

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TERMO-HIDRÁULICO DE NANOFLUIDOS MWCNTs/H₂O

Gómez, Abdul Orlando Cárdenas/ LEST-UFU (ing_abdulcardenas@hotmail.com)
Bandarra Filho, Enio Pedone/ LEST-UFU (bandarra@mecanica.ufu.br)

Resumo. Uma bancada experimental foi construída para avaliar os parâmetros relacionados ao processo de transferência de calor por convecção e características do escoamento de nanofluidos. Esta bancada experimental possui um sistema de monitoramento automatizado para melhorar a exatidão dos resultados experimentais obtidos, que junto com as propriedades termofísicas dos nanofluidos estimam o coeficiente de transferência de calor. Foram avaliados experimentalmente nanofluidos de nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNTs) a base de água, com concentrações em volume de $0 < \varphi < 0,24\%$, para vazões mássicas de 20g/s até 90g/s. O calor fornecido pela parede do tubo através da resistência na seção de teste, variou entre 500 W até 900 W. A avaliação do desempenho termo-hidráulico das três amostras de nanofluidos testados foi realizada especificando o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção em função da potência de bombeamento relativa obtida das potências de bombeamento consumidas na seção de teste.

Palavras chave: Convecção, Potência, Experimental, Nanopartícula, Transferência de calor.

1. INTRODUÇÃO

O advento da nanotecnologia e a eventual chance de sintetizar materiais na escala manométrica, possibilitou-se o surgimento de novas iniciativas que buscam a intensificação das propriedades térmicas dos fluidos de trabalho como a relatada por Masuda et al., (1993), onde partículas sólidas ultrafinas de Al₂O₃, SiO₂ e TiO₂ foram dispersas num fluido base, através da aplicação da técnica de repulsão eletrostática, e como resultado obteve um aumento da condutividade térmica na dispersão proporcional à concentração. Estas partículas ultrafinas ou nanopartículas de tamanho reduzido, com uma dimensão compreendida entre 1 e 100 nanômetros (nm) (1nm = 10⁻⁹ m) que possuem propriedades físicas e químicas únicas quando comparadas com as propriedades de partículas grandes (escala micrométrica ou maiores) dos mesmos materiais, ao serem dispersas em fluidos convencionais de arrefecimento como água, óleos ou etileno glicol deu origem a um conceito inovador idealizado por Choi, (1995), denominado de “Nanofluidos”. Segundo Choi, (1995), os nanofluidos oferecem dispersões estáveis por longos períodos de tempo, incrementam pouco a perda de carga e apresentam uma maior condutividade térmica. Segundo Pak e Cho (1998) e Xuan e Li (2003) a transferência de calor por convecção utilizando nanofluidos varia com as propriedades e dimensões das partículas, assim como a fração volumétrica. Devido as possíveis vantagens do uso dos nanofluidos, muitos pesquisadores têm estudado o desempenho da transferência de calor e características do escoamento de vários nanofluidos, com nanopartículas produzidas de diferentes materiais e vários fluidos base, como pode ser observado na tabela 1. Ainda que muitos dos estudos relatados mostrem que houve aumento da transferência de calor por convecção forçada utilizando nanofluidos escoando em regime laminar e turbulento [Pak e Cho (1998), Wen e Ding (2004), Sundar et al (2012)], outras pesquisas mostram inconsistências nos resultados apresentados, ou seja, sob certas condições relatam incremento no coeficiente de transferência de calor e sob outras não apresenta acréscimos ou mesmo apresentam uma diminuição no coeficiente de transferência de calor por convecção quando nanopartículas são adicionados aos fluidos base [Yu et al (2009), Meyer, McKrell, Grote (2013), Haghighi et al (2014)].

Tabela 1. Comparação dos trabalhos realizados que analisaram a transferência de calor por convecção em nanofluidos.

Autor	Faixa de escoamento	Tipo de Nanofluido	Incremento do h (%)
Pak e Cho (1998)	Turbulento	Al ₂ O ₃ em água	+45
Wen e Ding (2004)	Laminar	Al ₂ O ₃ em água	+ 47
Yu et al (2009)	Turbulento	SiC em água	-7 para 3.5vol% mesma velocidade
Gard et al (2009)	Laminar	MWCNTs em água	+32 para 1wt% mesmo número de Reynolds.

Duangthongsuk e Wongwises (2010)	Turbulento	TiO ₂ em água	+26 para 1vol% -14 para 2vol%
Sajadi e Kamesi (2011)	Turbulento	TiO ₂ em água	+22
Sundar et al (2012)	Turbulento	Fe ₃ O ₄ em água	+30.96
Meyer, McKrell, Grote (2013)	Laminar, Transição e Turbulento	MWCNTs em água	+33 para 1vol%, mesmo número de Reynolds. -12.6 para 1vol% mesma velocidade.
Haghighi et al (2014)	Turbulento	TiO ₂ e Al ₂ O ₃ em água	+15%, mesmo número de Reynolds. -10%, mesma potência de bombeamento.

