UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

ALEX PEREIRA DA CUNHA

A METHOD FOR MEASURING CONTACT ANGLE AND INFLUENCE OF SURFACE FLUID PARAMETERS ON THE BOILING HEAT TRANSFER PERFORMANCE

Ilha Solteira
2019

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

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA)

ALEX PEREIRA DA CUNHA

A METHOD FOR MEASURING CONTACT ANGLE AND INFLUENCE OF SURFACE FLUID PARAMETERS ON THE BOILING HEAT TRANSFER PERFORMANCE

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

Prof.ª Dra. Elaine Maria Cardoso
Orientadora

Ilha Solteira
2019

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C972m

Cunha, Alex Pereira da.
A method for measuring contact angle and influence of sur-face fluid parameters on the boiling heat transfer perfor-mance / Alex Pereira da Cunha. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
117 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2019

Orientador: Elaine Maria Cardoso
Inclui bibliografia

1. Nanofluidos. 2. Ângulo de contato. 3. Ebulição. 4. Molhabilidade. 5. Transferência de calor.

Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus da Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: A METHOD FOR MEASURING CONTACT ANGLE AND INFLUENCE OF SURFACE-FLUID PARAMETERS ON THE BOILING HEAT TRANSFER PERFORMANCE

AUTOR: ALEX PEREIRA DA CUNHA
ORIENTADORA: ELAINE MARIA CARDOSO

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

Profa. Dra. ELAINE MARIA CARDOSO
Coordenadoria de Curso de Engenharia Aeronáutica / UNESP - Câmpus Experimental de São João da Boa Vista

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

Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JEFERSON DIEHL DE OLIVEIRA
Centro Universitário da Serra Gaúcha

Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES
Engenharia Mecânica / USP - São Carlos

Ilha Solteira, 28 de junho de 2019

Dedico

aos meus pais, Ilson e Sebastiana, por todo esforço e carinho a mim empenhados. E a Carlos Eduardo May da Cunha e Ana Luiza May da Cunha, para que possam crescer em um mundo em que as pesquisas contribuam para um crescimento sustentável, e uma melhor utilização dos nossos recursos naturais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro ao Pai Celestial – Deus, sem o qual nenhum esforço renderia qualquer resultado e este trabalho não seria possível de ser executado.

Aos meus pais que, em sua experiência, entenderam minha ausência, proporcionando-me todo suporte, carinho e motivação para seguir em frente.

Ao meu irmão por me mostrar uma realidade além da que eu conhecia e ensinar que a perseverança é a chave para o sucesso.

À Professora Dra. Elaine Maria Cardoso pela orientação, paciência e confiança de que o trabalho seria realizado.

À Maira de Oliveira Ferreira e família, por todo incentivo, dedicação, carinho e compreensão.

Ao Capítulo Jales da Ordem DeMolay Nº 48/657, por sempre me receber carinhosamente, mesmo após longos períodos de ausências nas reuniões; neste lugar aprendi o valor e a importância das virtudes do Amor Filial, Reverência pelas Coisas Sagradas, Cortesia, Companheirismo, Fidelidade, Pureza, Patriotismo e, principalmente, amizade.

Aos amigos e companheiros de laboratório, Leonardo Lachi Manetti, Igor Seicho Kiyomura, Jéssica Martha Nunes e Reinaldo Rodrigues de Souza que com cada particularidade individual convergimos para ideais comuns, uns auxiliando aos outros.

Aos funcionários da secção Técnica de Pós-graduação, técnicos de laboratórios e demais funcionários da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, por sempre se mostrarem solícitos em auxiliar e fazer com que a fase de execução do trabalho transcorresse da melhor maneira possível.

“Aqui, no entanto, nós não olhamos para trás por muito tempo. Nós continuamos seguindo em frente, abrindo novas portas e fazendo coisas novas, porque somos curiosos... e a curiosidade continua nos conduzindo por novos caminhos. Siga Em Frente.”
Walt Disney.

RESUMO

O avanço de novas tecnologias, associado à minimização dos custos de fabricação e instalação, constitui um grande desafio para a área de refrigeração, uma vez que a geração de calor tem aumentado gradativamente nos últimos anos. Assim, a busca de novos fluidos com propriedades térmicas superiores aos comumente usados tornou-se indispensável para melhorar a eficiência energética. Nas últimas décadas os nanofluidos - dispersões de partículas de escala nanométrica (1 a 100nm) em um fluido-base - têm atraído especial interesse não somente da comunidade acadêmica, mas também da indústria em áreas como: a microeletrônica, microfluídica, transporte, manufatura, assistência médica, entre outras. O melhor desempenho térmico e a vasta gama de aplicações fazem dos nanofluidos potenciais substitutos dos refrigerantes utilizados em diversos segmentos da engenharia. Dentro desse contexto, o presente trabalho teve como objetivos: o estudo teórico e experimental da influência das propriedades termofísicas e concentração de nanofluidos, bem como, das características geométricas da superfície aquecedora sobre o ângulo de contato e a molhabilidade. Também, atenção foi dada à preparação e caracterização dos nanofluidos (Al_2O_3-água e Fe_2O_3-água), por meio da análise experimental da condutividade térmica e da viscosidade dinâmica para diferentes concentrações; uma bancada experimental, para aquisição de imagens de gota séssil, foi construída a fim de viabilizar as análises de ângulo de contato e molhabilidade; e, uma rotina computacional foi desenvolvida para obtenção do perfil da gota e determinação da interação superfície-fluido, para os diferentes nanofluidos e superfícies utilizadas. Com as informações obtidas, foi possível a avaliação dos métodos de predição das propriedades termofísicas existentes na literatura, por meio da comparação com os resultados experimentais obtidos pelo presente estudo. Além disso, mostra-se que a condição original da superfície e a concentração do nanofluido utilizado para nanoestruturação afetam o comportamento do ângulo de contato e da rugosidade média da superfície. O efeito da capilaridade superficial faz com que uma área maior seja molhada ao longo do tempo e a análise de circularidade evidencia caminhos preferenciais de espalhamento do fluido sobre a superfície, ambos interferindo no comportamento térmico da transferência de calor. Assim, tem-se que a alteração superficial tem um papel crucial na transferência de calor por ebulição: a deposição de nanopartículas (baixa concentração) multiplica os sítios de nucleação no caso de superfícies lisas, melhorando a transferência de calor e, nas superfícies rugosas, as nanopartículas podem bloquear as microcavidades, deteriorando a troca térmica; somado a isso, o aumento da concentração dos nanofluidos gera uma aglomera-

ção de nanopartículas sobre a superfície, criando uma resistência térmica adicional à transferência de calor.

Palavras-chave: Nanofluidos. Ângulo de contato. Ebulição. Molhabilidade. Transferência de calor.

ABSTRACT

The advance of new technologies, associated to the minimization of manufacturing and installation costs, presents a great challenge for the refrigeration area, since the heat generation has increased in recent years. Thus, the search for new fluids with thermal properties higher than those commonly used has become indispensable to improve energy efficiency. In recent decades, nanofluids - dispersions of nanometer-scale particles (1 to 100 nm) in a base fluid - have attracted special interest not only from the academic community but also from industry in areas such as microelectronics, microfluidics, transport, manufacturing, medical assistance, among others. In this context, the present work had the following goals: the theoretical and experimental study of the influence of thermophysical properties and nanofluid concentration, as well as the geometric characteristics of the heating surface on the contact angle and wettability. Attention was also given to the preparation and characterization of nanofluids (Al_2O_3-water and Fe_2O_3-water) by the experimental analysis of thermal conductivity and dynamic viscosity for different concentrations; an experimental apparatus for the acquisition of sessile droplet images was designed in order to analyze the contact angle and wettability; and a computational routine was developed to obtain the drop profile and the surface-fluid interaction for the different nanofluids and surfaces used. Based on database, it was possible to evaluate the prediction methods of the thermophysical properties existing in the literature, by comparison with the experimental results obtained in the present study. In addition, it is shown that the original surface condition and the nanofluid concentration used for surface coating affect the behavior of the contact angle and the average surface roughness. The effect of the surface capillarity causes a larger area to be wetted over time and the circularity analysis shows preferential ways of spreading the fluid on the surface, both interfering in the thermal behavior of the heat transfer. Thus, the surface change plays a role in the boiling heat transfer: the nanoparticle deposition (at low concentration) multiplies the nucleation sites in the smooth surfaces, improving heat transfer and, on the rough surfaces the nanoparticles can clog the microcavities, deteriorating the thermal exchange. In addition, the increment in the nanofluid concentration generates agglomeration of nanoparticles on the surface, creating additional thermal resistance to heat transfer.

