



Condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico em rochas metamórficas de origem plutônica

*Luis Manuel García Reyes, Roberto Max de Argollo e Moacyr Moura Marinho, Universidade Federal da Bahia – CPGG

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

In this research we measured the thermal conductivity, thermal diffusivity and the specific heat in metamorphic rocks with plutonic origin located at the west border of Jequié Block, in the São Francisco Craton. These values were obtained at ambient temperature in 58 rock samples collected in outcrops related to the different crustal depths. We evaluate the influence of porosity, saturating fluid and anisotropy in that measurements and suggest that the effect of saturating fluid is slight in rocks with porosity smaller than 0,6 %. In the case of anisotropy in the propagation of heat, we consider that can be disregarded in the lithologies studied.

Introdução

O conhecimento das propriedades térmicas de uma rocha é de grande importância para diversas aplicações geofísicas, assim como para a quantificação da distribuição da temperatura na Terra. Por exemplo, o conhecimento de parâmetros térmicos como a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico das rochas de um embasamento são importantes na avaliação da possível geração de hidrocarbonetos numa bacia. Essas grandezas são utilizadas no modelamento termomecânico da bacia na determinação do seu fluxo térmico (Mottaghy e outros, 2005).

As dificuldades encontradas nas pesquisas geotérmicas nos continentes estão relacionadas com os métodos utilizados para a medição dos parâmetros térmicos uma vez que amostras representativas das diferentes litologias são necessárias. Nesse sentido, poços profundos apresentam grande utilidade, mas os custos elevados associados à perfuração e ao revestimento limitam o desenvolvimento dessa prática. De qualquer maneira, mesmo nas regiões onde existem furos para sondagens, os dados da crosta inferior precisam ser obtidos mediante a elaboração de modelos. Processos geológicos como dobramentos, erosão e falhas favorecem algumas regiões possibilitando a medição de parâmetros em rochas formadas em grandes profundidades e que afloram na superfície.

Para um grande número de rochas, valores de condutividade e difusividade térmicas estão disponíveis

na literatura (Birch, 1942; Cermák e Rybach, 1982; Clark, 1966; Clauser e Huenges, 1995; Desai e outros, 1974; Kappelmeyer e Hänel, 1974; Robertson, 1988; Roy e outros, 1981), e são de grande importância para estudos gerais de transferência de calor. Entretanto, a aplicação desses dados em regiões diferentes daquelas em que foram medidos, requer a consideração da variação de aspectos petrofísicos e experimentais que podem influenciar consideravelmente os resultados obtidos. Assim, devem ser estudados os minerais constituintes da rocha, a natureza e a quantidade de seus fluidos intersticiais, a porosidade, a pressão, a temperatura e a anisotropia na direção de propagação do calor.

Nas rochas com porosidades abaixo de 1 %, como as metamórficas e ígneas, o comportamento da condutividade térmica é pouco influenciado pelos espaços gerados pelos poros. Não obstante, o grau de saturação dos poros deve ser avaliado, tendo em vista que os espaços secos aumentam a resistência térmica nos contatos entre os grãos. As medidas de condutividade térmica, em rochas, sob condições secas, conduzem a erros graves se o resultado for tomado como sendo representativo da condutividade térmica *in situ*. Isto foi evidenciado por Lobo (1981) utilizando dezenove amostras de três grupos de rochas características das regiões de Toscana e Lazio, onde mostrou a influência da água nos poros da rocha como fator importante no aumento da condutividade térmica em relação às amostras secas, para a mesma temperatura. Outros estudos apontam um aumento linear entre a condutividade térmica e a saturação dos poros para rochas com porosidade próximas de 1% (Clauser e Huenges, 1995).

No presente trabalho, medimos os parâmetros térmicos condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico em amostras das principais litologias de uma seção vertical exposta por tectonismo no cráton do São Francisco, descrita por Reyes (2008). Foram considerados aspectos que influenciam estas grandezas, como saturação da rocha e anisotropia. Esses resultados são de grande interesse no conhecimento do comportamento geotérmico de regiões cratônicas no mundo, uma vez que existem poucos trabalhos abordando o assunto.

