

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 18/02/2024.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

IGOR SEICHO KIYOMURA

**INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM EBULIÇÃO EM
PISCINA POR MEIO DE SUPERFÍCIES NANOESTRUTURADAS
HIERARQUICAMENTE**

Ilha Solteira

2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

IGOR SEICHO KIYOMURA

**INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM EBULIÇÃO EM
PISCINA POR MEIO DE SUPERFÍCIES NANOESTRUTURADAS
HIERARQUICAMENTE**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos
para obtenção do título de Doutor em Engenharia
Mecânica. Especialidade: Ciências Térmicas.

Profa. Dra. Elaine Maria Cardoso

Orientadora

Prof. Dr. Gherhardt Ribatski

Coorientador

Ilha Solteira

2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

K62i Kiyomura, Igor Seicho.
Intensificação da transferência de calor em ebulição em piscina por meio de superfícies nanoestruturadas hierarquicamente / Igor Seicho Kiyomura. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
96 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2022

Orientador: Elaine Maria Cardoso
Coorientador: Gherhardt Ribatski
Inclui bibliografia

1. Transferência de calor. 2. Ebulição nucleada. 3. Superfícies nanoestruturadas hierarquicamente. 4. Ebulição em piscina. 5. Dinâmica de bolhas.


Raiane da Silva Santos

Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Unidade Técnica de Biblioteca e Documentação
CNPq - 0000

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM EBULIÇÃO EM PISCINA
POR MEIO DE SUPERFÍCIES NANOESTRUTURADAS HIERARQUICAMENTE

AUTOR: IGOR SEICHO KIYOMURA

ORIENTADORA: ELAINE MARIA CARDOSO

COORIENTADOR: GHERHARDT RIBATSKI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA
MECÂNICA, área: Ciências Térmicas pela Comissão Examinadora:

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "ELAINE MARIA CARDOSO".

Profa. Dra. ELAINE MARIA CARDOSO (Participação Virtual)

Coordenadoria de Curso de Engenharia Aeronáutica / Faculdade de Engenharia - Câmpus de São João da Boa Vista

Prof. Dr. JOAO BATISTA CAMPOS SILVA (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. JEFERSON DIEHL DE OLIVEIRA (Participação Virtual)

FSG - Centro Universitário da Serra Gaúcha

Prof. Dr. MARCO HIROSHI NAKA (Participação Virtual)

Engenharia Mecânica / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DIAS DOS SANTOS (Participação Virtual)

Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR

Ilha Solteira, 18 de fevereiro de 2022

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Elaine Maria Cardoso não apenas pela excelente orientação proporcionada durante a elaboração deste trabalho, mas também pela paciência e dedicação.

Ao Professor Doutor Gherhardt Ribatski pela coorientação e ao seu grupo de pesquisa da EESC-USP, pelo compartilhamento de experiências laboratoriais.

Aos meus pais Arnaldo Kiyomura e Sandra Cristina Arakaki Kiyomura, pelo esforço e dedicação para me proporcionar bons estudos e me incentivar nas boas escolhas.

A minha irmã Ingrid Tiheme Kiyomura pela amizade e companheirismo.

Aos meus amigos e companheiros de laboratório: Leonardo Lachi Manetti, Reinaldo Rodrigues de Souza e Bruno Alves Andrade, não só pelo auxílio nas atividades laboratoriais, mas também pela amizade.

Aos meus amigos, Luís Alberto Schwind Pedroso Stussi da Silva Pereira e Bruna Viana Ito, que estavam presentes em todos os momentos de alegria e dificuldades.

A todos os amigos do Departamento e da área de Ciências Térmica que tive o prazer de conviver e que me proporcionaram momentos de distração.

Ao Professor Doutor Alessandro Roger Rodrigues (EESC – USP) e ao Professor Doutor Ricardo Arai (IFSP – São Carlos), responsáveis pela fabricação das superfícies, possibilitando a realização deste trabalho.

Aos técnicos de laboratórios: Gilberto Antônio de Brito, Elton José de Souza e Edvaldo Silva de Araújo por todo o auxílio e orientação nas técnicas necessárias para a construção da bancada experimental.

Aos professores integrantes da banca examinadora, pelos comentários e sugestões apresentados ao trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo número 88882.433639/2019-01, pelo apoio financeiro e institucional.

“A ciência não é somente compatível com a espiritualidade; ela é uma fonte profunda de espiritualidade.”
(Carl Sagan)

Esta tese é inteiramente dedicada
aos meus pais, Sandra e Arnaldo.

Os dois maiores incentivadores
das realizações dos meus sonhos.

RESUMO

Uma forma promissora de aumentar o coeficiente de transferência de calor (CTC) e o fluxo de calor crítico (FCC) é modificar a morfologia da superfície de aquecimento usando técnicas de usinagem, revestimento e processos químicos. Superfícies microestruturadas, ou seja, superfícies com a presença de micropilares fornecem pequenas perturbações no líquido, afetando a dinâmica das bolhas de vapor, aumentando a área da superfície de aquecimento e alterando o escoamento do fluido. Este trabalho teve como objetivo o estudo experimental da ebulição em piscina utilizando, como superfícies aquecedoras, superfícies de cobre modificadas por meio de técnicas de micro e nanofabricação. Os fluidos de trabalho utilizados foram a água deionizada ou HFE-7100 (ambos à pressão atmosférica e à temperatura de saturação). As matrizes quadradas de micropilares foram fabricadas em uma superfície plana de cobre por meio do processo de microusinagem. Microaletas quadradas de diferentes escalas de comprimento (isto é, altura e comprimento lateral) foram uniformemente espaçadas na superfície plana de cobre. As superfícies microaletadas intensificam o CTC em comparação com a superfície plana, sendo o número de aletas o principal fator para o aumento do CTC; se o número de aletas for constante, quanto maior a rugosidade efetiva, maior o desempenho de transferência de calor. Além disso, ocorre o aumento da capilaridade, a qual facilita o retorno do líquido para as regiões mais quentes (*hot spots*), postergando o fluxo de calor de secagem em comparação com a superfície plana. Para as superfícies nanoestruturadas hierarquicamente (combinação de superfícies microaletadas e nanoestruturação por meio da deposição de nanopartículas pelo processo de ebulição do nanofluido de alumina) e uso de HFE-7100 como fluido de trabalho, houve uma melhora no CTC de até 65% em comparação com as superfícies microaletadas. Tal melhora é devido ao aumento da densidade de sítios de nucleação e à dinâmica das bolhas de vapor. A deposição de nanopartículas em superfícies microaletadas aumenta a capacidade de absorção de líquidos, melhorando o remolhamento da superfície e postergando a ocorrência da secagem (maiores valores de fluxo de calor máximo).

