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
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB 8 - 9980

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

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:

Profa. Dra. ELAINE MARIA CARDOSO (Participaçao Virtual)
Coordenadoria de Curso de Engenharia Aeronáutica / Faculdade de Engenharia - Câmpus de São João da Boa Vista

Prof. Dr. JOAO BATISTA CAMPOS SILVA (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. JEFERSON DIEHL DE OLIVEIRA (Participaçao Virtual)
FSG - Centro Universitário da Serra Gaúcha

Prof. Dr. MARCO HIROSHI NAKA (Participaçao Virtual)
Engenharia Mecânica / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DIAS DOS SANTOS (Participaçao 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 mementos 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 *et al*. (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 *et al*. (2018). 28

Figura 6 - Imagens de MEV das superfícies testadas por Kong *et al*. (2018). 28

Figura 7 - Imagens das superfícies testadas por Cheng *et al*. (2009). 31

Figura 8 - Imagens esquemáticas e MEV das camadas de Cu_2O 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 *et al*. (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 *et al*. (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/m^2·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/m^2]
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	[º]
μ	Viscosidade dinâmica	[kg/m·s]
ρ	Massa específica	[kg/m^3]
σ	Tensão superficial	[N/m]

Subíndices

1, 2, ou 3	Posição dos termopares
atm	Condição atmosférica
HTE	Taxa de aumento no coeficiente de transferência e calor
l ou liq	Líquido
sat	Condição de saturação
vap	Vapor
s	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; KWARK *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, consequentemente, 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, consequentemente, 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, consequentemente, 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.

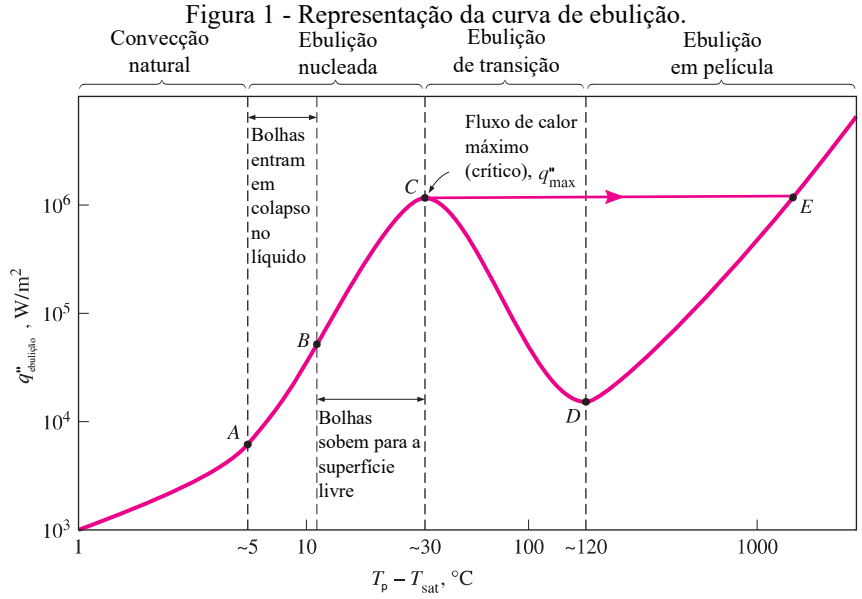
5. KIYOMURA, I. S. ; NUNES, J. M. ; SOUZA, R. R. ; CARDOSO, E. M. . Pool boiling heat transfer enhancement using micro-fin surfaces and dielectric fluids. *In:* 5th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC), 2020, New Orleans. Proceedings of 5th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC),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

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Regime de Ebulição Nucleada

Seguindo metodologias experimentais acerca do processo de ebulição, pode-se observar que tal processo é marcado por diferentes regimes de transferência de calor. Dessa forma, a curva de ebulição é determinada por meio da relação entre o fluxo de calor *q''* e o superaquecimento da superfície, ΔT_{sat}. Na Figura 1 encontra-se, em escala logarítmica, a variação do fluxo de calor transferido a um fluido de trabalho (água) em função do superaquecimento do mesmo em contato com uma superfície aquecida.

Figura 1 - Representação da curva de ebulição.



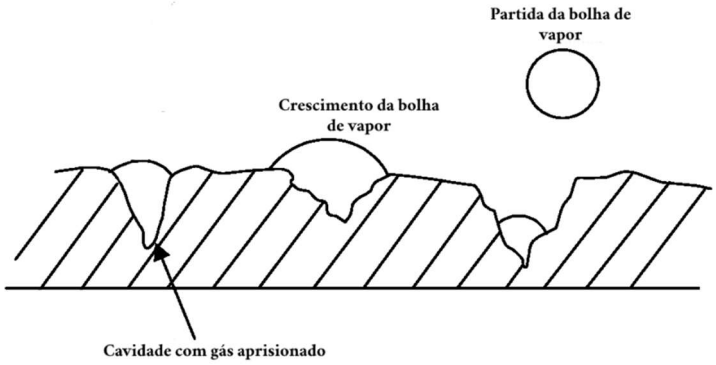
Fonte: Adaptada de Çengel, Ghajar e Kanoglu (2012).

O regime de ebulição nucleada (região AC) é caracterizado por um maior coeficiente de transferência de calor, sendo este da ordem de cinquenta vezes maior do que aquele encontrado em convecção monofásica forçada (ÇENGEL; GHAJAR; KANOGLU, 2012). O elevado valor do CTC é atribuído a diferentes efeitos, tais como: a transferência de calor latente devido à mudança de fase; a evaporação da microcamada (referente à evaporação de uma película de líquido superaquecido existente entre a bolha de vapor e a superfície aquecida); a microconvecção resultante do desprendimento das bolhas de vapor da superfície aquecida; a convecção natural; e a termocapilaridade ou correntes de Marangoni causadas pelos gradientes de tensão superficial na interface líquido-vapor associados ao movimento de líquido na parede aquecida (CARDOSO; PASSOS, 2013).

A partir da curva de ebulição foram desenvolvidos inúmeros modelos e correlações, com a finalidade de analisar o desempenho do coeficiente de transferência de calor em função do fluxo de calor, das propriedades termofísicas do fluido de trabalho, de parâmetros relacionados à combinação fluido-superfície e, também, às características morfológicas da superfície de aquecimento; de modo a quantificar e até mesmo predizer os ganhos de eficiência envolvendo o processo térmico de mudança de fase - ebulição (JABARDO, 2008).

O regime de ebulição nucleada é um processo de não equilíbrio, onde o líquido se encontra em um estado metaestável e necessita de uma leve perturbação/ativação para que se dê início à nucleação de bolhas. Essa perturbação vem de gases aprisionados em cavidades presentes em todas as superfícies reais, os chamados sítios de nucleação. Os sítios de nucleação podem ser sulcos, ranhuras ou impurezas nas superfícies (Figura 2) onde ocorre o surgimento/nucleação da bolha de vapor (CAREY 1992).

Figura 2 - Cavidades com gás aprisionado servindo como sítios de nucleação de bolhas de vapor.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Dessa forma, os sítios de nucleação podem interagir entre si, e como existem as bolhas de vapor formadas e o fluido ao seu redor, esses também interagem de forma: i) térmica, entre a bolha de vapor e a superfície aquecida; ii) térmica, entre os sítios de nucleação; iii) hidrodinâmica, entre as bolhas de vapor e o líquido; iv) hidrodinâmica, entre as bolhas de vapor (ZHANG; SHOJI, 2003). Observa-se, então, a forte influência de parâmetros como propriedades termofísicas do fluido de trabalho e da topografia e química da superfície de aquecimento (sendo a primeira a que desempenha o papel chave na formação da bolha de vapor).

2.2 Influência de Superfícies Microestruturadas

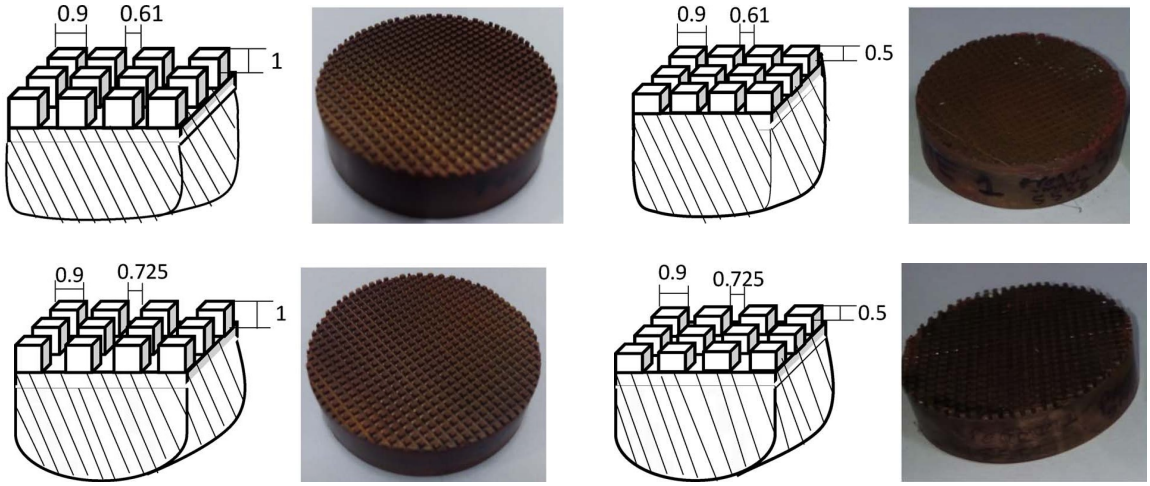
As técnicas de intensificação em microescala incluem: rugosidade da superfície; microaletas; microcanais abertos; revestimentos de partículas sinterizadas; revestimentos de grafite; túneis com cavidades reentrantes e estruturas microporosas dendríticas. O principal benefício dessas técnicas é o aumento da densidade de sítios ativos de nucleação, o que pode levar ao aumento do coeficiente de transferência de calor (LIANG; MUDAWAR, 2019).

A rugosidade da superfície de aquecimento tem um impacto significativo no desempenho de transferência de calor por ebulição. Em geral, o aumento da rugosidade pode formar inúmeras cavidades/sítios de nucleação que promovem o surgimento/nucleação de bolhas de vapor. Como resultado, tem-se uma redução significativa do superaquecimento da superfície, melhorando o desempenho térmico do sistema (LI *et al*., 2020).

Estudos realizados por Honda *et al*. (2002) analisaram os efeitos de superfícies microaletadas, com dimensões de 50 x 50 x 60 μm^3 e rugosidade média de 25 – 32 nm, na transferência de calor por ebulição em piscina utilizando FC-32 como fluido de trabalho. As microaletas foram fabricadas em uma superfície de silício. Seus resultados mostraram que a superfície microaletada foi eficaz em aumentar a transferência de calor por ebulição, principalmente na região de alto fluxo de calor.

Nirgude *et al*. (2017) analisaram experimentalmente superfícies estruturadas que se cruzam ortogonalmente com profundidade variável de 0,5 mm e 1,0 mm, e largura de 0,61 mm e 0,725 mm, fabricadas pelo processo de eletroerosão (Figura 3). Os autores estudaram o desempenho da transferência de calor por ebulição em piscina utilizando água ou álcool isopropílico como fluidos de trabalho. Os resultados experimentais demonstraram que a influência da geometria dos pilares na transferência de calor é significativa; os CTCs para a água e para o álcool isopropílico tiveram um aumento de 250% e 100%, respectivamente. Segundo os autores, a redução do superaquecimento das superfícies se dá pela melhora da interação vapor-líquido sobre a superfície.

Figura 3 – Esquema e imagens das superfícies testadas por Nirgure *et al*. (2017).



Fonte: Nirgude e Sahu (2017).

Li e Huang (2017) estudaram a ebulição em superfícies com rugosidade em micro-escala, incluindo micropilares, estruturas de microparedes e rugosidade aleatória (Figura 4). Com base nos resultados, os autores desenvolveram um modelo para o FCC que leva em consideração os efeitos da molhabilidade e capilaridade. O modelo consiste em um aperfeiçoamento no modelo de Kandlikar (2001) que leva em consideração o ângulo de contato estático. Este modelo possui um segundo termo que representa o fluxo de calor adicional referente à ebulição de líquido induzida por capilaridade, sendo representado na seguinte forma:

$$q_{li} = q_{Kandlicar} + q_{adicional} \tag{1}$$

na qual o fluxo de calor do modelo do Kandlikar (2001) é expresso como:

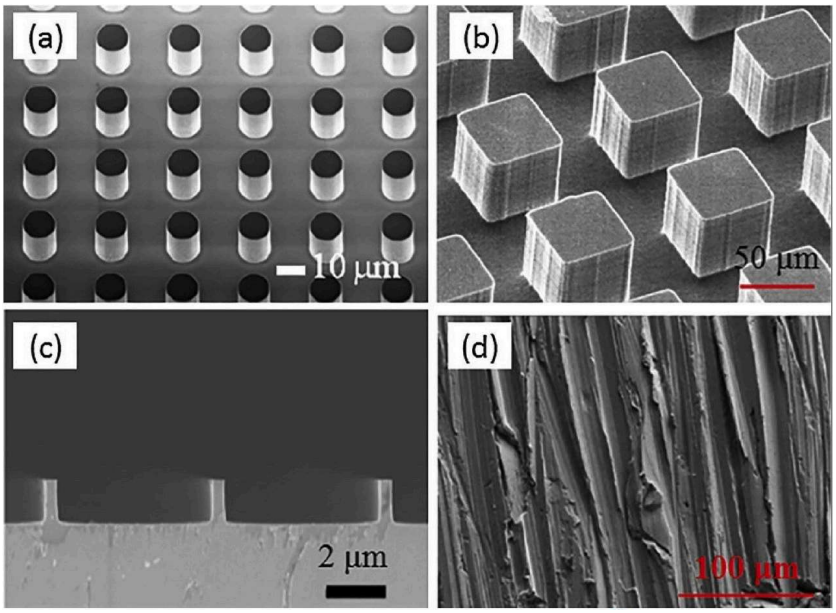
$$q"_k = S \,.\, \frac{1+\cos\theta°}{16}\left[\frac{2}{\pi}+\frac{\pi}{4}\,(1+\cos\theta°)\,.\cos\varphi\right]^{0,5} .\, h_{lv}\,\rho_g^{0,5}\,(\sigma\, g\,\Delta\rho)^{0,25} \tag{2}$$

sendo *S* um multiplicador usado para garantir que o modelo de Kandlikar (2001) se ajuste aos dados de FCC em superfícies lisas. O fluxo de calor adicional é dado por:

$$q_{adc} = M\,.\,h_{lv}.h\,\sqrt{\frac{P-d}{P^2}\;g\;\cos\theta\,\rho_l\Delta\rho\,.\frac{(P-d)d}{\sin\alpha\,.\,P^2}} \tag{3}$$

sendo *M* um fator resultante obtido por meio de ajuste dos dados experimentais; *P* é distância de centro a centro de dois pilares consecutivos ou adjacentes; *d* é a largura dos pilares e *h* é a altura. Embora as equações acima tenham sido desenvolvidas para pilares quadrados, também são aplicáveis para pilares circulares. Nessa condição, o parâmetro *d* representará o diâmetro dos pilares circulares.

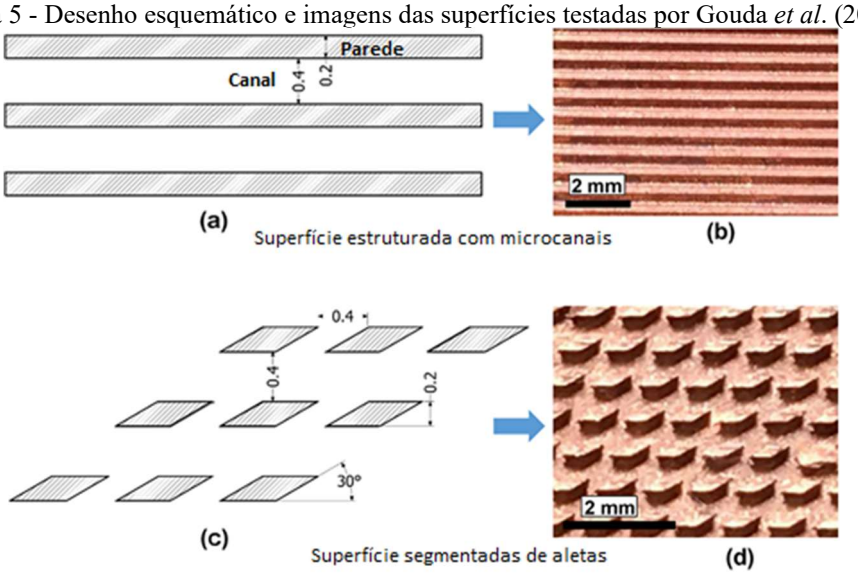
Figura 4 - MEV (a) micropilares cilíndricos; (b) micropilares quadrados; (c) microparedes; (d) rugosidade aleatória.



Fonte: Li *et al*. (2017).

Gouda *et al*. (2018) fabricaram as seguintes superfícies: segmentadas de aletas e a estruturada com microcanais abertos. As superfícies foram fabricadas pelo processo de microfresamento em um bloco de cobre de 10 x 10 mm², sendo a seção transversal do microcanal de 400 μm de espaçamento entre os canais, 450 μm de profundidade e 200 μm de largura das paredes, conforme a Figura 5. Os resultados experimentais obtidos mostraram que ambas as superfícies foram capazes de melhorar o desempenho térmico por ebulição em piscina (por exemplo, a superfície estruturada com microcanais abertos teve um incremento de 200% em relação a uma superfície plana). As análises também mostraram que a superfície com aletas segmentadas teve um aumento maior (em média, 300%) que a superfície com microcanais abertos em relação à superfície plana.

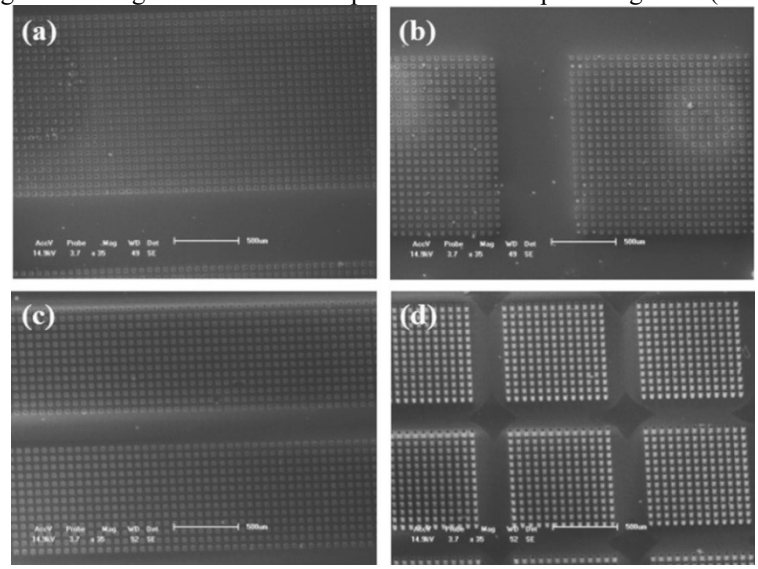
Figura 5 - Desenho esquemático e imagens das superfícies testadas por Gouda *et al*. (2018).



Fonte: Adaptada de Gouda *et al*. (2018).

Utilizando o método de corrosão a seco (*dry-etching method*) para fabricar vários tipos de superfícies microaletadas em silício, Kong *et al*. (2018) analisaram superfícies microaletadas com comprimento lateral de aleta de 30 µm e altura 60 µm, arranjadas em tiras e passagens com diferentes tamanhos, conforme a Figura 6. Os autores utilizaram FC-72 como fluido de trabalho e os resultados indicaram que superfícies microaletadas melhoram o CTC e o FCC, quando comparados aos CTC e FCC de uma superfície plana. Segundo os autores, a superfície estruturada não apenas otimizou a dinâmica da bolha de vapor, mas também melhorou o processo de transferência de calor e massa, evitando a ocorrência de pontos de secagem sobre a superfície aquecedora.

Figura 6 - Imagens de MEV das superfícies testadas por Kong *et al*. (2018).



Fonte: Kong *et al*. (2018).

Zhou, Qi e Wei (2019) utilizaram o parâmetro rugosidade adimensional, definida como a razão entre a área da superfície real com as microaletas e a área de base. Este parâmetro foi utilizado para quantificar os efeitos da microestrutura no desempenho térmico do processo de ebulição. Utilizando água como fluido de trabalho e alterando as configurações geométricas das aletas (altura, largura e espaçamento), os autores mostraram que o CTC aumentou em até 300% com o aumento da rugosidade efetiva, quando comparado ao CTC de uma superfície plana. O fluxo de calor crítico também teve um incremento de até 350%; para espaçamentos de 10 a 20 μm, houve uma redução no valor máximo do FCC.

Portanto, superfícies microaletadas não só aumentam a área superficial de transferência de calor, seguido do aumento na densidade de sítios ativos, como também, aumentam a capacidade de absorção de fluido, *i.e.*, a capilaridade, que permite o fluido resfriar as regiões internas da superfície (LIANG E MUDAWAR, 2019). Assim, estudos adicionais sobre a configuração ótima dos parâmetros geométricos das superfícies microaletadas (largura, altura e espaçamento entre as aletas, além da forma geométrica destas) se fazem necessários.

2.3 Influência das Superfícies Nanoestruturadas

Técnicas de modificações superficiais em escalas nanométricas, como camadas nanoporosas, nanotubos, nanofios e deposição de nanopartículas por ebulição de nanofluidos, têm como principal benefício a intensificação da transferência de calor por ebulição, devido à melhora da capilaridade causada pelas nanoestruturas (LI *et al*., 2020). Por exemplo, nanotubos de carbono (CNTs) e nanotubos de TiO_2, definidos como tubos com dimensões nanométricas (diâmetros externos variando de 1 a 100 nm e comprimento na faixa de 1 a 50 nm) podem ser utilizados como revestimentos superficiais a fim de intensificar a transferência de calor por ebulição, pois são materiais com alta condutividade térmica (LIANG; MUDAWAR, 2019).

Yao *et al*. (2011) desenvolveram uma técnica para fabricação de nanofios de cobre em substrato de silício sem uma camada de ligação interfacial e usaram diferentes parâmetros de síntese para controlar a altura dos nanofios. Os autores relataram que esta técnica melhorou a durabilidade e o contato da estrutura do nanofio de cobre com o substrato e, consequentemente, reduziu a resistência térmica de contato. Ao aumentar a altura do nanofio de 2 para 35 μm, eles alcançaram uma melhora gradual no CTC para o processo de ebulição da água, que atribuíram ao aumento da densidade e tamanho das cavidades super-

ficiais. Lee *et al*. (2012) obtiveram incrementos tanto no CTC quanto no FCC utilizando nanofios de ZnO dispostos longitudinalmente e nanofios ramificados sobre a superfície aquecedora; segundo os autores, a natureza superhidrofílica resultante desta técnica aumenta a densidade de sítios ativos de nucleação.

