

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DEPOSIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS POR EBULIÇÃO DE Al_2O_3 -ÁGUA EM SUPERFÍCIES DE COBRE PARA AUMENTAR A MOLHABILIDADE E A RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Marcos Antonio de Souza Peloso Junior, marcosspeloso@gmail.com¹

Alex P. da Cunha, eng.alexcunha@gmail.com¹

Leonardo L. Manetti, leomanetti@gmail.com¹

Igor S. Kiyomura, igorseicho@gmail.com¹

Elaine Maria Cardoso, elainemaria@dem.feis.unesp.br¹

¹UNESP - Univ Estadual Paulista - Department of Mechanical Engineering, Av. Brasil Centro, 56, 15385-000 Ilha Solteira, SP, Brazil

Resumo: Os coletores fotovoltaicos/térmicos vêm ganhando destaque por sua capacidade de fornecer energia elétrica e térmica simultaneamente, e assim, melhorar a eficiência global da energia solar. Para tanto, o arrefecimento da célula fotovoltaica é necessário e a utilização de nanofluidos pode ser uma boa alternativa aos fluidos convencionais, melhorando a transferência de calor e as propriedades térmicas, fatores importantes para o melhor desempenho desses coletores. O presente trabalho tem como objetivo o estudo do nanofluido Al_2O_3 -água no fenômeno de ebulição e como esse processo influencia as características superficiais, como o ângulo de contato e a rugosidade. Nos testes foram utilizadas duas superfícies de cobre com diferentes rugosidades, que foram nanoestruturadas pelo processo de ebulição da solução Al_2O_3 -água para duas concentrações diferentes. As superfícies foram submetidas a ensaios metalográficos, de molhabilidade e de rugosidade permitindo a avaliação das modificações estruturais, topográficas e químicas das superfícies. Os resultados mostraram que o processo de ebulição do nanofluido leva à deposição de uma nanocamada sobre a superfície capaz de reduzir drasticamente o ângulo de contato, aumentando sua molhabilidade. Verificou-se que a rugosidade da superfície e o ângulo de contato são funções da concentração do nanofluido e das condições originais da superfície. À medida que a concentração aumentou a rugosidade da superfície também aumentou. Já para o ângulo de contato tem-se o efeito inverso, diminuindo à medida que a concentração do nanofluido aumentou. O aumento/degradação do coeficiente de transferência de calor mostrou-se dependente da concentração do nanofluido e da rugosidade original da superfície aquecida.

Palavras-chave: Transferência de Calor, Ebulição Nucleada, Nanofluido, Rugosidade, Molhabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A crise ambiental tem conduzido grande parte das pesquisas ao redor do mundo à busca de novas formas de energia e ao desenvolvimento de tecnologias para aumentar a eficiência de equipamentos eletrônicos. A utilização de coletores solares para produção de energia elétrica possui grande aceitação devido à sua inesgotável fonte, gerando danos quase nulos ao meio ambiente. Nesse contexto, os coletores fotovoltaicos/térmicos vêm sendo estudados, pois possuem a capacidade de fornecer eletricidade e calor, melhorando assim o rendimento global da energia solar. Contudo, para sua utilização são necessários sistemas de arrefecimento e o uso de água ou ar como meios de remoção do calor já estão sendo utilizados em algumas aplicações.

A utilização de nanofluidos, como alternativa aos fluidos convencionais utilizados em processos de transferência de calor, vem mostrando que as modificações nas propriedades físicas do fluido base e as alterações causadas na superfície de aquecimento devido à deposição das nanopartículas são capazes de alterar parâmetros importantes do fenômeno de transferência de calor, como o coeficiente de transferência de calor (CTC) e o fluxo de calor crítico (FCC). Neste cenário, sua aplicação no arrefecimento de coletores solares se torna muito atrativo. Yousefi et al. (2012) realizaram um estudo para determinar a influência do nanofluido Al_2O_3 -água em coletores solares, utilizando 0,2 % e 0,4 % de fração mássica e nanopartículas da ordem de 15 nm, juntamente com um surfactante (X-100) para melhorar a estabilidade do fluido. Os resultados mostraram que, quando comparado ao mesmo equipamento utilizando água como fluido de trabalho, a eficiência máxima aumentou em 15,63 %. Paralelamente, Chougule et al. (2012) elaboraram um experimento com coletores solares utilizando tubos aquecidos de cobre, a fim de avaliar a influência do nanofluido na

eficiência média dos coletores. Três tubos idênticos foram instalados utilizando, como fluido de trabalho, nanotubo de carbono de 10 a 12 nm em concentrações volumétricas de 0,15%. Os autores reportaram que uma baixa quantidade de nanopartículas é capaz de gerar um ganho considerável na eficiência do coletor, com um aumento mínimo no custo de fabricação e operação, tornando assim a utilização de nanofluidos completamente viável.

