



Determinação das propriedades térmicas das rochas do embasamento adjacente à bacia do Recôncavo

Emmanoelle Pereira & Roberto Max de Argollo, UFBa

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.

Resumo

Neste trabalho, analisamos as propriedades térmicas, especificamente, condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico, de 95 amostras do embasamento adjacente à bacia do Recôncavo. Essas amostras foram coletadas durante o projeto Geoterm (2004), quando nelas foram determinadas a densidade, as concentrações de potássio, urânio e tório e a taxa de produção de calor.

As medidas de condutividade térmica variaram de 1,76 a 5,11 $W m^{-1} K^{-1}$, as de difusividade térmica de 0,97 a 2,60 $\times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ e o calor específico de 0,54 a 0,79 $\times 10^3 J kg^{-1} K^{-1}$.

Os resultados mostraram não haver correlações entre as propriedades térmicas e as concentrações de elementos radioativos e a produção de calor radiogênico. Entretanto foi observada uma relação entre as propriedades estudadas e o conteúdo de quartzo na rocha.

Introdução

O conhecimento das propriedades térmicas das rochas é importante em estudos geotérmicos da crosta e dos processos de convecção térmica no manto, como também em trabalhos de modelagem termo-mecânica de bacias. São essas propriedades que definem a distribuição de calor na Terra. Se num dado ponto x do espaço há um gradiente de temperatura diferente de zero, então ocorre um processo de equilíbrio buscando diminuir o gradiente, desde que não haja sumidouros adicionais de calor presentes no ponto x . Durante o processo de equilíbrio, o calor é transportado fluindo na direção do gradiente de temperatura.

Do calor existente na crosta continental, parte vem do interior da Terra transmitida através do manto e outra parte é produzida na própria crosta. O calor radiogênico é o calor gerado pela transformação da energia cinética das partículas decorrentes das emissões radioativas dos radioisótopos presentes nas rochas e constitui cerca de 40 % do calor total presente na crosta. Dentre esses radioisótopos, o K^{40} e os membros das séries do U^{235} , U^{238} e Th^{232} são responsáveis por mais que 98 % do calor produzido no interior da Terra.

Trabalhos recentes desenvolvidos no projeto Geoterm estudaram a produção de calor radiogênico no embasamento emerso adjacente à bacia sedimentar do Recôncavo, numa faixa de 60 km de suas bordas, e o gradiente de calor em poços petrolíferos no interior da bacia (Cavalcante, 2004; Argollo e Penteado, 2005). O objetivo desses trabalhos, segundo aqueles autores, foi conhecer-se a taxa de produção de calor das rochas desse embasamento para ter-se uma melhor compreensão do comportamento termo-mecânico da bacia.

Neste trabalho, medimos a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico das rochas do embasamento trabalhadas no projeto Geoterm buscando ampliar o estudo das propriedades térmicas das rochas desenvolvido naquele projeto. Buscamos, também, correlacionar essas propriedades com grandezas determinadas nos estudos do projeto Geoterm tais como densidade, teores de K, U e Th, e taxa de produção de calor radiogênico. O presente trabalho insere-se, portanto, nos objetivos do projeto GEOTERM o qual visa determinar parâmetros térmicos necessários a uma modelagem termo-mecânica da bacia.

Metodologia/ Problema Investigado

A área estudada neste trabalho é o embasamento adjacente à bacia do Recôncavo, especificamente uma faixa de cerca de 60 km das bordas emersas da bacia. Seguindo a metodologia adotada no projeto Geoterm, o embasamento estudado foi subdividido em quatro áreas: Salvador, Borda Oeste, Alto de Aporá e Borda Leste. A razão da subdivisão é que as bordas são bastante separadas pela bacia e não dispomos de medidas do embasamento em pontos no interior da bacia. Ademais, a borda leste tem poucos afloramentos por ser uma região coberta pela formação Barreiras. A figura 1 mostra o mapa geológico simplificado do embasamento das bordas da bacia do Recôncavo (Argollo & Penteado, 2005).

