



Condutividade Térmica do Município de Teófilo Otoni com base em perfis litológicos de poços

¹Felipe Pereira dos Santos (felipereira.santos@gmail.com), ²Jorge Luiz dos Santos Gomes (jorge.gomes@cprm.gov.br) e ¹Antônio Jorge de Lima Gomes (antonio.gomes@ufvjm.edu.br)

¹UFVJM - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – ²CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper presents results of the thermal conductivity of the city of Teófilo Otoni obtained with the assistance of relevant literature and analysis of wells using the database SIAGAS (CPRM, 2013).

To obtain values of thermal conductivity were used two methods: linear and planar source of heat for the determination of thermal conductivity.

The region has a thin layer of sediment. We note the low sediment layer, on average 21 meters, found in the municipality.

The values of the thermal conductivity of rocks and sediments ranged between 2.6 and 4.4 W/m.K. The regional average of thermal conductivity was 3.2 (W/m.K).

We emphasize that more accurate results are obtained with field research, however our finding is concise and well represents the behavior of the thermal conductivity of the municipality.

Introdução

O objetivo deste trabalho é determinar a condutividade térmica do município de Teófilo Otoni, no Estado de Minas Gerais, com base na análise de perfis construtivos de poços descritos pela CPRM (1995, 1998, 1999, 2000, 2003 e 2007) disponibilizado no portal do SIAGAS (2013), e com o auxílio de trabalhos já publicados que trazem resultados de condutividade térmica de rochas, compatíveis e aplicáveis à área de estudo, principalmente os publicados por Gomes (2003); Gomes e Hamza (2009), Gomes & Hamza (2003), Alexandrino (2008) e Santos et al (2012),

No âmbito científico entender as propriedades térmicas da matéria permite o estudo e utilização favorável destas propriedades. No caso das rochas esse raciocínio é válido, e uma propriedade muito importante nesse contexto é a condutividade térmica.

Dentre as diversas características físicas das rochas, a condutividade térmica é uma propriedade (intrínseca) que chama a atenção, principalmente no contexto geotérmico, pois a sua determinação possibilita dentre outras aplicações, a avaliação de recursos geotermiais Santos et al (2012), Gomes e Hamza (2009), Gomes & Hamza (2003), Alexandrino (2008).

Através dos poços foi possível obter o conhecimento da composição e profundidade da camada sedimentar no município de Teófilo Otoni – MG. Todos os poços analisados pertencem a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

Apresenta-se na figura (1) a localização do município de Teófilo Otoni no estado de Minas Gerais.



Figura 1 - Mapa do estado de Minas Gerais com a localização do município de Teófilo Otoni (Adaptado de GOMES et al 2012).

Metodologia

A energia transferida do interior da Terra para a superfície ocorre mediante três mecanismos principais: radiação, condução e convecção. De maneira geral, na litosfera terrestre o mecanismo principal de transferência de energia é a condução de acordo com Clauser & Huenges (1995).

Segundo as Leis da Termodinâmica enunciadas e descritas por vários autores Braga (2006), Halliday et al (2009), quando existe uma diferença de temperatura entre sistemas postos em contato, deve ocorrer de forma espontânea uma transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas menos energéticas

em função das interações entre elas e sua energia térmica associada, essa transferência ocorre entre sistemas e partes de um mesmo sistema.

Podemos definir então a condutividade térmica como a capacidade e/ou habilidade de um material conduzir energia na forma de calor Santos et al (2012).

Em nosso contexto o principal sistema envolvido são apenas as rochas.

Matematicamente a condução térmica é um parâmetro que relaciona o fluxo de calor com o gradiente térmico. Essa relação é conhecida como lei de Fourier. No regime permanente se torna:

$$q'' = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

q'' = fluxo de calor (W/m^2); λ = condutividade térmica ($W/m.K$); $\frac{\partial T}{\partial x}$ = gradiente térmico na direção x (K/m). Nesse caso a equação está na forma unidimensional com λ constante.

As características físico-químicas das rochas governam seu comportamento no que se diz respeito à condução de energia Santos et al (2012), Figueiredo (2006), Silva (2010), Gomes & Hamza (2009). Neste sentido a constituição e organização mineralógica determinam a maior ou menor capacidade de condução.