Porém, para que os efeitos da aplicação do nanofluido em coletores solares sejam compreendidos, é necessário compreender todos os parâmetros envolvidos, bem como a sua influência no fenômeno de transferência de calor. Para tal, vários estudos vêm sendo conduzidos a fim de determinar como a variação das propriedades do nanofluido afeta o processo de transferência de calor. Theofanous (2002), Cheng et al. (2008) e Kwark et al. (2011) mostraram resultados satisfatórios realizando alterações na rugosidade da superfície aquecedora e na adição de nanopartículas ao fluido base de refrigeração. Shahmoradi et al. (2013) realizaram testes com Al_2O_3 -água em ebulição sobre superfície de cobre com 130 mm de diâmetro. Seus resultados mostraram uma relação entre o tamanho das nanopartículas e a rugosidade média da área de aquecimento, sendo que, quando o diâmetro é muito maior que a rugosidade média, há a formação de uma fina camada de vapor nas microcavidades resultantes, aumentando consideravelmente a resistência térmica da junção e degradando consideravelmente o CTC.

Zhang et al. (2015) realizaram estudos sobre a interação fluido/superfície e mostraram que o revestimento da superfície aquecida também é uma alternativa viável para melhorar o processo de transferência de calor. Ao aplicar uma camada nanoestruturada em uma superfície limpa de cobre, observou-se uma redução à zero do ângulo de contato da água, aumentando a molhabilidade. Assim, foi possível estabelecer uma relação da molhabilidade com a variação da rugosidade e a espessura da nanocamada depositada. Lee et al. (2014) verificaram uma variação do ângulo de contato da água e do butanol em superfícies de cobre e titânio sem deposição e, também, em superfícies com deposição por meio do processo de ebulição. Antes da realização das medidas, todas as superfícies passaram por um período de 8 horas em ebulição e seus ângulos de contato apresentaram valores menores do que os medidos em superfícies que não passaram pelo mesmo procedimento. Os autores justificaram a variação como consequência de uma reação química entre o fluido e a superfície, que altera a molhabilidade e, por conseguinte, influencia na transferência de calor. Forrest et al. (2010) também já havia obtido resultados similares, obtendo ângulos de contato em superfícies imediatamente após a realização do processo de ebulição. Os testes foram realizados com água em superfícies de aço inoxidável, que inicialmente apresentaram valores dentro do esperado. Após a ebulição de Al_2O_3 -água com diferentes concentrações notou-se uma queda no valor do ângulo de contato, indicando um aumento drástico na molhabilidade da superfície. A disparidade dos resultados, além dos fatores já conhecidos, se dá também pelas alterações químicas devido à nanodeposição.

Apesar do grande número de resultados concretos apresentados ao longo dos últimos anos (Vafaei et al., 2014), ressalta-se que ainda há uma complexa relação entre a densidade de nucleação de sítios ativos, molhabilidade e rugosidade sendo que, com o aumento da molhabilidade aumenta-se a possibilidade do preenchimento das microcavidades presentes na superfície aquecida, levando a um decréscimo na densidade de sítios de nucleação ativos. O principal efeito da deposição da nanocamada é a alteração na rugosidade superficial, o que interfere diretamente nos sítios de nucleação. Nolan et al. (2013) utilizaram uma técnica de eletrodeposição e observaram que, para superfícies nanoestruturadas, houve um aumento de 33 % no CTC quando comparado com superfícies sem deposição. Segundo os autores, esse comportamento é devido ao aumento na densidade de sítios de nucleação, resultante da modificação imposta pela nanocamada depositada.

Os resultados contraditórios obtidos por White et al. (2010) e Kathivaran et al. (2009) vão de encontro com a ideia de que os ganhos obtidos no processo de transferência de calor, com a utilização de nanofluidos, são exclusivamente devido ao valor elevado da condutividade térmica desses fluidos. White et al. (2010) realizaram estudos com TiO_2 , nanopartícula de baixa condutividade térmica, e observaram um aumento no CTC. Já Kathivaran et al. (2009) utilizaram nanopartículas de cobre, consideradas de alta condutividade térmica se comparada ao TiO_2 , e observaram uma deterioração no CTC. Tais resultados sugerem que a condutividade térmica da nanocamada não é o fator responsável pelo aumento/degradação da transferência de calor, mas sim, a interação do nanofluido/superfície por meio da modificação da rugosidade e da molhabilidade das superfícies em questão.

