enquanto a 2 raios a relação atinge 36%. Entretanto, esses efeitos são cíclicos. Com circulação a temperatura da rocha diminui, induzindo tração e melhorando a estabilidade. Nas paradas, fluido e rocha readquirem equilíbrio térmico, reduzindo ou até extinguindo o efeito térmico previamente induzido. Isso explica porque os poços se mostram estáveis logo após perfurados mas tornam-se instáveis após algum tempo.

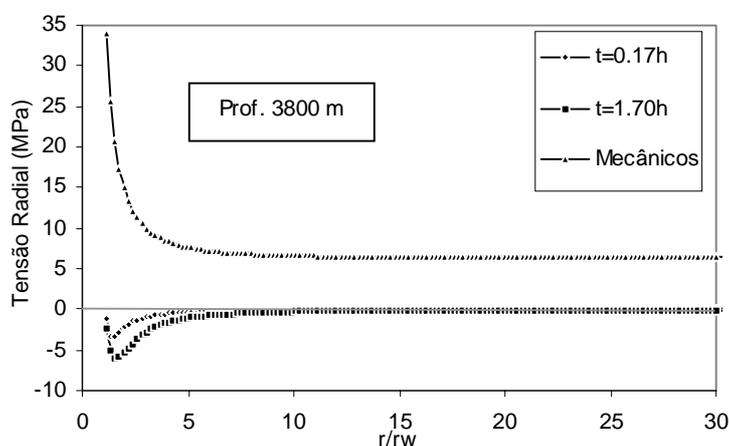


Figura 8 – Tensões Radiais Térmicas e Mecânicas – B. Potiguar - 3800m

Para as tensões tangenciais (Fig. 9) observa-se que tanto os efeitos mecânicos quanto os térmicos são tração próximo do poço, tornando-se compressão à medida que dele se afasta. Nesse caso, o máximo efeito térmico de tração (25,2 MPa) se dá nas paredes e o de compressão à distância de 2.6 raios ( $t=1,7 h$ ). Nas paredes os efeitos térmicos e mecânicos são da mesma ordem. Assim, quando se assume a condição isotérmica, a resultante de tensões nas paredes é

cerca da metade do valor realmente atuante. Desse modo, o efeito térmico pode levar a falhas por fratura caso a resultante dos efeitos atinja valores acima da tensão de ruptura a tração da rocha.

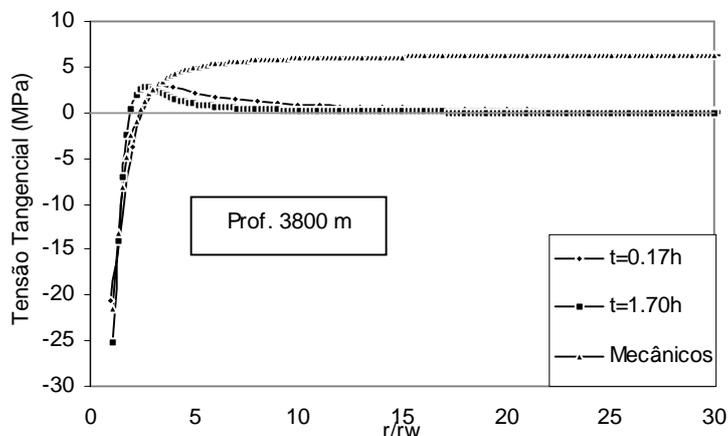


Figura 9 – Tensões Tangenciais Térmicas e Mecânicas – B. Potiguar - 3800m

**Aquecimento.** A 3047m, nota-se que as tensões radiais mecânicas e térmicas são de compressão (Fig. 10). Neste caso o efeito térmico aumenta a compressão provocada pelos efeitos mecânicos resultando numa redução do potencial de estabilidade ao colapso. Para essa situação, observa-se também que a tensão térmica é máxima (2,6 MPa) à distância de 2,6 raios ( $t=1,7$  h) e está restrito a menos de 8 raios. Nas paredes do poço, o valor, em módulo, da tensão radial térmica é de cerca de 4% da mecânica, enquanto a 2.6 raios essa relação atinge 21%.

