



## Espessura Termal da Litosfera na Província Estrutural do São Francisco

Alexandrino C. H., ([chalex@on.br](mailto:chalex@on.br)) e Hamza V. M., ([Hamza@on.br](mailto:Hamza@on.br)) Observatório Nacional – ON/MCT, Rio de Janeiro.

Copyright 2008, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica. Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGF, mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.

### Abstract

One presents in this work estimates of the thermal thickness of the lithosphere of the Province Structure of the San Francisco and the adjacent folds belts. The results had been gotten from recent geothermal studies. The results had been grouped in six subgroups: Mantiqueira, Tocantins, Salvador Cráton, San Francisco, Cráton San Francisco Basin, the northwest of the Paraná Basin the biggest thicknesses ( $\approx 200\text{km}$ ) are situated in the Cráton of Salvador, and the minors in the basins of sedimentary of the San Francisco ( $\approx 90\text{km}$ ). The used model to determine the field of temperatures and for consequence the thermal thickness of the lithosphere took into consideration the variation of the thermal conductivity with the temperature as well as change of radiogenic heat generation with depth. The results indicate that the temperature contrasts, between the provinces, reach values of order of  $500^\circ\text{C}$ , in the base of the crust. It has indications of that this difference of temperature is the main factor that determines standards of deformations in regional metamorphic processes

### Introdução

Os blocos crustais tectonicamente estáveis e de idade pré-cambriana, identificados como áreas cratônicas, no Brasil incluem Guiana, Guaporé e São Francisco. Apesar de grande número de estudos geológicos e geofísicos realizados nas últimas décadas, não foram efetuadas ainda avaliações de campos térmicos da crosta nestas regiões. A fim de superar essa dificuldade iniciou-se um projeto de pesquisa no Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional – ON/MCT visando aquisição de dados geotérmicos complementares e modelagem do campo térmico da crosta cratônica e das áreas vizinhas. Apresentam-se neste trabalho os resultados obtidos nas fases iniciais deste projeto, referente à Província Estrutural de São Francisco (PESF).

### Estudos Geotérmicos

Os estudos geotérmicos anteriores realizados anteriores na área cratônica da São Francisco tiveram como enfoque a aquisição experimental de dados básicos. Foram determinados valores de gradientes de temperaturas, condutividade térmica e fluxo geotérmico em cerca de dez localidades. A baixa densidade de dados não permitiram mapeamento do fluxo geotérmico em escala regional e estudos complementares sobre campo térmico da crosta.

Iniciou-se neste contexto, um conjunto de atividades visando compilação de dados geotérmicos anteriores, aquisição de dados complementares e modelagem do campo térmico da crosta cratônica e das áreas vizinhas. Na compilação atual constam resultados de perfis distribuídos em 99 municípios.

Medições complementares de condutividade térmica, efetuadas em amostras coletadas de 32 localidades, permitiram determinação de valores representativos dos tipos litológicos predominantes. As coletâneas de dados de gradientes e de condutividades térmicas foram reavaliadas para determinações de fluxo geotérmico regional. Também foram determinadas as distribuições de calor radiogênico nas províncias tectônicas.

### Gradiente e Fluxo Geotérmico

Os acervos de dados reunidos permitiram determinações de gradiente e de fluxo geotérmico em 99 localidades. Detalhes das metodologias adotadas e dos resultados obtidos foram apresentados num trabalho recente de Alexandrino e Hamza (2008). Desta forma, apresentam-se aqui apenas sínteses dos resultados finais relevantes para análises dos parâmetros geotérmicos em escala regional. Encontram-se reunidos na tabela (1) os valores médios e os respectivos desvios padrão do gradiente geotérmico ( $\Gamma$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ) e fluxo geotérmico ( $q$ ) das principais unidades tectônicas.

Tabela 1 - Valores médios de gradiente de temperatura ( $\Gamma$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ), fluxo de calor ( $q$ ) para as principais unidades tectônicas na área de estudo.