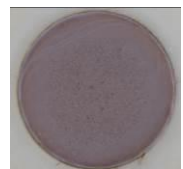
Como mostrado acima, a rugosidade resultante do processo de deposição e a variação no ângulo de contato das superfícies nanoestruturadas possuem uma influência direta, porém ainda não muito compreendida, no coeficiente de troca de calor (CTC) e no fluxo de calor crítico (FCC). Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo o estudo do nanofluido Al_2O_3 -água no fenômeno de ebulição e a influência desse sobre as características superficiais, como o ângulo de contato e a rugosidade.

2. METODOLOGIA

A Tab. 1 contém a descrição das seis superfícies testadas, sendo: uma superfície lisa (SL), uma superfície rugosa (SR), duas lisas com deposição de nanopartículas (para baixa e alta concentração, SL-BC e SL-AC, respectivamente) e duas superfícies rugosas com deposição de nanopartículas (para baixa e alta concentração, SR-BC e SR-AC, respectivamente). As superfícies nanoestruturadas foram produzidas pela deposição de nanopartículas de alumina por meio da ebulição do nanofluido de Al_2O_3 -água deionizada.

As superfícies lisas foram obtidas através do polimento utilizando um composto abrasivo de óxido de alumínio e as superfícies rugosas por meio de lixa #600, correspondendo a uma rugosidade R_a , de 0,05 μm e 0,23 μm , respectivamente. Antes do processo de deposição, todas as superfícies foram limpas com acetona.

Tabela 1. Descrição das superfícies testadas no presente estudo.

Superfícies	Descrição	Aspecto superficial
Superfície Lisa (SL)	Superfície Lisa sem deposição.	
Superfície Rugosa (SR)	Superfície rugosa sem deposição.	
SL-Baixa Concentração (SL-BC)	Superfície lisa com deposição de alumina via processo de ebulição de Al ₂ O ₃ -água. 0,029 g/l de concentração de nanofluido.	
SL-Alta Concentração (SL-AC)	Superfície lisa com deposição de alumina via processo de ebulição de Al ₂ O ₃ -água. 0,29 g/l de concentração de nanofluido.	
SR-Baixa Concentração (SR-BC)	Superfície rugosa com deposição alumina via processo de ebulição de Al ₂ O ₃ -água. 0,029 g/l de concentração de nanofluido.	
SR-Alta Concentração (SR-AC)	Superfície rugosa com deposição alumina via processo de ebulição de Al ₂ O ₃ -água. 0,29 g/l de concentração de nanofluido.	

O processo de nanoestruturação foi por meio da ebulição do nanofluido Al₂O₃-água, aplicando fluxos de calor crescente, de 100 kW/m² à 800 kW/m². As superfícies nanoestruturadas foram preparadas com duas concentrações mássicas de 0,029 g/l (correspondendo à baixa concentração) e 0,29 g/l (correspondendo à alta concentração), a fim de verificar a influência da espessura da nanocamada depositada e seu efeito sobre a molhabilidade e rugosidade.

2.1. Caracterização da superfície de teste

Antes e após cada ensaio, diferentes técnicas foram utilizadas para obter as características superficiais:

- I. Informação estrutural e química por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- II. Rugosidade média da superfície (R_a), com a mesma área de digitalização para todas as superfícies, por meio de um rugosímetro;
- III. Ângulos de contato estáticos medidos através da análise de imagens de uma gota séssil usando o aparato experimental mostrado na Fig. 1, com a seguinte metodologia: as imagens foram analisadas por meio de um software de pós-processamento de imagens.

O equipamento utilizado para medir o ângulo de contato estático e dinâmico consiste em uma seção de testes, uma câmera com lente macro, uma fonte de luz de LED verde, um difusor de luz e uma placa de alumínio (na qual a superfície de testes foi fixada). O equipamento permite medições do ângulo estático, de avanço e de recuo inclinando a seção de testes até o início do movimento da gota.

