

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

LEONARDO LACHI MANETTI

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE NANOFLUIDOS
SOBRE A EBULIÇÃO NUCLEADA**

Ilha Solteira
2017



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LEONARDO LACHI MANETTI

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DE
NANOFLUIDOS SOBRE A EBULIÇÃO NUCLEADA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Conhecimento: Ciências Térmicas.

Profa. Dra. Elaine Maria Cardoso
Orientadora

Ilha Solteira
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Manetti, Leonardo Lachi.

M275e Estudo teórico e experimental da influência de nanofluidos sobre a ebulição nucleada / Leonardo Lachi Manetti. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
94 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2017

Orientador: Elaine Maria Cardoso

Inclui bibliografia

1. Ebulição em piscina. 2. Nanofluidos. 3. Transferência de calor.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estudo Teórico e Experimental da Influência de Nanofluidos sobre a Ebulição Nucleada

AUTOR: LEONARDO LACHI MANETTI

ORIENTADORA: ELAINE MARIA CARDOSO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: CIÊNCIAS TÉRMICAS pela Comissão Examinadora:


Profa. Dra. ELAINE MARIA CARDOSO
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JOAO BATISTA CAMPOS SILVA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. PAULO ARTHUR BECK
Fakultät für Maschinenwesen / Technische Universität München

Ilha Solteira, 13 de fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

À Deus, fonte infinita de sabedoria e confiança.

À Professora Dra. Elaine Maria Cardoso pela oportunidade, paciência e confiança em mim depositada.

Ao Professor Dr. João Batista Campos Silva pela orientação durante o período de estágio em docência.

Aos meus pais, Jodacir João Manetti e Maria Nadir Lachi Manetti, sempre presentes em minha vida.

À família, amigos e irmãos pela companhia e colaboração.

À minha namorada, paciente e carinhosa.

Ao amigo e companheiro de pesquisa, Igor Seicho Kiyomura pela ajuda, paciência e companhia durante o tempo de realização deste trabalho.

Aos colegas de departamento e de laboratório pela ajuda na realização do trabalho.

Aos técnicos de laboratórios da UNESP/FEIS pela disposição.

À Professora Dra. Maria de Fátima da Silva e ao Técnico Marcelo Parise do NFA/Instituto de Física – UnB por fornecerem os nanofluidos de maguemita.

Ao Professor Dr. Gherhardt Ribatski da Escola de Engenharia de São Carlos/USP por fornecer as nanopartículas de alumina.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP/FEIS).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo número 2014/19497-5, pelo apoio financeiro e institucional.

“Se vi mais longe foi por estar de pé sobre ombros de gigantes” - Sir Isaac Newton (1676).

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo teórico e experimental da ebulição em piscina utilizando diferentes nanofluidos como fluido de trabalho e em condições saturadas. Inicialmente, uma revisão bibliográfica foi realizada a fim de abranger o estado da arte do presente tema. Um aparato experimental foi construído para o estudo da influência das características da superfície e dos nanofluidos sobre o coeficiente de transferência de calor. Os ensaios de ebulição em piscina foram realizados utilizando água deionizada, para validação do aparato experimental e comparação, e os nanofluidos de Al_2O_3 -Água e Fe_2O_3 -Água (à pressão atmosférica local e à temperatura de saturação) nas concentrações mássicas de 0,029 g/l (baixa concentração) e 0,29 g/l (alta concentração). Foram utilizadas duas diferentes superfícies de aquecimento, uma lisa e outra rugosa, ambas de cobre. Aspectos relacionados a efeitos de interação superfície-nanofluido, tal como o efeito da deposição de nanopartículas na superfície de aquecimento durante a ebulição, foram estudados por meio da análise de dados experimentais e da caracterização das superfícies antes e depois do processo de ebulição. O coeficiente de transferência de calor aumentou para os ensaios utilizando nanofluidos de baixa concentração sobre superfícies lisas. Para superfícies rugosas, os nanofluidos de baixa concentração apresentaram um aumento na transferência de calor para fluxos de até 300 kW/m². Os nanofluidos de alta concentração apresentaram um desempenho inferior aos de baixa concentração. Os diferentes comportamentos são atribuídos às alterações na morfologia da superfície devido à deposição das nanopartículas. A transferência de calor aumentou quando houve um aumento dos raios das cavidades ocasionado pela nanocamada depositada sobre a superfície de aquecimento, como observado para superfícies lisas com nanopartículas depositadas. No entanto, para superfícies rugosas, a deposição das nanopartículas preencheu as cavidades (de maior diâmetro) diminuindo a transferência de calor. Os nanofluidos de alta concentração apresentaram uma maior taxa de deposição quando comparados aos de baixa concentração, o que acarretou em uma maior resistência térmica sobre a superfície e, conseqüente, decréscimo na transferência de calor. Tal efeito foi ainda maior quando a ebulição foi realizada em ensaios de longa duração. Outro fator que colaborou com o aumento da taxa de deposição é o fluxo de calor aplicado. Nanofluidos colocados em ebulição por longos períodos de tempo e com altos fluxos de calor (>500 kW/m²) apresentaram grande diminuição no coeficiente de transferência de calor.

Palavras-chave: Ebulição em piscina. Nanofluidos. Transferência de calor.

ABSTRACT

In this work is presented a theoretical and experimental study on the nucleate pool boiling using different nanofluids as working fluid at saturated conditions. Firstly, a review was carried out in order to understand the state of art of the present topic. Also, an experimental apparatus was designed in order to study the influence of the heating surface characteristics and nanofluids on the heat transfer coefficient. The pool boiling tests were carried out using de-ionized water, for the experimental apparatus validation and for comparison, and the Al_2O_3 -water and Fe_2O_3 -water nanofluids (at local atmospheric pressure and at saturation temperature) at 0.029 g/l (low nanofluid concentration) and 0.29 g/l (high nanofluid concentration). Two different copper heating surfaces were used, corresponding to smooth and rough surfaces. Aspects related to the interaction effect of the surface/nanofluid as well as the effect of the nanoparticles deposition on the heating surface during pool boiling were studied by analyzing the experimental data and also the surfaces characteristics before and after the pool boiling tests. The heat transfer coefficient increased for low nanofluids concentration on smooth surfaces. For rough surface, the heat transfer coefficient increased for low nanofluids concentration and for heat fluxes up to 300 kW/m^2 . The heat transfer behavior depends on the surface morphology changes due to the nanoparticle deposition on the heating surface during the nanofluid pool boiling. The heat transfer increased as the nanoparticles deposited on the heating surface increased the cavities radius (smooth surfaces). However, for the rough surfaces, the deposited nanoparticles filled the cavities (with high diameter) and so, deteriorated the heat transfer. The high nanofluids concentration had a higher deposition rate than low nanofluids concentration, leading to a high thermal resistance on the heating surface which negatively affects the heat transfer. The effects that influence on the deposition rate are the heat flux applied and, also, the boiling time. Nanofluids pool boiling performed over a long time period and for moderated and high heat fluxes ($>500 \text{ kW/m}^2$) showed a noticeable heat transfer degradation.

Keywords: Pool boiling. Nanofluids. Heat transfer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de ebulição.	18
Figura 2 – Mecanismos existentes durante o regime de ebulição nucleada.	20
Figura 3 - Passos da preparação de nanofluidos pelo método de duas etapas.	24
Figura 4 – Fotografia do nanofluido de Cu-H ₂ O para vários valores de pH após sete dias da preparação.	25
Figura 5 – Potencial zeta de nanofluidos.	26
Figura 6 – Efeito do pH sobre o potencial zeta no nanofluido de alumina-água com SDBS. .	26
Figura 7 - Distribuições do tamanho das partículas nos nanofluidos. (a) Al ₂ O ₃ -H ₂ O sem SDBS, (b) Al ₂ O ₃ -H ₂ O com SDBS, (c) Cu-H ₂ O sem SDBS e (d) Cu-H ₂ O com SDBS. A concentração das nanopartículas e surfactante SDBS foram ambos de 0,05 wt.%.	28
Figura 8 - Efeito do pH na absorvância do nanofluido Cu-H ₂ O+CTAB com concentração de 0.1 wt.%.	29
Figura 9 - Imagens de TEM para nanofluidos de grafite em água preparados pelo método de duas etapas, agitadas por: a) suspensão sem nenhum tipo de agitação; b) misturador magnético; c) banho ultrassônico; d) ultrassonicação.	30
Figura 10 – Mecanismo de deposição das nanopartículas durante a ebulição de nanofluidos.	35
Figura 11 – Nanopartícula depositada em superfície de aquecimento para $Ra/dp > 1$	36
Figura 12 – Nanopartículas depositadas na superfície de aquecimento para $Ra/dp \ll 1$	36
Figura 13 – Nanopartículas depositadas na superfície de aquecimento. a) Diâmetro da partícula é maior que a rugosidade, $Ra/dp < 1$. b) Diâmetro da partícula é muito menor que a rugosidade, $Ra/dp \gg 1$	37
Figura 14 – Influência da concentração do nanofluido de alumina para diferentes rugosidades superficiais.	38
Figura 15 – Razão entre o CHF do nanofluido e o CHF do fluido base em função da concentração do nanofluido Al ₂ O ₃ -Água.	41
Figura 16 – Representação do ângulo de contato e as tensões de adesão e superficial.	42
Figura 17 – Ângulo de contato da água em fio de Ni-Cr. a) antes da ebulição. b) após a ebulição do nanofluido.	43
Figura 18 - Ângulo de contato estático da água sobre placa de cobre. a) antes da ebulição. b) após a ebulição do nanofluido.	43

Figura 19 – Ângulo de contato estático de acordo com o tempo de ebulição do nanofluido de alumina (0,01 vol.%). a) antes da ebulição. b) 3 min. após. c) 15 min. após. d) 180 min. após.	44
Figura 20 – CHF para nove diferentes deposições de Titânio em fio de Ni-Cr <i>versus</i> o ângulo de contato.....	44
Figura 21 - Nanofluido de maguemita-água. a) concentração de 29 g/l; b) concentração de 0,29 g/l e 0,029 g/l, respectivamente.....	47
Figura 22 - Nanofluido de alumina-água em concentração de 0,29 g/l e 0,029 g/l.....	48
Figura 23 – Condutividade térmica efetiva dos nanofluidos utilizados neste estudo a $T = 300$ K.....	49
Figura 24 - Aparato experimental utilizado para a medição do ângulo de contato estático.....	51
Figura 25 - Desenho esquemático do aparato experimental.....	52
Figura 26 - Bancada experimental para o estudo da ebulição nucleada de nanofluidos.....	52
Figura 27 - Câmara de ebulição.....	53
Figura 28 - Seção de testes. (a) vista explodida e (b) vista do corte transversal.....	54
Figura 29 - Desenho esquemático da seção de testes com a localização dos termopares.....	55
Figura 30 - Validação do aparato experimental usando ajuste de curva exponencial e a correlação de Rohsenow (1952). (a) superfície lisa e (b) superfície rugosa.....	59
Figura 31 – Efeito da rugosidade superficial para $q'' = 200$ kW/m ² e para superfícies sem deposição. (a) superfície rugosa (RS) e (b) superfície lisa (SS).....	60
Figura 32 – Curvas de coeficiente de transferência de calor durante a ebulição da água e dos nanofluidos de Al ₂ O ₃ -Água e Fe ₂ O ₃ -Água, para diferentes concentrações. (a) superfície lisa, SS. (b) superfície rugosa, RS.....	61
Figura 33 – Raios de cavidades mínimos para cada superaquecimento da superfície. (a) Superfície lisa ebulida com água, Al ₂ O ₃ -Água e Fe ₂ O ₃ -Água. (b) Superfície rugosa ebulida com água, Al ₂ O ₃ -Água e Fe ₂ O ₃ -Água.....	63
Figura 34 – Efeito da deposição das nanopartículas. (a) sobre a superfície lisa, SIP > 1. (b) sobre a superfície rugosa, SIP >> 1.....	64
Figura 35 - Curva de comparação do HTC para ebulição com nanofluido de Al ₂ O ₃ -Água obtidos neste trabalho com valores da literatura, para várias concentrações e valores de SIP.....	64
Figura 36 – Rugosidade média superficial antes (limpa) e depois da ebulição com nanofluidos.....	67
Figura 37 – Ângulo de contato estático antes (limpa) e depois da ebulição com nanofluidos.	67

Figura 38 – Densidade de sítios de nucleação ativos dada pela correlação de Wang e Dhir (1993) em função do fluxo de calor aplicado. (a) superfície lisa. (b) superfície rugosa.	69
Figura 39 - Densidade de sítios de nucleação dada pela correlação de Kolev (2006) em função do fluxo de calor aplicado. (a) superfície lisa. (b) superfície rugosa.....	71
Figura 40 – Comportamento do HTC ao longo do tempo de ebulição para diferentes fluxos de calor e concentração de nanofluido para a superfície lisa. (a) 120 kW/m ² . (b) 500 kW/m ² . (c) 800 kW/m ²	72
Figura 41 - Comportamento do HTC ao longo do tempo de ebulição para diferentes fluxos de calor e concentração de nanofluido para a superfície rugosa. (a) 120 kW/m ² . (b) 500 kW/m ² . (c) 800 kW/m ²	74
Figura C. 1 - Esquema do termopar de referência utilizado para a calibração dos termopares.	89
Figura D. 1 – Volume de controle.	91
Figura E. 1 – Análise da perda de calor no bloco de cobre.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade térmica dos principais sólidos e líquidos a temperatura de 300 K..	21
Tabela 2 - Incertezas experimentais do fluxo de calor e do coeficiente de transferência de calor dos ensaios realizados.....	58
Tabela 3 – Análise metalográfica da superfície de aquecimento antes e depois dos ensaios de ebulição com nanofluidos (continuação).....	65
Tabela 4 - Correlações para a densidade de sítios de nucleação ativos.....	70
Tabela A.1 - Resumo da revisão bibliográfica sobre ebulição em piscina utilizando nanofluidos.	84
Tabela A.2 - Resumo dos trabalhos que analisaram o HTC e o parâmetro superfície-nanofluido.....	85
Tabela A.3 - Resumo dos trabalhos que analisaram o CHF e o ângulo de contato.....	86
Tabela B. 1 - Propriedades termofísicas das nanopartículas a 300 K.....	87
Tabela B. 2 – Propriedades termofísicas da água deionizada saturada a 98 kPa.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFM	Microscópio de força atômica
CHF	Fluxo de calor crítico
EDS	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia
HTC	Coefficiente de transferência de calor
ONB	Início da ebulição nucleada
TEM	Microscópio eletrônico de transmissão
SEM	Microscópio eletrônico de varredura
SIP	Parâmetro de interação superfície-nanopartícula

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{sf}	Coeficiente fluido-superfície [-]
c_p	Calor específico a pressão constante [J/kg.K]
d_p	Diâmetro médio da nanopartícula [m]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Coeficiente de transferência de calor [W/m ² K]
h_{lv}	Calor latente de vaporização [J/kg]
k	Condutividade térmica [W/m.K]
k_b	Condutividade térmica do fluido base [W/m.K]
k_c	Condutividade térmica do cobre [W/m.K]
k_{nf}	Condutividade térmica do nanofluido [W/m.K]
k_p	Condutividade térmica da partícula ou nanopartícula [W/m.K]
Ja	Número de Jacob referente ao superaquecimento da superfície [-]
L	Distância entre termopares [m]
Na	Densidade de sítios de nucleação ativos [sítios/m ²]
p	Pressão [N/m ²]
Pr	Número de Prandtl
q''	Fluxo de calor [W/m ²]
\bar{q}''	Fluxo de calor médio medido [W/m ²]
$q''_{aplicado}$	Fluxo de calor aplicado [W/m ²]
$q''_{perdido}$	Fluxo de calor perdido [W/m ²]
R	Resistência elétrica [Ω]
r	Fator de rugosidade [-]
R_c	Raio da cavidade [m]
R_a	Rugosidade média [μ m]
R_{nd}	Rugosidade adimensional [-], definido pela Eq. (19)
T_{sat}	Temperatura de saturação do fluido [K]
T_p	Temperatura da superfície [K]
u	Incerteza experimental
V	Diferença de potencial elétrico [V]
$vol.\%$	Porcentagem em volume de nanopartículas no fluido base [-]

wt.% Porcentagem em peso de nanopartículas no fluido base [-]

Letras gregas

β	Definido pela Eq. (24)
ρ	Densidade [kg/m ³]
σ	Tensão superficial [N/m]
γ	Tensão de adesão [N/m]; parâmetro de interação superfície-fluido [-], definido pela Eq. (18).
θ	Ângulo de contato estático [°]
θ^*	Ângulo de contato estático aparente [°]
μ	Viscosidade dinâmica [kg/m.s]
ϕ	Fração volumétrica de nanopartículas na mistura [-]
Ψ	Esfericidade da partícula

Subscritos

atm	Atmosférica
l	Líquido
v	Vapor
SV	Sólido-vapor
SL	Sólido-líquido
p	Superfície de aquecimento
1	Posição do termopar 1
2	Posição do termopar 2
3	Posição do termopar 3

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	INTRODUÇÃO.....	18
2.1.1	Ebulição Nucleada.....	19
2.2	NANOFLUIDOS.....	21
2.2.1	Aplicações	22
2.2.2	Preparação	22
2.2.3	Estabilização	24
2.2.3.1	<i>Métodos de avaliação da estabilidade de nanofluidos</i>	24
2.2.3.2	<i>Métodos para aumentar a estabilidade de nanofluidos</i>	27
2.3	EBULIÇÃO EM PISCINA UTILIZANDO NANOFLUIDOS	30
2.3.1	Influência sobre o Coeficiente de Transferência de Calor	31
2.3.1.1	<i>Mecanismos de transferência de calor em ebulição em piscina utilizando nanofluidos</i>	35
2.3.2	Influência sobre o Fluxo de Calor Crítico	38
2.3.2.1	Influência do Ângulo de Contato e Molhabilidade sobre o CHF	41
2.4	CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	45
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	47
3.1	PREPARAÇÃO DOS NANOFLUIDOS	47
3.1.1	Medição e predição da condutividade térmica dos nanofluidos	48
3.2	SUPERFÍCIES DE AQUECIMENTO.....	50
3.2.1	Medição do ângulo de contato	50
3.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	56
3.5	INCERTEZA EXPERIMENTAL	57
3.6	VALIDAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	ANÁLISE DA QUANTIDADE DE SÍTIOS DE NUCLEAÇÃO	68
4.2	EFEITO DO TEMPO DE EBULIÇÃO	72
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A – RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	84
	APÊNDICE B - PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E CONCENTRAÇÕES DOS NANOFLUIDOS	87
	APÊNDICE C - CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	89

APÊNDICE D - HIPÓTESE DE CONDUÇÃO UNIDIMENSIONAL.....	91
APÊNDICE E - CÁLCULO DA PERDA TÉRMICA	94

1 INTRODUÇÃO

A ebulição é o processo de mudança de estado líquido para o vapor ocorrendo por meio do contato do líquido com uma superfície sólida (interface S-L), cuja temperatura deve ser maior do que a temperatura de saturação do líquido. Nesse processo, bolhas de vapor se formam rapidamente na interface S-L, desprendendo-se e subindo para a superfície livre do líquido. Uma das características que se observa no processo de ebulição é a grande taxa de transferência de calor com pequenas diferenças de temperatura entre a superfície aquecida e o fluido (SEADER; HENLEY, 2006). A ebulição pode acontecer em regimes de escoamento forçado (*flow boiling*) ou sem escoamento, chamado de ebulição em piscina (*pool boiling*). O processo de ebulição é caracterizado por diferentes regimes de transferência de calor, sendo que, o regime de ebulição nucleada é onde que se obtém o maior coeficiente de transferência de calor, sendo este da ordem de cinquenta vezes maior do que aquele encontrado em convecção monofásica forçada (INCROPERA et al., 2008).

Existe um grande número de variáveis envolvidas na ebulição, sendo que as propriedades termofísicas do fluido de trabalho (viscosidade, densidade, capacidade calorífica e condutividade térmica) estão entre as principais (CAREY, 1992). Outra variável importante é a morfologia da superfície aquecida, a qual foi analisada primeiramente por Corty e Foust (1955). Estes relataram que o aumento de cavidades na superfície diminui o superaquecimento necessário para o início da nucleação.

Água, etileno glicol e fluidos refrigerantes estão entre os fluidos mais utilizados nos sistemas térmicos com mudança de fase. Esses fluidos possuem propriedades termofísicas inferiores quando comparados aos nanofluidos (SILVA, 2010). Um nanofluido é obtido pela adição de pequenas partículas (tamanho médio entre 1 a 100 nm) em um fluido base, sendo seu nome criado por Choi em 1995. As nanopartículas podem ser metálicas (Cu, Al), óxidos metálicos (Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , F_2O_3 , CuO), carbonos (grafite, nanotubos) ou outro material que possua uma alta condutividade térmica em relação ao fluido base como água, etileno glicol e demais fluidos refrigerantes (BARBER; BRUTIN; TADRIST, 2011).

Devido ao avanço da tecnologia e ao crescimento da demanda de potência torna-se necessário a busca de fluidos capazes de dissipar mais calor. A aplicação de nanofluidos em ebulição em piscina pode ter importância em várias áreas, dentre elas: reatores nucleares, destiladores de petróleo, resfriamento de componentes micro e macro eletrônicos, refrigeração e ar-condicionado (KAMATCHI; VENKATACHALAPATHY, 2015). Processadores de alto desempenho, por exemplo, estão sendo projetados para dissipar uma potência na faixa de

1000 kW/m² a 3000 kW/m², valores superiores ao potencial de dissipação de sistemas por ventilação de ar e refrigerantes convencionais (WANG; MUJUNDAR, 2008b). Assim, devido à sua alta condutividade térmica, os nanofluidos podem aumentar a transferência de calor em microchips, podendo até minimizar o tamanho e o inventário de fluido refrigerante utilizado e, conseqüentemente, os custos dos dispositivos de arrefecimento (WANG; MUJUNDAR, 2008b).

A aplicação de nanofluidos em sistemas que utilizam mudança de fase ainda apresenta divergências quanto aos seus resultados, gerando várias questões a serem resolvidas pela comunidade científica. Dentre as questões importantes a serem resolvidas estão: a relação entre a rugosidade superficial e o tamanho da nanopartícula, o efeito das nanopartículas que permanecem em suspensão no fluido base durante a ebulição, o efeito dos nanofluidos e das superfícies na molhabilidade, a explicação física do acréscimo observado no fluxo de calor crítico, o comportamento do coeficiente de transferência de calor e o mecanismo de transferência de calor predominante em ebulição com nanofluidos.

Portanto, o tema do presente estudo é de grande interesse da indústria e da comunidade científica, possibilitando o desenvolvimento de novas tecnologias para diferentes setores, nos quais a remoção de grande quantidade de calor é um aspecto limitante à miniaturização.

Assim, a presente pesquisa tem como objetivo geral o estudo da ebulição em piscina utilizando água deionizada e nanofluidos (Al₂O₃-Água e Fe₂O₃-Água) como fluido de trabalho, sobre superfícies aquecidas de cobre com diferentes rugosidades superficiais. Para tanto, os seguintes itens foram abordados:

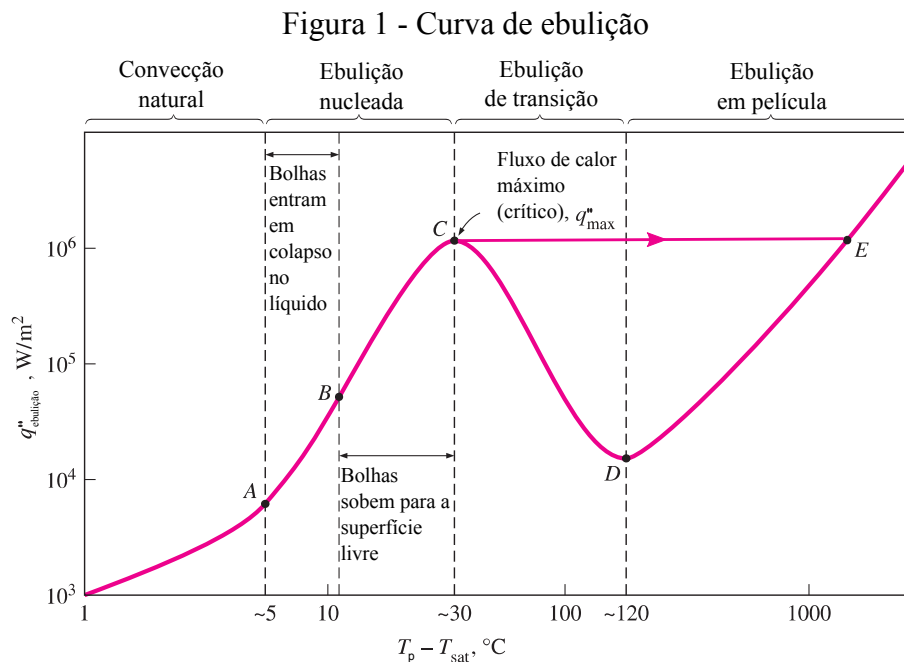
- Influência das configurações geométricas da superfície aquecida, tais como, rugosidade, modificações impostas pela deposição de nanopartículas e densidade de sítios de nucleação sobre o coeficiente de transferência de calor.
- Influência do tipo e concentração das nanopartículas constituintes do nanofluido sobre a transferência de calor no regime de ebulição nucleada;
- Comparação dos resultados experimentais com os valores já relatados na literatura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Como mencionado anteriormente, a ebulição é o processo de mudança de estado líquido para o vapor, no qual bolhas são formadas por meio do contato do líquido com uma superfície sólida superaquecida, i.e., a temperatura da superfície deve ser maior do que a temperatura de saturação do líquido. O processo pode ocorrer a partir de um fluido estacionário sobre a superfície de aquecimento (*pool boiling*) ou a partir de um fluxo forçado imposto por um agente externo (*flow boiling*) podendo, por exemplo, ocorrer no exterior ou interior de um tubo (DHIR, 1998).

O processo de ebulição é marcado por diferentes regimes de transferência de calor. Nukiyama (1934) foi o primeiro a levantar uma curva de ebulição – caracterizada por uma relação do fluxo de calor, q'' , pelo superaquecimento da superfície, $T_p - T_{sat}$, utilizando um fio metálico imerso em água estacionária. A Figura 1 apresenta a curva de ebulição e seus regimes.



Fonte: Adaptado de Çengel, Ghajar e Kanoglu (2012)

Conforme o fluxo de calor é aplicado no fio, tem-se o aumento da temperatura na superfície. O primeiro estágio na Figura 1 é o modo de transferência de calor por convecção natural, devido à diferença de temperatura provocada pelo aquecimento (DHIR, 1998).