Em Salvador, são encontradas rochas metatonalíticas, charnoenderbíticas e supracrustais metamorfizadas na *facies* granulito. A borda oeste está representada por rochas do complexo metamórfico-migmatítico, do complexo granulítico, pelos sienitos de São Félix e de Santanópolis e pelo granito de Cachoeira. A região do Alto de Aporá caracteriza-se por ortognaisses da *facies* anfibolito. Na borda leste, também são encontradas rochas gnáissicas.

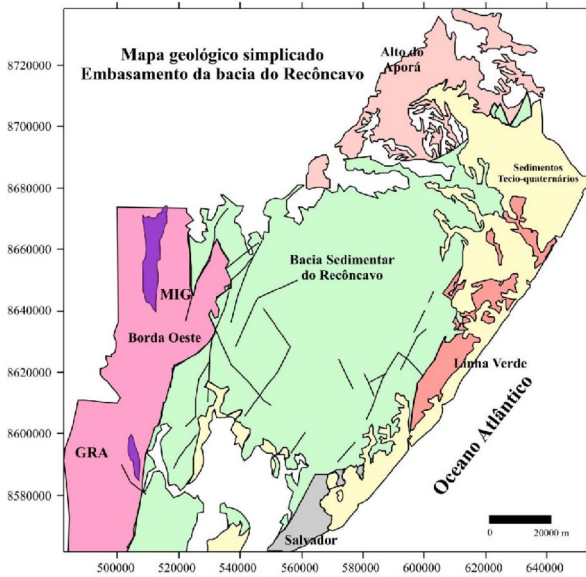


Figura 1 – Mapa geológico simplificado do embasamento das bordas da bacia do Recôncavo (Argollo e Pentead, 2005).

Medimos a condutividade térmica, difusividade térmica e capacidade calorífica utilizando o aparelho Quickline™ - 30 da Anter Corporation (figura 2) e obtivemos o valor do calor específico dividindo a capacidade calorífica pela densidade. Esse equipamento utiliza o método transiente semelhante ao do fio aquecido, no qual o sensor submete o material a um pulso de calor e registra sua resposta ao decorrer do tempo. A avaliação e medição da condutividade térmica e dos outros parâmetros são baseadas em amostras e períodos da temperatura em função do tempo.



Figura 2 – Aparelho utilizado na medida das propriedades térmicas.

Os fatores que influenciam a confiabilidade e qualidade das medidas são as flutuações na temperatura e perturbações no sensor, umidade, as dimensões das amostras e a superfície de contato entre a amostra e o sensor, sendo que os dois últimos fatores são os mais importantes. Isso porque amostras com espessuras menores que dois centímetros permitem a perda de calor pela face oposta àquela onde se põe o sensor; e em superfícies de contato rugosas, o ar presente entre o

sensor e a superfície interfere no valor medido. Para este trabalho foram selecionadas as amostras que possuíam espessura de 2 cm no mínimo e diâmetro de 6 cm. As amostras foram cortadas e polidas na face a ser medida para reduzir efeitos de rugosidade e dispensar o uso de pasta térmica.

Fizemos, em geral, três medidas em cada amostra, em locais diferentes para minimizar o efeito da inhomogeneidade na distribuição dos cristais nas amostras. Utilizamos o Excel para encontrar médias, desvios padrão e fazer gráficos de dispersão.

Resultados

A condutividade térmica, λ , variou entre 1,76 e 5,11 W m⁻¹ K⁻¹. Na tabela 1, estão os valores médios obtidos para cada litologia com seus desvios padrões.

Litologia	λ_m (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Metatonalitos (n=35)	2,51 ± 0,38
Sienitos (n=16)	2,23 ± 0,37
Charnockitos e charnoenderbitos (n=13)	2,60 ± 0,44
Granitos (n=14)	3,03 ± 0,69
Gabros (n=5)	2,23 ± 0,16
Granodioritos (n=7)	2,71 ± 0,60
Supracrustais(n=2)	2,35 ± 0,15
Migmatitos (n=2)	2,48 ± 0,50

Tabela 1 – Condutividade térmica média por litologia (n=número de amostras).

Os granitos tiveram maior condutividade média, seus valores variaram entre 2,50 e 3,50 W m⁻¹ K⁻¹, tendo uma amostra apresentado condutividade de 5,11 W m⁻¹ K⁻¹.