Área de estudo / Metodologia

O cráton do São Francisco abrange principalmente os estados da Bahia e de Minas Gerais. De uma maneira simplificada, é constituído pelas seguintes unidades

estratigráficas e tectônicas pré-cambrianas: uma cobertura plataformar dobrada do Neoproterozóico e relacionada ao ciclo Brasileiro (grupos Bambuí, Salitre-Jacaré e Rio Pardo); uma cobertura plataformar dobrada do Mesoproterozóico (Chapada Diamantina) com o correlato cinturão dobrado Espinhaço; e um embasamento do Arqueano e Paleoproterozóico (Sapucaia, 2004; Sapucaia e outros, 2005).

A área de trabalho, na presente pesquisa, está incluída na borda oeste do Bloco Jequié, parte integrante do embasamento do cráton do São Francisco. As litologias amostradas foram as unidades típicas de charnoquitos e enderbitos, na *facies* granulito, e de granitos, na *facies* anfíbolito, representadas, na Fig. 1, por "A", "B" e "C", respectivamente.

O Bloco Jequié ou Complexo Jequié (Cordani, 1973) ou Domínio Jequié-Mutuípe (Barbosa, 1986) ou ainda Domínio Jequié-Mutuípe-Maracás (Barbosa e outros, 1992) é constituído de dois conjuntos principais de rochas:

- o primeiro, é representado por hornblenda granulitos de composição charnoquítica a charnoenderbítica na região de Laje e Mutuípe, e predominantemente charnoquítica na região sudoeste de Maracás. Esses hornblenda granulitos compõem-se de mesopertita, quartzo, plagioclásio antepertítico, ortopiroxênio, clinopiroxênio, olivina (restrita à região sudoeste de Maracás), hornblenda e biotita; opacos, zircão e apatita são minerais acessórios. As rochas da região de Laje e Mutuípe são de afinidade calcio-alcalina, enquanto que as de Maracás são de caráter alcalino, com elevados teores de zircônio. As idades U-Pb em zircões (SHRIMP) dessas rochas variam de 2,7 a 2,8 Ga (Alibert e Barbosa, 1992). Elas são mais jovens que o conjunto heterogêneo descrito a seguir;
- o segundo conjunto, mais heterogêneo, é constituído de granulitos charnoquíticos a enderbíticos com intercalações centimétricas a métricas de rochas supracrustais máficas e félsicas de composição variadas, representadas por quartzitos, formações ferríferas bandadas, rochas quartzo-feldspáticas, calciossilicáticas, granulitos aluminosos e granulitos máficos (originalmente basaltos e andesitos). Todas essas rochas mostram feições de fusão parcial, tais como veios migmatíticos e granitos anatóticos portadores de granada. Os granulitos charnoquíticos a enderbíticos são compostos de plagioclásio antepertítico, mesopertita, quartzo, biotita, ortopiroxênio e granada almandina; apatita, zircão e alanita são os acessórios mais freqüentes.

No presente trabalho, medimos a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico a pressão constante e na temperatura de 28°C, em 58 amostras sendo 23 delas na *facies* anfíbolito e 35 na *facies* granulito.

As medições dos parâmetros térmicos foram realizadas em amostras secas e em amostras saturadas para fins de

avaliar a influência da porosidade nesses parâmetros. Entretanto, os resultados apresentados são os obtidos nas amostras secas.