O ponto A na Figura 1 é o início do regime de ebulição nucleada (do inglês, *onset nucleate boiling*, ONB), onde bolhas de vapor aparecem na superfície devido a pré-existência de gases nas cavidades da superfície aquecida (CARDOSO, 2010). A ebulição nucleada entre os pontos A e B é caracterizada pela formação isolada de bolhas sobre a superfície, na qual a densidade de sítios ativos de nucleação e a frequência de emissão de bolhas de vapor aumentam com o aumento do superaquecimento da superfície (DHIR, 1998). A ebulição nucleada passa de bolhas isoladas para nucleação totalmente desenvolvida a partir do ponto B, quando as bolhas formam colunas de vapor na direção vertical, juntando-se com as bolhas formadas em cavidades vizinhas e formando grandes cogumelos de vapor até atingir o ponto C, conhecido como Fluxo de Calor Crítico (do inglês, *critical heat flux*, CHF), onde acontece a secagem da superfície (*dry out*) e, conseqüente, degradação da transferência de calor (DHIR, 1998; CARDOSO, 2010). Quando o fluxo de calor é imposto, a curva passa rapidamente do ponto C para o E causando a falha (rompimento ou queima) do aquecedor (*burn out*) (DHIR, 1998).

O regime de transição (região CD) é descrito por uma camada intermitente de vapor instável sobre a superfície e por bolhas de vapor. O último regime é denominado ebulição em película (região DE), o qual é caracterizado por uma película ondulada contínua de vapor sobre a superfície e a transferência de calor entre a superfície aquecida e o fluido é unicamente por condução. Estes dois últimos regimes apenas são atingidos por meio de sistema no qual a temperatura é controlada (CAREY, 1992).

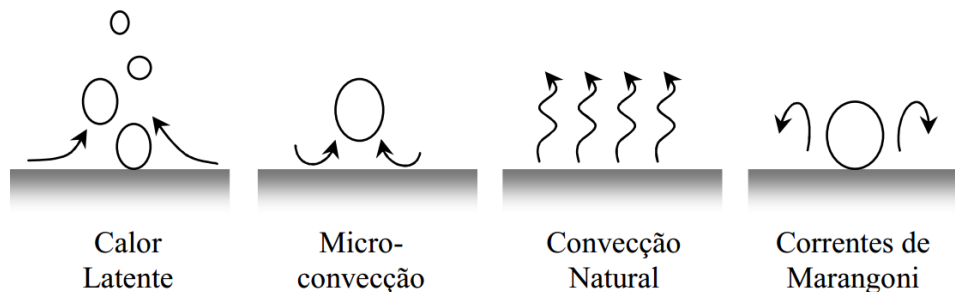
2.1.1 Ebulição Nucleada

Conforme apresentado na seção anterior, no regime de ebulição nucleada se obtém elevados fluxos de calor para baixos valores de superaquecimento da superfície, i.e., o coeficiente de transferência de calor, h , (do inglês *heat transfer coefficient*, HTC) definido pela lei de Newton do resfriamento,

$$h = \frac{q''}{T_p - T_{sat}(p_{sat})} \quad (1)$$

é maior nesse regime do que nos demais. Na Equação (1) q'' é o fluxo de calor e, $T_p - T_{sat}(p_{sat})$ é a diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura de saturação do fluido, à pressão de saturação. O elevado valor do HTC é atribuído a diferentes efeitos (Fig. 2), como: a transferência de calor latente devido à mudança de fase; a micro-convecção 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 e associada ao movimento de líquido na parede aquecida (CARDOSO; 2010).

Figura 2 – Mecanismos existentes durante o regime de ebulição nucleada.



Fonte: Cardoso (2010).

A ebulição nucleada pode ser de dois tipos: a homogênea e a heterogênea. A primeira ocorre quando embriões ou pequenas bolhas de vapor são formados no interior de um líquido superaquecido puro, sendo um tipo de nucleação estritamente termodinâmica, pois um núcleo somente é viável se o líquido estiver superaquecido (CAREY, 1992). A segunda, por sua vez, ocorre na presença de paredes ou elementos estranhos ao líquido, como uma superfície sólida, que acabam favorecendo a formação de núcleos ativos de vapor. A presença dessas impurezas permite que haja uma energia de formação menor na nucleação heterogênea comparada à nucleação homogênea. O estudo sobre a influência dessas impurezas e o uso de novas tecnologias, como nanofluidos e superfícies nanoestruturadas, consiste em métodos para melhorar o coeficiente de transferência de calor (CILOGLU; BOLUKBASI, 2015).

Outros parâmetros, tais como, propriedades termofísicas do fluido e do material da superfície, dimensões e rugosidade, influenciam significativamente os mecanismos da ebulição nucleada (CAREY, 1992).

2.2. NANOFLUIDOS

A adição de pequenas partículas em um fluido base, denominada dispersão coloidal, vem sendo muito estudado na área de ciências térmicas nas últimas décadas (AHMED; HAMMED, 2012; DAS; PUTRA; ROETZEL, 2003; MOREIRA; NASCIMENTO; RIBATSKI, 2015; NGUYEN et al., 2008; PAK; CHO, 1998). Uma potencial dispersão coloidal foi apresentada por Choi (1995) em seu estudo sobre o aumento da condutividade térmica em fluidos utilizando a adição de nanopartículas, denominada “nanofluido”. Os nanofluidos são dispersões coloidais de nanopartículas, com tamanho médio entre 1 a 100 nm, em um fluido base. As nanopartículas podem ser metálicas (Cu, Al), óxidos metálicos (Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO, F_2O_3 , CuO); carbonos (grafite, nanotubos) ou outro material que possua uma alta condutividade térmica em relação ao fluido base: água, etileno glicol, fluidos refrigerantes (BARBER; BRUTIN; TADRIST, 2011). A Tabela 1 apresenta a condutividade térmica dos principais materiais usados para a obtenção de nanofluidos.

Tabela 1 - Condutividade térmica dos principais sólidos e líquidos a temperatura de 300 K.

Material		k (W/mK)
Metais	Cobre ¹	401
	Alumínio ¹	237
Óxidos	Al_2O_3 ¹	36
	Fe_2O_3 ³	6
	TiO_2 ¹	8,4
	SiO_2 ¹	1,38
Carbonos	Nanotubo ²	200
Fluidos base	Água ¹	0,613
	Etileno glicol ¹	0,252
	Óleo de motor ¹	0,145
	R-134a ¹	0,080

Notas: ¹Incropera et al., 2008.

²Hone, 2004.

³Rainho Neto, Oliveira e Passos, 2016.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Segundo Wang e Mujundar (2008a), nanofluidos podem ser considerados uma nova geração de fluidos refrigerantes devido às suas características quando comparados aos fluidos puros. Dentre suas características, destacam-se: elevada capacidade de transferência de calor; melhor estabilidade do que de outros coloides; redução da erosão e do entupimento de partículas em microcanais quando comparados a suspensões convencionais, promovendo assim a miniaturização do sistema; propriedades ajustáveis, incluindo a condutividade térmica e a

molhabilidade da superfície, variando as concentrações de partículas para se adequar às diferentes aplicações.

2.2.1 Aplicações

Os nanofluidos podem ser usados para melhoria da eficiência energética em uma vasta gama de sistemas térmicos. Além disso, outras áreas, tais como tribologia, química, farmacêutica e médica já fazem uso de nanofluidos. Wang e Mujundar (2008b) e Ciloglu e Bolukbasi (2015) realizaram uma revisão das potenciais aplicações dos nanofluidos baseados nos trabalhos já publicados. Dentre as aplicações, as que fazem uso de sistemas bifásicos, principalmente ebulição em piscina, foram detalhadas:

- Aplicações em reatores nucleares: o arrefecimento dos reatores, comuns em usinas nucleares, é realizado a partir da imersão das varetas de combustíveis em água, sendo o valor limite do arrefecimento igual ao fluxo de calor crítico (CHF) do fluido. Assim, a aplicação de nanofluidos ao invés da água pode aumentar o CHF, por meio da deposição das nanopartículas nas varetas de combustível nuclear (conteúdo a ser discutido em detalhes na seção 2.3);
- Aplicações em eletrônica: a potência de circuitos e microprocessadores tem aumentado acentuadamente nos últimos anos. Processadores de alto desempenho são projetados para dissipar uma potência na faixa de 1000 kW/m^2 a 3000 kW/m^2 . Sistemas de dissipação por ventilação de ar já atingiram seus limites e novas tecnologias de dissipação por líquido vêm sendo desenvolvidas. Devido à sua alta condutividade térmica, os nanofluidos podem aumentar o coeficiente de transferência de calor (HTC) em microchips, usando sistema monofásico ou bifásico, podendo até minimizar o tamanho dos dispositivos de arrefecimento.

Entretanto, apesar da ampla faixa de aplicações, a maioria das pesquisas envolvendo nanofluidos precisa ser aprimorada, principalmente em relação à estabilidade do nanofluido em diversas situações, para sua aplicação comercial em larga escala.

2.2.2 Preparação

A preparação dos nanofluidos é um importante fator a ser analisado, uma vez que a estabilidade é sensivelmente dependente do método de preparação. Nanofluidos são mais es-

táveis que suspensões micrométricas, porém alguns requisitos são essenciais para sua estabilidade, por exemplo: suspensão estável, uniforme e durável; aglomerações de partículas (*cluster*) desprezíveis; química do fluido inalterada (WANG; MUJUNDAR, 2008b).

Existem dois métodos bem difundidos para a preparação dos nanofluidos: o método de uma etapa ou etapa única e o método de duas etapas.

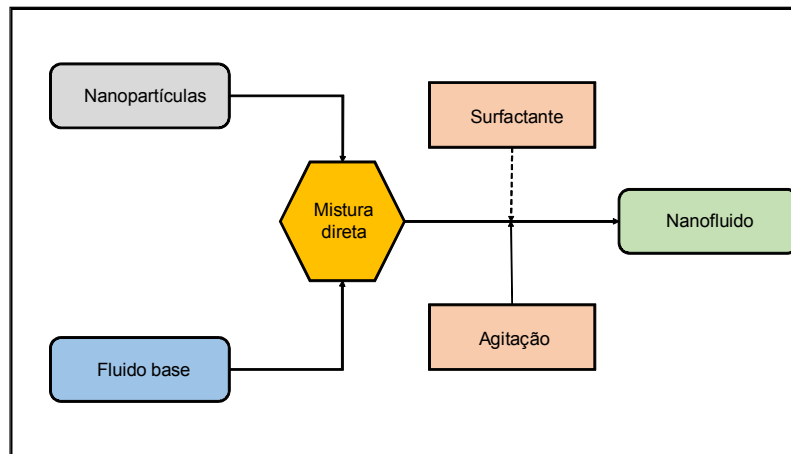
O método de uma etapa é um processo que combina a obtenção das nanopartículas e a dispersão no fluido base em uma única etapa, sendo as nanopartículas diretamente preparadas pela técnica de deposição física a vapor ou pelo método químico líquido. Neste método, os processos de secagem, armazenamento, transporte e dispersão de nanopartículas são evitados, de modo que a aglomeração das nanopartículas é minimizada e a estabilidade dos fluidos é aumentada (RAINHO NETO, 2011).

A desvantagem do método de uma etapa é que este precisa ser desenvolvido por lotes, ou seja, normalmente a produção acontece apenas em pequenas quantidades, inviabilizando a produção comercial de nanofluidos devido ao elevado custo operacional. Além disso, o controle sobre parâmetros importantes como o tamanho das nanopartículas é limitado (MUKHERJEE; PARIA, 2013).

O método de duas etapas é o método mais utilizado para a obtenção de nanofluidos. Neste método, as nanopartículas são primeiramente obtidas na forma de pós secos e então dispersas em um fluido base. Dentre os processos utilizados para a obtenção das nanopartículas, os mais comuns são: moagem mecânica, técnica de condensação de gás inerte, precipitação química, pirólise spray e aspersão térmica. Geralmente, um equipamento ultrassônico é usado para realizar a dispersão no fluido base a fim de evitar a aglomeração das partículas. Quando comparado com o método de etapa única, o método de duas etapas funciona melhor para nanopartículas de óxidos como, por exemplo, alumina e titânia, porém este método é menos estável para partículas metálicas (WANG; MUJUNDAR, 2008b; RAINHO NETO, 2011).

O método em duas etapas é mais econômico para produzir nanofluidos em grande escala, devido às técnicas de síntese do nanoparticulado serem ampliadas para níveis de produção industrial. Porém, devido à elevada área superficial e atividade de superfície, as nanopartículas têm a tendência de se aglomerarem. Técnicas de estabilização como agitação ultrassônica ou adição de surfactantes apropriados são muitas vezes utilizadas para minimizar a aglomeração das partículas e melhorar o comportamento da dispersão. O método de preparação de nanofluido por duas etapas é apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Passos da preparação de nanofluidos pelo método de duas etapas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

2.2.3 Estabilização

A preparação de uma suspensão homogênea e estável é ainda uma técnica desafiadora devido às fortes interações de Van der Waals entre as nanopartículas, as quais causam *clusters*. Essas aglomerações resultam na diminuição das propriedades termofísicas dos nanofluidos, tais como condutividade térmica, viscosidade e calor específico (GHADIMI; SAIDUR; METSELAAR, 2011). Além disso, a aglomeração causa a sedimentação das nanopartículas podendo acarretar no aumento da resistência térmica em superfícies de aquecimento e, também, entupimento de microcanais. Portanto, a investigação da estabilidade de um nanofluido é essencial para sua aplicação. Yu e Xie (2012) realizaram um levantamento dos métodos para avaliar a estabilização dos nanofluidos e das maneiras de aumentar a sua estabilidade. Esses métodos são descritos nas seções seguintes (2.2.3.1 e 2.2.3.2).

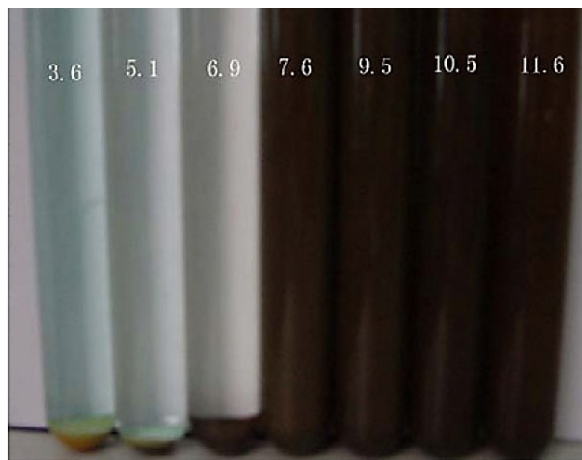
2.2.3.1 Métodos de avaliação da estabilidade de nanofluidos

Após a preparação do nanofluido, a sua estabilidade pode ser avaliada pelos seguintes métodos:

- **Sedimentação e Centrifugação:** a quantidade de nanopartículas sedimentadas, devido à ação de uma força de campo externa (gravidade, em muito dos casos), é pesada ou medida em termos de volume. Os nanofluidos são considerados estáveis quando a quantidade de nanopartículas no fluido base, ou seja, a concentração do nanofluido é

mantida constante. O efeito da sedimentação pode ser observado a partir de imagens fotográficas após um longo período de tempo no qual o nanofluido foi preparado (horas ou dias). Wang e Li (2009) utilizaram o método de sedimentação e, a partir da imagem apresentada na Figura 4, mostraram que a estabilização do nanofluido de Cu-H₂O depende do pH da suspensão.

Figura 4 – Fotografia do nanofluido de Cu-H₂O para vários valores de pH após sete dias da preparação.

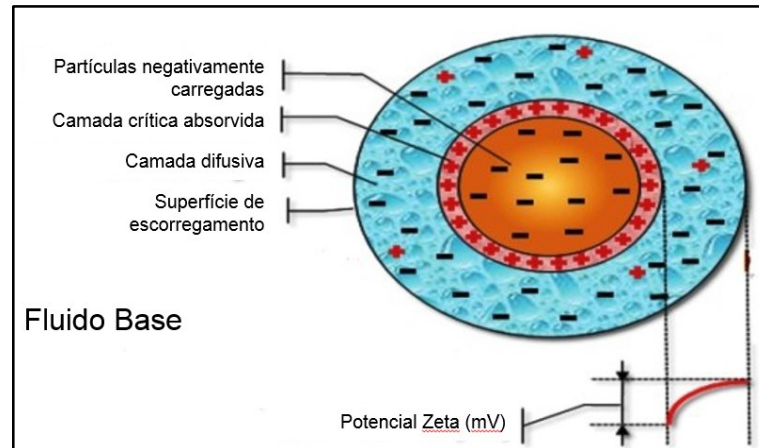


Fonte: Wang e Li (2009).

- **Análise do Potencial Zeta:** o potencial zeta corresponde à diferença de potencial entre o meio de dispersão (fluido base) e a camada estacionária de fluido ligada à partícula dispersa (nanopartícula). Ele indica o grau de repulsão entre as partículas adjacentes igualmente carregadas na dispersão que, por sua vez, está relacionado com a estabilidade da dispersão coloidal (Fig. 5). Assim, coloides de elevado potencial zeta (negativo ou positivo) são eletricamente estabilizados, enquanto coloides com baixo potencial zeta tendem a coagular ou aglomerar. Em geral, um valor de 25 mV (positivo ou negativo) pode ser tomado como o valor arbitrário que separa as superfícies com baixa carga das superfícies altamente carregadas. Os coloides com potencial zeta de 40 a 60 mV tendem a ter boa estabilidade e aqueles com mais de 60 mV tendem a ter excelente estabilidade. Zhu et al. (2009) utilizaram a análise do potencial zeta para verificar a estabilidade de nanofluidos de Al₂O₃-H₂O (0,05 wt.%) com adição de surfactante de dodecilbenzeno sulfonato de sódio (SDBS) sob diversos valores de pH. Para a medição do potencial zeta foi utilizado um *Malvern Zetasizer Nano S analyzer*. A análise feita por Zhu et al. (2009) é apresentada na Figura 6. Para a referente concentração, a

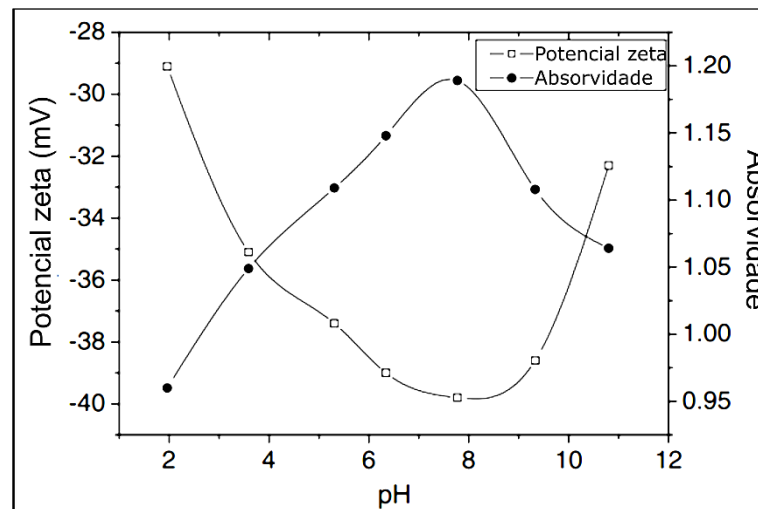
partir da análise do potencial zeta, o pH próximo de 8 é o que oferece uma maior estabilidade do coloide.

Figura 5 – Potencial zeta de nanofluidos.



Fonte: Adaptado de Mukherjee e Paria (2013).

Figura 6 – Efeito do pH sobre o potencial zeta no nanofluido de alumina-água com SDBS.



Fonte: Zhu et al. (2009).

- **Análise Espectral da Absorvência:** a variação da concentração de nanopartículas no fluido base com o tempo pode ser obtida pela absorção do nanofluido através do espectrofotômetro ultravioleta-visível (UV-VIS), pois existe uma relação linear entre a concentração de nanopartícula e a absorção da suspensão coloidal. O método é aplicável para todos os fluidos base, enquanto que a análise do potencial zeta tem restrições relacionadas à viscosidade do fluido base. Zhu et al. (2009) também realizaram a análise espectral do nanofluido utilizando um espectrofotômetro *Hitachi U-3010* e, como

apresentado na Figura 6, o nanofluido com maior absorção é o que possui maior estabilidade.

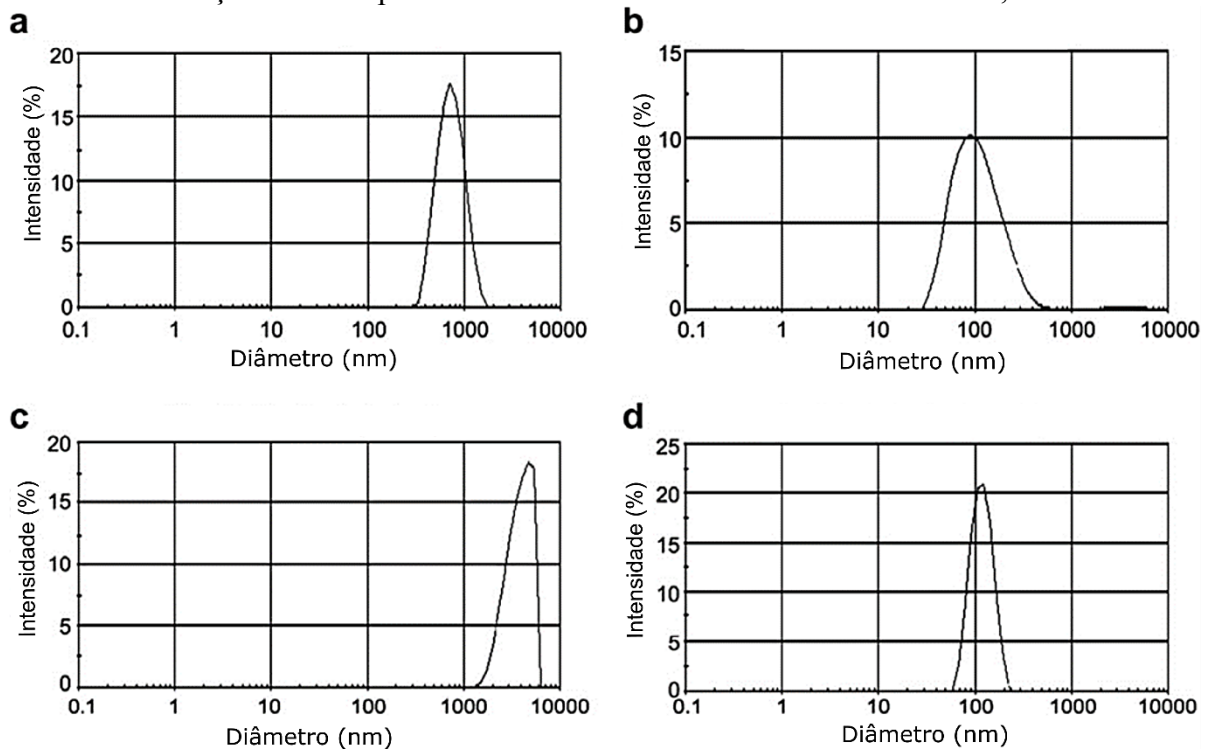
- Análise por microscopia eletrônica: No método da microscopia eletrônica, tanto a microscopia eletrônica de transmissão (do inglês, *Transmission Electron Microscopy*, TEM) quanto a microscopia eletrônica de varredura (do inglês, *Scanning Electron Microscopy*, SEM) são ferramentas capazes de distinguir o formato, tamanho e distribuição das nanopartículas.

2.2.3.2 Métodos para aumentar a estabilidade de nanofluidos

Por meio das técnicas apresentadas na seção anterior é possível avaliar a estabilidade do nanofluido. Caso o mesmo não apresente boa estabilidade, existem técnicas para melhorar a estabilidade de nanofluidos, sendo as mais comuns: adição de surfactantes, controle de pH do nanofluido e agitação ultrassônica.

- Adição de Surfactantes: o surfactante ou dispersante pode melhorar a estabilidade do coloide devido à diminuição da tensão superficial do fluido base, aumentando a dispersão das nanopartículas e, por conseguinte, evitando a sua aglomeração. Vários tipos de surfactantes têm sido utilizados para diferentes tipos de nanofluidos, como: dodecil sulfato de sódio (SDS), dodecilbenzeno sulfonato de sódio (SDBS), sal e ácido oleico, brometo de cetil trimetil amônio (CTAB), brometo de dodeciltrimetilamônio (DTAB), octanoato de sódio (SOCT) e polivinilpirrolidona (PVP) (GHADIMI; SAIDUR; METSELAAR, 2011). Eles podem ser aniônicos, catiônicos ou não iônicos. Wang, Zhu e Yang (2009) testaram o efeito de SDBS em nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ e $\text{Cu-H}_2\text{O}$. A Figura 7 apresenta o resultado obtido por eles, na qual observa-se que a adição de surfactantes diminui o tamanho dos *clusters* e, por consequência, melhora a estabilidade da solução. Porém, o uso de surfactantes pode afetar as características de transferência de calor dos nanofluidos, especialmente em altas temperaturas (WANG; MUJUMDAR, 2008b). Segundo Ghadimi, Saidur e Metselaar (2011), acima de 60°C a ligação entre surfactante e as nanopartículas pode ser danificada levando a perda da estabilidade da solução e, conseqüente, sedimentação das nanopartículas.

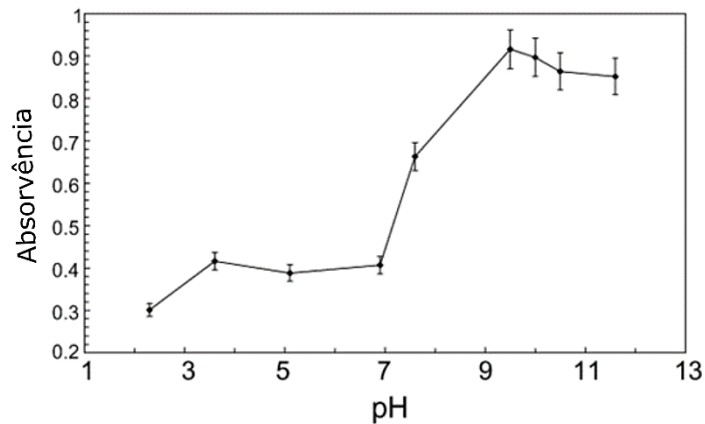
Figura 7 - Distribuições do tamanho das partículas nos nanofluidos. (a) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ sem SDBS, (b) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ com SDBS, (c) $\text{Cu-H}_2\text{O}$ sem SDBS e (d) $\text{Cu-H}_2\text{O}$ com SDBS. A concentração das nanopartículas e surfactante SDBS foram ambos de 0,05 wt.%.



Fonte: Wang, Zhu e Yang (2009).

- Controle do pH: a estabilidade dos nanofluidos está diretamente relacionada às suas propriedades eletro-cinéticas. Existe um ponto ótimo em que as partículas com íons estão com força máxima de repulsão, ou seja, existe um pH ótimo no qual o potencial zeta ou a absorção do nanofluido é máximo (LI; ZHU; WANG, 2007). Assim, o controle do pH pode aumentar a estabilidade devido às fortes forças repulsivas. O valor de pH ótimo varia de acordo com a combinação do fluido base e material da nanopartícula. Por exemplo: o valor de pH adequado para o cobre, alumina e grafite dispersos em água é, aproximadamente, 8; 9,5 e 2, respectivamente (XIE et al., 2003). Li, Zhu e Wang (2007) usaram o método de análise espectral para verificar a estabilidade do nanofluido de $\text{Cu-H}_2\text{O}$ com adição de CTAB (surfactante) por meio da variação do pH das amostras. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos por eles. Nota-se que a faixa de pH entre 9 e 10 é a faixa de maior absorção, logo é o pH de maior estabilidade das nanopartículas na água (como já mencionado anteriormente).