Ray *et al*. (2016) sintetizaram matrizes de nanofios de TiO_2 normais à superfície de cobre e com comprimentos de 150, 300 e 450 nm por meio de um evaporador de feixe de elétrons. Os autores analisaram o desempenho térmico durante a ebulição do fluido refrigerante R-134a, comparando os resultados obtidos com as matrizes de nanofios com aqueles obtidos com um substrato plano. O melhor desempenho térmico foi obtido com o revestimento de 450 nm, o qual apresentou uma redução significativa no superaquecimento da superfície e um aumento de 81,4% no coeficiente de transferência de calor por ebulição.

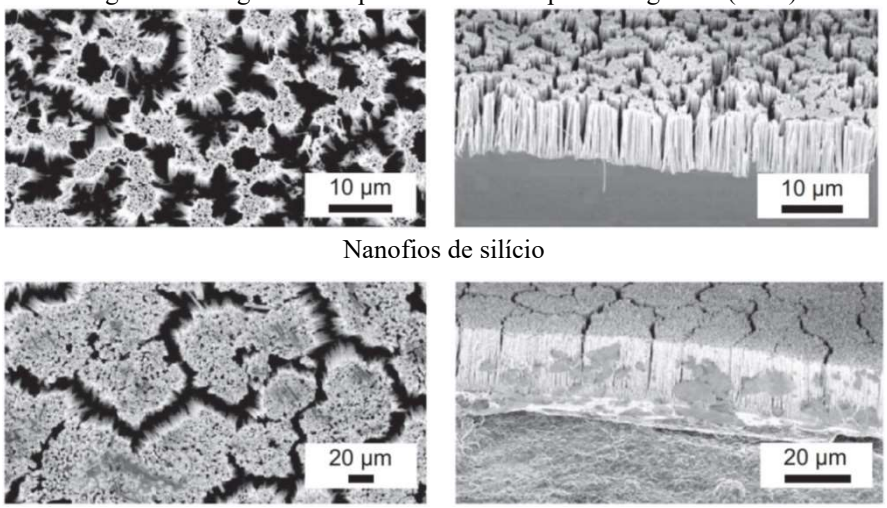
Zhang e Kim (2016) utilizaram oxidação anódica para desenvolver uma superfície nanoporosa de Al_2O_3 em substrato de liga de alumínio 6061, que mostrou incrementos significativos no CTC e FCC para água, como fluido de trabalho. Usando espectroscopia de impedância eletroquímica, os autores mostraram que o aumento de FCC foi devido à absorção de líquido induzida pela pressão capilar desenvolvida na estrutura porosa.

Seo *et al*. (2015) utilizaram um processo de filtração a vácuo para revestir uma superfície de aço inoxidável com CNTs orientados de forma aleatória com diferentes diâmetros. Os autores observaram uma redução no coeficiente de transferência de calor por ebulição (usando água como fluido de trabalho) e um aumento no FCC com a técnica de revestimento utilizado. Os resultados indicaram que tanto a rugosidade quanto a molhabilidade aumentaram à medida que o número de camadas aumentou; e o aumento do FCC foi atribuído às características de absorção capilar do revestimento.

Estudos realizados por Zhang *et al*. (2017) utilizaram superfícies com revestimento de nanotubos de TiO_2 e água como fluido de trabalho. Os autores demonstraram que a molhabilidade de tal superfície poderia ser controlada por irradiação de luz ultravioleta (UV), sendo possível melhorar a molhabilidade conforme o aumento do tempo de irradiação. Esta técnica resultou na redução do CTC, porém observou-se um aumento no FCC. No entanto, Chen *et al*. (2009) também realizaram experimentos em superfícies de titânio com revestimentos de nanotubos de TiO_2 e água como fluido de trabalho; segundo os autores, todas as superfícies revestidas tiveram melhorias no CTC e no FCC. Além disso, Chen *et al*. (2009) analisaram nanofios de silício e cobre (Figura 7), que foram obtidos via processo de sintetização por ataque químico e galvanoplastia, respectivamente. As melhorias foram atribuí-

das à alta densidade de sítios de nucleação e à melhora da capacidade de remolhamento capilar destas superfícies modificadas.

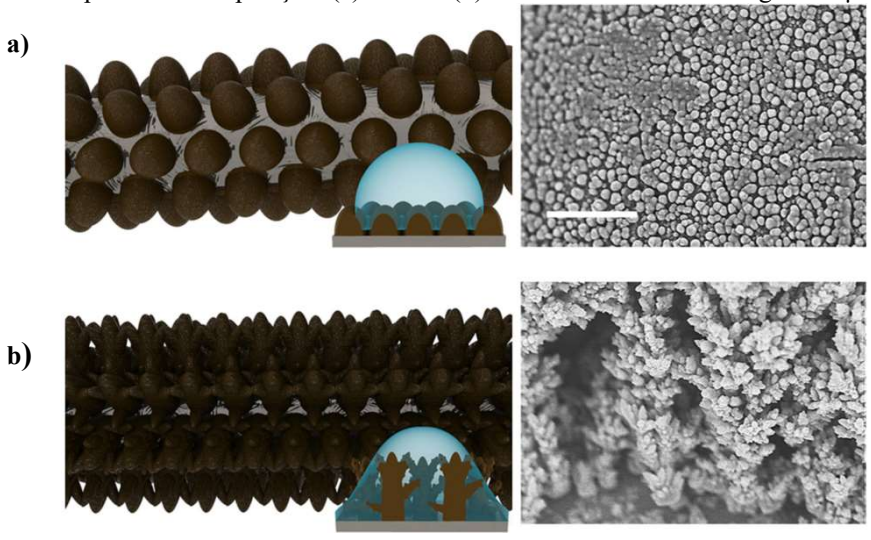
Figura 7 - Imagens das superfícies testadas por Cheng *et al*. (2009).



Fonte: Adaptada de Chen *et al*. (2009).

Gao *et al*. (2017) fabricaram estruturas dendríticas nanoporosas de cobre em substrato também de cobre por meio de eletrodeposição a fim de aumentar o CTC por ebulição usando água, como fluido de trabalho. Jo *et al*. (2017) usaram uma técnica de galvanoplastia para fabricar nanoestruturas de Cu_2O tipo fractal em substrato de NiCr (Figura 8), cuja molhabilidade foi controlada pelo tempo de eletrodeposição; tais superfícies melhoraram o CTC por ebulição de água.

Figura 8 - Imagens esquemáticas e MEV das camadas de Cu_2O 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.



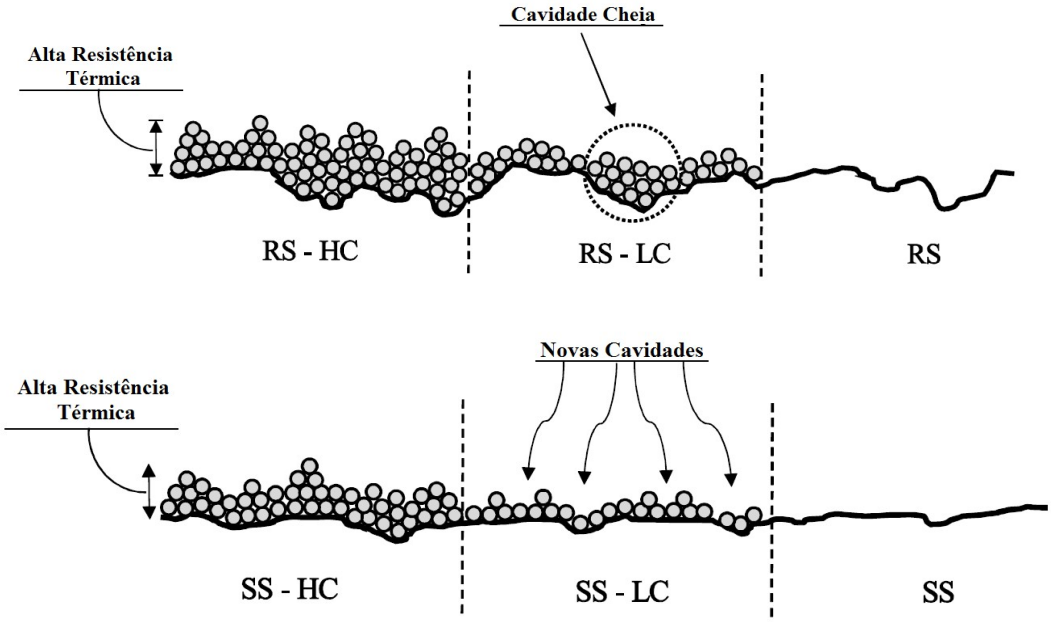
Fonte: Adaptada de Jo *et al*. (2017).

Em geral, as estruturas nanoporosas representam grandes desafios para a implementação em aplicações de sistema de resfriamento envolvendo ebulição em piscina. Dadas às mudanças observadas no desempenho da ebulição em testes de longo prazo, é crucial que tais superfícies sejam avaliadas cuidadosamente para quaisquer mudanças na nanoestrutura da superfície ao longo do tempo.

A deposição de nanopartículas em um substrato também pode ser obtida por ebulição do nanofluido com o devido controle de parâmetros como, tempo de ebulição, concentração de nanopartículas e fluxo de calor (MANETTI *et al*., 2017; KWARK *et al*., 2010).

Kiyomura *et al*. (2017) investigaram experimentalmente os efeitos da rugosidade da superfície e deposição de nanopartículas no ângulo de contato, molhabilidade da superfície e CTC. Duas superfícies rugosas foram revestidas com baixa e alta concentração (0,029 g/l e 0,29 g/l, respectivamente) de nanofluido de Fe_2O_3 por ebulição, sendo nomeadas como RS-LC e RS-HC, respectivamente. Da mesma forma, outras duas superfícies lisas foram revestidas por meio da ebulição de nanofluido de maguemita de baixa e alta concentração (SS-LC e SS-HC, respectivamente). Em seguida, todas as amostras foram usadas para o experimento de ebulição nucleada em piscina, utilizando água deionizada como fluido de trabalho. Os resultados mostraram que tanto a RS-HC quanto a RS-LC apresentaram deterioração do CTC quando comparados com a superfície rugosa original (RS); enquanto o CTC da SS-LC teve um aumento de 20% em relação a SS-HC e a superfície lisa original (SS). Para as superfícies rugosas, a densidade dos sítios de nucleação diminuiu após o revestimento, bem como o aumento da resistência térmica, uma vez que as cavidades maiores foram preenchidas com nanopartículas e, consequentemente, cavidades menores foram formadas. Para manter essas cavidades ativas, um superaquecimento maior foi necessário, o que foi prejudicial para o CTC, conforme ilustrado na Figura 9. Já a deposição de nanopartículas nas superfícies lisas aumentou os sítios ativos de nucleação. No entanto, o revestimento excessivamente espesso aumentou a resistência térmica da superfície, portanto, o SS-LC exibiu melhor desempenho térmico. Souza *et al*. (2014) também relataram que a deposição de nanopartículas de Fe_2O_3 de 10 nm aumentou o CTC para ebulição do HFE-7100, enquanto as nanopartículas de 80 nm degradaram o CTC, em comparação com uma superfície sem deposição de nanopartículas.

Figura 9- Desenho esquemático da deposição de nanopartículas em superfície rugosa e superfície lisa.



Fonte: Kiyomura *et al*., 2017 (Adaptado).

Akbari *et al*. (2017) investigaram a deposição de nanopartículas de prata em superfície de cobre em função da concentração do nanofluido utilizado para a deposição. Segundo os autores, com o aumento da concentração, a estabilidade de deposição e o diâmetro da bolha de vapor diminuem, mas a deposição de aglomerados e a hidrofobicidade da superfície aumentam, fazendo com que a nucleação ocorra para superaquecimentos menores. Finalmente, os resultados mostraram que para concentrações mais elevadas, tanto o CTC quanto o FCC aumentaram em até 90% em relação à superfície de cobre polido. Já, Abdollahi *et al*. (2017) afirmaram que a adição de nanopartículas ao fluido base não significa necessariamente um aumento no CTC. Os autores investigaram diferentes concentrações de nanofluido Fe_3O_4-água, sendo o melhor desempenho térmico observado na concentração de 0,1%vol. Nikulin *et al*. (2018) usaram um nanofluido de Al_2O_3 com base de isopropanol não aquosa. Eles observaram que o efeito da adição de nanopartículas ao fluido base sobre o CTC depende da concentração do nanofluido e da temperatura de ebulição. Durante os testes de ebulição com nanofluido, as nanopartículas se depositam sobre a superfície aquecedora afetando, por conseguinte, o diâmetro de partida e a frequência de partida das bolhas de vapor, bem como, a densidade de sítios de nucleação.

Observam-se inconsistências significativas em torno da influência dos nanofluidos no coeficiente de transferência de calor na ebulição em piscina. Tais inconsistências indicam a necessidade de realizar estudos mais abrangentes e sistemáticos, a fim de cobrir uma

ampla gama de parâmetros operacionais e de fornecer uma análise convincente dos mecanismos físicos dominantes. Embora a maioria dos pesquisadores indique que nanofluidos acarretam num incremento mensurável do FCC, resultante da melhor molhabilidade da superfície devido à camada depositada de nanopartículas, muitas questões permanecem em aberto relacionadas à sustentabilidade em longo prazo deste incremento. Na ausência de experimentos sistemáticos e testes de repetibilidade em longo prazo, são esperados fenômenos como aglomeração de nanopartículas (formação de *clusters*), sedimentação, erosão superficial e entupimento de cavidades (*clogging effect*). Assim, é importante garantir a qualidade na produção e uso de nanofluidos, para que tal técnica seja não apenas eficiente em relação à transferência de calor, mas também seja aplicável do ponto de vista prático (MORI; UTAKA, 2017). Ou seja, não é suficiente pesquisar superfícies nano/microestruturadas cuidadosamente controladas em ambientes laboratoriais. Faz-se necessário que as técnicas sejam aplicáveis em escala industrial.

2.4 Influência de Superfícies Nanoestruturadas Hierarquicamente

Nas últimas décadas, a rápida evolução dos processos de modificação/fabricação de superfícies tem facilitado o avanço na pesquisa de ebulição em piscina com superfícies capazes de aumentar o coeficiente de transferência de calor e o fluxo de calor crítico através de micro/nanoestruturas. Os processos híbridos, que combinam a remoção ou adição de material para formação de microestruturas seguida de adição de material para formação de nanoestruturas, combinam os benefícios alcançados com diferentes técnicas de intensificação em busca de um desempenho superior na transferência de calor por ebulição (LIANG; MUDAWAR, 2019).

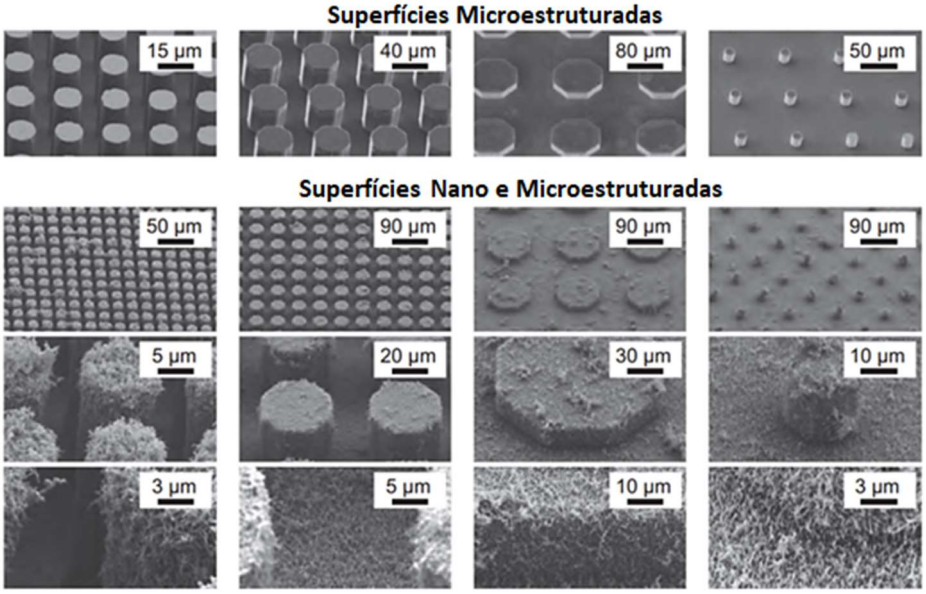
Chu *et al*. (2013) examinaram o aumento de ebulição em água para dois tipos de superfícies híbridas em substrato de silício: micropilares de silício de 5 - 10 μm de diâmetro e 10 μm de altura, com nanopartículas de SiO_2 de 14 nm sobrepostas nos micropilares por deposição eletroforética; e micropilares de cobre galvanizado de 30 - 35 μm de diâmetro e 35 - 68 μm de altura revestidos por oxidação com nanoestruturas de CuO, com valores de rugosidade adimensionais entre 3,6 e 13,3. Um aumento de 200% para o FCC foi obtido com a última superfície e a maior rugosidade adimensional de 13,3.

Dong *et al*. (2014) realizaram um estudo comparativo do desempenho de micro e nanoestruturas em superfícies de silício. A análise mostrou um aumento na densidade de sítios de nucleação para superfícies microestruturadas. No entanto, para amostras com na-

noestruturas, a saída da bolha foi melhorada pela redução do diâmetro da bolha, inibindo a formação de um filme de vapor para altos fluxos de calor. Portanto, os autores propuseram combinar as duas técnicas de intensificação para melhorar o desempenho térmico da ebulição em piscina.

Rahman *et al*. (2014) fabricaram quatro tipos de microaletas em silício usando corrosão reativa por íons profunda, as quais foram revestidas com nanoestruturas de níquel usando uma técnica de nanofabricação, como mostrado na Figura 10. Os autores mostraram que a capacidade de absorção de fluido pela estrutura híbrida foi o fator determinante para o comportamento do FCC durante a ebulição de água em superfícies estruturadas superhidrofílicas.

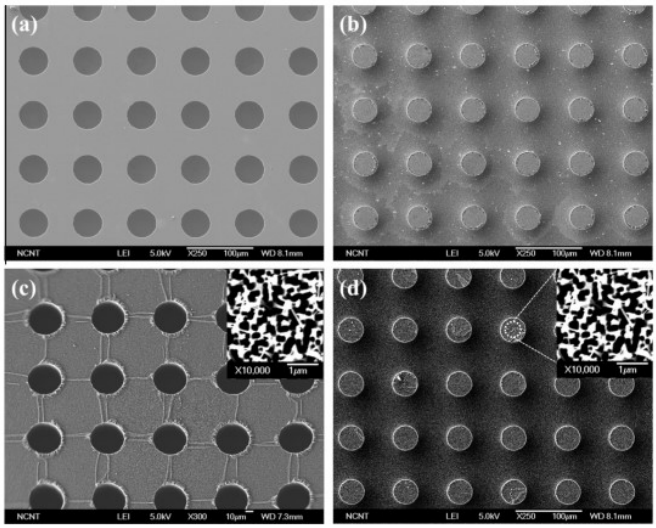
Figura 10- Imagens de MEV dos quatro tipos de matrizes de microaletas formadas em superfície de silício com e sem nanoestruturação.



Fonte: Adaptada de Rahman *et al*. (2014).

Moon *et al*. (2016) investigaram o aumento da ebulição utilizando água como fluido de trabalho e superfícies hierarquicamente estruturadas (micropilares e microfuros bem ordenados com a adição de nanofios, Figura 11); os autores mostraram que os nanofios foram eficazes em aumentar a capacidade de remolhamento de líquido nas superfícies hierarquicamente estruturadas.

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.



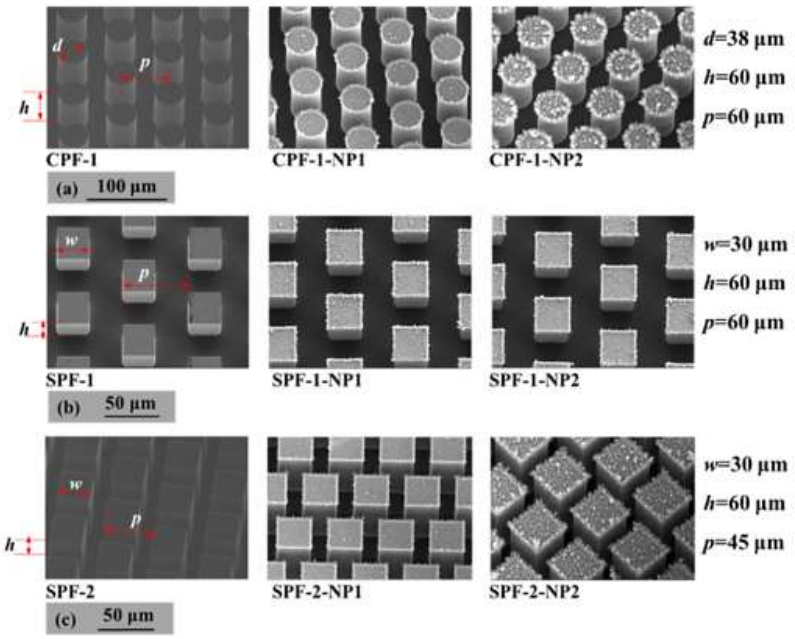
Fonte: Moon *et al*. (2016).

Estudos realizados por Rahman e McCarthy (2017) examinaram a ebulição em piscina para superfícies de cobre fabricadas com diferentes estruturas e escalas, incluindo arranjos de canais com comprimentos característicos de 300 μm a 3 mm; nano revestimentos com comprimentos característicos de 50 nm a 50 μm; e microcanais e nano revestimentos combinados. Os microcanais e nanoestruturas foram fabricados por meio de usinagem por descarga elétrica e oxidação hidrotérmica, respectivamente. Os nano revestimentos aumentaram o FCC para água por causa da capacidade de absorver o fluido mais rapidamente, porém diminuíram o CTC devido à supressão da nucleação de bolhas. Por outro lado, os microcanais aumentaram tanto o FCC quanto o CTC. Já a superfície híbrida, obtida pela combinação das duas técnicas de intensificação, apresentou desempenho superior, atingindo valores de CTC e FCC de até 461 kW/m^2K e 313 W/cm^2, respectivamente.