É importante ressaltar que a condutividade térmica de uma cidade ou região pode não ser precisa levando em consideração apenas o contexto litológico Santos et al (2012). Para determinar a condutividade térmica das rochas são feitas pesquisas de campo e colhidas amostras representativas da geologia de interesse, estas amostras são polidas e preparadas para se adequar melhor aos aparelhos e gerar resultados mais precisos na medição.

Dois métodos são utilizados na determinação da condutividade térmica das rochas, o da Fonte Linear de Calor e Fonte Planar de Calor Gomes & Hamza (2003), Alexandrino (2008).

a) Fonte Linear de Calor: O princípio deste método tem como base a solução da equação de transmissão de calor apropriada para o caso de fonte linear de calor num meio infinito (Carslaw e Jaeger, 1959) apresentada a seguir:

$$T = \frac{Q \ln(t)}{4\pi\lambda} + c \quad (2)$$

Onde:

Q: taxa de produção de calor por unidade de tempo e comprimento;

λ : condutividade térmica;

t: tempo após o início do ensaio;

T: temperatura.

A relação linear entre a temperatura (T) e o logaritmo de tempo (t) permite a determinação da condutividade térmica da amostra, desde que se conheça o valor de taxa de taxa de aquecimento (Q).

Um ensaio inicial com uso de um material padrão cuja condutividade térmica seja conhecida permite a determinação do valor efetivo de Q.

A equação (1) pode ser facilmente adaptada para caso do meio semi-infinito (isso é: o fluxo de calor ocorre em geometria de 2π):

$$T = \frac{Q \ln(t)}{2\pi\lambda} + c \quad (3)$$

Ambos os casos representados nas equações (1) e (2) podem ser utilizados para determinação de condutividade térmica. Contudo, questões práticas na preparação de amostras determinam a escolha. Geralmente, o caso representado pela equação (1) é utilizado para amostras de sedimentos e de calha enquanto o caso da equação (2) é mais adequado para amostras sólidas.

No trabalho realizado por GOMES e HAMZA (2003) ao utilizar o método de Fonte de calor para a determinação da condutividade térmica no estado do Rio de Janeiro, usaram os seguintes materiais:

1º Sensor Agulha: Consiste de uma agulha de aço inoxidável da Fenwall Electronics (K1137A), com um fio aquecedor e um sensor de termistor em seu interior. O diâmetro da agulha é de 1mm e seu comprimento é de 90 mm. Do conector, saem as conexões da resistência de aquecimento à fonte de alimentação e do termistor ao multímetro. A resistência elétrica do fio aquecedor é 360 Ω e a do termistor, à temperatura de 25 °C, é 930 Ω .

2º Fonte de Corrente Constante: É uma fonte ajustável entre 1 a 20 VCC, por meio de um potenciômetro no painel frontal. Este módulo faz a conversão de voltagem/energia de 110 VCA para 20 VCC / 150 mA. Os terminais do fio aquecedor são conectados à fonte de corrente contínua e os do termistor ao multímetro. No painel traseiro, encontra-se um conector BNC com saída de sinal de 5V/1Hz com a finalidade de habilitar o multímetro para as leituras de resistência elétrica.

3º Multímetro: Este instrumento é utilizado no sistema experimental para a leitura de resistência elétrica. Recebe o sinal para leituras, por meio do conector 'External Trigger', vindo da fonte de corrente constante e, depois, envia as leituras efetuadas ao computador por meio de um cabo serial RS-232.

4º Computador: É utilizado para a aquisição automática de dados. Recebe as leituras do multímetro via cabo serial RS-232. A aquisição dos dados é facilitada com o uso de um programa em linguagem BASIC.

No caso de sedimentos a agulha é inserida num recipiente contendo a amostra. A geometria do ensaio é obviamente de meio infinito, já que o calor liberado na agulha flui em todas direções.

No caso de amostras sólidas utiliza-se uma placa base de poliestireno expandido, que serve como isolante térmico, simulando desta forma o caso do meio semi-infinito para propagação de calor liberado na agulha.

A amostra é colocada de forma a cobrir a parte central da agulha. Daí, ao acionar a fonte, inicia-se a liberação de calor no interior da agulha, o que induz na mesma, variações de temperatura.