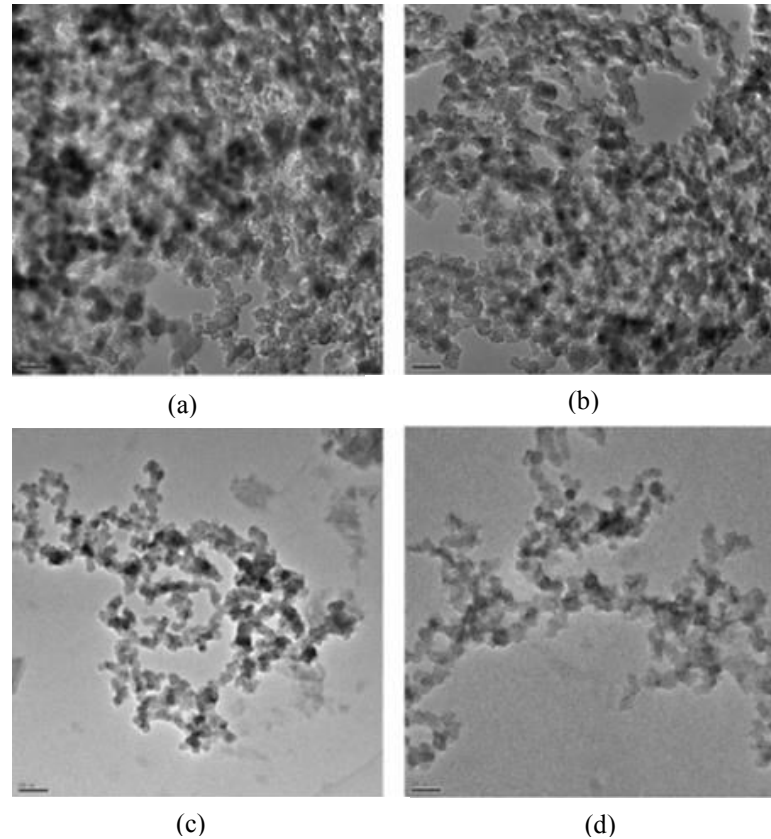
Figura 8 - Efeito do pH na absorvência do nanofluido Cu-H₂O+CTAB com concentração de 0.1 wt.%.



Fonte: Li, Zhu e Wang (2007).

- Agitação ultrassônica: a agitação não altera as propriedades superficiais do nanofluido em relação aos métodos citados anteriormente. Banho ultrassônico, ultrassonicação, misturadores e homogeneizadores são ferramentas normalmente utilizadas por pesquisadores a fim de obter um nanofluido sem aglomeração (GHADIMI; SAIDUR; METSELAAR, 2011). O banho ultrassônico e a ultrassonicação são métodos semelhantes, no qual o efeito de uma vibração na faixa de 10 a 50 kHz é transferido à mistura. No banho ultrassônico, a amostra é mergulhada em água e a vibração é transmitida pela água para a mesma. Já na ultrassonicação, a vibração é transmitida pelo contato do sonotrodo com a amostra. Hwang et al. (2008) realizaram um estudo com diferentes métodos de agitação a fim de verificar o comportamento da dispersão. Três métodos foram usados, misturador magnético (1500 rpm por 120 minutos), banho ultrassônico (40 kHz por 60 min) e sonotrodo (20 kHz e 350 W por 60 minutos). Os pesquisadores encontraram que o melhor método é o de ultrassonicação, porém a agitação por banho ultrassônico também obteve boa dispersão como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Imagens de TEM para nanofluidos de grafite em água preparados pelo método de duas etapas, agitadas por: a) suspensão sem nenhum tipo de agitação; b) misturador magnético; c) banho ultrassônico; d) ultrassonicação.



Fonte: Hwang et al. (2008).

2.3 EBULIÇÃO EM PISCINA UTILIZANDO NANOFLUIDOS

Os estudos em ebulição em piscina usando particulados tiveram início com Yang e Maa (1984). Eles utilizaram partículas de alumina em escala nano (50 nm) e escala micro (0,3 μm e 1 μm) em baixas concentrações – 0,025 vol.% a 0,125 vol.% – dispersas em água. Os autores encontraram um aumento no HTC, porém a faixa do fluxo de calor aplicado foi de 10 a 50 kW/m^2 , ou seja, apenas o início do regime de ebulição nucleada foi estudado pelos autores.

Desde o início do século, vários pesquisadores têm realizado estudos experimentais em ebulição em piscina, principalmente, dentro do regime de ebulição nucleada, buscando melhores coeficientes de transferência de calor (HTC). Outro parâmetro bastante estudado é o fluxo de calor crítico (CHF), tido como limite para projetos térmicos.

Portanto, a fim de investigar as alterações no comportamento do HTC e CHF durante a ebulição de nanofluidos, uma ampla revisão bibliográfica foi realizada. A Tabela A.1 (Apêndice A) apresenta um resumo da revisão. Observou-se, da revisão bibliográfica realizada, que os resultados experimentais possuem divergência em relação ao aumento ou redução do HTC, o qual será discutido na seção 2.3.1; em relação ao CHF, o seu aumento foi encontrado em todos os trabalhos pesquisados, porém, a porcentagem desse aumento difere entre os pesquisadores, o que será discutido na seção 2.3.2.

2.3.1 Influência sobre o Coeficiente de Transferência de Calor

Neste século, o comportamento do nanofluido de alumina tem sido exaustivamente estudado em ebulição em piscina. Das, Putra e Roetzel (2003) foram alguns dos primeiros pesquisadores a realizarem o estudo de nanofluidos em ebulição focando o HTC. Eles usaram nanofluido de alumina (38 nm) em quatro concentrações volumétricas (0,1; 1; 2 e 4 vol.%), as quais foram preparadas pelo método de duas etapas e, posteriormente, colocadas em vibração ultrassônica por 4 horas. Para a superfície de aquecimento, eles utilizaram um cilindro horizontal de aço inoxidável com rugosidades diferentes (387 nm e 1150 nm). Sendo o aparato experimental mantido à pressão atmosférica, o máximo fluxo de calor aplicado foi de 100 kW/m². Para todas as concentrações foi encontrada uma diminuição no HTC. Segundo Das, Putra e Roetzel (2003), a diminuição foi causada pela deposição das nanopartículas na superfície, cuja rugosidade era muito maior que o diâmetro das nanopartículas, levando a uma redução na quantidade do número de sítios de nucleação.

Em seguida, Bang e Chang (2005) também usaram nanofluido de alumina (47 nm) com quatro diferentes concentrações (0,5; 1; 2 e 4 vol.%), preparadas pelo método de duas etapas e colocadas em banho ultrassônico por 8 horas. Uma placa de cobre com rugosidade de 37 nm, igualmente polida para todos os testes, foi utilizada como superfície de aquecimento. O máximo fluxo de calor aplicado foi de 600 kW/m² e a câmara de ebulição foi mantida à pressão atmosférica durante todos os fluxos. Novamente um decréscimo no HTC foi constatado, sendo maior à medida que a concentração do nanofluido aumentou. Os autores relataram que houve um aumento da rugosidade superficial após a ebulição, sendo mais significativo para a superfície submetida à ebulição com nanofluido de alta concentração (4 vol.%). Ainda segundo Bang e Chang (2005), a alteração na morfologia da superfície depende do diâmetro da nanopartícula e da rugosidade original da superfície, visto que Das, Putra e Roetzel (2003) obtiveram uma redução na rugosidade da superfície.

Wen e Ding (2005) estudaram o nanofluido de alumina em água, com concentrações de 0,08 vol.% a 0,31 vol.%, preparadas pelo método de duas etapas seguido de um homogeneizador de alta velocidade, utilizado para quebrar os *clusters*. A superfície de aquecimento foi um disco polido de aço inox (rugosidade não reportada). O fluxo máximo aplicado foi de 130 kW/m². Ao contrário dos autores anteriores, Wen e Ding (2005) relataram um aumento do HTC para todas as concentrações (aumento de 40% para a concentração de 0,31 vol.%). Segundo os autores, a deterioração do HTC relatada por outros pesquisadores é devido à resistência térmica causada pela deposição das nanopartículas. Portanto, no trabalho de Wen e Ding (2005) nenhuma deposição foi relatada, indicando uma alta estabilização do nanofluido.

Kim et al. (2007a) analisaram diferentes nanofluidos (alumina, zirconia e sílica em água) sob o regime de ebulição nucleada. As concentrações volumétricas foram as mesmas para todos os nanofluidos: 0,001; 0,01 e 0,1 vol.%. Os autores optaram por utilizar um fio de Ni-Cr, com diâmetro de 0,38 mm e comprimento de 120 mm, como superfície de aquecimento. O fluxo de calor foi aplicado gradativamente até atingir o CHF, *i.e.*, fluxos acima de 1000 kW/m². Para todos os nanofluidos e concentrações volumétricas o HTC foi menor do que aquele para água pura. Isso ocorre devido à deposição das nanopartículas na superfície, a qual aumenta a resistência térmica e diminui a densidade de sítios de nucleação.

Soltani, Etemad e Thibault (2009) estudaram a ebulição dos nanofluidos de Al₂O₃ e SnO₂ em água destilada. Para o nanofluido de alumina as concentrações variaram de 0,07 a 0,50 vol.% e, para o nanofluido de óxido de estanho, as concentrações variaram de 0,07 a 0,75 vol.%. Para a superfície de aquecimento foi utilizada uma resistência tipo cartucho de aço inox colocada na posição vertical e o máximo fluxo de calor aplicado foi de 80 kW/m². No geral, foi observado um aumento no HTC para ambos os nanofluidos, sendo mais evidente para altas concentrações. Foi relatado um aumento de 30% para o nanofluido de Al₂O₃ a 0,50 vol.% e, 20% para o nanofluido de SnO₂ a 0,75 vol.%. Os autores relataram que o processo ebulição é função das propriedades termofísicas do fluido. Considerando que a condutividade térmica dos nanofluidos é maior que a do fluido base, a transferência de calor por condução na camada limite térmica será maior em nanofluidos, podendo ser um dos fatores responsáveis pelo aumento do HTC observado pelos autores.

Kwark et al. (2010) usaram nanopartículas de alumina, com diâmetro médio de 139 nm, dispersas em água deionizada para estudar o efeito da ebulição em piscina de nanofluidos em baixas concentrações. A concentração do nanofluido variou de 0,001 a 1 g/l ($0,0027 \times 10^{-3}$ a 0,0027 vol.%). Os nanofluidos foram preparados pelo método de duas etapas seguido de uma estabilização por banho ultrassônico durante 2 horas. A superfície de aquecimento con-

sistiu de uma placa de cobre polido de 10 mm × 10 mm (rugosidade não reportada). O experimento foi realizado à pressão atmosférica e à temperatura de saturação. O fluxo de calor foi gradativamente aplicado até atingir o CHF. Para as concentrações de 0,001 a 0,025 g/l, nenhuma alteração no HTC foi constatada. A partir da concentração de 0,01 g/l, um decréscimo no HTC foi observado pelos autores. Segundo Kwarck et al. (2010), a redução no HTC foi causada pelo aumento da resistência térmica na superfície de aquecimento devido à deposição de nanopartículas, a qual foi desprezível para concentrações volumétricas muito baixas.

Harish, Emlin e Sajith (2011) utilizaram nanofluido de alumina (tamanho médio de 50 nm) em água, para três diferentes concentrações (0,5; 1 e 2 vol.%) preparadas pelo método de duas etapas e estabilizadas por vibração ultrassônica (sonotrodo) e por controle de pH. A superfície de aquecimento consistiu de um disco de alumínio com duas rugosidades, lisa (53 nm) e rugosa (308 nm). O diferencial do trabalho, segundo os autores, foi que para cada fluxo de calor aplicado o nanofluido foi trocado a fim de manter a concentração. O máximo fluxo aplicado foi de 550 kW/m². O HTC aumentou para todas as concentrações de nanofluido em ebulição sobre a superfície rugosa, sendo a maior concentração a que obteve o maior aumento. Já para a superfície lisa, ocorreu uma redução no HTC de aproximadamente 20%, 26% e 30% para as concentrações de 0,5, 1 e 2 vol.%, respectivamente. Segundo Harish, Emlin e Sajith (2011), a modificação das propriedades termofísicas dos nanofluidos e a interação fluido-superfície interferem no fenômeno de ebulição, visto que para a superfície rugosa, a rugosidade ficou maior depois da ebulição e, para a superfície lisa, a rugosidade ficou menor depois da ebulição.

Ahmed e Hamed (2012) estudaram o efeito dos nanofluidos de baixas e médias concentrações no regime de ebulição nucleada. O nanofluido foi obtido a partir da dispersão de nanopartículas de alumina (40 - 50 nm) em água deionizada e estabilizado em um banho ultrassônico durante 5 horas. Para a superfície de aquecimento foi utilizada uma placa horizontal de cobre com diâmetro de 25,4 mm e rugosidade média de 50 nm. O fluxo máximo de calor aplicado para todos os testes foi de 600 kW/m². O nanofluido de 0,01 vol.% mostrou um aumento de 35% no HTC em relação à água pura. O nanofluido de 0,1 vol.% teve comportamento similar ao da água e, o de 0,5 vol.% resultou em uma redução de 45% no HTC em relação à água. Segundo os autores, a alteração no HTC foi principalmente devido à deposição das nanopartículas na superfície de aquecimento. Para baixas concentrações, tal como 0,01 vol.%, a taxa de deposição foi menor e o efeito da condutividade térmica do nanofluido prevaleceu. Para valores mais elevados de concentração a taxa de deposição foi maior, aumentando a resistência térmica e reduzindo a quantidade de sítios de nucleação.

Wen (2012) realizou experimentos em ebulição em piscina, para baixos valores de fluxos de calor (até 105 kW/m^2), utilizando nanopartículas de alumina (20 - 150 nm) em água destilada. As concentrações do nanofluido foram: 0,001; 0,01 e 0,1 vol.%, preparados pelo método de duas etapas seguido de agitação ultrassônica. Duas diferentes superfícies de cobre, uma lisa ($R_a = 25 \text{ nm}$) e outra rugosa ($R_a = 420 \text{ nm}$), foram testadas. A superfície lisa foi utilizada apenas para o teste com a concentração de 0,001 vol.%, onde um aumento de aproximadamente 100% no HTC, para fluxos de calor muito baixos (30 kW/m^2), foi relatado. Para a superfície rugosa, todas as concentrações obtiveram valores de HTC maiores que do fluido base para baixos fluxos de calor, porém os valores tenderam a se igualar ao da água quando o fluxo de calor foi maior que 100 kW/m^2 . Segundo Wen (2012), o comportamento dos nanofluidos em ebulição varia com o tempo devido à deposição das nanopartículas na superfície. Vafaei (2015) realizou um estudo de revisão sobre o trabalho de Wen (2012) e concluiu que além do tempo, o diâmetro da nanopartícula e a morfologia da superfície tem papel importante na transferência de calor bifásica utilizando nanofluidos.

Shahmoradi, Etesami e Esfahany (2013) também utilizaram nanopartículas de alumina (40 nm) em água. Os nanofluidos foram preparados em cinco concentrações (0,0001; 0,002; 0,05 e 0,1 vol.%) pelo método de duas etapas e estabilizados por vibração ultrassônica alternando com misturador mecânico por mais de 3 horas, a fim de obter uma dispersão estável. Um disco horizontal de cobre (38 mm de diâmetro) foi utilizado como superfície de aquecimento. A superfície foi lixada com lixa #2500 por 3 min antes de cada teste. A rugosidade da superfície foi de 5,1 nm, medida por meio de um microscópio de força atômica (do inglês, *Atomic Force Microscopy*, AFM). O experimento foi realizado em condições de pressão atmosférica e temperatura de saturação. O fluxo de calor foi gradativamente aplicado até atingir o CHF. A redução no HTC foi relatada para todas as concentrações maiores que 0,0001 vol.%. Para a concentração de 0,0001 vol.% não houve alteração no HTC. Segundo Shahmoradi, Etesami e Esfahany (2013), a redução no HTC foi causada pela deposição das nanopartículas, as quais criaram uma nanocamada sobre a superfície de aquecimento.

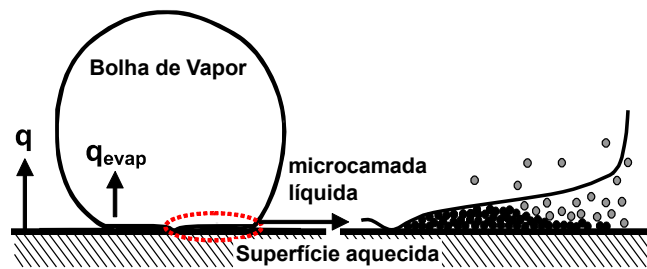
Sarafraz, Hormozi e Peyghambarzadeh (2016) usaram nanopartículas de alumina em dois diâmetros (20 nm e 50 nm) dispersas em água deionizada. A concentração do nanofluido foi de 0,025 vol.% e 0,075 vol.%. Os nanofluidos foram preparados pelo método de duas etapas seguido de agitação magnética em 250 rpm por 30 minutos; depois o nanofluido foi agitado por um sonotrodo durante 20 minutos; e, por fim, 0,1 vol.% de surfactante não iônico foi misturado ao nanofluido. A superfície de aquecimento consistiu de uma placa de cobre com 11 mm de diâmetro (rugosidade não reportada). O experimento foi realizado à pressão atmos-

férica e à temperatura de saturação. O fluxo de calor foi gradativamente aplicado até atingir o CHF. Para ambas as concentrações foram relatadas diminuição no HTC comparado a água pura. Porém, o nanofluido de menor concentração e menor tamanho de nanopartícula (20 nm) foi o que obteve o menor decréscimo. Os autores relataram que a redução no HTC foi causada pelo aumento da resistência térmica na superfície de aquecimento devido à deposição das nanopartículas.

2.3.1.1 Mecanismos de transferência de calor em ebulição em piscina utilizando nanofluidos

A grande maioria dos autores observou que a modificação no HTC para a ebulição em piscina foi devido à alteração da morfologia da superfície de aquecimento. A camada formada pela deposição das nanopartículas sobre a superfície (Fig. 10) pode fornecer uma barreira para a transferência de calor e também reduzir a formação de bolhas de vapor.

Figura 10 – Mecanismo de deposição das nanopartículas durante a ebulição de nanofluidos.



Fonte: Adaptado de Kwark et al. (2010)

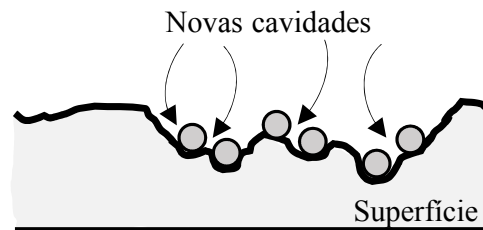
No entanto, esta mesma camada pode aumentar o número de sítios de nucleação e, conseqüentemente, aumentar o HTC. Narayan, Anoop e Das (2007) apresentaram um parâmetro de interação superfície-nanopartícula (do inglês, *surface-interaction parameter*, SIP) definido por

$$SIP = \frac{R_a}{d_p} \quad (2)$$

no qual R_a é a rugosidade média da superfície de aquecimento e d_p , o diâmetro médio das nanopartículas. O parâmetro SIP pode, em alguns casos, indicar qual será o comportamento do HTC. Por exemplo, razões próximas a 1 apresentarão HTC menores comparados aos fluidos base devido ao entupimento das microcavidades e, razões maiores que 1 terão HTC maiores

comparados aos fluidos base devido à multiplicação das microcavidades (Fig. 11). Harish, Emlin e Sajith (2011) obtiveram resultados coerentes com a teoria proposta por Narayan, Anoop e Das (2007), segundo os quais o HTC aumentou para $R_a/d_p > 1$ e diminuiu para $R_a/d_p \approx 1$. Demais pesquisadores também obtiveram resultados similares. A Tabela A.2 apresenta uma lista com os autores e o parâmetro de interação superfície-nanopartícula.

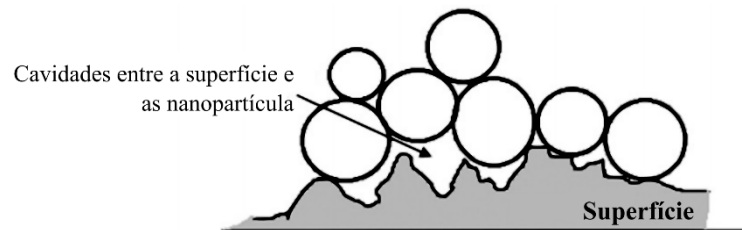
Figura 11 – Nanopartícula depositada em superfície de aquecimento para $R_a/d_p > 1$.



Fonte: Adaptado de Manetti e Cardoso (2015).

Seguindo a mesma linha, Shahmoradi, Etesami e Esfahany (2013) relataram que quando $R_a/d_p \ll 1$, o aumento da resistência térmica na superfície é superior a qualquer outro efeito, pois além das nanopartículas depositadas, pequenos bolsões de vapor ficam acumulados entre as nanopartículas e a superfície (Fig. 12).

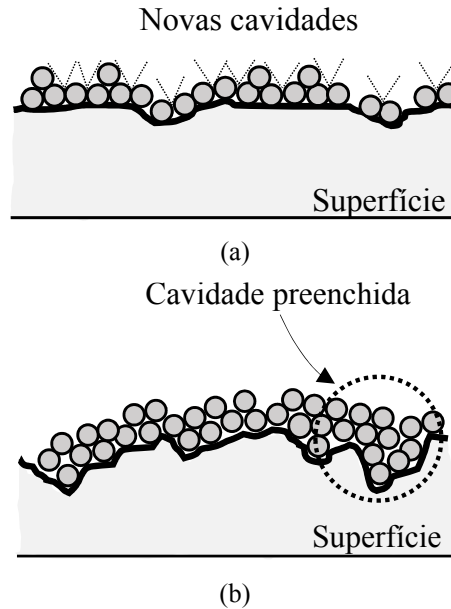
Figura 12 – Nanopartículas depositadas na superfície de aquecimento para $R_a/d_p \ll 1$.



Fonte: Adaptado de Shahmoradi, Etesami e Esfahany (2013).

Segundo Vafaei (2015), a deposição de nanopartículas também pode multiplicar a quantidade de sítios de nucleação quando $R_a/d_p < 1$ (Fig. 13a), sendo mais efetiva para o aumento do HTC. No entanto, para razões muito maiores que 1 ($R_a/d_p \gg 1$) as nanopartículas podem entupir totalmente as microcavidades (Fig. 13b), e assim, se tornarem menos efetivas para o aumento do HTC.

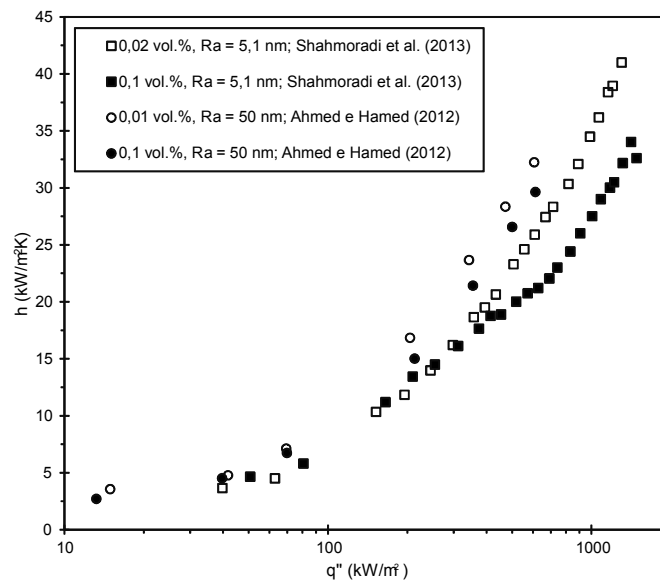
Figura 13 – Nanopartículas depositadas na superfície de aquecimento. a) Diâmetro da partícula é maior que a rugosidade, $R_a/d_p < 1$. b) Diâmetro da partícula é muito menor que a rugosidade, $R_a/d_p \gg 1$.



Fonte: Adaptado de Vafaei (2015).

Outro fator que interfere no desempenho do HTC durante a ebulição de nanofluidos é a sua concentração. Na revisão apresentada observou-se que baixas concentrações possuem melhor desempenho (maiores valores de HTC), principalmente, para fluxos de calor acima de 400 kW/m^2 , devido à baixa taxa de deposição das nanopartículas sobre a superfície. A Figura 14 apresenta uma análise comparativa de ensaios utilizando nanofluido de alumina com diferentes concentrações volumétricas.

Figura 14 – Influência da concentração do nanofluido de alumina para diferentes rugosidades superficiais.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Comparando os resultados para o mesmo autor e suas duas diferentes concentrações, é possível notar que o coeficiente de transferência de calor é maior para concentrações mais baixas e para fluxos de calor acima de 400 kW/m².

2.3.2 Influência sobre o Fluxo de Calor Crítico

You, Kim e Kim (2003) foram uns dos primeiros a realizar o estudo do CHF em nanofluidos. Eles utilizaram nanofluido de alumina-água com uma faixa de concentração de 0 a 0,05 g/l (0 - 0,001 vol.%). Para os ensaios foi utilizada uma placa horizontal de cobre. Os ensaios foram realizados sob pressão menor do que a atmosférica, 2,89 Psia ou 0,2 bar, nos quais a temperatura de saturação do fluido base foi de 60 °C. Os autores obtiveram um aumento de 200% no CHF para concentrações acima de 0,001 g/l. Os autores concluíram que o aumento no CHF poderia, em parte, ser causado pelo aumento do diâmetro das bolhas de vapor, porém relataram que mais estudos deviam ser realizados para entender o fenômeno.

Bang e Chang (2005) também mediram o CHF dos nanofluidos (à pressão atmosférica) e obtiveram valores duas vezes maiores ao do fluido base puro. Segundo os autores, o aumento foi devido à camada de nanopartículas formada sobre a superfície, pois a mesma reduz a quantidade de sítios de nucleação diminuindo a formação de bolhas de vapor e, portanto, a coalescência destas.

Kim, Kim e Kim (2006) utilizaram dois tipos de nanofluidos para análise do CHF. Foram realizados testes com alumina (47 nm) e óxido de titânio (85 nm) em baixas concentrações (1×10^{-5} a 1×10^{-1} vol.%). A superfície de aquecimento foi um fio de Ni-Cr. Os ensaios foram realizados à pressão atmosférica e o CHF foi determinado pelo valor da potência no momento da queima do fio (*burn out*). O aumento no CHF chegou a 100% para o nanofluido de óxido de titânio na concentração de 0,1 vol.% e, 76% para o nanofluido de alumina para todas as concentrações superiores a 0,001 vol.%. Novamente, o aumento no CHF foi atribuído à deposição das nanopartículas sobre a superfície e, segundo os autores, as características desta nanocamada são altamente dependentes da concentração do nanofluido. Em publicação posterior, Kim, Kim e Kim (2007) utilizaram a mesma metodologia e realizaram a medição do ângulo de contato – definido como o ângulo entre as interfaces líquido-vapor e líquido-sólido de uma gota líquida sobre uma superfície sólida (detalhada na seção 2.3.2.1) – e detectaram uma grande redução deste em superfícies com nanopartículas depositadas.