Província Geológica	$\Gamma$ ( $^\circ\text{C}/\text{km}$ )	$\lambda$ (W/m K)	$q$ ( $\text{mW}/\text{m}^2$ )
Cráton Salvador	$14.8 \pm 4.3$	$2.9 \pm 1.1$	$43 \pm 9$
Província Tocantins	$16.0 \pm 4.2$	$3.1 \pm 0.5$	$50 \pm 12$
Província Mantiqueira	$17.9 \pm 7.2$	$2.8 \pm 0.3$	$51 \pm 10$
Cráton São Francisco	$16.6 \pm 3.7$	$3.1 \pm 0.3$	$51 \pm 14$
NO. Bacia do Paraná	$28.7 \pm 6.3$	$2.6 \pm 0.6$	$73 \pm 14$
Bacia São Francisco	$29.4 \pm 7.8$	$2.6 \pm 0.2$	$76 \pm 20$

De modo geral, os valores obtidos são típicos de áreas continentais tectonicamente estáveis, de idade Pré-Cambriana. Contudo, os valores médios apontam para a

existência de regiões com características geotérmicas distintas na área de estudo. O primeiro desses é área na parte norte da PESF, conhecido como Cráton Salvador. As faixas de dobramentos metamórficos (Tocantins e Mantiqueira) e o Cráton São Francisco (situada na parte sul da PESF) constituem o segundo segmento. O terceiro é constituído pelas áreas de bacias sedimentares de São Francisco e o do segmento nordeste da Bacia do Paraná. A figura (1) ilustra a distribuição dos gradientes geotérmicos na PESF. A região norte onde se encontra o Cráton Salvador é caracterizada por valores de gradientes térmicos menores que  $15^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . As demais áreas da PESF são caracterizadas por gradientes térmicos na faixa de  $15$  a  $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Gradientes geotérmicos com valores acima de  $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$  ocorrem somente nas regiões das bacias sedimentares de São Francisco e Paraná. Os maiores valores foram encontrados na parte centro-leste da bacia São Francisco. Parece que a falha situada na borda leste da PESF desempenha um papel importante na delimitação da anomalia geotérmica.

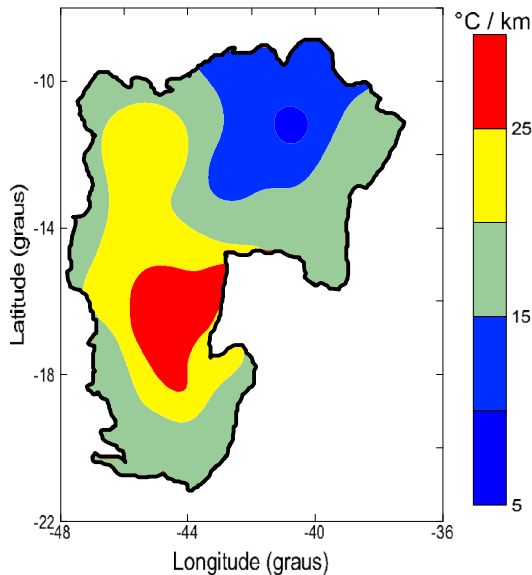


Figura 1 – Gradiente Geotérmico na Região do PESF.

O mapa da figura (2) ilustra a distribuição do fluxo geotérmico na PESF. Nota-se que a Bacia São Francisco é caracterizada por valores de fluxo geotérmico maiores que  $50 \text{ mW m}^{-2}$ , enquanto na área do Cráton Salvador o fluxo térmico é menor que  $50 \text{ mW m}^{-2}$ . De modo geral, as características da distribuição espacial de fluxo térmico são semelhantes àquelas observadas no caso dos gradientes térmicos. Em ambos os casos as correlações com as províncias tectônicas são marcantes, indicando que as características estruturais desempenham um papel importante no campo térmico da crosta na PESF.

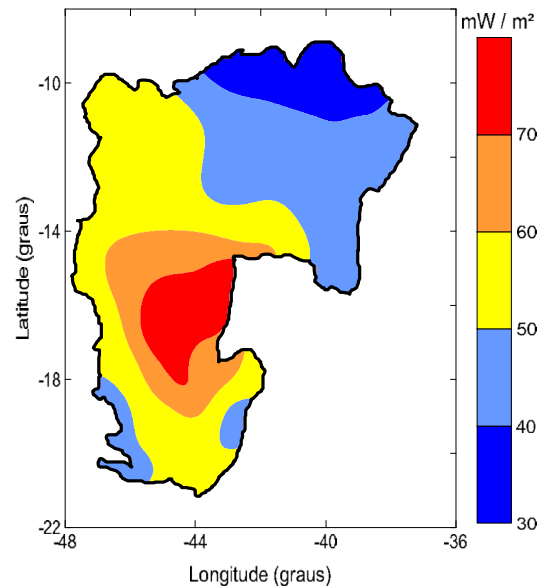


Figura 2 – Fluxo Geotérmico na Região do PESF

#### Campo Termal da Litosfera da Província Estrutural do São Francisco

A avaliação do campo térmico da litosfera exige não somente informações sobre as variações regionais de gradiente e de fluxo térmico, mas também conhecimentos das distribuições verticais de condutividade térmica e de produção de calor radiogênico. Precisa-se ainda o modelo que integra os funcionais dos parâmetros. Essas questões são tratadas nos subitens a seguir:

