



XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP
Artigo CREEM2012

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE SILÍCIO NA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE NANOFLUIDO BASEADO EM ÁGUA

Israel Graciano Saba, Anderson A. Ubices de Moraes, Francisco Júlio do Nascimento, Gherhardt Ribatski

Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, Universidade de São Paulo, USP, Curso de Engenharia Mecatrônica
CEP 13566-590 – São Carlos – São Paulo

E-mail para correspondência: israel.saba@usp.br

Introdução

A necessidade de miniaturização e a crescente demanda por resfriamento de equipamentos eletrônicos e sistemas micro-eletromecânicos (MEMs) proporcionou, na última década, intensa pesquisa visando o desenvolvimento de dissipadores de calor de elevado desempenho e reduzido tamanho. Neste contexto, a condutividade do fluido de trabalho é um parâmetro relevante, cuja elevação pode proporcionar tais resultados. Metais e óxidos metálicos possuem condutividade superior aos fluidos utilizados como meio de transporte de calor, entretanto por serem sólidos não são utilizados em tais aplicações. O desenvolvimento de técnicas para fabricação de partículas com dimensões da ordem de 10 a 300 nm possibilitou a preparação de soluções de nanopartículas de materiais de alta condutividade térmica em um fluido base. Tais soluções receberam a denominação de nanofluidos e não apresentam os inconvenientes da rápida deposição e erosões nas superfícies dos trocadores, conforme verificado anteriormente com a utilização de partículas micrométricas. A Tab. 1 ilustra incrementos da condutividade térmica através da adição de nanopartículas a um fluido base encontrados na literatura. Nela constatam-se incrementos entre 3 e 24%.

Tabela 1 – Incremento da condutividade térmica de nanofluidos em relação ao fluido base segundo resultados da literatura.

Autor (Ano)	Nanofluido	Concentração	dimensão (nm)	Temperatura(°C)	Incremento na Condutividade
Lee et al. (2012)	ZnO – Etileno Glicol	0,5 – 5,5 % vol	10 – 60	20 – 90	Incremento de 3 a 18%
Wei et al. (2009)	Cu ₂ O – Água	0,01 - 0,05 mol/L	200	10 – 40	Incremento de até 24%
Teng et al. (2010)	Al ₂ O ₃ – Água	0,5 – 2 % massa	20-100	10 – 50	Incremento de 3% a 10%

Neste estudo resultados experimentais da condutividade térmica de nanofluidos são apresentados e comparados ao modelo de Maxwell (1873) apud Choi (1995), proposto para a avaliação da condutividade térmica de soluções de particulados, este modelo é dado pela seguinte equação:

$$\frac{k}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\phi_v(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \phi_v(k_p - k_f)} \quad (I)$$

onde k é a condutividade térmica do nanofluido, k_f é a condutividade do fluido base, k_p é a condutividade da nanopartícula e ϕ_v é a concentração volumétrica de nanopartícula em relação ao fluido base, dada pela seguinte equação:

$$\phi_v = \frac{\phi_m \rho_f}{\rho_p + \phi_m \rho_f - \phi_m \rho_p} \quad (\text{II})$$

na equação acima, ϕ_m é a concentração mássica, ρ_f é a densidade do fluido base e ρ_p é a densidade da nanopartícula.

Objetivos

O presente estudo tem como objetivo avaliar para diferentes concentrações volumétricas a condutividade térmica de nanofluidos compostos por Dióxido de Silício (SiO_2) com dimensão característica de 80 nm em água mili-q, utilizando o método da sonda linear, também conhecido como método do fio quente transiente. Estes resultados são comparados a valores estimados através do modelo de Maxwell (1873) apud Choi (1995).