Um dos objetivos deste trabalho foi verificar a existência de correlação entre os parâmetros térmicos e as concentrações de elementos radioativos e a taxa de produção de calor radiogênico. Pelos gráficos de dispersão apresentados nas figuras 3, 4, 5 e 6, podemos observar que não existe nenhum tipo de correlação entre a condutividade térmica e aqueles parâmetros.

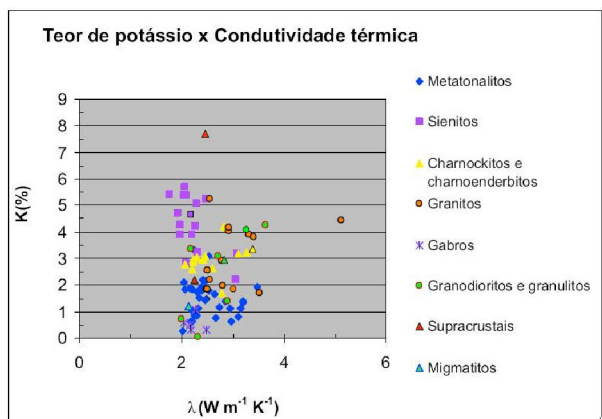


Figura 3 – Relação entre condutividade térmica e teor de potássio.

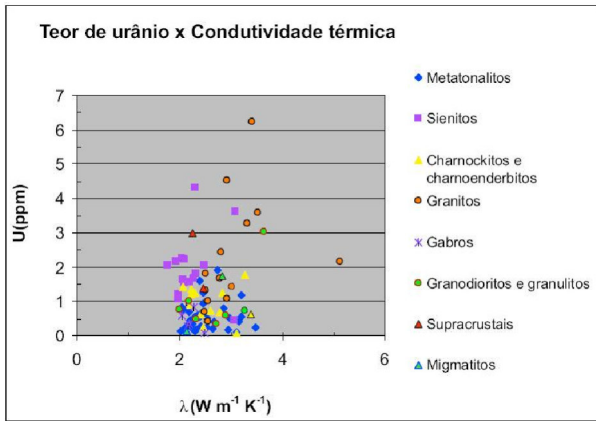


Figura 4 – Relação entre condutividade térmica e teor de urânio.

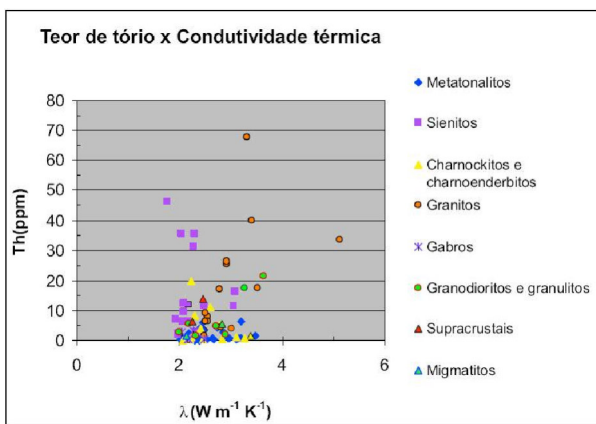


Figura 5 – Relação entre condutividade térmica e teor de tório.

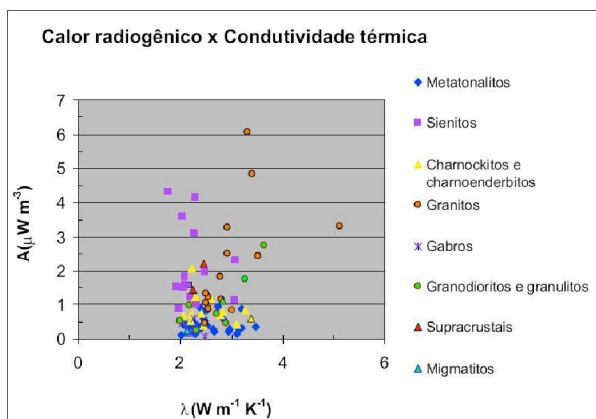


Figura 6 – Relação entre condutividade térmica e a taxa volumétrica de produção de calor radiogênico.