Com todas as pesquisas e análises da transferência de calor por convecção dos nanofluidos anteriormente detalhados e descritos na tabela 1, ainda são necessários mais estudos que validem e verifiquem o desempenho termo-hidráulico destes novos fluidos de arrefecimento. Assim, o trabalho desenvolvido tem como objetivo realizar comparações dos resultados experimentais obtidos, para avaliar o desempenho da transferência de calor por convecção forçada de três dispersões de nanopartículas de nanotubo de carbono de parede múltipla (MWCNTs- Multi-walled Carbon Nanotubes) em água destilada como fluido base. As concentrações em volume utilizadas no experimento foram de 0.12vol% de MWCNTs e razão de aspecto $r=600$, 0.24vol% de MWCNTs e razão de aspecto $r=100$ e 0.24vol% de MWCNTs e razão de aspecto $r=2400$. Todas as propriedades termofísicas foram obtidas através de experimentos e correlações existentes para transferência de calor com nanofluidos.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Preparação do nanofluido

Os nanotubos de carbono, assim como produzidos, apresentavam agregados que estavam fortemente entrelaçados e foi necessária aplicação de energia externa para romper estes aglomerados. No presente estudo, a dispersão das nanopartículas na água destilada foi realizada com o auxílio do homogeneizador de alta pressão, durante 3 horas para cada amostra. As nanopartículas utilizadas para a preparação dos nanofluidos no processo de homogeneização apresentam as seguintes propriedades termofísicas mostradas na Tab. (2).

Tabela 2. Características das amostras de nanofluidos utilizadas.

Tipo de nanotubo	Fluido base	L[μm]	d [nm]	$r=L/d$	wt[% massa]	θ [% volume]
NT ₀₁ MWCNTs (Disp.)/7.5g	H ₂ O/2992.5 g	5 – 30	20 – 40	≈ 600	0.25	0.12
NT ₀₂ MWCNTs (Disp.)/15g	H ₂ O/2985 g	5 – 10	50 – 100	≈ 100	0.50	0.24
NT ₀₃ MWCNTs (Disp.)/15g	H ₂ O/2985 g	5 – 50	8 – 15	≈ 2400	0.50	0.24

Todos os nanotubos de carbono de paredes multiplas (MWNTs- Multi-walled Carbon Nanotubes), embora, de diferentes características, foram fornecidas por Nanostructured & Amorphous Materials Inc. As características geométricas dos nanotubos, isto é, o comprimento, L, e o diâmetro, d, são aquelas informadas pelo fornecedor. Para o calor específico e a massa específica dos nanotubos de carbono a granel os valores adotados foram de C_p igual a 710 [J/kg °C] e $\rho_{NTCs} = 2.1$ [g/cm³] respectivamente.

2.2. Caracterização das propriedades termofísicas

Uma vez que a concentração em volume de nanopartículas na dispersão, θ , é determinada, a massa específica da dispersão e o calor específico podem ser calculados a partir das seguintes equações,

$$\rho_{nf} = (1 - \theta) \rho_{fb} + \rho_{np} \quad (1)$$

$$C_{p,nf} = \frac{(1 - \theta) \rho_{fb} C_{p,fb} + \theta \rho_{np} C_{p,np}}{(1 - \theta) \rho_{fb} + \theta \rho_{np}} \quad (2)$$

A condutividade térmica das amostras de nanofluidos de MWCNTs/H₂O foi medida pelo método do fio quente transiente (THW). Foi utilizada a sonda Hukseflux TP-08. Ela é indicada para a avaliação de materiais com condutividade térmica entre 0,1 e 6 [W/mK]. A incerteza de medição do equipamento é $\pm 10\%$ a condutividade da água

a temperatura ambiente. As medições da viscosidade das amostras de nanofluidos de MWCNTs/H₂O foram realizadas em um reômetro Brookfield LDDV-IIIU, tipo cone-placa com uma incerteza de medição $\pm 1\%$ do fundo de escala do equipamento, que é de 3 [cP], mais 1% do valor medido). Os resultados experimentais para a condutividade térmica e a viscosidade das amostras de nanofluido são apresentados na figura 1.