**a) Condutividade Térmica:** Os mecanismos de transferência de calor em materiais geológicos variam com a profundidade na crosta, dependendo temperatura vigente. No presente caso, o modelo adotado para determinar o comportamento da condutividade térmica ( $\lambda$ ) em função da temperatura ( $T$ ) é:

$$\lambda = \frac{\lambda(25)}{1+BT} + C(273.15+T)^3 \quad (1)$$

onde  $B$  e  $C$  são constantes. O primeiro termo na equação (1) representa a variação da condutividade térmica por fônons e o segundo representa a variação por fótons. Nota-se que nas temperaturas relativamente baixas a condução por fônons é o mecanismo predominante, nas temperaturas elevadas transferência por fótons torna-se importante.

**b) Calor Radiogênico:** Uma das formas de estimar o calor radiogênico em profundidades fora de alcance de perfurações é utilizar relações empíricas entre a produção de calor radiogênico ( $A$ ) e as velocidades das ondas sísmicas ( $V_p$ ). Rybach e Buntebarth (1984) propuseram relações distintas para as formações geológicas de idades Pré-cambrianas e Paleozóicas:

$$\text{a) Pré-cambriana: } \ln(A) = 13.7 - 2.17 V_p \quad (2a)$$

$$\text{b) Paleozóica: } \ln(A) = 12.7 - 2.17 V_p \quad (2b)$$

Utilizou-se no presente trabalho os dados de velocidades das ondas sísmicas ( $V_s$ ) determinados por Pacheco (2003) e Avilar (2004), abrangendo amplas regiões do PESF e faixas móveis adjacentes. Em ambos os trabalhos foram utilizadas curvas de dispersão fonte-estação de ondas sísmicas superficiais do tipo Rayleigh. As regiões das trajetórias fonte-estação foram divididas em células, de  $2^0 \times 2^0$ . A velocidade da onda S pode ser convertida em onda P, e a produção de calor radiogênico em cada profundidade obtida através da equação (2). Supõe-se que a distribuição de Calor Radiogênico em função da profundidade  $A(z)$  obedece a seguinte relação:

$$A(z) = A_0 \exp(-z/D) \quad (3)$$

onde  $A_0$  produção de calor radiogênico na superfície e  $D$  o fator de decaimento exponencial.

Alexandrino (2008) apresenta em detalhes a localização e os procedimentos utilizados para obter os valores  $A_0$  e  $D$ . Constam na tabela (3) os valores médios destas grandezas nas principais províncias estão.

Tabela 3 - Valores médios do decaimento exponencial ( $D$ ) e produção de calor radiogênico ( $A_0$ ) para as principais províncias tectônicas na área de estudo.

Província Geológica	A ( $\mu\text{Wm}^{-3}$ )	D (km)
Cráton Salvador	$1.3 \pm 0.7$	$14.1 \pm 3.1$
Província Tocantins	$1.2 \pm 0.6$	$11.1 \pm 2.1$
Província Mantiqueira	$1.2 \pm 0.7$	$11.9 \pm 2.1$
Cráton São Francisco	$1.3 \pm 0.9$	$12.0 \pm 2.2$
NO. Bacia do Paraná	$2.9 \pm 1.0$	$10.1 \pm 1.8$
Bacia São Francisco	$1.7 \pm 1.0$	$12.8 \pm 2.5$

**c) Modelo de Temperaturas na Crosta:** No ponto de vista da geotermia a litosfera é definida como a região da Terra onde o modo preponderante de transmissão de calor é a condução, desta forma o ponto de partida para determinação do campo térmico da litosfera é a equação da condução de calor. Considerando geometria unidimensional e regime estacionário, pode-se escrevê-la da seguinte forma:

$$\frac{d}{dz} \left[ \lambda(T) \frac{dT}{dz} \right] = -A_0 \exp(-z/D) \quad (4a)$$

Com as seguintes condições de contorno:

$$T(z=0) = T_0 \quad (4b); \quad \lambda(T) \frac{dT}{dz} \Big|_0 = q_0 \quad (4c)$$

onde  $T$  é a temperatura,  $z$  a coordenada na direção vertical.  $A_0$ ,  $T_0$  e  $q_0$  são respectivamente produção de calor radiogênico, temperatura e fluxo geotérmico, todos com seus valores observados na superfície,  $D$  o parâmetro de decaimento exponencial e  $\lambda(T)$  a condutividade térmica. Nota-se que a equação (4) leva em consideração os efeitos da variação da condutividade térmica com a temperatura e da produção de calor radiogênico com a profundidade.

