

ANALISE EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO DE NANOFLUIDOS
DE Ag/H₂O E SWCNT/H₂O EM TUBOS CIRCULARES

Abdul Orlando Cárdenas Gómez – orlandocardenas1589@gmail.com

Marcelo Costa flores – Marcelo.costa.flores@gmail.com

Enio Pedone Bandarra Filho – bandarra@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Energia, Sistemas térmicos e Nanotecnologia LEST-nano

R2 Refrigeração-Componentes e Equipamentos

Resumo. Este documento visa contribuir ao desenvolvimento de novas técnicas para o melhoramento dos processos de troca térmica. Portanto, o presente trabalho avalia experimentalmente a transferência de calor e queda de pressão de nanofluidos que foram produzidos com nanopartículas de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT) e prata (Ag) utilizando água destilada como fluido base. Assim os resultados experimentais da transferência de calor e a perda de carga foram obtidos por intermédio de uma bancada experimental que foi projetada, dimensionada e desenvolvida no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LEST-nano), capaz de atingir as condições nominais de ensaio necessárias para a análise experimental. Os ensaios foram realizados em escoamento monofásico turbulento plenamente desenvolvido, no interior de tubos circulares lisos, com fluxo de calor uniforme aplicado à superfície do tubo. A vazão mássica variou de 30 a 80 g/s para os nanofluidos SWCNT/H₂O, e de 30 a 100g/s para nanofluidos de Ag/H₂O. O fluxo de calor variou entre 20 e 22kW/m² e a temperatura de entrada na seção de testes foi mantida constante em 20 e 25°C, respectivamente. As concentrações em volume de nanopartículas do nanofluido SWCNT/H₂O variaram entre 0,03% e 0,21% e para o nanofluido Ag/H₂O variaram entre 0,1% e 0,5%. As propriedades termofísicas como a condutividade térmica e viscosidade foram obtidas experimentalmente. Outras propriedades de interesse como massa específica e calor específico foram obtidas por intermédio de modelos desenvolvidos para nanofluidos. Os resultados obtidos mostraram que nanofluidos a partir de nanotubos (SWCNT/H₂O) apresentou um incremento de 28% no coeficiente de transferência de calor em função do número de Reynolds para a amostra de maior concentração. No entanto, foram observados decrementos no coeficiente de transferência de calor quando comparado em função da mesma velocidade mássica para todas as amostras de SWCNT/H₂O. Os resultados também mostraram que para os nanofluidos (Ag/H₂O) teve um incremento máximo no coeficiente de transferência de calor de 18% em função do número de Reynolds e de 5,5% em função da vazão mássica para a amostra com concentração em volume (0,5%). Assim, pode ser considerada a utilização de nanofluidos como uma alternativa no melhoramento do processo de transferência de calor.

Palavras-chave: Nanofluido, convecção forçada, nanotubo de carbono, queda de pressão, nanopartícula de prata

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais barreiras no desenvolvimento de sistemas de troca de calor mais eficientes, de dimensões reduzidas, de menor custo construtivo e operacional é o limitado desempenho térmico dos fluidos de arrefecimento convencionais. Razão pela qual os grupos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico têm focado seus trabalhos na intensificação da transferência de calor nos processos térmicos por intermédio do desenvolvimento de fluidos que incrementem a transferência de calor sem penalizar, excessivamente, o consumo de energia pelo bombeamento do fluido.

Uma vez que o advento da nanotecnologia possibilitou a sintetização de partículas sólidas de escala manométrica, surgiu uma aplicação potencial, que consiste em dispersar nanopartículas em fluidos convencionais de arrefecimento. Uma consequência imediata é a intensificação das propriedades termo-físicas, que pode melhorar a capacidade da troca de calor dos fluidos de trabalho nos processos térmicos. Essa dispersão de nanopartículas no fluido base foi denominada por Choi, (1995) como Nanofluidos.

Devido às possíveis vantagens aplicando nanofluidos, foram realizados estudos sobre desempenho da transferência de calor e características do escoamento de vários nanofluidos, com nanopartículas produzidas de diferentes materiais e vários fluidos base. Por exemplo, Wen e Ding (2004) usaram nanopartículas de Al₂O₃ dispersas em água com concentrações volumétricas de 0,6%, 1% e 1,6%, sob condições de escoamento de regime laminar. Conseguiram incrementos até 47% no coeficiente local de transferência de calor por convecção em comparação com o fluido base. Ding, *et al.* (2006), mostraram em sua pesquisa que para nanofluidos MWCNT/Água, que continham uma concentração em massa de 0,5% nanopartículas nanotubos de carbono (CNT), atingiram uma intensificação máxima do coeficiente de transferência de calor local de 350% em escoamento laminar para Re=800. Heris, *et al.* (2006), mostraram resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor de nanofluidos de CuO/H₂O e Al₂O₃/H₂O, os experimentos foram realizados para escoamento em regime laminar sob a condição de temperatura de parede constante. A base de comparação que utilizaram foi o número de Peclet, portanto a razão de incrementos para o número de Peclet de 5000 o nanofluidos de Al₂O₃/H₂O com concentrações de 0.2% a 2.5% foi de 1,05 a 1,29 e para nanofluidos de CuO/H₂O de 1,06 a 1,23. Garg, *et al.* (2009), testaram MWCNT/Água com concentração de massa de nanopartículas de 1% em regime laminar e mostraram que em

comparação com o fluido base houve uma intensificação de 32% na transferência de calor por convecção para um número de Reynolds de 600.

Recentemente Meyer, *et al.* (2013), avaliaram experimentalmente o coeficiente de transferência de calor por convecção na condição superficial de fluxo de calor constante para nanofluidos MWCNT/Água. Eles mostraram que para as três amostras testadas, cujas concentrações em volume foram 0,33%, 0,75% e 1% respectivamente, o coeficiente de transferência de calor do nanofluido apresentou um incremento em comparação com o fluido base para o mesmo número de Reynolds, mas quando as amostras foram comparados em função da velocidade do escoamento o coeficiente não apresentou incremento algum. Nazari, *et al.* (2014), estudaram experimentalmente o desempenho térmico de nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ e CNT/ H_2O escoando dentro de um microtrocador. Os resultados mostraram um incremento do coeficiente de transferência de calor de 6% utilizando nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ com concentração em volume de nanopartícula de 0,5% sob a mesma velocidade de escoamento. No entanto o máximo incremento do coeficiente de transferência de calor apresentado foi de 13%, obtido com nanofluidos de CNT/ H_2O cuja concentração em volume de nanopartícula foi de 0,25%.