Palavras-chave: ebulição em piscina; nanoestruturação hierárquica; transferência de calor; dinâmica da bolha de vapor.

ABSTRACT

One promising way to enhance the heat transfer coefficient (HTC) and the critical heat flux (CHF) is to modify the heating surface morphology by machining techniques, coating, and chemical processes. Microstructured surfaces, *i.e.*, surfaces with micropillars on the surface, provide small perturbations in the liquid, affecting the vapor bubbles dynamic. These structures increase the heating surface area and change the fluid flow. Microfins can have different shapes and sizes and be arranged in different patterns to improve heat transfer. This study aimed to evaluate experimentally the thermal performance of pool boiling on modified surfaces by using micro/nano-fabrication techniques and deionized water or HFE-7100 as working fluids (at atmospheric pressure and saturation temperature). The square-micro pillar arrays were etched on a plain copper surface through the micro-milling process. Squares microfins of different length scales (*i.e.*, height and side length) were uniformly spaced on the plain copper surface. Microfin surfaces intensify the HTC compared to the plain surface and the number of fins is the main factor for the HTC enhancement; if the number of microfins is constant, the larger the effective roughness the higher the heat transfer performance. Additionally, the capillary-wicking ability increases and improves the HTC and the dryout heat flux due to the prevention of hotspots in the microfin surface. The thermal performance of the HFE-7100 pool boiling on surfaces with a combination of microfins and nanostructured surfaces through nanoparticle deposition indicates a significant enhancement in the HTC (up to 65% compared to the microtextured surfaces) due to improved density of nucleation site and vapor bubble dynamics. The nanoparticle deposition on microtextured surfaces enhances the liquid absorption capacity, improving the surface's rewetting and delaying the dryout occurrence (improving the maximum heat flux values).

Keywords: pool boiling; hierarchically structured surfaces; heat transfer; vapor bubble dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da curva de ebulição.....	23
Figura 2 - Cavidades com gás aprisionado servindo como sítios de nucleação de bolhas de vapor.....	24
Figura 3 – Esquema e imagens das superfícies testadas por Nirgure <i>et al.</i> (2017).....	26
Figura 4 - MEV (a) micropilares cilíndricos; (b) micropilares quadrados; (c) microparedes; (d) rugosidade aleatória.....	27
Figura 5 - Desenho esquemático e imagens das superfícies testadas por Gouda <i>et al.</i> (2018).....	28
Figura 6 - Imagens de MEV das superfícies testadas por Kong <i>et al.</i> (2018).....	28
Figura 7 - Imagens das superfícies testadas por Cheng <i>et al.</i> (2009).....	31
Figura 8 - Imagens esquemáticas e MEV das camadas de Cu ₂ O tipo fractal no fio de NiCr em função do tempo de eletrodeposição: (a) t = 3s e (b) t = 100s. A escala da imagem 10 µm.	31
Figura 9 - Desenho esquemático da deposição de nanopartículas em superfície rugosa e superfície lisa.....	33
Figura 10 - Imagens de MEV dos quatro tipos de matrizes de microaletas formadas em superfície de silício com e sem nanoestruturação.	35
Figura 11 - Imagens de MEV das superfícies de testes: (a) Microfuros, (b) micropilares, (c) microfuros com adição de nanofios e (d) micropilares com adição de nanofios.	36
Figura 12 - Imagens de MEV das superfícies testadas por Cao <i>et al.</i> (2021).....	37
Figura 13 - Desenho esquemático das superfícies microestruturadas.....	43
Figura 14 - Caracterização dimensional e geométrica das amostras microestruturadas.	44
Figura 15 - Caracterização dimensional e geométrica das amostras nanoestruturadas hierarquicamente.	45
Figura 16 - Esquema do aparato experimental utilizado para medição da capilaridade.	46
Figura 17 - Ensaio de capilaridade com as diferentes superfícies testadas e acetona como fluido de teste.	47

Figura 18 - Esquema do aparato experimental utilizado para medição do ângulo de contato (molhabilidade).	48
Figura 19 - Desenho esquemático do aparato experimental.	49
Figura 20 - Câmara de ebulição.	49
Figura 21 - (a) seção de teste em vista isométrica explodida e (b) montagem da seção de testes.	51
Figura 22 - Exemplo de perfis de temperatura linear usados para estimar o fluxo de calor e a temperatura da superfície.	53
Figura 23 - Fluxo de calor estimado por meio do perfil linear de temperatura versus fluxo de calor imposto para (a) e (c) água deionizada e (b) e (d) HFE-7100.	53
Figura 24 - Valores médios das incertezas experimentais para ambos os fluidos de trabalho e superfícies testadas.	55
Figura 25 - Validação da bancada experimental utilizando água como fluido de trabalho.	56
Figura 26 - Validação da bancada experimental utilizando HFE-7100 como fluido de trabalho.	57
Figura 27 - Desempenho do coeficiente de transferência de calor (h vs q'') em condições de saturação para superfícies microaletadas e superfície plana. (a) água deionizada; (b) HFE-7100.	58
Figura 28 - Curva de ebulição em piscina (q'' vs ΔT_{sat}) em condições de saturação para superfícies microaletadas e superfície plana. (a) água deionizada; (b) HFE-7100.	59
Figura 29 - Parâmetros de superfícies microaletadas que influenciam na transferência de calor por ebulição em piscina.	60
Figura 30 - Fator de intensificação da transferência de calor por ebulição em piscina em função do fluxo de calor para as superfícies microaletadas. (a) água deionizada; (b) HFE-7100.	62
Figura 31 - Visualização da dinâmica das bolhas de vapor para diferentes valores de fluxo de calor, para superfície plana e superfícies microestruturadas. (a) água deionizada; (b) HFE-7100.	63
Figura 32 - Desenho esquemático dos regimes de dinâmica de crescimento das bolhas de vapor.	65

