



# Um estudo para determinação da condutividade térmica de sólidos isolantes em condutivímetro cilíndrico

Hernandes de Souza Brandão, Marcelo de Oliveira Penco, Carlos E. Ferreira Leite; Gustavo Rodrigues; Aparecido J. de Santana, Tamires C. Silva Santos, Maria Fernanda Bastos, Aldo Ramos Dos Santos e Deovaldo Moraes Jr.

*Unisanta – Universidade Santa Cecília – Departamento de Pós-Graduação  
Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica,  
Rua Oswaldo Cruz- Santos-SP, Brasil  
E-mail: rsantos@unisanta.br  
Received january, 2014, revised may, 2014*

**Resumo:** Condutividade térmica é uma propriedade termofísica que indica a quantidade de calor que flui pelo material, o que o classifica em condutor ou isolante, de acordo com o seu valor alto ou baixo. Esse valor é determinado experimentalmente. A necessidade de proteção térmica em diversos equipamentos de engenharia e de processos industriais direciona as pesquisas a buscarem isolantes térmicos mais eficientes e de menor custo; porém, a maioria dos métodos clássicos de medida de condutividade exige compactação e moldagem desses materiais, o que aumenta o custo da avaliação. O presente trabalho mostra uma nova alternativa de método de determinação de condutividade térmica de isolantes: a aplicação de um cilindro oco, com geração interna de calor, sem influência de convecção e radiação térmica, em regime transiente, para materiais em pó. Resultados experimentais de condutividade térmica da cal viva comercial e resíduo industrial de fosfogesso no cilindro, através de dados termofísicos do silicato de cálcio como parâmetro comparativo, demonstram a eficiência deste novo método e confiabilidade nos valores obtidos.

**Palavras chave:** condutivímetro cilíndrico; condutividade térmica de sólidos; isolantes térmicos; condução de calor em regime transiente.

## A study to determination of thermal conductivity of insulating solid materials in cylindrical conductivimeter

**Abstract:** Thermal conductivity is a thermophysical property that indicates the amount of heat flowing through the material, which ranks the conductor or insulator, according its high or low value. This value is determined experimentally. The need for thermal protection in various engineering equipment and industrial processes directs research to seek more efficient thermal insulation and lower cost, but most of the classical methods for measurement of conductivity requires compression and molding of these materials, which increases the cost evaluation. This paper presents a new alternative method of determining thermal conductivity of insulators: the application of a hollow cylinder with internal generation of heat, without influence of convection and thermal radiation in unsteady state for powdered materials. Experimental results of thermal conductivity of quicklime and commercial industrial waste phosphogypsum into the cylinder through the thermophysical data of calcium silicate as a comparative parameter, demonstrating the efficiency and reliability of this new method by the values obtained.

**Keywords:** cylindrical conductivimeter, thermal conductivity of solids, thermal insulation, heat conduction in unsteady state.

## 1. Introdução

Condutividade térmica, segundo Kreith e Bohn (2003), é uma propriedade física característica de cada material sólido, líquido ou gasoso que indica a quantidade de calor que fluirá por ele, por unidade de tempo através de uma unidade de área quando o gradiente de temperatura for unitário.

Moraes Jr. e De Moraes (2012) mencionam que materiais que apresentam alta condutividade térmica, como os metais, são chamados condutores de calor, enquanto que os materiais de baixa condutividade térmica, como o ar e o plástico, são considerados isolantes. A maioria dos dados de condutividade térmica encontrados em livros e manuais se refere a materiais homogêneos e isotrópicos.

A condutibilidade térmica é explicada pelo movimento de elétrons (em metais) e pela vibração da rede cristalina das moléculas (nos não metais); varia, portanto, com a temperatura e com a composição do material. Para cálculos e projetos de engenharia, a condutividade térmica é determinada experimentalmente.

Métodos clássicos de determinação experimental de condutividade térmica indicados pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) em trabalhos industriais, também são indicados para trabalhos de pesquisa, como: (1) o Método da Placa Quente Compensada ou GHP (Guarded Hot Plate); (2) Método do Flash de Laser (LFA, Laser Flash Analysis); (3) Método do Medidor de Fluxo de Calor ou HFM (Heat Flow Meter). Também se destaca o Método do Fio Quente ou TCT (Testador de Condutibilidade Térmica).