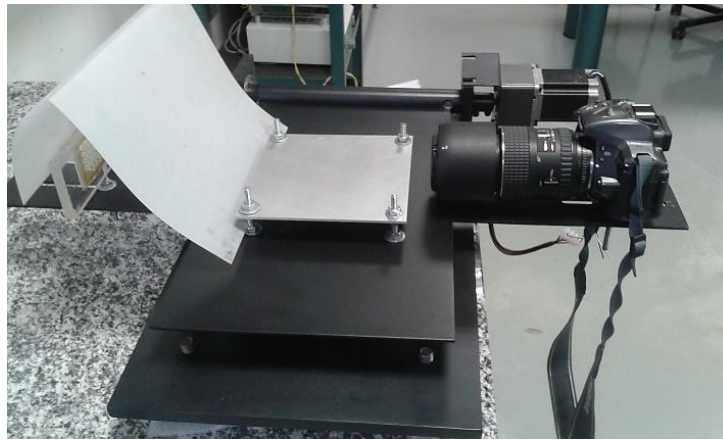


Figura 1. Aparato experimental desenvolvido para a medição do ângulo de contato.

O processo de calibração, baseado em Netto et al. (2013) e em Kiyomura et al. (2015), foi validado por comparação com ângulos previamente conhecidos. Corpos semi-esféricos de vidro foram usados, com formas semelhantes à imagem 2D da gota posicionada na seção de testes, como pode ser visto na Fig. 2.

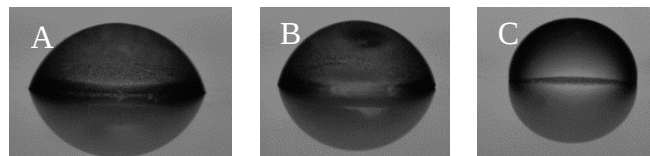


Figura 2. Corpos de prova semiesféricos sobre a seção teste para validar as medidas de ângulo de contato.

Três operadores distintos analisaram cada imagem e mediram o ângulo de contato usando software de pós-processamento de imagens. A Tab. 2 compara o ângulo de contato com base nas medições e o valor estimado a partir de relações geométricas. O baixo valor do erro médio absoluto confirma que o presente método de análise é válido.

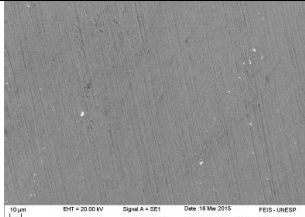
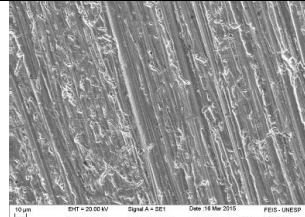
Tabela 2. Resultado da medida do ângulo de contato estático para os corpos de prova semiesféricos.

	A	B	C
Operador 1	76,90	81,56	93,92
Operador 2	74,69	80,68	94,86
Operador 3	76,45	80,50	94,51
Valor Médio	76,02	80,92	94,43
$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{\theta_{calc} - \theta_{exp}}{\theta_{calc}} \right $	1,04%	0,97%	0,47%

3. RESULTADOS

A Tab. 3 mostra a caracterização das superfícies lisa (SL) e rugosa (SR). As imagens obtidas pelo MEV mostram algumas irregularidades topográficas para SR comparadas a SL. A análise química (EDX) mostrou a predominância de Cu e material residual (óxido de alumínio).

Tabela 3. Resultados para a caracterização das superfícies lisa e rugosa.

Técnicas				SL		SR																			
MEV																									
R _a		0,05 μm		0,23 μm																					
EDX		<table><tr><th>Elemento</th><th>Massa (%)</th></tr><tr><td>C</td><td>2,94</td></tr><tr><td>O</td><td>1,77</td></tr><tr><td>Al</td><td>0,69</td></tr><tr><td>Cu</td><td>94,60</td></tr></table>		Elemento	Massa (%)	C	2,94	O	1,77	Al	0,69	Cu	94,60	<table><tr><th>Elemento</th><th>Massa (%)</th></tr><tr><td>C</td><td>4,43</td></tr><tr><td>O</td><td>1,67</td></tr><tr><td>Al</td><td>0,52</td></tr><tr><td>Cu</td><td>93,37</td></tr></table>		Elemento	Massa (%)	C	4,43	O	1,67	Al	0,52	Cu	93,37
Elemento	Massa (%)																								
C	2,94																								
O	1,77																								
Al	0,69																								
Cu	94,60																								
Elemento	Massa (%)																								
C	4,43																								
O	1,67																								
Al	0,52																								
Cu	93,37																								

Os resultados para a caracterização das superfícies nanoestruturadas, obtido por processo de ebulição do nanofluido Al_2O_3 -água com diferentes concentrações mássicas, mostram aspectos microestruturais com diferentes tamanhos de grãos e porosidades (Tab. 4 e 5). Para todas as superfícies nanoestruturadas, a análise química revela a presença de oxigênio e alumínio, em diferentes quantidades, o que já era esperado devido à diferença de concentrações. Como pode ser visto, para as superfícies que sofreram deposição para baixas concentrações (0,029 g/l) predomina a presença de cobre, ou seja, a camada depositada é menos espessa. Já para as amostras com deposição a alta concentração (0,29 g/l) a presença de oxigênio e alumínio são consideravelmente maiores, demonstrando uma camada mais espessa sobre a superfície de teste.