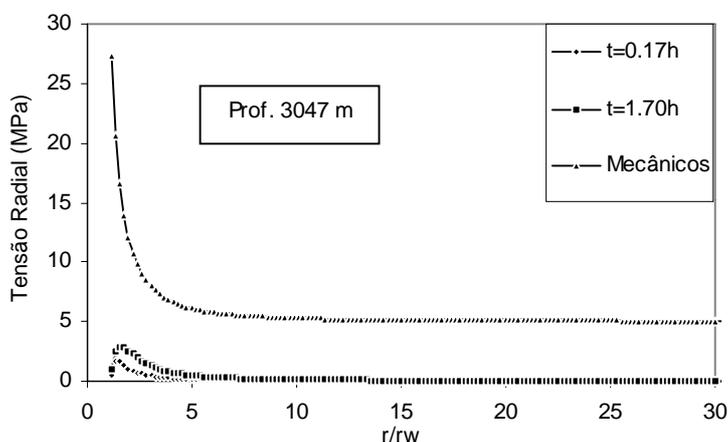


Figura 10 – Tensões Radiais Térmicas e Mecânicas – B. Potiguar - 3047m

Para a tensão tangencial (Fig. 11) verifica-se que os efeitos térmicos e mecânicos têm direções opostas. As tensões mecânicas são de tração próximos das paredes e compressão acima de 2,4 raios de distância enquanto que as térmicas são de compressão com máximo (12 MPa) próximo do poço, desaparecendo a medida que dele se afasta ( $t=1,7$  h). Nota-se também que nas paredes os efeitos térmico e mecânico são, em módulo, da mesma ordem.

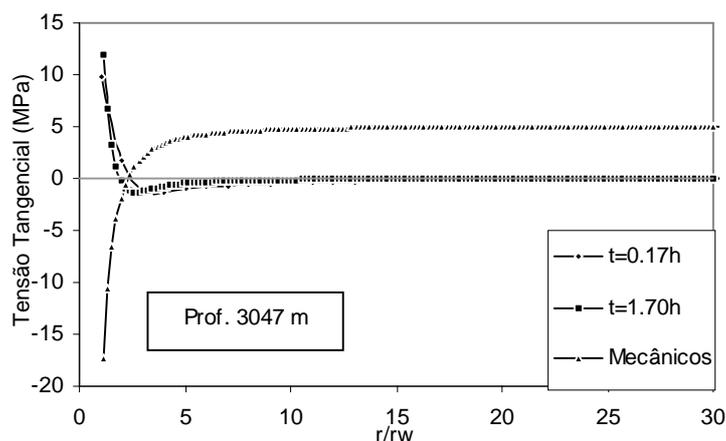


Figura 11 – Tensões Tangenciais Térmicas e Mecânicas – B. Potiguar - 3047m

## 4.2 Bacia de Santos

**Resfriamento.** Nota-se para o poço HT da Bacia de Santos à 4530m (Fig. 12) um resultado similar ao da Bacia Potiguar só diferindo na magnitude das tensões geradas. Nessa caso, observa-se que o efeito térmico radial é de tração, com máximo (4,6 MPa) à distância de 2,2 raios ( $t=1,7h$ ) e está restrito a menos de 10 raios. Nas paredes o da tensão radial térmica é cerca de 5% da mecânica, enquanto a 2.2 raios a relação atinge 29%.