Cárdenas, *et al.* (2015), avaliaram experimentalmente o desempenho termohidráulico de nanofluidos de nanotubo de carbono de parede múltipla a base de água (MWCNT/água). Eles mostraram que para uma amostras de nanofluido com concentração em volume de 0,24% e com uma razão de aspecto da nanopartícula $r=2400$, este apresentou um incremento no coeficiente de transferência de calor de 15% para um incremento na potência de bombeamento menores de 10%. Experimentos realizados por Shahrul, *et al.* (2016) sobre a desempenho térmico de nanofluidos de $\text{ZnO}/\text{H}_2\text{O}$ -(PVP), $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ e $\text{SiO}_2/\text{H}_2\text{O}$, mostraram que o coeficiente de transferência de calor em regime turbulento dos três nanofluidos apresentaram incrementos máximos de 50%, 15% e 9% respectivamente em comparação com o fluido base sob as mesma vazão volumétrica. Outros estudos com resultados análogos, onde são apresentados incrementos na transferência de calor com nanofluidos são citados a seguir, Duangthongsuk e Wongwises (2010), Vajjha, *et al.* (2010), Liu e Liao (2010), Asirvatham, *et al.* (2011) e Sundar, *et al.* (2012).

Tabela 1. Resumo de estudos experimentais sobre a transferência de calor por convecção em nanofluidos.

Autor	Faixa de escoamento	Nanofluido	Incremento na transferência de calor
Wen e Ding (2004)	Laminar	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$	+ 47% do h local, mesmo Re
Ding, <i>et al.</i> (2006)	Laminar	MWCNT/ H_2O	+350% do h local, mesmo Re
Heris, <i>et al.</i> (2006)		$\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$	+23% do h para $\phi=2,5\%$ +29% do h para $\phi=2,5\%$, mesmo Pe
Garg, <i>et al.</i> (2009)	Laminar	MWCNT/ H_2O	+32 do h para concentração em massa de 1%, mesmo número de Reynolds.
Duangthongsuk e Wongwises (2010)	Turbulento	$\text{TiO}_2/\text{água}$	+26% para $\phi=1\%$ -14% para $\phi=2\%$
Vajjha, <i>et al.</i> (2010)	Turbulento	SiO_2 , Al_2O_3 , CuO em [H_2O -EG; (60:40)]	+29%, +40% e +43% do h respectivamente, para mesmo Re.
Liu e Liao (2010)	Turbulento	MWCNT/ (H_2O + CTAC)	+40% do h, para concentração em massa de 1%, mesmo Re
Asirvatham, <i>et al.</i> (2011)	Laminar, Transição e Turbulento	$\text{Ag}/\text{H}_2\text{O}$	+28,9% do h, para mesmo Re -- +69,3% do h, para mesmo Re
Sundar, <i>et al.</i> (2012)	Turbulento	$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{H}_2\text{O}$	+30,96% para mesmo Reynolds
Meyer, <i>et al.</i> (2013)	Laminar, Transição e Turbulento	MWCNT/ H_2O funcionalizados	+33 do h para $\phi=1\%$, mesmo Re. -12,6 do h para $\phi=1\%$, mesma velocidade.
Nazari, <i>et al.</i> (2014)	Turbulento	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ e CNT/ H_2O	+6% do h para $\phi=0,5\%$ +13% do h para $\phi=0,25\%$, mesma velocidade
Cárdenas, <i>et al.</i> (2015)	Turbulento	MWCNT facilmente dispersíveis/ H_2O	-1% para $\phi=0,12\%$ e $r=600$ -2% para $\phi=0,24\%$ e $r=100$ +6% para $\phi=0,24\%$ e $r=2400$ Para mesma velocidade mássica.
Shahrul, <i>et al.</i> (2016)	Turbulento	$\text{ZnO}/\text{H}_2\text{O}$ -(PVP), $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ e $\text{SiO}_2/\text{H}_2\text{O}$	+50% do h para mesma velocidade +15% do h para mesma velocidade +9% do h para mesma velocidade

No entanto, ainda com toda a análise experimental e computacional aplicada para avaliar o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos, são encontradas na literatura resultados controversos que dificultam e limitam a capacidade de consenso dos grupos de pesquisa do mundo todo. Assim, na Tab. 1 podem ser observado um breve resumo de resultados para o desempenho da transferência de calor em nanofluidos. Portanto, o presente trabalho apresenta resultados experimentais

desempenho da transferência de calor por convecção e da perda de carga de nanofluidos de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT/H₂O) e de prata (Ag/H₂O), em escoamento em regime turbulento no interior de um tubo horizontal sob a condição de contorno de fluxo de calor constante na superfície externa do tubo. As concentrações em volume de nanopartícula do nanofluido SWCNT/H₂O variaram entre 0,03% e 0,21% e para o nanofluido Ag/H₂O variaram entre 0,1% e 0,5%. As propriedades termofísicas como a condutividade térmica e viscosidade foram obtidas experimentalmente. Outras propriedades de interesse como massa específica e calor específico foram obtidas por intermédio de modelos desenvolvidos para nanofluidos.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realizar dispersão de nanopartículas SWCNT (nanotubos de carbono de parede simples) e de nanopartículas esféricas de prata (Ag), dentro do fluido base (água destilada), foi necessária a aplicação de energia externa produzida por diferentes equipamentos, isto é, foram utilizados: agitadores (misturadores), e um disruptor ultrassônico com sonotrodo por ter sido capaz de fornecer energia suficiente para desaglomerar os clusters de partículas com forte impacto sobre os clusters de nanopartículas. Finalmente as amostras foram homogeneizadas com ajuda do homogeneizador de alta pressão do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia, LEST-UFU, operando em pressões de 400 bar por um período de 30 minutos.

O método utilizado para produzir os nanofluidos neste trabalho é conhecido como o método de dois passos, já que as nanopartículas são provenientes de uma solução funcionalizada de alta concentração (6wt%) no caso dos nanotubos (SWCNT) ou em forma de pó para nanopartículas de prata (Ag), que foram posteriormente dispersas e diluídas dentro do fluido base (H₂O). Portanto, foi previamente estabelecida uma rotina implementada igualmente na síntese de todas as amostras, denominadas SNC01, SNC02, SNC03 para os nanofluidos de nanotubos, e Ag_01, Ag_02, Ag_03 para os nanofluidos de prata.

Tabela 2. Características geométricas e propriedades termofísicas das nanopartículas utilizadas.