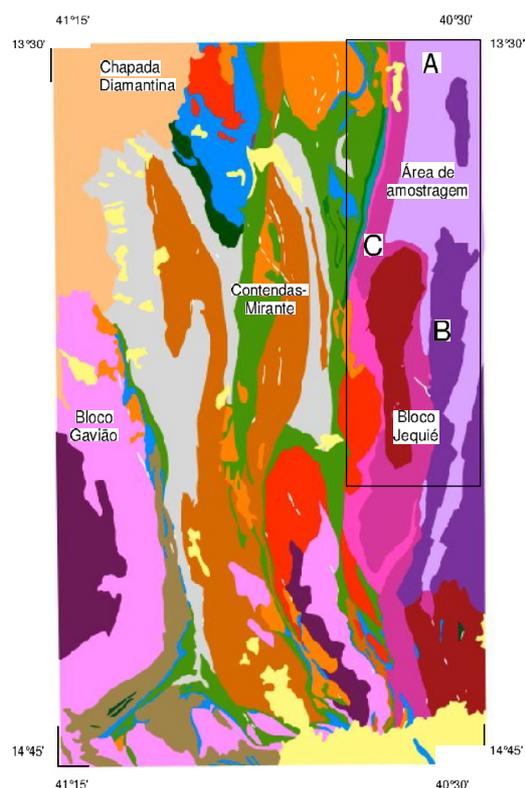


Fig. 1: Mapa geológico simplificado do Bloco Gavião, da seqüência Contendas-Mirante e da borda oeste do Bloco Jequié. Área de amostragem. Algumas litologias da região: charnoquitos ("A"); enderbitos ("B") e granitos ("C").

A temperatura influi nas nas propriedades térmicas do material. No caso da influência da temperatura no comportamento da condutividade térmica, deve ser considerado que a expansão térmica aumenta com a temperatura de forma diferente para cada mineral, gerando uma resistência térmica nos contatos entre os grãos. Este mecanismo propicia a diminuição da condutividade térmica com o aumento de temperatura até 1000 a 1200 °C, sendo menos acentuada na presença de água. Para temperaturas maiores, é observada uma inversão neste comportamento, atribuída à influência da componente de calor transmitido por radiação que começa ser significativa. Os dados de condutividade térmica disponíveis na literatura geralmente correspondem à temperatura ambiente, sendo necessária a aplicação de correções empíricas para obterem-se valores a temperaturas elevadas (Zoth e Hänel, 1988).

Além da porosidade, dos fluidos intersticiais e da temperatura, a condutividade térmica varia também com a pressão, a composição mineral da rocha e a anisotropia na direção de propagação de calor.

A anisotropia na condução calor tem sido estudada em minerais e rochas. Aqueles, em sua maioria, têm-se mostrado anisotrópicos. No caso das rochas metamórficas de origem plutônica, alguns autores têm

verificado que a anisotropia é desprezível. Nesse sentido, Clauser e Huenges (1995) mostraram a independência da anisotropia em medidas realizadas em anfíbolitos pouco condutores. Mas anisotropia tem sido observada em rochas com granito, dunito, mica xisto e, de um modo geral, em rochas com altas condutividades térmicas e ricas em quartzo.

A difusividade térmica é a medida do quão rápido um material conduz calor de forma a ajustar sua temperatura total à de suas bordas. A difusividade pode ser medida diretamente ou pode ser calculada pela equação

$$\kappa = \frac{K}{\rho c}, \quad (1)$$

onde K é a condutividade térmica, ρ a densidade e c o calor específico da rocha.

O calor específico de um material pode variar segundo as condições em que ocorra a entrega de calor. Nos estudos de rochas, normalmente supõe-se o processo de transferência de calor a pressão constante, admitindo-se a ocorrência de uma expansão térmica. Este efeito de aumento de volume é mais relevante nas rochas com maior porosidade (Halliday e Resnick, 1991).

A presença de água nos poros aumenta a condutividade térmica e o calor específico. No caso da difusividade, a consequência da saturação da rocha é desprezível já que esse efeito afeta tanto o numerador quanto o denominador da Equação 1

Resultados e discussões

Medimos os parâmetros térmicos das rochas com o analisador de propriedades térmicas QuicklineTM - 30, da Anter Corporation. Esse medidor trabalha com sondas planas e usa o método da medição de transientes de temperatura. Trabalhamos com sondas que cobrem a faixa de 0,70 a 6,0 W m⁻¹ K⁻¹, a qual é apropriada para amostras de rochas. Para ambas as sondas, o erro da medida é de 10% e a reprodutibilidade é de 3%.

O analisador térmico utilizado mede diretamente a condutividade térmica K , a capacidade calorífica volumétrica Q , e indica a temperatura em que a medida foi feita, geralmente em torno de 28 °C. A difusividade térmica τ é calculada internamente no aparelho pela relação $\tau = K/Q$. Calculamos o calor específico c pela relação $c = Q/\rho$, onde ρ é a densidade da amostra que determinamos com um picnômetro de água.