Para resolver a equação (4) é necessário analisar o contexto geológico da região, e indicar o melhor modelo que descreve o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura e a produção de calor radiogênico em profundidade.

No ponto de vista matemático a equação (4), pertence a classe das equações diferenciais ordinárias, não homogênea e não linear, uma das formas de se obter sua solução é utilizar a Transformada de Kirchoff. Isto exige a definição de uma nova variável, e sua forma é:

$$U = \int_{T_0}^T \lambda(T) dT \quad (5)$$

Introduzindo a equação (5) em (4) e integrando, obtemos:

$$U(z) = \frac{1}{B} \left[ B[T(z) - T_{v,x}] + \frac{C}{4\lambda_0} \{273.15 + [T(z) - T_{v,x}]\}^4 \right] \quad (6)$$

A equação (6) estabelece a conexão entre os problemas  $U$  e  $T$ . O valor da constante  $B$  é obtido através da regressão linear do modelo proposto por Zoth e Haenel (1988) e o de  $C$  através os resultados experimentais para rochas ultrabásicas realizados por Schatz e Simmons (1972). A ordem de grandeza das constantes  $B$  e  $C$  são respectivamente  $10^{-4}$  e  $10^{-10}$ . Para reescrever a equação (4) em termos de  $U$ . Derivando a equação (5) em relação a  $T$  e usando a regra da cadeia:

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\lambda_0}{\lambda(T)} \frac{dU}{dz} \quad (7)$$

Usando a equação (7) em (4a) – (4c) chega-se ao problema em termos da variável  $U$ :

$$\frac{d}{dz} \left[ \lambda_0 \frac{dU}{dz} \right] = -A_0 \exp(-z/D) \quad (8a)$$

$$U(z=0) = 0 \quad (8b); \quad \lambda_0 \frac{dU}{dz} \Big|_0 = q_0 \quad (8c)$$

A solução da equação (8) é:

$$U(z) = \frac{1}{\lambda_0} \left\{ A_0 D^2 [1 - \exp(-z/D)] + (q_0 - A_0 D) z \right\} \quad (9)$$

Usando a equação (6) retorna-se para o problema em  $T$ ,

$$\frac{1}{B} \left[ B[T(z) - T_{v,x}] + \frac{C}{4\lambda_0} \{273.15 + [T(z) - T_{v,x}]\}^4 - U(z) \right] = 0 \quad (10)$$

A distribuição da temperatura em profundidade pode ser estimada através da solução numérica da equação (9). Neste trabalho foi utilizada a rotina "ZREAL" da biblioteca do IMSL (1990), que utiliza o método de Muller, com critério de parada menor que  $10^{-5}$  para o erro relativo.

#### Espessura Termal da Litosfera

A base da a litosfera termal é definida como a profundidade onde a temperatura de fusão de rochas básicas é alcançada. O valor consagrado desta isoterma na literatura é de  $1300^\circ\text{C}$  (Hamza, 1982; Artemieva e Mooney, 2001). Desta forma o valor da espessura da litosfera pode ser estimado utilizando as equações (9) e (10), com base em dados de fluxo geotérmico ( $q_0$ ), condutividade térmica ( $\lambda_0$ ), produção de calor radiogênico ( $A_0$ ) e decaimento exponencial da produção de calor radiogênico ( $D$ ). A figura (4) ilustra as distribuições de temperaturas nos segmentos litosféricos de Cráton Salvador, Cráton São Francisco, províncias de Mantiqueira e Tocantins e as bacias de São Francisco e de Paraná. As maiores temperaturas foram encontradas nos segmentos litosféricos sob as bacias sedimentares de São Francisco e Paraná. A litosfera sob o Cráton

Salvador apresentou as menores temperaturas. As faixas de dobramentos metamórficos de Mantiqueira e Tocantins e o Cráton São Francisco apresentaram temperaturas intermediárias.

As espessuras da litosfera foram determinadas para os locais de medições de fluxo geotérmico, com base em temperaturas calculadas utilizando as equações (9) e (10), e os resultados apresentados no mapa da figura (5). Os resultados apontam que a espessura da litosfera é maior que 200 km no segmento norte da área cratônica de Salvador. Litosfera com espessura menor que 120 km parece ser uma característica da área da bacia São Francisco e segmentos adjacentes do cráton homônimo. Nas demais áreas da PESF as espessuras da litosfera se encontram na faixa de 120 a 200 km. O fator de afinamento litosférico inferido da área de bacia São Francisco é cerca de dois.