Nanopartículas	Características geométricas		Propriedades Termofísicas	
	Comprimento (l _{np})	Diâmetro (d _{np})	Massa específica (ρ)	Calor específico (c _p)
SWCNT	5-30 μm	1-2 nm	2,1 g/cm ³	0,71 kJ/(kg.k)
Ag	[-]	20 nm	10,5 g/cm ³	0,23 kJ/(kg.k)

Todas as nanopartículas foram fornecidas pela Nanostructures & Amorphous Material Inc, a qual também fornece as características geométricas e as propriedades termofísicas das nanopartículas, que são especificadas na Tab. 2. As concentrações volumétricas definidas na preparação das amostras são descritas na Tab. 3. Assim, o volume necessário de nanofluido para realizar os testes no equipamento experimental foi de 3200 ml.

Tabela 3. Respectiva concentração volumétrica das amostras de nanofluidos.

AMOSTRAS (SWCNT)	[% volume] φ	AMOSTRAS (Ag)	[% volume] φ
SCN01	0,03	Ag_01	0,1
SCN02	0,05	Ag_02	0,3
SCN03	0,21	Ag_03	0,5

2.1 Massa específica e calor específico do nanofluido (SWCNT/H₂O e Ag/H₂O)

Uma vez determinada a concentração em volume de nanopartículas na dispersão (φ), a massa específica das nanopartículas (ρ_{np}) fornecida pelos fabricantes e conhecendo a massa específica do componente do fluido base (ρ_{fb}), finalmente a massa específica da dispersão (ρ_{nf}), pode ser calculada a partir da regra da mistura apresentada na Eq.(1).

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

Pak e Cho, (1998), mediram a massa específica de amostras de nanofluido de dióxido de titânio e de alumina a base de água com concentração de nanopartículas de até 31,6%, encontraram um desvio máximo de 0,6% em relação aos resultados calculados pela teoria da regra da mistura, demonstrando assim uma boa compatibilidade.

De maneira semelhante ao realizado para massa específica, o calor específico das amostras de nanofluido foi determinado, empregando um modelo clássico baseado no equilíbrio térmico entre as partículas e o fluido circundante, que aplicando a primeira lei da termodinâmica, origina-se o modelo matemático para o cálculo do calor específico do nanofluido, cp_{nf}, dado pela Eq.(2), que considera a concentração volumétrica das nanopartículas, (φ), e a capacidade térmica dos elementos envolvidos na suspensão, (ρ·cp)_{fb} e (ρ·cp)_{np}. A massa específica e o calor específico do fluido base, ρ_{fb}, e cp_{fb}, foram obtidos por intermédio da base de dados do software EES e a massa específica e o calor específico das nanopartículas foram fornecidos pelo fabricante.

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

2.2 Condutividade térmica dos nanofluidos (SWCNT/H₂O e Ag/H₂O)

A condutividade térmica das amostras de nanofluidos de SWNTC/H₂O e Ag/ H₂O foi medida pelo método do fio quente transiente (THW), também conhecido como sonda linear. Foi utilizada a sonda Hukseflux TP-08, disponível no laboratório de refrigeração da EESC-USP. 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 de $\pm 3\% + 0,02$ W/mK, conforme especificado pelo fabricante.

O processo adotado para medição é fundamentado nas diretrizes da norma ASTM D5334-08, onde a condutividade térmica é estabelecida em função da relação temperatura-tempo, características geométricas da sonda e o calor dissipado, sob a hipótese de que o fio é uma fonte de calor ideal que está imerso em um meio homogêneo é isotrópico.

Foram realizadas medições de condutividade térmica para todas as amostras de nanofluidos em uma faixa de temperatura compreendida entre 5 e 50°C com incrementos de 5 °C. A sonda, previamente calibrada para a água ($k = 0,6$ W/mK), foi totalmente imersa no fluido e, após acionar o circuito elétrico, a temperatura foi medida durante um tempo superior a 50 segundos. Cinco testes de medição foram executados para cada valor da faixa de temperatura. A condutividade foi determinada dos dados adquiridos na região linear do gráfico, ($\Delta T \times \ln(t)$), para cada uma das amostras analisadas. A Fig. 1, ilustra os resultados experimentais para a condutividade térmica das amostras de nanofluidos de SWNTC/H₂O em função das diferentes temperaturas nas que foram realizadas as medições.

Os resultados da medição da condutividade na amostra SNC01, preparada com a menor concentração em volume de nanotubos dispersos, 0,03%, apresentou a menor condutividade térmica, em média um incremento de 11% acima do fluido base (água destilada), demonstrando o efeito da concentração no incremento da condutividade térmica dos nanofluidos. As amostras SCN02 e SCN03 com uma concentração em volume de, 0,05% e 0,21%, apresentaram incrementos distintos da condutividade, de 24% para SCN02 e de 29% para SCN03. Os resultados da medição da condutividade para os nanofluidos de prata apresentaram incrementos de 7,6% para Ag_01, de 18,6% para Ag_02 e de 37,3% para Ag_03 comparado com o fluido base (H₂O).

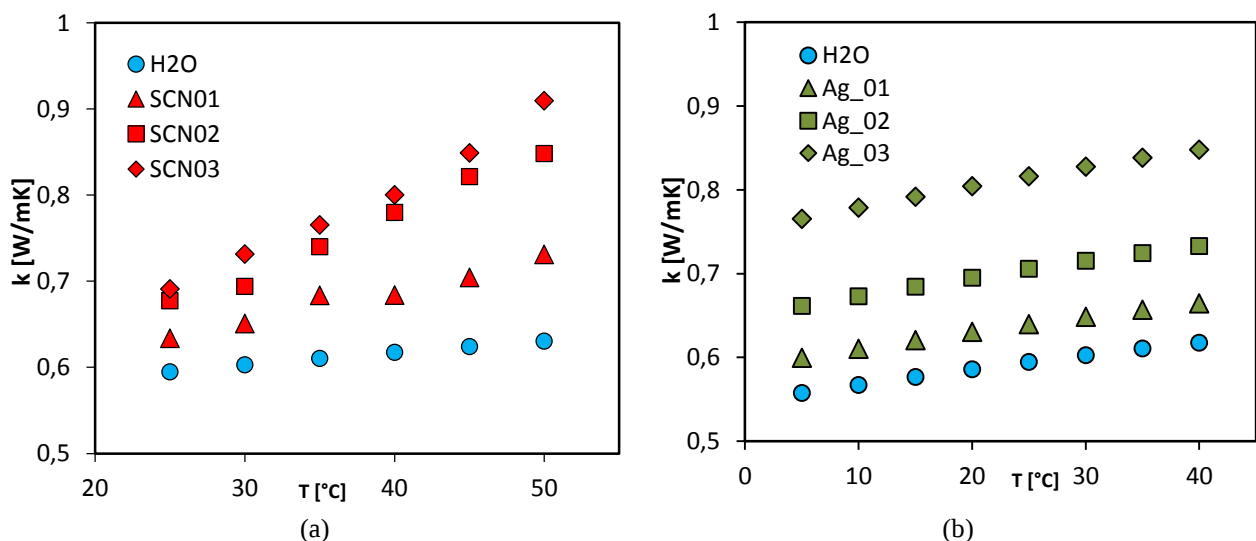


Figura 2. Condutividade térmica dos nanofluidos SWCNT/ H₂O e Ag/H₂O em função da variação da temperatura do fluido.