Utilizamos amostras com espessura acima de 2 cm para prevenir o problema da perda de calor pela face oposta a que se põe o sensor, e dimensões laterais maiores que 6 cm. Com essas dimensões tem-se uma área da face de medida tal que permite fazer-se mais de uma medida em diferentes áreas da face para obter-se um valor médio e, assim, minorar os efeitos da distribuição inhomogênea dos cristais na rocha. Fizemos a superfície de medida da amostra de rocha ser plana e polida para garantir um melhor contato entre a sonda e a rocha, evitando-se, assim, o uso de pasta térmica.

Determinamos a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico em amostras das litologias charnoquitos ("A"), enderbitos ("B"), granitos ("C") e

rochas máficas ("noritos e gabronoritos"). Para estimar o efeito da água nos poros das rochas, as medidas foram repetidas nas amostras saturadas.

Na Fig. 2, apresentamos os resultados das medidas nos gráficos de distribuição da condutividade térmica, da difusividade térmica e do calor específico. Nos dois primeiros gráficos, observa-se que a condutividade térmica e a difusividade térmica mantêm-se proximamente constantes, independente da litologia, exceto para as rochas máficas as quais têm valores menores. O calor específico segue a mesma tendência anterior, mas verifica-se uma maior dispersão nos valores da unidade granítica ("C").

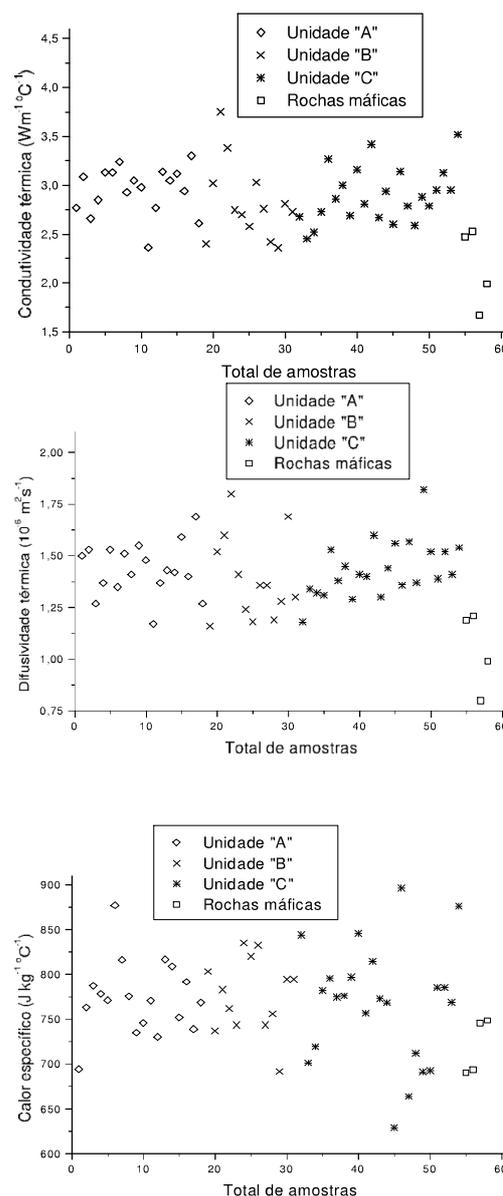


Fig. 2: Condutividade e difusividade térmicas e calor específico a pressão constante para rochas secas das várias litologias ("A" – charnoquitos, "B" – enderbitos, "C" – granitos e rochas máficas – noritos e gabronoritos).

Os valores médios da condutividade térmica em amostras secas, a 28°C, para as litologias "A", "B", "C" e rochas máficas, com a precisão de um desvio padrão, variam de $(2,17 \pm 0,41) \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ nos noritos e gabronoritos a $(2,95 \pm 0,24) \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para os charnoquitos da unidade ("A").