Keywords: Nanofluids. Contact angle. Pool boiling. Wettability. Heat transfer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Síntese de nanofluidos pelo método de duas etapas. 20
Figura 2 - Nanofluidos de CaO-óleo para várias concentrações após dias da preparação. 21
Figura 3 - Potencial zeta de várias nanopartículas dispersas em água em função do pH. 22
Figura 4 - Imagens TEM de nanopartículas de CuO de acordo com os métodos de fabricação: (a) método de uma etapa e (b) método de duas etapas. 22
Figura 5 - Diferentes técnicas de medição de condutividade térmica para nanofluidos. 26
Figura 6 - Comparação das técnicas de medição de condutividade térmica para nanofluidos. 27
Figura 7 - Diagrama da técnica do fio quente transiente e analisador comercial. 28
Figura 8 - Sensor TPS. 29
Figura 9 - Configuração experimental para medição da condutividade térmica de nanofluidos. 29
Figura 10 - Tipos de viscosímetros: (a) capilar, (b) rotacional de cilindro coaxial do tipo Couette e (c) pistão. 35
Figura 11 - Gota líquida em equilíbrio com uma superfície sólida. 39
Figura 12 - Configurações para uma gota líquida em contato com uma superfície sólida. 39
Figura 13 - Goniômetro Ramé-Hart™. 41
Figura 14 – Ilustração do método do “plano inclinado”. 42
Figura 15 - Ilustração do método de medição do ângulo de contato de Wilhelmy. 44
Figura 16 - Ilustração de um tubo capilar imerso em um líquido. 45
Figura 17 - Demonstração do método *θ/2*. 46
Figura 18 - Nanofluidos utilizados no presente estudo. (a) Fe_2O_3-água, concentração de 29 g/l; (b) Fe_2O_3-água, concentração de 0,29 g/l e 0,029 g/l, respectivamente; (c) Al_2O_3-água, concentrações de 0,29 g/l e 0,029 g/l, respectivamente. 54
Figura 19 - Câmara de ebulição utilizada para o processo de nanoestruturação das superfícies. 55
Figura 20 - Desenho esquemático do aparato experimental. 56
Figura 21 - Seção de testes. (a) vista explodida e (b) vista do corte transversal. 57
Figura 22 - Aparato experimental para aquisição de imagens e medição do ângulo de contato. 58
Figura 23 - Desenho esquemático do aparato experimental para avaliação da velocidade de espalhamento. 59
Figura 24 - Diagrama do procedimento experimental para obtenção das imagens de gotas sésseis. (a) procedimento de gotejamento; (b) ajuste de foco em corpo de prova (amostra) de validação. 60
Figura 25 - Procedimento para o pós-processamento da imagem de uma gota séssil, incluindo a medição do ângulo de contato. 62
Figura 26 - Corpos semiesféricos usados para validação das medidas do ângulo de contato. . 63
Figura 27 - Condutividade térmica efetiva dos nanofluidos utilizados, a T = 300 K. 66
Figura 28 - Comparação entre dados experimentais de outros autores, aqueles obtidos no presente estudo e correlações usuais para a condutividade térmica efetiva dos nanofluidos (linhas pontilhadas). 67

Figura 29 - Influência da concentração de nanofluidos sobre o ângulo de contato estático; (a) gotas de nanofluidos sobre as superfícies não nanpestrutuadas; (b) gota de água deionizada sobre as superfícies nanoestruturadas.* 72
Figura 30 - Evolução da área molhada, usando uma gota de água deionizada, para superfícies lisas nanoestruturadas com Al_2O_3 ou Fe_2O_3 ao longo de 10^4 ms. 73
Figura 31 - Evolução da área molhada, usando uma gota de água deionizada, para superfícies rugosas nanoestruturadas com Al_2O_3 ou Fe_2O_3 ao longo de 10^4 ms. 74
Figura 32 - Fator de circularidade para superfícies lisas nanoestruturadas com Al_2O_3 ou Fe_2O_3 ao longo de 10^4 ms. 75
Figura 33 - Fator de circularidade para superfícies rugosas nanoestruturadas com Al_2O_3 ou Fe_2O_3 ao longo de 10^4 ms. 76
Figura 34 - Evolução da área molhada em uma superfície lisa recoberta com nanopartículas de Al_2O_3 (alta concentração). 77
Figura 35 - Influência da rugosidade sobre o ângulo de contato estático. 80
Figura 36 - Alterações superficiais devidas ao processo de ebulição de nanofluidos e suas influências sobre o ângulo de contato. (a) superfície lisa; (b) superfície rugosa. 81
Figura 37 - Coeficiente de transferência de calor experimental para água e nanofluidos de Al2O3-água e Fe2O3-água, para diferentes concentrações. (a) superfície lisa. (b) superfície rugosa.* 82
Figura 38 - Espalhamento de uma gota de água sobre as superfícies nanoestruturadas com maguemita e alumina de alta concentração. 117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo sobre a preparação de nanofluidos. 24
Tabela 2 - Resultados experimentais da condutividade térmica de nanofluidos (continua). ... 30
Tabela 3 - Comparação entre os modelos de predição da condutividade térmica. 32
Tabela 4 - Modelos propostos para obtenção da condutividade térmica (continua). 32
Tabela 5 - Resultados experimentais para a viscosidade de nanofluidos (continua). 36
Tabela 6 - Modelos clássicos de predição da viscosidade. 37
Tabela 7 - Modelos de predição para a viscosidade dos nanofluidos. 38
Tabela 8 - Comparação dos métodos de medição do ângulo de contato reportado por diferentes autores (continua). 46
Tabela 9 - Estudos sobre o efeito dos nanofluidos na ebulição nucleada (continua). 48
Tabela 10 - Estudos experimentais para ebulição nucleada em superfície aquecida com deposição de nanopartículas (continua). 49
Tabela 11 - Resultados da medida do ângulo de contato para os corpos de prova semiesféricos simulando gotículas. 64
Tabela 12 - Medidas de condutividade térmica, em $W.m^{-1}K^{-1}$, dos fluidos utilizados no presente estudo. 65
Tabela 13 - Interação superficial entre superfícies não nanoestruturadas e gotas de água ou nanofluidos em diferentes concentrações (continua). 68
Tabela 14 - Interação superficial entre superfícies nanoestruturadas (por meio da ebulição de nanofluidos em diferentes concentrações) e gotas de água deionizada (continua). 70
Tabela 15 - Análise das características das superfícies de aquecimento antes e depois dos ensaios de ebulição com nanofluidos (processo de nanoetsruturação empregado neste estudo) (continua). 78

LISTA DE SÍMBOLOS

A_m	Área molhada da superfície, em [mm²]
dp	Diâmetro médio da nanopartícula [µm]
f	Força de molhamento[N]
g	Aceleração da gravidade [m/s²]
h	Coeficiente de transferência de calor [W/m²K]
I_c	Fator de circularidade[-]
k -	Condutividade térmica [W/m.K]
k_{eff}	Condutividade térmica efetiva [W/m.K]
k_f	Condutividade fluido base [W/m.K]
k_s	Condutividade térmica da superfície [W/m.K]
k_p	Condutividade térmica da partícula ou nanopartícula [W/m.K]
P_m,	Perímetro molhado, em [mm]
q''	Fluxo de calor [W/m²]
T_{rf}	Ponto de congelamento do fluido base, K
vol.%	Porcentagem em volume de nanopartículas no fluido base [-]
wt.%	Porcentagem em peso de nanopartículas no fluido base [-]