Cabe ressaltar que a razão de aspecto (l_{np}/d_{np}) é de aproximadamente 11666 para todas as amostras de SWCNT, portanto o fato do nanofluido ter apresentado um condutividade térmica elevada, mesmo para baixas concentrações volumétricas, poderia ser explicado pelo fato que as nanopartículas que tiverem menor diâmetro possuem uma área específica maior. Isso favorece o movimento Browniano, que é considerado um fator importante para aumentar a condutividade térmica do nanofluido Xuan, *et al.* (2003). Além disso, uma maior área específica, significa que existem mais moléculas de líquido próximas da superfície dos SWCNT. Estas moléculas de líquido podem formar uma estrutura de camada, chamada por Yu, *et al.* (2000) de camada interfacial e que segundo Jiang, *et al.* (2009), pode aumentar a condutividade térmica do nanofluido.

2.3 Viscosidade dos nanofluidos (SWCNT/H₂O e Ag/H₂O)

Neste trabalho, as medições da viscosidade das amostras de nanofluidos de SWCNTs/H₂O e Ag/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). Devido ao fato de que, aparentemente, a viscosidade das amostras era muito próxima da viscosidade da água, o reômetro foi calibrado com água destilada ($\mu_{H_2O} = 0,89$ [cP]) e o elemento cônico utilizado na realização das medições foi o spindle CPE-41, requerendo uma amostra de 1 ml. Na Fig. 2 são ilustrados os resultados experimentais para a viscosidade das diferentes amostras de nanofluidos de SWCNT/ H_2O e Ag/ H_2O em função das temperaturas nas quais foram realizadas as medições.

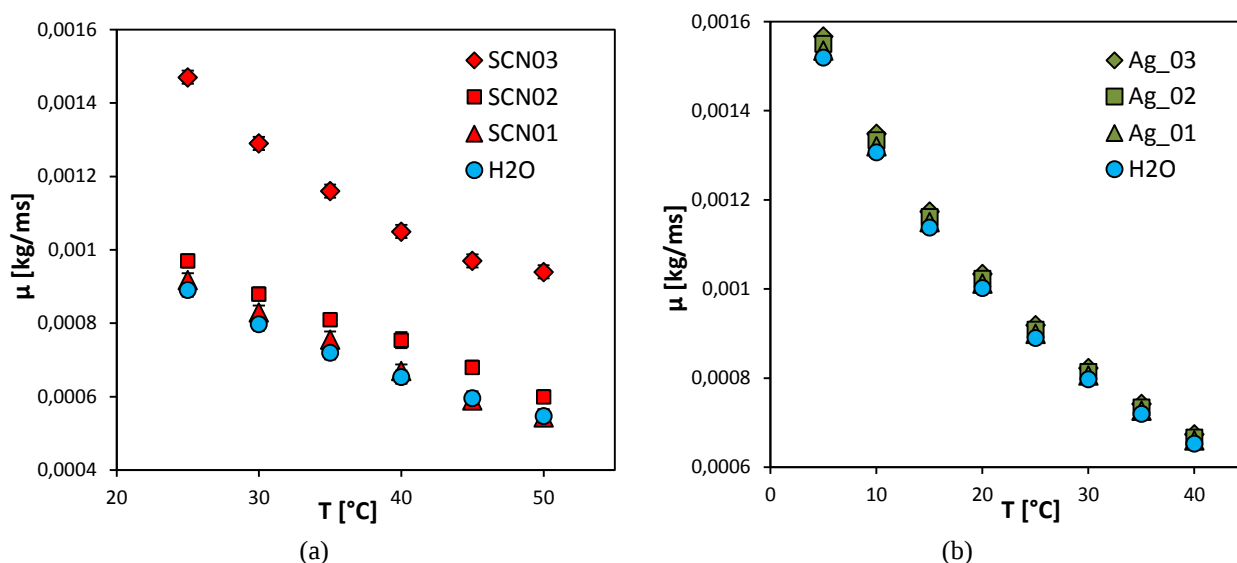


Figura 2. Viscosidade dos nanofluidos em função da variação da temperatura do fluido.

Cinco testes de medição foram executados para cada valor da faixa de temperatura. Como todas as três amostras, SCN01, SCN02 e SCN03, foram produzidas a partir do processo de diluição e homogeneização de uma solução funcionalizada de (SWCNT/água) com concentração mássica de 6%, era esperado que a amostra com menor concentração volumétrica de nanopartícula (SCN01 com concentração em volume de 0,03%), apresentasse a menor viscosidade efetiva de 2,2%. A amostras SCN02, cuja concentração em volume é 0,05%, apresentou um incremento de 11,8% e, finalmente, a amostra SCN03, com concentração em volume de 0,21%, apresentou um incremento da viscosidade efetiva de 63,4% comparada com o fluido base. No entanto, a viscosidade para as amostras dos nanofluidos de prata apresentaram baixos incrementos da viscosidade em comparação com o fluido base comp pode ser observado na Fig. 2(b). Assim, a amostras Ag_01 apresentou pequeno incremento em média de 1,5%, a amostra Ag_02 apresentou um incremento da viscosidade em média de 2,3% e finalmente a amostra Ag_03 cuja concentração volumétrica foi de 0,5% apresentou um incremento apenas de 3,2%.