Pode-se observar um aumento no valor da rugosidade superficial para todas as amostras nanoestruturadas em comparação com aquelas sem a deposição de nanopartículas, tanto para superfícies lisas e rugosas.

Tabela 4. Caracterização da superfície lisa e rugosa com a deposição de nanopartículas (via processo de ebulição de 0,029 g/l de Al_2O_3 -água).

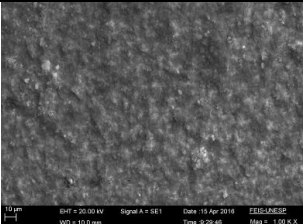
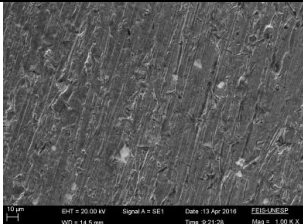
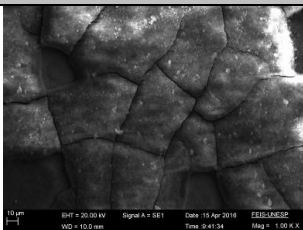
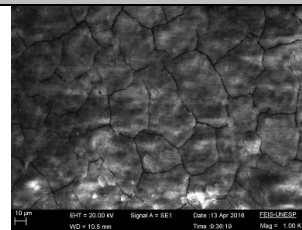
Técnicas	SL	SR																
MEV																		
R _a	0,25 µm	0,26 µm																
EDX	<table><tr><th>Elemento</th><th>Massa (%)</th></tr><tr><td>O</td><td>22,82</td></tr><tr><td>Al</td><td>16,23</td></tr><tr><td>Cu</td><td>60,95</td></tr></table>	Elemento	Massa (%)	O	22,82	Al	16,23	Cu	60,95	<table><tr><th>Elemento</th><th>Massa (%)</th></tr><tr><td>O</td><td>6,30</td></tr><tr><td>Al</td><td>3,50</td></tr><tr><td>Cu</td><td>90,20</td></tr></table>	Elemento	Massa (%)	O	6,30	Al	3,50	Cu	90,20
Elemento	Massa (%)																	
O	22,82																	
Al	16,23																	
Cu	60,95																	
Elemento	Massa (%)																	
O	6,30																	
Al	3,50																	
Cu	90,20																	

Tabela 5. Caracterização da superfície lisa e rugosa com a deposição de nanopartículas (via processo de ebulição de 0,29 g/l de Al_2O_3 -água).

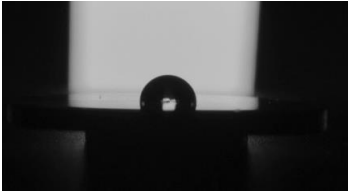
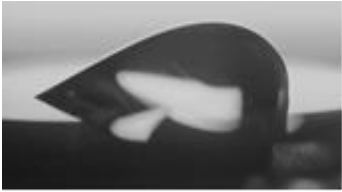
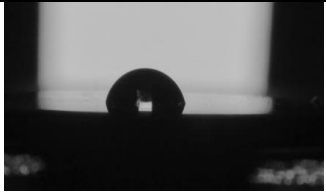
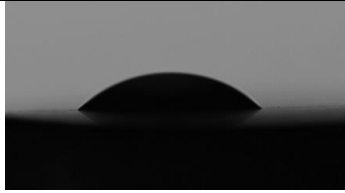
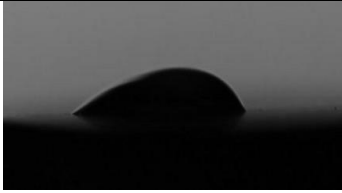
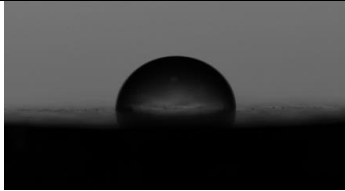
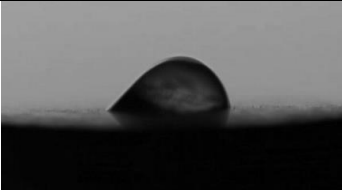
Técnicas	SL-AC	SR-AC																
MEV																		
R _a	0,61	0,68																
EDX	<table> <tr> <th>Elemento</th> <th>Massa (%)</th> </tr> <tr> <td>O</td> <td>48,67</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>41,68</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>9,65</td> </tr> </table>	Elemento	Massa (%)	O	48,67	Al	41,68	Cu	9,65	<table> <tr> <th>Elemento</th> <th>Massa (%)</th> </tr> <tr> <td>O</td> <td>53,24</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>44,67</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>2,09</td> </tr> </table>	Elemento	Massa (%)	O	53,24	Al	44,67	Cu	2,09
Elemento	Massa (%)																	
O	48,67																	
Al	41,68																	
Cu	9,65																	
Elemento	Massa (%)																	
O	53,24																	
Al	44,67																	
Cu	2,09																	