O aumento de temperatura da agulha depende em grande parte do fluxo de calor para a amostra, o que, por sua vez, é proporcional a sua condutividade térmica. (GOMES E HAMZA, 2003).

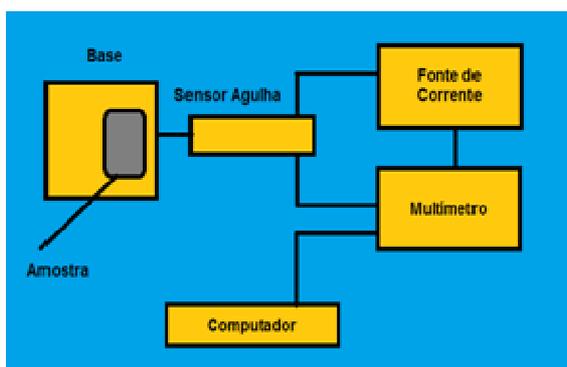


Figura 2 - Diagrama experimental para medição de condutividade térmica pelo método da fonte linear de calor (Adaptado de GOMES e HAMZA 2003).

O sistema é calibrado através de um disco padrão, cuja condutividade térmica é conhecida.

b) Fonte Planar de Calor: O método de fonte planar de calor foi desenvolvido inicialmente por Mongelli (1968). O princípio deste método é baseado na solução da equação de transmissão de calor apropriada (Carslaw & Jaeger, 1959):

$$T = Q \left(\frac{t\rho c}{\pi\lambda} \right)^2 e^{-\frac{(x-x')^2}{4kt}} - \frac{Q|x-x'|}{2k\rho c} \operatorname{erfc} \frac{|x-x'|}{2\sqrt{kt}} \quad (4)$$

Onde:

Q: a taxa de produção de calor por unidade de tempo e área unitária; λ : condutividade térmica; t: tempo após o início do ensaio; T: temperatura e κ : difusividade térmica.

A relação entre a temperatura (T) e o tempo (t) permite a determinação da condutividade térmica da amostra, desde que se conheça o valor efetivo de (Q).

O dispositivo experimental para o método de Fonte planar de Calor utilizado no trabalho de Gomes e Hamza (2003) é da marca Isomet, modelo 104 fabricada pela companhia 'AppliedPrecision', da República Eslováquia, pertencente ao Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional no Rio de Janeiro. O desenho esquemático deste equipamento é ilustrado a seguir na Figura (3).

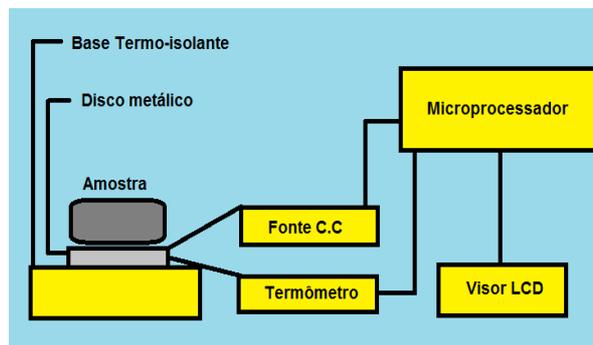


Figura 3 - Desenho esquemático do equipamento ISOMET para medição de condutividade térmica (Adaptado de GOMES e HAMZA, 2003).

Para determinar a condutividade térmica de uma cidade ou região é preciso ter informações também a respeito das unidades geológicas do respectivo local que está sendo estudado, ou seja, é necessário conhecer a sua geologia. Nesse contexto apresenta-se na figura (4) a região geológica a qual o município de Teófilo Otoni pertence.

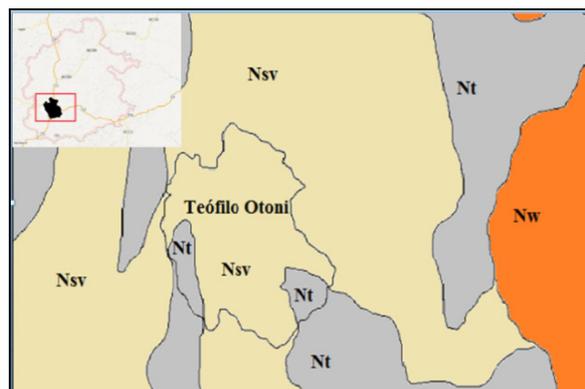


Figura 4 - Geologia Regional do Município de Teófilo Otoni. (Adaptado de CPRM 1996). Legenda: Nsv – Tonalito São Vitor/ Nt – Formação Tumiritinga/ Nw – Granito Wolf.