A viscosidade dos nanofluidos é uma das propriedades que tem sido cuidadosamente estudada, por exemplo Timofeeva, *et al.* (2009), reportou que existe uma forte dependência da viscosidade dos nanofluidos com a forma e o tamanho das nanopartículas, eles concluíram que para a mesma concentração volumétrica, nanopartículas como nanotubos ou plaquetas os nanofluidos apresentam incrementos maiores de viscosidade em comparação com nanopartículas de esferas ou esferoides, sendo a razão de aspecto um parâmetro que resulta na intensificação da viscosidade do nanofluido, já que devido à configuração estrutural da nanopartícula a interação superficial entre partícula-fluido dificulta os movimentos rotacionais ou movimentos de transição como o movimento browniano. Assim, pode ser explicado que para a amostra de nanotubos (SCN01) como concentração em volume de 0,03% apresentou aproximadamente o mesmo incremento em viscosidade de 2,3%, observado na amostra de prata (Ag_01) com concentração de 0,3%, onde a forma das nanopartículas é esférica.

2.4 Bancada Experimental para avaliar o desempenho termohidráulico dos nanofluidos (SWCNT/ H_2O e Ag/ H_2O)

Uma bancada experimental foi projetada e construída para atingir as condições fluidodinâmicas e térmicas necessárias a fim de atender as hipóteses e exigências teoricamente estabelecidas para a solução analítica e/ou experimental do problema em questão. Neste sentido, a Fig. 3, apresenta uma imagem da bancada experimental desenvolvida no laboratório LESTnano-UFU.

A seção de testes, por onde circula o nanofluido pela ação de uma bomba magnética de engrenagem, Rotogearmagnetic-Drive, com velocidade controlada por um inversor de frequência VLT 2800 DANFOSS, é constituída por um tubo circular de latão com o interior liso, de comprimento 2460 mm, diâmetro externo de 12,7mm e espessura de parede de 3,175mm. A medida na temperatura de parede ao longo do tubo e feita por 24 termopares tipo T fixados sobre o tubo em diferentes posições. As condições de temperatura e pressão na entrada e na saída são medidas por sensores RTD modelo PT100 e piezo resistivo, respectivamente. A medida da vazão mássica é feita por um sensor do tipo coriolis, modelo RHM06-4FS1PS e a unidade eletrônica (conversor), modelo CMM01, ambos fornecidos por METROVAL Controle de Fluidos Ltda, o sensor foi instalado na linha de escoamento principal, logo depois da seção de visualização e antes da

entrada do pré-aquecedor. Para obter a condição de contorno de fluxo de calor constante na seção de testes, o calor é fornecido através de uma resistência elétrica tipo fita flexível de 1500 W, cuja potência é fornecida por uma fonte elétrica DC. O isolamento térmico da seção de testes foi realizado com uma camada de lã de rocha de 25 mm de espessura. Para evitar a fuga de calor por condução axial, o tubo foi suportado em casquilhos de nylon tecnil e a seguir todo o conjunto foi recoberto com uma manta isolante de espuma elastomérica de borracha sintética com espessura de 20 mm.



Figura 3. Equipamento experimental para avaliar o desempenho termohidráulico dos nanofluidos.

2.5 Dedução e Avaliação dos dados experimentais

O coeficiente de transferência de calor foi determinado utilizando a seguinte equação:

$$h = \frac{Q_{EP} / A_{ST}}{\Delta T} \quad (3)$$

Onde, Q_{EP} , é a potência elétrica fornecida nas resistências que estão instaladas ao longo da superfície externa do tubo da seção de teste (A_{ST}) e a diferença entre as temperaturas da superfície ou parede do tubo é (ΔT). O número de Reynolds e o número de Prandtl foram calculados por intermédio das Eq.(4) e Eq.(5).

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (4)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (5)$$

Onde k e μ , são os valores da condutividade térmica e a viscosidade do fluido de trabalho, obtidos experimentalmente. A comparação entre o coeficiente de transferência de calor obtido experimentalmente foi avaliado com o coeficiente de transferência de calor por convecção calculado pela correlação de Gnielinski Eq. (6).

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} \left(Pr^{2/3} - 1 \right)} \quad (6)$$

Sendo, f o fator de atrito calculado através da equação de Petukhov Eq. (7).

$$f = (0.79 \ln(Re) - 1.64)^{-2} \quad (7)$$

A Fig. 4, apresenta a comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente e aquele calculado pela correlação de Gnielinski para testes com água destilada, destacando que o desvio médio proporcionado pelos resultados experimentais em relação àqueles obtidos pela correlação de Gnielinski foi de 4%.

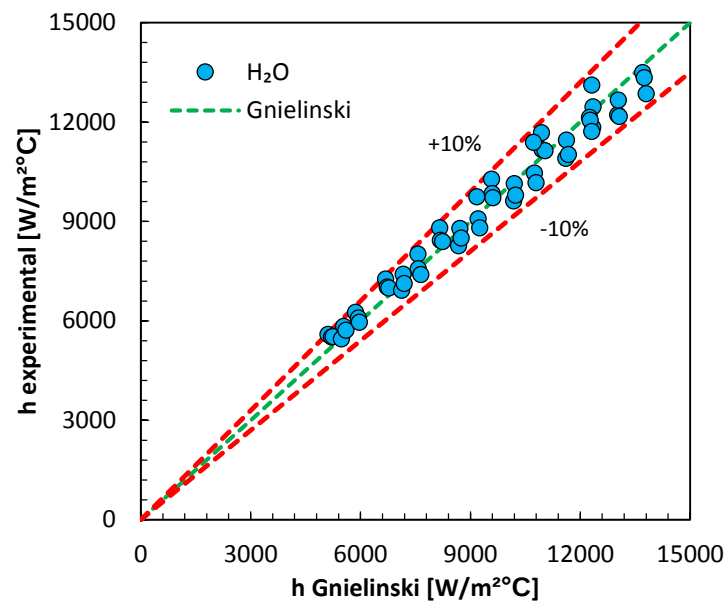


Figura 4. Comparação entre o coeficiente de transferência de calor experimental e o modelo teórico.

O fator de atrito também foi utilizado para validar os resultados experimentais, já que não leva em conta influência da transferência de calor sob as propriedades. O fator de atrito dos experimentos foi calculado através da Eq. (8) e posteriormente comparado com a correlação de Petukhov Eq. (7).

$$f = \frac{\Delta P \rho \pi^2 D^5}{8 L \dot{m}^2} \quad (8)$$

Onde, ΔP , é a queda de pressão determinada através das medições de transmissor de pressão diferencial e $\dot{m}$, é a vazão mássica que foi determinante a partir das leituras do medidor de vazão mássica tipo Coriolis. A Figura 5 ilustra os resultados experimentais para o fator de atrito, f_{exp} , para a água destilada em comparação com a correlação de Petukhov Eq. (7) em função do número de Reynolds, mostrando que os resultados experimentais apresentam desvio de 2.1% em relação à correlação.