Kim et al. (2007) estudaram o CHF para várias dispersões (alumina, zircônia e sílica) em água deionizada. Três concentrações foram usadas: 0,001; 0,01 e 0,1 vol.%. Um fio de aço inox 316 com diâmetro de 0,38 mm foi utilizado como superfície de aquecimento. Os ensaios foram realizados à pressão atmosférica. Aumentos significativos no CHF foram observados para todos os nanofluidos, sendo 52% para a alumina (0,001 vol%), 75% para a zircônia (0,01 vol.%) e 85% para a sílica (0,1 vol.%). Usando imagens feitas por um microscópio eletrônico de varredura foi observado uma grande quantidade de nanopartículas sobre o fio, a qual causou uma diminuição no ângulo de contato. Assim, Kim et al. (2007) atribuíram o aumento no CHF devido às mudanças superficiais.

Golubovic et al. (2009) também estudaram o CHF dos nanofluidos de Al_2O_3 -Água e BiO-Água. Para a alumina dois tamanhos médios (46 nm e 22 nm) foram utilizados e para o óxido de bismuto, apenas nanopartículas de 38 nm. Os nanofluidos foram preparados pelo método de duas etapas seguido de estabilização em banho ultrassônico. A concentração variou entre 2×10^{-5} a 2×10^{-4} vol.%. Para a superfície de aquecimento foi utilizado um fio de Ni-Cr. O CHF aumentou para todas as concentrações e nanofluidos estudados. Golubovic et al. (2009) encontraram uma grande redução no ângulo de contato após os testes de ebulição dos nanofluidos. A redução do ângulo de contato foi o principal motivo no aumento do CHF, segundo os autores.

Kwark et al. (2010) também estudaram o efeito dos nanofluidos no CHF ao final de cada ensaio de HTC detalhado na seção 2.3.1. Eles relataram um aumento no valor do CHF conforme a concentração do nanofluido de alumina-água foi aumentando, atingindo um valor

máximo de 2000 kW/m² para a concentração de 0,025 g/l. Como conclusão, os autores relataram a existência de um ponto ótimo de concentração, 0,025 g/l ou 0,0007 vol.%, no qual tanto o CHF quanto o HTC foram máximos.

Harish, Emlin e Sajith (2011) utilizaram os mesmos nanofluidos utilizados nos ensaios de HTC (seção 2.3.1.), porém foi utilizado um fio de Ni-Cr a fim de obter o CHF pelo método do *burn out*. O CHF aumentou para todas as concentrações de nanofluidos ensaiados, sendo o maior aumento igual a 121% para a concentração de 2 vol.%.

Lee, Lee e Jeong (2012) estudaram o efeito do nanofluido de magnetita (Fe₃O₄) dispersa em água, com concentrações de 0,0001; 0,001 e 0,01 vol.%, sem adição de surfactante. Outros dois tipos de nanopartículas (alumina e óxido de titânio) também foram preparados usando as mesmas concentrações para comparação. A superfície de aquecimento foi um fio horizontal de Ni-Cr e o CHF foi estimado usando os dados obtidos após a incandescência do fio. O CHF aumentou para todos os casos, no entanto o nanofluido de magnetita mostrou o maior aumento. Lee, Lee e Jeong (2012) enfatizaram a importância do ângulo de contato da superfície como responsável pelo aumento do CHF.

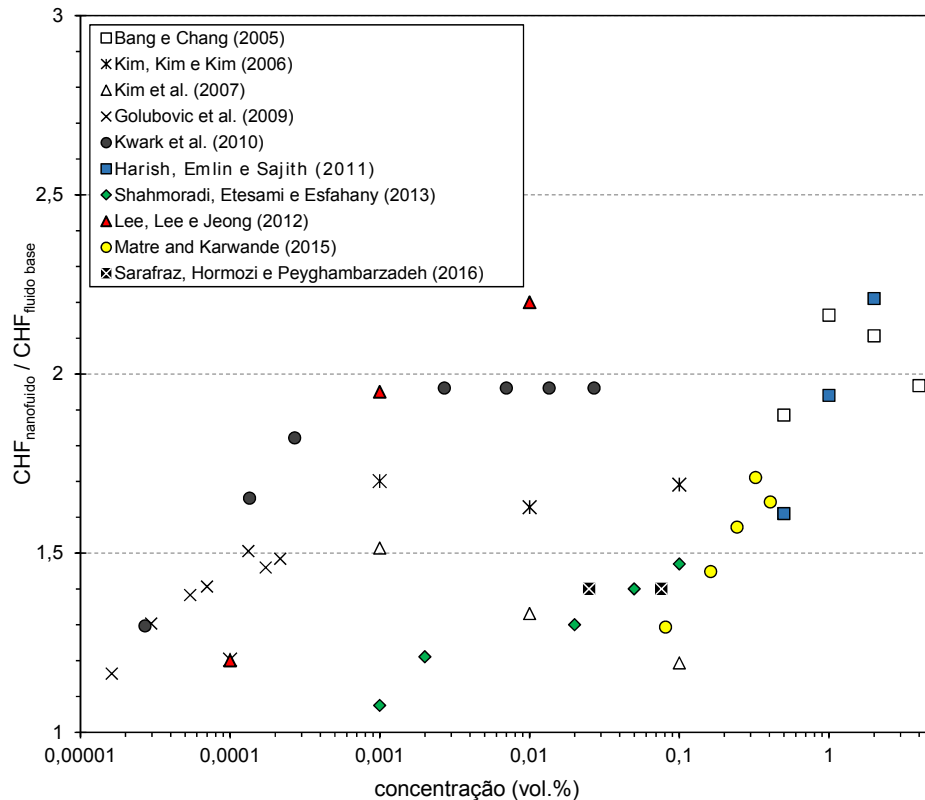
Shahmoradi, Etesami e Esfahany (2013) reportaram o aumento do CHF para todas as concentrações testadas. De acordo com os autores, o aumento é devido ao fato da precipitação das nanopartículas na superfície de aquecimento, a qual forma uma camada porosa que melhora o remolhamento da superfície e retarda a ocorrência de secagem (*dry out*) da mesma.

Recentemente, Matre e Karwande (2015) realizaram ensaios com nanofluidos de Al₂O₃-Água em diversas concentrações (0,08 a 0,40 vol.%) usando fio de Ni-Cr como superfície de aquecimento. O CHF aumentou com o aumento da concentração até 0,32 vol.%, onde uma melhora de 73% foi obtida; para as demais concentrações o aumento foi inferior a 73%.

Sarafraz, Hormozi e Peyghambarzadeh (2016) também detectaram aumento nos valores de CHF, sendo o valor igual para ambas as concentrações de nanofluido de alumina e tamanhos de nanopartículas. O aumento, segundo os autores, foi devido à deposição das nanopartículas, as quais formaram uma camada porosa capaz de absorver rapidamente o fluido impedindo a secagem da superfície (*dry out*).

A fim de visualizar os dados de CHF relatados, a Figura 15 apresenta a razão entre o CHF do nanofluido e o CHF do fluido base em função da concentração do nanofluido, para os autores que utilizaram o nanofluido de Al₂O₃-Água.

Figura 15 – Razão entre o CHF do nanofluido e o CHF do fluido base em função da concentração do nanofluido Al_2O_3 -Água.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se que existe uma divergência entre os valores de CHF para a mesma concentração de nanofluido. As concentrações próximas de 0,01 vol.% obtiveram CHF próximos ou até acima de 100% do valor do fluido base para Kwark et al. (2010) e Lee, Lee e Jeong (2012), porém valores bem abaixo de 100% para Kim, Kim e Kim (2006), Kim et al. (2007) e Shahmoradi, Etesami e Esfahany (2013). Da mesma maneira, as concentrações próximas de 1 vol.% obtiveram aumentos na faixa de 100% ou mais nos estudos de Bang e Chang (2005) e Harish, Emlin e Sajith (2011). Tal divergência pode ocorrer devido ao modo de preparo do nanofluido (uma ou duas etapas), tempo de ebulição e fluxo de calor aplicado antes do CHF ser atingido, além das condições originais da superfície de aquecimento.

2.3.2.1 Influência do Ângulo de Contato e Molhabilidade sobre o CHF

O desempenho da transferência de calor em ebulição é dependente do contato das fases com a superfície sólida. Tal contato pode variar, dependendo da superfície e do tipo de fluido, podendo ser observado quando uma pequena quantidade de líquido (gota) é colocada sobre uma superfície. Líquidos com pequena afinidade com a superfície tendem a se juntar e

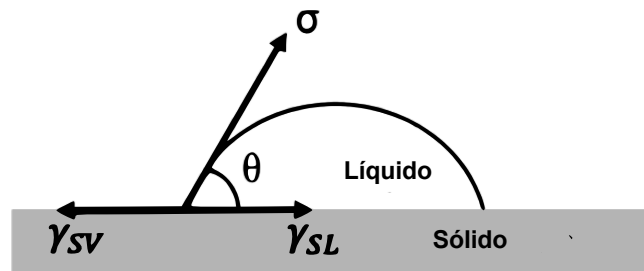
repelir-se da superfície enquanto líquidos com grande afinidade tendem a se esparramar sobre a superfície, formando um filme. Esta afinidade entre líquidos e sólidos é denominada molhabilidade, que por sua vez é quantificada por meio do ângulo de contato, ou seja, o ângulo entre a superfície sólida e a linha tangente a interface líquido-vapor (Fig. 16). Combinações sólido-líquido com grande afinidade são consideradas molhantes (possuem baixo ângulo de contato) e vice-versa (CAREY, 1992).

De acordo com a revisão realizada e resumida na Tabela A.3, a causa do aumento do CHF utilizando nanofluidos é o aumento da molhabilidade (redução do ângulo de contato) devido à camada de nanopartículas depositada na superfície de aquecimento (placa ou fio) durante a ebulição. A equação de Young, modificado por Wenzel (1949),

$$\cos \theta^* = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\sigma} r = r \cos \theta \quad (3)$$

pode ser usada para demonstrar o efeito da molhabilidade no CHF, na qual, $\gamma_{SV} - \gamma_{SL}$ é a tensão de adesão, r é o fator de rugosidade (razão entre a área de contato efetiva e a área de contato lisa), σ é a tensão superficial, θ^* é o ângulo de contato estático aparente e θ é o ângulo de contato estático (Fig. 16).

Figura 16 – Representação do ângulo de contato e as tensões de adesão e superficial.

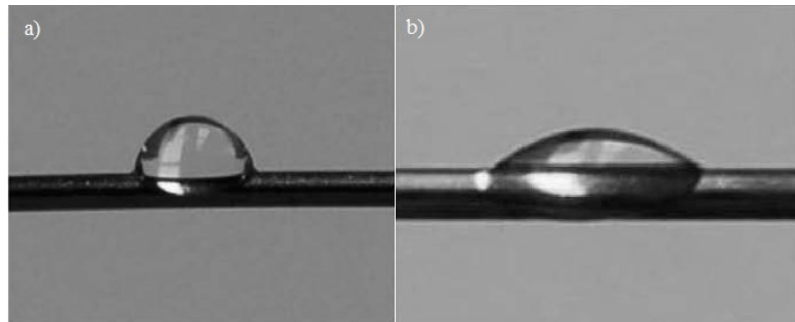


Fonte: Adaptado de Ciloglu e Bolukbasi (2015).

Segundo Kim et al. (2006), as superfícies de aquecimento ensaiadas com nanofluidos no regime de ebulição nucleada em piscina, obtiveram um decréscimo no ângulo de contato devido à camada porosa aumentar a tensão de adesão e o fator de rugosidade da Eq. (3). A tensão superficial não sofre alterações, de acordo com as medições realizadas pelos pesquisadores. Assim, o aumento da molhabilidade retarda a formação do filme de vapor, pois absorve rapidamente o fluido para as regiões mais quentes da superfície (*hot spots*) e, portanto, aumenta o valor do CHF (CILOGLU; BOLUKBASLI, 2015; SARAFRAZ; HORMOZI; PEYGHAMBARZADEH, 2016).

A medição do ângulo de contato na superfície de aquecimento foi realizada por diversos autores, antes e depois do processo de ebulição. Golubovic et al. (2009) verificaram a redução do ângulo de 90° , para a superfície original, para 33° (Fig. 17) após a ebulição do nanofluido de alumina (concentração de 0,0065 g/l).

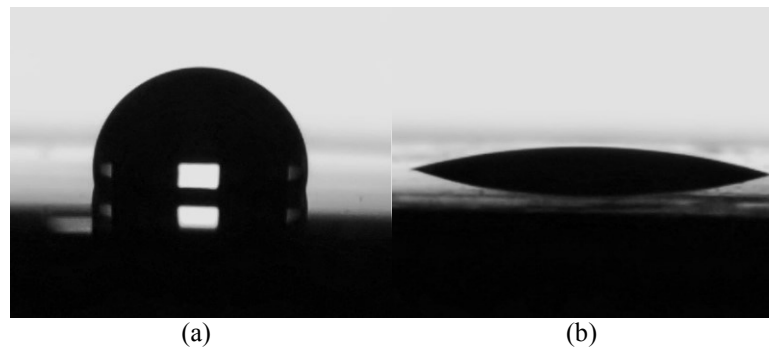
Figura 17 – Ângulo de contato da água em fio de Ni-Cr. a) antes da ebulição. b) após a ebulição do nanofluido.



Fonte: Golubovic et al. (2009)

Interessados em estudar a mudança da molhabilidade de superfícies, com diferentes rugosidades e cobertas por nanopartículas de maguemita (Fe_2O_3), Kiyomura et al. (2015) notaram uma drástica redução do ângulo de contato estático para superfície de cobre ($R_a = 50$ nm) em relação a mesma superfície coberta por nanopartículas, obtida por meio do método de ebulição do nanofluido de maguemita em água (concentração de 0,29 g/l). A Figura 18 apresenta o resultado obtido por Kiyomura et al. (2015).

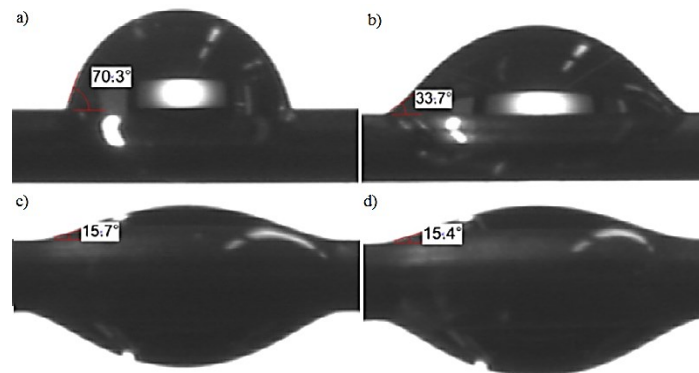
Figura 18 - Ângulo de contato estático da água sobre placa de cobre. a) antes da ebulição. b) após a ebulição do nanofluido.



Fonte: Kiyomura et al. (2015).

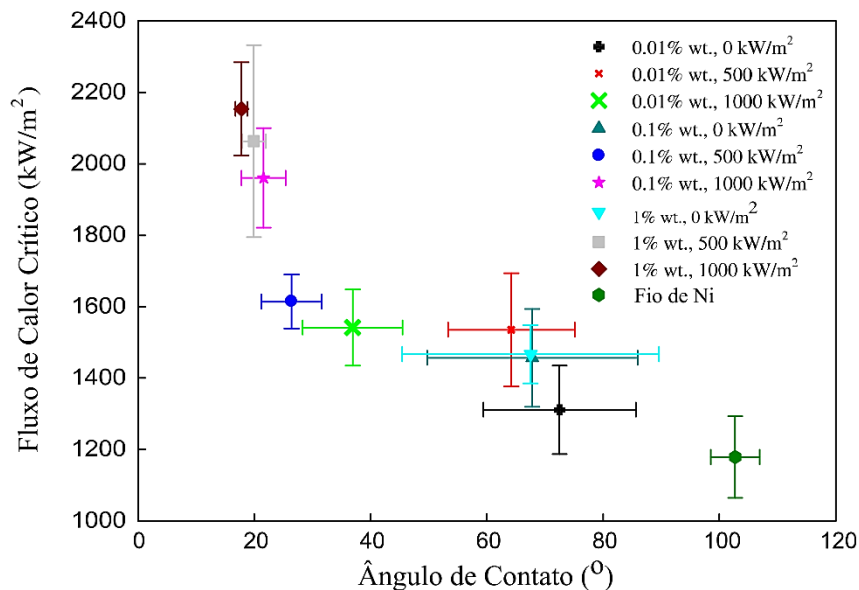
Outros fatores como, tempo de ebulição, potência aplicada e formação da nanocamada depositada também foram estudados por Park, Moon e Bang (2014) e Huang, Lee e Wang (2011), respectivamente. A Figura 19 apresenta a modificação do ângulo de contato em função do tempo e a Figura 20 apresenta a modificação do ângulo de contato e CHF para diferentes potências aplicadas e concentrações de nanofluidos, no regime de ebulição nucleada.

Figura 19 – Ângulo de contato estático de acordo com o tempo de ebulição do nanofluido de alumina (0,01 vol.%). a) antes da ebulição. b) 3 min. após. c) 15 min. após. d) 180 min. após.



Fonte: Park, Moon e Bang (2014).

Figura 20 – CHF para nove diferentes deposições de Titânio em fio de Ni-Cr *versus* o ângulo de contato.



Fonte: Adaptado de Huang, Lee e Wang (2011).

Portanto, a partir das Figuras 19 e 20 nota-se que o ângulo de contato se modifica com o tempo de ebulição até 15 minutos e, após esse tempo a modificação é desprezível. Também é observado que a concentração do nanofluido e a potência aplicada para ebulição desempenham papéis importantes na formação de uma camada que auxilie no remolhamento da superfície de aquecimento, retardando sua secagem e, por fim, aumentando o CHF.

2.4 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão bibliográfica detalhada sobre os nanofluidos e seu comportamento na ebulição em piscina foi descrita neste capítulo. Com base nessa revisão, seguem-se algumas conclusões:

- Os nanofluidos estão sendo cada vez mais investigados e suas aplicações se estendem a várias áreas, principalmente, aquelas que envolvem altas taxas de dissipação de calor;
- A preparação e estabilização do nanofluido tem fundamental importância, sendo o método de duas etapas seguido de agitação ultrassônica o método mais utilizado pelos pesquisadores para a produção da suspensão coloidal. A mistura de demais componentes (surfactantes) pode ajudar na estabilização, porém modificam as propriedades térmicas dos nanofluidos, além destes perderem suas características químicas e termofísicas em temperaturas próximas da saturação;
- Focando na transferência de calor com mudança de fase usando nanofluidos, ambos os HTC e CHF apresentam modificações devidas, principalmente, à deposição das nanopartículas na superfície de aquecimento;
- Para o HTC, a deposição das nanopartículas sobre a superfície de aquecimento é a principal causa do seu aumento/diminuição. Alguns autores indicaram a existência de uma concentração ótima na qual o aumento do HTC é máximo. Pesquisadores também indicaram o uso de baixas concentrações, nas quais a taxa de deposição é menor e a condutividade térmica do nanofluido é dominante. Altas concentrações de nanopartículas acarretam em altas taxas de deposição e conseqüentemente, na redução da densidade dos sítios de nucleação e no aumento da resistência térmica. Outro fator é o parâmetro superfície-nanopartícula (SIP), o qual também deve ser levado em consideração na hora da escolha da rugosidade superficial e diâmetro da nanopartícula a ser utilizada;

- Para o CHF, a deposição das nanopartículas causa um aumento da molhabilidade o que retarda a formação do filme de vapor sobre a superfície, resultando no aumento do CHF.

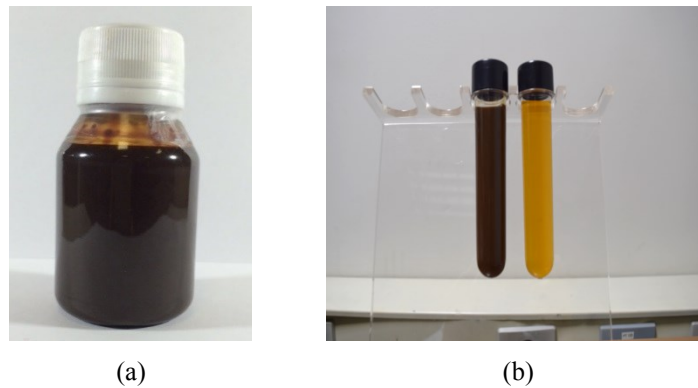
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 PREPARAÇÃO DOS NANOFLUIDOS

Foram preparados dois nanofluidos: Fe_2O_3 -Água (maguemita-água) e Al_2O_3 -Água (alumina-água). Ambos foram preparados em duas concentrações: 0,029 g/l (baixa concentração) e 0,29 g/l (alta concentração).

O nanofluido de maguemita foi produzido e fornecido pelo Instituto de Física da Universidade de Brasília (NFA). Segundo os fabricantes, o nanofluido é constituído de nanopartículas de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ com diâmetro médio de 10 nm e concentração volumétrica de 29 g/l (Fig. 21a), sintetizado pelo método de Massart (MASSART, 1982) por meio da precipitação de Fe_2^+ e Fe_3^+ em meio alcalino disperso em água destilada, ou seja, método de uma etapa. O nanofluido foi então diluído nas concentrações desejadas (Fig. 21b) a partir da mistura de água deionizada seguido de uma agitação em banho ultrassônico (UNIQUE, 25 kHz) por 3 horas.

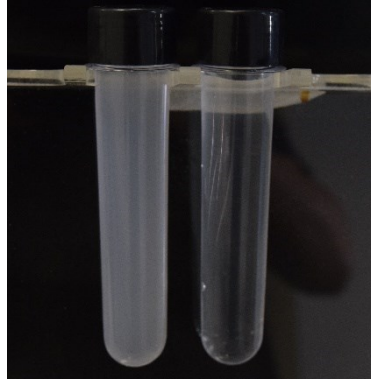
Figura 21 - Nanofluido de maguemita-água. a) concentração de 29 g/l; b) concentração de 0,29 g/l e 0,029 g/l, respectivamente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O nanofluido de alumina foi preparado pelo método de duas etapas por meio da pesagem das nanopartículas secas de Al_2O_3 (diâmetro médio de 10 nm, segundo o fabricante Nanoamor) seguido da diluição em água deionizada de acordo com a concentração desejada (Fig. 22). Por fim, os nanofluidos foram agitados em banho ultrassônico por 3 horas.

Figura 22 - Nanofluido de alumina-água em concentração de 0,29 g/l e 0,029 g/l.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.1 Medição e predição da condutividade térmica dos nanofluidos

Como relatado anteriormente, a adição de nanopartículas em um fluido base altera suas propriedades termofísicas. Dentre as propriedades, a de maior interesse neste trabalho é a condutividade térmica devido ao aumento na transferência de calor que esta pode acarretar. Desta maneira, foram medidas as condutividades térmicas da água deionizada e dos nanofluidos, nas concentrações de 0,029 g/l, 0,29 g/l e 2,9 g/l, a fim de identificar uma tendência nos dados.

A condutividade térmica dos nanofluidos foi avaliada utilizando o equipamento *Hukseflux TP-08 probe*, o qual realiza a análise a partir do método transiente do fio quente. A incerteza de medição do equipamento foi de $\pm 3\%$.

Os resultados experimentais foram confrontados com os valores preditos pela correlação de Hamilton e Crosser (1962),

$$k_{nf} = \frac{k_p + (n - 1)k_b - (n - 1)(k_p - k_b)\phi}{k_p + (n - 1)k_b + (k_p - k_b)\phi} k_b \quad (4)$$

na qual,

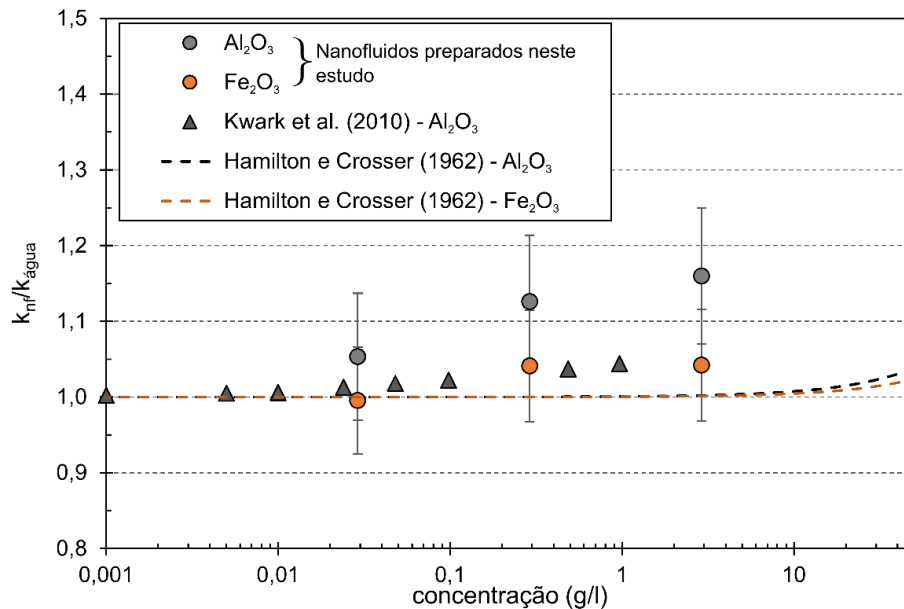
$$n = \frac{3}{\psi} \quad (5)$$

e ψ é a esfericidade da partícula, definida pela razão entre a área superficial de uma esfera, com volume similar ao da partícula, pela área superficial da partícula. Assim, para partículas

esféricas ($\psi = 1$ e $n = 3$) o modelo de Hamilton e Crosser (1962) torna-se idêntico ao de Maxwell (1873). O valor da condutividade térmica das nanopartículas e do fluido base, assim como as demais propriedades termofísicas de ambos, se encontra no Apêndice B; ϕ é a concentração volumétrica do nanofluido, sua conversão para concentração comum e vice-versa foi realizada conforme os tipos de concentrações (também apresentada no Apêndice B).

Os valores da condutividade térmica efetiva, $k_{nf}/k_{\text{água}}$, são apresentados na Figura 23.

Figura 23 – Condutividade térmica efetiva dos nanofluidos utilizados neste estudo a $T = 300$ K.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir da Figura 23 é possível verificar que a variação da condutividade térmica nas concentrações de 0,029, 0,29 e 2,9 g/l foram respectivamente 5%, 12% e 16%, para os nanofluidos de Al₂O₃ e 0%, 4% e 4,2% para os nanofluidos de Fe₂O₃. Ou seja, a condutividade térmica dos nanofluidos nas concentrações preparadas para os ensaios de ebulição, 0,029 e 0,29 g/l, possuem valores de próximos ao do fluido base (água), logo acredita-se que o parâmetro dominante sobre o comportamento do HTC em ebulição com nanofluidos possa ser a modificação de superfície, conforme apresentado na revisão bibliográfica, ao invés do aumento da condutividade térmica como sugerido por Wen e Ding (2005) e Wang e Mujundar (2008b).