Usando dados de análise de mineralogia feitas em lâminas delgadas de algumas rochas, também as composições mineralógicas médias de algumas das litologias estudadas e de outras semelhantes do embasamento de Camamu-Almada descritas por Sapucaia (2004), observamos na figura 7 que os valores da condutividade térmica crescem com o maior teor de quartzo na rocha mostrando uma forte correlação entre esses dois parâmetros..

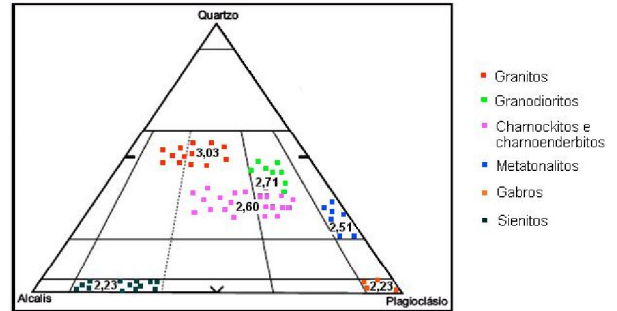


Figura 7 – Diagrama de Streckeisen com valores de condutividade térmica média de acordo com a faixa em que cada litologia se encontra (os pontos coloridos não representam a quantidade de amostras estudadas).

Os valores da difusividade térmica, α , variaram entre 1,0 e $2,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Na tabela 2, apresentamos os valores médios obtidos por litologia.

Litologia	$\alpha_m (\times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$
Metatonalitos (n=35)	$1,26 \pm 0,19$
Sienitos (n=16)	$1,15 \pm 0,17$
Charnockitos e charnoenderbitos (n=13)	$1,28 \pm 0,18$
Granitos (n=14)	$1,50 \pm 0,36$
Gabros (n=5)	$1,14 \pm 0,06$
Granodioritos (n=7)	$1,37 \pm 0,27$
Supracrustais (n=2)	$1,19 \pm 0,14$
Migmatitos (n=2)	$1,24 \pm 0,19$

Tabela 2 – Difusividade térmica média por litologia (n=número de amostras).

Pelos gráficos mostrados nas figuras 8, 9, 10 e 11, vemos que as distribuições dos valores de difusividade foram semelhantes àquelas da condutividade térmica. Do mesmo modo, os granitos apresentaram maior valor médio e os sienitos e gabros os menores. Também não existiu correlação entre a difusividade e os teores de K, U e Th, nem tampouco com a taxa volumétrica de produção de calor radiogênico.

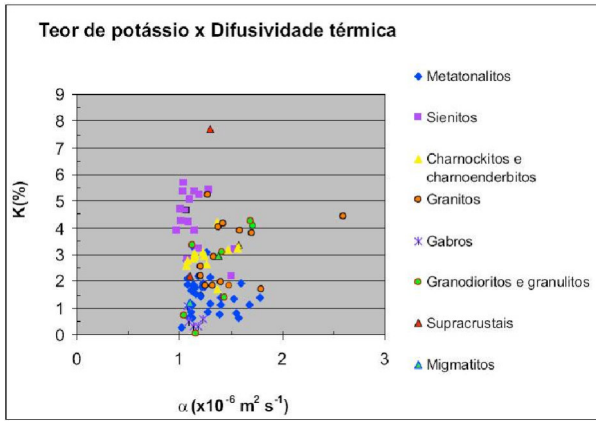


Figura 8 – Relação entre difusividade térmica e teor de potássio.

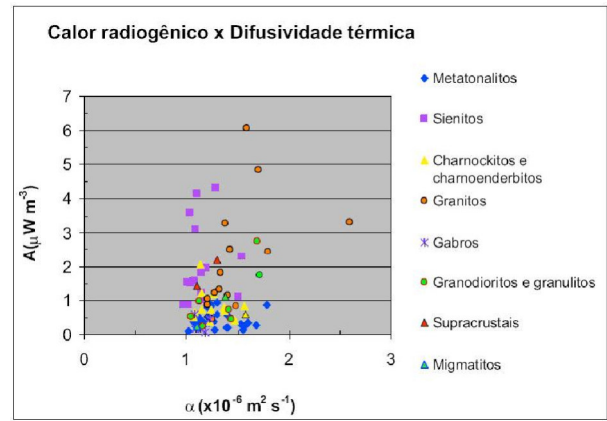


Figura 11 – Relação entre difusividade térmica e taxa volumétrica de produção de calor radiogênico.