Figura 33 - Curva de ebulição para superfície plana (superfície de referência) e para as superfícies hierárquicas, usando HFE-7100 como fluido de trabalho.	67
Figura 34 – Coeficiente de transferência de calor para superfície plana (superfície de referência) e para as superfícies hierárquicas, usando HFE-7100 como fluido de trabalho.	69
Figura 35 – Fator de intensificação da transferência de calor para as superfícies hierárquicas, usando HFE-7100 como fluido de trabalho.....	69
Figura 36 - Comparação do CTC entre as superfícies hierárquicas e a respectiva microestruturada, usando HFE-7100 como fluido de trabalho.	70
Figura 37 - Visualização do fenômeno de ebulição para superfícies nanoestruturadas hierarquicamente e respectivas microestruturadas.....	71
Figura 38 – Coeficiente de transferência de calor para superfície plana (superfície de referência) e para as superfícies hierárquicas, usando água como fluido de trabalho.	74
Figura 39 - Comparação do CTC entre as superfícies hierárquicas e a respectiva microestruturada, usando água como fluido de trabalho.....	74
Figura 40 - Visualização do fenômeno de ebulição usando água como fluido de trabalho para superfícies nanoestruturadas hierarquicamente e respectivas microestruturadas.....	75
Figura B.1 - Esquema do termopar de referência utilizado para a calibração dos demais termopares.	88
Figura C.1 - Repetibilidade das curvas de CTC para superfícies nanoestruturadas hierarquicamente, usando HFE-7100 como fluido de trabalho.....	90
Figura C.2 - Repetibilidade das curvas de CTC para superfícies nanoestruturadas hierarquicamente, usando água como fluido de trabalho.	90
Tabela A.1 - Propriedades termofísicas dos fluidos de trabalho utilizados no presente estudo.	87
Tabela B.1 - Incertezas experimentais das temperaturas.	89

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	17
1.1 Motivação	17
1.2 Objetivos	19
1.3 Organização do Texto	20
1.4 Produção Acadêmica.....	21
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 Regime de Ebulição Nucleada	23
2.2 Influência de Superfícies Microestruturadas	25
2.3 Influência das Superfícies Nanoestruturadas	29
2.4 Influência de Superfícies Nanoestruturadas Hierarquicamente	34
2.5 Correlações para Ebulição Nucleada	37
2.5.1 Correlação de Rohsenow (1952).....	38
2.5.2 Correlação de Cooper (1984)	39
2.5.3 Correlação de Ribatski e Jabardo (2003).....	39
2.5.4 Correlação de Kiyomura <i>et al.</i> (2017).....	40
2.6 Resumo da revisão da literatura	40
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	42
3.1 Descrição das Superfícies de Aquecimento	42
3.1.1 Caracterização das Superfícies de Aquecimento.....	44
3.2 Descrição do Aparato Experimental	48
3.3 Procedimento Experimental.....	51

3.3.1 Redução dos dados experimentais e incerteza de medição.....	52
3.4 Validação do Aparato Experimental.....	55
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES PARA ebulição EM SUPERFÍCIES MICROESTRUTURADAS.....	58
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES PARA ebulição EM SUPERFÍCIES NANOESTRUTURADAS HIERARQUICAMENTE	67
5.1 Ensaios de Ebulição com HFE-7100	67
5.2 Ensaios de Ebulição com Água	73
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
APÊNDICE a.....	87
A.1 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS FLUIDOS DE TRABALHO	87
APÊNDICE B	88
B.1 CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	88
APÊNDICE C	90
APÊNDICE D	91

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p	Calor específico	[J/kg·K]
C_{sf}	Coeficiente Superfície-fluido	[-]
D	Largura das aletas	[μm]
D_d	Diâmetro de desprendimento de bolha	[m]
f_w	Parâmetro do material da superfície aquecida	[-]
h	Coeficiente de transferência de calor	[W/m²·K]
h_{lv}	Calor latente de evaporação	[kJ/kg]
H	Altura das aletas	[μm]
k	Condutividade térmica	[W/m·K]
k_{Cu}	Condutividade térmica do cobre	[W/m·K]
L	Distância do bloco de cobre	[m]
L_c	Comprimento corrigido da aleta	[m]
M	Massa molar	[kg/kmol]
n	Expoente de Stephan	[-]
P	Pressão	[Pa]
Pr	Número de Prandtl	[-]
p_r	Pressão reduzida	[-]
q''_{medido}	Fluxo de calor do bloco de cobre	[W/m²]
R_a	Rugosidade média aritmética	[μm]
R_p	Raio máximo do pico de rugosidade da superfície	[μm]
S	Espaçamento entre as aletas	[μm]
T	Temperatura	[K]
u_i	Incerteza	

Símbolos Gregos

ΔT	Diferença de temperatura	[K]
θ	Ângulo de contato estático	[°]
μ	Viscosidade dinâmica	[kg/m·s]
ρ	Massa específica	[kg/m³]
σ	Tensão superficial	[N/m]

Subíndices

<i>1, 2, ou 3</i>	Posição dos termopares
<i>atm</i>	Condição atmosférica
<i>HTE</i>	Taxa de aumento no coeficiente de transferência e calor
<i>l ou liq</i>	Líquido
<i>sat</i>	Condição de saturação
<i>vap</i>	Vapor
<i>s</i>	Superfície

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Com a miniaturização de dispositivos eletrônicos, a funcionalidade de tais dispositivos aumentou consideravelmente. Os recentes desenvolvimentos na área de microssistemas tornaram possível o aumento da capacidade de processamento de diversos dispositivos eletrônicos com redução contínua do tamanho destes. Entretanto, devido ao avanço da tecnologia e ao crescimento da capacidade de processamento, o calor dissipado por unidade de área em tais dispositivos aumentou de forma significativa. Por consequência, o desenvolvimento de sistemas de arrefecimento cada vez mais eficazes e igualmente miniaturizados tornou-se uma prioridade, a fim de preservar a integridade física e a funcionalidade de tais dispositivos (DEMIR *et al.*, 2014).

A ebulição é o processo de mudança de estado líquido para o vapor, no qual bolhas de vapor são formadas por meio do contato do líquido com uma superfície sólida superaquecida, *i.e.*, a temperatura da superfície deve ser maior que a temperatura de saturação do líquido (CAREY, 1992). Os mecanismos que regem o fenômeno de ebulição dependem da dinâmica de crescimento e partida das bolhas de vapor e, está por sua vez, depende de fatores como: configurações geométricas da superfície (como por exemplo, espessura, diâmetro e rugosidade da superfície), propriedades termofísicas do fluido de trabalho, dentre outros (SEADER; HENDLEY, 2006). Uma das motivações para realizar pesquisas sobre o fenômeno de ebulição deve-se às altas taxas de transferência de calor para baixos valores de superaquecimento da superfície (5 a 15 °C), quando comparadas aos demais processos de transferência de calor.