Letras gregas

$\emptyset$	Concentração de nanofluidos
μ_{eff}	Viscosidade efetiva
δ	Tensão de adesão [N/m]; parâmetro de interação superfície-fluido [-]
φ_p	Fração de volume sólido de nanopartículas

Lista de Subscritos

l	Líquido
v	Vapor
SV	Sólido-vapor
SL	Sólido-líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **15**

1.1 Motivação **15**

1.2 Objetivos **16**

1.3 Organização do Texto **17**

2 REVISÃO DA LITERATURA **18**

2.1 Principais Características da Utilização de Nanofluidos em Processos Térmicos **18**

2.2 Preparação dos Nanofluidos **19**

2.2.1 Estabilização dos Nanofluidos **20**

2.3 Caracterização dos Nanofluidos **25**

2.3.1 Condutividade Térmica **25**

2.3.2 Viscosidade dos Nanofluidos **34**

2.4 Ângulo de Contato e Molhabilidade **38**

2.4.1 Técnicas para Medição do Ângulo de Contato **40**

2.5 Influência do Uso de Nanofluidos sobre o Coeficiente de Transferência de Calor **48**

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL **53**

3.1 Preparação dos Nanofluidos **53**

3.2 Preparação das Superfícies **54**

3.3 Descrição do Aparato Experimental para Medição do Ângulo de Contato **57**

3.3.1 Procedimento Experimental para Medição do Ângulo de Contato **60**

3.3.2 Validação do Aparato Experimental e Procedimento para Determinação do Ângulo de Contato **63**

4 RESULTADOS E ANÁLISE **65**

4.1 Condutividade Térmica **65**

4.1.1 Comparação com Dados da Literatura **67**

4.2 Viscosidade **68**

4.3 Ângulo de Contato **68**

4.4 Rugosidade **77**

4.5 Influência dos Diferentes Parâmetros Estudados sobre o CTC em Ebulição em Piscina com o Uso de Nanofluidos **81**

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. **84**

5.1 Conclusões **84**

5.2 Recomendações Futuras 85

6 REFERÊNCIAS 86

APÊNDICE A – Rotina computacional desenvolvida, em Matlab®, para análises de ângulo de contato 105

APÊNDICE B – Estudo da evolução da área molhada das superfícies nanoestruturadas 117

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Uma grande revolução tecnológica tem marcado as últimas décadas, percebida, principalmente, nos meios de comunicação e tecnologia da informação e em novos dispositivos eletrônicos. Com efeito, o desenvolvimento de novas tecnologias, associado à minimização dos custos de fabricação e instalação, necessita da dissipação de fluxos de calor cada vez maiores e problemas relacionados à dissipação térmica começam a se tornar fatores limitantes de projeto, particularmente, em aplicações que possuem componentes que dependem do controle de temperatura para garantia da sua integridade física e perfeito funcionamento.

Entre os diversos métodos utilizados, a transferência de calor associada à mudança de fase, e em particular à ebulição, é objeto de vários estudos recentes (ULCAY, 2014; BORMASHENKO, 2015; LEONG; HO; WONG, 2017; ALIREZAIE *et al.*, 2018; DRELICH, 2019). O processo de ebulição possibilita a transferência de elevados fluxos de calor com pequenas diferenças entre as temperaturas da superfície aquecida e a do fluido.

A otimização da transferência de calor por ebulição necessita de um bom conhecimento dos mecanismos fundamentais que governam esse fenômeno. Dentre os estudos que são realizados, apenas alguns focam na física do fenômeno de ebulição; enquanto, que o número de correlações que permitem estimar o coeficiente de transferência de calor para configurações específicas aumenta a cada década. Essas correlações, no entanto, são importantes para dimensionar novos equipamentos e estimar sua eficiência. Porém, a sua utilidade diminui rapidamente quando os parâmetros se afastam do intervalo para o qual a correlação foi desenvolvida. Por este motivo é muito importante desenvolver trabalhos que aprimorem o conhecimento dos mecanismos fundamentais da ebulição nucleada.

Os recentes avanços nas técnicas de melhora da transferência de calor consistem na utilização de nanoestruturas e nanofluidos. Nanofluidos são suspensões diluídas com nanopartículas sólidas menores que 100 µm em um fluido-base (CHOI, 1995), os quais foram desenvolvidos com o intuito de apresentar uma condutividade e difusividade térmica significativamente maiores em comparação aos fluidos tradicionais. Muitos experimentos com nanofluidos têm sido desenvolvidos nos últimos anos (FANG *et al.*, 2016; KHAN; ATIEH; KOÇ, 2018; RUDYAK, 2019), mas ainda existem muitas divergências do efeito destes sobre o coeficiente de transferência de calor.

Outra técnica consiste em tratar/modificar a superfície aquecida de forma a variar suas características mediante algum tratamento mecânico ou químico (superfícies nano ou micro-estruturadas), através do qual o aumento da rugosidade leva ao aumento da área de transferência de calor e ao mesmo tempo ao acréscimo de sítios de nucleação (LIANG; MUDAWAR, 2019). Por exemplo, Bizi-Bandoki *et al*. (2011) modificaram a rugosidade e a molhabilidade de metais através da irradiação pulsante de laser.

Vários estudos (SUGRUE; BUONGIORNO; MCKRELL, 2014; VERMA; TIWARI, 2015; MANETTI *et al*., 2017; SOUZA *et al*., 2018) têm mostrado uma melhora significativa no fluxo de calor crítico, tanto para superfícies nanoestruturadas quanto as que utilizam nanofluidos. Entretanto, ainda existem divergências em relação à porcentagem e ao mecanismo responsável por este aumento.

As técnicas de aplicação de nanofluidos e a modificação da superfície aquecida mediante processos mecânicos/químicos ainda apresentam divergências quanto aos seus resultados (ALIREZAIE *et al*., 2018), como mencionado anteriormente, gerando várias questões a serem resolvidas pela comunidade científica. Entre as questões importantes a serem resolvidas estão: mudanças nas propriedades termofísicas do fluido-base com a adição das nanopartículas, efeito dos nanofluidos e das superfícies nanoestruturadas na molhabilidade e no ângulo de contato dos fluidos, influência da deposição das nanopartículas sobre a superfície aquecedora, efeito das nanopartículas que permanecem em suspensão no fluido-base durante a ebulição, explicação física do acréscimo no fluxo de calor crítico (KAMEL *et al*., 2018), comportamento do coeficiente de transferência de calor e o mecanismo de transferência de calor em ebulição nucleada com nanofluidos.

1.2 Objetivos

Dentro desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo a construção de um aparato experimental que permitiu a visualização da região de contato triplo de uma gota séssil e o desenvolvimento de uma rotina computacional que permitiu a análise do formato da gota para determinação do ângulo de contato estático e da interação fluido-superfície.

Além desse, foi desenvolvido o estudo teórico e experimental da influência das propriedades termofísicas e concentração de nanofluidos, bem como, das características geométricas da superfície aquecedora sobre o ângulo de contato, a molhabilidade e o coeficiente de transferência de calor em ebulição. Tal análise foi realizada mediante a estudos de vários fatores de interferência por meio de simples trocas da superfície e do fluido de trabalho. Atenção tam-

bém foi dada à preparação e caracterização dos nanofluidos (Al_2O_3 – água e Fe_2O_3 – água), por meio de análise experimental da condutividade térmica e da viscosidade dinâmica para diferentes concentrações. Assim, foi possível a avaliação dos métodos de predição das propriedades termofísicas existentes na literatura, por meio da comparação com os resultados experimentais obtidos pelo presente estudo.

1.3 Organização do Texto

O presente estudo está dividido em 5 capítulos, sendo este o capítulo 1 inicial.