3.2 SUPERFÍCIES DE AQUECIMENTO

Foram preparados dois tipos de superfície de cobre:

- Superfície lisa (*smooth surface*, SS): polida mecanicamente com pasta abrasiva de alumina, tendo uma rugosidade média de $0,05 \pm 0,01 \mu\text{m}$ após o polimento;
- Superfície rugosa (*rough surface*, RS): polida manualmente com lixa #600, tendo uma rugosidade média de $0,23 \pm 0,04 \mu\text{m}$ após o polimento.

As superfícies foram caracterizadas antes e depois dos ensaios de ebulição com nanofluidos por meio das seguintes técnicas:

- Obtenção das informações estruturais e da composição química utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM) e Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (do inglês *Energy-dispersive X-ray spectroscopy*, EDS);
- Medição da rugosidade média (R_a) por meio de um rugosímetro marca *Mitutoyo Surftest SJ 301*, com um intervalo de medição de -200 a +150 μm e resolução de $\pm 0.005 \mu\text{m}$. Para cada superfície foi realizada dez medições de rugosidades em diferentes regiões, sempre no sentido radial;
- Medição do ângulo de contato estático por meio da análise de imagens de uma gota séssil de água a 25 °C utilizando o aparato experimental detalhado na seção 3.2.1.

3.2.1 Medição do ângulo de contato

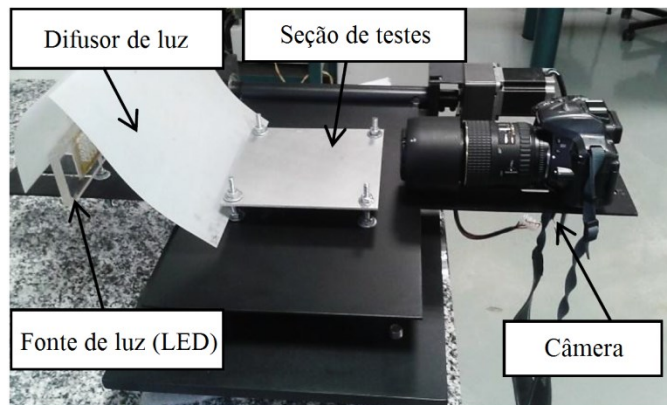
O aparato experimental para medir o ângulo de contato estático consistiu de uma câmera fotográfica, uma fonte de luz LED verde, um difusor de luz e uma placa de alumínio na qual a superfície de teste foi fixada (Fig. 24). O procedimento adotado para avaliar o ângulo de contato consistiu em depositar sobre a superfície de teste uma gota séssil de água, com volume igual a 20 μl , utilizando uma seringa posicionada verticalmente sobre a amostra. Então, as imagens da gota sobre a amostra foram capturadas com uma câmera digital *DSLR D5300 NIKON* equipada com lente macro *Tokina AT-X M100 PRO D* com as seguintes configurações:

- Abertura: f/7.1;
- Tempo de exposição: 1/1600 s;

- ISO: 1250;
- Distância focal: 100 mm.

Feito isso, as imagens foram analisadas usando um software de pós-processamento de imagens com um erro absoluto médio de 1%. O procedimento adotado está bem detalhado em Netto, Moraes e Ribatski (2013) e Kiyomura et al. (2015).

Figura 24 - Aparato experimental utilizado para a medição do ângulo de contato estático.

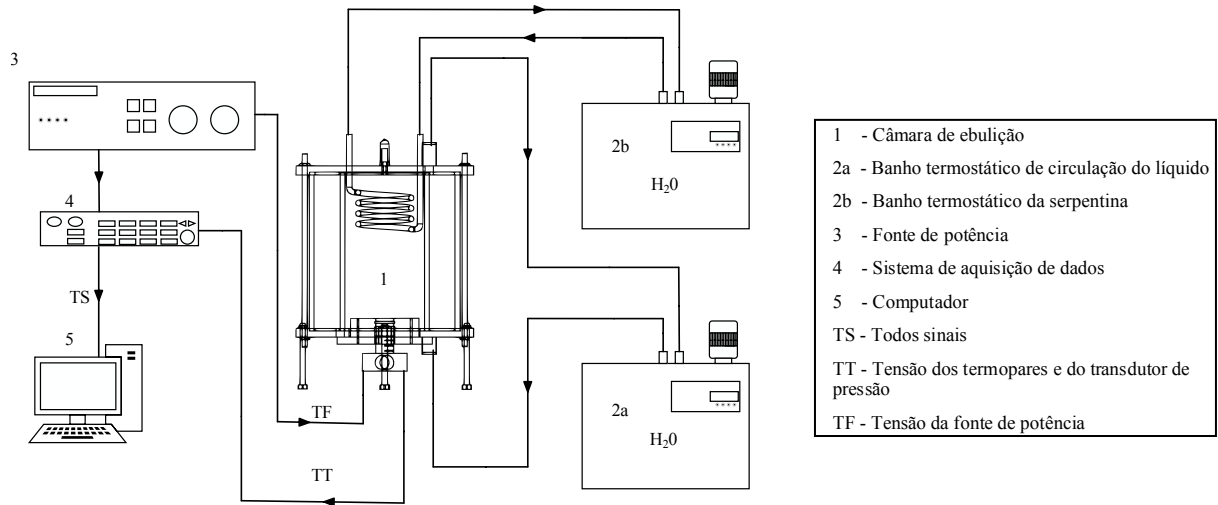


Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.3 APARATO EXPERIMENTAL

Para os ensaios de ebulição em piscina foi construída uma bancada experimental, cujo desenho esquemático é apresentado na Figura 25 indicando os principais componentes: seção de testes, banhos termostáticos, fonte de alimentação, sistema de aquisição de dados e o computador para aquisição e pré-tratamento dos dados. A Figura 26 mostra a bancada experimental construída no Laboratório de Escoamento Bifásico, localizado no DEM - UNESP/FEIS.

Figura 25 - Desenho esquemático do aparato experimental.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

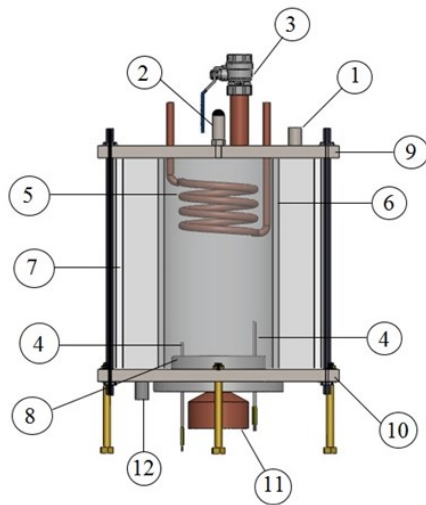
Figura 26 - Bancada experimental para o estudo da ebulição nucleada de nanofluidos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A câmara de ebulição, Fig. 27, consistiu em uma cuba de vidro com espessura de 5 mm e dimensões 170 mm × 170 mm × 180 mm envolvendo um tubo de vidro (borossilicato) de 90 mm de diâmetro interno, 180 mm de altura e 10 mm de espessura.

Figura 27 - Câmara de ebulição.



- 1) Saída do escoamento forçado de água
- 2) Transdutor de pressão
- 3) Válvula para carregamento do fluido de trabalho
- 4) Termopares no líquido e no vapor
- 5) Condensador
- 6) Tubo de vidro
- 7) Cuba de vidro
- 8) Peça de politetrafluoretileno
- 9) Chapa de aço inoxidável superior
- 10) Chapa de aço inoxidável inferior
- 11) Seção de testes
- 12) Entrada do escoamento forçado de água

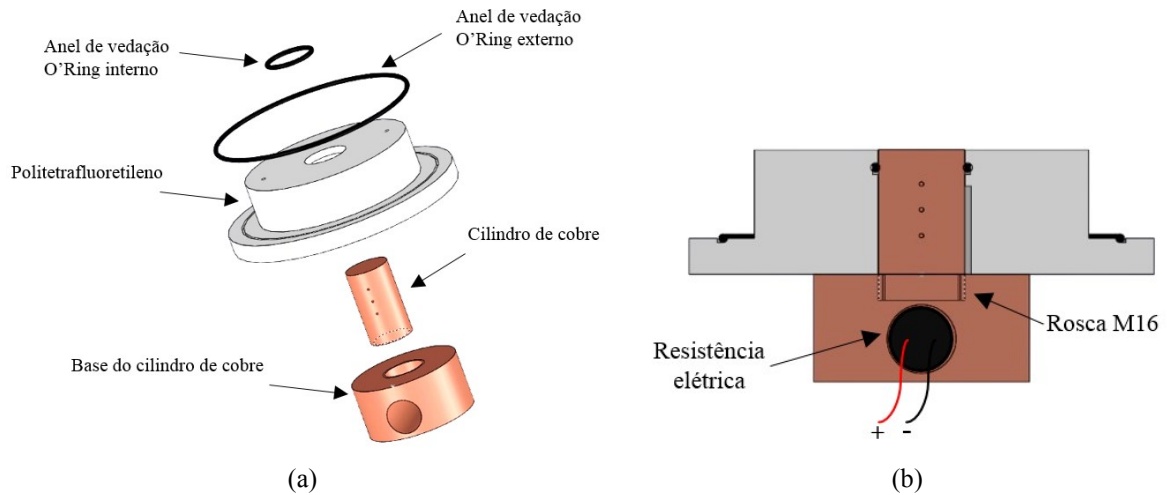
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A cuba de vidro e o tubo de vidro foram fixados entre duas chapas de aço inoxidável AISI 316, com dimensões de 200 mm × 200 mm × 10 mm. Para as vedações da câmara de ebulição e da cuba de vidro foi utilizada borracha nitrílica e silicone. Na região entre a cuba e o tubo de vidro existia um escoamento forçado de água com temperatura controlada por um banho ultra termostático *QUIMIS* modelo *Q214M2*, com o objetivo de manter a temperatura do fluido de trabalho nas condições de saturação ($T_{sat} = 99 \text{ °C}$). Um segundo banho ultra termostático foi utilizado para controlar a temperatura do condensador, tipo serpentina, localizado na parte superior da câmara de ebulição. Um transdutor de pressão *OMEGA PXM 309 - 002A10V* mediu a pressão no interior da câmara de ebulição, a qual foi mantida na pressão atmosférica ($p_{atm} = 98 \text{ kPa}$) durante os ensaios de ebulição. Na parte superior da câmara de ebulição uma válvula foi utilizada para realizar o vácuo e o carregamento do fluido de trabalho.

A seção de teste (Fig. 28), inserida dentro da câmara de ebulição, consistiu de um cilindro de cobre (20 mm de diâmetro e 60 mm de altura) contendo três termopares tipo K (calibração detalhada no Apêndice C), com 0,50 mm de diâmetro, fixados no interior de orifícios com 1 mm de diâmetro localizados ao longo do eixo do cilindro de cobre, a fim de determinar o fluxo de calor e a temperatura superficial. Os orifícios foram preenchidos com pó de cobre para evitar a presença de ar. A parte inferior do cilindro de cobre possuía uma rosca M16 para acoplar a seção de teste à base do bloco de cobre. Na base do bloco de cobre foi alocada uma resistência elétrica tipo cartucho capaz de fornecer um fluxo de calor máximo de 1100 kW/m² através da seção de testes. A resistência elétrica de 206 Ω, a qual não sofreu variação durante

os testes, foi alimentada por uma fonte de potência regulável (0 – 300 V) de até 750 W (*SUPPLIER FCC 75-30i*). O isolamento térmico da seção de testes consistiu em uma peça de politetrafluoretileno com 57,4 mm de espessura e, a parte do bloco de cobre que permaneceu no exterior da câmara de ebulição foi isolada termicamente com vermiculita.

Figura 28 - Seção de testes. (a) vista explodida e (b) vista do corte transversal.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

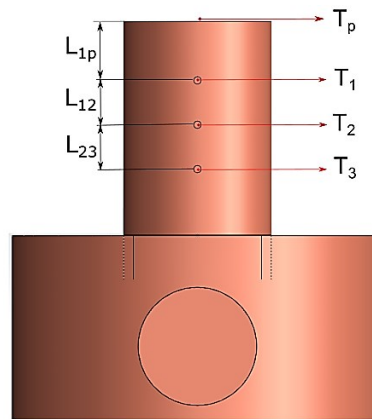
A fim de reduzir a resistência térmica de contato, entre o cilindro de cobre e a base de cobre, foi utilizada pasta térmica à base de prata *AKASA HI-SPEC 450*.

A aquisição dos sinais dos termopares alocados no cilindro de cobre (Fig. 29) foi realizada por um sistema de aquisição de dados *Agilent* modelo *34970A*. Utilizando as medidas obtidas pelos três termopares e a partir da lei de Fourier da condução, considerando condução unidimensional e regime permanente (análise detalhada no Apêndice D), calculou-se o fluxo de calor transferido para o fluido de trabalho como,

$$\bar{q}'' = \frac{k_c}{3} \left(\frac{T_2 - T_1}{L_{12}} + \frac{T_3 - T_2}{L_{23}} + \frac{T_3 - T_1}{L_{13}} \right) \quad (6)$$

na qual, k_c é a condutividade térmica do cobre na temperatura média do cilindro; L_{1p} , L_{12} e L_{23} correspondem às distâncias entre os termopares (8,2 mm; 6,0 mm e 6,0 mm, respectivamente).

Figura 29 - Desenho esquemático da seção de testes com a localização dos termopares.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após a medição do fluxo de calor foi possível calcular a temperatura da superfície aquecida, T_p , usando novamente a Lei de Fourier entre o termopar T_1 e a parede da superfície, admitindo as perdas radiais desprezíveis,

$$T_p = T_1 - \frac{\bar{q}'' L_{1p}}{k_c} \quad (7)$$

Ressalta-se que T_p não é dada diretamente por um termopar a fim de evitar retroação no fenômeno de ebulição, e que a distância L_{1p} é maior que as demais devido ao sistema de vedação da bancada (*o-ring*) ficar posicionado logo acima do termopar T_1 . Assim, a distância foi a mínima possível dentro das limitações técnicas do aparato experimental.

Por fim, o coeficiente de transferência de calor, h , foi calculado a partir da lei de Newton do resfriamento:

$$h = \frac{\bar{q}''}{T_p - T_{sat}(p_{atm})} \quad (8)$$

na qual $T_{sat}(p_{atm})$ corresponde a temperatura de saturação da água à pressão atmosférica local, medida por um barômetro durante a realização de cada teste.

As perdas térmicas foram calculadas por meio da medição do fluxo de calor aplicado e a medição do fluxo de calor médio, Eq. (6), cuja análise detalhada encontra-se no Apêndice E. As perdas térmicas foram da ordem de 12%, corroborando a hipótese feita anteriormente

para o cálculo do fluxo de calor e da temperatura da superfície. Ressalta-se que análise similar foi realizada por Sarafraz, Hormozi e Peyghambarzadeh (2016).

3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente trabalho foi analisado o comportamento da transferência de calor, no regime de ebulição nucleada, para duas diferentes superfícies de cobre utilizando água e nanofluidos de alumina e maguemita como fluidos de trabalho. No total, dez diferentes ensaios foram realizados:

- Superfície lisa c/ água (*smooth surface, SS*);
- Superfície rugosa c/ água (*rough surface, RS*);
- SS c/ nanofluido de Alumina de baixa concentração (*smooth surface w/ alumina nanofluid at low concentration, Al-SS-LC*);
- SS c/ nanofluido de Alumina de alta concentração (*smooth surface w/ alumina nanofluid at high concentration, Al-SS-HC*);
- RS c/ nanofluido de Alumina de baixa concentração (*rough surface w/ alumina nanofluid at low concentration, Al-RS-LC*);
- RS c/ nanofluido de Alumina de alta concentração (*rough surface w/ alumina nanofluid at high concentration, Al-RS-HC*);
- SS c/ nanofluido de Maguemita de baixa concentração (*smooth surface w/ maghemite nanofluid at low concentration, Fe-SS-LC*);
- SS c/ nanofluido de Maguemita de alta concentração (*smooth surface w/ maghemite nanofluid at high concentration, Fe-SS-HC*);
- RS c/ nanofluido de Maguemita de baixa concentração (*rough surface w/ maghemite nanofluid at low concentration, Fe-RS-LC*);
- RS c/ nanofluido de Maguemita de alta concentração (*rough surface w/ maghemite nanofluid at high concentration, Fe-RS-HC*);

Os experimentos foram feitos usando água deionizada como fluido de trabalho ou fluido base, no caso dos nanofluidos, em condições saturadas a pressão atmosférica ($p_{atm} = 98$ kPa). O mesmo procedimento foi adotado durante todos os testes experimentais a fim de garantir a repetitibilidade dos resultados.

As condições saturadas 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, $\pm 0,4$ °C.

Vácuo foi realizado na câmara de ebulição, antes de cada ensaio, a qual foi então carregada com 200 ml do fluido de trabalho (o mesmo volume de fluido de trabalho foi utilizado em todos os testes), sendo a pressão na câmara equalizada com a pressão atmosférica após o carregamento.

Uma vez estabilizadas as condições de teste e o processo de ebulição iniciado, o fluxo de calor imposto foi crescente em um intervalo de 100 a 800 kW/m². Para garantir a estabilização do regime, cada patamar de fluxo de calor aplicado teve duração de 1500 s, mas somente os dados de temperatura para os últimos 500 s (correspondendo a 100 pontos experimentais) do intervalo de teste foram considerados na análise. A condição de estabilização do regime foi caracterizada por variações na temperatura dentro da faixa de incerteza de sua medição.

3.5 INCERTEZA EXPERIMENTAL

A calibração dos termopares está detalhada no Apêndice C, sendo a incerteza de medição encontrada de $\pm 0,4$ °C. A incerteza da distância entre os termopares foi dada pela resolução do paquímetro utilizado (0,01 mm).

A incerteza de medição combinada foi baseada no guia para expressão da incerteza de medição GUM (BUREAU; 2008):

$$\frac{u(\bar{q}'')}{\bar{q}''} = \sqrt{\left(\frac{u(\Delta T_{12})}{3\Delta T_{12}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta T_{23})}{3\Delta T_{23}}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta T_{13})}{3\Delta T_{13}}\right)^2 + \left(\frac{u(L_{12})}{3L_{12}}\right)^2 + \left(\frac{u(L_{23})}{3L_{23}}\right)^2 + \left(\frac{u(L_{13})}{3L_{13}}\right)^2} \quad (9)$$

$$\frac{u(T_p - T_{sat})}{T_p - T_{sat}} = \sqrt{\left(\frac{u(T_1 - T_{sat})}{T_1 - T_{sat}}\right)^2 + \left(\frac{u(\bar{q}'')}{\bar{q}''}\right)^2 + \left(\frac{u(L_{1p})}{L_{1p}}\right)^2} \quad (10)$$

$$\frac{u(h)}{h} = \sqrt{\left(\frac{u(T_p - T_{sat})}{T_p - T_{sat}}\right)^2 + \left(\frac{u(\bar{q}'')}{\bar{q}''}\right)^2} \quad (11)$$

A incerteza experimental para o fluxo de calor e para o coeficiente de transferência de calor tende a diminuir com o aumento do fluxo de calor. A Tabela 2 apresenta as faixas de incertezas encontradas.

Tabela 2 - Incertezas experimentais do fluxo de calor e do coeficiente de transferência de calor dos ensaios realizados.

Ensaio	Incerteza ($\pm\%$)			
	Fluxo de calor		Coeficiente de transferência de calor	
SS	12,3	$> u(q) >$	1,5	13,1 $> u(h) >$ 2,6
RS	13,0	$> u(q) >$	1,5	14,8 $> u(h) >$ 3,5
Al-SS-LC	14,5	$> u(q) >$	1,7	17,2 $> u(h) >$ 3,0
Al-SS-HC	13,8	$> u(q) >$	1,7	14,8 $> u(h) >$ 2,6
Fe-SS-LC	13,9	$> u(q) >$	1,6	17,5 $> u(h) >$ 3,1
Fe-SS-HC	13,8	$> u(q) >$	1,6	14,4 $> u(h) >$ 2,4
Al-RS-LC	13,3	$> u(q) >$	1,6	16,4 $> u(h) >$ 2,8
Al-RS-HC	14,3	$> u(q) >$	1,6	16,1 $> u(h) >$ 2,5
Fe-RS-LC	13,8	$> u(q) >$	1,6	16,3 $> u(h) >$ 2,8
Fe-RS-HC	15,0	$> u(q) >$	1,7	17,1 $> u(h) >$ 2,6

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.6 VALIDAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

A fim de validar o aparato experimental e o procedimento experimental, testes em regime de ebulição nucleada foram realizados para água deionizada sobre as superfícies rugosa (RS) e lisa (SS). Os dados experimentais, correspondendo ao ajuste das curvas e valores preditos pela correlação de Rohsenow (1952) estão representados graficamente na Fig. 30a (SS) e 30b (RS). Os ajustes da curva foram baseados na relação entre o coeficiente de transferência de calor (h , em kW/m².K) e o fluxo de calor (q'' , em kW/m²) expresso por,

$$h = C q''^n \quad (12)$$

no qual C é um coeficiente que depende do par fluido-superfície e n é o expoente do fluxo de calor. A correlação de Rohsenow (1952) é dada por:

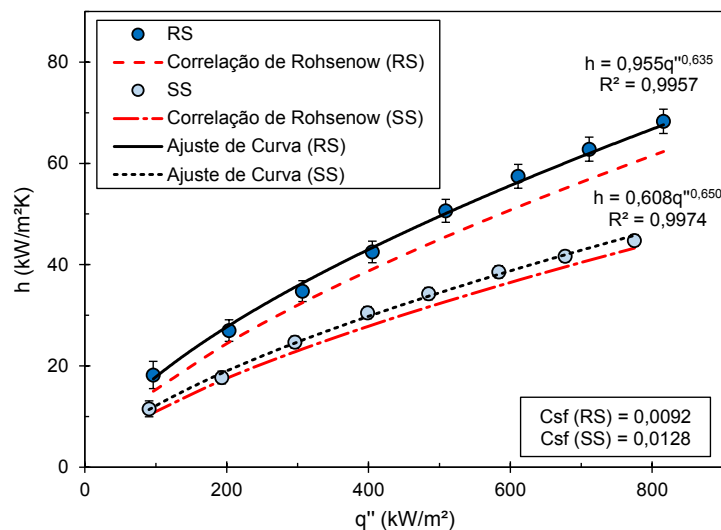
$$h = \frac{1}{C_{sf}} Pr_l^{-s} \frac{q'' c_{pl}}{h_{lv}} \left(\frac{\mu_l h_{lv}}{q''} \right)^r \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{-\frac{1}{2}r} \quad (13)$$

na qual $s = 1$ e $r = 1/3$ para água como fluido de trabalho, μ_l , h_{lv} , c_{pl} , e Pr_l representam, respectivamente, a viscosidade do líquido (kg/m.s), o calor latente de vaporização (J/kg), o calor específico do líquido (J/kg.K) e o número de Prandtl do líquido, obtidos na pressão atmosférica local (98 kPa) (os valores são apresentadas no Apêndice B). C_{sf} é um coeficiente que depende do material, do acabamento da superfície de aquecimento e do fluido de trabalho. Baseado no estudo de Vachon, Nix e Tanger (1968) foram adotados $C_{sf} = 0,0128$ para SS e, $C_{sf} = 0,0092$ para RS. Ao fim, h da correlação é dado em W/m².K para valores de fluxo de calor, q'' , em W/m². Como mostrado na Fig. 30, os dados experimentais concordam com os preditos pela correlação Rohsenow (1952), sendo o erro absoluto médio,

$$\text{erro} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{h_{i,exp} - h_{i,correlação}}{h_{i,correlação}} \right|}{N} \quad (14)$$

de aproximadamente 7% e 11%, respectivamente para a superfícies lisa e rugosa. Nos ajustes da curva observa-se que os valores de n são da ordem de 0,65. Tal resultado concorda com os obtidos por Stephan (1992), o qual reportou que no regime de ebulição nucleada, o valor de n situa-se geralmente entre 0,6 e 0,8.

Figura 30 - Validação do aparato experimental usando ajuste de curva exponencial e a correlação de Rohsenow (1952). (a) superfície lisa e (b) superfície rugosa.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

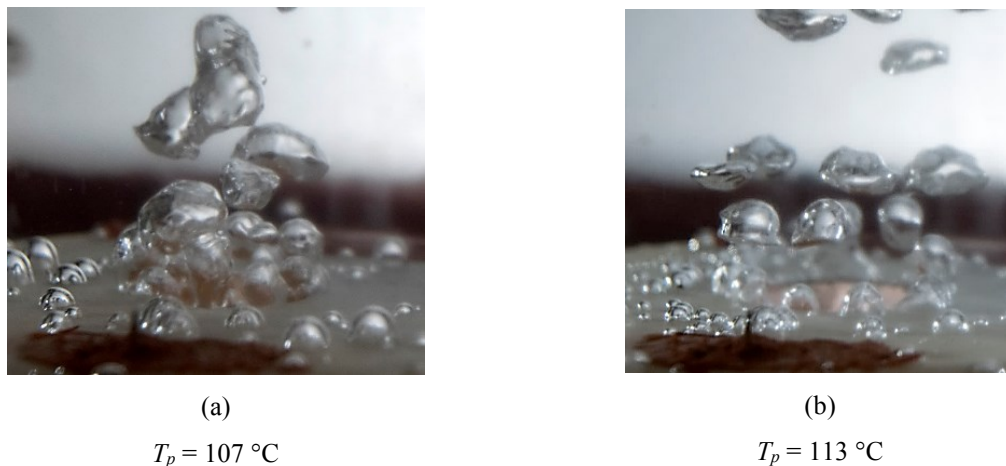
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de validação apresentadas na seção anterior mostram que a rugosidade superficial desempenha um papel significativo sobre o HTC. A superfície rugosa mostra um superaquecimento menor comparada com a superfície lisa e a explicação para tal comportamento pode ser a presença de cavidades de maior diâmetro na superfície aquecida. Pela análise feita por Griffith e Wallis (1960), com o superaquecimento dado por:

$$(T_p - T_{sat}) = \frac{2\sigma T_{sat}}{R_c \rho_v h_{lv}} \quad (15)$$

sabe-se que cavidades de maior diâmetro requerem um superaquecimento menor para serem ativadas quando comparadas às de menor diâmetro. Assim, o número de sítios de nucleação ativos aumenta com o aumento da rugosidade, levando a uma redução da temperatura da superfície e, conseqüentemente, a um aumento no HTC. Além dos dados de temperatura, imagens foram capturadas durante o processo de ebulição e mostram uma maior quantidade de bolhas de vapor sobre a superfície rugosa quando comparada a superfície lisa (Fig. 31).

Figura 31 – Efeito da rugosidade superficial para $q'' = 200 \text{ kW/m}^2$ e para superfícies sem deposição. (a) superfície rugosa (RS) e (b) superfície lisa (SS).