A técnica de tratar/modificar a superfície aquecedora, de forma a variar suas características mediante algum tratamento mecânico ou químico (superfícies nano e/ou microestruturadas), tem sido proposta para aumentar tanto o coeficiente de transferência de calor (CTC) quanto o fluxo de calor crítico (FCC). Segundo alguns autores (WEN, 2012; VAFAEI, 2015), a melhora no desempenho térmico se deve ao aumento da rugosidade que acarreta o aumento da área superficial de transferência de calor e ao mesmo tempo no acréscimo de sítios de nucleação ativos. Diferentes autores (BUONGIORNO *et al.*, 2014; SOUZA *et al.*, 2014; KIYOMURA *et al.*, 2017; MANETTI *et al.*, 2017), que aplicaram a técnica das superfícies nanoestruturadas em ebulição em piscina, concordam ao mencionar

que essas superfícies produzem um acréscimo no FCC. Porém, ainda existem divergências em relação à porcentagem e ao mecanismo responsável por esse aumento.

Yang e Maa (1984) foram pioneiros ao avaliarem o efeito da deposição de nanopartículas sobre uma superfície aquecida na transferência de calor por ebulição em piscina. Seus resultados indicaram uma mudança na camada limite térmica causada pela presença da nanocamada depositada. Desde então, pesquisadores conduzem experimentos para ebulição em piscina usando superfícies nanoestruturadas a fim de compreender os mecanismos físicos responsáveis pelo aumento/degradação do CTC (LU *et al.*, 2016; KIYOMURA *et al.*, 2017; DAS, SAHA E BHAUMIK, 2017; BOCK *et al.*, 2020; DORAN *et al.*, 2020).

O comportamento do nanofluido de alumina (Al_2O_3 -água deionizada) tem sido muito estudado em ebulição em piscina (DAS; PUTRA; ROETZEL, 2003; BANG; CHANG, 2005; KWARAK *et al.*, 2010; AHMED; HAMED, 2012; VAFAEI, 2015). A grande maioria dos autores observou que a modificação no CTC na ebulição em piscina foi devido à alteração da morfologia da superfície aquecedora. A camada formada pela deposição das nanopartículas sobre a superfície pode fornecer uma resistência térmica e reduzir a formação de bolhas de vapor. No entanto, segundo os mesmos autores, esta mesma camada pode aumentar o número de sítios de nucleação e, conseqüentemente, aumentar o CTC. Outro fator que interfere no desempenho do CTC durante a ebulição de nanofluidos é a sua concentração, sendo que baixas concentrações possuem melhor desempenho (maiores valores de CTC).

Superfícies microestruturadas, ou seja, superfícies com a presença de micropilares (protuberâncias) na superfície proporcionam pequenas perturbações no líquido, auxiliando na dinâmica das bolhas de vapor (micro convecção), além de possibilitar o aumento da densidade de sítios de nucleação ativos levando a um aumento do CTC. Por outro lado, com base nos modelos de Wenzel (1936) e Cassie-Baxter (1944), as micro e nanoestruturas alteram o ângulo de contato e a molhabilidade, parâmetros que também controlam o comportamento hidrodinâmico das bolhas de vapor sobre a superfície aquecida (KANDLIKAR, 2001). Portanto, a influência das nano e microestruturas, bem como a molhabilidade superficial, no processo de nucleação e partida das bolhas de vapor e, conseqüentemente, no coeficiente de transferência de calor, necessita ser mais bem compreendida.

As micro/nanoaletas, pilares e/ou pinos são estruturas geralmente feitas de silício, mas também podem ser feitas de outro material termicamente condutor, auxiliando na remoção de calor. Estas estruturas projetam-se para fora da superfície, aumentando a área da

superfície aquecedora e alterando o escoamento do fluido. As microaletas podem ter diferentes formas e tamanhos e, também, podem estar dispostas em diferentes padrões a fim de melhorar a transferência de calor (TULLIUS, 2013; LIANG; MUDAWAR, 2019; LI *et al.*, 2020).

O desenvolvimento de superfícies nanoestruturadas hierarquicamente (superfícies microestruturadas submetidas a um processo de nanoestruturação) para o aumento da transferência de calor em ebulição requer uma compreensão dos mecanismos envolvidos na macro e microescala. Durante o processo de ebulição, a transferência de calor resulta de uma combinação de efeitos como: condução transiente, evaporação da microcamada e microconvecção devido à nucleação, crescimento e partida das bolhas de vapor (KIM, 2009).

Ressalta-se que o incremento da transferência de calor para as superfícies micro e nanoestruturadas depende de diversas variáveis como: as dimensões das microestruturas, a porosidade da superfície nanoestruturada, o ângulo de inclinação e a distribuição das microestruturas sobre a superfície (por exemplo, micro/nano pilares aleatórios ou alinhados). Essas variáveis devem ser estudadas individualmente a fim de compreender os mecanismos responsáveis pelo aumento do CTC.

Da literatura observou-se que diferentes técnicas podem ser utilizadas para modificar/tratar a superfície aquecedora a fim de melhorar o CTC. Estas originaram superfícies: microestruturadas por meio de superfícies microaletadas (HONDA; WEI, 2004); nanoestruturadas pela presença de nanoaletas (DEMIR *et al.*, 2014); microestruturadas pela presença de microcanais abertos (JAIKUMAR; KANDLIKAR, 2016); e, nanoestruturadas por deposição de nanopartículas (KIYOMURA *et al.*, 2017). Porém, até o momento têm-se poucos estudos referentes à combinação de superfícies microaletadas e nanoestruturação (por meio da deposição de nanopartículas pelo processo de ebulição de nanofluido com diferentes concentrações volumétricas) (SHRESTHA *et al.*, 2020; XIE *et al.*, 2021; PARK *et al.*, 2021).