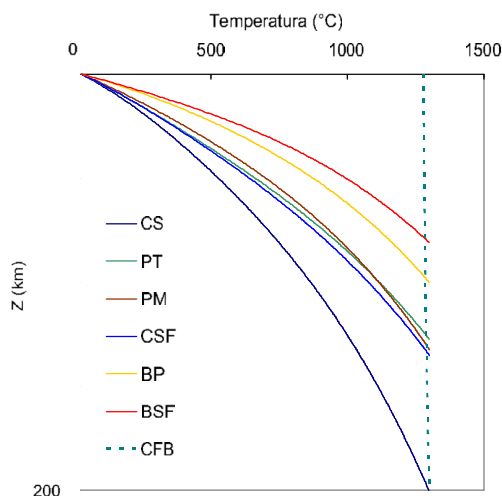


Figura (4) Distribuição vertical de temperaturas na litosfera das províncias tectônicas: bacias Paraná (BP) e São Francisco (BSF), Crátoms São Francisco (CFS) e Salvador (CS) e as Províncias Tocantins (PT) e Mantiqueira (PM). A linha pontilhada (CFB) indica curva de fusão do basalto.

#### Conclusões

Foram determinados valores representativos de gradiente de temperatura, condutividade térmica, fluxo geotérmico e calor radiogênico das principais unidades geotectônicas na província estrutural de São Francisco. Mapeamentos das variações regionais apontam para existência de uma área de fluxo térmico elevado no segmento centro-leste da bacia de São Francisco. Os resultados também foram utilizados na modelagem térmica da crosta e na determinação de espessuras da litosfera. O procedimento computacional empregado é bastante flexível, o que permite facilmente a sua utilização em estruturas geológicas com maior grau de complexidade. Desta forma, conclui-se que o Cráton Salvador é a unidade tectônica que possui maior espessura litosférica no território Brasileiro, possuindo um raiz que ultrapassa 200km.

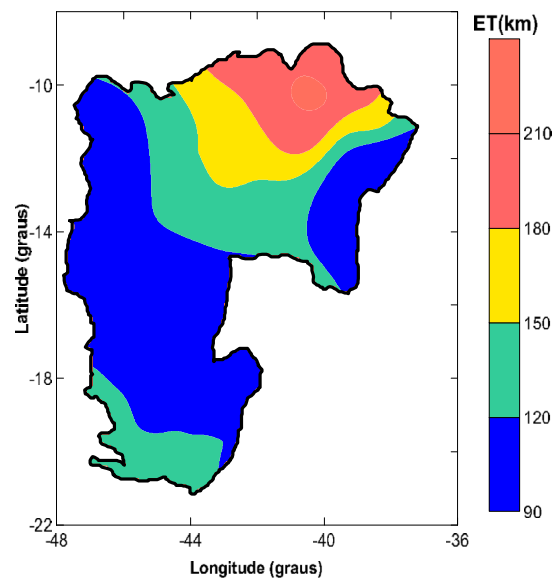


Figura (5) Mapa da espessura da litosfera na área de PESF

#### Agradecimentos

As colaborações da CPRM – MG e dos Dep. de Geologia da UFMG e da UFOP foram importantes na aquisição de dados geotérmicos. Prefeituras dos Municípios de Cachoeira do Pajéu, Medina, São Gonçalo do Rio Preto e Felício dos Santos foram importantes nos trabalhos de campo. Dr. Jorge Luis de Souza, do setor de Sismologia do Observatório Nacional – ON/MCT cedeu os dados de velocidade de ondas sísmicas.

#### Referências

- Alexandrino, C. H., Hamza, V.M., 2008, Estimates of heat flow and heat production and a thermal model of the São Francisco Cráton. *International Journal of Earth Sciences*, Volume 97, Number 2, April 2008, pp. 289-306
- Artemieva, I. M., Mooney, W.D., 2001. Thermal structure and evolution of Precambrian lithosphere: a global study. *J. Geophys. Res.* 106, 16387–16414.
- Hamza, V., M., (1982) Thermal structure of South America continental lithosphere during Archean and Proterozoic - Páginas 149-159 *Revista Brasileira de Geociências*, Vol. 12, n. 1- 3.
- Rybach, L., and Buntebath, G. (1984). The variation of heat generation, density and seismic velocity with rock type in the continental lithosphere. *Tectonophysics*, 103, 335–44.
- Schatz J. F., e Simmons, G., (1972) Thermal conductivity of Earth materials at high temperatures, *J. Geophys. Res.*, **77**, 6966–6983.
- Zoth, G., Hanel, R., (1988). Appendix. In: Hanel, R., Rybach, L., Stegena, L. (Eds.), *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.