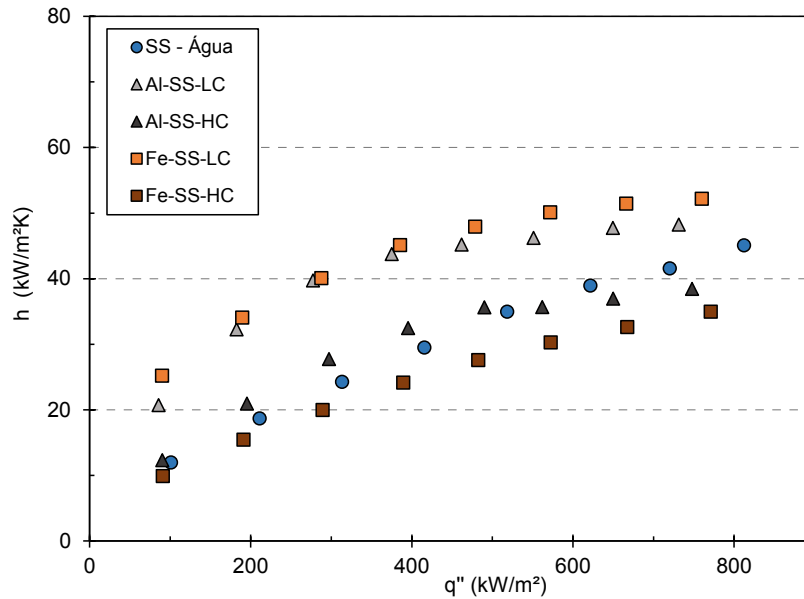


Fonte: Elaboração do próprio autor.

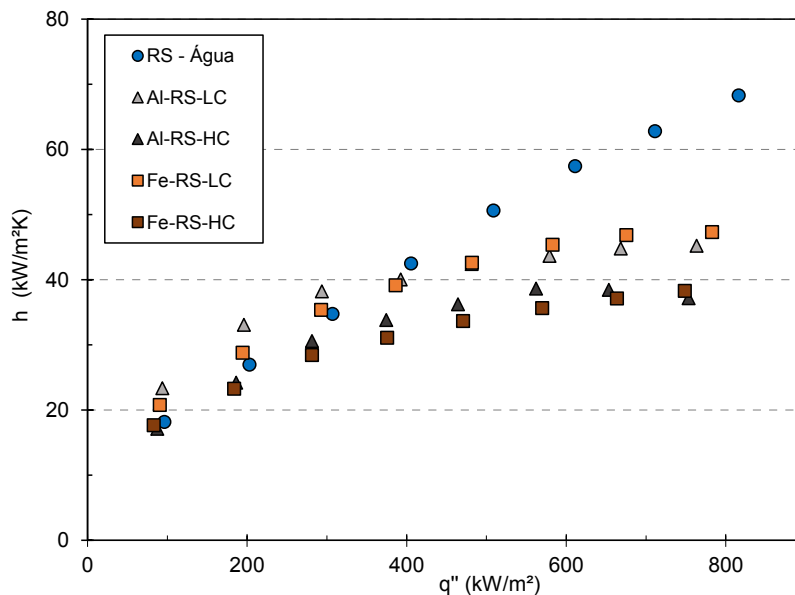
Após o levantamento das curvas de ebulição para a água, foram realizados os ensaios de ebulição em piscina com nanofluidos (Fig. 32). Os resultados mostram que a melhora ou

deterioração do HTC é fortemente afetada pela relação entre o tamanho das nanopartículas e a morfologia da superfície de aquecimento antes da ebulição.

Figura 32 – Curvas de coeficiente de transferência de calor durante a ebulição da água e dos nanofluidos de Al_2O_3 -Água e Fe_2O_3 -Água, para diferentes concentrações. (a) superfície lisa, SS. (b) superfície rugosa, RS.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a superfície lisa e para ambos os nanofluidos de baixa concentração ensaiados, ocorre um aumento no HTC para todos os fluxos de calor aplicados (aumento médio de 52%

para alumina e 62% para maguemita quando comparado ao HTC da água). Porém, para altas concentrações, o nanofluido de alumina possui um leve aumento no HTC, de 15% até 400 kW/m², seguido de sua diminuição para fluxos de calor maiores; e, o nanofluido de maguemita apresenta um HTC menor ao da água para todos os fluxos de calor aplicados.

Para a superfície rugosa e para ambos os nanofluidos de baixa concentração ensaiados, ocorre um leve aumento no HTC até 300 kW/m² (aumento médio de 21% para alumina e 9% para maguemita quando comparado ao HTC da água), seguido da diminuição para fluxos de calor maiores. Para ambos os nanofluidos de alta concentração, a deterioração no HTC é notável desde os primeiros fluxos de calor aplicados.

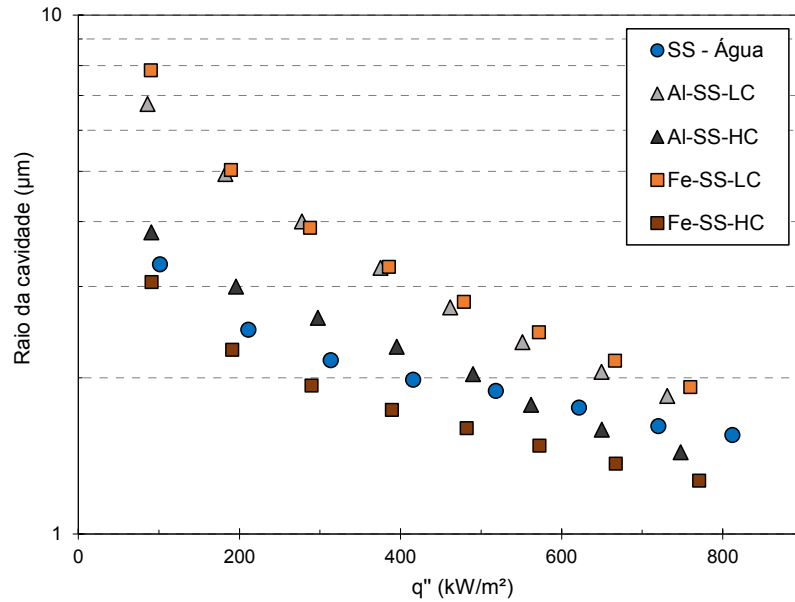
Todas as curvas de HTC utilizando nanofluidos apresentam uma mudança na inclinação a partir do fluxo de 400 kW/m². Esse efeito deve-se a deposição das nanopartículas sobre a superfície de aquecimento, a qual aumenta com o aumento do fluxo de calor.

Como mencionado, a deposição das nanopartículas desempenham um papel chave na ebulição. Assim, o aumento do HTC encontrado, principalmente para as superfícies lisas, pode ser devido ao aumento no tamanho das cavidades, ou seja, as nanopartículas depositadas sobre a superfície são capazes de criar cavidades maiores. Utilizando a Eq. (15) é possível obter o tamanho mínimo do raio da cavidade ativa para cada superfície e nanofluido em ebulição e compará-lo com o valor para a mesma superfície limpa em ebulição com água (Fig. 33). A Figura 33a mostra que o tamanho dos raios das cavidades ativas para a superfície lisa em ebulição com o nanofluido de alumina de baixa concentração é maior quando comparado com a água pura, para o mesmo fluxo de calor aplicado. O mesmo efeito ocorre para o nanofluido de maguemita de baixa concentração. As superfícies foram preparadas seguindo a mesma metodologia e, sabendo que a deposição ocorre desde os primeiros fluxos, pode-se inferir que as nanopartículas depositadas modificam a morfologia da superfície de aquecimento, formando cavidades maiores que necessitam de menor energia para a sua ativação, o que leva a um aumento do HTC.

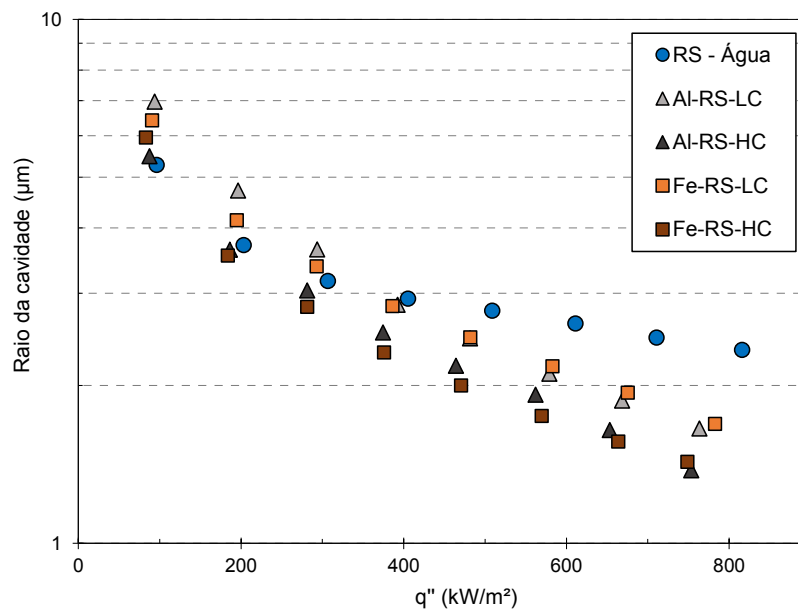
O mesmo mecanismo responsável por aumentar o HTC em superfícies lisas, também ocorre para os primeiros fluxos de calor nas superfícies rugosas (Fig. 33b). Porém, conforme aumenta-se o fluxo de calor as nanopartículas preenchem as grandes cavidades, entupindo-as e impossibilitando a formação de bolhas de vapor.

O efeito descrito acima torna-se nulo na ebulição de nanofluidos de alta concentração, pois nestes casos a taxa de deposição é maior, criando uma camada espessa sobre a superfície, o que aumenta a resistência térmica e diminui drasticamente a transferência de calor.

Figura 33 – Raios de cavidades mínimos para cada superaquecimento da superfície. (a) Superfície lisa ebulida com água, Al_2O_3 -Água e Fe_2O_3 -Água. (b) Superfície rugosa ebulida com água, Al_2O_3 -Água e Fe_2O_3 -Água.



(a)

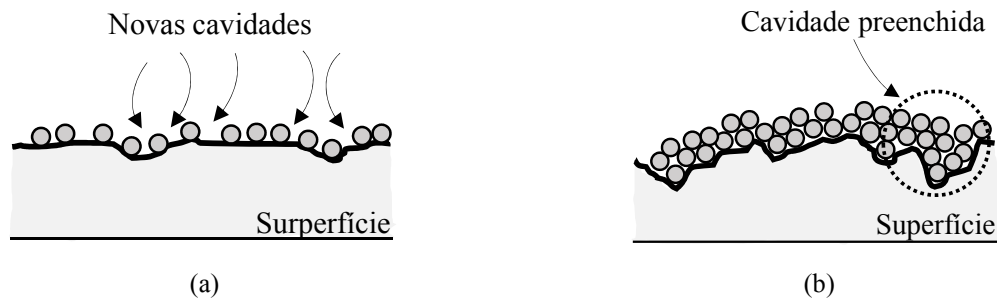


(b)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os dados obtidos estão de acordo com a revisão bibliográfica apresentada, na qual a superfície lisa ($\text{SIP} > 1$) e a superfície rugosa ($\text{SIP} \gg 1$) apresentam, respectivamente, melhora e diminuição no HTC (Fig. 34).

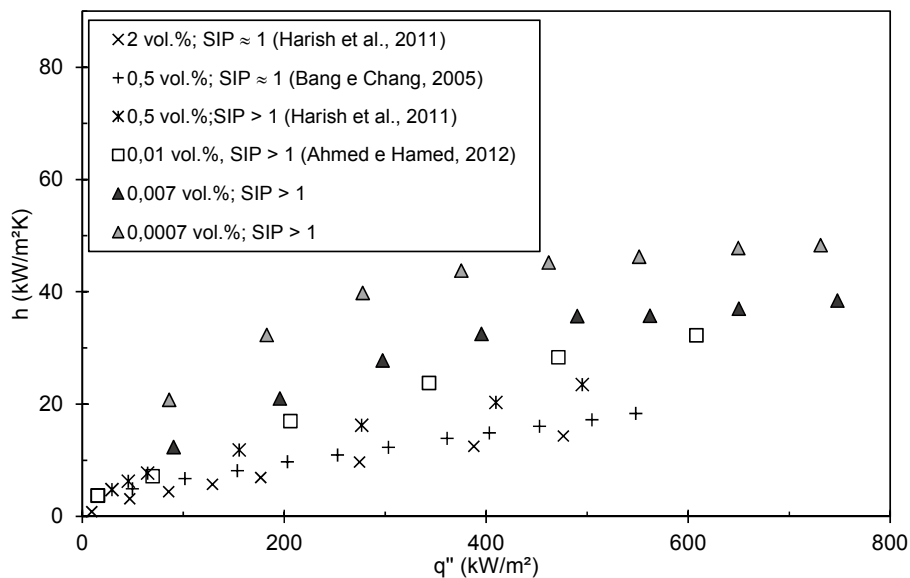
Figura 34 – Efeito da deposição das nanopartículas. (a) sobre a superfície lisa, $SIP > 1$. (b) sobre a superfície rugosa, $SIP \gg 1$.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Além do SIP, a concentração volumétrica do nanofluido também desempenha um papel importante sobre a ebulição. A Figura 35 apresenta a comparação dos dados para o nanofluido de alumina obtidos neste trabalho com demais dados da literatura. Como se observa, SIP maiores do que 1 realmente apresentam melhor desempenho e, também, baixas concentrações de nanofluido são mais efetivas para aumentar o HTC.

Figura 35 - Curva de comparação do HTC para ebulição com nanofluido de Al_2O_3 -Água obtidos neste trabalho com valores da literatura, para várias concentrações e valores de SIP.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A discussão acima é corroborada com as imagens das superfícies de aquecimento capturadas antes e depois dos testes de ebulição, seguido da sua caracterização por meio de SEM e EDS (Tabela 3), rugosidade (Fig. 36) e ângulo de contato estático (Fig. 37).

Tabela 3 – Análise metalografica da superfície de aquecimento antes e depois dos ensaios de ebulição com nanofluidos (continuação).

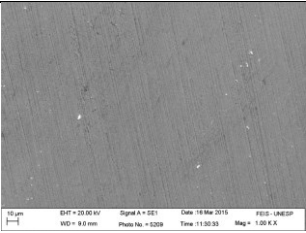
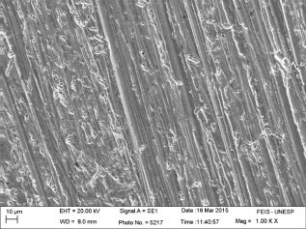
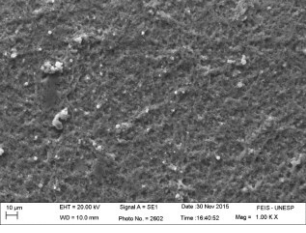
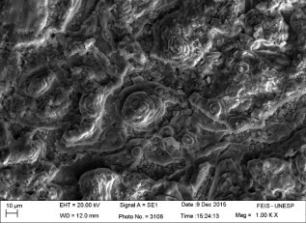
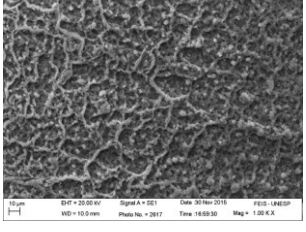
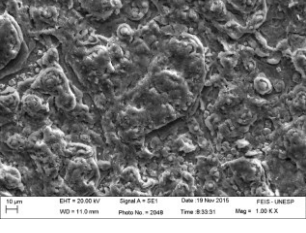
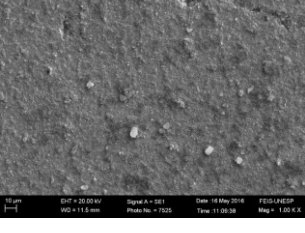
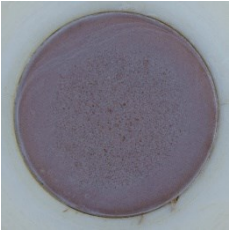
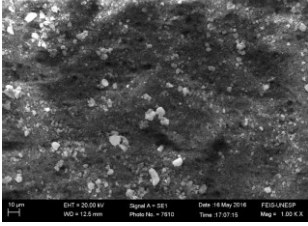

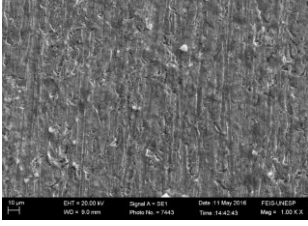
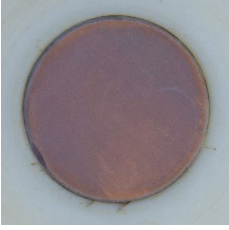
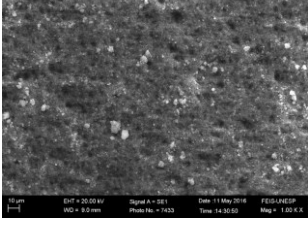
Superfícies	SEM	EDS										
SS		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>2,94</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>1,77</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>0,69</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>94,60</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Peso%	C	2,94	O	1,77	Al	0,69	Cu	94,60
Elemento	Peso%											
C	2,94											
O	1,77											
Al	0,69											
Cu	94,60											
RS		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>4,43</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>1,67</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>0,52</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>93,37</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Peso%	C	4,43	O	1,67	Al	0,52	Cu	93,37
Elemento	Peso%											
C	4,43											
O	1,67											
Al	0,52											
Cu	93,37											
Fe-SS-LC		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O</td> <td>32,85</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>53,32</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>13,83</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Peso%	O	32,85	Fe	53,32	Cu	13,83		
Elemento	Peso%											
O	32,85											
Fe	53,32											
Cu	13,83											
Fe-SS-HC		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>4,40</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>31,99</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>55,23</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>8,38</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Peso%	C	4,40	O	31,99	Fe	55,23	Cu	8,38
Elemento	Peso%											
C	4,40											
O	31,99											
Fe	55,23											
Cu	8,38											
Fe-RS-LC		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O</td> <td>32,33</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>45,22</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>22,45</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Peso%	O	32,33	Fe	45,22	Cu	22,45		
Elemento	Peso%											
O	32,33											
Fe	45,22											
Cu	22,45											
Fe-RS-HC		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>4,00</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>32,09</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>52,19</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>11,72</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Peso%	C	4,00	O	32,09	Fe	52,19	Cu	11,72
Elemento	Peso%											
C	4,00											
O	32,09											
Fe	52,19											
Cu	11,72											
Al-SS-LC		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O</td> <td>26,14</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>10,78</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>63,08</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Peso%	O	26,14	Al	10,78	Cu	63,08		
Elemento	Peso%											
O	26,14											
Al	10,78											
Cu	63,08											

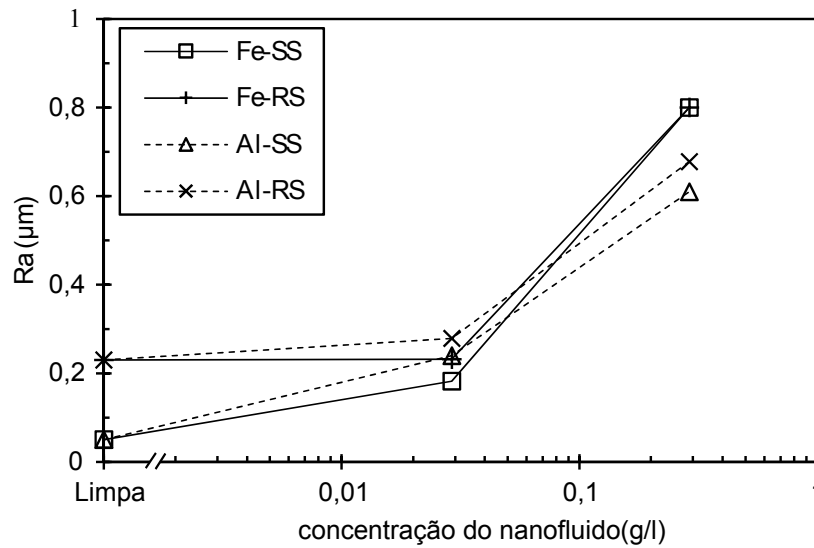
Tabela 3 – Análise metalográfica da superfície de aquecimento antes e depois dos ensaios de ebulição com nanofluidos (conclusão).

Al-SS-HC			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O</td> <td>61,27</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>37,29</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>1,44</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Peso%	O	61,27	Al	37,29	Cu	1,44
Elemento	Peso%										
O	61,27										
Al	37,29										
Cu	1,44										
Al-RS-LC			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O</td> <td>19,94</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>9,01</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>71,05</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Peso%	O	19,94	Al	9,01	Cu	71,05
Elemento	Peso%										
O	19,94										
Al	9,01										
Cu	71,05										
Al-RS-HC			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Peso%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O</td> <td>60,80</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>37,62</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>1,58</td> </tr> </tbody> </table>	Elemento	Peso%	O	60,80	Al	37,62	Cu	1,58
Elemento	Peso%										
O	60,80										
Al	37,62										
Cu	1,58										

Fonte: Elaboração do próprio autor.

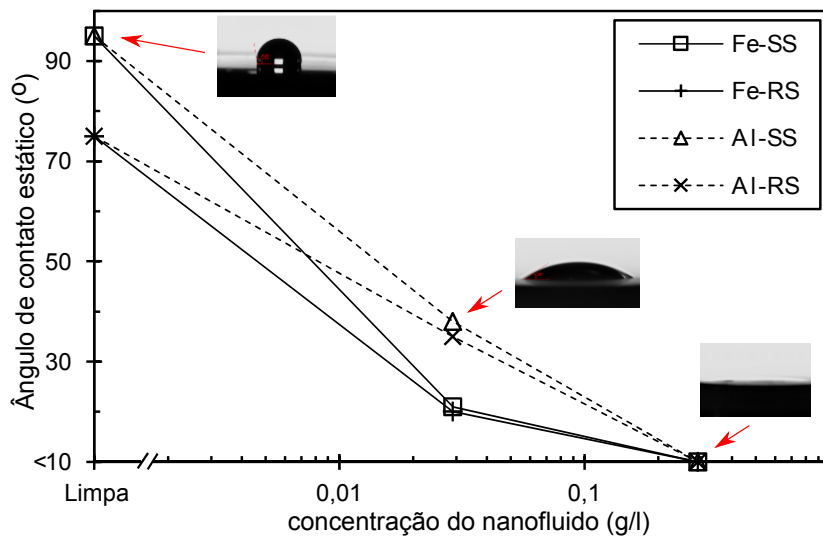
A partir da análise do SEM e EDS nota-se que a quantidade de óxido de alumínio (alumina) e óxido de ferro (magnetita) foi encontrada em maior quantidade sobre a superfície para ebulição com nanofluidos de alta concentração volumétrica. A deposição das nanopartículas cria uma camada porosa, aumentando a rugosidade superficial e diminuindo o ângulo de contato estático (aumentando a molhabilidade), como mostrado nas Figs. 36 e 37.

Figura 36 – Rugosidade média superficial antes (limpa) e depois da ebulição com nanofluidos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 37 – Ângulo de contato estático antes (limpa) e depois da ebulição com nanofluidos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Neste trabalho não foram realizados ensaios até o fluxo de calor crítico (CHF). No entanto, os dados obtidos para o ângulo de contato seguem o relatado por demais autores (Tabela A.3), permitindo especular que essas superfícies são capazes de atingir um CHF maior do que quando submetidas à ebulição de água pura, pois a camada porosa de nanopartículas possibilita uma absorção rápida do fluido para as regiões mais quentes da superfície, facilitando o remolhamento desta e postergando a ocorrência de *dry out* (CILOGLU; BOLUKBASI, 2015; SARAFRAZ; HORMOZI; PEYGHAMBARZADEH, 2016).

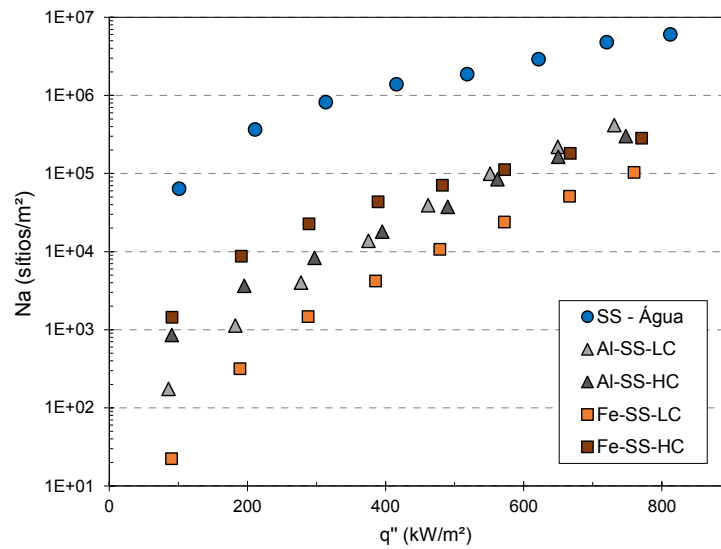
4.1 ANÁLISE DA QUANTIDADE DE SÍTIOS DE NUCLEAÇÃO

Como mostrado anteriormente, a mudança na morfologia da superfície modifica o comportamento do coeficiente de transferência de calor. Estas modificações no HTC são devidas ao aumento do raio da cavidade, como apresentado na Figura 33, e também ao aumento da densidade de sítios de nucleação. Então, buscando prever a densidade de sítios de nucleação ativos (Na) para os ensaios realizados neste trabalho, foi analisada a correlação de Wang e Dhir (1993),

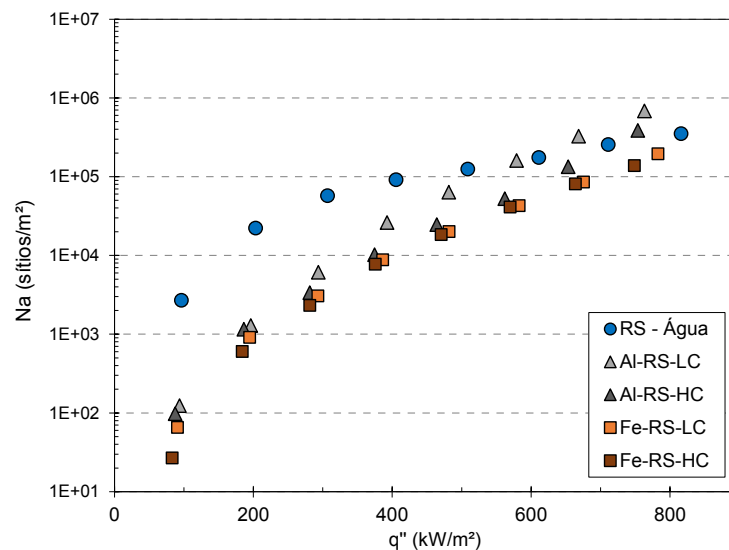
$$Na = 7,81 \times 10^{-29} (1 - \cos \theta) R_c^{-6,0} \quad (16)$$

A Figura 38 apresenta a densidade de sítios de nucleação em função do fluxo de calor aplicado, para as diferentes combinações superfície/fluido usadas neste trabalho. Observa-se que a densidade de sítios preditos pela correlação de Wang e Dhir (1993) possui uma tendência diferente à apresentada pelas curvas de HTC na Figura 32, ou seja, os ensaios realizados apenas com água deionizada apresentaram maior densidade de sítios de nucleação ativos mesmo para baixos valores de fluxo de calor, onde os nanofluidos obtiveram melhor desempenho na transferência de calor. Este comportamento se deve ao fato de que os valores estimados pela Equação (16) são fortemente dependentes do inverso do raio da cavidade, Equação (15), que por sua vez é função do superaquecimento da superfície. Desta maneira, superfícies com superaquecimento elevado tendem a possuir maiores Na ; no entanto, também tendem a terem menores coeficiente de transferência de calor.