1.2 Objetivos

Dentro do contexto apresentado anteriormente, insere-se o presente trabalho, cujo objetivo é a análise da transferência de calor por ebulição em piscina em superfícies nanoestruturadas hierarquicamente, incluindo a visualização do fenômeno por meio de uma câmera de alta velocidade. Para tal, objetivos específicos a seguir foram propostos:

- Analisar como a variação da geometria de uma superfície microaletada e parâmetros como largura, altura e espaçamento entre as microaletas influenciam na transferência de calor;
- Analisar qual o comportamento da transferência de calor quando combinadas as técnicas de superfície microestruturadas e nanoestruturação via processo de ebulição de nanofluido de alumina;
- Avaliar como o coeficiente de transferência de calor e o fluxo de calor máximo são influenciados com o uso das superfícies nanoestruturadas hierarquicamente.

Desta forma, o presente trabalho propicia novas percepções do papel das superfícies micro e nanoestruturadas no processo de ebulição e, conseqüentemente, no CTC, possibilitando estabelecer diretrizes básicas de projeto para novas tecnologias de superfície com alta capacidade de remoção de calor para aplicações avançadas no gerenciamento térmico de dispositivos eletrônicos em geral.

1.3 Organização do Texto

Este trabalho está distribuído na escrita de seis capítulos. O presente capítulo é introdutório no qual a motivação e objetivos são apresentados, além das contribuições acadêmicas geradas pela pesquisa realizada. O segundo capítulo traz uma revisão dos conceitos físicos necessários para entendimento do trabalho com uma revisão da literatura mais específica. O terceiro capítulo apresenta a metodologia do trabalho experimental desde a construção da bancada, calibração de instrumentos e validação do aparato experimental usado nos ensaios de ebulição. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e discussão sobre ensaios de ebulição usando superfícies microestruturadas. No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos e discussão sobre ensaios de ebulição usando superfícies nanoestruturadas hierarquicamente. Por fim, no sexto capítulo, uma conclusão é realizada e sugestões de trabalho futuros são apresentadas.

Os apêndices complementam os capítulos apresentados com detalhes do trabalho, mas que não necessitam de leitura obrigatória para entendimento desta tese.

1.4 Produção Acadêmica

Até o momento, o trabalho realizado contribuiu diretamente para duas publicações em revistas internacionais indexadas e quatro artigos em congressos e conferências da área.

Publicações em revistas internacionais:

1. SANTOS FILHO, E. ; **KIYOMURA, I. S.** ; ANDRADE, B. A. ; CARDOSO, E. M. . Pool boiling performance of HFE-7100 on hierarchically structured surfaces. CASE STUDIES IN THERMAL ENGINEERING, v. 28, p. 101536, 2021.
2. **KIYOMURA, I. S.** ; NUNES, J. M. ; SOUZA, R. R. ; GAJGHATE, S. S. ; BHAUMIK, S. ; CARDOSO, E. M. . Effect of microfin surfaces on boiling heat transfer using HFE-7100 as working fluid. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 42, p. 1-13, 2020.

Publicações em congressos e conferências:

1. MANETTI, L.L, Kiyomura, I. S., Cardoso, E. M. Porous and Non-Porous Microstructured Surfaces for Boiling Heat Transfer Applications. *In: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2018), 2018, Águas de Lindóia. Anais [...] Águas de Lindóia: ABCM, 2018.*
2. Kiyomura, I. S. ; Souza, R. R. ; Cardoso, E. M. . Pool boiling heat transfer intensification by using micro-fin surfaces. *In: 25th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2019, 2019, Uberlândia. Anais [...] Uberlândia: ABCM, 2019.*
3. Kiyomura, I. S. ; Souza, R. R. ; Cardoso, E. M. . Intensification of pool boiling heat transfer by using micro-fin surfaces. *In: 10th International Conference on Multiphase Flow - ICMF2019, 2019, Rio de Janeiro. Anais [...] Rio de Janeiro: ABCM, 2019.*
4. SILVA, I. I. ; Kiyomura, I. S. ; Souza, R. R. ; Cardoso, E. M. . Novas técnicas de modificações superficiais para aumento da transferência de calor por ebulição. *In: 71ª Reunião Anual da SBPC, 2019, Campo Grande – MS. Disponível em: <<http://livro.sbpcnet.org.br/71ra/>>. ISSN: 2176-1221.*

5. KIYOMURA, I. S. ; NUNES, J. M. ; SOUZA, R. R. ; CARDOSO, E. M. . Pool boiling heat transfer enhancement using micro-fin surfaces and dielectric fluids. *In*: 5th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC), 2020, New Orleans. Proceedings of 5th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC), 2020. v. 2. p. 15-23.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo analisar experimentalmente o desempenho térmico de diferentes superfícies modificadas por meio de técnicas de micro e nanofabricação. As superfícies híbridas analisadas consistiram em uma combinação de superfícies microaletadas e nanoestruturação por meio da deposição de nanopartículas pelo processo de ebulição do nanofluido de alumina. Os ensaios de ebulição foram realizados utilizando HFE-7100 ou água (ambos em condições de saturação). Com base nos resultados e nas discussões apresentadas, as principais conclusões, a seguir, podem ser tiradas:

✓ As superfícies microaletadas intensificam o CTC em comparação com a superfície plana e o número de aletas demonstra ser o principal fator para esse incremento (em média, para a água houve um aumento de 58% e para o HFE-7100 este aumento foi de 116% em comparação à superfície plana); a presença de gases aprisionados na base das aletas reduz a energia necessária para o início da ebulição nucleada (ONB - *onset nucleate boiling*), aumentando o número de sítios de nucleação e, conseqüentemente, o desempenho da transferência de calor;

✓ Outro parâmetro analisado é a rugosidade efetiva, que tem menos influência no comportamento do CTC do que o número de aletas. Se o número de microaletas for constante, quanto maior a rugosidade efetiva, maior o desempenho de transferência de calor;

✓ Além disso, a capacidade de absorção capilar aumenta para superfícies microaletadas em comparação com superfícies planas, melhorando o CTC e postergando o fluxo de calor de secagem devido à prevenção de *hot spots* sobre a superfície de aquecimento. Assim, o comportamento térmico da superfície é função da morfologia da superfície e da capilaridade;

✓ A visualização do fenômeno mostra que a dinâmica de crescimento e partida das bolhas de vapor em superfícies microaletadas e superfícies planas são diferentes e podem ser divididas em diferentes regimes; para superfícies microaletadas, os regimes de geração e de aglomeração são predominantes para todo o intervalo de fluxo de calor aplicado;