O segundo capítulo é composto de uma revisão da bibliografia mais recente, contemplando o estado atual dos estudos com nanofluidos e métodos de medição e predição de propriedades termofísicas de nanofluidos, ângulo de contato e molhabilidade, bem como, seus efeitos na troca térmica.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia experimental utilizada, onde são descritos o desenvolvimento da bancada experimental para estudo do ângulo de contato e molhabilidade, as funções básicas da rotina computacional implementada para análise de pós-processamento das imagens obtidas, além do modo de preparação para obtenção dos nanofluidos e das superfícies. Adicionalmente, tem-se a descrição dos testes realizados para análise da área molhada em função do tempo.

O quarto capítulo corresponde à análise e discussão dos resultados obtidos experimentalmente, incluindo comparação com aqueles encontrados na literatura.

O quinto capítulo inclui as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, se apresentam as principais características de estudos envolvendo a utilização de nanofluidos e superfícies nanoestruturadas em processos térmicos com mudança de fase. Incluem-se, também, os principais métodos de preparação e estabilização dos nanofluidos e a caracterização das propriedades termofísicas como: condutividade térmica e viscosidade.

Adicionalmente, apresentam-se os conceitos, técnicas e métodos utilizados na medição do ângulo de contato e sua relação com a molhabilidade de superfícies. Finalizando o Capítulo, apresenta-se a influência do uso de nanofluidos sobre o processo de transferência de calor com mudança de fase (ebulição em piscina).

2.1 Principais Características da Utilização de Nanofluidos em Processos Térmicos

As nanopartículas (usualmente metálicas como óxido de ferro, prata, ouro ou alumínio) dispersas em um fluido-base possuem uma condutividade térmica mais elevada, alterando as propriedades termofísicas desses. Deste modo, a suspensão destas partículas em meio aos fluidos convencionalmente utilizados (água, óleo ou etileno glicol) acarreta uma série de benefícios como: aumento da condutividade térmica, da estabilidade de dispersão (por serem nanométricas estariam menos sujeitas à ação da gravidade e, em consequência, à sedimentação), diminuição da dimensão de sistemas (diminuição em tamanho e peso de sistemas), entre outros. Esses fatores têm gerado muito interesse e pesquisa nos últimos anos, intensificando publicações em torno do tema nanofluidos (GANVIR; WALKE; KRIPLANI, 2017), superfícies nanoestruturadas (KUMAR *et al*., 2018; LIANG; MUDAWAR, 2019) e sua influência sobre o coeficiente de transferência de calor (CTC) e fluxo de calor crítico (FCC) (KUMAR *et al*., 2018).

Ambos os comportamentos do coeficiente de transferência de calor (CTC) e do fluxo de calor crítico (FCC) podem ser atribuídos, principalmente, às mudanças na molhabilidade da superfície causada pela deposição de nanopartículas durante o processo de ebulição do nanofluido. A molhabilidade da superfície aumenta com a presença da camada depositada de nanopartículas, a qual promove um melhor remolhamento da superfície e leva a um aumento do FCC. A redução do ângulo de contato devido à deposição de nanopartículas explica parcialmente o comportamento do CTC, uma vez que a frequência de saída e o diâmetro das bolhas de vapor diminuem com a formação da nanocamada sobre a superfície. Em relação aos resul-

tados para o CTC, as divergências encontradas na literatura confirmam que o processo de ebulição é muito sensível às variações nas características superficiais causadas pelos nanofluidos e superfícies nanoestruturadas, principalmente, quanto ao número e a forma das microcavidades.

2.2 Preparação dos Nanofluidos

Dois métodos principais são utilizados para obtenção de nanofluidos: o método de um passo e o método de dois passos, descritos a seguir.

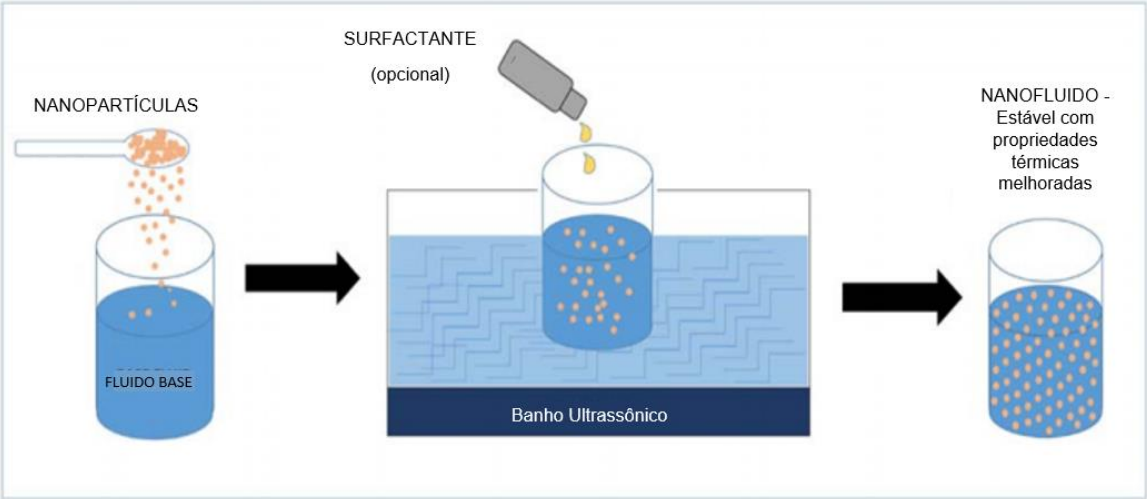
O método de um passo consiste na dispersão das nanopartículas no fluido-base simultaneamente ao processo de obtenção das mesmas, que pode ocorrer por deposição física a vapor ou por método químico líquido. O processo de secagem, armazenamento, dispersão e transporte são evitados neste método, de modo que a aglomeração é minimizada e, portanto, a dispersão de nanopartículas no fluido-base é melhorada (LI *et al*., 2014).

A desvantagem deste processo é que resíduos de reagentes podem contaminar o nanofluido devido às reações incompletas ou a não estabilização, diminuindo o grau de pureza do nanofluido, contribuindo para formação de aglomerados de nanopartículas (CHAUPIS, 2011).

O método de dois passos é mais utilizado para a obtenção de nanofluidos, pois as nanopartículas são obtidas, a princípio, na forma de pós secos e então dispersos 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 das nanopartículas no fluido-base a fim de evitar a aglomeração das mesmas. Quando comparado ao método de um passo, o método de dois passos funciona melhor para nanopartículas de óxidos como, por exemplo, alumina e titânia, porém este método de acordo com Wang e Mujumdar (2008 a e b) e Rainho Neto (2011) é menos estável para partículas metálicas.

O método de dois passos 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 solução. Na Figura 1 é representado o método de preparação de dois passos ou duas etapas.

Figura 1 - Síntese de nanofluidos pelo método de duas etapas



Fonte: Adaptado de Sezer *et al*. (2019).

Na Figura 1 tem-se a adição de surfactante e o banho ultrassônico, os quais são duas formas de aumentar a estabilidade da mistura nanopartícula e fluido-base. Os principais métodos de estabilização serão descritos na seção a seguir.

2.2.1 Estabilização dos Nanofluidos

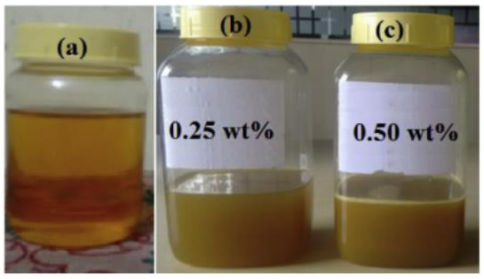
A preparação de uma suspensão homogênea e estável é ainda uma técnica de difícil execução, em parte devido às fortes interações de Van der Waals entre as nanopartículas, as quais acarretam em aglomerações (*clusters*). Essas aglomerações resultam na diminuição das propriedades termofísicas dos nanofluidos, como a condutividade térmica, viscosidade e calor específico (GHADIMI; SAIDUR; METSELAAR, 2011). Além disso, a formação de *clusters* pode levar à sedimentação das nanopartículas e, consequentemente, no aumento da resistência térmica em superfícies de aquecimento e no entupimento de trocadores de calor compactos baseados em microcanais.