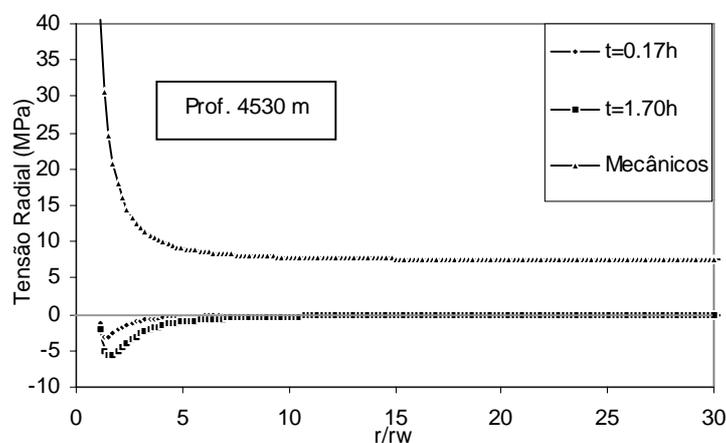


Figura 12 – Tensões Radiais Térmicas e Mecânicas – Bacia de Santos - 4530m

Para a tensão tangencial (Fig. 13) observa-se que tanto os efeitos mecânicos como térmicos são de tração próximo das parede tornando-se de compressão à medida delas se afasta. O máximo efeito térmico de tração (24 MPa) se dá nas paredes enquanto o de compressão se da à distância de 2,6 raios ( $t=1,7h$ ). Nota-se que nas paredes os efeitos térmico e mecânico são da mesma ordem. Novamente, essa situação mais realista para poços HT, pode induzir fraturas caso o efeito resultante se torne maior que a resistência à tração da rocha.

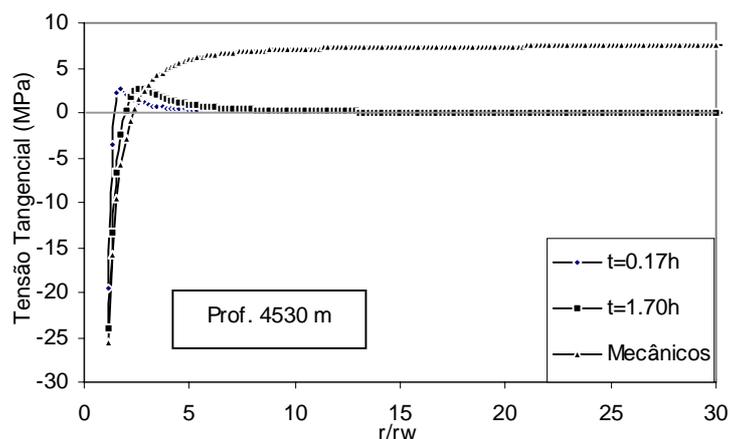


Figura 13 – Tensões Tangenciais Térmicas e Mecânicas – Bacia de Santos - 4530m

**Aquecimento.** Verifica-se na Fig. 14 que a 3500m as tensões radiais térmicas e mecânicas são de compressão. Neste caso o efeito térmico atua no sentido de aumentar a compressão provocada pelo efeito mecânico resultando numa redução da estabilidade ao colapso. Para essa situação, nota-se também que o efeito térmico é máximo (3,6 MPa) à distância de 2,5 raios de poço ( $t=1,7$  h) e está restrito menos de 8 raios. Nas paredes do poço, o valor em módulo da tensão térmica é cerca de 4% da mecânica, enquanto a 2,5 raios a relação atinge 24%.

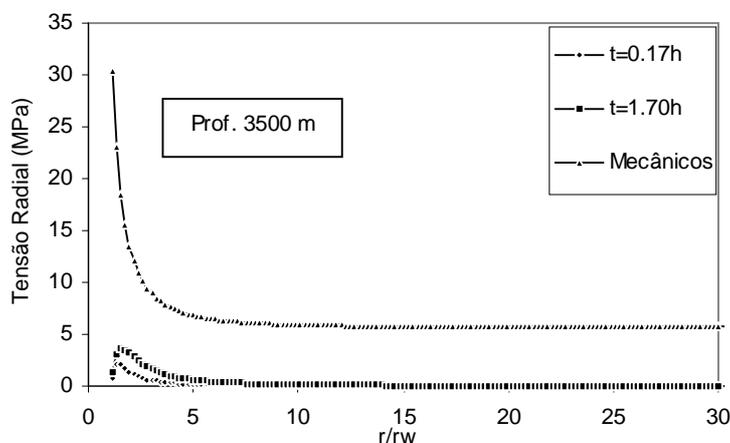


Figura 14 – Tensões Radiais Térmicas e Mecânicas – Bacia de Santos - 3500m

Para a tensão tangencial (Fig. 15), nota-se que as tensões mecânicas são de tração próximos das paredes e compressão acima de 2,5 raios de distância enquanto que as tensões térmicas são de compressão, com seu máximo (15 MPa) na parede e desaparecendo a medida que dela se afasta. Observa-se também que nas paredes os efeitos térmico e mecânico tem direções opostas e são da mesma ordem, tendendo a se anular e a aumentar o potencial de estabilidade ao colapso.