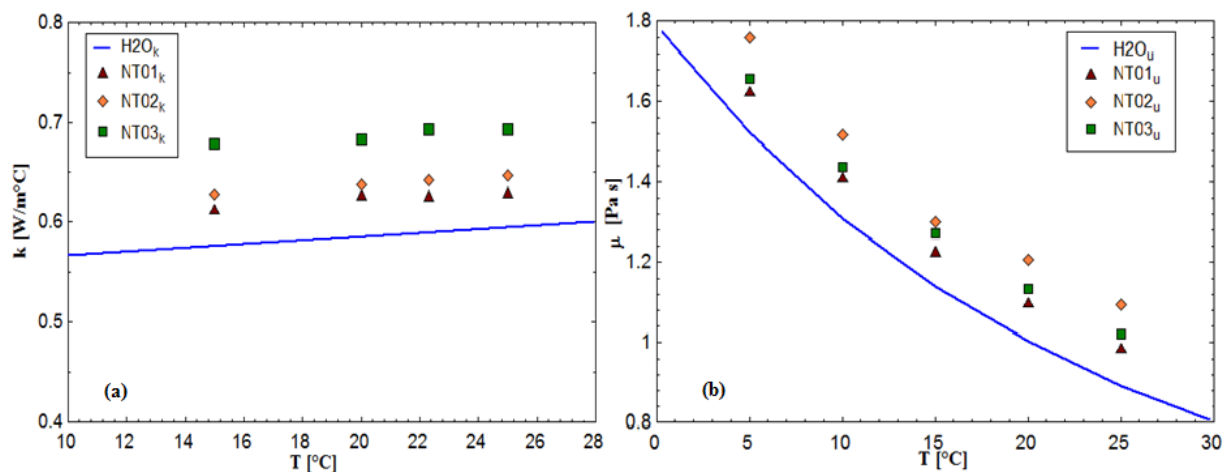


Figura 1. Resultados experimentais para a condutividade térmica e viscosidade das amostras de nanofluidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a operação da bancada, foram medidas as temperaturas na parede no tubo em oito pontos da seção de testes, assim como a temperatura e a pressão na entrada e saída do tubo para cada amostra de nanofluido avaliada. A potência elétrica fornecida para o aquecimento da resistência e a vazão mássica do nanofluido também foram monitoradas. O coeficiente de transferência de calor local foi determinado utilizando a Lei de Resfriamento de Newton Eq. (1), segundo a qual,

$$h_{nf(x)} = \frac{Q/A}{T_w(x) - T_m(x)} \quad (3)$$

Finalmente o valor médio do coeficiente da transferência de calor por convecção do nanofluido, foi calculado pela equação Eq. (2).

$$h_{médio} = \frac{h(x1) + \dots + h(n)}{n} \quad (4)$$

Para Williams, Buongiorno e Hu (2008) as vantagens dos nanofluidos como fluidos de arrefecimento melhorados dependem em grande parte do equilíbrio entre o aumento da condutividade térmica (que determina o aumento de transferência de calor desejado) e aumento da viscosidade (que determina um aumento indesejável na potência de bombeamento). Consequentemente a avaliação do desempenho termo-hidráulico das três amostras de nanofluidos testados foi realizada especificando o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção em função da potência de bombeamento relativa obtida das potências de bombeamento consumidas na seção de teste calculadas através da Eq. (5), tanto para todas as três amostras testadas (NT01, NT02 e NT03) como para o fluido base (H₂O) sob as mesmas condições nominais, ou seja, mesma vazão mássica, igual temperatura de entrada e igual calor imposto na seção de teste. Os resultados obtidos para as três amostras (NT01, NT02 e NT03) são apresentados nas figuras 2(a), 2(b) e 2 (c).

$$P_B = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho} \quad (5)$$

Com o apresentado nas figuras 2(a), 2(b) e 2 (c) pode-se dizer que tanto as amostras de nanofluidos de MWCNTs/H₂O NT01 com razão de aspecto $r=600$ e concentração em volume de 0.12vol% e NT02 com razão de aspecto $r=100$ e concentração em volume de 0.24vol%, são as amostras que apresentaram o menor benefício como fluido de transferência de calor, já que o desempenho termo-hidráulico para a maioria dos pontos testados sob a condições nominais se encontram no quarto quadrante. No entanto, a amostra NT03 com razão de aspecto $r=2400$ e concentração em volume de 0.24vol% apresentou um desempenho termo hidráulico esperado porque sob com mesmas condições nominais nas que foram realizadas os testes, a amostra NT03 apresentou incrementos no coeficiente de transferência de calor por convecção acima de 15% para incrementos em potencia de bombeamentos menores que 10%.