Materiais e Métodos

Preparação do nanofluido

O nanofluido foi fabricado utilizando o método de *dois-passos* em que o nanofluido é o resultado da adição de nanopartículas a um fluido base, enquanto que no método de *um-passo* o nanofluido é resultado de um processo químico. Nanopartículas de SiO_2 disponíveis comercialmente foram adquiridas da *Nanostructured & Amorphous Materials, Inc.*. Como fluido base foi utilizada água mili-q. A Tab. 2 apresenta as propriedades das nanopartículas fornecidas pelo fabricante e da água segundo Incropera *et al.* (2008).

Tabela 2 – Propriedades de transporte da Água e do Dióxido de Silício.

Material	Densidade (Kg/m^3)	Condutividade térmica(W/mK)
Água (~25 °C)	998,003	0,616
SiO_2	2.400	1,38

Para um volume de amostra de 400 ml, a partir da Eq. (II) é calculada a fração mássica e a partir desse valor a massa de nanopartícula para o volume de amostra estudado. Esta massa é pesada em um frasco com uma balança de precisão (erro = 0,001g) e então completa-se o volume da amostra com água milli-q. A mistura é submetida à agitação ultrassônica por uma hora. O efeito de agitação se dá através de um agitador ultrassônico de 20 kHz de frequência e 500 W de potência. Durante o processo de agitação o recipiente, no qual se encontra a amostra, é envolto por um banho de água e gelo de forma que o calor resultante da agitação seja dissipado no processo de mudança de fase evitando o superaquecimento do agitador e da amostra.

Método da Sonda linear

Dentre os métodos de determinação da condutividade térmica, o da sonda linear ou fio quente transiente é o mais utilizado nos estudos acerca de nanofluidos. O princípio de funcionamento da sonda linear consiste na avaliação da propagação do campo transiente de temperaturas gerado por uma fonte de calor, em um meio infinito. A fonte de calor consiste em uma resistência delgada, de diâmetro nulo, considerada sem massa e portanto sem capacidade térmica, com comprimento infinito. O meio infinito consiste no fluido em um recipiente cilíndrico ao redor da sonda, com dimensões superiores a ela. A partir destas hipóteses pode-se efetuar a formulação matemática em que o método do presente estudo é baseado (Boer, 1980). Considerando a equação da difusão de calor unidimensional em um meio cilíndrico tem-se que:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III})$$

onde T é a temperatura, r o raio a partir da sonda, α a difusividade térmica e t o tempo de amostragem. Integrando duplamente, em r , a Eq. (III) tem-se que:

$$T(r) = -\frac{Q}{4k} r^2 + C_1 \ln(r) + C_2 \quad (\text{IV})$$

na equação acima k é a condutividade térmica, $\alpha = k/\rho c_p$, c_p é o calor específico, Q é a potência aplicada à sonda linear e C_1 e C_2 as constantes de integração. Aplicando as condições de contorno iniciais:

$$T = T_0 \quad \text{para } r \geq 0, t = 0 \quad (\text{V})$$

$$T = T_0 \quad \text{para } r \rightarrow \infty, t > 0 \quad (\text{VI})$$

$$2\pi k r \frac{\partial T}{\partial r} = Q' \quad \text{para } r \rightarrow 0, t > 0 \quad (\text{VII})$$

onde que Q' é a potência aplicada à sonda linear por unidade de comprimento. Portanto tem-se que:

$$T - T_0 = \frac{Q'}{4\pi k} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (\text{VIII})$$

onde u é:

$$u = \frac{r^2}{4\alpha t} \quad (\text{IX})$$

Substituindo u por ξ , na integral exponencial (Özisik, 1990), tem-se que:

$$E_1(\xi) = \int_\xi^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = -y - \ln \xi - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \xi^n}{n \cdot n!} \quad (\text{X})$$

onde y é a constante de Euler. Considerando a hipótese de períodos longos, ou seja:

$$t \gg \frac{r^2}{4\alpha t} \quad (\text{XI})$$

e desprezando no somatório os termos de ordem igual ou superior a um, tem-se que:

$$\Delta T(a, t) = T(a, t) - T_0 = \frac{Q'}{4\pi k} \left[\ln(t) - y - \ln \left(\frac{r^2}{4\alpha} \right) \right] \quad (\text{XII})$$