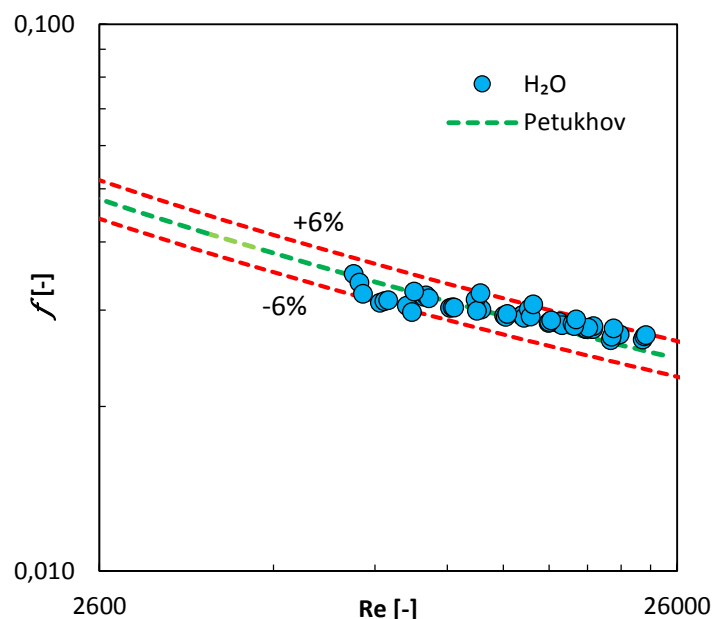


Figura 5. Comparação entre o fator de atrito experimental e o modelo teórico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resultados da transferência de calor

As amostras de nanofluidos a partir de nanotubos (SWCNT/H₂O), foram testadas para faixas de número de Reynolds de 3500 a 20000, mantendo como condições nominais impostas a temperatura de entrada de 25°C; o fluxo de calor fornecido na seção de teste de 22 kW/m² e a vazão mássica variou entre 30 e 80 g/s, com incrementos de 10 g/s. Para as amostras de nanofluidos de prata (Ag/H₂O), foram testadas para faixas de número de Reynolds de 5000 a 21000, mantendo como condições nominais impostas a temperatura de entrada de 20°C; o fluxo de calor fornecido na seção de teste de 20 kW/m² e a vazão mássica variou entre 30 e 100 g/s, com incrementos de 10 g/s. Todos os resultados obtidos, foram comparados com água destilada em função do número de Reynolds e da velocidade mássica.

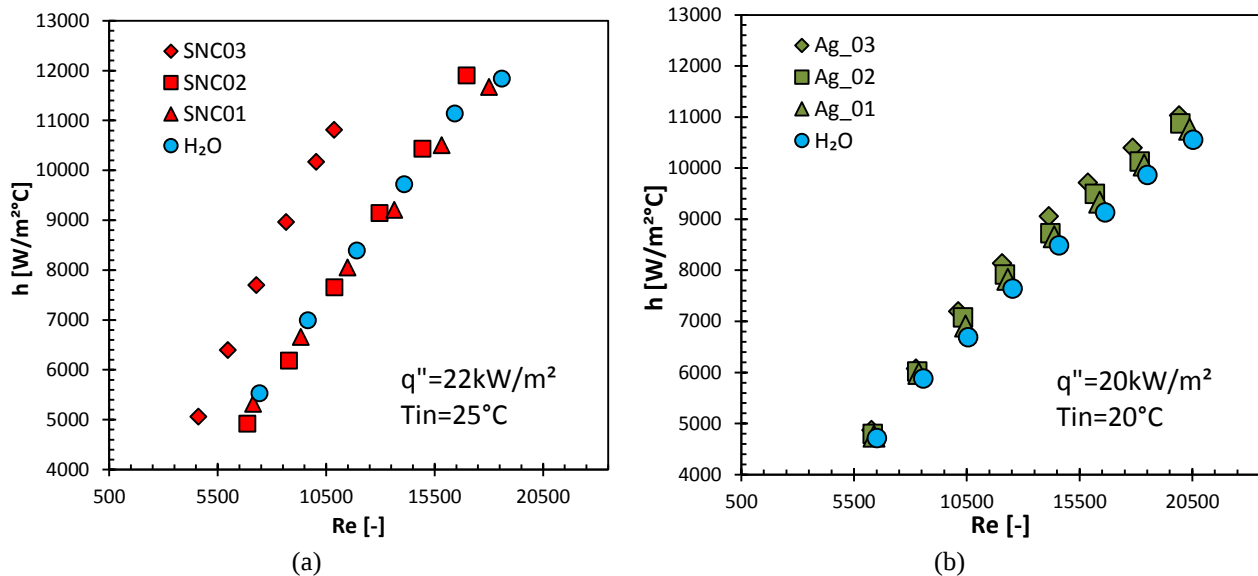


Figura 6. Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção em função do número de Reynolds (Re), para os nanofluidos SWCNT/H₂O e Ag/H₂O

Pode ser observado na Fig. 6(a) que a única amostra de nanofluido SWCNT/H₂O que apresentou um incremento no coeficiente de transferência de calor em função do número de Reynolds foi a amostra SNC03, cujo incremento foi de 28%. Por outro lado, nas concentrações SNC01 e SNC02 foram observados pequenos decrementos de 4% e 2,5% respectivamente. Na Fig. 6(b) todas as amostras de nanofluido de Ag/H₂O apresentaram incrementos em função do número de Reynolds. Portanto, para a amostra Ag_01 cuja concentração em volume é de 0,1% o incremento do coeficiente de transferência de calor apresentado foi de 3%, para a amostra Ag_02 o incremento foi de 7% e finalmente para a amostra de maior concentração Ag_03 com uma concentração em volume de 0,5% o incremento foi de 18%.