Segundo o mapa geológico de Minas Gerais (COMIG, 1994) o município em estudo pertence regionalmente ao Complexo Juiz de Fora, que apresenta a maioria de suas unidades geológicas de idade arqueira. Rangel da Silva *et al.* (1987 *In* Costa *et al.* 1995), adotaram a designação do Complexo Juiz de Fora como sendo o conjunto de rochas pertencentes à fácies granulito e anfíbolito médio a forte. Constituído por granada-biotita gnaisses, gnaisses a hiperstênio, gnaisses quartzo-feldspáticos e biotita-gnaisse.

Heilbron (1993, 1995) define o Complexo Juiz de Fora como sendo constituído por ortognaisses e metabasitos com paragênese da fácies granulito, que localmente mostram efeitos de evento metamórfico retrógrado, com formação de hornblenda e biotita a partir de piroxênios.

Num contexto local o município pertence à Formação Tumiritinga, Tonalito São Vitor e Granito Wolf segundo as cartas geológicas de Mucuri e Teófilo Otoni descritas pelo projeto leste (CPRM, 1996). Segue então a descrição geológica local do município segundo a CPRM, (1996):

Formação Tumiritinga: Biotita gnaisse xistoso, cinza, ocasionalmente com cordierita, sillimanita e granada, por vezes migmatizado, o litotipo principal é um biotita gnaisse cinza, que apresenta mais quartzo-feldspáticos e níveis mais biotíticos que muitas vezes conferem aspecto xistoso à rocha.

Tonalito São Vitor: Apresenta rochas com granulação média a grossa tendo como principais tipos petrográficos: biotita-tonalito, hornblenda biotita tonalito e, subordinadamente, biotita granodiorito, de cor cinza e, ocasionalmente com megacristais de feldspato mostrando textura de fluxo magmático.

Granito Wolf: Cordierita-biotita-granada leucogranito cinza claro (subordinadamente granodiorito e tonalito).

Analisando a dinâmica terrestre entendemos que o núcleo da Terra possui temperaturas muito elevadas, e isso faz com que haja um fluxo de calor na direção núcleo-superfície. No contexto geotérmico a Lei de Fourier também pode ser aplicada e a condutividade térmica das rochas tem papel fundamental, pois é por condução que a energia chega à superfície com maior significância Santos et al (2012) uma vez que a transmissão de calor por condução é característica do transporte através dos sólidos Incropera & Witt (1987), nesse sentido é evidente a importância da condutividade pois esta relaciona o gradiente com o fluxo geotérmico.

Como estamos tratando de rochas, determinar a condutividade térmica requer muita atenção, uma vez que essa grandeza física é dependente de diversos fatores e considerações: porosidade, constituição mineralógica, direção da medida (devido a anisotropia), temperatura e pressão em que a rocha está sendo submetida, fraturas, saturação de fluido, presença ou não de cristais, dentre outras dependências, Clauser & Huenges (1995) Figueiredo (2006), Santos et al (2012), Pereira (2008).

De maneira geral existem dois parâmetros fundamentais que governam significativamente as variações de condutividade térmica: porosidade e presença de quartzo. Entendendo que a condução ocorre pelas vibrações das estruturas eletrônicas e interações moleculares de colisão (BRAGA, 2006), as rochas menos porosas tendem a ser mais condutivas devido ao menor espaçamento entre seus grãos o que corrobora para a transmissão de calor. A explicação para o quartzo colaborar para a condução é o seu alto valor de condutividade térmica 7,69 W/m.K Horai (1971), Cermak & Rybach (1987), em relação aos outros minerais. Como é esperado, quanto maior a presença de um mineral bom condutor na constituição rochosa tem-se uma maior capacidade de condução da mesma. Clauser & Huenges (1995) analisaram e descreveram o comportamento de alguns tipos de rochas no que se diz respeito aos fatores que determinam a condutividade térmica.