Os principais métodos de avaliação da estabilidade da solução, elencados por ordem de dificuldade de execução e relevância, são: sedimentação, centrifugação, potencial zeta, análise espectral de absorvência, e análise por microscopia eletrônica.

O primeiro método, e também o mais simples, para a avaliação da estabilidade de nanofluidos é obtido a partir da análise da sedimentação das nanopartículas. A quantidade de nanopartículas sedimentadas devido à ação de uma força de campo externa (gravidade, na maioria dos casos estudados) é pesada ou medida em termos de volume. São considerados

estáveis os nanofluidos em que a quantidade de nanopartículas no fluido-base, e consequentemente, sua concentração são mantidas constantes. O efeito da sedimentação pode ser observado a partir de imagens tiradas por câmera fotográfica após um longo período de tempo no qual o nanofluido foi preparado (horas ou dias). Sunil *et al*. (2019) utilizaram o método de sedimentação e, a partir da imagem apresentada na Figura 2, concluíram que a estabilização do nanofluido de CaO em óleo de farelo de arroz (lubrificante biodegradável) depende do pH da solução formada e de sua concentração volumétrica.

Figura 2 - Nanofluidos de CaO-óleo para várias concentrações após dias da preparação. a) Óleo de farelo de arroz isento de aditivos (b) 0,25 wt% de nanofluido CaO (c) 0,50 wt% de nanofluido CaO



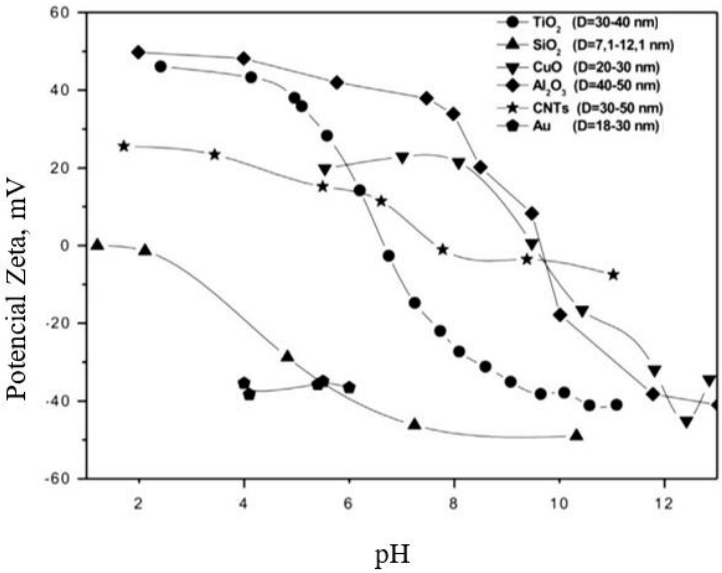
Fonte: Sunil *et al*. (2019).

Devido ao longo período de tempo necessário para se notar a sedimentação, o método de centrifugação foi desenvolvido, no qual o nanofluido é submetido a uma centrífuga e em questão de horas a estabilidade é obtida e analisada.

A estabilidade das partículas dispersas é influenciada pela sua carga de superfície, ou potencial zeta. O significado do potencial zeta (negativo ou positivo) é que seu valor pode estar relacionado à estabilidade de dispersões coloidais. É bem conhecido que suspensões com o potencial zeta acima de 30 mV é fisicamente estável e, acima de 60 mV, possui excelente estabilidade; enquanto, uma suspensão com valores abaixo de 20 mV tem estabilidade, e abaixo de 5 mV, a aglomeração é pronunciada (MÜLLER, 1996).

Existem mudanças do potencial zeta em função dos valores de pH. A Figura 3 mostra o potencial zeta de vários tipos de nanopartículas dispersas em água sem a adição de qualquer surfactante.

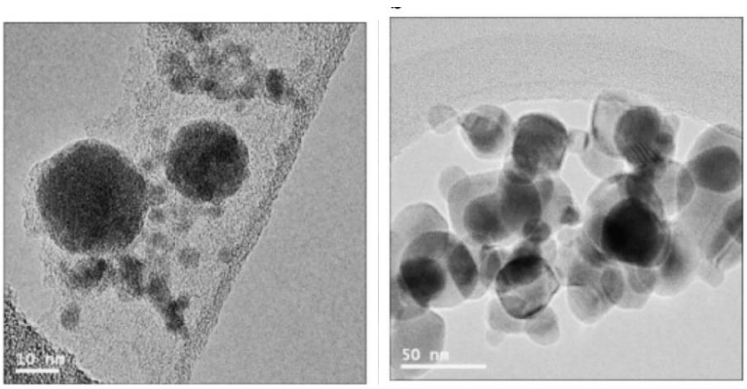
Figura 3 - Potencial zeta de várias nanopartículas dispersas em água em função do pH



Fonte: Wen e Ding (2005).

Tem-se ainda, como ferramentas para determinação da estabilidade dos nanofluidos, a análise espectral da absorvência e a microscopia eletrônica. Esta última se divide em dois grupos muito utilizados: a microscopia eletrônica de transmissão (*Transmission Electron Microscopy*, TEM) e a microscopia eletrônica de varredura (*Scanning Electron Microscopy*, SEM). São métodos extremamente úteis na obtenção de imagens com alta resolução e fidedignidade ao real estado da mistura nanopartícula e fluido-base, auxiliando na visualização da formação de aglomerações. Nas imagens da Figura 4 têm-se análises realizadas por microscopia eletrônica de varredura e de transmissão, obtidas por Lee, Park e Bang. (2012), para o nanofluido de óxido de cobre em água, utilizando o método de fabricação de uma e duas etapas.

Figura 4 - Imagens TEM de nanopartículas de CuO de acordo com os métodos de fabricação: (a) método de uma etapa e (b) método de duas etapas



Fonte: Lee, Park e Bang. (2012).

Depois de avaliada a estabilidade dos nanofluidos, caso seja necessário, existem técnicas capazes de melhorar a dispersão de nanopartículas em fluidos-base. De acordo com Manetti (2017), a adição de surfactante é um dos métodos mais comuns para minimizar e até evitar a aglomeração de nanopartículas, melhorando a estabilidade da mistura coloidal; o surfactante ou dispersante atua na diminuição da tensão superficial do fluido-base, contribuindo para uma melhor dispersão das nanopartículas e, por consequência, evitando a sua aglomeração.

Outro efeito causado pelo uso de surfactantes é o surgimento de uma força de repulsão entre as nanopartículas em suspensão causada pelo potencial zeta, que aumenta devido à carga superficial das nanopartículas suspensas no fluido-base. Vários tipos de surfactantes têm sido utilizados para diferentes tipos de nanofluidos: dodecilsulfato de sódio (SDS), dodecilbenzenosulfonato de sódio (SDBS), sal e ácido oleico, brometo de cetil trimetil amônio (CTAB), brometo de dodecil trimetil amônio (DTAB), octanoato de sódio (SOCT) e polivinilpirrolidona (PVP), entre outros (MANETTI, 2017).

Além da adição de surfactantes, outra característica que pode ser controlada a fim de garantir uma boa estabilidade é o pH, pois a estabilidade dos nanofluidos relaciona-se às suas propriedades eletro-cinéticas. Rainho Neto (2011) relata a existência de um pH ótimo, no qual o potencial zeta é máximo. De forma, que controlar o pH pode interferir aumentando a estabilidade devido às fortes forças repulsivas entre as partículas.

Li e Xuan (2009), Tamjid e Guenther (2010), e Yang *et al* (2012) utilizaram-se de agitação ultrassônica, dado que a mesma não altera as propriedades superficiais do nanofluido em relação aos métodos já mencionados. Banho ultrassônico, ultrassonicação, misturadores e homogeneizadores são métodos comumente empregados por pesquisadores para obtenção de nanofluidos sem aglomeração e sem a necessidade de inserção de surfactantes e controle de pH (SIDIK *et al*., 2014).

De maneira simples, no banho ultrassônico a amostra está mergulhada no banho e a vibração é transmitida pela água ou outro fluido; na ultrassonicação, a vibração é transmitida diretamente pela ferramenta do sonotrodo. Esses são tidos como métodos similares, já que o efeito de vibração transferido à mistura varia na faixa de 10 a 50 kHz (TAJIK *et al*, 2012).