Mais recentemente, Cao *et al*. (2021) analisaram a ebulição em piscina para o FC-72, em condições de saturação, usando diferentes superfícies de aquecimento (microaletas circulares e quadradas foram fabricadas em superfícies de silício por corrosão a seco e, em seguida, nanopartículas de cobre foram depositadas por deposição eletrostática), Figura 12. Os resultados experimentais indicaram que, em comparação com uma superfície lisa, as microaletas aumentaram o CTC e o FCC em mais de 200% e 75%, respectivamente; e com a adição das nanopartículas, a intensificação para ambos os parâmetros analisados foi de 24% e 20%, respectivamente. Segundo os autores, diâmetros de partida de bolhas menores associados a altas frequências de partida de bolhas promoveram os elevados valores de CTC observados. A capilaridade, associada à capacidade de remolhamento da superfície,

desempenhou um papel importante no FCC, mas análises adicionais indicaram que o fluxo de calor crítico é o resultado da competição entre a absorção do fluido (capilaridade) e a evaporação da película líquida sob as bolhas de vapor coalescidas.

Figura 12 - Imagens de MEV das superfícies testadas por Cao *et al*. (2021).



Fonte: Cao *et al*. (2021).

Da literatura, tem-se que uma superfície pode ser aperfeiçoada através de três fatores: (i) existência de micro ou nano cavidade ou irregularidades para a nucleação do embrião de vapor; (ii) estruturas porosas que permitem o fluido acessar as regiões quentes da superfície e manter os sítios de nucleação ativos; e (iii) protuberâncias que aumentam a área de ebulição. As técnicas de intensificação envolvendo processos híbridos incluem superfícies estendidas com microaletas e/ou ranhuras com acabamento microporoso e revestimentos em nanoescala.

2.5 Correlações para Ebulição Nucleada

As correlações para o regime de ebulição nucleada em piscina representam parcialmente o fenômeno físico, pois alguns parâmetros relevantes acabam por ser desconsiderados a fim de simplificar a análise realizada pelos autores. Ressalta-se que a transferência de calor durante a ebulição nucleada é resultado da ação simultânea de vários mecanismos

físicos e depende de condições, tais como: fluxo de calor, pressão, ângulo de contato, características superficiais, grau de subresfriamento, entre outros.

A seguir são apresentadas correlações, usualmente citadas na literatura, para predizer o coeficiente de transferência de calor no regime de ebulição nucleada. Essas serão utilizadas na comparação com os dados experimentais obtidos no presente trabalho.

2.5.1 Correlação de Rohsenow (1952)

A primeira correlação para predizer o coeficiente de transferência de calor, h, a empregar parâmetros relacionados com as características superficiais foi desenvolvida por Rohsenow (1952). Utilizando diferentes constantes para expressar os efeitos de uma diversidade de materiais, condições da superfície e tipos de líquidos, a correlação de Rohsenow (1952) para a ebulição nucleada é escrita como:

$$h = \mu_l h_{lv} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma}\right]^{0,5} \left(\frac{c_{pl}}{C_{sf} h_{lv} Pr_l^s}\right)^{\frac{1}{r}} \Delta T_p^2 \tag{4}$$

na qual:

$\Delta T_p = T_p - T_{sat}(p_{sat})$ [K]

C_{sf} → Coeficiente que depende da combinação líquido/superfície;

$$C_{sf} \begin{cases} = 0{,}0154 & (n - Pentano/cobre) \\ = 0{,}0128 & (água/cobre) \\ = 0{,}0047 & (FC - 72/cobre) \end{cases} \quad \text{(Pioro, 1999)}$$

$r = 0{,}33$ (Rohsenow, 1952);

s → parâmetro que também depende da combinação líquido/superfície.

$$s \begin{cases} = 1{,}0 & (água) \\ = 1{,}7 & (demais\ fluidos) \end{cases} \quad \text{(Rohsenow, 1952)}$$

A correlação de Rohsenow (1952) considera o mecanismo resultante do movimento de líquido junto à superfície aquecida promovido pela partida das bolhas de vapor. O autor sugere que as bolhas atuam como microbombas e a transferência de calor estaria associada à convecção "local", de forma que uma relação geral pode ser aplicada, envolvendo parâmetros adimensionais característicos, definidos em termos das propriedades do líquido e de

uma dimensão característica relacionada ao diâmetro de partida das bolhas (JABARDO, 2008).

2.5.2 Correlação de Cooper (1984)

Em 1984, Cooper propôs uma correlação para a ebulição nucleada considerando a rugosidade da superfície aquecida (definida como a máxima altura do perfil acima da linha de referência dentro de um comprimento amostral, R_p em μm), a pressão reduzida do líquido (p_r em Pa), a massa molecular do fluido M em [kg/kmol], o fluxo de calor $q"$ em [W/m²]. A correlação de Cooper (1984), que independe do formato da superfície, é

$$h_{cooper} = 55 p_r^b (-\log p_r)^{-0,55} M^{-0,5} q"^{0.67} \tag{5}$$

na qual,

$$b = 0,15 - 0,2 \log(R_p) \tag{6}$$

2.5.3 Correlação de Ribatski e Jabardo (2003)

Ribatski e Jabardo (2003) obtiveram dados experimentais para os fluidos R-11, R-123, R-134a, R-22 e R-12 no regime de ebulição nucleada sobre superfícies cilíndricas de latão, cobre e aço inoxidável. Após o tratamento estatístico dos dados experimentais e obtenção dos coeficientes por regressão linear, os autores propuseram uma correlação simplificada para o cálculo do CTC que apresenta o mesmo formato da correlação de Cooper (1984), dada por:

$$h = f_p R_a^{0,2} p_r^{0,45} (-\log p_r)^{-0,8} M^{-0,5} q"^m \tag{7}$$

$$\text{sendo, } m = 0,9 - 0,3 p_r^{0,2} \tag{8}$$

O fator associado ao efeito de superfície, f_p, é igual a 100 para o cobre, 110 para o latão e 85 para o aço inoxidável.

2.5.4 Correlação de Kiyomura et al. (2017)

A correlação desenvolvida, com base em um banco de dados de resultados experimentais, considera o efeito da interação superfície/líquido, a influência do ângulo de contato no desempenho da ebulição em piscina e o efeito da ebulição nucleada em espaços confinados. A correlação proposta prediz o comportamento de transferência de calor em ebulição de fluidos com propriedades termofísicas diferentes em condições confinadas e não confinadas:

$$\frac{hL_b}{k_l} = 154\left[\left(\frac{c_{pl}T_{sat}}{h_{lv}}\right)^{1.72}\left(\frac{c_{pl}\mu_l}{k_l}\right)^{-0.34}\left(\frac{D_b q''}{\mu_l h_{lv}}\right)^{0.62}\left(\frac{s}{L_b}\right)^{-0.05}\right] \quad (9)$$

na qual, $L_b = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}}$ e $d_b = 0{,}0208\theta L_b$ sendo L_b o comprimento característico, d_b o diâmetro de partida da bolha de vapor, k_l a condutividade térmica do fluido, T_{sat} a temperatura de saturação do fluido de trabalho e s o grau de confinamento para casos de ebulição confinada.

É importante ressaltar que a precisão da base de dados relacionada aos parâmetros tem um efeito decisivo no sucesso do modelo em predizer os dados experimentais. Portanto, muitos dos modelos e correlações encontrados na literatura são úteis para o intervalo do banco de dados usado no desenvolvimento da correlação e/ou modelo.

2.6 Resumo da revisão da literatura

A partir dos trabalhos apresentados nesta seção foi possível entender as principais características da ebulição em piscina usando diferentes processos de modificação/fabricação de superfícies aquecidas. Os avanços nas técnicas de fabricação permitiram pesquisas sobre transferência de calor em superfícies micro e nanoestruturadas, mostrando, em geral, um aumento do CTC e FCC. Nas últimas décadas, pesquisas têm sido realizadas para avaliar o comportamento do CTC e FCC, no regime de ebulição nucleada, em diferentes superfícies, como: microporosas, microestruturadas, nanoestruturadas e híbridas; sendo que esta última combina os benefícios de diferentes técnicas de intensificação para alcançar alto desempenho na transferência de calor em ebulição.

Como mencionado na revisão da literatura, as técnicas de micro/nanofabricação alteram a capacidade de absorção de fluido, *i.e*., a capilaridade, a densidade de sítios de nucleação e melhoram o CTC e FCC. Embora essas superfícies mostrem tendências de intensificação da transferência de calor promissoras, as superfícies híbridas - envolvendo o uso de nanorevestimentos - são suscetíveis a variações no desempenho em longo prazo (envelhecimento da superfície ou, em inglês, *surface aging effect*); o que justifica mais estudos comparativos a fim de estabelecer diretrizes de projeto para novas tecnologias de superfície com alta capacidade de remoção de calor e aplicáveis industrialmente.

A partir das correlações apresentadas para predição do CTC, verifica-se que há diferentes possibilidades de modelagem do fenômeno de transferência de calor em ebulição em piscina. Ou seja, até o momento não se tem um modelo genérico para predizer o CTC considerando diferentes condições experimentais. O uso de um extenso banco de dados, com base em variações de superfícies e fluidos, resulta em correlações mais robustas; entretanto, a ampla gama de condições leva a correlações com maior erro de predição.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

No presente trabalho foram analisadas superfícies de cobre microaletadas e nanoestruturadas hierarquicamente, com diferentes configurações geométricas, em ebulição em piscina utilizando HFE-7100 ou água deionizada como fluido de trabalho (à temperatura de saturação e à pressão atmosférica). A escolha do HFE-7100 como fluido de trabalho se deve ao seu baixíssimo índice de potencial de aquecimento global (*global warming potential*, GWP), além de ter baixa temperatura de saturação à 1 atm (61 ºC); bom contato térmico com todos os componentes; excelente compatibilidade química com qualquer material; baixa toxidade e boas características ambientais (3M COMPANY, 2002). Já a água possui vantagens tais como custo, segurança e alto calor latente de vaporização. O Apêndice A apresenta a tabela com as propriedades termofísicas de cada fluido.

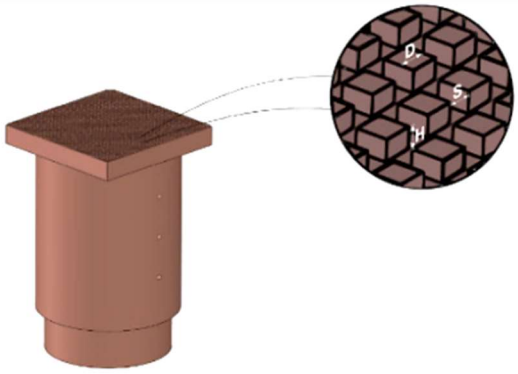
Atenção também foi dada na visualização do fenômeno, por meio de uma câmera de alta velocidade, a fim de analisar qualitativamente a influência das condições superficiais sobre a dinâmica da bolha de vapor (densidade de sítios de nucleação ativos, diâmetro e frequência de partida das bolhas de vapor).

3.1 Descrição das Superfícies de Aquecimento

As superfícies de aquecimento microestruturadas estão apresentadas na Figura 13. Estas possuem pilares com diferentes larguras e alturas; o espaçamento entre as aletas tem o mesmo valor, 250 μm, para todas as superfícies a fim de controlar a rugosidade efetiva, R_{eff}, definida como a razão entre a área em contato com o líquido e a área projetada, apresentada por Chu *et al*. (2012) e Dong *et al*. (2014).

Os arranjos de micropilares quadrados foram produzidos em uma superfície plana de cobre através do processo de microfresamento utilizando usinagem CNC de precisão no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade/Escola de Engenharia de São Carlos (LAPRAS/EESC-USP), orientado pelo Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues.

Figura 13 - Desenho esquemático das superfícies microestruturadas.



Superfície	Altura, H (μm)	Largura, D (μm)	Espaçamento, S	R_{eff}*	Nº aletas
Superfície plana	-	-	-	1	-
Micro_Fin_n1 (M1)	200	250	250	1,80	1024
Micro_Fin_n2 (M2)	150	250	250	1,60	1024
Micro_Fin_n3 (M3)	200	300	250	1,79	841
Micro_Fin_n4 (M4)	150	300	250	1,60	841

** fator relacionado com o aumento de área que pode ser calculado pela razão entre o aumento de área proporcionado pelas microaletas e a área da base da amostra.*

$$R_{eff} = 1 + \left[\frac{4DH}{(S+D)^2}\right]$$

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A fim de produzir as superfícies nanoestruturadas hierarquicamente, após a fabricação das superfícies microestruturadas, estas foram nanoestruturadas pelo processo de ebulição do nanofluido de alumina - com concentração volumétrica de 0,0007 vol.%. Esta concentração foi escolhida devido a resultados anteriores (MANETTI *et al*., 2017) indicarem que para valores acima de 0,001 vol.% ocorre a formação de uma camada depositada sobre a superfície de aquecimento cuja espessura aumenta a resistência térmica de condução, degradando o CTC.

O nanofluido de alumina à base de água (com tamanho médio de partícula de 10 nm, fornecido pela NanoAmor Inc.) foi preparado pelo método de duas etapas (NUNES *et al*., 2020; CUNHA *et al*., 2020). Primeiramente, um banho ultrassônico modelo UNIQUE USC-1850 foi utilizado para dispersar as nanopartículas uniformemente na solução. De acordo com Wen e Ding (2005), os aglomerados de nanopartículas (*clusters*) diminuem rapidamente nos primeiros 50 minutos de agitação ultrassônica. Portanto, o tempo de agitação adotado foi de 3 h a 25 kHz para reduzir a formação de *clusters*. Destaca-se que nenhuma sedimentação foi observada ao longo de 48 h após a preparação do nanofluido. Em

seguida, os testes de ebulição com nanofluido foram realizados sob condições saturadas a 98 kPa (pressão atmosférica local) aplicando um fluxo de calor fixo de 500 kW/m^2 por 240 min para garantir o regime permanente. Após o processo de deposição, o nanofluido foi removido da câmara de ebulição e os testes de ebulição em piscina foram realizados com os diferentes fluidos de trabalho em superfícies hierárquicas, sem remoção da camada de revestimento. O mesmo procedimento foi adotado para todas as superfícies microestruturadas para evitar a influência do fluxo de calor, tempo de ebulição e concentração do nanofluido no processo de deposição.

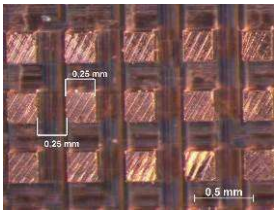
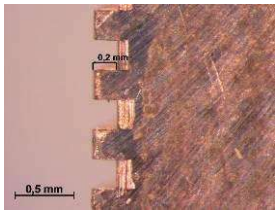
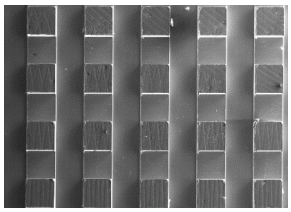
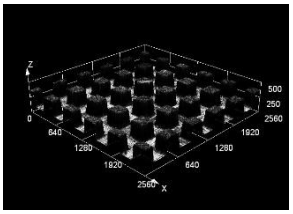
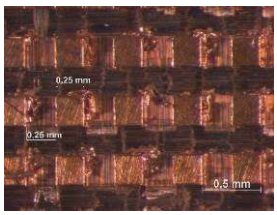
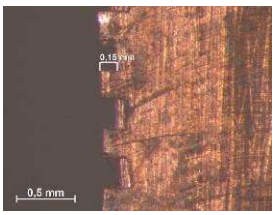
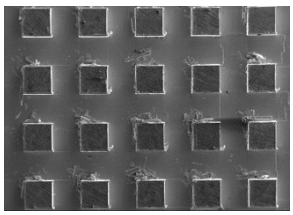
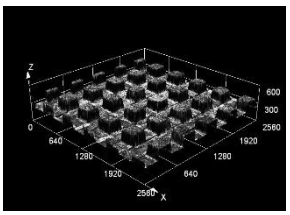
3.1.1 Caracterização das Superfícies de Aquecimento

Para a caracterização dimensional e geométrica das superfícies, três sistemas diferentes de técnicas de microscopia foram usados:

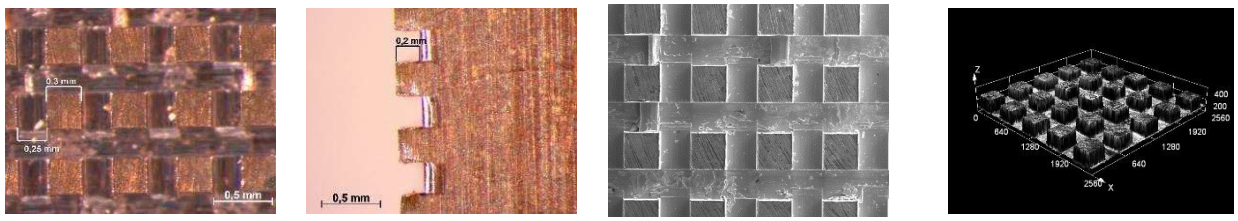
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando um EVO LS15 Zeiss®;
- Microscopia Ótica (STEREO), usando Zeiss® SteREO DiscoveryV8;
- Microscopia confocal, em Olympus LEXT OLS 4000;

Essas técnicas foram utilizadas para a obtenção das imagens apresentadas na Figura 14 e Figura 15, que permitem verificar as características relacionadas ao acabamento do processo de fabricação e nanoestruturação (no caso das superfícies hierárquicas), bem como, parâmetros estabelecidos para as microaletas, como altura, largura e espaçamento entre as aletas.

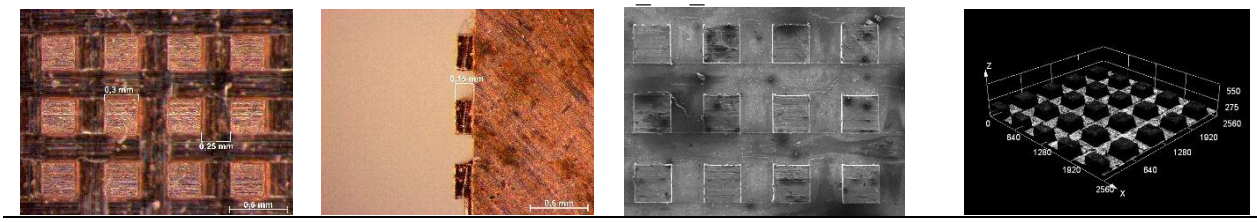
Figura 14 - Caracterização dimensional e geométrica das amostras microestruturadas.

STEREO		**MEV (100X)**	**Microscopia Confocal**
Vista Superior	Vista Lateral	Vista Superior	Vista Superior
Micro_Fin_n1			
			
Micro_Fin_n2			
			

Micro_Fin_n3

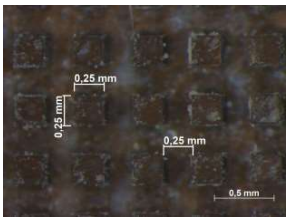
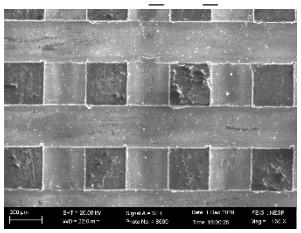
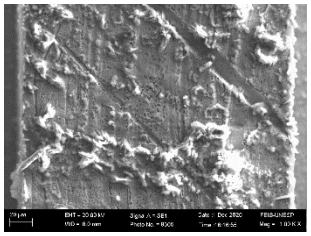
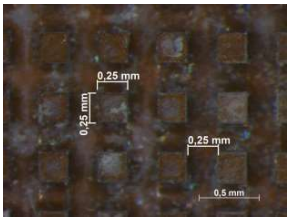
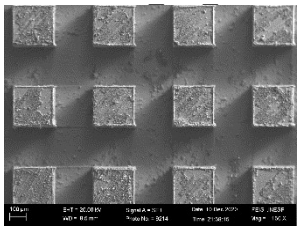
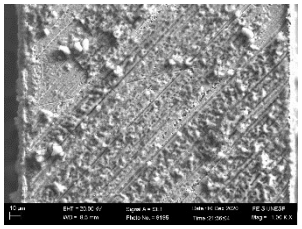
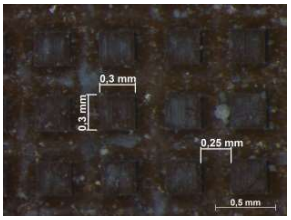
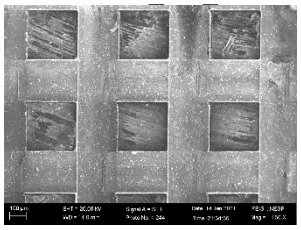
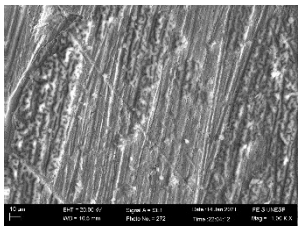
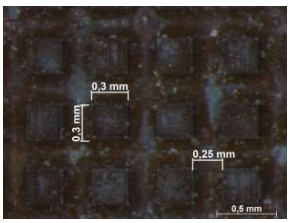
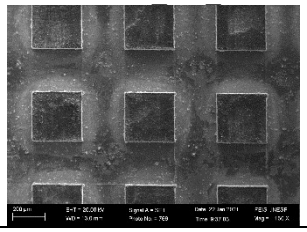
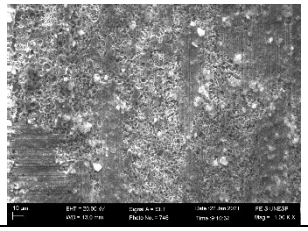


Micro_Fin_n4



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 15 - Caracterização dimensional e geométrica das amostras nanoestruturadas hierarquicamente.