na equação acima, ΔT representa a diferença de temperatura obtida entre os sensores de temperatura localizados no centro da região de aquecimento e fora dela na sonda linear, conforme se observa na Fig. 2a. No presente estudo para cada medição de condutividade térmica, uma curva como a da Fig. 1 é obtida. Neste gráfico pode-se

observar um período de elevado gradiente para a diferença de temperatura, que corresponde ao momento em que é iniciada a aplicação de potência na sonda linear. Posteriormente, este gradiente se reduz e uma região com comportamento aproximadamente linear pode ser notada, delimitada pelos pontos 1 e 2. Esta região considerada linear é segregada do restante dos dados obtidos e então, através do método dos mínimos quadrados, é aproximada por uma reta com coeficiente angular, S .

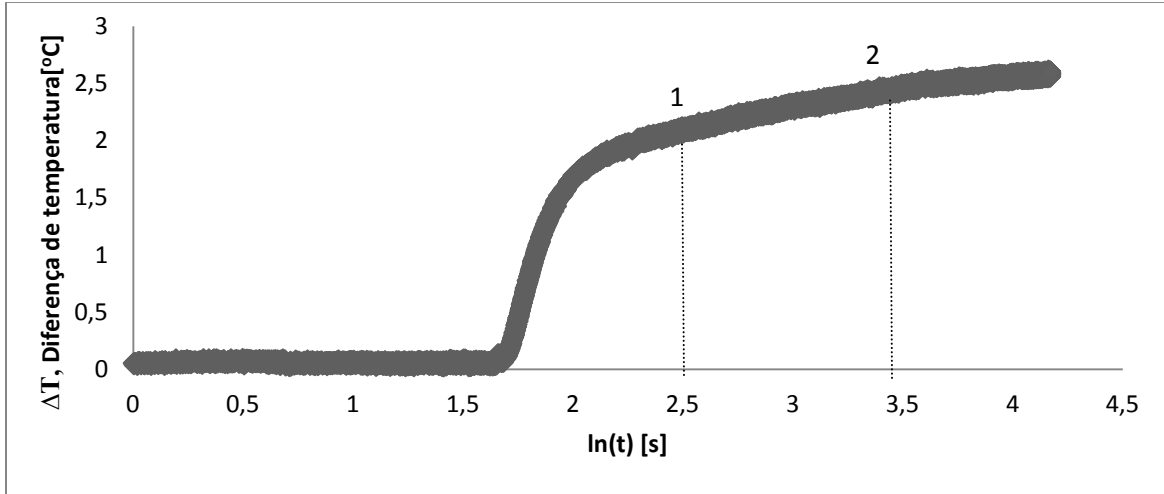


Figura 1 – Curva levantada com a sonda linear.

Finalmente, uma constante de calibração, C , é determinada a partir de medições realizadas com fluidos de condutividade térmica conhecida, segundo a norma ASTM D5334-08 (2008). No presente estudo o aparato experimental foi calibrado com água, etileno glicol e glicerina resultando em uma constante de calibração igual a 1,029.

A condutividade térmica do nanofluido é então determinada pela seguinte equação:

$$k = \frac{CQ'}{4\pi S} \quad (\text{XIII})$$

A sonda linear utilizada neste estudo é a TP08 da Hukseflux, e encontra-se ilustrada na Fig. 2a. Ela apresenta dois sensores de temperatura (TP1000 no topo e termopar tipo K no centro da seção de aquecimento) e uma seção de aquecimento de 70 mm considerado uniforme. A potência aplicada à sonda linear por comprimento, Q' , é calculada por:

$$Q' = \frac{U \cdot I}{l_{sonda}} \quad (\text{XIV})$$

onde U é a diferença de potencial sobre a resistência da sonda linear, I é a corrente elétrica e l_{sonda} é o comprimento da seção de aquecimento.