O presente trabalho visa a determinação da condutividade térmica de isolantes sólidos (silicato de cálcio como material padrão, óxido de cálcio comercial ou cal viva e fosfogesso), na forma de particulados, por condutímetro cilíndrico, como método experimental.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Fundamentos Teóricos

A determinação da condutividade térmica é baseada na Equação de Fourier-Biot, resultado de um balanço de energia num sistema, com geração de energia interna, em regime transiente, sem considerar a influência da convecção e radiação térmica, conforme escrevem Bird *et al.* (2009), expressa pela equação (1), usando o operador de

Laplace, em que a temperatura é uma função de (x, y, z) e do tempo, T(x,y,z,t):

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{e}_{ger}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\delta T}{\delta t} \quad (1)$$

em que:

T é a temperatura, em °C; k é a condutividade térmica, em W/m.°C;  $\dot{e}_{ger}$  é taxa de energia interna (calor) gerada por unidade de volume, em W/m<sup>3</sup>;  $\alpha$  é a difusividade térmica do material, em m<sup>2</sup>/s.

Considerando-se: o sistema um cilindro com:

$\nabla^2 T = 0$  para T(r),  $\alpha = k / \rho \hat{c}_p$  em que  $\rho$  e  $\hat{c}_p$  são, respectivamente, massa específica do material em kg/m<sup>3</sup> e capacidade calorífica a pressão constante do material, em J/kg.°C,

Para uma condução de calor de sólido num valor de raio fixo e em regime transiente, a equação (1), torna-se a equação (2):

$$\dot{e}_{ger} - \rho \hat{c}_p \frac{\delta T}{\delta t} \quad (2)$$

Integrando-se a equação (3) para t = 0, Tf = T0 ; para tf = t, Tf = T, e admitindo-se constante a capacidade calorífica  $\hat{c}_p$  em relação à temperatura, tem-se a equação (3) afim:

$$T = T_0 + \frac{\rho \hat{c}_p}{\dot{e}_{ger}} t \quad (3)$$

Segundo Çengel (2009), o processo de transferência de calor continua até que as condições de operação permanentes sejam alcançadas e a taxa de geração de calor se iguale à taxa de transferência de calor para os arredores. Assim, a variação máxima entre a temperatura da parte anelar do cilindro (isolante) e o centro do mesmo (onde ocorre a geração por resistência elétrica)  $\Delta T_{máx}$  é calculada conforme a equação (4):

$$\Delta T_{máx} = \frac{\dot{e}_{ger} r_{anel}^2}{4k} \quad (4)$$

em que:  $r_{anel}$  é a espessura da camada anelar de isolante usado no cilindro, isto é,

$$r_{anel} = r_2 - r_1, \text{ que neste caso é } r_{anel} = 0,0460 - 0,0197 = 0,0263\text{m.}$$

Isolando-se  $\dot{q}_{\text{ser}}$  da equação (4) e substituindo-a na equação (3), resulta a equação (5), em que se fundamenta este método:

$$T = T_0 + \frac{\rho \dot{q}_p r_{\text{anel}}^2}{4k\Delta T_{\text{máx}}} t \quad (5)$$

## 2.2 Materiais

Os isolantes empregados, em pó, de 200 mesh de granulometria, previamente secos, foram:

- silicato de cálcio,
- cal viva e
- fosfogesso. (resíduo industrial constituído basicamente sulfato de cálcio diidratado contaminado com fosfato de cálcio).

A figura 1 mostra o aparelho para medida de condutividade térmica: condutivímetro cilíndrico.