STEREO	**MEV**	
Vista Superior	150x	1000x
Nano_Fin_n1		
		
Nano_Fin_n2		
		
Nano_Fin_n3		
		
Nano_Fin_n4		
		

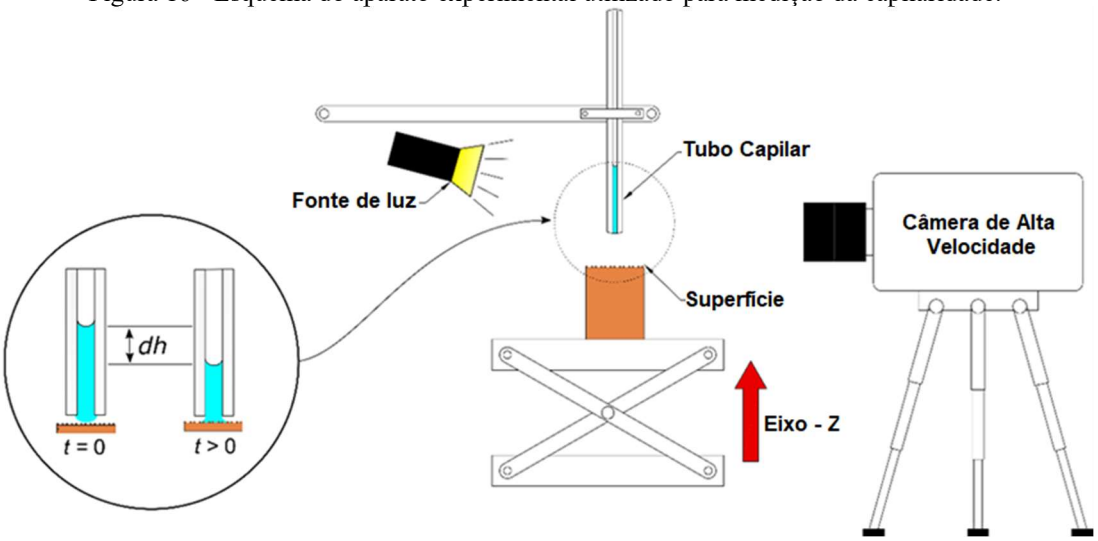
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A morfologia superficial das superfícies hierárquicas se altera devido ao revestimento produzido pelo processo de ebulição do nanofluido de alumina (Al_2O_3-água), com regiões de diferentes aspectos, estrutura porosa e formação de aglomerados no topo e na base das microaletas, que por sua vez, influenciam a dinâmica da bolha de vapor.

Neste trabalho, a capilaridade do HFE-7100 (3M^{TM} Novec^{TM}) foi avaliada utilizando a mesma técnica apresentada por Ahn *et al*. (2012), Rahman *et al*. (2014) e replicada por Manetti *et al*. (2020). A técnica consiste na filmagem, com câmera de alta velocidade, do deslocamento da coluna de líquido dentro de um tubo capilar (incerteza estimada como uma resolução de pixel, ± 0,03 mm) quando a mesma encosta na superfície a ser ensaiada. A capilaridade é dada pelo volume de líquido que a superfície absorve no instante em que ela entra em contato com o tubo capilar.

O esquema experimental utilizado na medição é apresentado na Figura 16. Uma mesa elevatória, no eixo *z*, movimenta a superfície em direção ao tubo capilar até tocá-lo, enquanto uma câmera *high-speed* Photron SA3, equipada com uma objetiva MACRO 100 mm, captura as imagens do deslocamento, do menisco no interior do tubo capilar, com diâmetro de 1 mm. Em seguida, o *software* Tracker 5.0.6 é utilizado para medir a variação da coluna de líquido dentro do tubo capilar devido à absorção superficial (capilaridade), então o volume é calculado.

Figura 16 - Esquema do aparato experimental utilizado para medição da capilaridade.

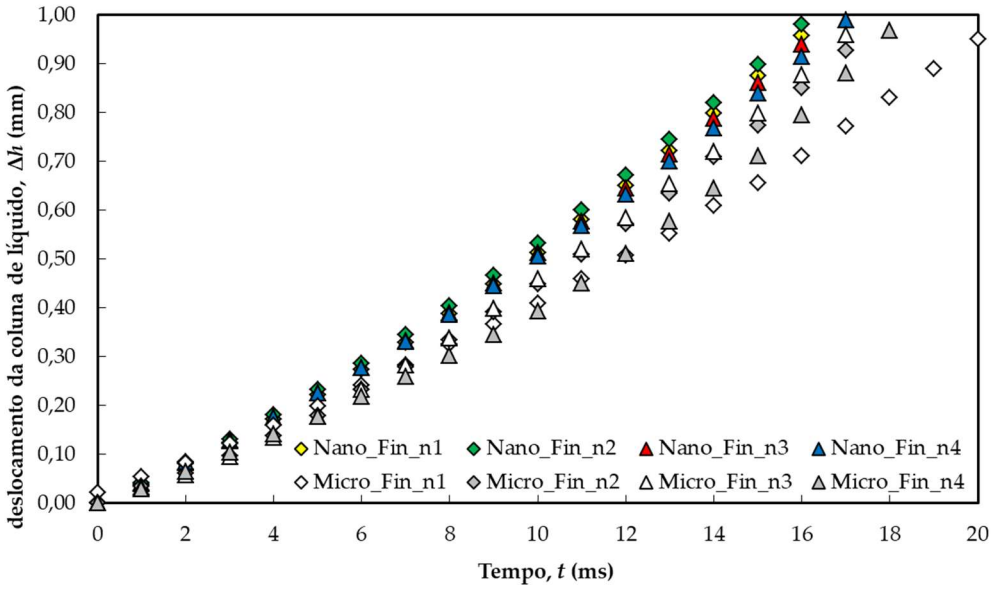


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Primeiramente, as microestruturas foram ensaiadas utilizando água como fluido de teste, mas o ensaio apresentou um deslocamento do menisco no interior do tubo capilar extremamente pequeno. Desta maneira, optou-se pela acetona para obter resultados mais

relevantes, visto que o fluido possui uma baixa tensão superficial e baixa densidade em relação à água. A Figura 17 mostra o deslocamento da altura do líquido dentro do tubo capilar para todas as superfícies testadas para os primeiros 20 ms.

Figura 17 - Ensaio de capilaridade com as diferentes superfícies testadas e acetona como fluido de teste.

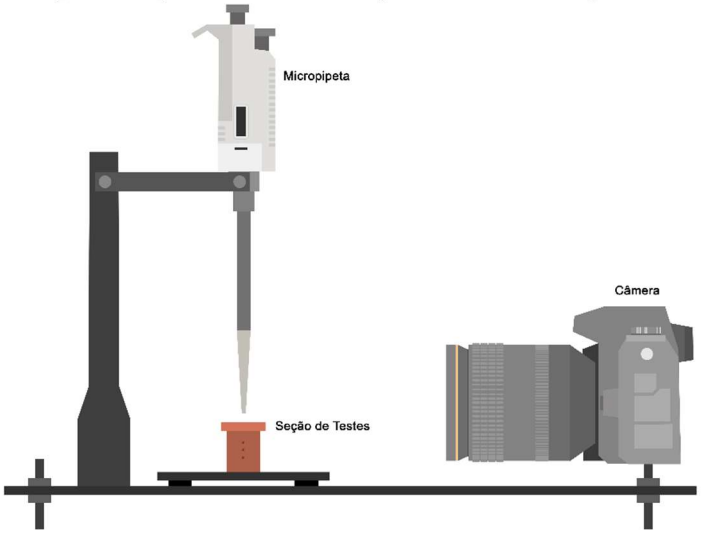


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como resultado obtido com os testes de capilaridade, observa-se que a capacidade de absorção do líquido aumenta para as superfícies hierárquicas em relação às superfícies microestruturadas, mas não foi observada diferença significativa (maior que 10%) entre as superfícies hierárquicas.

O processo para avaliar a molhabilidade consiste na medida através da visualização e medição do ângulo de contato estático, θ, de uma gota de água sobre a superfície. O aparato para medição do ângulo de contato estático (Figura 18) consiste em uma câmera fotográfica, uma fonte de luz LED verde, um difusor de luz e uma placa de alumínio na qual a superfície de teste é fixada. O procedimento adotado para avaliar o ângulo de contato consiste em depositar sobre a superfície de teste uma gota de água, com volume igual a 20 µl, por meio de uma seringa posicionada verticalmente sobre a amostra. Em seguida, imagens da gota sobre a superfície são capturadas com uma câmera digital DSLR D5300 NIKON e Lente Macro Nikon BH-TO10028PNA. Feito isso, as imagens são analisadas usando um *software* de pós-processamento de imagens (detalhes do procedimento podem ser encontrados em Cunha *et al*., 2020).

Figura 18 - Esquema do aparato experimental utilizado para medição do ângulo de contato (molhabilidade).



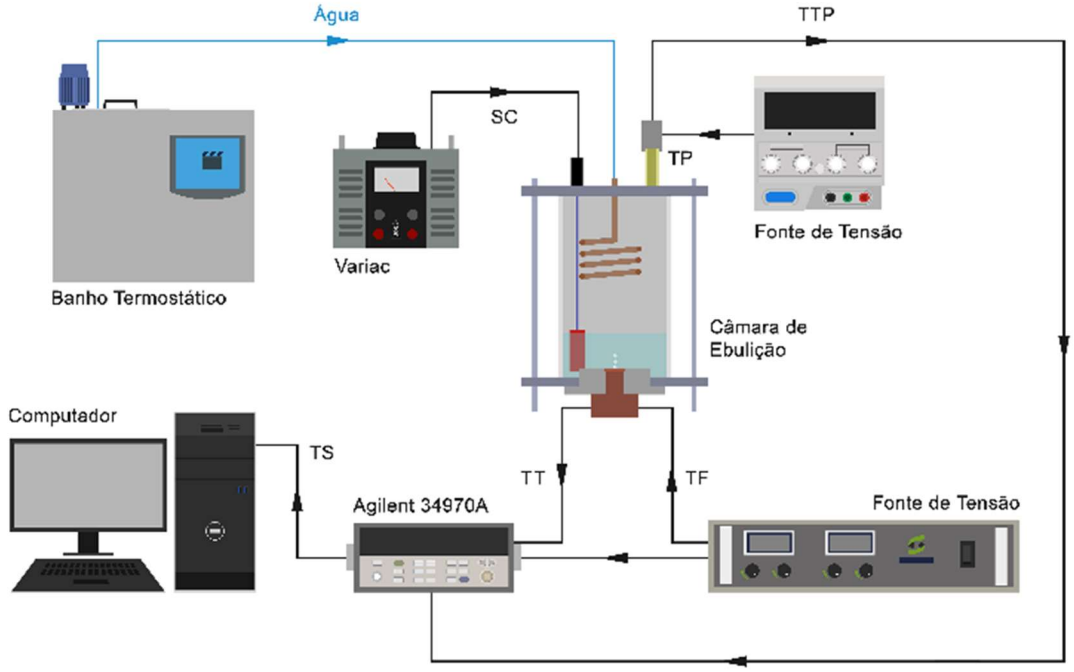
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como resultado dos ensaios de molhabilidade observou-se pouca variação do ângulo de contato estático com mudanças dos parâmetros geométricos das microaletas (as superfícies microaletadas são não molhantes, ou seja, apresentam ângulos de contato estático $\geq 90°$), bem como após o processo de nanoestruturação por meio da ebulição do nanofluido de alumina.

3.2 Descrição do Aparato Experimental

A Figura 19 mostra um desenho esquemático do aparato experimental indicando os principais componentes tais como, a câmara de ebulição, banho termostático, a fonte de potência, o sistema de controle de temperatura do líquido, o sistema de aquisição de dados e o computador para aquisição e pré-tratamento dos dados. A fonte de potência FCC 75-30i LED de até 750 W, com tensão elétrica variando entre 0 e 300 DC, foi conectada à resistência elétrica do tipo cartucho (300 W/220 V). As aquisições dos sinais dos termopares, da tensão elétrica do transdutor de pressão e da tensão aplicada na resistência, foram feitas por meio de um sistema DAQ AGILENT® 34970A.

Figura 19 - Desenho esquemático do aparato experimental.

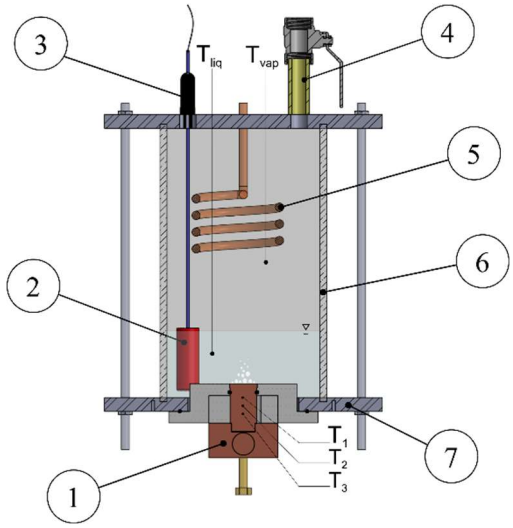


SC – Sistema de controle de temperatura do líquido; TF – Tensão da fonte de potência; TS – Todos os sinais; TP – Transdutor de pressão; TT – Tensão dos termopares; TTP – Tensão do transdutor de pressão.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A câmara de ebulição consiste em uma cuba de vidro de 5 mm de espessura e dimensões 120 x 100 x 200 mm, duas chapas de aço inoxidável AISI 316 com dimensões de 150 x 150 x 10 mm, um condensador tipo serpentina de cobre e a seção de testes, conforme mostra a Figura 20.

Figura 20 - Câmara de ebulição.



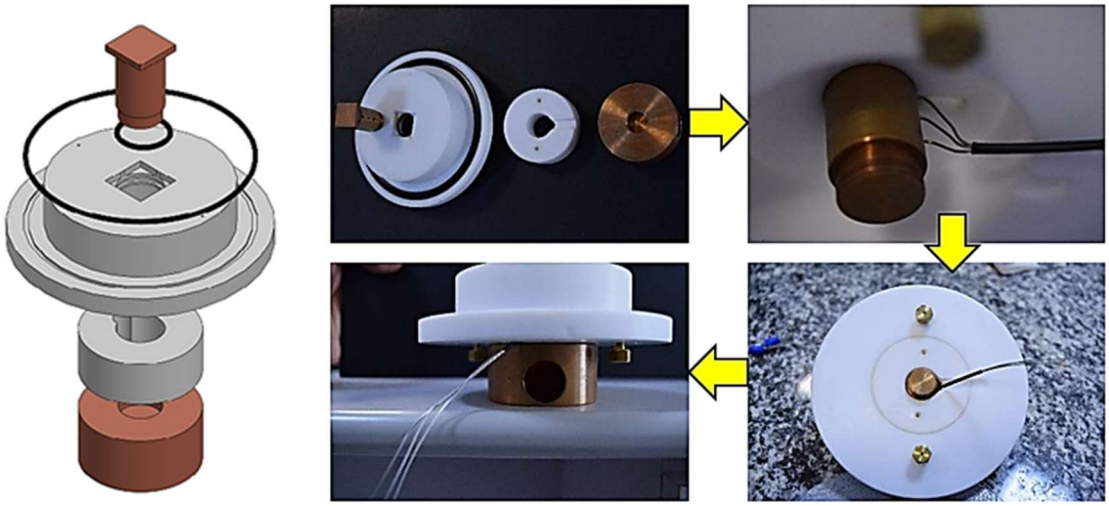
1) Bloco de cobre
2) Aquecedor auxiliar
3) Transdutor de pressão
4) Válvula de carregamento
5) Condensador
6) Cuba de vidro
7) Placa de aço inoxidável

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Um banho termostático, QUIMIS® Q241M, foi utilizado para controlar a temperatura do condensador, tipo serpentina, localizado na parte superior da câmara de ebulição. Um transdutor de pressão absoluta Ômega PXM309-2A permitiu medir a pressão no interior da câmara de ebulição, a qual foi mantida à pressão atmosférica durante os testes em ebulição (os experimentos foram realizados sob pressão atmosférica local, p_{atm} = 98 ± 0,05 kPa). A parte superior da câmara de ebulição possui uma válvula para realizar o vácuo e o carregamento do fluido de trabalho. O aquecedor auxiliar, tipo cartucho (com 350 W a 220 V), foi posicionado no interior da câmara de ebulição a fim de manter a temperatura do líquido à temperatura de saturação. Para monitoramento de temperatura do líquido e do vapor, dois termopares do tipo K da Ômega de 0,5 mm com blindagem, T_{liq} e T_{vap}, foram posicionados nas regiões de líquido e vapor, respectivamente, em diferentes alturas e posições opostas da resistência auxiliar (para não sofrerem influência do mesmo).

A seção de teste, Figura 21, consiste em uma peça de cobre circular com uma superfície superior quadrada na (16 × 16 × 3 mm) usinada a partir de um bloco de cobre com 60 mm de altura e 16 mm de diâmetro (a fim de evitar resistência térmica de contato, a seção de teste foi usinada a partir de uma peça única de cobre). Três termopares tipo K da Ômega de 0,5 mm com blindagem (T_1, T_2 e T_3) foram embutidos na parte cilíndrica da seção e esta, por sua vez, foi fixada em um segundo bloco de cobre que continha a resistência elétrica, tipo cartucho, responsável pelo aquecimento da seção de testes. A fonte de alimentação FCC 75-30i LED de até 750 W, com tensão elétrica variando de 0 a 300 DC, foi conectada à resistência elétrica. Para garantir o isolamento térmico da seção de testes, utilizou-se um pedaço de politetrafluoroetileno (PTFE) e a parte do bloco de cobre que permaneceu no exterior da câmara de ebulição foi isolada termicamente com uma fita de fibra de cerâmica capaz suportar temperaturas de até 1260 °C.

Figura 21 - (a) seção de testes em vista isométrica explodida e (b) montagem da seção de testes.



(a) (b)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Uma superfície plana (com rugosidade superficial, R_a = 0,14 ± 0,005 μm), obtida pelo mesmo método de polimento apresentado por Manetti *et al*. (2017) - *i.e.*, superfície polida mecanicamente com pasta abrasiva de alumina (diâmetro médio da partícula de 0,3 μm), tendo uma rugosidade média de 0,14 μm após o polimento - foi usada como superfície de referência para as análises.

3.3 Procedimento Experimental

Os experimentos foram realizados utilizando o HFE-7100 ou água deionizada como fluido de trabalho em condições saturadas, à pressão atmosférica local. O mesmo procedimento foi adotado durante todos os ensaios experimentais a fim de garantir a repetitividade dos resultados (ao menos três ensaios para cada condição de superfície e fluido de trabalho foram realizados em condições semelhantes).

As condições de saturação foram asseguradas mantendo a diferença entre a temperatura do fluido de trabalho, dentro da câmara de ebulição, e a temperatura de saturação, estimada pela medida da pressão por um barômetro, dentro da faixa de incerteza do termopar.

Antes de cada teste, o fluido de trabalho foi aquecido, próximo à temperatura de saturação, por 1h para a retirada dos gases não condensáveis. Em seguida foi realizado vácuo na câmara de ebulição, antes de cada série de testes, a qual foi carregada com o fluido de trabalho (o mesmo volume de fluido de trabalho foi utilizado em todos os testes, 200 ml).

As condições de testes foram determinadas por monitoramento da pressão e temperatura dentro da câmara de ebulição. Os ensaios foram iniciados apenas quando o fluido de trabalho estava à temperatura de saturação e, em seguida, foi imposto o fluxo de calor crescente em um intervalo de 50 a 900 kW/m², para a água deionizada e 25 a 400 kW/m², para o HFE-7100. Para garantir a estabilização do regime, cada patamar de fluxo de calor aplicado teve duração de 1500 segundos, mas somente os dados de temperatura para os últimos 500 segundos do intervalo do ensaio foram considerados nas análises. A condição de estabilização do regime foi caracterizada por variações na temperatura dentro da faixa de incerteza de sua medição.

3.3.1 Redução dos dados experimentais e incerteza de medição

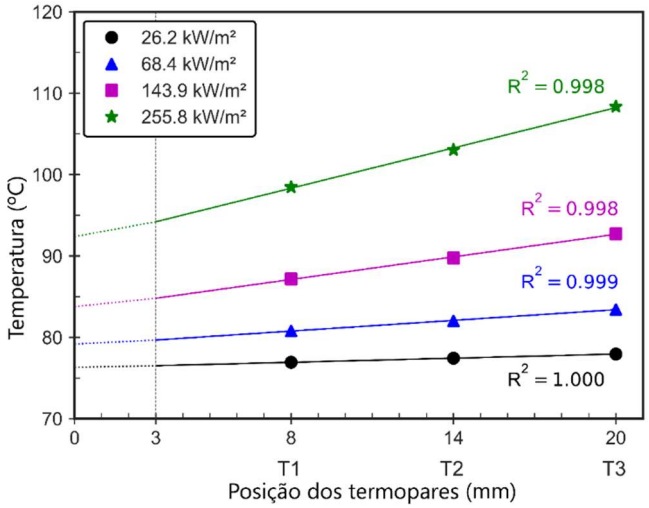
Os dados de tensão aplicada pela fonte de potência CC, da pressão interna na câmara de ebulição e das temperaturas capturadas pelos termopares foram lidos pelo DAQ e registrados em tempo real em um microcomputador através de comunicação serial (RS-232) e tratados conforme as equações descritas a seguir.

O fluxo de calor e a temperatura da superfície foram calculados de acordo com a Lei de Fourier, assumindo a condução de calor unidimensional com base nas medições de temperatura da superfície. O coeficiente de transferência de calor (CTC) foi calculado usando a equação do coeficiente de transferência de calor por convecção, dada por:

$$h = \frac{q''_{medido}}{T_s - T_{sat}(p_{int})} = \frac{q''_{medido}}{\Delta T_{sat}} \tag{10}$$

na qual $T_{sat}(p_{int})$ corresponde à temperatura de saturação do fluido de trabalho, estimada na pressão dentro da câmara de ebulição, e T_s é a temperatura da superfície, determinada pela extrapolação do perfil de temperatura linear fornecido pelos termopares alocados no bloco de cobre (o mesmo procedimento foi realizado por Manetti *et al*., 2020). Diferentes ajustes de curvas de temperatura linear, com R^2 sempre maior que 0,99, foram obtidos para cada fluxo de calor com base nas medidas de temperatura. A Figura 22 mostra o perfil de temperatura e as curvas de ajuste obtidas para cada termopar.