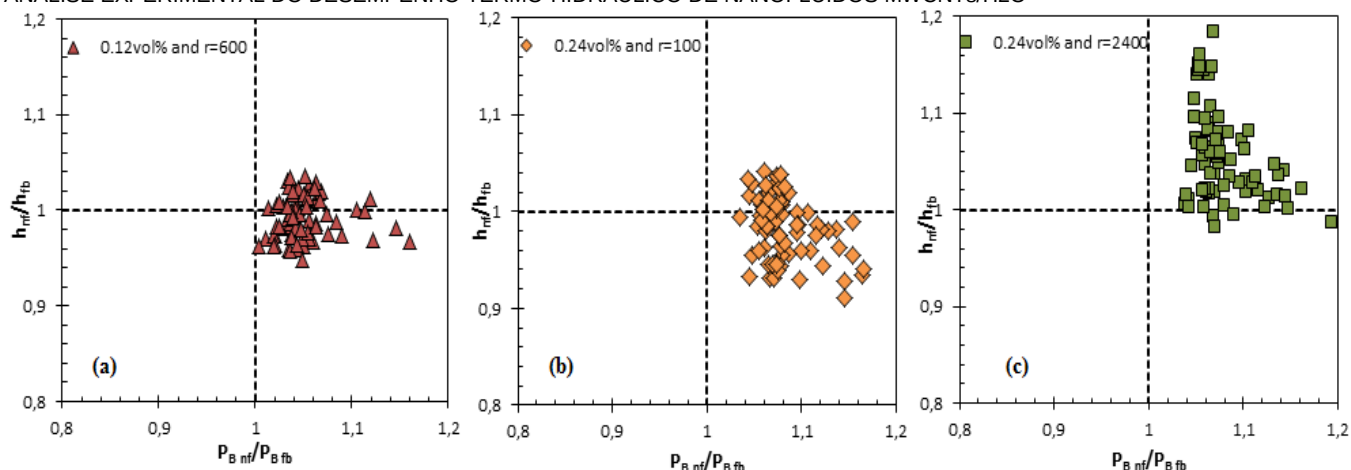


Figura 2. Resultados obtidos experimentalmente para o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção [h_{nf}/h_{fb}] em função da potência de bombeamento relativa [$P_{B,nf}/P_{B,fb}$]. (a) amostra NT01, (b) amostra NT02 e (c) amostra NT03.

4. CONCLUSÕES

As amostras NT01, NT02 e NT03 descritas na tabela 1, apresentaram um incremento na condutividade térmica, em média, 6,3%, 8,8% e 17% superiores a do fluido base (água destilada), demonstrando o efeito da concentração no aumento desta propriedade, no entanto as três amostras também apresentaram um incremento na viscosidade em média de 8,8% para NT01, de 17,8% para NT02 e 11,6% para NT03.

Segundo o apresentado na figura 2(a), 2(b) e 2(c), pode-se dizer que tanto as amostras de nanofluidos de MWCNTs/H₂O NT01 com razão de aspecto $r=600$ e concentração em volume de 0.12vol% e NT02 com razão de aspecto $r=100$ e concentração em volume de 0.24vol%, são as amostras que apresentaram o menor benefício como fluido de transferência de calor. No entanto, a amostra NT03 com razão de aspecto $r=2400$ e concentração em volume de 0.24vol% apresentou um desempenho termo hidráulico esperado porque sob as mesmas condições nominais nas que foram realizadas os testes, a amostra NT03 apresentou incrementos no coeficiente de transferência de calor por convecção acima de 15% para incrementos em potência de bombeamentos menores que 10%.

5. REFERÊNCIAS

- Choi, S.U.S., 1995, "Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles", in: D.A. Siginer, H.P. Wang (Eds.), Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, FED-V231/MD-V.66. ASME, New York, Pages 99–105.
- Haghighi, E.B. et al., 2014, "Experimental Study on Convective Heat Transfer of Nanofluids in Turbulent Flow: Methods of Comparison of Their Performance". Experimental Thermal and Fluid Science.
- Masuda, H. Ebata, A. Teramae, K. & Hishinuma, N., 1993, "Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles. Dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ Ultra-Fine Particles". Netsu Bussei 7, 227-233.
- Meyer, J.P., McKrell, T.J., & Grote, K., 2013, "The influence of multi-walled carbon nanotubes on single-phase heat transfer and pressure drop characteristics in the transitional flow regime of smooth tubes". International Journal of Heat and Mass Transfer 58, 597-609.
- Pak, B. C., and Cho, Y. I., 1998, "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles," Exp. Heat Transfer, 11, Pages 151–170.
- Wen, D., & Ding, Y., 2004, "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions". International Journal of Heat and Mass Transfer 47, 5181-5188.
- Williams, W., Buongiorno, J., & Hu, L.W., 2008, "Experimental Investigation of Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Loss of Alumina/Water and Zirconia/Water Nanoparticle Colloids (Nanofluids) in Horizontal Tubes". Journal of Heat Transfer 130, 342-412.
- Xuan, Y., & Li, Q., 2003, "Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids", ASME J. Heat Transfer, Volume 125, Pages 151-155.
- Yu, W. et al., 2009, "Heat transfer to a silicon carbide/water nanofluid". International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 3606-3612.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.