O nanofluido é colocado em um recipiente distinto do frasco em que se deu sua preparação. Este recipiente possui dimensões conforme recomendação do fabricante da sonda linear: mínimo de 20 mm de raio ao redor da sonda linear e mínimo de 30 mm entre a extremidade inferior da sonda linear e o fundo do recipiente, para evitar efeitos de borda. A sonda linear é inserida verticalmente no fluido com isolante térmico no topo do recipiente para que a amostra não seja submetida à troca de calor com o ambiente e impurezas do ar, conforme ilustrado na Fig. 2b. Para cada concentração foram realizadas três medições, em sala com temperatura controlada a 25 °C, com intervalo de tempo de 30 minutos para que a temperatura da amostra se mantenha uniforme. Todos os

parâmetros, assim como as temperaturas, são adquiridas e registradas através do sistema de aquisição a uma taxa de 100 Hz.

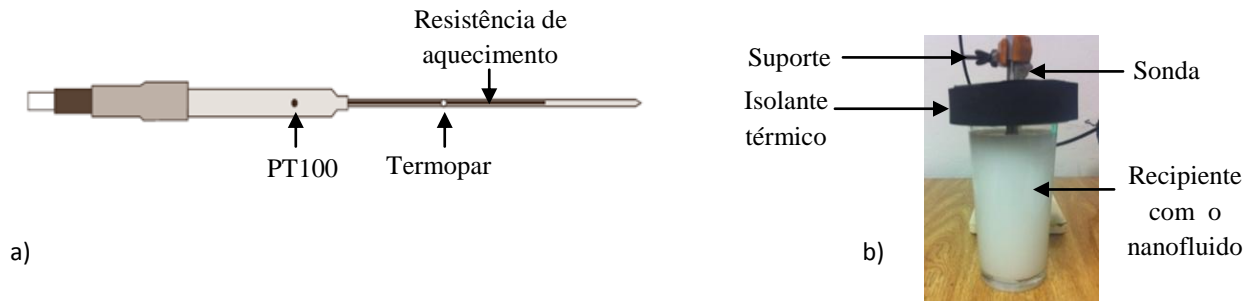


Figura 2 – Equipamento de medição de condutividade: a) esquemático da sonda linear TP08 da Hukseflux e b) experimento montado com nanofluido.

Resultados

A Fig. 3 ilustra a variação da razão entre as condutividades térmicas do nanofluido e de seu fluido base com o incremento da concentração volumétrica segundo os dados experimentais levantados no presente estudo e o modelo de Maxwell.

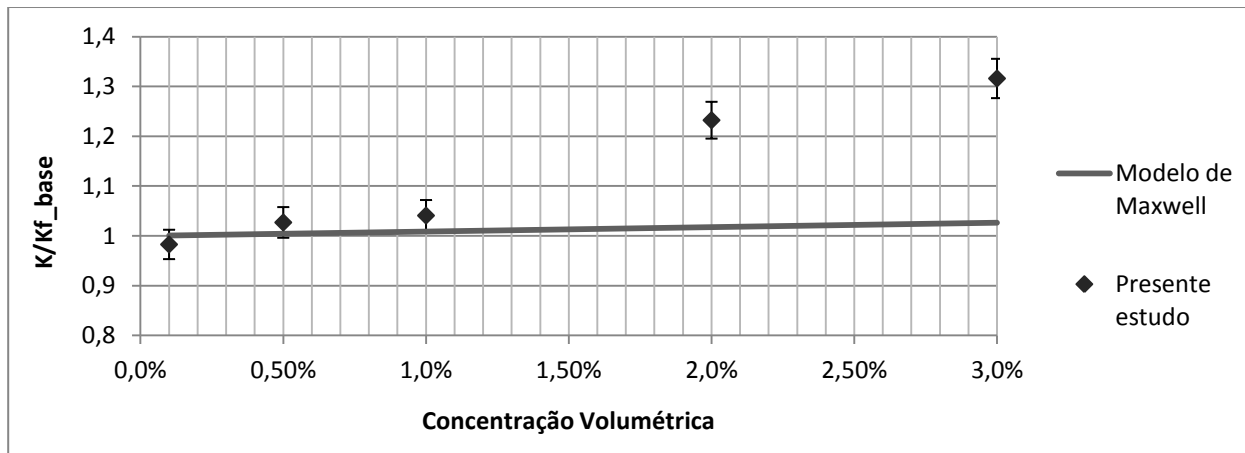


Figura 3 – Variação da condutividade térmica relativa com a concentração volumétrica.