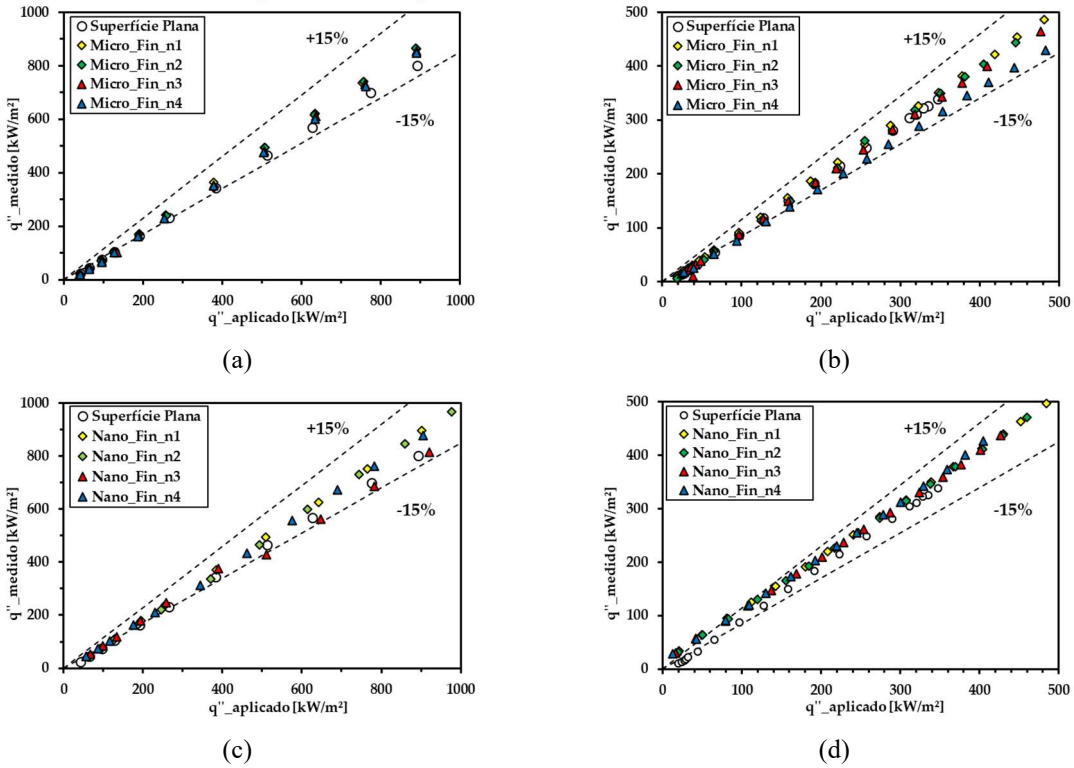
Figura 22 - Exemplo de perfis de temperatura linear usados para estimar o fluxo de calor e a temperatura da superfície.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O perfil de temperatura linear corrobora a hipótese de que as perdas de calor na direção radial são desprezíveis. Além disso, a Figura 23 representa a comparação entre o fluxo de calor imposto e o fluxo de calor estimado a partir do perfil linear de temperatura, mostrando que as perdas de calor são inferiores a 15% para todos os testes realizados.

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.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A incerteza experimental (u) foi calculada usando o método da série de Taylor, introduzido por Kline e McClintock (1953), descrito por Moffat (1988) e Coleman e Steele (2009) e padronizado pelo Birô Internacional de Pesos e Medidas (*Bureau International des Poids et Mesures*, BIPM) através do documento do guia para a expressão da incerteza de medição no qual foi traduzido pelo INMETRO (INMETRO, 2008).

A incerteza de um resultado R é função das variáveis independentes X_i,

$$u_R = \left[\sum_i^n \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} u_{X_i}\right)^2\right]^{1/2} \tag{11}$$

na qual, $\partial R/\partial X_i$ é o coeficiente de sensibilidade absoluto da grandeza u_{xi}. Para equações na forma de produto com as variáveis de primeira ordem, a equação acima pode ser reduzida para a forma de incerteza relativa,

$$\frac{u_R}{R} = \left[\sum_i^n \left(\frac{u_{X_i}}{X_i}\right)^2\right]^{1/2} \tag{12}$$

na qual não há a necessidade do cálculo das derivadas parciais (coeficiente de sensibilidade absoluto).

Portanto, para o fluxo de calor e o coeficiente de transferência de calor, as incertezas experimentais relativas são, respectivamente:

$$\frac{u_{q''_{\text{medido}}}}{q''_{\text{medido}}} = \left[\left(\frac{u_{\Delta T_{13}}}{\Delta T_{13}}\right)^2 + \left(\frac{u_{L_{13}}}{L_{13}}\right)^2\right]^{1/2} \tag{13}$$

$$\frac{u_h}{h} = \left[\left(\frac{u_{\Delta T_{\text{sat}}}}{\Delta T_{\text{sat}}}\right)^2 + \left(\frac{u_{q''_{\text{medido}}}}{q''_{\text{medido}}}\right)^2\right]^{1/2} \tag{14}$$

nas quais, a incerteza da diferença de temperatura dos termopares tipo K é ± 0,3 °C (obtida por meio da calibração descrita no Apêndice B); enquanto a incerteza da medida de distância entre os termopares alocados na seção de teste foi estimada pela distribuição retangular da resolução do instrumento de medição ($\pm 0{,}05/\sqrt{3}$). No entanto, $u_{\Delta T_{sat}}$ não foi obtida

através da diferença de temperatura dos termopares, pois depende de T_s, que por sua vez não pode ser calculada pela forma reduzida, Equação (12). Logo $u_{\Delta T_{sat}}$ é dado por,

$$u_{\Delta T_{\text{sat}}} = \left[\left(u_{(T_1 - T_{\text{sat}})}\right)^2 + \left(\frac{-(4/\pi) \cdot L_{1q} - L_{qp}}{k_{Cu}} u_{q''_{\text{medido}}} \right)^2 + \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{-q''_{\text{medido}}}{k_{\text{Cu}}} u_{L_{1q}} \right)^2 + \left(\frac{q''_{\text{medido}}}{k_{\text{Cu}}} u_{L_{\text{qp}}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

Figura 24 - Valores médios das incertezas experimentais para ambos os fluidos de trabalho e superfícies testadas.

Diferença temperatura ($u_{\Delta T}$)	6,9 % > $u_{\Delta T}$ > 1,3%
Fluxo de calor ($u_{q"}$)	15,5 % > $u_{q"}$ > 3,1 %
Coeficiente de Transferência de calor (u_h)	16,9 % > u_h > 3,5 %

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se que, à medida que o fluxo de calor aplicado aumenta, as incertezas experimentais tendem a diminuir.

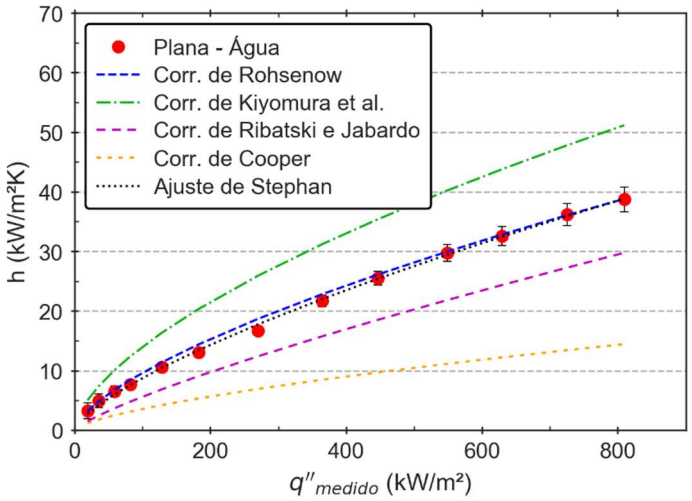
3.4 Validação do Aparato Experimental

A fim de verificar o aparato experimental desenvolvido para os testes de ebulição em piscina e a precisão do procedimento adotado, testes foram realizados para água deionizada e HFE-7100 utilizando uma superfície plana (R_a = 0,14 ± 0,005 μm, obtida pelo mesmo método de polimento proposto por Manetti *et al*., 2017) e os valores experimentais foram comparados com correlações fornecidas pela literatura: Rohsenow (1952), Cooper (1984), Ribatski e Jabardo (2003) e Kiyomura *et al*. (2017). Além destas, também foi utilizada o ajuste de curva proposto por Stephan (1992), $h = Cq"^n$, no qual *C* é um coeficiente que depende do par fluido-superfície e *n* é o expoente do fluxo de calor que tem seu valor entre 0,6 e 0,8.

Primeiramente, a bancada foi ensaiada com uma superfície de cobre plana polida mecanicamente e água deionizada como fluido de trabalho. Colocou-se 400 ml de água na câmara de ebulição - resultando em uma coluna de água de aproximadamente 50 mm. Variou-se o fluxo de calor aplicado de 25 kW/m^2 até 800 kW/m^2. A Figura 25 apresenta o resultado obtido comparado com as correlações apresentadas. Baseando-se no estudo de

Vachon, Nix e Tanger (1968), adotou-se C_{sf} = 0,0147 para água em superfície polida de cobre na correlação de Rohsenow (1952); na correlação de Kiyomura *et al*. (2017) adotou-se θ = 90°, que corresponde ao ângulo de contato medido em laboratório para a superfície polida (utilizando água como fluido de teste). Como não existiu confinamento, adotou-se s = 50 mm que se refere à coluna de líquido na bancada.

Figura 25 - Validação da bancada experimental utilizando água como fluido de trabalho.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O erro absoluto médio (*mean absolute error*, MAE) entre os resultados experimentais e as correlações pode ser calculado utilizando,

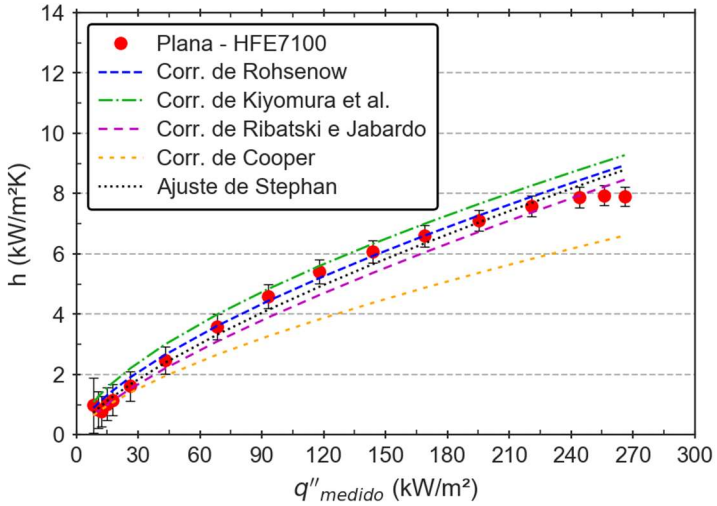
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left| \frac{h_{i,exp} - h_{i,c}}{h_{i,c}} \right|}{N} \tag{17}$$

O MAE foi de 4%, 53% e 31% para Rohsenow (1952), Ribatski e Jabardo (2003) e Kiyomura *et al*. (2017), respectivamente. O valor do coeficiente n de Stephan (1992) foi igual a 0,70, com um coeficiente de correlação R^2 = 0,98.

Após a validação da bancada com água, foi ensaiado o fluido HFE-7100. Repetiu-se a mesma metodologia utilizada anteriormente com a água, com exceção da faixa de fluxo de calor aplicado, que neste caso foi de 10 kW/m^2 até 270 kW/m^2. A Figura 26 apresenta o resultado obtido comparado com as correlações apresentadas. Assim como feito para água, usou-se as correlações de Rohsenow (1952), Cooper (1984), Ribatski e Jabardo (2003), Kiyomura *et al*. (2017) e o ajuste de curva de Stephan (1992) para verificar o resultado

experimental com os dados preditos. Neste caso, com base no trabalho de Cao *et al*. (2019), adotou-se C_{sf} = 0,005. Para o ângulo de contato estático, usou-se θ = 2º (fluido molhante) na correlação de Kiyomura *et al*. (2017).

Figura 26 - Validação da bancada experimental utilizando HFE-7100 como fluido de trabalho.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

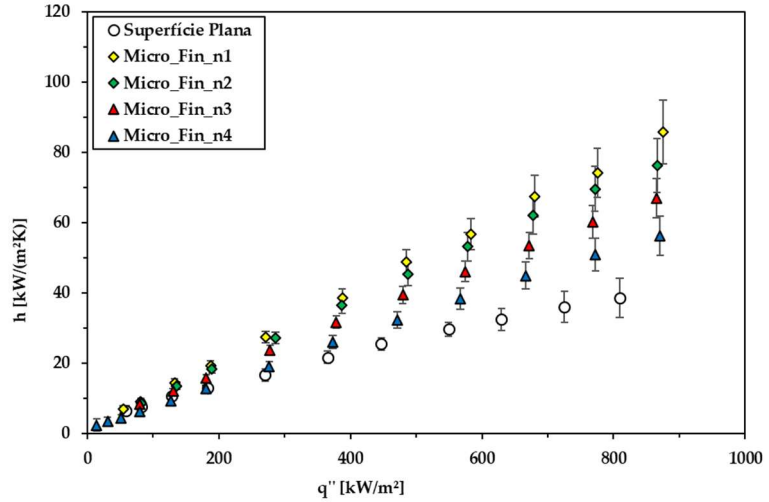
Os dados experimentais concordam satisfatoriamente com os valores preditos com um erro absoluto médio (MAE) de 10% para a correlação de Rohsenow (1992); 16% para Kiyomura *et al*. (2017); 26% para a correlação de Cooper (1984); e, 10% para a correlação de Ribatski e Jabardo (2003). O expoente *n* do ajuste de Stephan (1992) foi de 0,71, com um coeficiente de correlação R^2 = 0,99.

Observa-se, da Figura 26 para o fluido HFE-7100, que os últimos pontos estão próximos ao início do fluxo de calor de secagem; de acordo com Cardoso *et al*. (2011), o início da secagem é a condição para a qual o coeficiente de transferência de calor apresenta valor máximo. Portanto, é razoável que os métodos de predição não capturem a tendência do coeficiente de transferência de calor sob tais condições.

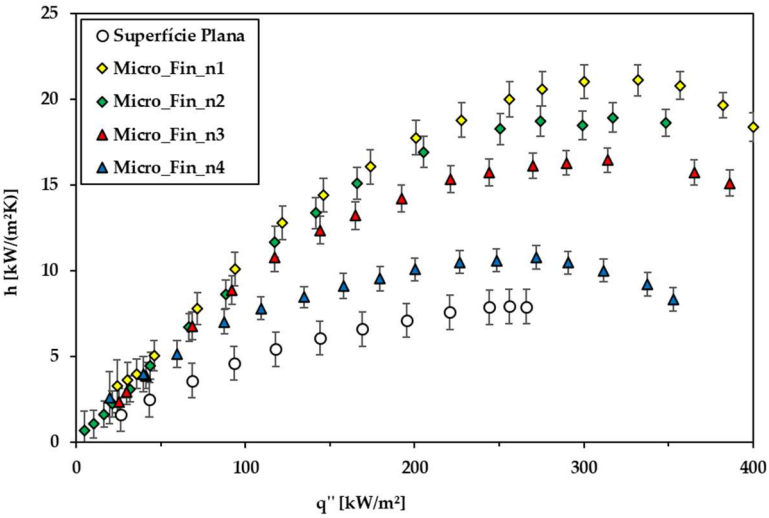
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES PARA EBULIÇÃO EM SUPERFÍCIES MICROESTRUTURADAS

A Figura 27 mostra as variações do coeficiente de transferência de calor em função do fluxo de calor para a superfície plana e superfícies microaletadas, usando água deionizada ou HFE-7100 como fluidos de trabalho. Todas as superfícies microaletadas apresentaram um incremento de, em média, 87% no CTC em comparação à superfície plana, independente do fluido de trabalho utilizado. Além disso, com o fluido HFE-7100, a ocorrência de secagem foi postergada para altos valores de fluxo de calor em comparação à superfície plana. Os resultados são semelhantes aos obtidos por Zhong *et al*. (2015) que mostraram um aumento na transferência de calor conforme o aumento do número de pilares e respectiva altura.

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.



(a)



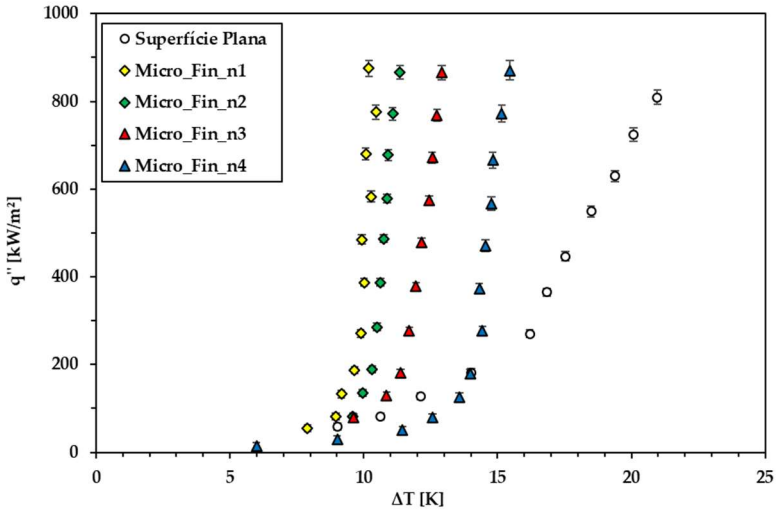
(b)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

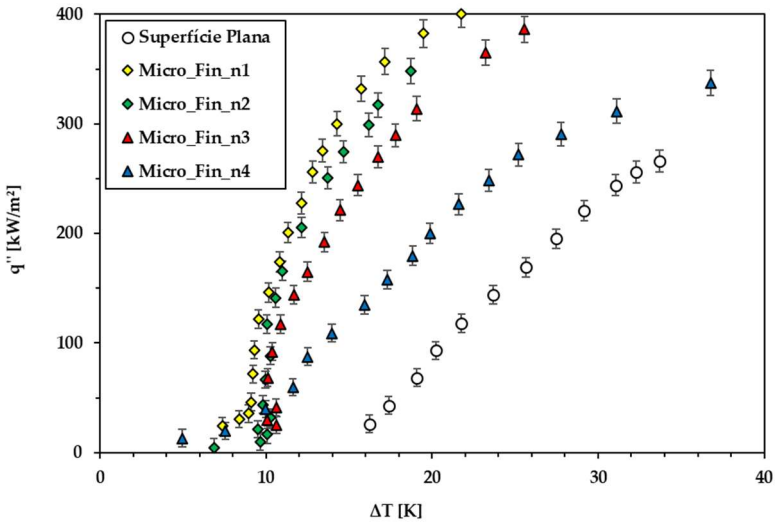
A faixa de aplicação do fluxo de calor para o HFE-7100 é menor em relação à água. Isso também foi observado no trabalho de Teodori, Moita e Moreira (2014) para a ebulição de FC-72 e Etanol em superfícies microestruturadas. Uma provável causa para a diferença na concavidade das curvas apresentadas na Figura 27 é a diferença das propriedades termofísicas dos fluidos. O HFE-7100 possui propriedades inferiores à água, principalmente o calor latente de vaporização (h_{lv}), calor específico (c_p) e a condutividade térmica (k); o que acarreta um menor desempenho da transferência de calor (podendo, inclusive, ter ocorrência precoce de secagem da superfície).

A Figura 28 apresenta as curvas parciais de ebulição em piscina para ambos os fluidos de trabalho, água deionizada e HFE-7100, em condições de saturação, sobre as superfícies microaletadas ou microestruturadas. Nota-se que para baixos fluxos de calor (para água valores de até 200 kW/m² e para HFE 7100 até 50 kW/m²) as superfícies microaletadas não possuem grande diferenças de superaquecimento, já para fluxos médios e altos (acima de 200 kW/m² para água e 50 kW/m² para HFE 7100) é possível observar uma diferença de comportamento entre as amostras; sendo que a Micro_Fin_n1 teve os menores valores de superaquecimento para ambos os fluidos de trabalho.

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.



(a)

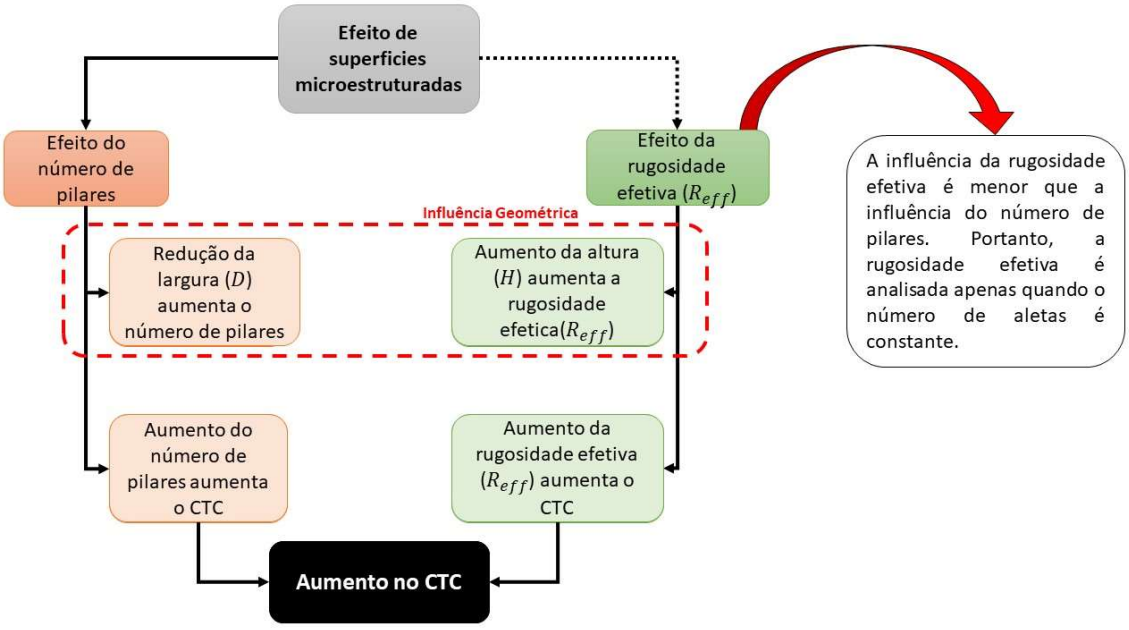


(b)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 29 resume os parâmetros de microaletas que podem influenciar a transferência de calor por ebulição em piscina. A presença de microaletas aumenta a área de troca de calor da superfície, levando a um aumento no CTC em comparação com a superfície plana. Pelos parâmetros analisados, o número de aletas parece ser o responsável pelo incremento do CTC, independente do fluido de trabalho utilizado. As superfícies 'Micro_Fin_n1' e 'Micro_Fin_n2' com 1024 aletas têm maiores coeficientes de transferência de calor do que 'Micro_Fin_n3' e 'Micro_Fin_n4', com 841 microaletas.

Figura 29 - Parâmetros de superfícies microaletadas que influenciam na transferência de calor por ebulição em piscina.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

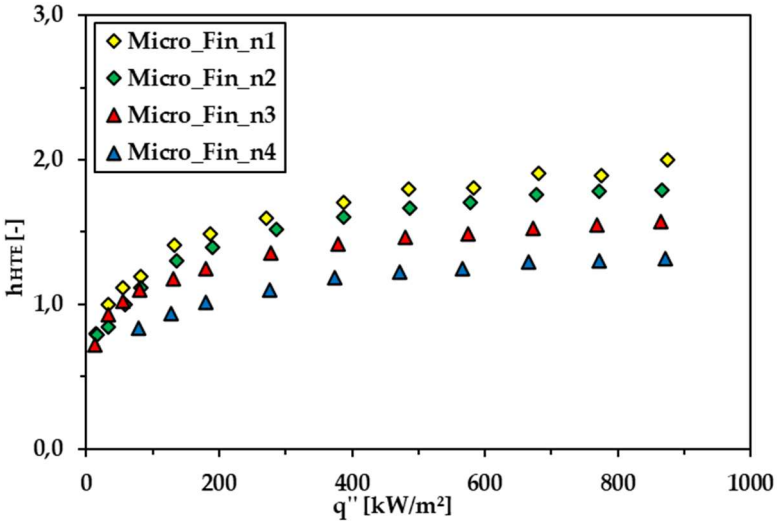
Porém, se o número de microaletas for constante, é necessário analisar a rugosidade efetiva ou fator de rugosidade, definido pela relação entre a área superficial e a área projetada; portanto, quanto maior a rugosidade efetiva, maior o desempenho de transferência de calor.