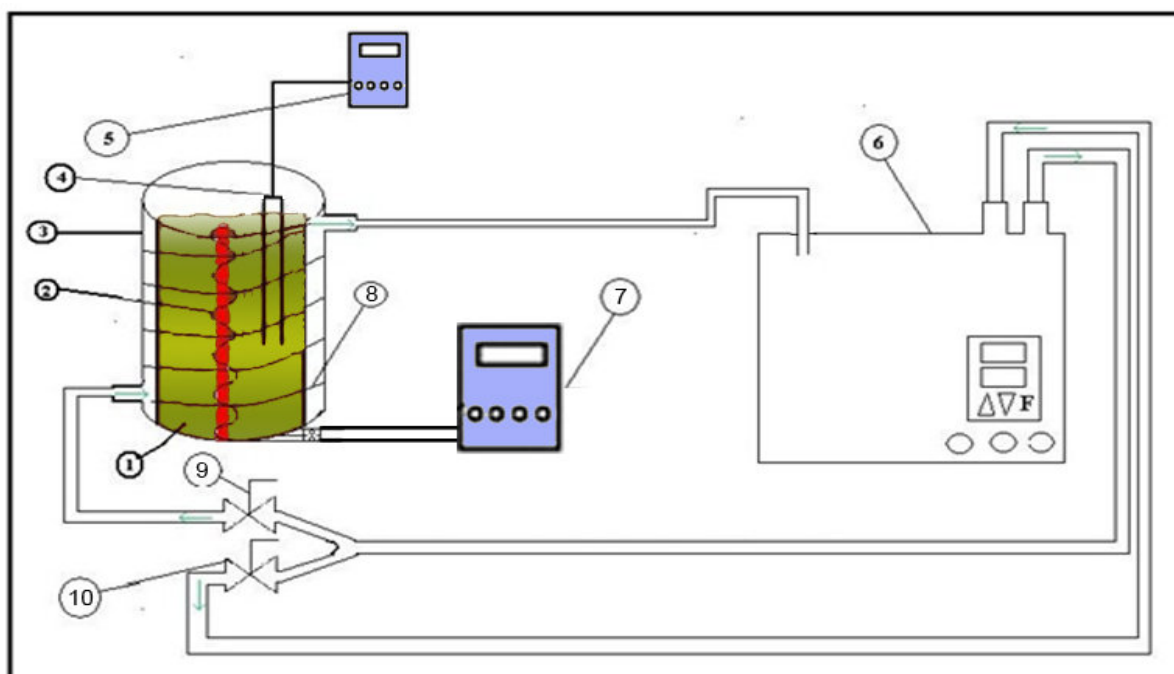
## 2.3 Métodos

Montou-se a aparelhagem segundo a figura 1. Ligou-se, primeiramente, o banho termostático em 22°C. Encheu-se o cilindro com o material isolante em pó (silicato de cálcio, previamente seco em estufa) sem compactação do sólido.

Conectou-se o termopar, ligou-se o indicador de temperatura, a fonte contínua de corrente que alimenta a resistência elétrica.

Fizeram-se leituras, de 5 em 5 minutos, das temperaturas T1 e T2, da voltagem e da corrente elétrica.

Repetiu-se o procedimento acima para a cal e para o fosfogesso.



- 1) Substâncias estudadas individualmente (Fosfogesso, Cal, ou Silicato de cálcio);
- 2) Resistência elétrica;
- 3) Módulo cilíndrico de Acrílico com tampa, de raios internos  $r_1$  e  $r_2$ ;
- 4) Termopares Tipo J;
- 5) Indicador de temperaturas digital;
- 6) Banho termostático;
- 7) Fonte de alimentação DC com indicador de tensão e corrente marca Minipa POWER SUPPLY MPL-1303;
- 8) Circulação de fluxo de água Helicoidal ;
- 9) Válvula de fluxo;
- 10) Válvula de reciclo.

Figura 1. condutivímetro cilíndrico e fluxograma.

### 3. Resultados

Usando a resistência elétrica cilíndrica de cobre como fonte de calor a 0,30 A e 30,2 V, monitorado por um multímetro, cronômetro e termopares, elaborou-se uma tabela com os resultados experimentais, em que a temperatura T(°C) é a média aritmética das temperaturas T1 e T2. Pelo EXCEL plotou-se T(t) para cada material segundo a figura 2.

Bloch (2004) revela que o programa computacional EXCEL traça linhas de tendência com os dados experimentais e cria uma equação que os justifica linear, polinomial, logarítmica ou exponencialmente, conforme figura 2, T(t), e R<sup>2</sup> indica a fração dos pontos experimentais que se encontram alinhados à curva

O valor das condutividades térmicas encontrado pelo coeficiente angular da equação (5) também é obtido e registrado na tabela 1.