Na *facies* granulito, medimos 35 amostras: 13 charnoquitos; 13 enderbitos, 2 noritos e 2 gabronoritos. Nos charnoquitos, as condutividades térmicas variam de 2,36 a $3,30 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, com média de $(2,95 \pm 0,24) \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. No caso das rochas enderbíticas, os valores encontrados estão na faixa de 2,36 a $3,75 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, com média igual a $(2,82 \pm 0,40) \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. As menores condutividades foram medidas nos noritos e gabronoritos com média de $(2,17 \pm 0,41) \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, variando de 1,67 a $2,53 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. De um modo geral, na *facies* granulito essa grandeza varia de 1,67 a $3,75 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, com média de $(2,81 \pm 0,4) \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Na *facies* anfibolito, medimos 23 amostras da região granítica ("C"). As medidas variam de 2,45 a $3,52 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, com média de $(2,89 \pm 0,28) \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Nas 58 amostras medidas, a condutividades térmica varia entre 1,67 e $3,75 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, com média de $(2,84 \pm 0,36) \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Os valores médios da difusividade térmica em amostras secas à temperatura de 28°C para as litologias "A", "B", "C" e rochas máficas, com a precisão de um desvio padrão, variam de $(1,05 \pm 0,19) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ nos noritos e gabronoritos a $(1,43 \pm 0,14) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ nos granitos (unidade "C").

Na *facies* granulito, medimos 35 amostras: 13 charnoquitos; 13 enderbitos, 2 noritos e 2 gabronoritos. Nos charnoquitos, as difusividades térmicas variam de $1,17 \times 10^{-6}$ a $1,69 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, com média de $(1,43 \pm 0,13) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. No caso das rochas enderbíticas, os valores obtidos estão na faixa de $1,16 \times 10^{-6}$ a $1,80 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, com média de $(1,19 \pm 0,03) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. As menores difusividades térmicas foram medidas nos noritos e gabronoritos, com média de $(1,05 \pm 0,19) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e valores extremos de $0,80 \times 10^{-6}$ e $1,21 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. De um modo geral, essa grandeza nessa *facies* à temperatura de 28 °C, varia de $0,80 \times 10^{-6}$ a $1,80 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, com média de $(1,37 \pm 0,20) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Na *facies* anfibolito, medimos 23 amostras de granito ("C"). A difusividade térmica varia de $1,18 \times 10^{-6}$ a $1,82 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, com média de $(1,43 \pm 0,14) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Considerando as 58 amostras medidas, as difusividades térmicas variam entre $0,8 \times 10^{-6}$ e $1,82 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, com média de $(1,40 \pm 0,18) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Os valores médios do calor específico em amostras secas, à temperatura de 28°C, para as litologias "A", "B", "C" e rochas máficas, com a precisão de um desvio padrão, variam de $(720 \pm 32) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, nos noritos e gabronoritos a $(774 \pm 41) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ na unidade granítica ("C").

Na *facies* granulito, medimos 35 amostras: 13 charnoquitos, 13 enderbitos, 2 noritos e 2 gabronoritos.

Nos charnoquitos, os calores específicos variam de 694 a $877 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, com média de $(774 \pm 41) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. No caso das rochas enderbíticas, os valores estão na faixa entre 692 e $835 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ com média igual a $(729 \pm 25) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Os menores valores de calor específico foram encontrados nos noritos e gabronoritos, com média de $(720 \pm 32) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e valores extremos de 690 e $749 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. De modo geral, o calor específico nessa *facies*, a 28°C, varia de 690 a $877 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, com média de $(769 \pm 43) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Na *facies* anfibolito, medimos 23 amostras de granitos (unidade "C"). As medidas variam de 629 a $896 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ com média de $(767 \pm 66) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Considerando as 58 amostras medidas, os calores específicos variam entre 629 e $896 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, com média de $(768 \pm 53) \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Em sentido geral, observa-se como os valores médios de condutividade térmica mantém-se constantes para charnoquitos ("A"), enderbitos ("B") e granitos ("C") sendo maiores do que a média nas rochas máficas. No caso da difusividade térmica, as unidades "A" e "C" possuem valores médios iguais, maiores que o da "B", que, por sua vez, é maior do que o dos noritos e gabronoritos. O calor específico comporta-se de maneira semelhante, possuindo as unidades "C" e "A" médias mais altas do que a "B" e as rochas máficas.

A presença de água nos poros aumenta a condutividade térmica e o calor específico. No caso da difusividade, a consequência da saturação da rocha é desprezível, uma vez que esse efeito afeta tanto o numerador quanto o denominador da Equação 1.