O fator de rugosidade não é o principal parâmetro responsável pela deterioração/incremento do CTC. Esta conclusão decorre da análise da Figura 13, que mostra que o valor de R_{eff} obtido por Chu *et al*. (2012) é o mesmo para as superfícies 'Micro_Fin_n1' e 'Micro_Fin_n3' e para as superfícies 'Micro_Fin_n2' e 'Micro_Fin_n4'; entretanto, ambos os conjuntos de dados apresentam valores diferentes para o coeficiente de transferência de calor. Ao analisar a relação dada por Chu *et al*. (2012), fica evidente que é possível obter valores idênticos para R_{eff} apenas ajustando os tamanhos das amostras. Assim, é melhor avaliar a influência da largura das aletas (D) e da altura (H) na transferência de calor.

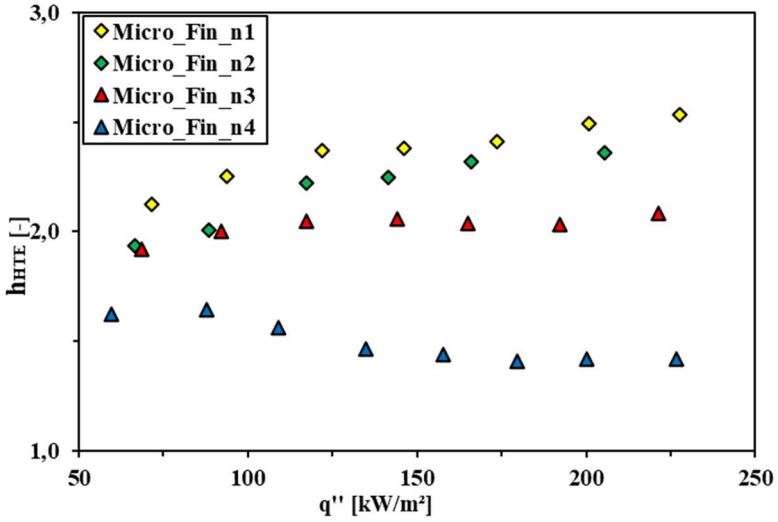
Neste trabalho, o espaço entre as aletas (S) foi previamente definido; desta forma, variou-se o comprimento e a altura das microaletas. Como as dimensões originais da superfície de cobre foram fixadas (16 × 16 mm), um aumento na largura das microaletas resulta em uma redução no número de aletas, levando à degradação do CTC, conforme mostrado na Figura 27. Isso ocorre porque o número de pilares está relacionado à densidade de sítios de nucleação, ou seja, quanto maior o número de pilares, maior a densidade dos sítios de nucleação. Quando comparamos duas superfícies com aletas de mesma largura, significando que ambas têm o mesmo número de microaletas, a aleta mais alta apresentará o maior CTC. Isso se deve às bordas laterais das aletas permitirem uma maior área de contato com o líquido.

A fim de mostrar mais claramente o efeito das superfícies microaletadas no aumento/deterioração do CTC, os resultados experimentais foram avaliados usando o fator de intensificação da transferência de calor ($h_{HTE} = {h_{fin}}/{h_{plana}}$), onde h_{fin} é o coeficiente de transferência de calor para as superfícies microaletadas e h_{plana} é o CTC para a superfície plana. Na Figura 30, independente do fluido de trabalho utilizado, o h_{HTE} aumenta com o aumento do fluxo de calor e o número de micropilares na superfície de aquecimento.

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.



(a)

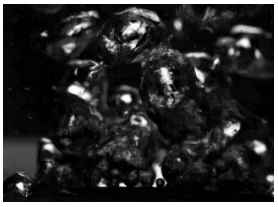
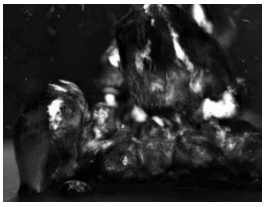
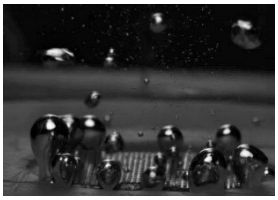
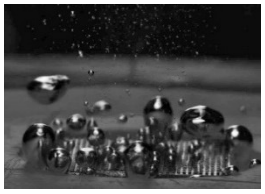
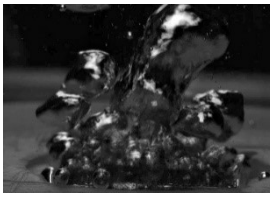
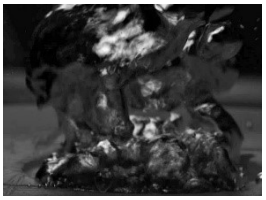
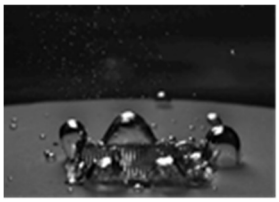
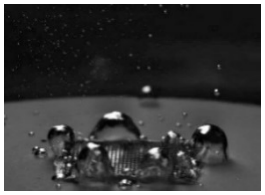
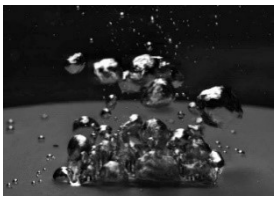
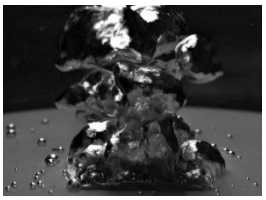
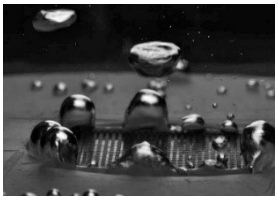
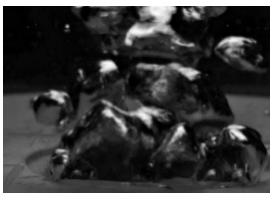
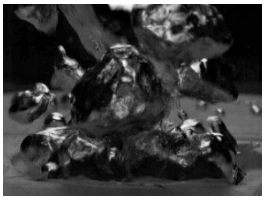
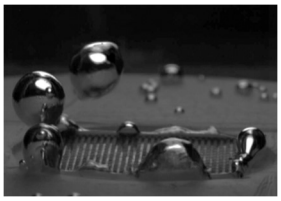
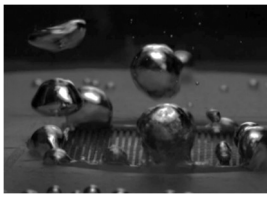
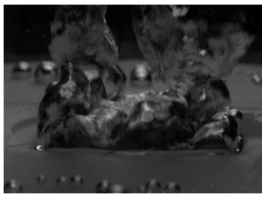


(b)

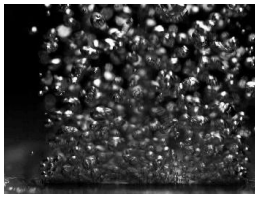
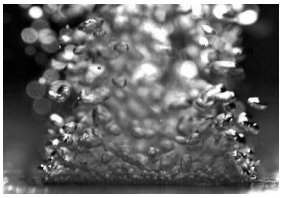
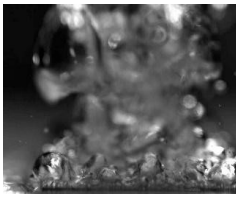
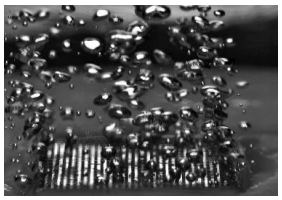
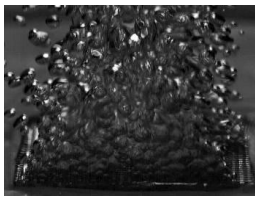
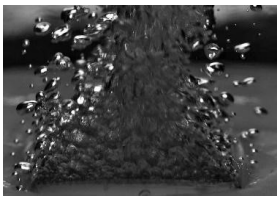
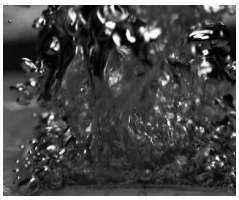
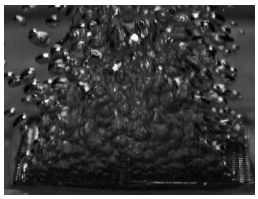
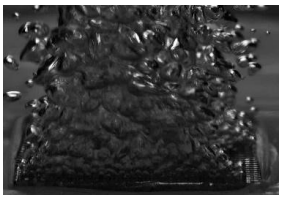
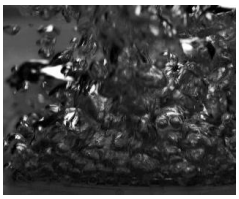
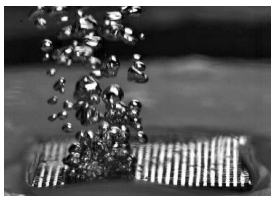
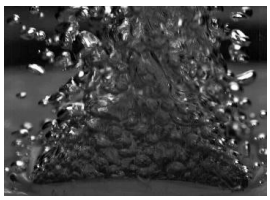
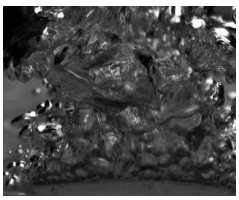
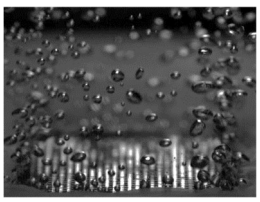
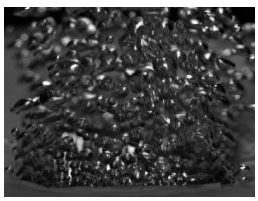
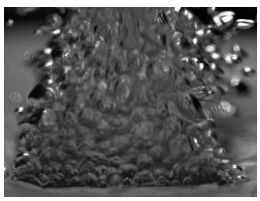
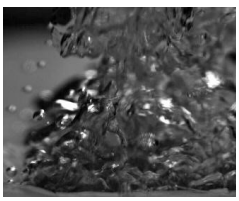
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Durante os ensaios de ebulição em piscina foram feitas filmagens a 1000 fps (*frames* por segundos) com uma resolução de 1024 × 1024 pixels utilizando uma câmera de alta velocidade, Photron FASTCAM SA3, com o objetivo de comparar o padrão de ebulição em cada condição de ensaio (Figura 31).

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.

	75 [kW/m²]	**200 [kW/m²]**	**300 [kW/m²]**	**500 [kW/m²]**
Plana				
	ΔT_{sat} = 9,0 ºC	ΔT_{sat} = 14,0 ºC	ΔT_{sat} = 16,2 ºC	ΔT_{sat} = 18,5 ºC
Micro_Fin_n1				
	ΔT_{sat} = 9,0 ºC	ΔT_{sat} = 9,6 ºC	ΔT_{sat} = 10,5 ºC	ΔT_{sat} = 10,8 ºC
Micro_Fin_n2				
	ΔT_{sat} = 7,9 ºC	ΔT_{sat} = 10,3 ºC	ΔT_{sat} = 9,9 ºC	ΔT_{sat} = 9,9 ºC
Micro_Fin_n3				
	ΔT_{sat} = 8,6 ºC	ΔT_{sat} = 11,3 ºC	ΔT_{sat} = 11,7 ºC	ΔT_{sat} = 12,2 ºC
Micro_Fin_n4				
	ΔT_{sat} = 11,5 ºC	ΔT_{sat} = 13,6 ºC	ΔT_{sat} = 14,4 ºC	ΔT_{sat} = 14,5 ºC

(a)

	25 [kW/m²]	50 [kW/m²]	100 [kW/m²]	200 [kW/m²]
Plana				
	ΔT_{sat} = 15,0 ºC	ΔT_{sat} = 17,4 ºC	ΔT_{sat} = 20,2 ºC	ΔT_{sat} = 27,5 ºC
Micro_Fin_n1				
	ΔT_{sat} = 6,4 ºC	ΔT_{sat} = 9,1 ºC	ΔT_{sat} = 9,3 ºC	ΔT_{sat} = 11,3 ºC
Micro_Fin_n2				
	ΔT_{sat} = 10,1 ºC	ΔT_{sat} = 9,8 ºC	ΔT_{sat} = 10,3 ºC	ΔT_{sat} = 12,1 ºC
Micro_Fin_n3				
	ΔT_{sat} = 10,9 ºC	ΔT_{sat} = 10,6 ºC	ΔT_{sat} = 10,4 ºC	ΔT_{sat} = 13,5 ºC
Micro_Fin_n4				
	ΔT_{sat} = 8,6 ºC	ΔT_{sat} = 12,6 ºC	ΔT_{sat} = 13,9 ºC	ΔT_{sat} = 19,6 ºC

(b)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

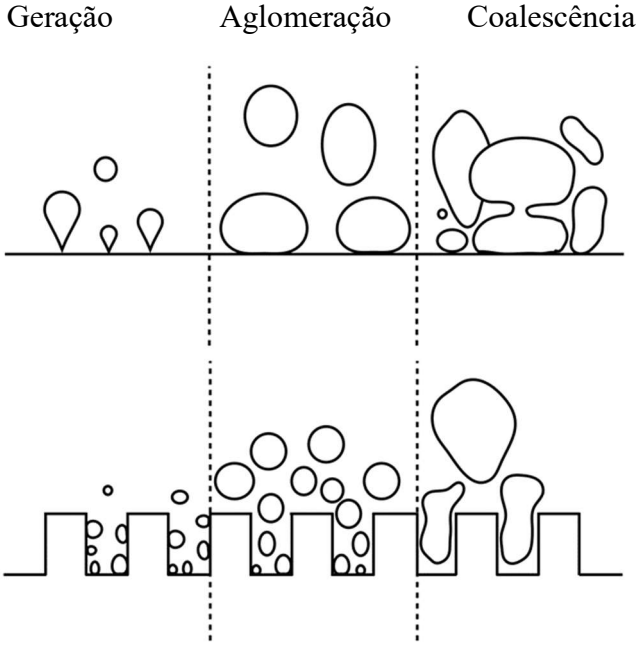
Para fluxos de calor mais baixos, tem-se a coexistência de bolhas isoladas e coalescidas, conforme mostrado na Figura 31. Nessa condição, ainda há um espaço entre as bolhas e a convecção natural predomina como mecanismo de transferência de calor. À medida que o fluxo de calor aumenta, o superaquecimento da parede é menor para as superfícies

microaletadas em comparação com a superfície plana, indicando um incremento na transferência de calor.

Os resultados da visualização mostram que para o fluido HFE-7100 e para um fluxo de calor de 25 kW/m², a superfície plana tem uma quantidade menor de locais de nucleação ativos em comparação com as superfícies microaletadas, o que leva a um aumento do superaquecimento da parede (para a água esse comportamento se observa para um fluxo de 200 kW/m^2); para superfícies microaletadas, a menor temperatura da parede é consequência de gases aprisionados entre as aletas, que promovem a ativação de sítios de nucleação. A taxa de formação de bolhas aumenta, porém estas partem discretamente da superfície, levando ao aumento do CTC devido à agitação local e maior área de contato com o líquido.

A dinâmica de crescimento das bolhas de vapor em superfícies microaletadas e superfícies planas são diferentes e podem ser divididas em regime de geração de bolhas, de aglomeração e de coalescência (Duan *et al*., 2019). A Figura 32 mostra um desenho esquemático da dinâmica de crescimento da bolha de vapor em superfícies planas e microaletadas.

Figura 32 - Desenho esquemático dos regimes de dinâmica de crescimento das bolhas de vapor.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O primeiro regime, para valores de baixos fluxos de calor, é caracterizado por bolhas isoladas na superfície aquecida; ao aumentar o fluxo de calor, a frequência de bolhas de vapor na superfície aquecida é alta o suficiente para formar aglomerados. Para fluxos de

calor baixo e moderado, observou-se o menor superaquecimento da parede tanto para superfícies planas quanto microaletadas, promovido pelo remolhamento do líquido. Para altos fluxos de calor, a dinâmica da bolha de vapor é caracterizada pelo regime de coalescência, onde pequenas bolhas de vapor coalescem para formar outras maiores dificultando o processo de remolhamento, o que aumenta o superaquecimento da parede e, consequentemente, reduz o CTC (Figura 31).

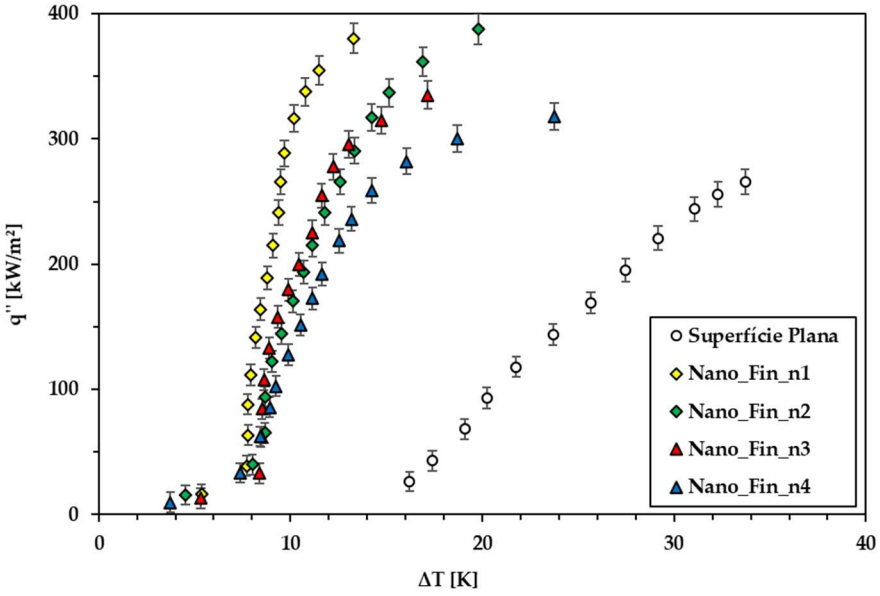
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES PARA EBULIÇÃO EM SUPERFÍCIES NANOESTRUTURADAS HIERARQUICAMENTE

A realização de experimentos em ebulição é sensível às condições de testes e ao procedimento experimental adotado. Devido a isso, os testes foram realizados em dias diferentes para a mesma configuração (para cada superfície, o experimento foi realizado pelo menos três vezes em condições semelhantes). Como resultado, não foram observadas nanopartículas suspensas no fluido e alterações significativas nas curvas de CTC para os ensaios realizados (detalhes encontram-se no Apêndice C).

5.1 Ensaios de Ebulição com HFE-7100

Na Figura 33 tem-se as curvas parciais de ebulição para a superfície plana (superfície de referência) e para as superfícies nanoestruturadas hierarquicamente, usando como fluido de trabalho HFE-7100 em condições de saturação. Em geral, as curvas parciais de ebulição para as superfícies hierárquicas são deslocadas para a esquerda quando comparadas com a amostra plana. As superfícies hierárquicas exibem valores semelhantes de superaquecimento da parede para o fluxo de calor até 100 kW/m² e inferiores à amostra polida simples que apresentou um superaquecimento de parede de 23 K em 100 kW/m².

Figura 33 - Curva de ebulição para superfície plana (superfície de referência) e para as superfícies hierárquicas, usando HFE-7100 como fluido de trabalho.



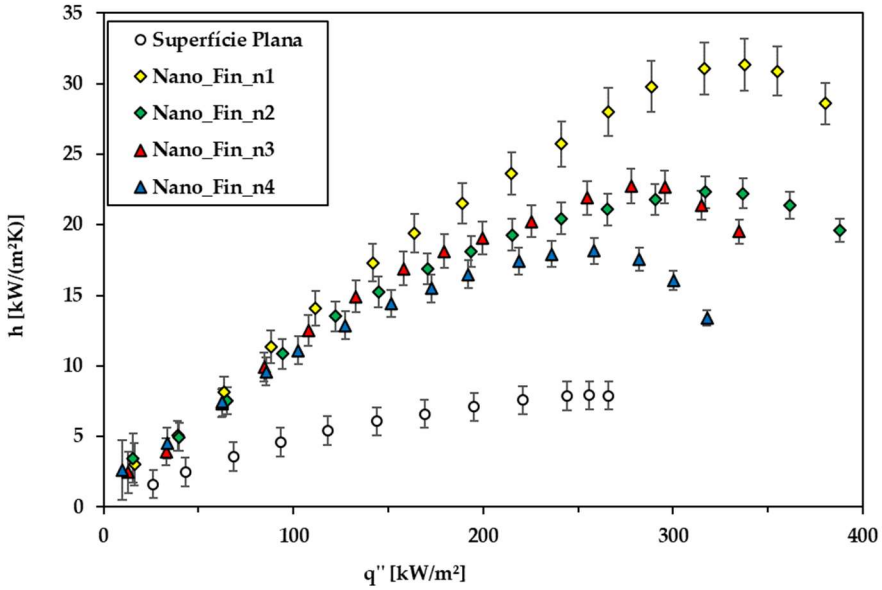
Fonte: Elaboração do próprio autor.

O aumento significativo do fluxo de calor máximo para reduzido superaquecimento nas superfícies hierárquicas é atribuído ao aumento da capilaridade e da densidade de sítios de nucleação, com diminuição do diâmetro das bolhas de vapor. Além disso, deve-se observar que o aumento da capilaridade desempenha um papel essencial no remolhamento da superfície, postergando o aparecimento de pontos de secagem (*dryout spots*) sobre a superfície aquecida, aumentando o desempenho da transferência de calor e retardando a ocorrência do fluxo de calor crítico (FCC).