✓ Os testes com superfícies nanoestruturadas hierarquicamente, utilizando HFE-7100 como fluido de trabalho, indicam um incremento significativo do CTC (em média 240% em relação à superfície plana); as superfícies também foram capazes de poster-

gar a ocorrência de secagem, apresentando um aumento do fluxo de calor de secagem de 32% em relação à superfície plana;

✓ Para os ensaios de ebulição com HFE-7100, as superfícies hierárquicas melhoram significativamente o CTC em comparação com as microaletadas (considerando todas as amostras, um aumento de até 65% foi observado). O menor superaquecimento para as superfícies hierárquicas usando HFE-7100 como fluido de trabalho se deve ao aumento da capacidade de absorção de líquido pela estrutura porosa e à maior densidade de sítios de nucleação, a qual afeta a dinâmica de formação, crescimento e partida das bolhas de vapor;

✓ As superfícies hierárquicas aumentam a absorção de líquidos em até 60% em relação às superfícies microaletadas. Tal comportamento promove o remolhamento da superfície, o que posterga o aparecimento de *hot spots* na superfície de aquecimento e garante um aumento de até 15% para o fluxo máximo de calor no caso dos ensaios com o fluido HFE-7100;

✓ Para os ensaios com água como fluido de trabalho, o processo de deposição de nanopartículas causou uma degradação no CTC quando comparado com sua respectiva superfície microestruturada. A baixa capilaridade do fluido (diferentemente do que se tem para o HFE-7100) impede que o líquido frio adjacente acesse as regiões quentes da superfície, o que acarreta num aumento no superaquecimento da mesma;

✓ A capacidade de absorção capilar tem papel essencial no comportamento do CTC e na prevenção de *hot spots* sobre a superfície de aquecimento. Assim, o comportamento térmico da superfície é função da sua morfologia e de sua capilaridade.

O comportamento da transferência de calor em ebulição em superfícies hierárquicas depende da morfologia original da superfície, do método de revestimento, do fluxo de calor aplicado e do comportamento da interação superfície-fluido. O presente trabalho indica que mais atenção deve ser dada em relação aos parâmetros físicos (relacionados à superfície e fluido de trabalho) e sua alteração devido à deposição de nanopartículas. Estudos futuros devem considerar ensaios de ebulição com diferentes nanofluidos e concentrações a fim de avaliar as características da camada depositada e sua influência no CTC e FCC. Além disso, é conveniente, do ponto de vista prático, desenvolver novas correlações para avaliar o CTC em superfícies hierárquicas, considerando parâmetros de interação superfície-fluido com base em um extenso banco de dados experimental.

REFERÊNCIAS

3M COMPANY. **3M Novec**: Engineered Fluid HFE-7100 for Heat Transfer. St Paul: 2022.

ABDOLLAHI, A.; SALIMPOUR, M. R.; ETESAMI, N. Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferrofluid. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 111, p. 1101-1110, 2017.

AHMED, O.; HAMED, M. S. Experimental investigation of the effect of particle deposition on pool boiling of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 55, n. 13-14, p. 3423-3436, 2012.

AHN, H. S.; SATHYAMURTHI, V.; BANERJEE, D. Pool boiling experiments on a nano-structured surface. **IEEE Transactions on components and packaging technologies**, New York, v. 32, n. 1, p. 156-165, 2009.

AKBARI, E.; GHEITAGHY, A. M.; SAFFARI, H.; HOSSEINALIPOUR, S. M. Effect of silver nanoparticle deposition in re-entrant inclined minichannel on bubble dynamics for pool boiling enhancement. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 82, p. 390-401, 2017.

BANG, I. C.; CHANG, S. H. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nanofluids from a plain surface in a pool. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 48, n. 12, p. 2407-2419, 2005.

BOCK, B. D.; BUCCI, M.; MARKIDES, C. N.; THOME, J. R.; MEYER, J. P. Pool boiling of refrigerants over nanostructured and roughened tubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 162, p. 120387, 2020.

BUONGIORNO, J.; CAHILL, D.G.; HIDROVO, C.H.; MOGHADDAM, S.; SCHIMIDT, A.J.; SHI, L. Micro and nanoscale measurement methods for phase change heat transfer on planar and structured surfaces. **Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering**, New York, 18, 270-287, 2014.

CAO, Z.; LIU, B.; PREGER, C.; ZHANG, Y.; WU, Z.; MESSING, M. E.; DEPPERT, K.; WEI, J.; SUNDÉN, B. **Nanoparticle-Assisted Pool Boiling Heat Transfer on Micro-Pin-Fin Surfaces**. [S. l.]: Langmuir, 2021.

CAO, Z.; WU, Z.; PHAM, A.; YANG, Y.; ABBOOD, S.; FALKMAN, P.; RUZGAS, T.; ALBÈR, C.; SUNDÉN, B. Pool boiling of HFE-7200 on nanoparticle-coating surfaces: Experiments and heat transfer analysis. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 133, p. 548-560, 2019.

CAO, Z.; WU, Z.; SUNDÉN, B. Heat transfer prediction and critical heat flux mechanism for pool boiling of NOVEC-649 on microporous copper surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 141, p. 818-834, 2019.

CARDOSO, E. M.; KANNENGIESER, O.; STUTZ, B.; PASSOS, J.C. FC72 and FC87 nucleate boiling inside a narrow horizontal space. **Experimental Thermal Fluid Science**, Philadelphia, v. 35, n. 6, p. 1038-1045, 2011.

CARDOSO, E. M.; PASSOS, J. C. Nucleate boiling of n-pentane in a horizontal confined space. **Heat Transfer Engineering**, New York, v. 34, p. 470-478, 2013.

CAREY, V. P. **Liquid-vapor phase-change phenomena: an introduction to the thermo-physics of vaporization and condensation processes in heat transfer Equipment**. London: Taylor & Francis, 1992.

CASSIE, A. B. D.; BAXTER, S. **Wettability of porous surfaces**. Cambridge: Transactions of the Faraday Society, 1944.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J.; KANOGLU, M. **Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem prática**. 4. ed. [S. l.] AMGH Editora, 2012.

CHEN, Y.; MO, D.; ZHAO, H.; DING, N.; LU, S. Pool boiling on the superhydrophilic surface with TiO₂ nanotube arrays. **Science in China Series E: Technological Sciences**, Beijing, v. 52, n. 6, p. 1596-1600, 2009.