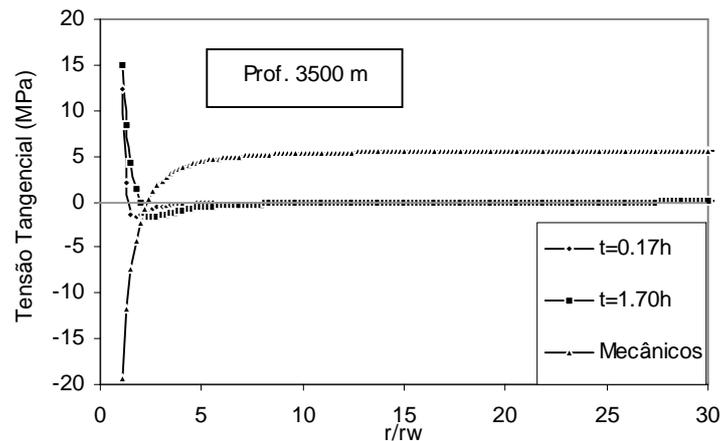


Figura 15 – Tensões Tangenciais Térmicas e Mecânicas – Bacia de Santos - 3500m

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para os casos estudados as tensões térmicas aumentam com o tempo, são mais acentuadas até 5 raios de poço e desaparecem antes de 10 raios. O resfriamento do poço é menos danoso visto que seus efeitos são cíclicos e tendem a aumentar o potencial de estabilidade. O efeito térmico é mais pronunciado na tensão tangencial, que é máxima nas paredes, do que na radial, que é máxima à cerca de 2 raios da parede. Pode-se concluir que o modelo isotérmico não representa o poço HT. Neste caso deve-se considerar o efeito térmico para a correta avaliação da estabilidade.

## REFERÊNCIAS

- \_\_\_\_\_, *WellTemp*® Application Manual, BJ Services, Version 1.00B2, 1996
- Cammichael, S.: *Handbook of Physical Properties of Rocks*, CRC Press, Florida, 1<sup>st</sup> Ed., 1989
- Closmann, P. & Phocas, D.: *Thermal Stress Near a Heated Fracture in Transversely Isotropic Shale*, JPT, February 1978
- Falcão, J.L.: *Stress Concentration Around Circular Wellbores Considering the Nonlinear Thermal Effect*, Ph.D. Dissertation, Colorado School of Mines, 1998
- MacGillivray, D. e Dusseault, M.: *Thermal Conduction of Saturated Quartz-Illitic and Smectitic Shale Function of the Stress, Temperature and Bedding Anisotropy*, IJRMMS, 1998, 35:4-5
- Souto F, J. e Penna F.: *Geotermia da Bacia Potiguar e seu Relacionamento com as Condições de Geração e Acumulação de Hidrocarbonetos*, Relatório Interno, Petrobras, Agosto 1984
- Wang, Y., Papamichos, E. e Dusseault, M.: *Thermal Stress and Borehole Stability*, proceedings of the 2<sup>nd</sup> North America Mechanics Symposium, Montreal, Canada, 19-21 Junho 1996

**Title: Evaluation of the Stress Concentration Around High Temperature Wells In Brazil**

**Abstract:** Evaluated are the stress around unlined holes in areas known as HT. The thermal stress induced by the difference between drilling fluid and formation is evaluated through a transient, non-linear thermo-elastic solution. The thermal effect is compared with the mechanical one induced by the drilling process, to assess its significance. Also, through two field cases it is shown that failure to consider this effect can lead to errors in the wellbore stability evaluation.

**Palavra-chave:** wellbore stability, thermal stress, high temperature wells