Por fim, uma síntese dos métodos de preparação e estabilidade dos nanofluidos estudados pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo sobre a preparação de nanofluidos

Autores	Partícula Material e Forma	Fluido-base	Parâmetros	Surfactante/ Controle pH	Estabilidade do Nanofluido
Hu *et al*. (2008)	AlN aproximadamente esférico.	Etanol	Ø = 0,5-4 vol%, D = 20 nm Ø ≤ 4vol%, D = 20 nm,	Óleo de rícino	Estável por mais de duas semanas.
Choi *et al*. (2008)	AlN esférico Al_2O_3 esférico em forma de barra	Óleo	D =2 nm x 20-200 nm, D = 13 nm	Ácido oleico	Sedimentação visível para o nanofluido de Al_2O_3 não filtrado após um mês.
Phuoc e Massoudi (2009)	Fe_2O_3	Água deionizada (DI)	Ø =1-4 vol%, D = 20-40 nm	Nenhum	Nenhuma aglomeração foi formada duas horas após a sonicação. Nanofluidos permaneceram estáveis por cerca de duas semanas.
Moosavi *et al*. (2010)	ZnO aproximadamente esférico.	Etileno glicol	Ø ≤ 3vol% Ø=0,005; 0,3; 0,7 wt%	Citrato de amônia	Estável por vários meses.
Mo *et al*. (2012)	TiO_2 (forma de barra), TiO_2 (esférico)	Água deionizada (DI)	D = 15 nm, D = 20 nm x 50 nm	SDS	Nanofluidos mantiveram estáveis por 286 h.
Fedele, Colla, Bobbo. (2012)	TiO_2	Água bidestilada	Ø = 1%, 10%, 20%, 35 wt%	Ácido acético	Suspensão estável por 35 dias usando sonicação.
Rohini Priya *et al*. (2012)	CuO não-esférico CuO	Água bidestilada	Ø = 0,016 vol% relação comprimento/espessura = 10 Ø = 0,1 % e 0,2 vol%	Tiron	Estabilidade confirmada por observação visual.
Selvakumar e Suresh (2012)	Al_2O_3 aproximadamente esférico	Água deionizada (DI)	D = 27-37 nm Ø = 0,3;0,4 e 0,5 vol% D = 40,3 nm	Nenhum	Nanofluidos estáveis após uma semana.
Hegde, Rao, Reddy (2012)	Al_2O_3 esférico	Água deionizada (DI)	Ø =0,1-0,5 g/L, D = 80 nm	Nenhum	Nanofluido estável por várias semanas sem sedimentação visualmente observável.
Kathiravan *et al*. (2012 ou 2010?)	Cu policristalino	Água deionizada (DI)	Ø =0,25; 0,5 e 1,0 wt% D = 10 nm	PVP SDS	Nanopartículas dispersas uniformemente em água, mesmo após 10 horas.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

2.3 Caracterização dos Nanofluidos

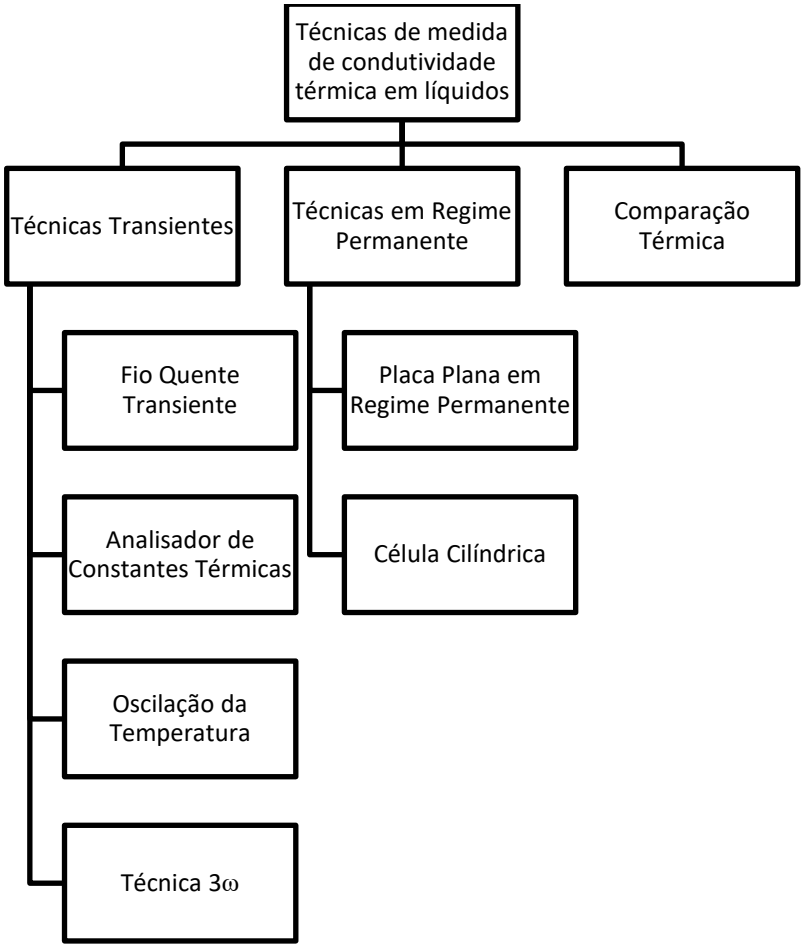
O estudo e aplicações da mistura de nanopartículas em suspensão em diferentes fluidos-base partiram do princípio de aumentar a capacidade de remoção de calor de maneiras mais eficientes e contribuir para avanços em outras áreas, tais como: indústria eletrônica, de geração de energia fotovoltaica, aplicações biomédicas, e em resfriamento de reatores nucleares (DEVENDIRAN; AMIRTHAM, 2016). Entretanto, isso somente é possível graças às alterações nas propriedades termofísicas que a adição das nanopartículas impõe aos fluidos-base (SEZER, ATIEH e KOÇ, 2018). Dentre as propriedades termofísicas mais estudadas estão a condutividade térmica, a viscosidade, a densidade e o calor específico, descritos nas seções a seguir.

2.3.1 Condutividade Térmica

O número de Nusselt e o número de Prandtl são dois parâmetros importantes para analisar a capacidade de transferência de calor de um fluido sob condições de escoamento laminar e turbulento. Esses números dependem da condutividade térmica dos fluidos. Portanto, faz-se necessário que a condutividade térmica seja conhecida a fim de analisar a capacidade de transferência de calor de um nanofluido (SHAHSAVANI; AFRAND; KALBASI, 2018).

Existem várias técnicas para medir a condutividade térmica dos nanofluidos, entre essas: técnica do fio quente transiente, método da oscilação da temperatura, o método das placas paralelas e o método 3ω. Estes métodos podem ser separados e ordenados de acordo com o diagrama mostrado na Figura 5.

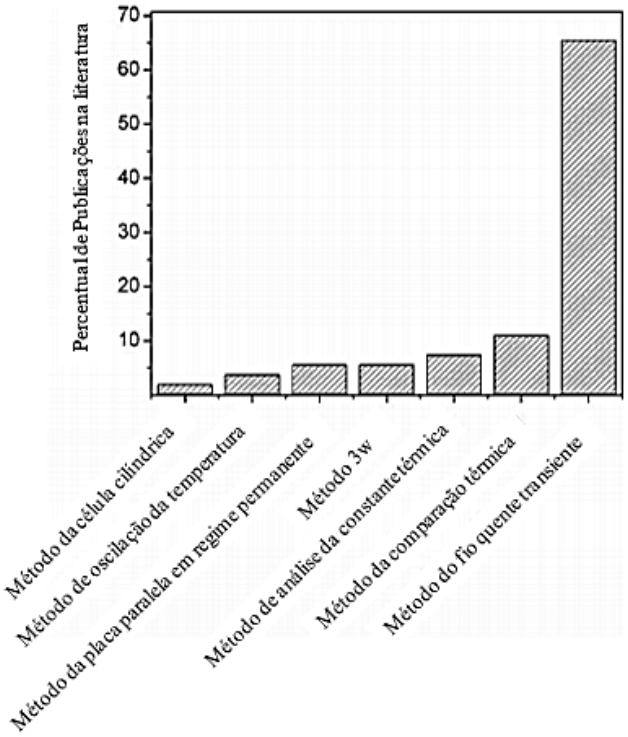
Figura 5 - Diferentes técnicas de medição de condutividade térmica para nanofluidos



Fonte: Adaptado de Paul *et al*. (2010).