- **Plutônicas:** fase mineral dominante;
- **Vulcânicas:** porosidade;
- **Sedimentares:** porosidade e origem da partícula sedimentar;
- **Metamórficas:** anisotropia e fase mineral dominante.

Quanto a anisotropia esses autores afirmam que na direção paralela à foliação a condutividade será maior do que na direção perpendicular.

Resultados e Discussões

A base de dados disponibilizada pelo SIAGAS (CPRM, 2013) descreve os perfis litológicos de poços caracterizando as diferentes camadas de sedimentos até a rocha-mãe. Analisamos 14 perfis para tirar algumas conclusões de interesse. Apresenta-se nas figuras que seguem quatro desses poços com suas respectivas informações. O índice *localização* indicado nas figuras representa uma referência da cidade de Teófilo Otoni ou algum de seus distritos próximos. O tipo de sedimento, latitude e longitude estão descritos na tabela. A condutividade térmica (λ) quando disponível também é apresentada nas figuras (5), (6), (7) e (8).

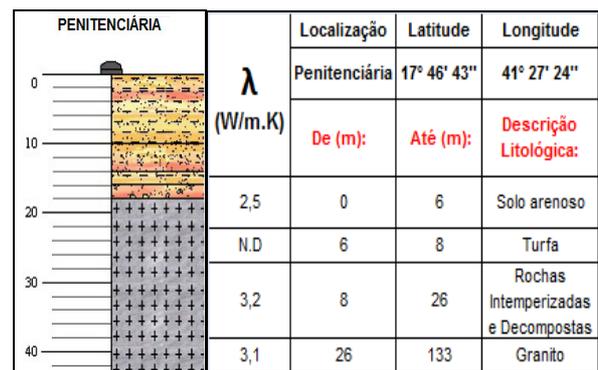


Figura 5 - Perfil construtivo do poço da Penitenciária no município de Teófilo Otoni e suas respectivas informações (Adaptado da CPRM, 2000).

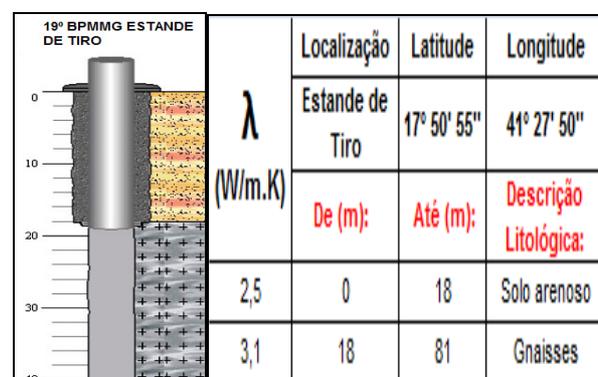


Figura 6 - Perfil construtivo do poço do Estande de Tiro no município de Teófilo Otoni e suas respectivas informações (Adaptado da CPRM, 1999).

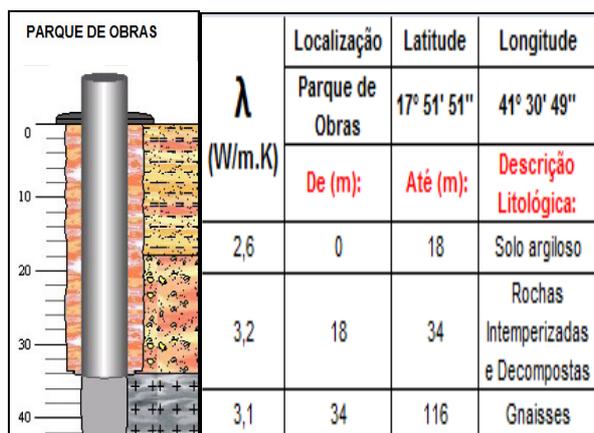


Figura 7- Perfil construtivo do poço do Parque de Obras no município de Teófilo Otoni e suas respectivas informações (Adaptado da CPRM, 1999).