Figura 38 – Densidade de sítios de nucleação ativos dada pela correlação de Wang e Dhir (1993) em função do fluxo de calor aplicado. (a) superfície lisa. (b) superfície rugosa.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Outras correlações, tais como a de Benjamin e Balakrishnan (1997), Basu, Warriar e Dhir (2002) e Li, Liu e Wang (2013) também são fortemente afetadas pelo superaquecimento da superfície (Tabela 4) e, possuem comportamento similares a de Wang e Dhir (1993).

Tabela 4 - Correlações para a densidade de sítios de nucleação ativos

	$Na = 218,8Pr^{1,63} \left(\frac{l}{\gamma}\right) R_{nd}^{-0,4} (T_p - T_{sat})^3$	(17)
Benjamin e Balakrishnan (1997)	$\gamma = \left(\frac{k_p \rho_p c_{p,p}}{k_l \rho_l c_{p,l}}\right)$	(18)
	$R_{nd} = 14,5 - 4,5 \left(\frac{RaD}{\sigma}\right) + \left(\frac{RaD}{\sigma}\right)^{0,4}$	(19)
Basu, Warriar e Dhir (2002)	$Na = 0,34(1 - \cos \theta)(T_p - T_{sat})^{2,0}, \text{ ONB} < (T_p - T_{sat}) < 15 \text{ K}$	(20)
	$Na = 3,4 \times 10^{-5}(1 - \cos \theta)(T_p - T_{sat})^{5,3}, 15 \text{ K} \leq (T_p - T_{sat})$	(21)
Li, Liu e Wang (2013)	$Na = \text{MAX}(612,5(1 - \cos \theta), 19,7)Pr^{1,63} \left(\frac{l}{\gamma}\right) R_{nd}^{-0,4} (T_p - T_{sat})^3$, $0^\circ < \theta < 90^\circ$	(22)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em contraste a estas, a correlação de Kolev (2006),

$$Na = \frac{4,29}{(2\beta)^2} \left(\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h}{k_l Ja^{\frac{1}{2}}}\right)^4 \quad (23)$$

na qual,

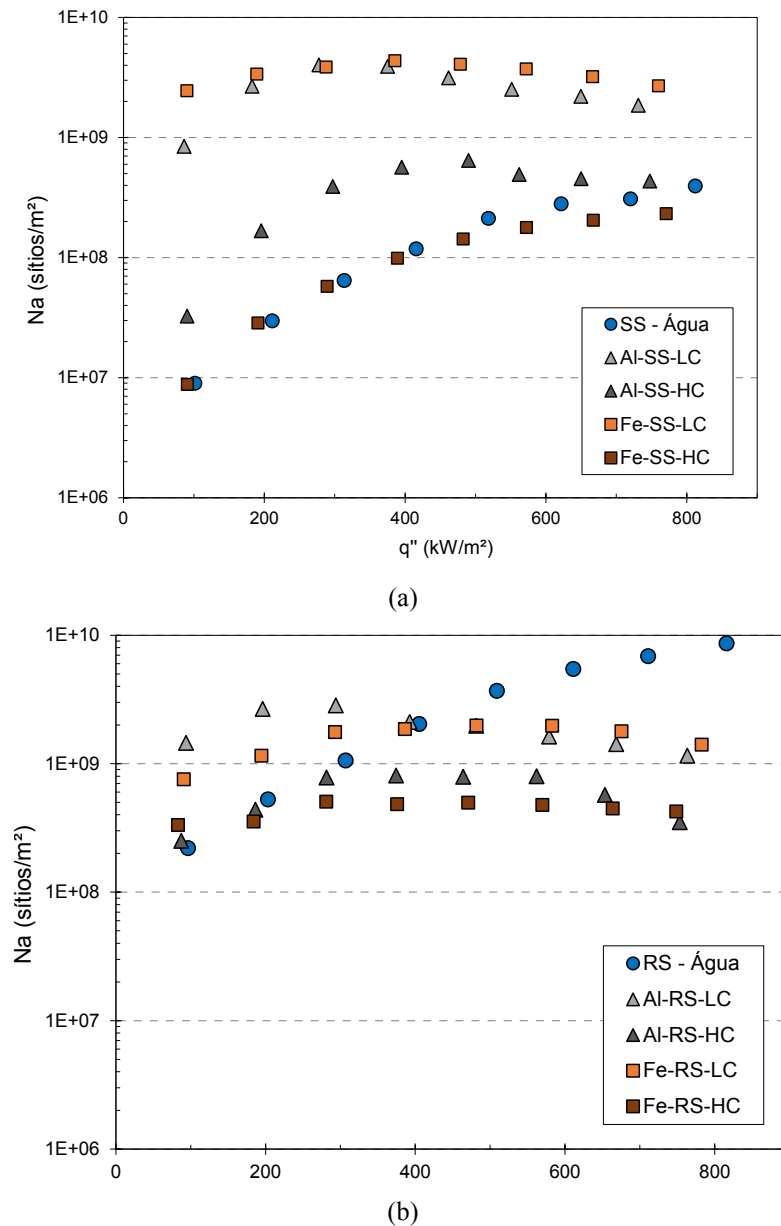
$$\beta = \frac{25,3 \cos(\theta/2)}{[(1 + \cos \theta)^2 (2 - \cos \theta)]} \quad (24)$$

e,

$$Ja = \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right) \left[\frac{c_{p,l}(T_p - T_{sat})}{h_{lv}}\right] \quad (25)$$

é fortemente dependente do coeficiente de transferência de calor (h). Desta maneira, a predição da densidade de sítios de nucleação (Figura 39) responde de maneira similar às curvas de HTC da Figura 32.

Figura 39 - Densidade de sítios de nucleação dada pela correlação de Kolev (2006) em função do fluxo de calor aplicado. (a) superfície lisa. (b) superfície rugosa.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

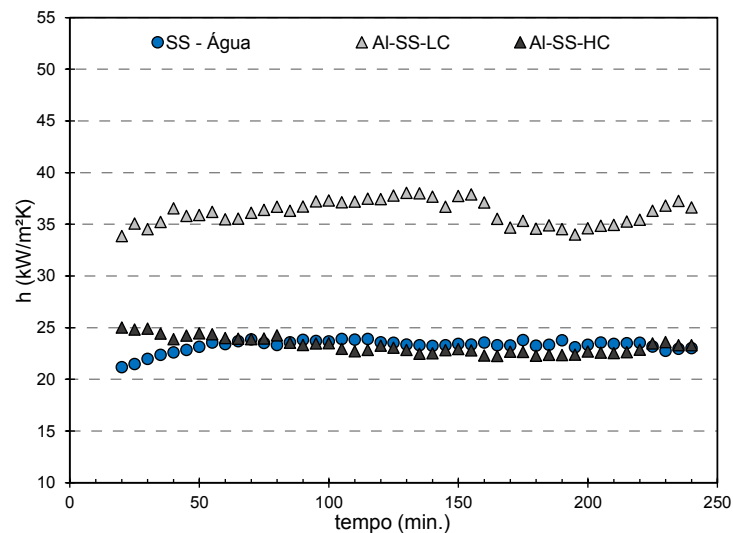
A partir da predição feita pela correlação de Kolev (2006), observa-se que para a maioria dos ensaios com nanofluidos existe um ponto de máximo nas curvas, seguido do decréscimo do Na . Novamente, este efeito pode ser atribuído ao fato de que a deposição de nanopartículas na superfície ocorre a uma taxa mais elevada para médios e altos fluxos de calor, ou seja, valores acima de 400 kW/m^2 .

4.2 EFEITO DO TEMPO DE EBULIÇÃO

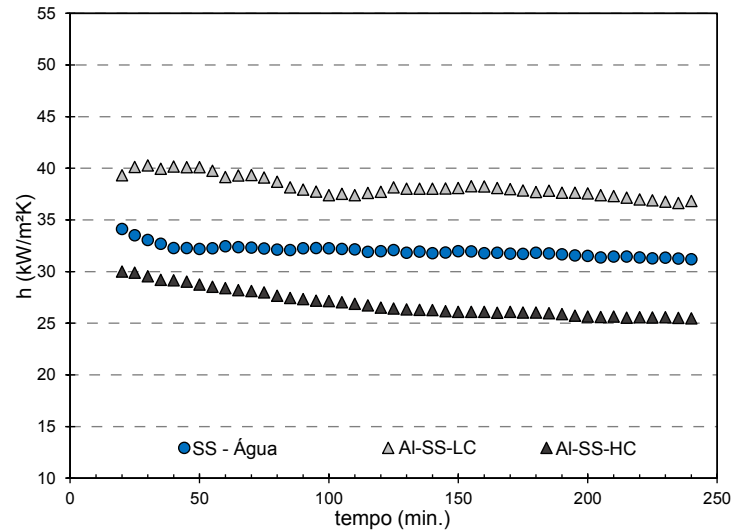
A fim de compreender o efeito da deposição das nanopartículas dispersas no fluido base sobre a alteração morfológica da superfície de aquecimento durante a ebulição, foram realizados ensaios de longa duração, por um período de 4 horas (240 minutos), fixando o valor do fluxo de calor aplicado em: 120 kW/m², 500 kW/m² e 800 kW/m². Para esses ensaios foram utilizados água deionizada e os nanofluidos de alumina em baixa e alta concentração (0,029 g/l e 0,29 g/l, respectivamente), para ambas as superfícies lisa e rugosa (SS e RS).

A superfície lisa foi a primeira a ser testada com os fluidos de trabalho e na Figura 40 são apresentados os resultados obtidos. Em seguida, na Figura 41 são apresentados os resultados obtidos durante a ebulição dos mesmos fluidos sobre a superfície rugosa.

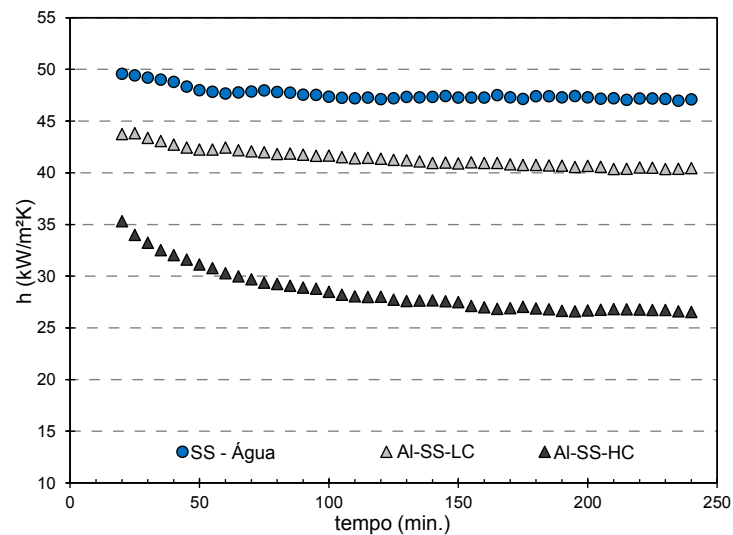
Figura 40 – Comportamento do HTC ao longo do tempo de ebulição para diferentes fluxos de calor e concentração de nanofluido para a superfície lisa. (a) 120 kW/m². (b) 500 kW/m². (c) 800 kW/m².



(a)



(b)



(c)

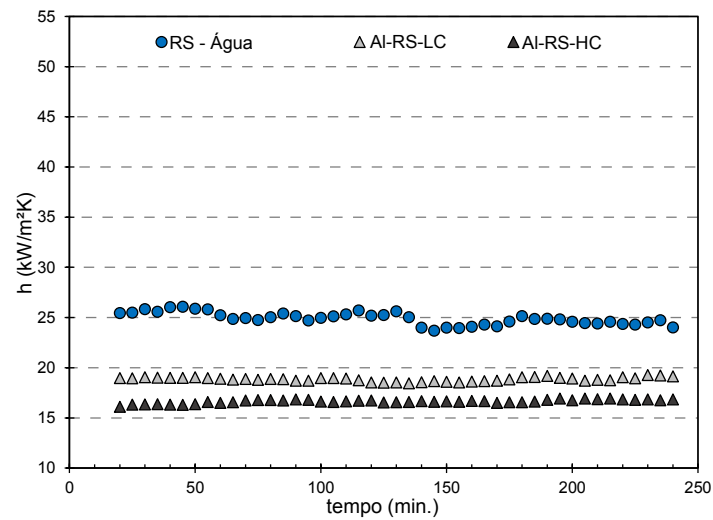
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para baixos valores de fluxos de calor (120 kW/m^2) e para ambos os testes com água deionizada e nanofluido de alumina, o HTC é quase constante; em outras palavras, o tempo de ebulição não possui influência sobre o HTC para baixos fluxos de calor. Para médios e elevados valores de fluxos de calor (500 kW/m^2 e 800 kW/m^2 , respectivamente), o HTC diminui com o aumento do tempo de ebulição do nanofluido de alumina, sendo que este decréscimo é significativo para altas concentrações de nanofluido (Al-SS-HC).

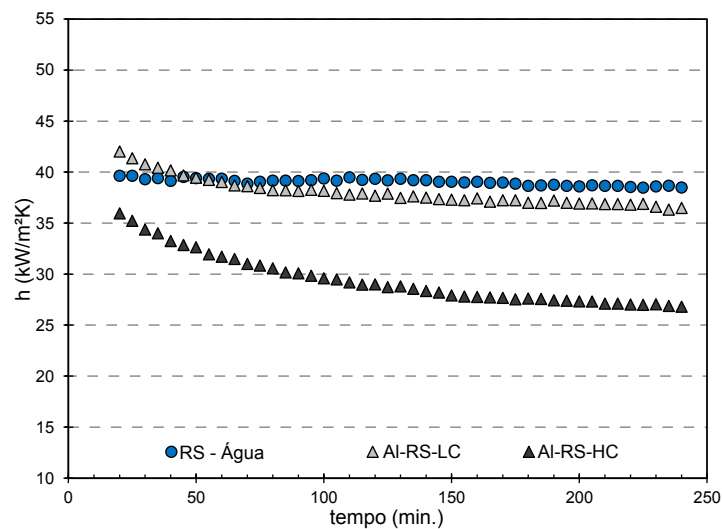
Da Figura 40b e 40c, observa-se que o decréscimo do HTC ocorre de maneira acentuada nos primeiros 100 minutos visto que a deposição das nanopartículas ocorreu a uma taxa mais elevada à medida que o fluxo de calor e a concentração do nanofluido aumentam. Isto é consequência do aumento da frequência de partida das bolhas de vapor (devido ao au-

mento do fluxo de calor aplicado), levando a um incremento na evaporação da microcamada (camada de líquido superaquecido de reduzida espessura existente entre a base da bolha de vapor e a superfície aquecida) e, conseqüentemente, na deposição das nanopartículas sobre a superfície de aquecimento como explicado por Kwark et al. (2010) (Fig. 10). Considerando que, nanofluidos em alta concentração possuem maior quantidade de nanopartículas dispersas no fluido base, a deposição destas será mais proeminente ao longo do tempo, aumentando a resistência térmica da superfície e diminuindo o HTC.

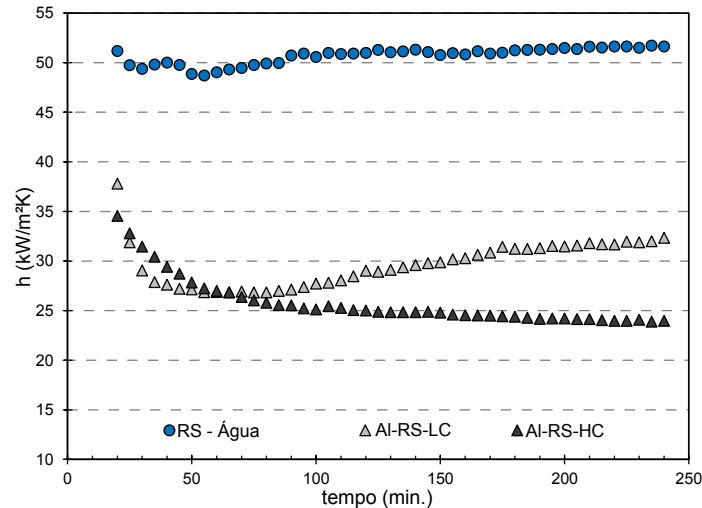
Figura 41 - Comportamento do HTC ao longo do tempo de ebulição para diferentes fluxos de calor e concentração de nanofluido para a superfície rugosa. (a) 120 kW/m². (b) 500 kW/m². (c) 800 kW/m².



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 41 mostra as curvas do HTC em função do tempo de ebulição, para ambos água deionizada e diferentes concentrações volumétricas de nanofluido de alumina. Para baixos valores de fluxo de calor aplicado, o comportamento é similar àquele para a superfície lisa. Entretanto, em contraste com a superfície lisa, na qual Al-SS-LC apresenta o maior valor de HTC quando comparado a água e a Al-SS-HC para 120 kW/m² e 500 kW/m², o HTC para a superfície rugosa diminui com o uso de nanofluido, independente da concentração.

Portanto, o uso de nanofluido de alumina em baixas concentrações é capaz de aumentar o HTC para superfícies com baixos valores de rugosidade (superfícies lisas), visto que a deposição das nanopartículas ocorre a uma menor taxa, alterando a morfologia da superfície de aquecimento sem uma resistência térmica significativa sobre a mesma. Contudo, este aumento só ocorre para baixos e moderados valores de fluxos de calor.

Independente da rugosidade superficial, a ebulição de nanofluidos em altas concentrações reduziu a transferência de calor devido, principalmente, à resistência térmica sobre a superfície de aquecimento ser o efeito dominante.

Ressalta-se a necessidade da repetição dos ensaios de longa duração, para confirmação dos dados obtidos e respostas a algumas anormalidades como a curva Al-RS-LC (Fig. 41c) que após um ponto de mínimo HTC apresentou melhoria no mesmo durante a ebulição. Também sugere-se a caracterização das superfícies em função do tempo, a fim de entender melhor a formação da camada de nanopartículas sobre a superfície de aquecimento.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma análise do coeficiente de transferência de calor por ebulição em piscina para a água e nanofluidos de alumina e maguemita, a $T_{sat} = 99 \text{ }^\circ\text{C}$ e $p_{atm} = 98 \text{ kPa}$, sobre duas diferentes superfícies de cobre. Por meio das curvas de ebulição e das características dos nanofluidos e das superfícies antes e após o processo de ebulição, as seguintes conclusões são apresentadas:

- ✓ A ebulição de nanofluidos acarreta na deposição de nanopartículas sobre a superfície, a qual cria uma camada porosa que aumenta a rugosidade e a molhabilidade da superfície comparada com a superfície original. Além disso, conforme a concentração do nanofluido aumenta a espessura da camada porosa também aumenta.
- ✓ Para os ensaios com superfície lisa e nanofluidos de baixa concentração, correspondendo em um $SIP > 1$, o HTC aumenta comparado ao ensaio para água pura. Esse efeito é devido ao aumento dos raios das cavidades (correspondendo na diminuição da energia necessária para ativação das mesmas, *i.e.*, diminuição do superaquecimento para um mesmo valor de fluxo de calor), pois a ebulição dos nanofluidos altera a morfologia da superfície durante a ebulição.
- ✓ Para os ensaios com superfície rugosa e baixas concentrações de nanofluidos, correspondendo em um $SIP \gg 1$, o HTC aumenta apenas para os primeiros fluxos de calor aplicados, seguido da diminuição devido ao preenchimento das cavidades pelas nanopartículas, levando a um aumento da espessura da camada depositada e, conseqüentemente, da resistência térmica sobre a superfície.
- ✓ A diminuição no HTC é observada para todos os nanofluidos de alta concentração independente da condição superficial. A espessa camada de nanopartícula formada sobre a superfície aumenta a resistência térmica da superfície e, por consequência, diminui o HTC.
- ✓ A diferença da composição das nanopartículas (Al_2O_3 ou Fe_2O_3) dispersas no fluido base tem efeito desprezível quando comparado ao efeito do SIP e da concentração.
- ✓ Para baixos valores de fluxos de calor aplicados, os nanofluidos apresentam valores constantes de HTC, independente do tempo de ebulição. No entanto, para médios e elevados valores de fluxos de calor, o HTC se modifica e tende a dimi-

nuir com o tempo de ebulição devido à deposição das nanopartículas ser mais proeminente ao longo do tempo, aumentando a resistência térmica da superfície.

Apesar dos esforços, a visualização do fenômeno de ebulição não pode ser realizada neste trabalho devido às características óticas da câmara de ebulição. Então, futuros trabalhos consistirão em aprimorar a visualização do fenômeno de ebulição a fim de auxiliar na análise dos resultados obtidos neste trabalho, principalmente, na análise da densidade sítios de nucleação ativos. Outro fator importante que necessita de estudos mais aprofundados é o fluxo de calor crítico (CHF), visto que este consiste em um parâmetro de projeto para o desenvolvimento de trocadores de calor mais eficientes e compactos.

Por fim, os ensaios de longa duração em fluxos de calor fixos mostraram a possibilidade para, em futuros trabalhos, explorar a modificação da superfície, a fim de obter um ponto ótimo de tempo, fluxo e concentração, por meio da caracterização apresentada no trabalho (rugosidade, molhabilidade) e também a inclusão de uma nova técnica para se obter a porosidade da camada depositada.

REFERÊNCIAS

- 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**, Kidlington, v. 55, n. 13-14, p. 3423–3436, 2012.
- BANG, I. C.; CHANG, S. H. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃–water nano-fluids from a plain surface in a pool. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 48, n. 12, p. 2407-2419, 2005.
- BARBER, J.; BRUTIN, D.; TADRIST, L. A review on boiling heat transfer enhancement with nanofluids. **Nanoscale Research Letters**, Heidelberg, v. 6, n. 1, p. 280, 2011.
- BENJAMIN, R. J.; BALAKRISHNAN, A. R. Nucleation site density in pool boiling of saturated pure liquids: effect of surface microroughness and surface and liquid physical properties. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 15, n. 1, p. 32-42, 1997.
- BASU, N.; WARRIER, G. R.; DHIR, V. K. Onset of nucleate boiling and active nucleation site density during subcooled flow boiling. **Journal of Heat Transfer**, New York, v. 124, n. 4, p. 717-728, 2002.
- BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES; ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. **Guide to the expression of uncertainty in measurement**. International Organization for Standardization, 2008.
- CARDOSO, E. M. **Intensificação da ebulição nucleada em espaços confinados**. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2010.
- CAREY, V. P. **Liquid-vapor phase-change phenomena: an introduction to the thermophysics of vaporization and condensation processes in heat transfer Equipment**. Abington: Taylor & Francis, 1992.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J.; KANOGLU, M. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 904 p.
- CHOI, S. U. S. Enhancement thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In: ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, San Francisco, 1995. **Proceedings...** San Francisco: [s. n.], 1995. p. 1-8.
- CILOGLU, D.; BOLUKBASI, A. A comprehensive review on pool boiling of nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, Kidlington, v. 84, p. 45–63, 2015.
- CORTY, C.; FOUST, A. S. Surface Variables in nucleate boiling. **Chem. Eng. Prog. Symp. Series**, New York, 51, pp.1-12, 1955.
- DAS, S. K.; PUTRA, N.; ROETZEL, W. Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, Kidlington, v. 29, n. 8, p. 1237-1247, 2003.

DHIR, V. K. Boiling heat transfer. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palo Alto, v. 30, p. 365–401, 1998.

FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. **Teoria e projeto para medições mecânicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 466 p.

GHADIMI, A.; SAIDUR, R.; METSELAAR, H. S. C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 54, n. 17-18, p. 4051–4068, 2011.

GOLUBOVIC, M. N.; HETTIARACHCHI, H. M.; WOREK, W. M.; MINKOWYCZ, W. J. Nanofluids and critical heat flux, experimental and analytical study. **Applied Thermal Engineering**, Kidlington, v. 29, n. 7, p. 1281–1288, 2009.

GRIFFITH, P.; WALLIS, J. D. The role of surface conditions in nucleate boiling. **Chemical Engineering Progress Symposium Series**, New York, v. 56, n. 30, p. 49-63, 1960.

GUIVAR, J. A. R. et al. Structural and magnetic properties of monophasic maghemite (γ -Fe₂O₃) nanocrystalline powder. **Advances in Nanoparticles**, Irvine, v. 2014, 2014.

HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. **Industrial & Engineering chemistry fundamentals**, Washington, v. 1, n. 3, p. 187-191, 1962.

HARISH, G.; EMLIN, V.; SAJITH, V. Effect of surface particle interactions during pool boiling of nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux, v. 50, n. 12, p. 2318–2327, 2011.

HONE, J. Carbon nanotubes: thermal properties. In: LYSHEVSKY, S. E. (Ed.) **Dekker encyclopedia of nanoscience and nanotechnology**. Boca Raton : CRC Press, 2004. v. 6, p. 603-610.

HUANG, C.; LEE, C.; WANG, C. Boiling enhancement by TiO₂ nanoparticle deposition. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 54, n. 23, p. 4895-4903, 2011.

HWANG, Y.; LEE, J.; LEE, J.; JEONG, Y.; CHEONG, S.; AHN, Y.; KIM, S. H. Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 186, n. 2, p. 145-153, 2008.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L., LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643p.

KAMATCHI, R.; VENKATACHALAPATHY, S. Parametric study of pool boiling heat transfer with nanofluids for the enhancement of critical heat flux: A review. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux, v. 87, p. 228-240, 2015.

KIM, H.; KIM, J.; KIM, M. Effect of nanoparticles on CHF enhancement in pool boiling of nano-fluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 49, n. 25, p. 5070-5074, 2006.

KIM, Hyung Dae; KIM, Jeongbae; KIM, Moo Hwan. Experimental studies on CHF characteristics of nano-fluids at pool boiling. **International journal of multiphase flow**, Kidlington, v. 33, n. 7, p. 691-706, 2007.

KIM, S. J.; BANG, I. C.; BUONGIORNO, J.; HU, L. W. Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids. **Applied Physics Letters**, Melville, v. 89, n. 15, 2006.

KIM, S. J.; Bang, I. C.; Buongiorno, J.; Hu, L. W.. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 50, n. 19, p. 4105-4116, 2007a.

KIYOMURA, I. S.; NASCIMENTO, F. J.; CUNHA, A. P.; CARDOSO, E. M. Analysis of the influence of surface roughness and nanoparticle concentration on the contact angle. In: ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 23., 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2015. p. 1-8.

KIYOMURA, I. S. et al. 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**, Kidlington, v. 106, p. 666-674, 2017.