As medições de ângulo de contato estático indicaram que, para ambas as superfícies lisas e rugosas, à medida que a concentração do nanofluido aumentou o ângulo de contato estático diminuiu, indicando um aumento na molhabilidade.

As amostras de SL apresentaram um comportamento hidrofóbico, isto é, com um ângulo de contato estático maior do que 90° . Todas as superfícies com deposição de nanopartículas apresentaram um comportamento hidrofílico (baixos valores de ângulo de contato estático), sendo que as amostras com alta concentração apresentaram um comportamento totalmente molhante (com ângulos de contato menor que 10°), alterações provavelmente originadas pelos aumentos na rugosidade observados. Para estes casos, não foi possível verificar a histerese do ângulo de contato (ângulos de avanço e recuo).

Na Tab. 6 é possível observar os valores dos ângulos estático e dinâmico das amostras analisadas no presente estudo.

Tabela 6. Resultados do ângulo de contato para todas as superfícies testadas.

Superfície	Estático	Avanço / Recuo
SL	 95°	 93° / 23°
SR	 75°	 80° / 4°
SL-BC	 42°	 62° / 21°
SR-BC	 82°	 83° / 36°
SL-AC	 < 10°	Amostra considerada completamente molhante.
SR-AC	 < 10°	Amostra considerada completamente molhante.

De acordo com Ahmed e Hamed (2012), a interação entre a rugosidade da superfície e a nanocamada formada por deposição das nanopartículas depende da concentração do nanofluido. As imagens do MEV mostram que à medida que a concentração aumenta, a deposição das nanopartículas na superfície é maior acarretando em um aumento nas irregularidades e microestruturas superficiais (rugosidade). A SL-BC tem apenas algumas nanopartículas aderidas à superfície após o processo de ebulição do nanofluido, enquanto a SL-AC apresenta uma camada homogênea com ranhuras em micro-escala. Este comportamento também é observado para SR-BC em comparação com a SR-AC. Cabe ressaltar também, que as nanopartículas de alumina possuem uma densidade menor se comparadas com a de outros materiais base para fabricação de nanofluidos, o que possivelmente gera uma taxa de deposição menor para baixas concentrações.

Na Fig. 3 tem-se a curva $h \times q''$ para a ebulição da água e do nanofluido Al_2O_3 – água (em baixa e alta concentração) sobre ambas as superfícies lisa e rugosa. Altas concentrações de nanofluido apresentaram menores coeficientes de transferência de calor se comparados com os de baixa concentração e principalmente, quando comparados com os valores obtidos para a água. Este comportamento é devido a nanocamada formada pela deposição das nanopartículas durante o processo de ebulição do nanofluido. Quanto maior a concentração do nanofluido mais espessa é a nanocamada depositada, e consequentemente maior é a resistência térmica, deteriorando o CTC. Este comportamento pode ser melhor observado ao se comparar os valores de CTC para as superfícies lisas, nas quais o uso

do nanofluido aumentou consideravelmente a rugosidade superficial porém, para altas concentrações, as perdas relacionadas à formação da resistência térmica devido à nanocamada sobrepõem aos ganhos devido ao aumento da rugosidade.