Calibrando o condutímetro cilíndrico com o silicato de cálcio, encontra-se um fator de correção (f) ao se comparar o valor encontrado com o seu valor teórico de condutividade térmica:

$$k = 0,05585 \text{ W/m.}^\circ\text{C.}$$

Os valores corrigidos de k da tabela 1 constam na última coluna.

$$k_{\text{exptal.}} \times f = k_{\text{teórico}} \quad (6)$$

$$496,0 \times f = 0,05585 \Rightarrow f = 1,126 \cdot 10^{-4}$$

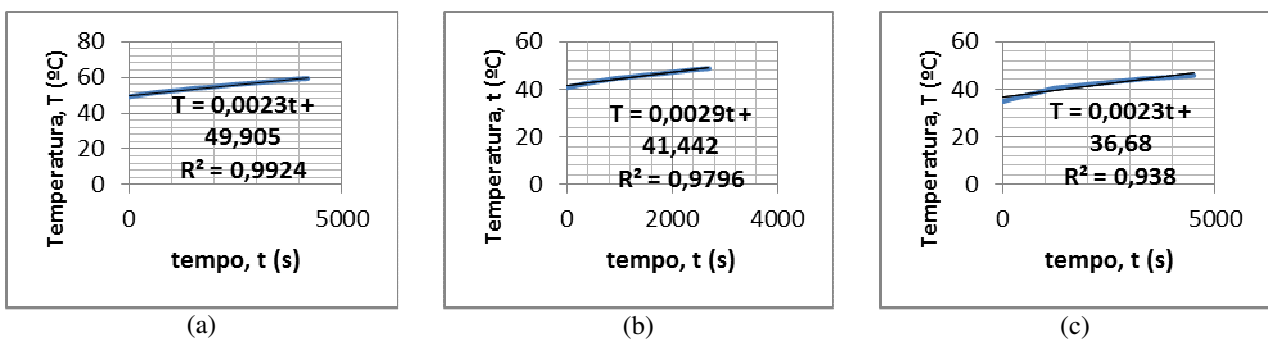


Figura 2. Gráficos de temperatura em função do tempo para os dados experimentais do: (a) Silicato de Cálcio; (b) da Cal viva; e, (c) do fosfogesso.

| Amostras           | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\hat{c}_p$<br>(J/kg.°C) | $\Delta T_{\text{máx}}$<br>(°C) | Coef.<br>angular | k<br>(W/m.°C) | k corrigido<br>(W/m.°C) |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------|---------------|-------------------------|
| Silicato de cálcio | 190                            | 2000                     | 57,6                            | 0,0023           | 496,0         | 0,05585                 |
| Cal viva pura      | 3340                           | 804                      | 39,5                            | 0,0029           | 4053,8        | 0,45646                 |
| Fosfogesso         | 2320                           | 1090                     | 35,5                            | 0,0023           | 5355,6        | 0,60304                 |

Tabela 1. Constantes termofísicas

Os valores obtidos foram comparados a valores de Çengel (2009) para o fosfogesso e da Quallical Indústria e Comércio de Cal Ltda, conforme a tabela 3 abaixo:

| Amostras                           | k (W/m°C) encontrado | Faixa de k (W/m°C) para composições diferentes do mesmo material |
|------------------------------------|----------------------|--|
| Cal viva comercial marca Quallical | 0,45646              | 0,628 a 0,837 (cal viva marca Quallical)                         |
| Fosfogesso (resíduo industrial)    | 0,60304              | 0,430 a 0,744 (gesso úmido e seco)                               |

Tabela 2. Comparação do valores experimentais com valores da literatura e de fabricante.

#### 4. Discussão

Como se pode observar nos gráficos da figura 3, os resultados experimentais se ajustaram fielmente ao modelo proposto, conforme a equação (5).