CHU, I.; NO, H. C.; SONG, C. Visualization of boiling structure and critical heat flux phenomenon for a narrow heating surface in a horizontal pool of saturated water. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 62, p. 142-152, 2012.

COLEMAN, H. W.; STEELE JR, W. G. Uncertainty in a result determined from multiple variables. **Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers**, New York, v. 3, p. 61-83, 2009.

COOPER, M. G. Heat Flow Rates in Saturated Nucleate Pool Boiling-A Wide-Ranging Examination Using Reduced Properties. **Advances in Heat Transfer**, New York, v. 16, p. 157-239, 1984.

CUNHA, A.P.; MOGAJI, T.S.; SOUZA, R.R.; CARDOSO, E.M. A method for measuring contact angle and the influence of surface-fluid parameters on the boiling heat transfer performance, **ASME Journal Heat Transfer**, New York v. 142, n. 9, p. 091601, 2020.

DAS, S. K.; PUTRA, N.; ROETZEL, W. Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, Elmsford, v. 29, n. 8, p. 1237-1247, 2003.

DAS, S.; SAHA, B.; BHAUMIK, S. Experimental study of nucleate pool boiling heat transfer of water by surface functionalization with crystalline TiO₂ nanostructure. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 113, p. 1345 – 1357, 2017.

DEMIR, E.; IZCI, T.; ALAGOZ, A. S.; KARABACAK, T.; KOSAR, A. Effect of silicon nanorod length on horizontal nanostructured plates in pool boiling heat transfer with water. **International Journal of Thermal Sciences**, Paris, v. 82, p. 111-121, 2014.

DONG, L.; QUAN, X.; CHENG, P. An experimental investigation of enhanced pool boiling heat transfer from surfaces with micro/nanostructures. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 71, p. 189-196, 2014.

DORAN, B.; ZHANG, B.; WALKER, A.; PRATIK, K. C.; MENG, W. J.; MOORE, A. L. Experimental determination of the role of increased surface area in pool boiling from nanostructured surfaces. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 111, p. 109956, 2020.

DUAN, Z.; REN T.; DING, G. Suppression effects of microfin surface on the explosive boiling of liquefied gas under rapid depressurization. **Journal of Hazard Materials**, Amsterdam, v. 365, p. 375 - 385, 2019.

GAO, J.; LU, L. S.; SUN, J. W.; LIU, X. K.; TANG, B. Enhanced boiling performance of a nanoporous copper surface by electrodeposition and heat treatment. **Heat and Mass Transfer**, Heidelberg, v. 53, n. 3, p. 947-958, 2017.

GOUDA, R. K.; PATHAK, M.; KHAN, M. K. Pool boiling heat transfer enhancement with segmented finned microchannels structured surface. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 127, p. 39-50, 2018.

HONDA, H.; TAKAMASTU, H.; WEI, J. J. Enhanced boiling of FC-72 on silicon chips with micro-pin-fins and submicron-scale roughness. **Journal of Heat Transfer**, New York, v. 124, n. 2, p. 383-390, 2002.

HONDA, H.; WEI, J. J. Enhanced boiling heat transfer from electronic components by use of surface microstructures. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 28, p. 159 – 169, 2004.

JABARDO, J. M. S. Transferência de calor por ebulição e trocadores de calor bifásicos. *In: ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE EBULIÇÃO, CONDENSAÇÃO E ESCOAMENTO MULTIFÁSICO LÍQUIDO-GÁS - EBECOM*, 2008. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2008.

JAIKUMAR, A.; KANDLIKAR, S. G. Ultra-high pool boiling performance and effect of channel width with selectively coated open microchannels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 95, p. 795- 805, 2016.

KANDLIKAR, S. G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. **Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics**, Thessaloniki, p. 129-146, 2001.

KIM, J. Review of Nucleate Pool Boiling Bubble Heat Transfer Mechanisms, International. **Journal of Multiphase Flow**, Elmsford, v. 35, p. 1067–1076, 2009.

KIYOMURA, I. K.; MANETTI L.L.; CUNHA A.P.; RIBATSKI G.; CARDOSO E.M. An analysis of the effects of nanoparticles deposition on characteristics of the heating surface and on pool boiling of water, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 106, p. 666-674, 2016.

KONG, X.; ZHANG, Y.; WEI, J. Experimental study of pool boiling heat transfer on novel bistructured surfaces based on micro-pin-finned structure. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 91, p. 9-19, 2018.

KWARK, S. M.; KUMAR, R.; MORENO, G.; YOO, J.; YOU, S. M. Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 53, n. 5, p. 972-981, 2010.

- LEE, D.; KIM, T.; PARK, S.; LEE, S. S.; KO, S. H. Zinc oxide nanowire forest for pool boiling heat transfer. **Japanese Journal of Applied Physics**, Bristol, v. 51, n. 11S, p. 11PE11, 2012.
- LI, R.; HUANG, Z. A new CHF model for enhanced pool boiling heat transfer on surfaces with micro-scale roughness. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 109, p. 1084-1093, 2017.
- LIANG, G.; MUDAWAR, I. Review of pool boiling enhancement by surface modification. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 128, p. 892-933, 2019.
- MANETTI L.L.; MOGAJI T.S.; BECK P.A.; CARDOSO E.M. Evaluation of the heat transfer enhancement during pool boiling using low concentrations of Al₂O₃-water based nanofluid. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 87, p. 191–200, 2017.
- MANETTI, L. L.; CARDOSO, E. M. Review of the influence of nanofluids on the nucleate pool boiling. *In*: ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING - COBEM, 23rd., Rio de Janeiro, 2015. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2015.
- MANETTI, L. L.; MOITA, A. S. O. H.; DE SOUZA, R. R.; CARDOSO, E. M. Effect of copper foam thickness on pool boiling heat transfer of HFE-7100. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 152, p. 119547, 2020.
- MANETTI, L. L.; RIBATSKI, G.; DE SOUZA, R. R.; CARDOSO, E. M. Pool boiling heat transfer of HFE-7100 on metal foams. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 113, p. 110025, 2020.
- MOFFAT, R. J. Describing the uncertainties in experimental results. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 1, n. 1, p. 3-17, 1988.
- MOON, H. W.; YOON, Y. J.; PARK, J. H.; MYUNG, B. S.; KIM, D. E. Dynamic wetting and boiling characteristics on micro-structured and micro/nano hierarchically structured surfaces. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 74, p. 19-26, 2016.
- MORI, S.; UTAKA, Y. Critical heat flux enhancement by surface modification in a saturated pool boiling: a review. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 108, p. 2534-2557, 2017.
- NETTO, F.P.; MORAES, A. A. U.; RIBATSKI, U. The effects of the nanoparticle concentration and surface roughness on the contact angle of nanofluids. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING - COBEM, 2013, Ribeirão Preto. **Anais [...]** Ribeirão Preto: COBEM, 2013.
- NIKULIN, A.; KHLIYEVA, O.; LUKIANOV, N.; ZHELEZNY, V.; SEMENYUK, Y. Study of pool boiling process for the refrigerant R11, isopropanol and isopropanol/Al₂O₃ nanofluid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 118, p. 746-757, 2018.