Os valores similares de fluxo de calor máximo para as superfícies hierárquicas podem ser atribuídos aos valores de capilaridade, os quais não apresentaram diferenças significativas entre as amostras. Da mesma forma que Cardoso *et al*. (2011), a ocorrência de secagem foi definida como a condição para a qual o CTC apresenta um valor máximo; sendo assim, o fluxo de calor associado a este máximo CTC foi denominado como fluxo de calor máximo, $q''_{CTC,max}$. Esta definição é interessante em aplicações de engenharia, visto que é o fluxo de calor limite acima do qual as superfícies hierárquicas deteriorarão rapidamente o CTC. O $q''_{CTC,max}$ para as superfícies hierárquicas 'Nano_Fin_n1' e 'Nano_Fin_n2' aumentou 32% em relação ao da superfície plana. Para o fluxo de calor de 255 kW/m^2, a superfície plana apresentou um superaquecimento de aproximadamente 32 K, enquanto a amostra 'Nano_Fin_n1' apresentou um superaquecimento inferior a 10 °C para o mesmo valor de fluxo de calor.

A Figura 34 representa o comportamento do coeficiente de transferência de calor em função do fluxo de calor, para as superfícies hierárquicas em comparação com a plana, usando HFE-7100 como fluido de trabalho. As superfícies hierárquicas mostram um aumento significativo do CTC em comparação à superfície plana, sendo que o CTC aumenta como o aumento de altura e número de micropilares.

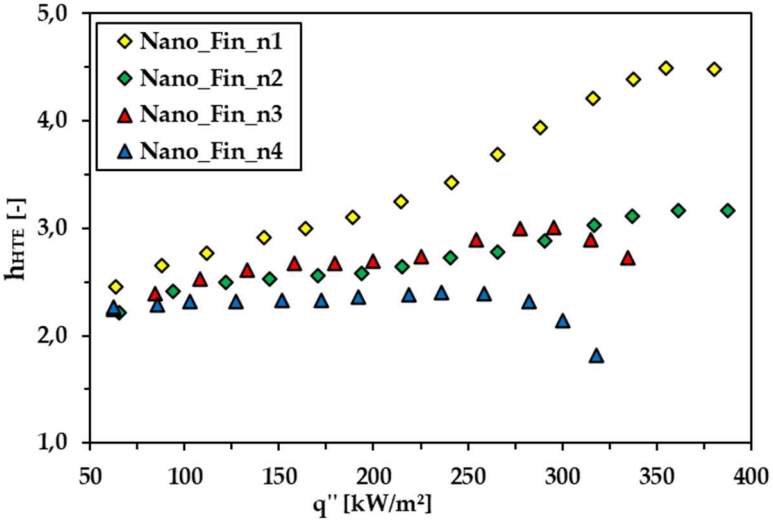
Figura 34 – Coeficiente de transferência de calor para superfície plana (superfície de referência) e para as superfícies hierárquicas, usando HFE-7100 como fluido de trabalho.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 35 mostra o efeito das superfícies nanoestruturadas hierarquicamente no aumento/deterioração do CTC, usando o fator de intensificação da transferência de calor ($h_{HTE} = {}^{h_{Nano_Fin}}/_{h_{plana}}$), onde h_{Nano_Fin} é o coeficiente de transferência de calor para as superfícies hierárquicas e h_{plana} é o CTC para a superfície plana.

Figura 35 – Fator de intensificação da transferência de calor para as superfícies hierárquicas, usando HFE-7100 como fluido de trabalho.

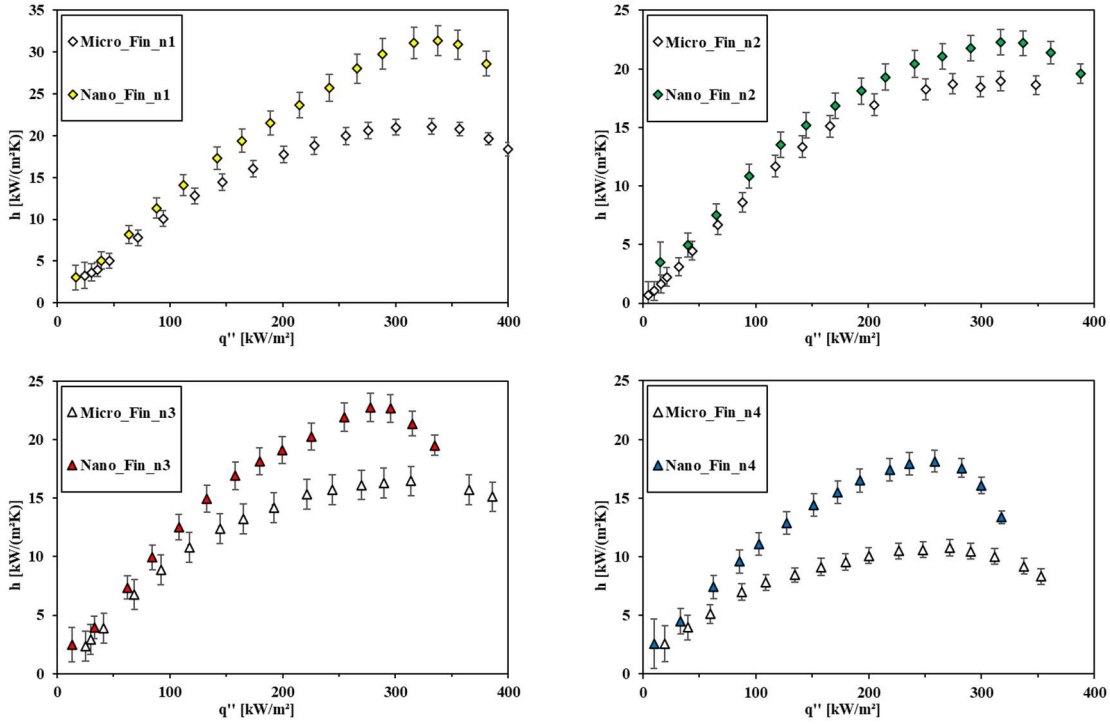


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A combinação de micropilares e superfícies nanoestruturadas (por meio da deposição de nanopartículas) intensificaram 2 a 4 vezes a transferência de calor. Em geral, o CTC aumenta com o aumento do fluxo de calor e o número de micropilares na superfície de aquecimento, exceto para as amostras 'Nano_Fin_n2' e 'Nano_Fin_n3' que exibiram valores semelhantes. O maior desempenho térmico da amostra hierárquica 'Nano_Fin_n1' está relacionado à maior densidade de sítios de nucleação; além disso, esta amostra tem o maior número e as mais altas microaletas, permitindo uma área de contato maior com o líquido.

A deposição de nanopartículas sobre a superfície microestruturada aumentou o CTC quando comparado às amostras microtexturizadas (apresentadas no Capítulo 4). Para ilustrar o efeito do processo de nanoestruturação no comportamento do CTC, a Figura 36 mostra a comparação da curva de CTC para a superfície hierárquica e sua respectiva superfície microestruturada, para todas as amostras estudadas.

Figura 36 - Comparação do CTC entre as superfícies hierárquicas e a respectiva microestruturada, usando HFE-7100 como fluido de trabalho.



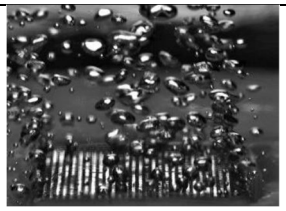
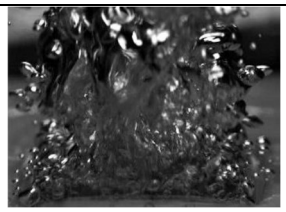
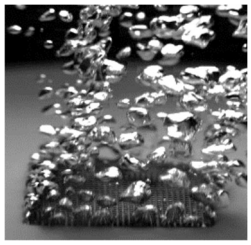
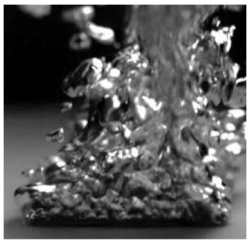
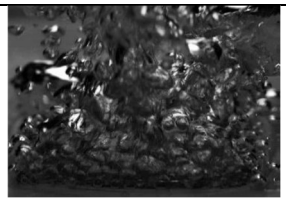
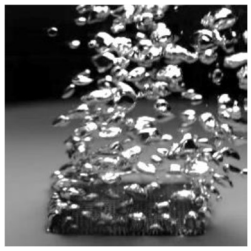
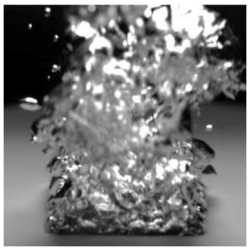
Fonte: Elaboração do próprio autor.

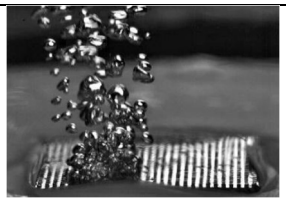
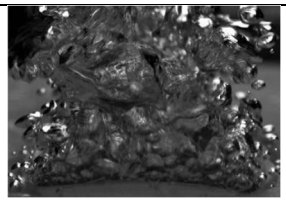
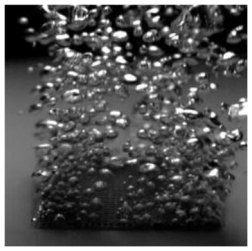
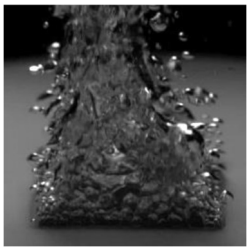
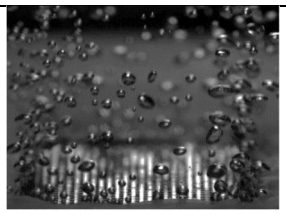
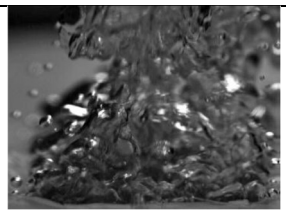
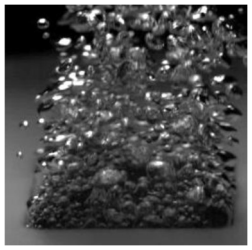
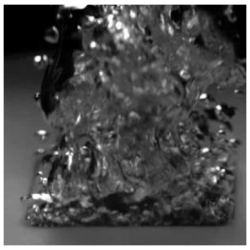
As superfícies nanoestruturadas hierarquicamente produzidas por meio do processo de ebulição do nanofluido de alumina melhoram significativamente o CTC para regiões de baixo e alto fluxo de calor (considerando todas as amostras, um aumento de até 65% foi observado). Tal aumento do CTC não apenas se deve ao aumento da densidade de sítios de

nucleação, que afeta diretamente na dinâmica de formação, crescimento e partida da bolha de vapor, mas também ao remolhamento da superfície devido à maior capilaridade, que aumenta a capacidade de bombeamento do líquido para as regiões mais quentes da superfície aquecida.

A Figura 37 apresenta um comparativo dos valores de superaquecimento e dinâmica de crescimento e partida das bolhas de vapor entre as superfícies hierárquicas e as respectivas microestruturadas, para 25 e 200 kW/m^2. Observa-se que o superaquecimento é sempre menor para as superfícies hierárquicas indicando, assim, que superfícies híbridas (que combinam as técnicas de micro e nanofabricação) são eficazes para o aumento do CTC.

Figura 37- Visualização do fenômeno de ebulição para superfícies nanoestruturadas hierarquicamente e respectivas microestruturadas.

	25 [kW/m²]	**200 [kW/m²]**
Micro_Fin_n1		
	ΔT = 6,4 °C	ΔT = 11,3 °C
Nano_Fin_n1		
	ΔT = 4,9 °C	ΔT = 8,8 °C
Micro_Fin_n2		
	ΔT = 10,1 °C	ΔT = 12,1 °C
Nano_Fin_n2		
	ΔT = 4,5 °C	ΔT = 10,7 °C

Micro_Fin_n3		
	ΔT = 10,9 °C	ΔT = 13,5 °C
Nano_Fin_n3		
	ΔT = 5,3 °C	ΔT = 10,5 °C
Micro_Fin_n4		
	ΔT = 8,6 °C	ΔT = 19,6 °C
Nano_Fin_n4		
	ΔT = 3,7 °C	ΔT = 11,7 °C

Fonte: Elaboração do próprio autor.

É mais fácil observar o comportamento das bolhas de vapor devido à menor interação entre as mesmas para baixos fluxos de calor (abaixo de 50 kW/m^2). A deposição de nanopartículas em superfícies microestruturadas altera a morfologia e a estrutura porosa da superfície, aumentando a ativação de sítios de nucleação em toda a superfície, o que melhora o processo de agitação local e o remolhamento, reduzindo a temperatura da parede e induzindo a uma melhor transferência de calor por ebulição. Quanto maior o fluxo de calor, maior a coalescência das bolhas de vapor, caracterizada por um maior volume de vapor sobre a superfície que inibe a reposição de líquido, afetando negativamente o desempenho da transferência de calor por ebulição, conforme mostrado na Figura 36 para os últimos fluxos de calor aplicados.

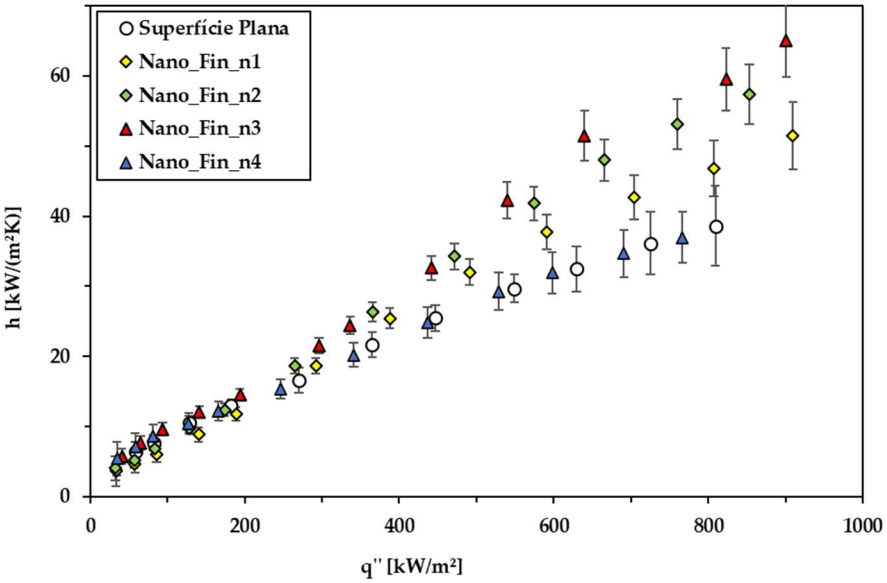
Seguindo o mesmo procedimento de Nunes *et al*. (2020), a condição para a qual o CTC apresenta um valor máximo foi determinada pelo ajuste polinomial das curvas de CTC, sendo o fluxo de calor correspondente a este ponto o fluxo de calor máximo (início da secagem da superfície). Os resultados estimados para $q''_{CTC,max}$ indicam um aumento de até 15% para as superfícies nanoestruturadas hierarquicamente, sendo mais pronunciado para 'Nano_Fin_n1'.

Ao considerar o comportamento da capilaridade para superfícies hierárquicas (Figura 17), podemos inferir que a deposição de nanopartículas aumentou a absorção de líquido, promovendo remolhamento da superfície e, consequentemente, retardando a ocorrência de pontos secos (*dry spots*); isso é consistente com os resultados encontrados para a amostra 'Nano_Fin_n1', a qual apresentou um aumento na capacidade de absorção de líquido de aproximadamente 60% em comparação com a 'Micro_Fin_n1' e o maior $q''_{CTC,max}$ (aproximadamente 340 kW/m²).

5.2 Ensaios de Ebulição com Água

Os resultados experimentais de ebulição em piscina em superfícies nanoestruturadas hierarquicamente com água deionizada são apresentados na Figura 38. A melhora observada no CTC em comparação com a superfície de referência (exceto para a 'Nano_Fin_n4'), após o fluxo de calor de 200 kW/m², está associada à influência dos micropilares, uma vez que estes aumentam a área de troca de calor. O comportamento anômalo da amostra 'Nano_Fin_n4' se deve, muito provavelmente, à combinação superfície/fluido; esta amostra apresentou uma deposição de nanopartículas mais acentuada na base dos micropilares (Figura 15), aumentando a resistência térmica e reduzindo os sítios de nucleação ativos (uma vez que pode ocorrer o entupimento desses); fatores estes que prejudicam a transferência de calor.

Figura 38 – Coeficiente de transferência de calor para superfície plana (superfície de referência) e para as superfícies hierárquicas, usando água como fluido de trabalho.

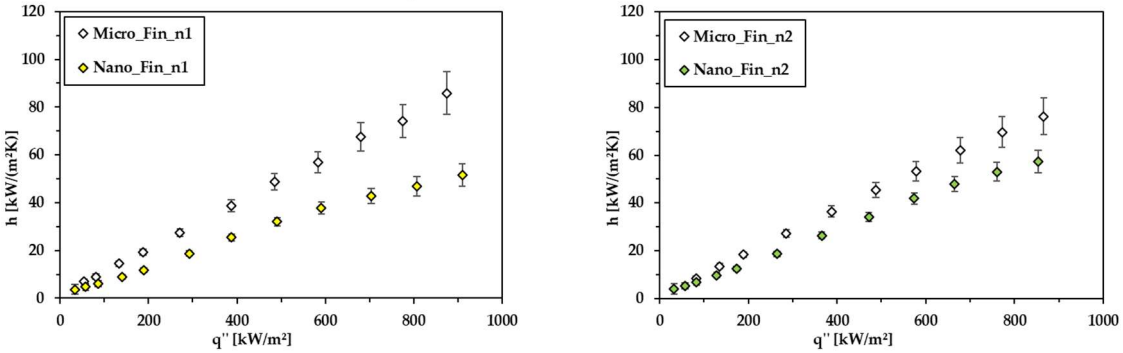


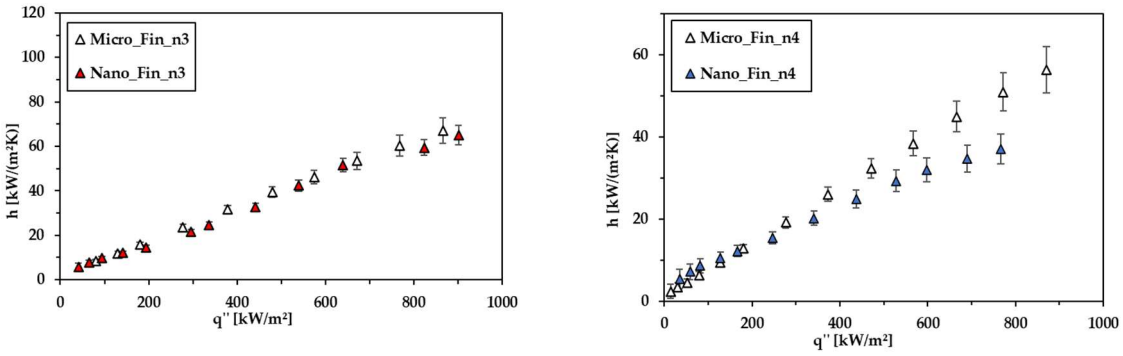
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para as superfícies nanoestruturadas hierarquicamente em ebulição em piscina utilizando água como fluido de trabalho não há aumentos significativos no CTC em relação à superfície plana, como observado para as amostras microestruturadas.

Para ilustrar mais claramente o efeito do processo de nanoestruturação no comportamento do CTC, a Figura 39 mostra a comparação da curva de CTC para a superfície hierárquica e sua respectiva superfície microestruturada, para todas as amostras estudadas.

Figura 39 - Comparação do CTC entre as superfícies hierárquicas e a respectiva microestruturada, usando água como fluido de trabalho.



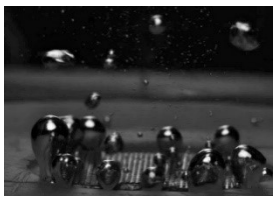
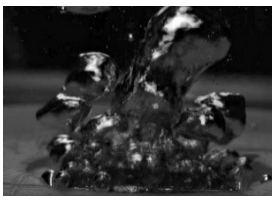
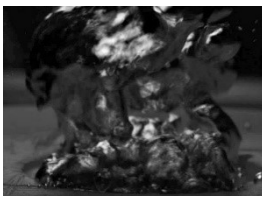


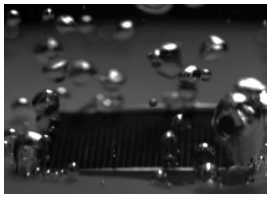
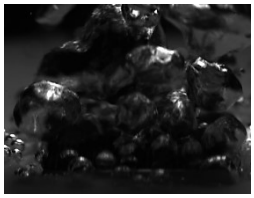
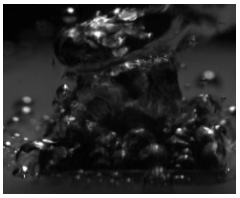
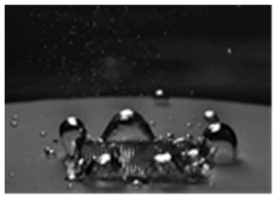
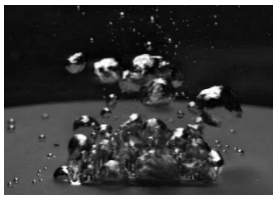
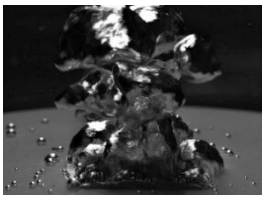
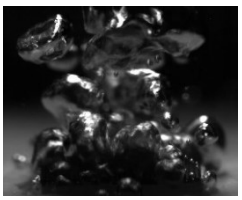
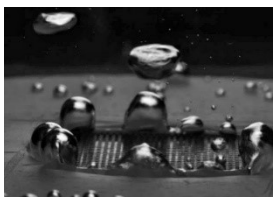
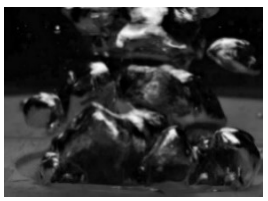
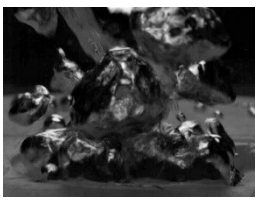
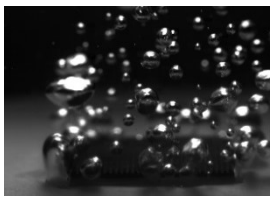
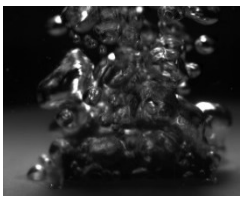
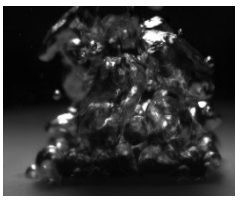
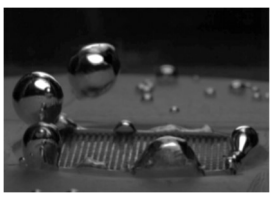
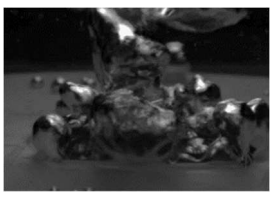
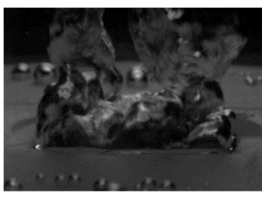
Fonte: Elaboração do próprio autor.