KOLE, Madhusree; DEY, T. K. Investigations on the pool boiling heat transfer and critical heat flux of ZnO-ethylene glycol nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, Kidlington, v. 37, p. 112-119, 2012.

KOLEV, N. I. The internal characteristics of boiling at heated surfaces. In: ECI INTERNATIONAL CONFERENCE ON BOILING HEAT TRANSFER, 2006, Spoleto. **Proceedings...** Spoleto: [s. n.], 2006.

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**, Kidlington, v. 53, n. 5, p. 972-981, 2010.

LEE, J. H.; LEE, T.; JEONG, Y. H. Experimental study on the pool boiling CHF enhancement using magnetite-water nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 55, n. 9-10, p. 2656-2663, 2012.

LI, X.; ZHU, D.; WANG, X. Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nanosuspensions. **Journal of Colloid and Interface Science**, Maryland Heights, v. 310, n. 2, p. 456-463, 2007.

LI, Y.; LIU, Z.; WANG, G. A predictive model of nucleate pool boiling on heated hydrophilic surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 65, p. 789-797, 2013.

MAJZLAN, J. et al. Thermodynamics of Fe oxides: Part I. Entropy at standard temperature and pressure and heat capacity of goethite (α -FeOOH), lepidocrocite (γ -FeOOH), and maghemite (γ -Fe₂O₃). **American Mineralogist**, Chantilly, v. 88, n. 5-6, p. 846-854, 2003.

MANETTI, L. L.; CARDOSO, E. M. Review of the influence of nanofluids on the nucleate pool boiling. In: ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2015.

MASSART, R. **Magnetic fluids and process for obtain them**. US Patent 4329241, 20 jul. 1979, 11 maio 1982.

MATRE, G. A.; KARWANDE, R. L. Critical heat flux enhancement in pool boiling with Al₂O₃-water nanofluid. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, [S. l.], v. 04, n. 5, p. 177-185. 2015.

MOREIRA, T. A.; DO NASCIMENTO, F. J.; RIBATSKI, G. Flow Boiling Heat Transfer Coefficient of DI-Water/SiO₂ Nanofluid Inside a 1.1 mm Round Microchannel. In: ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOCHANNELS, MICROCHANNELS, AND MINICHANNELS, 13., 2015, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: [s. n.], 2015.

MUKHERJEE, S. Preparation and Stability of Nanofluids-A Review. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, Ghaziabad, v. 9, n. 2, p. 63–69, 2013.

NARAYAN, G. P.; ANOOP, K. B.; DAS, S. K. Mechanism of enhancement/deterioration of boiling heat transfer using stable nanoparticle suspensions over vertical tubes. **Journal of Applied Physics**, Melville, v. 102, n. 7, 2007.

NGUYEN, C. T. et al. Viscosity data for Al₂O₃-water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux, v. 47, n. 2, p. 103-111, 2008.

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: ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 2013, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: ABCM, 2015. p. 431-437.

NUKIYAMA, S. The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 9, n. 12, p. 1419-1433, 1966.

NEWTON, S. I. Letter to Robert Hooke, February 5, 1676. **The Correspondence of Isaac Newton**, [S. l.], v. 7, p. 1661-1675, 1959.

PAK, B. C.; CHO, Y. I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with sub-micron metallic oxide particles. **Experimental Heat Transfer an International Journal**, New York, v. 11, n. 2, p. 151-170, 1998.

PARK, S. D.; MOON, S. B.; BANG, I. C.. Effects of thickness of boiling-induced nanoparticle deposition on the saturation of critical heat flux enhancement. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 78, p. 506-514, 2014.

RAINHO NETO, A. **Análise da ebulição nucleada da água contendo nanopartículas de alumina, maguemita ou nanotubo de carbono**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

- RAINHO NETO, A.; OLIVEIRA, J. L. G.; PASSOS, J. C. Heat transfer coefficient and critical heat flux during nucleate pool boiling of water in the presence of nanoparticles of alumina, maghemite and CNTs. **Applied Thermal Engineering**, Kidlington, v. 111, n. 25, p. 1493-1506, 2016.
- RAVESH, M. R.; KESHAVARZ, A.; MOJARRAD, M. S.; AMIRI, S. Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement of alumina–water–ethylene glycol nanofluids. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 44, p. 805-814, 2013.
- ROHSENOW, W. M. A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids. **Transactions of ASME – Journal of Heat Transfer**, Reston, v. 74, pp. 969-976, 1962.
- SARAFRAZ, M. M.; HORMOZI, F. Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of dilute Al₂O₃–ethyleneglycol nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 58, p. 96-104, 2014.
- SARAFRAZ, M. M.; HORMOZI, F.; PEYGHAMBARZADEH, S. M. Pool boiling heat transfer to aqueous alumina nano-fluids on the plain and concentric circular micro-structured (CCM) surfaces. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 72, p. 125–139, 2016.
- SEADER, J. D.; HENLEY, E. J. **Separation process principles**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- SHAHMORADI, Z.; ETESAMI, N.; ESFAHANY, M. N. Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 47, p. 113–120, 2013.
- SILVA, A. C. M. **Transferência de calor em nanofluidos: potencialidades e desafios**. 2010. 73f. Dissertação (Mestrado em Eng. Química) – Departamento de Química, Universidade de Aveiro, Portugal, 2010.
- SOLTANI, S.; ETEMAD, S. G. .; THIBAUT, J. Pool boiling heat transfer performance of Newtonian nanofluids. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, Heidelberg, v. 45, n. 12, p. 1555–1560, 2009.
- STEPHAN, K. **Heat transfer in condensation and boiling**. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- 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. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 277, p. 181–192, 2015.
- WANG, C. H.; DHIR, V. K. Effect of surface wettability on active nucleation site density during pool boiling of water on a vertical surface. **Journal of Heat Transfer**, New York, v. 115, n. 3, p. 659-669, 1993.

WANG, X. Q.; MUJUMDAR, A. S. A review on nanofluids-part I: theoretical and numerical investigations. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, Sao Paulo, v. 25, n. 4, p. 613-630, 2008a.

WANG, X. Q.; MUJUMDAR, A. S. A review on nanofluids-part II: experiments and applications. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, Sao Paulo, v. 25, n. 04, p. 631-648, 2008b.

WANG, X.; LI, X. Influence of pH on nanofluids' viscosity and thermal conductivity. **Chinese Physics Letters**, Bristol, v. 26, n. 5, p. 056601, 2009.

WANG, X.; ZHU, D.; YANG, S. Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids. **Chemical Physics Letters**, Bristol, v. 470, n. 1, p. 107-111, 2009.

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

WEN, D.; DING, Y. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ -alumina nanofluids. **Journal of Nanoparticle Research**, Dordrecht, v. 7, n. 2-3, p. 265-274, 2005.

WENZEL, Robert N. Surface Roughness and Contact Angle. **The Journal of Physical Chemistry**, Moscow, v. 53, n. 9, p. 1466-1467, 1949.

XIE, H.; LEE, H.; YOUNG, W.; CHOI, M. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. **Journal of Applied Physics**, Melville, v. 94, n. 8, p. 4967-4971, 2003.

YANG, Y. M.; MAA, J. R. Boiling of suspension of solid particles in water. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 27, n. 1, p. 145-147, 1984.

YOU, S. M.; KIM, J. H.; KIM, K. H. Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer. **Applied Physics Letters**, Melville, v. 83, n. 16, p. 3374-3376, 2003.

YU, W.; XIE, H. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. **Journal of Nanomaterials**, New York, v. 2012, p. 1, 2012.

ZHU, D. et al. Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al₂O₃-H₂O nanofluids. **Current Applied Physics**, Amsterdam, v. 9, n. 1, p. 131-139, 2009.

ZHU, D.; LI, X.; WANG, N.; WANG, X.; GAO, J.; LI, H. Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al₂O₃-H₂O nanofluids. **Current Applied Physics**, Amsterdam, v. 9, n. 1, p. 131-139, 2009.

APÊNDICE A – RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela A.1 - Resumo da revisão bibliográfica sobre ebulição em piscina utilizando nanofluidos.

Autor (ano)	Nanofluido	Característica da superfície aquecida	Alteração no CHF	Alteração no HTC
You et al. (2003)	Alumina em água; d_p não relatado	Placa horizontal de cobre; R_a não relatada	Aumento	Sem alteração
Das et al. (2003)	Alumina (38nm) em água	Cilindro horizontal de aço inox; lisa ($R_a = 387$ nm); rugosa (1150 nm).	-	Redução
Bang e Chang (2005)	Alumina (47 nm) em água	Placa horizontal de cobre; $R_a = 37$ nm	Aumento	Redução
Wen e Ding (2005)	Alumina (10-59 nm) em água	Placa horizontal de aço inox.; R_a não relatada	-	Aumento
Kim, Kim e Kim (2006)	Alumina (47 nm) e Titania (85 nm) em água	Fio de Ni-Cr; R_a não relatada	Aumento	-
Kim et al. (2007)	Alumina (110-210 nm), Zircônia (110-250 nm), e Sílica (20-40 nm) em água	Fio de aço inox; R_a não relatada	Aumento	Redução
Golubovic et al. (2009)	Alumina (46 nm) e óxido de bismuto (38 nm) em água.	Fio de Ni-Cr; R_a não relatada	Aumento	-
Soltani, Etemad e Thibault (2009)	Alumina (20-30) e SnO ₂ (55 nm) em água	Cilindro vertical de aço inox; R_a não relatada	-	Aumento
Kwark et al. (2010)	Alumina (139 nm) em água	Placa horizontal de cobre; R_a não relatada	Aumento	Sem alteração/ Redução
Harish, Emlin e Sajith (2011)	Alumina (50 nm) em água	Placa horizontal de alumínio; lisa ($R_a = 53$ nm); rugosa ($R_a = 308$ nm). Fio de Ni-Cr	Aumento	Aumento (rugosa) Redução (lisa)
Ahmed e Hamed (2012)	Alumina (40 nm) em água	Placa horizontal de cobre; $R_a = 50$ nm	-	Aumento/ redução
Lee, Lee e Jeong (2012)	Magnetita (25 nm); Alumina (40-80 nm) e Titania (15 nm) em água	Fio de Ni-Cr; R_a não relatada	Aumento	-
Wen (2012)	Alumina (20-150 nm) em água	Placa horizontal de cobre; lisa (25 nm); rugosa (420 nm)	-	Aumento (lisa) sem alteração (rugosa)
Shahmoradi, Etesami e Esfahany (2013)	Alumina (40 nm) em água	Placa horizontal de cobre; $R_a = 5,1$ nm	Aumento	Redução
Park, Moon e Bang (2014)	Alumina (50 nm) em água	Fio de Ni-Cr; R_a não relatada	Aumento	-
Vafaei (2015)	Alumina (20-150 nm) em água	Placa de cobre horizontal; lisa ($R_a = 25$ nm); rugosa (420 nm)	-	Aumento/ Redução/ sem alteração
Matre e Karwande (2015)	Alumina (30 nm) em água	Fio de Ni-Cr; $R_a = 126$ nm	Aumento	-
Sarafraz, Hormozi e Peyghambarzadeh (2016)	Alumina (20 e 50 nm) em água c/ surfactante não iônico	Placa circular de cobre; R_a não relatada	Aumento	Redução

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela A.2 - Resumo dos trabalhos que analisaram o HTC e o parâmetro superfície-nanofluido.

Autor (ano)	Nanofluido	Alteração no HTC	(Ra/d_p) antes da ebulição
Das et al. (2003)	Alumina (38nm) em água	Redução	»1
Bang e Chang (2005)	Alumina (47 nm) em água	Redução	≈ 1
Harish, Emlin e Sajith (2011)	Alumina (50 nm) em água	Aumento (rugosa) Redução (lisa)	> 1 (rugosa) ≈ 1 (lisa)
Ahmed e Hamed (2012)	Alumina (40 nm) em água	Aumento/ redução	> 1
Kole e Dey (2012)	Óxido de Zinco (30-40 nm) em etileno glicol	Aumento	> 1
Wen (2012)	Alumina (20-150 nm) em água	Aumento (lisa) sem alteração (rugosa)	< 1 »1
Raveshi et al. (2013)	Alumina (20-30 nm) em água e etileno glicol (combinados em proporções iguais) com surfactante (SDBS)	Aumento	> 1
Shahmoradi, Etesami e Esfahany (2013)	Alumina (40 nm) em água	Redução	«1
Sarafraz e Hormozi (2014)	Alumina (45-50 nm) em etileno glicol	Redução	≈ 1
Vafaei (2015)	Alumina (20-150 nm) em água	Aumento Redução	< 1 (lisa) »1 (rugosa)
Kiyomura et al. (2017)*	Maguemita (10 nm) em água	Aumento Redução	> 1 (lisa) >>1 (rugosa)

*Os autores utilizaram nanofluido para estruturar as superfícies. Os ensaios foram realizados com água deionizada após a nanoestruturação

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela A.3 - Resumo dos trabalhos que analisaram o CHF e o ângulo de contato.

Autor (ano)	Nanofluido	Superfície de aquecimento	CHF p/ água pura (kW/m ²)	Máximo CHF atingido p/ nanofluido (kW/m ²)	Ângulo de contato estático	
					Antes da ebulição	Depois da ebulição
Bang e Chang (2005)	Alumina (47 nm) em água	Placa horizontal de cobre	1220	2640 (1 vol.%)	-	-
Kim, Kim e Kim (2006)	Alumina (47 nm) em água	Fio de Ni-Cr	980	1670 (0,001 vol.%)	71°	36°
Kim, Kim e Kim (2006)	Titania (85 nm) em água	Fio de Ni-Cr	980	1960 (0,1 vol.%)	71°	16°
Kim et al. (2007)	Alumina (110-210 nm)	Fio de aço inox.	1310	1980 (0,001 vol.%)	79°	22°
Kim et al. (2007)	Zirconia (110-250 nm)	Fio de aço inox.	1310	2260 (0,01 vol.%)	79°	16°
Kim et al. (2007)	Sílica (20-40 nm)	Fio de aço inox.	1310	2330 (0,1 vol.%)	79°	8°
Golubovic et al. (2009)	Alumina (46 nm) em água	Fio de Ni-Cr	1570	2360 (0,00015 vol.%)	90°	33°
Golubovic et al. (2009)	Óxido de bismuto (38 nm) em água	Fio de Ni-Cr	1570	2100 (0,00005 vol.%)	90°	60°
Kwark et al. (2010)	Alumina (139 nm) em água	Placa horizontal de cobre	1010	1980 (0,0007 vol.%)	90°	60°
Lee, Lee e Jeong (2012)	Magnetita (25 nm) em água	Fio de Ni-Cr	1090	2600 (0,01 vol.%)	-	-
Lee, Lee e Jeong (2012)	Alumina (40-80 nm) em água	Fio de Ni-Cr	1090	2500 (0,01 vol.%)	-	-
Lee, Lee e Jeong (2012)	Titania (15 nm) em água	Fio de Ni-Cr	1090	2235 (0,01 vol.%)	-	-
Shahmoradi, Etesami e Esfahany (2013)	Alumina (40 nm) em água	Placa horizontal de cobre	1000	1470 (0,1 vol.%)	45°	20°
Ahn e Kim (2013)	Alumina (47 nm) em água	Placa horizontal de cobre	1532	2096 (0,001 vol.%)	68°	16°
Park, Moon e Bang (2014)	Alumina (50 nm) em água	Fio de Ni-Cr	1090	2450 (0,01 vol.%)	70°	15°
Matre e Karwande (2015)	Alumina (30 nm) em água	Fio de Ni-Cr	1200	2070 (0,32 vol.%)	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor.

APÊNDICE B – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E CONCENTRAÇÕES DOS NANOFLUIDOS

B.1 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DAS NANOPARTÍCULAS

Tabela B. 1 - Propriedades termofísicas das nanopartículas a 300 K.

	Al ₂ O ₃ (Alumina)	Fe ₂ O ₃ (Maguemita)
ρ (kg/m ³)	3970 ¹	4870 ²
c_p (J/kg.K)	765 ¹	660 ³
k (W/mK)	36 ¹	6 ⁴
M (g/mol)	101,96	159,69

¹Incropera et al., 2008.

²Guivar et al. 2014.

³Majzlan et al. 2003.

⁴Rainho Neto, Oliveira e Passos, 2016.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

B.2 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA ÁGUA DEIONIZADA

Tabela B. 2 – Propriedades termofísicas da água deionizada saturada a 98 kPa.

$c_{p,l}$ (J/kg.K)	4216
h_{lv} (J/kg)	2259000
ρ_l (kg/m ³)	959,1
ρ_v (kg/m ³)	0,5786
σ (N/m)	0,0591
μ_l (kg/m-s)	$0,0285 \times 10^{-6}$
k_l (W/m.K)	0,6648
T_{sat} (K)	372,19
α_l (m ² /s)	$16,441 \times 10^{-6}$
M (g/mol)	18,01528
Pr_l	1,8

Fonte: Elaboração do próprio autor.

B.3 TIPOS DE CONCENTRAÇÕES DOS NANOFLUIDOS

Concentração Comum [g/l]

$$C = \frac{m_p}{V_b} \frac{\text{(massa das nanopartículas em gramas)}}{\text{(volume do fluido base em litros)}} \quad (\text{B.1})$$

Concentração Volumétrica [-]

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} \frac{\text{(volume das nanopartículas)}}{\text{(volume do fluido base)}} \quad (\text{B.2})$$

Concentração Volumétrica Percentual [%]

$$\text{vol.}\% = \frac{V_p}{V_b} \frac{\text{(volume das nanopartículas)}}{\text{(volume do fluido base)}} \times 100 \quad (\text{B.3})$$

Concentração Mássica Percentual [%]

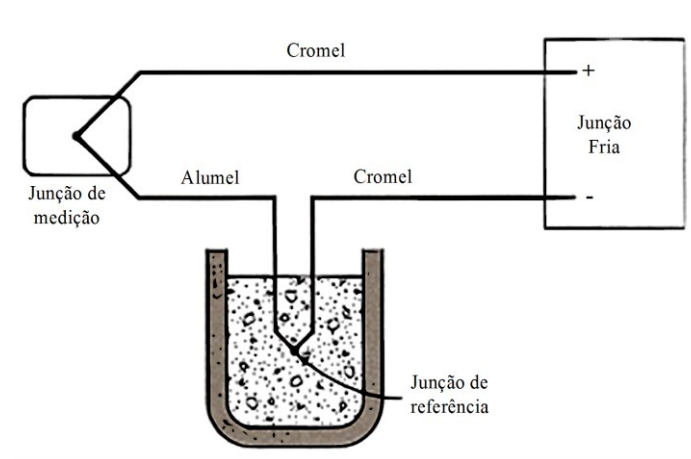
$$\text{wt.}\% = \frac{m_p}{m_b} \frac{\text{(massa das nanopartículas)}}{\text{(massa do fluido base)}} \times 100 \quad (\text{B.4})$$

APÊNDICE C – CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

Os termopares são caracterizados pela junção de dois fios condutores elétricos diferentes. A junção ou junta do termopar pode ser criada soldando-se os fios ou qualquer outro método que permita o contato elétrico entre os dois condutores. A partir de uma diferença de temperatura entre as junções, uma força eletromotriz é gerada devido ao Efeito Seebeck (FIGLIOLA; BEASLEY, 2007). Para as medições da temperatura no bloco de cobre, durante os ensaios de ebulição, foram utilizados três termopares tipo K (*Cromel/Alumel*) blindados da marca *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 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. 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 Fig. 12.

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



Fonte: Adaptado de Figliola e Beasley (2007).

A medição da diferença de potencial em milivolt (mV) gerada pelos termopares foi capturada utilizando um sistema de aquisição de dados *AGILENT 34970A*. As medidas de temperatura foram calibradas numa faixa de 15,0 °C a 90,0 °C crescente e decrescente. Após a obtenção das curvas de calibração T vs V para cada termopar, as mesmas foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados para uma função linear dada a seguir:

$$T = A(mV) + B \quad (C.1)$$

na qual, T é o valor real fornecido pelo termômetro de bulbo, 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.

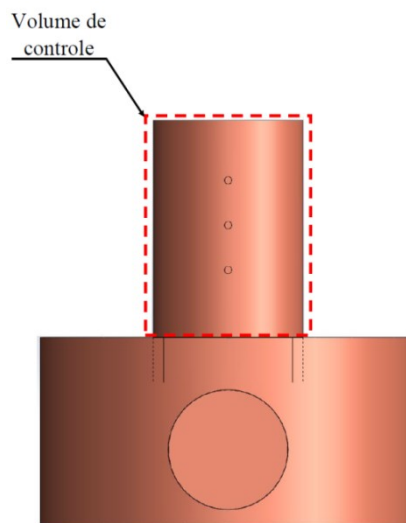
A incerteza experimental encontrada foi de 0,4 °C, dada pelo desvio padrão entre o valor medido e o valor ajustado pela função linear.

APÊNDICE D – HIPÓTESE DE CONDUÇÃO UNIDIMENSIONAL

Utilizando a equação da energia em coordenadas cilíndricas no volume de controle demarcado na Fig. D.1.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{D.1})$$

Figura D. 1 – Volume de controle.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Algumas considerações foram realizadas:

- Condução em regime permanente, ou seja, a condição de estabilização do regime foi caracterizada por variações na temperatura dentro da faixa de incerteza de sua medição ($\pm 0,4$ °C);
- A geração de calor está fora do volume de controle considerado;
- O volume de controle escolhido (cilindro de cobre) é simétrico.

Com estas considerações, a equação da energia pode ser simplificada e seu campo de temperatura fica em função apenas das coordenadas axiais, z , e radiais, r :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{D.2})$$

O isolamento térmico da seção de testes consiste em uma peça de politetrafluoretileno; a parte do bloco de cobre que permanece no exterior da câmara de ebulição é isolada ter-

micamente com vermiculita. Então, a condição de contorno na interface entre o cilindro de cobre (seção de teste) e a peça de politetrafluoretileno pode ser escrita como:

$$\left(k_{\text{cobre}} \frac{\partial T_{\text{cobre}}}{\partial r_{\text{cobre}}} \right)_{r_{\text{cobre}} = R_{\text{cobre}}} = \left(k_{\text{ptfe}} \frac{\partial T_{\text{ptfe}}}{\partial r_{\text{ptfe}}} \right)_{r_{\text{ptfe}} = R_{\text{cobre}}} \quad (\text{D.3})$$

Por meio de uma análise de ordem de grandeza tem-se:

$$\Delta T_{\text{cobre}, r} \sim \frac{k_{\text{ptfe}} R_{\text{cobre}}}{k_{\text{cobre}} R_{\text{ptfe}}} \Delta T_{\text{ptfe}, r} \quad (\text{D.4})$$

A Equação D.4 mostra que a temperatura radial do cobre está em função da temperatura radial da peça de politetrafluoretileno.

O cilindro de cobre possui raio igual a 10 mm e a peça de politetrafluoretileno possui raio interno igual a 10 mm e raio externo igual a 40 mm. A condutividade térmica do cobre e do politetrafluoretileno é 398 W/m.K e 0,45 W/m.K, respectivamente. Assumindo uma condição limite de teste em que o fluxo de calor aplicado é de 800 kW/m² e, que a diferença de temperatura é dada pela medição do termopar mais próximo à resistência elétrica e a temperatura de saturação da água, ou seja, 54 K, tem-se que:

$$\Delta T_{\text{cobre}, r} = \frac{0,45}{398} \left[\frac{10}{(40 - 10)} \right] 54 \quad (\text{D.5})$$

Assim, o gradiente de temperatura do cobre na direção radial é igual a:

$$\Delta T_{\text{cobre}, r} = 0,0203 \text{ K} \quad (\text{D.6})$$

Com base nos dados experimentais é possível obter uma diferença de temperatura na ordem de 25 K para termopares com distanciamento entre si de 12 mm na direção axial, z , nas mesmas condições mencionadas acima. Com o intuito de corroborar a hipótese de condução unidimensional na direção axial, foi realizada uma comparação das razões, entre ΔT e a distância, nas direções radial e axial:

$$\frac{\Delta T_{cobre,r}}{R_{cobre}} = \frac{0,0203}{0,010} = 2,035 \frac{K}{m} \quad (\text{Direção radial}) \quad (D.7)$$

$$\frac{\Delta T_{cobre,z}}{Z} = \frac{25}{0,012} = 2083 \frac{K}{m} \quad (\text{Direção axial}) \quad (D.8)$$

Sendo assim, pode-se concluir que:

$$\frac{\partial T_{cobre,r}}{\partial r_{cobre}} \ll \frac{\partial T_{cobre,z}}{\partial Z}$$

Então é apropriado considerar a hipótese de condução unidimensional em regime permanente na direção axial.

APÊNDICE E - CÁLCULO DA PERDA TÉRMICA

O cálculo da perda térmica foi realizado utilizando o fluxo de calor aplicado, calculado por:

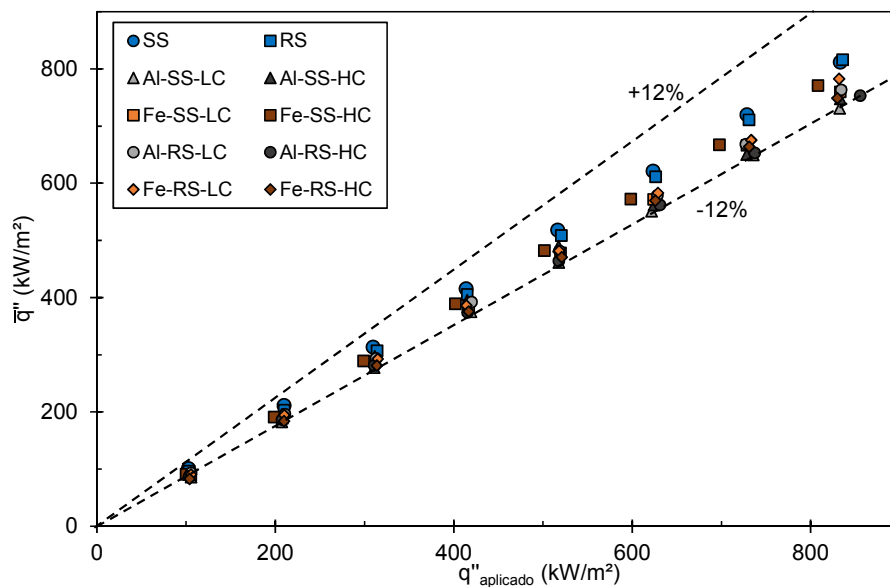
$$q''_{\text{aplicado}} = \frac{V^2}{R} \quad (\text{E.1})$$

onde V é a tensão (em Volts) aplicada na resistência elétrica de cartucho e R é o valor da resistência (em Ohms); e, com o fluxo de calor médio medido pelos termopares, Eq. (6), a perda foi calculada por:

$$q''_{\text{perdido}} \% = \frac{\bar{q}'' - q''_{\text{aplicado}}}{q''_{\text{aplicado}}} \times 100 \quad (\text{E.2})$$

A Figura E.1 apresenta a comparação do fluxo aplicado com o fluxo medido, com uma perda de $\pm 12\%$.

Figura E. 1 – Análise da perda de calor no bloco de cobre.



Fonte: Elaboração do próprio autor.