Como pode ser observado na Figura 6, o método de fio quente transiente e o método de análise por comparação térmica possuem ampla utilização em publicações relacionadas ao estudo das propriedades termofísicas de nanofluidos.

Figura 6 - Comparação das técnicas de medição de condutividade térmica para nanofluidos



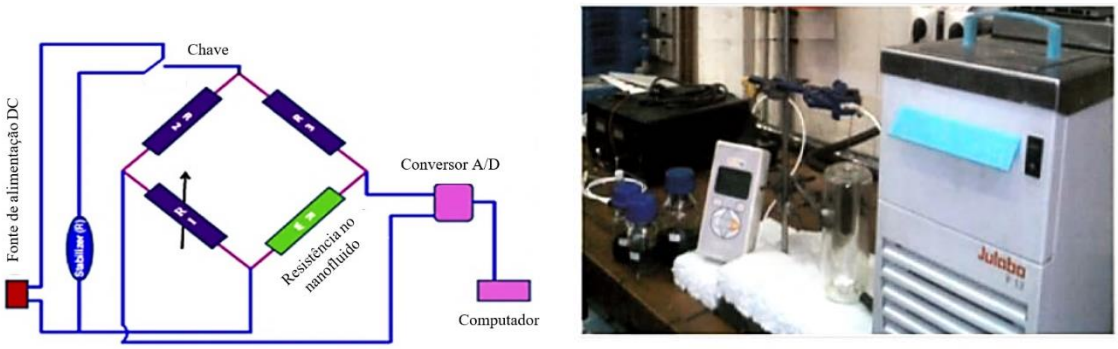
Fonte: Adaptado de Paul *et al*. (2010).

Segundo a literatura (HONG; YANG; CHOI, 2005; MURSHED; LEONG; YANG, 2005; BECK; SUN; TEJA, 2007; HEMMAT *et al*., 2014; GANVIR, WALKE; KRIPLANI, 2017), a técnica do fio quente transiente (THW, *transient hot-wire*) é a mais utilizada. Esta se baseia no princípio de medição de temperatura e resposta temporal do fio submetido a um pulso elétrico abrupto. Um fio longo e fino de platina é usado como uma sonda que funciona como um aquecedor de linha dupla e como um sensor de temperatura, sendo inserido no nanofluido para aferição. A temperatura do fio é aumentada pelo fornecimento de corrente constante através de aquecimento resistivo. O calor dissipado no sensor é transferido para o nanofluido circundante através de condução, aumentando assim a sua temperatura. Este aumento de temperatura depende da condutividade térmica do nanofluido. A condutividade térmica do fluido, Equação (1), é obtida a partir da mudança relativa na resistividade do fio, medida por meio de um sistema de medição resistivo de quatro fios. As vantagens deste método são baixo custo e fácil implementação. O diagrama do aparato experimental e um analisador podem ser vistos nas imagens da Figura 7.

$$k = \left[\frac{q''}{4\pi(\Delta T_2 - \Delta T_1)}\right] ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad (1)$$

onde k é a condutividade térmica medida do fluido teste, q'' é o fluxo de calor imposto pela resistência elétrica para aquecimento do fluido, T_1 representa a temperatura inicial do fluido e T_2 a temperatura após a aplicação do fluxo de calor.

Figura 7 - Diagrama da técnica do fio quente transiente e analisador comercial



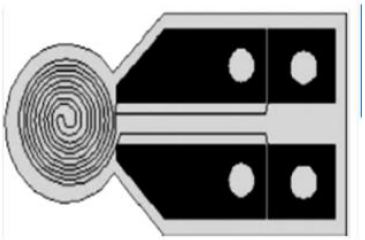
Fonte: Sarviya e Fuskele (2017).

O método da oscilação da temperatura consiste em medir a variação da temperatura nas extremidades de um cilindro contendo o fluido a ser analisado. Essas variações de temperatura nas extremidades e em algum ponto no interior do cilindro dão origem ao valor da difusividade térmica. Então, conhecendo a densidade e o calor específico do material, calcula-se a condutividade térmica (BHATTACHARYA *et al*., 2006).

O método das placas paralelas é baseado na lei de Fourier para condução de calor, onde é gerado um fluxo unidimensional de calor através de uma fina camada de fluido de teste.

Por sua vez, a técnica da fonte plana transitória (TPS, *transient plane source*) é utilizada pelo analisador de constantes térmicas (TCA, *thermal constants analyzer*) para medir a condutividade térmica do nanofluido. Neste método, o elemento TPS consiste de uma folha fina eletricamente condutora de um padrão conhecido alocada dentro de uma camada isolante (Figura 8), de forma que atua tanto como fonte de calor quanto como sensor de temperatura. Semelhante ao método do fio quente transiente, o método TPS também usa a lei de Fourier da condução de calor como seu princípio fundamental para medir a condutividade térmica.

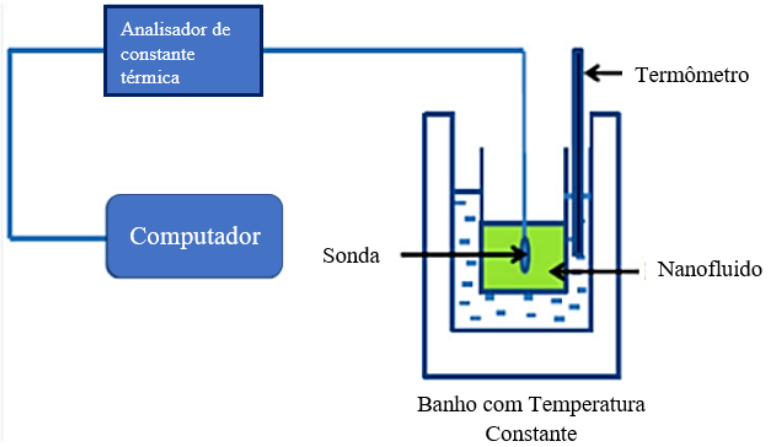
Figura 8 - Sensor TPS



Fonte: Paul *et al*. (2010).

O aparato experimental está ilustrado na Figura 9, o qual consiste de um banho termostático, um recipiente e um termômetro. O procedimento de medição consiste em ter o elemento TPS imerso verticalmente no recipiente contendo o nanofluido, o qual está imerso no banho à temperatura constante. A temperatura do nanofluido é medida por um termômetro. A condutividade térmica do nanofluido é determinada pela medição da resistência do elemento TPS.

Figura 9 - Configuração experimental para medição da condutividade térmica de nanofluidos



Fonte: Adaptado de Sarviya e Fuskele (2017).

O método 3ω é amplamente utilizado para medir as propriedades termofísicas de filmes finos e substratos sólidos. Uma corrente elétrica senoidal com uma frequência angular 2ω passa através de um aquecedor de película fina de metal modelado sobre o substrato sólido de interesse. O aquecedor de metal também funciona como um termômetro. Devido ao aquecimento com uma frequência duas vezes maior que a corrente de entrada, a temperatura do metal também oscila com uma frequência angular 2ω. Uma vez que a resistência elétrica do aquecedor de metal é uma função linear da temperatura, a oscilação da temperatura pode ser medida indiretamente através da medição da tensão associada 3ω através do aquecedor de

metal. A amplitude e a fase da oscilação da temperatura podem ser utilizadas para determinar as propriedades termofísicas do substrato, uma vez que estes parâmetros estão relacionados uns com os outros através da solução da equação de energia para a geometria dada e um conjunto de condições de contorno (LEE *et al*., 2008).