NIRGUDE, V. V.; MODAK, M.; SHARMA, A. K.; SAHU, S. K. Experimental Study on Structured Surfaces for Nucleate Pool Boiling Enhancement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR ENGINEERING, 25th, [s. l.]. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2017. (American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2017).

NUKIYAMA, S. The maximum and minimum value of the q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure. **Journal Japan Society of mechanical Engineers**, Tokyo, v. 37, p. 367-374, 1934.

NUNES, J.M.; SOUZA, R.R.; RODRIGUES, A.R.; SAFAEI, M.R., CARDOSO, E.M. Influence of coated surfaces and gap size on boiling heat transfer of deionized water, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Heidelberg, v. 42, n. 3, p. 1-14, 2020.

PARK, C.; KIM, T.; KIM, Y. I.; ALDALBAHI, A.; HATSHAN, M. R.; AN, S.; YOON, S. S. Pool boiling enhancement using hierarchically structured ZnO nanowires grown via electrospraying and chemical bath deposition. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, p. 116553, 2021.

PIORO, I. L. Experimental evaluation of constants for the Rohsenow pool boiling correlation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 42, n. 11, p. 2003-2013, 1999.

RAHMAN, M. M.; MCCARTHY, M. Boiling enhancement on nanostructured surfaces with engineered variations in wettability and thermal conductivity. **Heat Transfer Engineering**, New York, v. 38, n. 14-15, p. 1285-1295, 2017.

RAHMAN, M. M.; OLCEROGLU, E.; MCCARTHY, M. Role of wickability on the critical heat flux of structured superhydrophilic surfaces. **Langmuir**, Washington, v. 30, n. 37, p. 11225-11234, 2014.

RAY, M.; DEB, S.; BHAUMIK, S. Pool boiling heat transfer of refrigerant R-134a on TiO₂ nano wire arrays surface. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 107, p. 1294-1303, 2016.

RIBATSKI, G., JABARDO, J. M. S. Experimental study of nucleate boiling of halocarbon refrigerants on cylindrical surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 46, p. 4439-4451, 2003.

ROHSENOW, W.M. A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids. **Journal of Heat Transfer**, New York, v.74, p. 969-976, 1952.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J. **Separation process principles**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

SEO, G.H.; HWANG, H.; YOON, J.; YEO, T.; SON, H. H.; JEONG, U.; JEUN, G.; CHOI, W.; KIM, S.J. Enhanced critical heat flux with single-walled carbon nanotubes bonded on metal surfaces, **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 60, p. 138-147, 2015.

SHRESTHA, R.; YU, B.; YANG, Q.; GONG, W.; SHEN, S. Hierarchical Micro-Nanostructured Surfaces for Isotropic/Anisotropic Liquid Transport. **Langmuir**, Washington, v. 36, n. 6, p. 1569-1573, 2020.

SOUZA, R.R.; PASSOS, J.C.; CARDOSO, E.M. Influence of nanoparticle size and gap size on nucleate boiling using HFE7100, **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v. 59, p. 195-201, 2014.

STEPHAN, K. **Heat transfer in condensation and boiling**. Berlin: Springer-Verlag, 1992.

TEODORI, E.; MOITA, A. S.; MOREIRA, A. L. N. Empirical and Modeling-Based Correlations for Pool Boiling on Microstructured Surfaces. **Interfacial Phenomena and Heat Transfer**, Danbury, v. 2, n. 3, p. 273–292, 2014.

VACHON, R. I.; NIX, G. H.; TANGER, G. E. Evaluation of constants for the Rohsenow pool-boiling correlation. **Journal of Heat Transfer**, New York, v. 90, n. 2, p. 239- 246, 1968.

VAFAEI, S. Nanofluid pool boiling heat transfer phenomenon. **Power Technology**, [s. l.], v. 277, p. 181–192, 2015.

WEN, D. Influence of nanoparticles on boiling heat transfer, **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 41 p. 2–9, 2012.

WEN, D.; DING, Y. Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications. **International Journal Heat Fluid Flow**, Philadelphia, v. 26, n. 6, p. 855–864, 2005.

WENZEL, R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water, **Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, v. 28, p. 988, 1936.

XIE, S.; JIANG, M.; KONG, H.; TONG, Q.; ZHAO, J. An experimental investigation on the pool boiling of multi-orientated hierarchical structured surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 164, p. 120595, 2021.

YANG, Y. M.; MAA, J. R. Boiling of suspension of solid particles in water. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 27, p. 145-147, 1984.

YAO, Z.; LU, Y.W.; KANDLIKAR, S. G. Effects of nanowire height on pool boiling performance of water on silicon chips. **International Journal of Thermal Sciences**, Paris, v. 50, n. 11, p. 2084-2090, 2011.

ZHANG, B. J.; GANGULY, R.; KIM, K. J.; LEE, C. Y. Control of pool boiling heat transfer through photo-induced wettability change of titania nanotube arrayed surface. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 81, p. 124-130, 2017.

ZHANG, L.; SHOJI, M. Nucleation site interaction in pool boiling on the artificial surface. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 46, n. 3, p. 513-522, 2003.

ZHONG, D.; LI, Z.; GUO, Z. Critical heat flux for downward-facing saturated pool boiling on pin fin surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 87, p. 201-211, 2015.

ZHOU, J.; QI, B.; WEI, J. Critical heat flux on heterogeneous fractal surfaces with micro-pin-fins in pool boiling Part I: The effects of distribution and subcooling. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 136, p. 1338-1348, 2019.