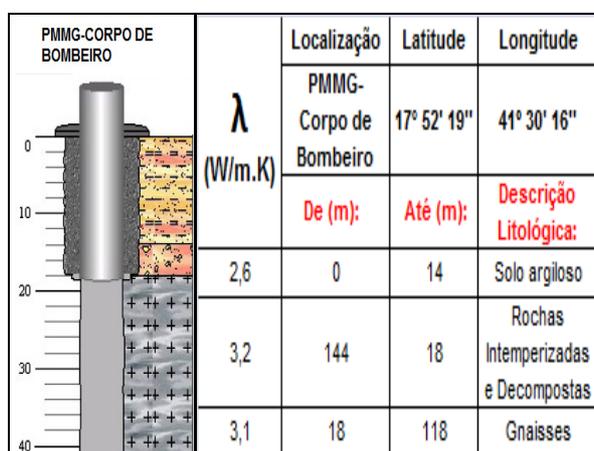


Figura 8 - Perfil construtivo do poço do Corpo de Bombeiro no município de Teófilo Otoni e suas respectivas informações (Adaptado da CPRM, 1999).

Foi verificado que a camada sedimentar é composta basicamente por argila, solo arenoso, solo argiloso, mas principalmente por rochas intemperizadas e decompostas. Estas foram encontradas em 10 dos 14 poços que foram estudados.

Na maioria dos poços a rocha-mãe é composta essencialmente por gnaisses, e apenas dois apresentaram granito como sendo a rocha-mãe.

Tomando como base trabalhos publicados de Gomes & Hamza (2003), Gomes & Hamza (2005), Alexandrino (2008) e Santos et al (2012) foi verificado que a condutividade térmica dos sedimentos apresenta um valor médio de 2,6 W/m.K com desvio padrão de ± 0,8 W/m.K.

Com a análise dos 14 poços verificamos que as camadas sedimentares possuem uma profundidade média de 21

metros de profundidade confirmando o que já era esperado para essa região pré-cambriana.

Constata-se que um dos poços saiu do padrão, apresentando a camada com 80 metros de profundidade, sendo esta a maior espessura sedimentar.

Com base na bibliografia relevante foi possível fazer o levantamento de condutividade térmica para diversos tipos litológicos. Os tipos de rochas de idade Paleoproterozóica e Arqueana são caracterizadas por valores de condutividade térmica entre 2,9 a 4,3 W/m.K Gomes & Hamza (2005). Como essa idade é característica do município, um resultado nessa faixa de valores é esperado.

De acordo com os perfis litológicos dos poços descritos pela CPRM (1995,1998, 1999, 2000, 2003, 2007) e tomando como base os mapas geológicos do município e região, os resultados de interesse a respeito da condutividade térmica das rochas foram compilados e são mostrados na tabela (1) contendo o valor médio representativo calculado. Ressaltamos que apenas a análise litológica está sendo considerada.

Esses valores são também apresentados de forma gráfica na Figura (9) no final deste trabalho permitindo melhor avaliação analítica e comparativa.

Tabela 1 - Média de Condutividade Térmica dos principais tipos litológicos (Adaptado de GOMES e HAMZA, 2003).

Tipos de Rochas	Tipo Litológico	Condutividade Térmica (W/m.K)	
		Média	σ
Metamórfica de Alto Grau	Biotita Gnaisse	3,5	2,0
	Gnaisse Granítico	3,1	2,1
	Gnaisse Leucocrático	2,8	1,2
	Granada-Gnaisse	4,4	3,0
Rochas Ígneas Ácidas	Granito	3,1	1,3
	Granito Diferenciado	2,7	1,5
	Granitóide	3,0	1,7
	Granitóide Tonalítico	3,1	1,3
Média Geral		3,2	1,8

Devido a pequena espessura sedimentar do município (21 metros) constatada nos poços, a condutividade térmica desse pacote se torna desprezível (nesse caso específico) uma vez que a proporção da camada rochosa é muito maior e sua condutividade térmica predomina, representando então o valor de condução térmica do município.

Conclusões

Os valores da condutividade térmica das rochas e dos sedimentos de Teófilo Otoni apresentaram resultados compreendidos entre 2,6 e 4,4 (W/m.K).

O valor médio de condutividade térmica do Município de Teófilo Otoni é de $3,2 \pm 1,8$ (W/m.K).