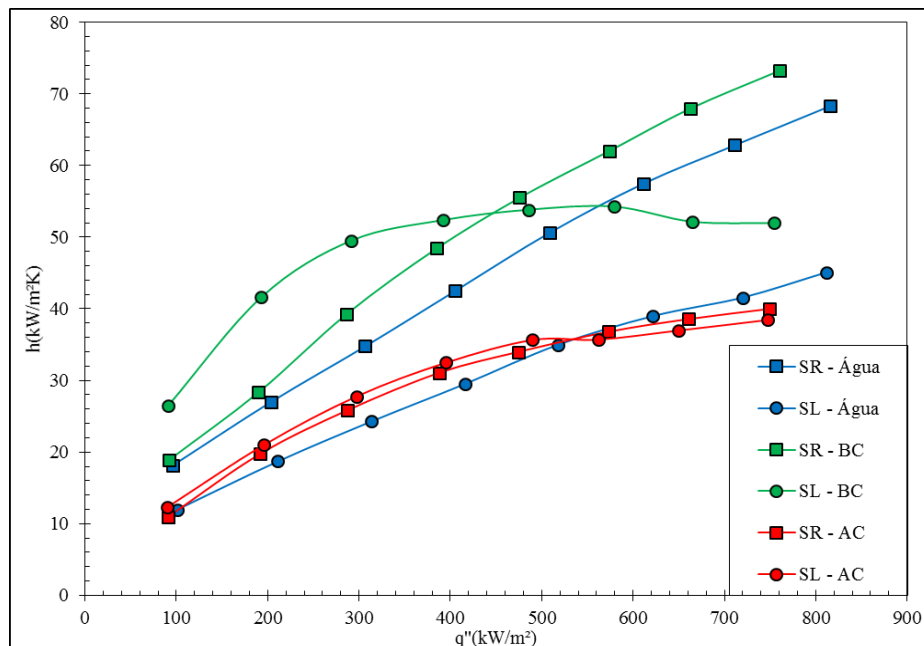


Figura 3. Curvas $h \times q''$ para a ebulição da água, do Al_2O_3 -água em baixa concentração (BC) e do Al_2O_3 -água em alta concentração (AC) sobre superfícies lisa e rugosa.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizada uma análise da deposição de Al_2O_3 -água sobre superfícies de cobre com diferentes valores de rugosidade. Foram testados diferentes valores de concentração do nanofluido a fim de analisar o efeito deste sobre o ângulo de contato e sobre as características superficiais, como a rugosidade. Após o processo de deposição por técnica de ebulição do nanofluido foram realizadas as caracterizações metalográficas, de rugosidade e de molhabilidade. Os principais resultados são os seguintes:

- A rugosidade das superfícies nanoestruturadas é uma função da concentração do nanofluido e da condição original da superfície. À medida que a concentração mássica aumenta a rugosidade da superfície também aumenta;
- A nanocamada depositada sobre a superfície de teste após o processo de ebulição do nanofluido acarreta em um aumento notável na molhabilidade, observado pela diminuição no ângulo de contato estático. Para baixa concentração, independente da rugosidade original da superfície, o ângulo de contato teve valores próximos daqueles para as superfícies sem deposição. Isso provavelmente é devido à baixa aderência da alumina no cobre como mostrado nas imagens dos ensaios metalográficos;
- A nanocamada formada por deposição de nanopartículas afeta tanto a rugosidade e quanto a molhabilidade. Observa-se que a nanocamada tem uma influência maior na molhabilidade da superfície do que a rugosidade da superfície original.

Baseados na presente análise metalográfica, de rugosidade e de molhabilidade, bem como nos resultados experimentais para ebulição em piscina utilizando as superfícies testadas neste estudo, será possível avaliar quais mecanismos têm maior influência sobre o coeficiente de transferência de calor.

5. AGREDECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio financeiro fornecido pelo PPGEM – UNESP/FEIS, Conselho Nacional de Tecnologia e Desenvolvimento Científico do Brasil (Concessão CNPq número 458702/2014-5), FAPESP (Concessões números 2013/15431-7, 2014/07949-9, 2014/19497-5 e 2015/04025-3). Os autores estendem ainda sua gratidão a Profa. Dra. Maria de Fátima da Silva e ao Sr. Marcelo Parise do NFA/Instituto de Física – Universidade de Brasília por fornecerem o nanofluido para a realização do presente estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, O. and Hamed, M. S., Experimental investigation of the effect of particle deposition on pool boiling of nanofluids. Int. J Heat Mass Transfer, 55, pp. 3423-3436, 2012.