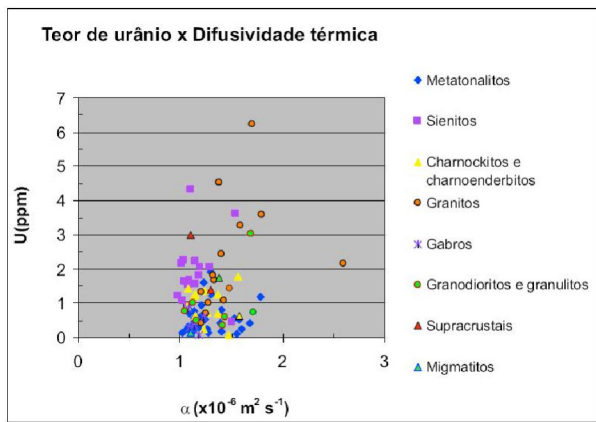


Figura 9 – Relação entre difusividade térmica e teor de urânio.

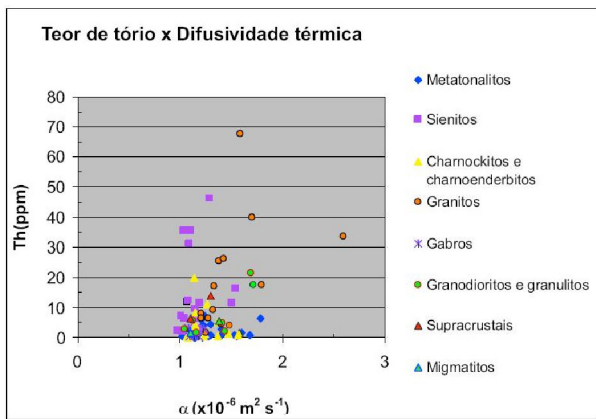


Figura 10 – Relação entre difusividade térmica e teor de tório.

Observamos na figura 12 que o comportamento da difusividade térmica com a quantidade de quartzo na rocha é similar àquela observada para a condutividade térmica na figura 7.

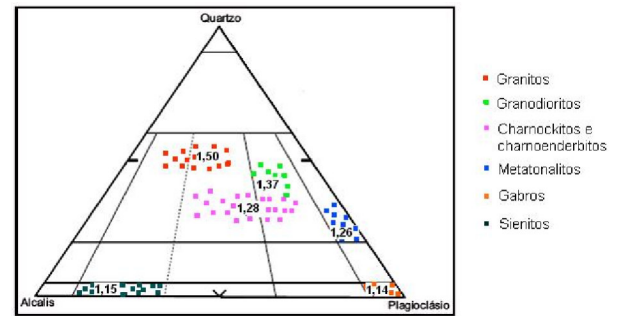


Figura 12 – Diagrama de Streckeisen com valores de difusividade térmica média de acordo com a faixa em que cada litologia se encontra (os pontos coloridos não representam a quantidade de amostras estudadas).

Para o calor específico, c , não se observou variações significativas em seus valores nas rochas analisadas, a maioria ficando em torno de $0,7 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Na tabela 3 apresentamos os valores médios obtidos por litologia.

Litologia	c_m ($\times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
Metatonalitos (n=35)	$0,70 \pm 0,04$
Sienitos (n=6)	$0,71 \pm 0,04$
Charnockitos e charnoenderbitos (n=13)	$0,73 \pm 0,04$
Granitos (n=14)	$0,74 \pm 0,03$
Gabros (n=5)	$0,64 \pm 0,06$
Granodioritos (n=7)	$0,70 \pm 0,05$
Supracrustais (n=2)	$0,71 \pm 0,06$
Migmatitos (n=2)	$0,73 \pm 0,05$

Tabela 3 – Calor específico médio por litologia (n=número de amostras).