Diante da figura 1, em que há um banho termostático envolvendo o cilindro, seria conveniente verificar se o calor gerado no centro do cilindro está sendo dissipado pelo isolante térmico, para avaliar a espessura da camada de isolante em teste. Moraes Jr. e De Moraes (2012) enfatizam a importância em se determinar o raio crítico (menor raio do isolante que proporciona a maior perda de calor) para um sistema cilíndrico que necessita de proteção térmica. Porém, haveria a necessidade de mais informações de transferência de calor do termostato, o que o tempo de trabalho experimental não permitiu.

A tabela 1 mostra valores coerentes de condutividade térmica, porém, multiplicados por um fator de 104. Entretanto, como há uma proporcionalidade entre os valores obtidos, e parâmetros conhecidos de um isolante clássico (os do silicato de cálcio), segundo Harris (2001), podem-se usar materiais de padrões de referência para se corrigir erros nos procedimentos de ensaio. O fator de correção empregado é explicado: pela diferente fase de agregação (em pó) em que foram empregados os materiais no cilindro; aos fatores físicos do próprio equipamento; e pela variação da composição dos materiais usados.

A tabela 2 mostra que os valores encontrados para a cal e para o fosfogesso são compatíveis com a faixa de valores teóricos. O valor de condutividade da cal fora da faixa de valores teóricos já era esperado pelo fato de o material ser para uso não nobre (comercial) e facilmente contaminável pela umidade e gás carbônico do ar durante a experimentação.

#### 5. Conclusão

As medidas da condutividade térmica do silicato de cálcio, da cal viva comercial e do fosfogesso realizadas no cilindro mostraram-se confiáveis e reprodutíveis.

A vantagem do método é que o isolante não precisa ser compactado e moldado na forma em que será empregado, como os demais métodos térmicos exigem, mas em pó, peneirado em granulometria pré-estabelecida e previamente seca em estufa. Sugestões para futuros ensaios de medidas de condutividade térmica neste cilindro compreendem: a determinação do raio crítico do condutímetro cilíndrico, a inserção de um terceiro termopar no raio central da camada de isolante e valores experimentais de massa específica e capacidade calorífica a pressão constante dos materiais empregados.

#### 6. Referências Bibliográficas

BIRD, R. B; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2ª edição. Tradução de Afonso Silva Telles (UFRJ), Carlos Russo (UERJ), Ricardo Pires Peçanha (UFRJ) e Verônica Calado (UFRJ). Rio de Janeiro: LTC, 2012.

BLOCH, S.C. **EXCEL para Engenheiros e Cientistas**. 2ª edição. Tradução de Bernardo Severo da Silva Filho (FEE-UERJ). Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004.

**MELO L. R. S., D. MORAES Jr, SANTOS A. R., Oil-water bifasic flow in a bench scale experimental unit**, UNISANTA – Science and Technology, ISSN: 2317-1316, Vol 1, No 2,p.p.1-5, 2012.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 3ª edição. Tradução de Luiz Felipe Mendes de Moura e Revisão Técnica de Kamal A. R. Ismail (FEM-UNICAMP). São Paulo: McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda., 2009.

HARRIS, D. C. **Análise Química Quantitativa**. 5ª edição. Tradução: Carlos Alberto da Silva Riehl (UFRJ) e Alcides Wagner Serpa Guarino (UNIRIO). Rio de Janeiro: LTC. 2001.

SILVA, H. V., MORAES Jr, D. , A. R SANTOS., **Research of the phosphogypsum as thermal-isolating material industrial uses**, UNISANTA – Science and Technology, ISSN: 2317-1316, Vol 1, No 1, p.p. 7-13, 2012.

KREITH, F.; BOHN, M. S. **Princípios de Transferência de Calor**. Tradução de Maria Teresa Castilho Mansor (FEA-UNICAMP) e Revisão Técnica de Flávio Maron Vichi (IQ-USP). São Paulo: Editora Thomson, 2003.

LIDE, D. R. **Handbook of Chemistry and Physics**. 78th ed. New York: CRC Press, 1997.

MORAES Jr., D.; DE MORAES, M. S. **Laboratório de Operações Unitárias II**. Edição dos Autores. Santos, 2012.

[www.inmetro.gov.br](http://www.inmetro.gov.br) , acesso em 13/06/2013.

[www.qualical.com.br](http://www.qualical.com.br) , acesso em 14/06/2013.