Para avaliar a influência da saturação na condutividade térmica e no calor específico, determinamos as porosidades em 29 amostras. Dentre as rochas selecionadas incluíram-se aquelas que apresentaram diferenças maiores do que 10 % entre os valores de condutividade térmica de rocha seca e saturada. Esta porcentagem foi escolhida uma vez que o erro do equipamento, nas medidas de condutividade térmica entre 0,70 e $6,0 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, é de 10%. Os resultados das medidas de porosidade mostraram que as maiores diferenças entre as condutividades térmicas e os calores específicos das rochas secas e saturadas ocorrem para as maiores porosidades, geralmente na *facies* anfibolito. Entretanto, essas diferenças ficam próximas do erro do equipamento, podendo ser desconsideradas. Do total de amostras medidas, 86 % apresentaram porosidades menores do que 0,6 %. Os valores extremos encontrados foram 0,25 %, numa amostra de enderbitos, e 1,30 % numa litologia granítica. No último caso, houve uma diferença de 17 % entre as medidas em ambiente seco e saturado. Esses resultados são compatíveis com os dados de Clauser e Huenges (1995), que apresentam até 20 % de discrepância entre valores para rochas secas e totalmente saturadas em granitos com porosidades próximas de 1 %.

A anisotropia na direção de propagação de calor também foi avaliada neste trabalho. Para isso, medimos 6 amostras representativas em duas faces perpendiculares, obtendo-se parâmetros térmicos com menos de 10 % de diferença entre estas faces. Assim, consideramos que no

tipo de rocha estudada o comportamento pode ser considerado isotrópico.

Conclusões

Esta pesquisa, em sentido geral, contribui com o conhecimento geotérmico da região estudada no cráton do São Francisco, onde não existiam dados de condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico em amostras de rochas representativas dos diferentes níveis crustais.

Na crosta atual, calculamos a condutividade térmica integrada \bar{K} usando a equação

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{K_i}} \quad (2)$$

sendo K_1, K_2, K_3, \dots , as condutividades dos tipos individuais de rochas com espessuras, respectivas, z_1, z_2, z_3, \dots , obtendo o valor de $2,76 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Os parâmetros térmicos condutividade e difusividade mantiveram-se praticamente constantes nas amostras secas estudadas, mesmo com a mudança de litologias enderbíticas para charnoquíticas e graníticas, exceto nas rochas máficas onde os valores foram menores para ambas as grandezas; o calor específico mostrou essa mesma tendência, mas apresentando uma maior dispersão na unidade dos granitos.

As rochas na *facies* anfíbolito apresentaram maiores discrepâncias entre os valores de condutividade térmica e calor específico medidos nas amostras secas e depois saturadas do que nas rochas na *facies* granulito. A razão dessa diferença é que a porosidade é maior na *facies* anfíbolito, conforme constatamos. No caso das medidas de difusividade térmica, a consequência da saturação da rocha é desprezível.

Em rochas com porosidades menores do que 0,6 % o efeito da saturação pode ser desconsiderado nas medidas de condutividade térmica e calor específico. Entretanto, em amostras com porosidades superiores a 1 % é conveniente considerar o efeito da porosidade.

A influência da anisotropia na propagação de calor pode ser desconsiderada no tipo de litologia estudado.

Agradecimentos

Agradecemos à *Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM)* e à *Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM)* pelo apoio técnico; ao *CNPq* pelo apoio financeiro a esta pesquisa através do projeto 486369/2006-4; à *FAPESB* pelo bolsa de doutorado dada ao primeiro autor; ao Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBa (CPGG) pelas facilidades disponibilizadas para realização deste trabalho.

Referências

Alibert, C. e Barbosa, J. S. F., 1992. Âges U-Pb déterminés à la "SHRIMP" sur des zircons du complex de Jequié, Craton du São Francisco, Bahia, Brésil. 14°

Réunion des Sciences de la Terre (RST), Toulouse, France.

Barbosa, J. S. F., 1986. Constitution lithologique et métamorphique de la région granulitique du Sud de Bahia (Brésil). Tese de Doutorado – Université Pierre et Marie Curie, Paris, 401p.