- Cheng L, Bandarra Filho EP, Thome Jr, Nanofluid Two-Phase Flow and Thermal Physics: A New Research Frontier of Nanotechnology and Its Challenges, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 8(7), pp: 3315-3332, 2008.
- Chougule SS, Pise AT, Madane PA. Performance of nanofluid-charged solar water heater by solar tracking system. In: *Proceedings of IEEE international conference on advances in engineering, science and management (ICAESM)*; 2012. p. 247–53.
- Forrest, E., Williamson, J. Buongiorno, L.W. Hu, M. Rubner, R. Cohen, Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings, *Int. J. Heat Mass Transfer* 53 (2010) 58–67.
- Heitich, L.V., Passos, J.C., Cardoso, E.M., Silva, M.F., Klein, A.N., 2014. Nucleate boiling of water using nanostructured surfaces. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol 36, pp 181-192.
- Kathiravan, R., Kumar, R., Gupta, A., Chandra, R., 2009. Characterization and pool boiling heat transfer studies of nanofluids. *J. Heat Transfer* 131, 0819021–0819028.
- Kiyomura, I. S., Nascimento, F. J., Cunha, A. P. and Cardoso, E. M. Analysis of the influence of surface roughness and nanoparticle concentration on the contact angle. *Proceedings of 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 2015.
- Kwark, S.M., Amaya, M., You, S.M. Pool Boiling Heat Transfer Characteristics Of Nanocoating In Various Working Fluids. 27th IEEE SEMI-THERM Symposium. San Jose, CA USA, 2011. 146-154.
- L. Zhang, et al., Influence of heater thermal capacity on bubble dynamics and heat transfer in nucleate pool boiling, *Applied Thermal Engineering* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.080>.
- Lee, C. Y., Zhang, B. J., Kim, K. J., Influence of heated surfaces and fluids on pool boiling heat transfer, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.07.012>.
- Nolan, E., Rioux, R., Jiang, P.X., Peterson, G. P., Calvin Hong Li, 2013. Experimental study of contact angle and active nucleation site distribution on nanostructure modified copper surface in pool boiling heat transfer enhancement, *Heat Transfer Research*, Volume 44, pp 115-131.
- Souza, R. R., Passos, J.C., Cardoso, E.M., 2014. Influence of nanoparticle size and gap size on nucleate boiling using HFE7100. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 59, pp. 195.
- Theofanous T., The boiling crisis phenomenon Part II: dryout dynamics and burnout, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 26(6-7), pp. 793-810, 2002.
- Vafaei, S., Tasciuc, T. B., Role of nanoparticles on nanofluid boiling phenomenon: Nanoparticle deposition, *Chemical Engineering Research and Design*, 92, 842-856.
- White, S.B., Shih, A.J., Pipe, K.P., 2010. Effects of nanoparticle layering on nanofluid and base fluid pool boiling heat transfer from a horizontal surface under atmospheric pressure. *J. Appl. Phys.* 107, 1143021–1143026.
- Yousefi T, Veysi F, Shojaeizadeh E, Zinadini S. An experimental investigation on the effect of Al₂O₃-H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. *Renew Energy* 2012;39:293–8.
- Z. Shahmoradi, et al. Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.06.006>.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho

NANOPARTICLES DEPOSITION BY AL₂O₃-WATER BOILING ON COPPER SURFACES TO IMPROVE THE WETTABILITY AND SURFACE ROUGHNESS

Marcos Antonio de Souza Peloso Junior, marcosspeloso@gmail.com¹

Alex P. da Cunha, eng.alexpcunha@gmail.com¹

Leonardo L. Manetti, lemanetti@gmail.com¹

Igor S. Kiyomura, igorseicho@gmail.com¹

Elaine Maria Cardoso, elainemaria@dem.feis.unesp.br¹

¹UNESP - Univ Estadual Paulista - Department of Mechanical Engineering, Av. Brasil Centro, 56, 15385-000 Ilha Solteira, SP, Brazil

Abstract. *The solar collectors have been standing out by your capacity of product electric and thermic energy simultaneously, however yours operating parameters required a large capacity of refrigeration. In this way, the use of nanofluid as refrigerant fluid could be a good alternative to conventional fluids, improving the heat transfer rate and the thermal properties, which are important parameters in enhancing the efficiency of solar systems. The main goal of this study is to analyze the Al_2O_3 -water nanofluid in the boiling process and how this influences the surface characteristics, as contact angle and surface roughness. The study was performed on copper surfaces with two different roughness values, nanostructured by boiling nanofluid process using two different nanofluids concentration. After the deposition process, the surfaces were submitted to metallographic, roughness and wettability analysis. The results showed that the nanolayer formed on the surface by the nanofluid boiling process decreases the contact angle, i.e, increases the wettability. Both surface roughness and contact angle showed to be a function of nanofluid concentration and original surface condition. The enhancement/degradation of the heat transfer coefficient is dependent on nanofluid concentration and surface roughness.*

Keywords: *Heat Transfer, Nucleate Boiling, Nanofluid, Roughness, Wettability.*