Os resultados ilustrados na Fig. 3 foram levantados para temperatura ambiente de 25 °C e temperatura do nanofluido entre 25 e 30 °C, faixa na qual a variação da condutividade térmica da água é da ordem de milésimos de W/mK. O valor de condutividade térmica do fluido base nesta faixa de temperatura é igual a 0,6165 W/mK, (Incropera et al., 2008). Obtém-se condutividade térmica do nanofluido de até 0,810 W/mK , que representa uma condutividade térmica relativa superior a 1,3.

Ao final dos testes para cada concentração volumétrica de nanopartículas observou-se a deposição de nanopartículas no fundo do recipiente. A Tab. 2 ilustra a variação da condutividade térmica com o tempo decorrido após a agitação ultrassônica, para concentração volumétrica de 3% de nanopartícula. Através da análise destes dados verifica-se que apesar da deposição, a variação da condutividade térmica obtida não excedeu o valor do erro do método de medição, estimado em 0,04 W/mK.

Tabela 3 – Comparativo da condutividade com o tempo após o preparo.

Tempo após agitação	Condutividade (W/mK)
10 minutos	0,798
40 minutos	0,830
70 minutos	0,803

Conclusões

Apesar da reduzida condutividade térmica do dióxido de silício em relação ao óxido de alumínio, de cobre, ou de zinco, o nanofluido obtido pela adição de nanopartículas de SiO₂ em água mili-q apresentou um incremento na condutividade térmica com relação à água mili-q de 31%. Este incremento é superior ao observado nos estudos da literatura apresentados na Tab. 1.

Observou-se também o incremento da condutividade térmica com o incremento da concentração volumétrica de nanopartículas e este incremento é acentuado a partir da concentração volumétrica de 1% de nanopartículas. A partir deste valor de concentração volumétrica, o modelo de Maxwell não prevê satisfatoriamente os dados levantados neste estudo.

A variação da condutividade térmica do nanofluido durante os testes foi inferior ao erro do método de medição, apesar da deposição de nanopartículas no recipiente.

Referências Bibliográficas

- ASTM, D 5334-08 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, In: Annual Book of ASTM Standards.
- Boer, J.; Butter, J.; Grosskopf, B.; Jeschke, P. *Refractories Journal*, Vol.55, pp.22, 1980.
- Choi, S. U. S. “Developments and Applications of non-Newtonian Flows”, *ASME FED*, Vol.66, pp.99–105, 1995.
- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S. “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”. 6ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643p.
- Lee, G.; Kim, C. K.; Lee, M. K.; Kim S.; Kim C. “Thermal conductivity enhancement of ZnO nanofluid using a one-step physical method”, *Thermochimica Acta*, www.elsevier.com/locate/tca, pp.1-4, 2012.
- Özisik, M. N. “Heat Transfer – A Basic Approach”, McGraw-Hill, Inc., New York, USA, 1990.
- Teng, T.; Hung, Y.; Teng, T.; Mo H.; Hsu, H. “The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity”, *Applied Thermal Engineering*, www.elsevier.com/locate/apthermeng, Vol.30, pp.2213-2218, 2010.
- Wei, X.; Zhu, H.; Kong, T.; Wang L. “Synthesis and thermal conductivity of Cu₂O nanofluid”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, www.elsevier.com/locate/ijhmt, Vol.52, pp.4371-4374, 2009.