Barbosa, J. F.; Marinho, M. M. e Sabaté, P., 1992. Geology of the Jequié-Itabuna Granulitic Belt. Em: "Petrologic and Geochronologic Evolution of the Oldest Segments of the São Francisco Craton, Brazil", Pedreira, A. J.; Marinho, M. M. e Barbosa, J. F. (eds.). Salvador, CBPM/IGCP 280, 7-28.

Birch, F., 1942. Thermal conductivity and diffusivity. Geological Society of America, Special paper, 36. Handbook of physical constant. Editores: F. Birch, J. F. Schairer e H. C. Spicer, 243-266.

Cermák, V. e Rybach, L., 1982. Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. Landoltbörnstein: numerical data and functional relationships in science and technology, News series, Group V (Geophysics and space research). Editores: G. Angenheister, V1a, Springer, Berlin-Heidelberg, 305-343.

Clark, S. P. Jr., 1966. Thermal conductivity. Geological Society of America. Handbook of physical constant, Memoir 97. Editor: S. P. Clark Jr., 459-482.

Clauser, Ch. e Huenges E., 1995. Thermal conductivity of rocks and minerals. AGU Reference Shelf 3. Rock physics and phase relations: a handbook of physical constant. Editor: Thomas J. Ahrens, 105-126.

Cordani, U. G., 1973. Evolução geológica da faixa costeira do Brasil entre Salvador e Vitória. Tese de livre docência, Universidade de São Paulo.

Desai, P. D.; Navarro, S. E.; Hasan, S. E.; Ho, C. Y.; DeWitt, D. P. e West, T. R., 1974. Thermophysical properties of selected rocks. Center for information and numerical data analysis and synthesis (CINDAS), Report 23, Purdue University, Indiana, USA, 256p.

Halliday, D. e Resnick, R., 1991. Fundamentos de Física 2: gravitação; ondas e termodinâmica. Livros Técnicos e Científicos Ed. Ltda., 280p.

Kappelmeyer, O. e Hänel, R., 1974. Geothermics with special reference to application. Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart, 238p.

Lobo, P. F. S., 1981. Comportamento da condutividade e difusividade térmica em função da temperatura de amostras de rochas secas e saturadas de água. Instituto Internazionale perle Ricerche Geotermiche, Pisa-Itália. In: 5th Int. Cong. Bras. Geofísica, Extend Abstracts, 29p.

Mottaghy, D.; Schellschmidt, R.; Popov, Y. A.; Clauser, C.; Kukkonen, L. T.; Nover, G.; Milanovsky, S. e Romushkevich, R. A., 2005. New heat data from the immediate vicinity of the Kola super-deep borehole: vertical variation in heat flow confirmed and attributed to advection. Tectonophysics, 401(1-2):119-142.

Robertson, E. C., 1988. Thermal properties of rocks. U. S. Geological Survey, Open file report 88-441. Reston, Virginia, USA, 106p.

Roy, R. F.; Beck A. E. e Touloukian Y. S., 1981. Thermophysical properties of selected rocks. Physical properties of rock and minerals. Center for information

and numerical data analysis and synthesis (CINDAS), Data series on material properties. Editores: Y. S. Touloukian, W. R. Judd e R. F. Roy. McGrawhill, NY, USA, II-2, 409-502.

Reyes, L. M. G., 2008. Distribuição vertical da taxa volumétrica de produção de calor radiogênico no Cráton do São Francisco. Tese de Doutorado – Curso de Pós-graduação em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, 158p.

Sapucaia, N. S., 2004. Diferenciação litológica, teores de potássio, urânio e tório e taxa de produção do calor radiogênico do embasamento cristalino das bacias de Camamu e Almada. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-graduação em Geofísica, Universidade Federal da Bahia, 72p.

Sapucaia, Najara Santos, Roberto Max de Argollo e Johildo Salomão Figueiredo Barbosa, 2005. Teores de potássio, urânio e tório e taxa de produção de calor radiogênico do embasamento cristalino das bacias de Camamu e Almada, Bahia, Brasil. Revista Brasileira de Geofísica **23** (4), 453-475.

Zoth, G. e Hänel, R., 1988. Appendix in handbook of terrestrial heat flow density determination. Editores: R. Hänel, L. Rybach e L. Stegena. Kluwer, Dordrecht, 449-466.