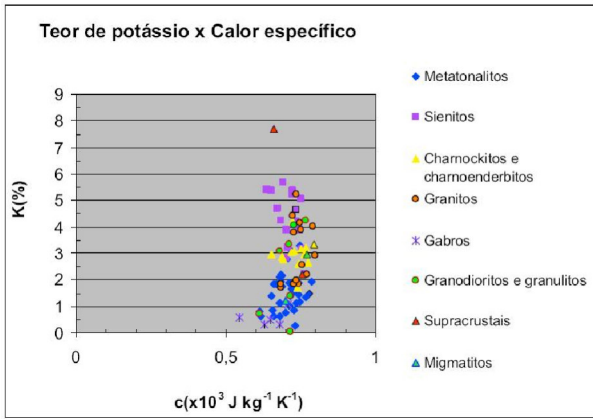


Figura 13 – Relação entre calor específico e teor de potássio.

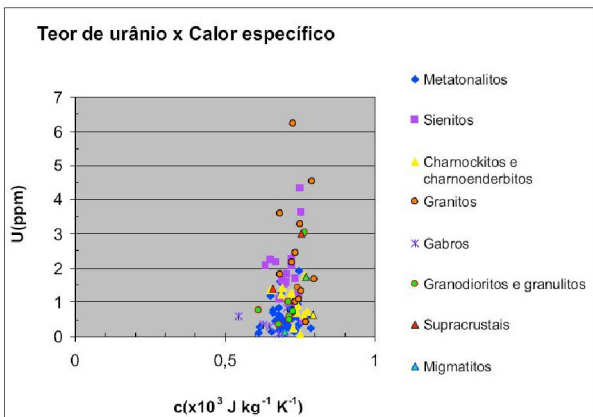


Figura 14 – Relação entre calor específico e teor de urânio.

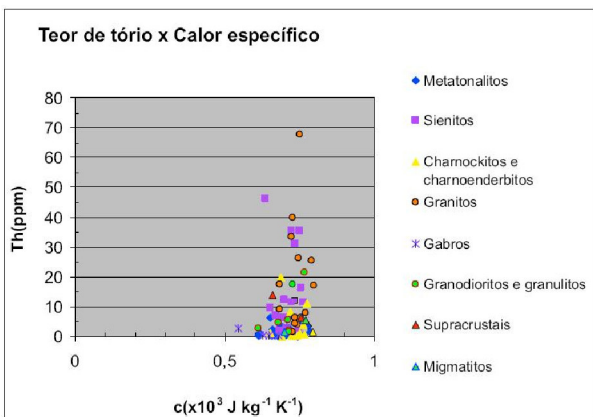


Figura 15 – Relação entre calor específico e teor de tório.

Pelos gráficos das figuras 13, 14, 15 e 16, podemos dizer que, dentro do erro experimental, o calor específico é constante para as rochas analisadas. Isso explica a semelhança na distribuição dos valores de difusividade térmica e condutividade térmica, já que $\alpha = \lambda / (\rho c)$, onde α é a difusividade térmica, λ a condutividade térmica, c o calor específico e ρ a densidade, sendo a variação deste também pouco significativa.

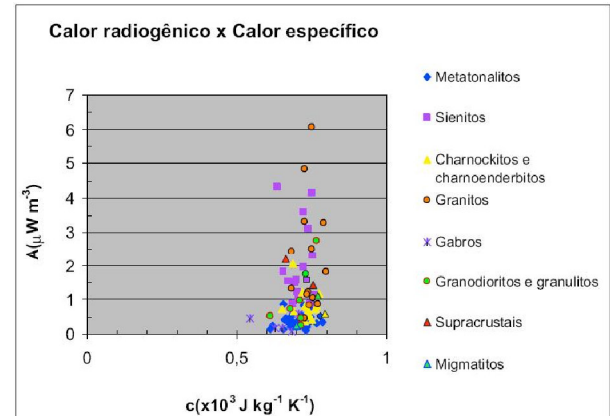


Figura 16 – Relação entre calor específico e produção de calor radiogênico.

Discussão e Conclusões

Os resultados deste trabalho contribuem para melhorar o conhecimento sobre as propriedades térmicas de rochas cristalinas, em particular de rochas ígneas e metamórficas do Cráton do São Francisco.

Nas amostras analisadas, os valores da condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico variaram entre 1,76 e 5,11 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$; 0,97 e $2,60 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ e 0,54 e $0,79 \times 10^3 \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$, respectivamente.