Como a rocha do embasamento pertencente à formação geológica do Complexo Juiz de Fora, esta tem a predominância de gnaisses, cujo valor médio de 3,2 W/m.K é compatível com esse tipo de litologia.

Resultados mais precisos podem ser obtidos com mais pesquisas de campo, entretanto este resultado de 3,2 W/m.K é consistente e pode representar o comportamento da condutividade térmica do município na avaliação de recursos geotermiais.

Referências

Alexandrino, C.H. 2008. **Campo Termal da Província Estrutural São Francisco e Faixas Móveis Adjacentes**. Tese de Doutorado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro.

Clauser, C.; Huenges, E. 1995. **Thermal Conductivity of Rocks and Minerals**, American Geophysical Union, pág.105 a 126,

Costa, A.G.;Rosiere, C.A.;Moreira, L.M.;Fischel, D.P. **Caracterização Geotectônica do Setor Setentrional do Cinturão Ribeira: Evidência de Acresção**

Neoproterozóica no Leste de Minas Gerais,Brasil. Genomos, pág. 51 a 68, 1995.

CPRM - Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, **Ficha Técnica de Poços na cidade de Teófilo Otoni – MG**. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php> Acesso: fev. 2013.

Figueiredo, E. H. **Condutividade Térmica de Rochas: Uma Aplicação para Granitos Ornamentais**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, 2006.

Gomes, A.J.L **Avaliação dos Recursos Geotermiais do Estado do Rio de Janeiro**, Dissertação de Mestrado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 2003.

Hamza, V.M.;Gomes, A.J.L.; Dias, F.J.S.S;Terceros, G.Z.D. **Numerical and Functional Representations Regional Heat Flow in South America**, 2005. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Volume 152,4, p.223-256.

Santos, F.P.; Gomes, A.J.L; Santos, G.M.; Silva, J.M.P.;Campos, Campos, P.C.O. **Condutividade Térmica de Rochas e Sedimentos do Complexo Juiz de Fora**, Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador – BA, 2012.

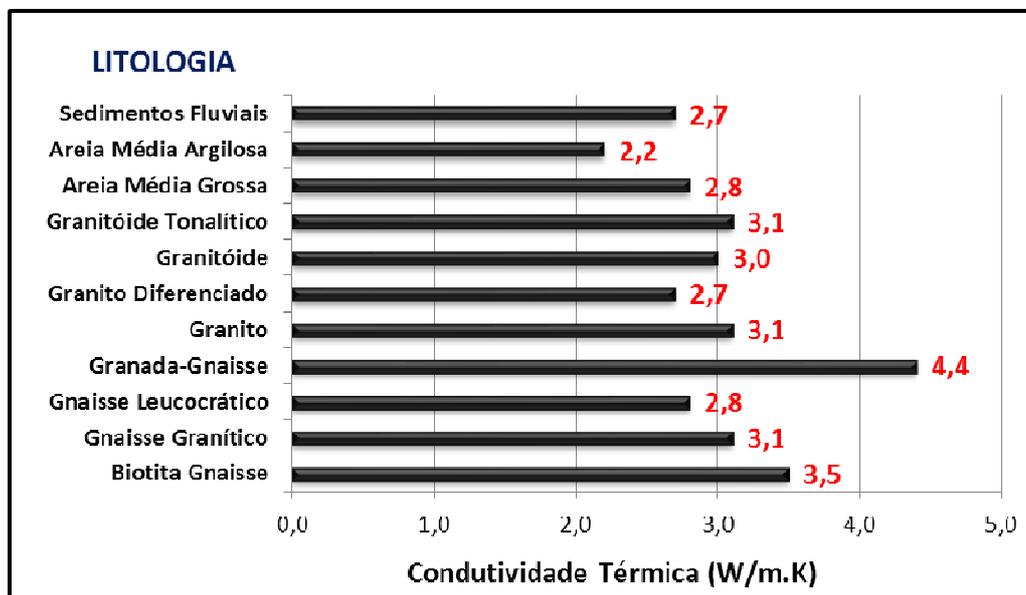


Figura 9 – Valores com a média de condutividade térmica dos principais tipos litológicos do município de Teófilo Otoni.