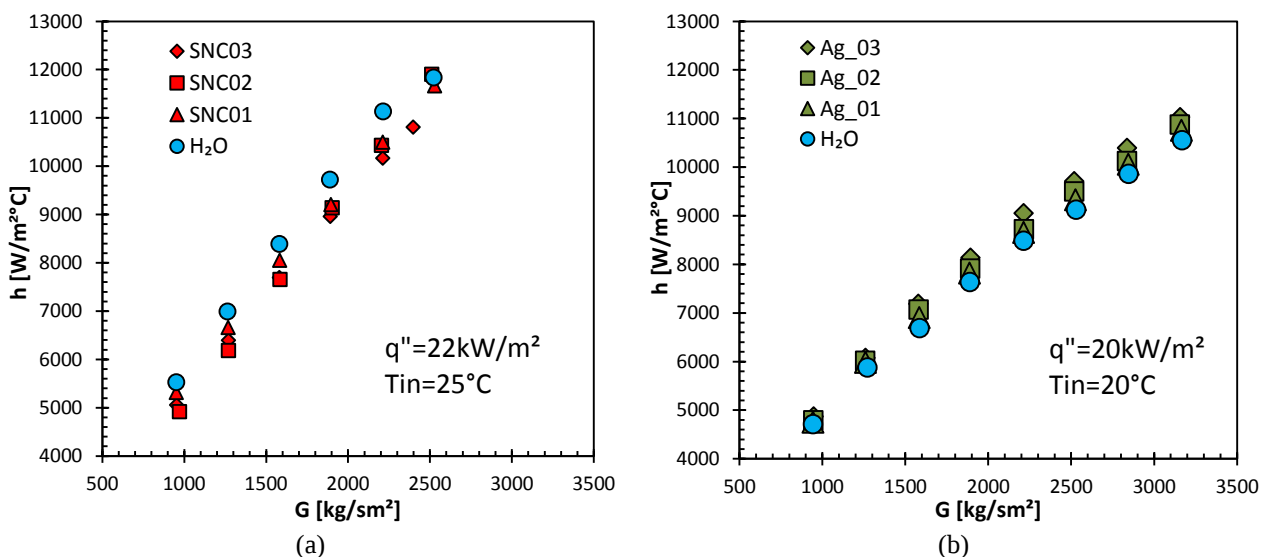


Figura 7. Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção em função da velocidade mássica (G), para os nanofluidos SWCNT/H₂O e Ag/H₂O

Pode ser observado na Fig. 7(a) que para todas as amostras de nanofluidos de SWCNT/H₂O foram observados decrementos no coeficiente de transferência de calor quando comparado em função da mesma velocidade mássica. Portanto, para a amostras SNC01 o decremento foi de 4% e para as amostras SNC02 e SNC03 foi observado o mesmo decremento de 8%. A Fig. 7(b) apresenta os resultados do coeficiente de transcendência de calor em função da velocidade mássica para todas a amostras de nanofluido de Ag/H₂O. Assim, pode ser observado que todas a amostras apresentaram pequenos incrementos do coeficiente de transferência de calor para a mesma velocidade de escoamento, sendo observado um incremento de 2% para a amostra Ag_01 e para as amostras Ag_02 e Ag_03 forma observados incrementos do coeficiente de transferência de calor de 3,2% e 5,5% respectivamente.

3.2. Resultados da queda de pressão

Os resultados experimentais de todos os ensaios para a queda de pressão do escoamento do fluido entre a entrada e a saída da seção de testes são apresentados nas Figs. 8(a) e 8(b) em função da velocidade mássica, G [kg/sm²], sendo um dos parâmetros que mais afeta a perda de carga.

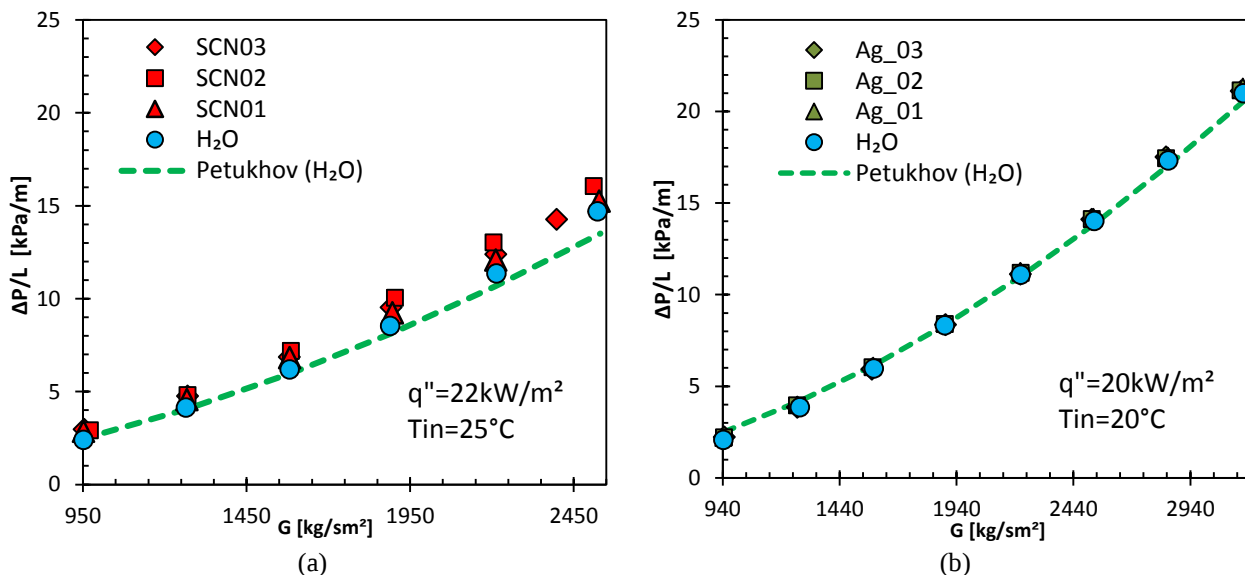


Figura 9. Resultados obtidos experimentalmente para queda de pressão em função do velocidade mássica (G), para os nanofluidos SWCNT/H₂O e Ag/H₂O

Portanto, na Fig. 8(a) todas as amostras de nanofluido SWCNT/H₂O (SCN01, SCN02 e SCN03), apresentaram valores de queda de pressão acima do fluido base (água destilada). A amostra SCN01, com uma concentração em volume de 0,03%, apresentou queda de pressão, em média, 7,5% acima do fluido base. O incremento da queda de pressão para a amostra SCN02, com uma concentração em volume de 0,05%, foi de 12,1%. Já o incremento da queda de pressão para a amostra SNC03, com a maior concentração em volume (0,21%) foi, em média, de 12,3%, destacando que o aumento na viscosidade para esta amostra foi de 63,4% em relação ao fluido base. No entanto, na Fig. 8(b) pode ser observados que as amostras de nanofluido Ag/H₂O (Ag_01, Ag_02 e Ag_03) não apresentaram incrementos significativos na queda de pressão da seção de teste, resultando em incrementos insignificantes na potência de bombeamento da ordem de 0,9%.

4. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos no presente trabalho permitiu as seguintes conclusões:

- Em geral, a condutividade térmica de todos os nanofluidos produzidos aumentou. Especificamente na amostra SNC03 com concentração volumétrica de 0,21% de nanotubos de carbono de parede simples apresentou um incremento de 29%. Os resultados da medição da condutividade para os nanofluidos de prata também apresentaram incrementos de 7,6% para Ag_01, de 18,6% para Ag_02 e de 37,3% para Ag_03 comparado com o fluido base (H₂O).
- Os resultados mostraram que a viscosidade obtida para os nanofluidos foi maior que para a água destilada, especialmente em nanofluidos produzidos com nanotubos de carbono cujos incrementos foram superiores quando comparados com nanofluidos produzidos com nanopartículas esféricas de prata. Assim, pode ser observada que existe uma forte influência da forma da nanopartícula no incremento da viscosidade dos nanofluidos.
- A amostras SCN03 mostrou o maior aumento do coeficiente de transferência de calor (28%) quando comparado em função do número de Reynolds e um decréscimo de 8%, em função da velocidade da massa. No entanto, para os nanofluidos de prata Ag/H₂O, todas as amostras apresentaram incrementos em função do número de Reynolds e em função da velocidade mássica.
- Pode-se concluir que todas as amostras de SWCNT/H₂O (SCN01, SCN02 e SCN03) não apresentaram resultados satisfatórios no desempenho da transferência de calor. No entanto, as amostras de Ag/H₂O apresentaram resultados

satisfatórios no desempenho da transferência de calor, sem incrementos significativos na queda de pressão e na bombeamento cujo incremento foi de 0,9%.

5. AUTORIZAÇÕES / RECONHECIMENTO

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste papel e de garantir o direito de publicar todo o conteúdo de seu trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio dado em esta pesquisa pela CAPES, CNPq e Fapemig. Os autores gostariam de estender o reconhecimento ao Prof. Oscar Saúl Hernandez Mendoza.

6. REFERÊNCIAS

- Asirvatham, L. G. et al. December 2011. Convective heat transfer of nanofluids with correlations. *Particuology*, v. 9, n. 6, p. 626-631. ISSN 1674-2001.
- Cárdenas Gómez, A. O., Hoffmann, A. R. K., & Bandarra Filho, E. P. (2015). Experimental evaluation of CNT nanofluids in single-phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 277-287. Elsevier Ltd.
- Choi, S. U. S. 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. [S.l.]: ASME. p. 99-105.
- Ding, Y. et al. January 2006. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 49, n. 1-2, p. 240-250. ISSN 0017-9310.
- Duangthongsuk, W.; Wongwises, S. April 2009. Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 33, n. 4, p. 706-714. ISSN 0894-1777.
- Heris, S. Z., Etemad, S. G., & Esfahany, M. N. (2006). Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33(4), 529-535.
- Liu, Z.-H.; Liao, L. December 2010. Forced convective flow and heat transfer characteristics of aqueous drag-reducing fluid with carbon nanotubes added. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 49, n. 12, p. 2331-2338. ISSN 1290-0729.
- Meyer, J. P.; Mckrell, T. J.; Grote, K. March 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*, v. 58, n. 1-2, p. 597-609. ISSN 0017-9310.
- Nazari, M., Karami, M., & Ashouri, M. (2014). Comparing the thermal performance of water, Ethylene Glycol, Alumina and CNT nanofluids in CPU cooling: Experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57, 371-377. Elsevier Inc.
- Shahrul, I. M., Mahbubul, I. M., Saidur, R., & Sabri, M. F. M. (2016). Experimental investigation on Al₂O₃-W, SiO₂-W and ZnO-W nanofluids and their application in a shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97, 547-558. Elsevier Ltd.
- Sundar, L. S. et al. February 2012. Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe₃O₄ magnetic nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 37, p. 65-71. ISSN 0894-1777.
- Timofeeva, E. V.; Routbort, J. L.; Singh, D. 2009. Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids. *Journal of Applied Physics*, v. 106, n. 1, p. 014304. ISSN 0021-8979.
- Vajjha, R. S.; Das, D. K.; Kulkarni, D. P. October 2010. Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 53, n. 21-22, p. 4607-4618. ISSN 0017-9310.
- 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*, v. 47, n. 24, p. 5181-5188. ISSN 0017-9310.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER OF Ag/H₂O AND SWCNT/H₂O NANOFLUIDS IN CIRCULAR TUBES

Abstract. *This document aims to contribute to the development of new techniques for the improvement of thermal exchange processes. Therefore, this work presents an experimental evaluation of heat transfer and pressure drop of nanofluids that were produced with nanoparticles of single walled carbon nanotubes (SWCNT) and silver (Ag) using distilled water as a base fluid. Thus, the experimental results of heat transfer and pressure drop were obtained through an experimental facility that was designed, sized and developed in the Laboratory of Energy, Thermal Systems and Nanotechnology (LEST-nano). This experimental facility is able to reach the nominal test conditions necessary for the experimental*

analysis. The tests were conducted on single-phase turbulent flow fully developed within smooth circular pipes with uniform heat flux applied to the pipe surface. The mass flow rate ranged from 30 to 80 g/s for SWCNT/H₂O nanofluids, and 30 to 100g/s to Ag/H₂O naofluids. The heat flux ranged from 20 to 22kW/m² and the inlet temperature in the test section was maintained constant at 20 to 25°C, respectively. The volume concentrations of nanoparticles for the carbon nanotubes nanofluid (SWCNT/H₂O) varied between 0.03% and 0.21% and the silver nanofluid (Ag/H₂O) varied between 0.1% and 0.5%. The thermophysical properties such as thermal conductivity and viscosity were obtained experimentally. Other properties of interest as specific mass and specific heat were obtained through models developed for nanofluids. The results showed that carbon nanotubes nanofluids (SWCNT/H₂O) increased 28% in the heat transfer coefficient versus Reynolds number for the highest concentration sample. However, decreases were observed for the heat transfer coefficient compared according to the same mass velocity for all samples from SWCNT/H₂O. The results also showed that for silver nanofluids (Ag/H₂O) was obtained a maximum increase of 18% in the heat transfer coefficient as a function of Reynolds number. However, the maximum increase of the heat transfer coefficient as a function of mass flow was 5.5% for the higher volume concentration (0.5%). Thus, it can be considered to use nanofluids as a possible alternative to improving the heat transfer process.

Key words: Nanofluid, forced convection, carbon nanotube, pressure drop, silver nanoparticle