Os resultados experimentais mostram que os valores da condutividade térmica e da difusividade térmica crescem com o crescimento do teor de quartzo na rocha, evidenciando uma forte dependência desses dois parâmetros com o crescimento desse teor.

O calor específico manteve-se praticamente constante em todas as litologias, em torno de $0,71 \times 10^3 \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$. Essa constância, juntamente com a pouca variação da densidade nas rochas, explicam os comportamentos semelhantes da condutividade térmica e da difusividade térmica.

Não observamos qualquer relação entre as propriedades térmicas analisadas e as concentrações de K, U e Th nas rochas, nem tampouco com a taxa volumétrica de produção de calor radiogênico, ainda que essa taxa dependa da densidade das rochas e dos teores de K, U e Th.

Agradecimentos

Agradecemos ao Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA, CPGG, particularmente ao Laboratório de Física Nuclear Aplicada pelo uso de seus laboratórios na execução deste trabalho.

Referências (Arial Bold, 9) Veja normas da RBGf

Alves Júnior, Paulo Bezerra, 2004. Determinação de perfis de taxa de produção de calor radiogênico em poços da bacia do Recôncavo. Monografia . Universidade Federal da Bahia.

Argollo, R. M. de, Penteado, H. L. B., 2005. Relatório final do projeto Geoterm, CPGG-UFBA, Petrobrás.

Beardmore, G. e Cull, J, 2001. Crustal Heat Flow. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.

Beck, A. E., 1965. Thecniques of measuring heat flow on land, American Geophysical Union, pp. 24-57.

Buntebarth, G., 1984. Geothermics, Spring Verlag, Berlin.

Cavalcante, Anderson Gusmão, 2004. Correção de dados de temperatura de fundo de poço (BHT). Trabalho de graduação, curso de graduação em geofísica, UFBA, 75 pp.

Cermak, V., Bodri, L., Rybach, L. e Buntebarth, G., 1990. Relationship between seismic velocity and heat production: comparison of two sets of data and test of validity, Earth and Planetary Science Letters, 99:48-57.

Clauser, C. e Huenges, E., 1995. Thermal conductivity of rocks and minerals, American Geophysical Union, pp. 105-126.

Davis, E. E., 1988. Handbook of terrestrial heat flow density determination, Kluwer, Dordrecht, Holanda.

Desai, P. D. et al (05 co-authors), 1974. Thermophysical properties of selected rocks, Center of information and numerical data analysis and synthesis (CINDAS), Purdue Univ., Indiana, USA.

Figueiredo, E. R. H., 2006. Condutividade térmica de rochas: uma aplicação para granitos ornamentais, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Fowler, C., 1990. The solid earth, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.

Jesus, Carlos Luciano C., 2004. Determinação da condutividade térmica de rochas a partir de perfilagem elétrica de poços. Dissertação de mestrado em Geofísica. Universidade Federal da Bahia.

Kappelmeyer, O. e Ranel, R., 1974. Geothermics with especial reference to application, Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart, Alemanha.

Medeiros, R. A. e Ponte, F. C., 1981. Roteiro geológico da bacia do Recôncavo (Bahia), Petrobrás/ SEDES/ DIVEN / SEM-BA, Salvador.

Roy, R. F., Beck, A. E. e Touloukian, Y. S., 1981. Physical properties of rocks and minerals, McGraw-Hill, New York, USA..

Rybach, L. e Buntebarth, G., 1987. The relationship between seismic velocity and heat production – critical comments, Earth and Planetary Science Letters, 83:175-177.

Sapucaia, Najara Santos, 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 em Geofísica, UFBA, 72 pp.

Seipold, U., 1998. Temperature dependence of thermal transport of crystalline rocks – a general law, Technophysics, 291:161-171.

Sharma, P., 1986. Geophysical methods in geology, Elsevier, New York, USA.

Somerton, W., 1992. Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems, Elsevier, New York, USA.

Stacey, F., 1954. Physics of the earth, Brookfield Press, Brisbane, Austrália.

Tye, R. P., 1969. Thermal conductivity, Academic Press, Londres, Inglaterra.

Young, H. D., 1992. University Physics, Pearson Addison-Wesley Publishing Company, São Francisco, USA.