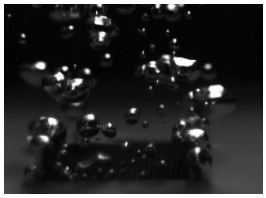
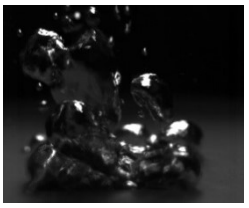
Observa-se que, usando água como fluido de trabalho, o processo de deposição de nanopartículas causou uma degradação na transferência de calor quando comparado com sua respectiva superfície microestruturada. A baixa capilaridade do fluido (diferentemente do que se tem para o HFE-7100) afeta negativamente o remolhamento da superfície, impedindo o líquido frio adjacente de acessar as regiões quentes da superfície. Para os ensaios com água, não foi possível alcançar o fluxo de calor máximo devido às limitações do sistema de aquecimento.

A Figura 40 apresenta um comparativo dos valores de superaquecimento e dinâmica de crescimento e partida das bolhas de vapor entre as superfícies hierárquicas e as respectivas microestruturadas, para diferentes valores de fluxo de calor. Observa-se que o superaquecimento é sempre menor para as superfícies hierárquicas indicando, assim, que superfícies híbridas (que combinam as técnicas de micro e nanofabricação) são eficazes para o aumento do CTC.

Figura 40- Visualização do fenômeno de ebulição usando água como fluido de trabalho para superfícies nanoestruturadas hierarquicamente e respectivas microestruturadas.

	75 [kW/m²]	**300 [kW/m²]**	**500 [kW/m²]**
Micro_Fin_n1			
	ΔT_{sat} = 9,0 ºC	ΔT_{sat} = 10,5 ºC	ΔT_{sat} = 10,8 ºC

Nano_Fin_n1			
	ΔT_{sat} = 12,2 ºC	ΔT_{sat} = 15,6 ºC	ΔT_{sat} = 15,4 ºC
Micro_Fin_n2			
	ΔT_{sat} = 7,9 ºC	ΔT_{sat} = 9,9 ºC	ΔT_{sat} = 9,9 ºC
Nano_Fin_n2			
	ΔT_{sat} = 10,9 ºC	ΔT_{sat} = 14,2 ºC	ΔT_{sat} = 13,8 ºC
Micro_Fin_n3			
	ΔT_{sat} = 8,5 ºC	ΔT_{sat} = 11,7 ºC	ΔT_{sat} = 12,2 ºC
Nano_Fin_n3			
	ΔT_{sat} = 8,6 ºC	ΔT_{sat} = 13,4 ºC	ΔT_{sat} = 13,8 ºC
Micro_Fin_n4			
	ΔT_{sat} = 11,5 ºC	ΔT_{sat} = 14,4 ºC	ΔT_{sat} = 14,5 ºC

Nano_Fin_n4			
	ΔT_{sat} = 11,0 ºC	ΔT_{sat} = 16,0 ºC	ΔT_{sat} = 16,9 ºC

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim como nas visualizações apresentadas anteriormente, somente para fluxos de calor baixos é possível observar diferenças na dinâmica das bolhas de vapor; para fluxos de calor mais elevados, a coalescência e maior frequência de partida das bolhas dificultam análises, mesmo que qualitativas. Observa-se que para o caso com água, em geral, as superfícies nanoestruturadas hierarquicamente apresentaram maior superaquecimento quando comparadas às superfícies microestruturadas.

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, consequentemente, 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 nanostructured 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.; BHAUMIKC, 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 - EBECEM, 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.

APÊNDICE A

A.1 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS FLUIDOS DE TRABALHO

O presente trabalho utilizou diferentes fluidos de trabalho para os testes de ebulição: água deionizada e HFE-7100. A água deionizada é obtida por meio de um dispositivo de filtragem QUIMIS Modelo Q380. As propriedades termofísicas de ambos os fluidos são mostrados na Tabela A.1.

Tabela A.1 - Propriedades termofísicas dos fluidos de trabalho utilizados no presente estudo, nas respectivas temperaturas de saturação.

PROPRIEDADES (p_{sat} = 98 kPa e T_{sat})	**Água Deionizada**	**HFE-7100**
Peso molecular	18,02 kg/kmol	250 kg/kmol
Temperatura de saturação, T_{sat}	99 K	60 K
Massa específica do líquido, ρ_l	959,1 kg/m³	1420,7 kg/m³
Massa específica do vapor, ρ_v	0,57 kg/m³	9,5 kg/m³
Calor latente de vaporização, h_{lv}	2256,7 kJ/kg	111,9 kJ/kg
Condutividade térmica do líquido, k_l	0,66 W/m K	0,06 W/m K
Calor específico do líquido, cp_l	4216 J/kg K	1253 J/kg K
Viscosidade cinemática do líquido, ν_l	2,97 x 10^{-7} m²/s	3,01x10^{-7} m²/s
Viscosidade dinâmica do líquido, μ_l	2,84x10^{-4} kg/m s	4,31x10^{-4} kg/m s
Número de Prandtl, Pr_l	1,80	8,72
Tensão superficial do líquido, σ_l	72 mN/m	13,6 mN/m

Fonte: Elaboração do próprio autor.

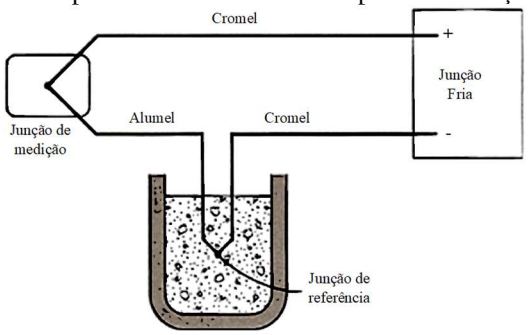
APÊNDICE B

B.1 CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

Para as medições das temperaturas no bloco de cobre, líquido e vapor do fluido de trabalho durante os ensaios de ebulição foram calibrados três termopares (T_1, T_2 e T_3) tipo K (Cromel/Alumel) 0,5 mm blindados Ômega e dois termopares (T_{liq} e T_{vap}) tipo K fabricados em laboratório a partir dos fios Cromel/Alumel Ômega. Os termopares foram calibrados para a correta obtenção dos valores de temperatura no bloco de cobre, no líquido e no vapor e para estimar o desvio padrão/incerteza das medições.

A calibração foi realizada mantendo todos os termopares imersos em um banho termostático juntamente com um termômetro de bulbo de mercúrio com incremento de escala igual a 0,1 °C e uma termoresistência Pt-100 (4 fios) calibrada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) com incerteza expandida $U_{95\%} = 0{,}03$ °C. Outro termopar idêntico aos demais foi utilizado como junção de referência, sendo este imerso em um banho de gelo fundente. O arranjo pode ser simplificado na ilustração da Figura B.1.

Figura B.1 - Esquema do termopar de referência utilizado para a calibração dos demais termopares.



Fonte: Manetti (2017).

A medição da diferença de potencial em milivolt (mV) gerada pelos termopares foi capturada utilizando um sistema de aquisição de dados AGILENT 34970A (DAQ). As medidas de temperatura foram calibradas numa faixa de 20,0 °C a 97,0 °C crescente e decrescente. Após a obtenção das curvas de calibração *T versus mV* para cada termopar, as mesmas foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados para uma função linear dada por,

$$T = A(mV) + B \tag{B.1}$$

na qual, *T* é o valor real de temperatura fornecido pela termoresistência, *A* é o coeficiente angular de ajuste da curva, *B* é o coeficiente linear e *mV* é a voltagem medida pelo canal.

Os coeficientes *A* e *B* foram calculados pelo método dos mínimos quadrados. As funções obtidas foram inseridas no programa de aquisição dos dados, a fim de converter o sinal de voltagem de cada termopar em temperatura na escala Celsius. A incerteza experimental foi dada pelo desvio padrão das temperaturas em relação ao ajuste linear,

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_i^N \left(T_i - T_{i,ajuste}\right)^2}{N-2}} \tag{B.2}$$

no qual *N* é o número de amostra, neste caso *N* = 47. As incertezas são dadas na Tabela B.1.

Tabela B.1 - Incertezas experimentais das temperaturas.

$\sigma_{T_{liq}} = 0{,}23\ °C$
$\sigma_{T_{vap}} = 0{,}24\ °C$
$\sigma_{T_1} = 0{,}28\ °C$
$\sigma_{T_2} = 0{,}29\ °C$
$\sigma_{T_3} = 0{,}29\ °C$

Fonte: Elaboração do próprio autor.

APÊNDICE C

Figura C.1 - Repetibilidade das curvas de CTC para superfícies nanoestruturadas hierarquicamente, usando HFE-7100 como fluido de trabalho.

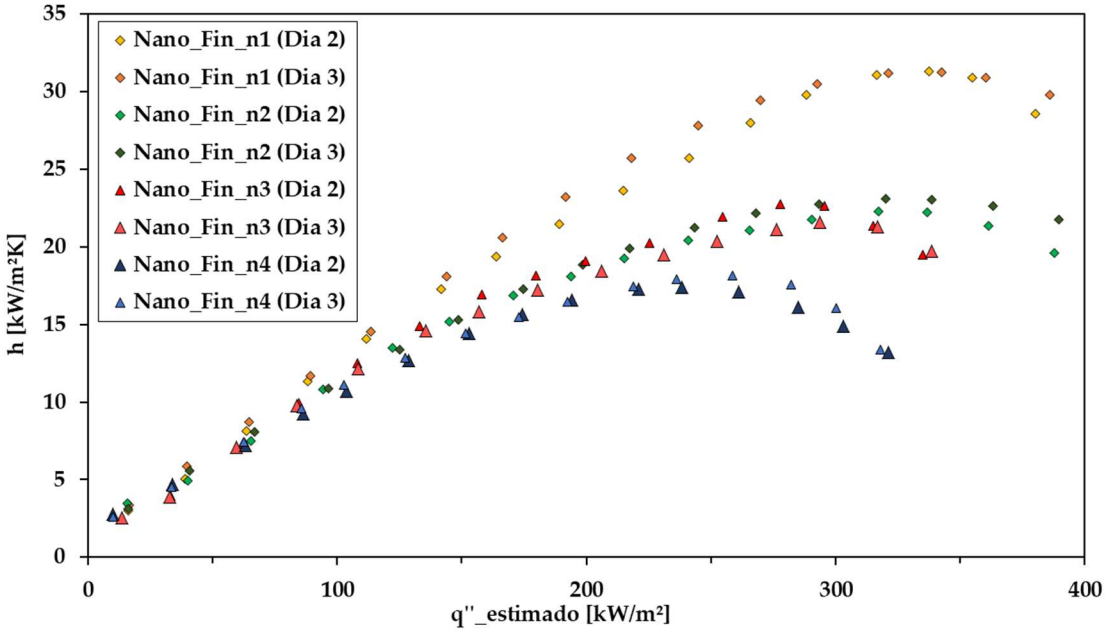
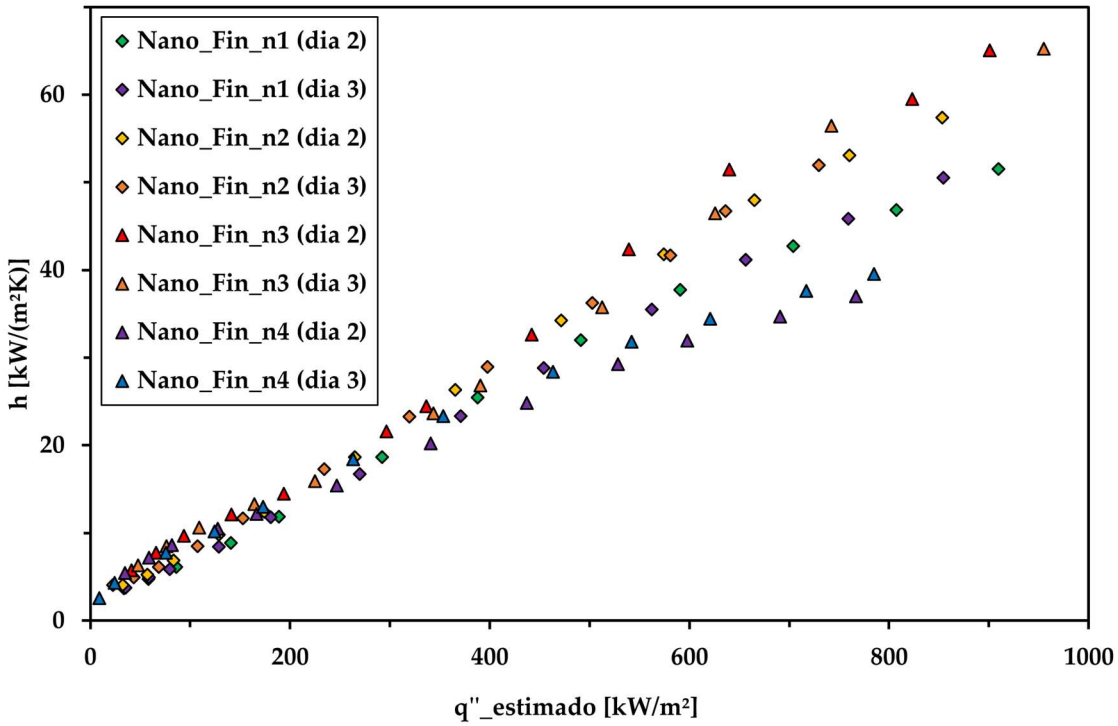


Figura C.2 - Repetibilidade das curvas de CTC para superfícies nanoestruturadas hierarquicamente, usando água como fluido de trabalho.



APÊNDICE D

SUPERFÍCIE PLANA E SUPERFÍCIES MICROESTRUTURADAS – HFE 7100

Superfície Plana		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
8,5	8,3	1,0
12,9	10,7	0,8
15,7	12,3	0,8
14,4	14,7	1,0
15,0	17,3	1,2
16,2	26,2	1,6
17,4	43,0	2,5
19,1	68,4	3,6
20,2	93,1	4,6
21,8	117,9	5,4
23,7	143,9	6,1
25,7	169,1	6,6
27,5	195,1	7,1
29,2	220,8	7,6
31,0	244,1	7,9
32,3	255,8	7,9
33,7	266,0	7,9
27,9	239,2	8,6
29,6	253,1	8,5

Micro_Fin_n1		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
7,4	24,1	3,3
8,4	30,4	3,6
9,0	35,7	4,0
9,1	46,0	5,1
9,2	71,6	7,8
9,3	93,7	10,1
9,5	121,9	12,8
10,1	146,1	14,4
10,8	173,7	16,1
11,3	200,8	17,7
12,1	227,7	18,8
12,8	256,1	20,0
13,4	275,6	20,6
14,3	300,1	21,0
15,7	331,9	21,1
17,2	356,9	20,8
19,5	382,3	19,6
21,8	400,0	18,4

Micro_Fin_n2		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
6,9	4,7	0,7
9,6	10,1	1,1
10,1	16,4	1,6
9,5	21,2	2,2
10,3	31,8	3,1
9,8	43,8	4,5
10,0	66,7	6,7
10,3	88,4	8,6
10,0	117,3	11,7
10,6	141,3	13,4
11,0	165,9	15,1
12,1	205,3	16,9
13,7	250,7	18,3
14,7	274,4	18,7
16,2	299,2	18,5
16,7	317,1	18,9
18,7	348,4	18,6

Micro_Fin_n3		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
10,6	25,1	2,4
10,1	29,6	2,9
10,6	41,2	3,9
10,1	68,4	6,8
10,4	92,0	8,9
10,9	117,1	10,8
11,7	144,3	12,4
12,5	165,0	13,2
13,5	192,1	14,2
14,4	221,4	15,3
15,5	244,1	15,7
16,7	269,8	16,1
17,8	289,5	16,3
19,1	313,9	16,5
23,2	365,1	15,7
25,6	386,2	15,1

Micro_Fin_n4		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
5,0	13,1	2,6
7,6	19,6	2,6
10,0	39,6	4,0
11,6	59,6	5,1
12,5	87,6	7,0
14,0	109,0	7,8
15,9	134,7	8,5
17,3	157,8	9,1
18,8	179,5	9,5
19,9	200,1	10,1
21,6	226,7	10,5
23,4	248,3	10,6
25,2	271,8	10,8
27,8	290,5	10,5
31,1	311,7	10,0
36,8	337,8	9,2
42,4	352,8	8,3

SUPERFÍCIES NANOESTRUTURADAS – HFE 7100

Nano_Fin_n1		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
5,4	16,2	3,0
7,7	39,0	5,1
7,8	63,5	8,1
7,8	88,0	11,3
7,9	111,6	14,1
8,2	141,8	17,3
8,4	163,9	19,4
8,8	188,9	21,5
9,1	214,9	23,6
9,4	241,3	25,7
9,5	266,0	28,0
9,7	288,4	29,8
10,2	316,4	31,1
10,8	337,5	31,3
11,5	355,0	30,9
13,3	380,3	28,6

Nano_Fin_n2		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
4,5	15,6	3,5
8,0	39,8	5,0
8,7	65,1	7,5
8,7	94,1	10,8
9,0	122,1	13,5
9,5	144,8	15,2
10,1	170,5	16,9
10,7	193,6	18,1
11,1	215,1	19,3
11,8	241,0	20,4
12,6	265,5	21,1
13,3	290,6	21,8
14,2	317,1	22,3
15,2	336,9	22,2
16,9	361,5	21,4
19,8	387,8	19,6

Nano_Fin_n3		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
5,3	13,1	2,5
8,4	33,0	3,9
8,5	62,2	7,4
8,5	84,5	9,9
8,6	107,9	12,5
8,9	132,9	14,9
9,3	157,9	16,9
9,9	179,5	18,1
10,5	199,6	19,1
11,1	225,4	20,3
11,6	254,7	21,9
12,2	277,8	22,7
13,0	295,5	22,7
14,7	315,0	21,4
17,2	334,9	19,5

Nano_Fin_n4		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
3,7	9,8	2,6
7,4	33,4	4,5
8,4	62,5	7,4
8,9	85,5	9,6
9,3	102,6	11,1
9,9	127,4	12,9
10,5	151,5	14,4
11,2	172,6	15,5
11,7	192,2	16,5
12,5	218,6	17,4
13,2	236,0	17,9
14,2	258,5	18,1
16,1	282,2	17,6
18,7	300,0	16,0
23,8	317,9	13,4

SUPERFÍCIE PLANA E SUPERFÍCIES MICROESTRUTURADAS – ÁGUA DI

Superfície Plana		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
5,9	5,8	3,2
7,2	7,1	4,9
9,0	8,8	6,5
10,6	10,4	7,7
12,1	11,8	10,6
14,0	13,5	13,0
16,2	15,5	16,7
16,8	15,9	21,7
17,5	16,4	25,5
18,5	17,2	29,7
19,4	17,8	32,5
20,1	18,3	36,1
21,0	19,0	38,6

Micro_Fin_n1		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
4,6	15,2	3,3
6,5	32,9	5,1
7,9	54,6	6,9
9,0	81,2	9,1
9,2	132,7	14,5
9,7	187,3	19,4
9,9	271,2	27,4
10,0	387,5	38,7
9,9	484,9	48,8
10,3	583,0	56,8
10,1	680,2	67,5
10,5	775,4	74,2
10,2	875,1	85,9

Micro_Fin_n2		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
4,9	15,9	3,3
7,7	32,9	4,3
9,1	57,9	6,4
9,6	82,0	8,5
10,0	135,4	13,6
10,3	189,5	18,4
10,5	285,7	27,2
10,6	387,2	36,4
10,7	487,3	45,3
10,9	578,3	53,2
10,9	677,8	62,1
11,1	771,8	69,7
11,4	866,0	76,3

Micro_Fin_n3		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
4,5	12,8	2,9
6,9	32,5	4,7
8,6	55,1	6,4
9,6	80,1	8,3
10,9	130,1	12,0
11,4	180,7	15,9
11,7	277,5	23,7
12,0	378,5	31,7
12,2	479,5	39,4
12,4	574,2	46,2
12,6	671,6	53,5
12,7	768,0	60,3
12,9	865,5	67,0

Micro_Fin_n4		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
6,0	14,0	2,3
9,0	30,8	3,4
11,5	51,5	4,5
12,6	78,9	6,3
13,6	126,8	9,3
14,0	179,9	12,9
14,4	276,5	19,2
14,3	373,0	26,1
14,5	471,0	32,4
14,8	566,8	38,4
14,8	666,2	45,0
15,2	772,4	51,0
15,5	870,8	56,4

SUPERFÍCIES NANOESTRUTURADAS – HFE 7100

Nano_Fin_n1		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
9,0	33,4	3,7
12,2	57,9	4,7
14,1	86,0	6,1
15,8	140,5	8,9
16,0	188,9	11,8
15,6	291,9	18,7
15,2	387,8	25,5
15,3	491,1	32,0
15,7	591,0	37,7
16,5	703,9	42,7
17,2	807,2	46,8
17,7	909,7	51,5

Nano_Fin_n2		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
8,0	32,7	4,1
10,8	57,1	5,3
12,1	83,3	6,9
13,2	128,8	9,8
14,0	174,0	12,4
14,2	264,6	18,6
13,9	365,4	26,3
13,8	471,5	34,3
13,7	574,3	41,8
13,9	665,3	48,0
14,3	760,1	53,1
14,9	853,4	57,4

Nano_Fin_n3		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
7,1	41,1	5,7
8,5	65,5	7,7
9,7	93,8	9,7
11,7	141,4	12,1
13,4	193,7	14,5
13,7	296,4	21,6
13,8	336,6	24,5
13,6	441,9	32,6
12,7	539,3	42,3
12,4	639,8	51,5
13,8	823,1	59,5
13,8	901,0	65,1

Nano_Fin_n4		
ΔT_sat	q'' (kW/m2)	h (kW/m²K)
6,4	34,6	5,5
8,1	58,5	7,2
9,5	81,7	8,6
12,1	127,6	10,5
13,7	166,3	12,2
16,0	246,7	15,4
16,9	341,1	20,2
17,6	436,9	24,8
18,1	528,7	29,3
18,7	598,0	32,0
19,9	690,6	34,7
20,7	766,6	37,0