Mais recentemente, conforme mostrado por Ahmadi *et al*. (2018), muitos pesquisadores utilizam-se de uma solução comercial que é o equipamento KD2-pro®, produzido pela empresa *Decagon Devices Inc*., que aperfeiçoa o processo de obtenção dos dados de condutividade térmica de nanofluidos.

A Tabela 2 tem por objetivo apresentar os resultados encontrados na literatura a partir de estudos experimentais acerca da condutividade térmica de diversos nanofluidos.

Tabela 2 - Resultados experimentais da condutividade térmica de nanofluidos (continua)

Autores	**Tipo de partícula/ concentração**	**Partícula Tamanho/forma**	**Fluido-base**	**Incremento de condutividade**	**Método de medição**
Sahooli e Sabbaghi (2013)	CuO / 1 vol%	34 nm/-	Etileno glicol	60,4%	THW
Sundar *et al*. (2013)	CuO / 0,8 vol%	-	Água – Etileno glicol (50:50 wt%)	15,6%	Regime permanente
Suganthi *et al*. (2014)	CuO / 1,5 wt%	22-28 nm / esférico	Propilenoglicol	38% 19%	THW
Manimaran *et al*. (2014)	CuO /-	20 nm / esférico	Óleo de motor Etileno glicol Água destilada Água deionizada	12,4%	THW
Rashin e Hemalatha (2014)	CuO / 0,48 vol%	20 nm / esférico	Etileno glicol	1,5%	THW
Ponmani *et al*. (2014)	CuO /0,5 wt%	< 50 nm / esférico	Água deionizada	23%	THW
Sundar *et al*. (2014)	Al_2O_3/ 0,8 vol%	-	Água - Etileno glicol (50:50 wt%)	9,8%-17,9%	THW e Método do regime permanente
Prakash *et al*. (2015)	CuO / -	<100 nm / -	Mistura de água de Etileno glicol-HPLC (40: 6001%)	60%	-
Akhavan-Behabadi *et al*. (2015)	CuO / 1,5 wt%	40 nm /esférico	Óleo	6,9%	THW
Senthilraja *et al*. (2015)	CuO / -	27 nm / -	Água destilada	-	THW
Khairul *et al*. (2015)	Al_2O_3 / 0,15 vol% Al_2O_3 / 0,8 vol%	10nm / -	Água deionizada Água - Etileno glicol (50:50 wt%)	2,4% 4,8% 8,0% 13%	THW e Método do regime permanente
Khairul *et al*. (2016)	CuO / 0,15 wt%	30-50 nm /-	Água deionizada	11%	THW

Tabela 2 - Resultados experimentais da condutividade térmica de nanofluidos (conclusão)

Chitra e Kumar (2016)	CuO / 0,6 wt%	30 nm / bastão	Água	75%	THW
Agarwal *et al*. (2016)	CuO / 2 vol%	55 nm / esférico	Propilenoglicol	27% 40%	THW
Kamalgharibi *et al*. (2016)	CuO / 0,1 wt%	40 nm / -	Água deionizada	-	-
Kumar e Sonawane (2016)	CuO / 0,06 vol%	26 nm / formato bastão	Água - Etileno glicol	25 21%	THW

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Da Tabela 2 tem-se que a adição das nanopartículas altera consideravelmente a condutividade térmica da mistura. Por exemplo, Chitra e Kumar (2016) para nanofluido de CuO – água com 0,6 wt%, obtiveram 75% de incremento na condutividade térmica (valor expressivo dada a baixa concentração de nanopartículas utilizadas).

Da mesma forma Suganthi *et al*. (2014) e Saini e Agarwal. (2016), com concentrações de CuO a 1.5 wt % e CuO a 2 vol%, respectivamente, dispersas em propilenoglicol, conseguiram incrementos na ordem de 19% a 40%. Estas diferenças nos ganhos de condutividade térmica são os grandes responsáveis pelo contínuo estudo das propriedades termofísicas dos nanofluidos, sendo cada vez mais necessário modelos e proposições de métodos de predição, como os descritos na seção a seguir.

Métodos de predição da condutividade térmica

Além das técnicas experimentais, as análises teóricas e modelos analíticos podem fornecer uma percepção física adicional para explicar o aumento da condutividade térmica dos nanofluidos.

Kumar *et al*. (2015) revisaram vários modelos teóricos para predição da condutividade térmica. A maioria dos modelos clássicos foi desenvolvida considerando as nanopartículas em condições estáticas. Já, os modelos estatísticos foram formulados usando o movimento browniano e a lei de Stokes-Einstein. Os modelos dinâmicos que consideraram o efeito de nanoestruturas juntamente com o movimento aleatório de nanopartículas no fluido-base também foram relatados. Estes modelos possibilitam calcular analiticamente a condutividade térmica e/ou a razão de aumento de condutividade térmica dos nanofluidos. Na Tabela 3, os vários modelos clássicos para determinação da condutividade térmica são mostrados.

Tabela 3 - Comparação entre os modelos de predição da condutividade térmica

Autores	Modelos de condutividade térmica	Fator considerado
Maxwell (1873)	$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f + 2\emptyset(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f - \emptyset(k_f - k_s)}$	Condutividade térmica de partículas esféricas, fluido-base e a fração de volume de partículas.
Hamilton e Crosser (1962)	$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \emptyset(k_f - k_p)}$	Introduz o fator de forma (n).
Yu e Choi (2003 e 2004)	$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\emptyset(k_f - k_p)(1+\eta)^3}{k_p + 2k_f + \emptyset(k_f - k_p)(1+\eta)^3}$	Considera a nanocamada depositada na superfície.
Timofeeva *et al*. (2007)	$\frac{k_{eff}}{k_f} = (1 + 3\phi)$	Teoria do meio efetivo.
Koo e Kleinstreuer (2004 e 2005)	$k_{eff} = k_f \left[\frac{k_s + 2k_f + 2\emptyset(k_f - k_p)}{k_s + 2k_f - \emptyset(k_f - k_s)}\right] + 5\,x10^4 \beta\phi\rho_f(C_p)\sqrt{\frac{k_b T}{d_p \rho_p}} f(T,\phi)$	Tamanho de partícula, fração de volume de partículas, temperatura, propriedades do fluido-base e partículas sujeitas a movimento browniano.

Fonte: Adaptado de Sarviya *et al*. (2017).

Outros pesquisadores, a partir de dados experimentais, propuseram outros modelos para determinação analítica da condutividade térmica. Por exemplo, na Tabela 4 encontram-se modificações dos modelos clássicos e proposições de novas abordagens para a condutividade térmica.

Tabela 4 - Modelos propostos para obtenção da condutividade térmica (continua)

Autores	Modelo proposto	Observações
Yamada e Ota (1980)	$k_{eff} = \frac{\frac{k_p}{k_b} + K - K\phi(1) - k_p/(k_b)}{\frac{k_p}{k_b} + k + \phi(1) - k_p/(k_b)} K_b$	Modelo de célula unitária para a predição da condutividade térmica efetiva, onde K é o fator de forma e $k = 2\varphi^{0,2}(I_p/d_p)$ para partículas cilíndricas, e I_p e d_p são o comprimento e diâmetro da partícula.

Tabela 4 - Modelos propostos para obtenção da condutividade térmica (conclusão)

Nan *et al.* (2004)	$k_{eff} = 1 + \phi \frac{k_p}{3k_b} k_b$	Generalizou a aproximação de Maxwell-Garnett para predizer a condutividade térmica efetiva de compósitos à base de nanotubos de carbono.
Kumar *et al.* (2004)	$k_{eff} = k_b + c \frac{2k_B T}{(\pi v d_p^2)} \frac{\phi r_b}{k_{b(1-\phi)r_p}} k_b$	Modelo para explicar o aumento da condutividade térmica em nanofluidos e sua dependência com a temperatura. Pode não ser adequado para altas concentrações, onde as interações entre partículas se tornam importantes.
Chon *et al.* (2005)	$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7\phi^{0,746} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0,369} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0,7476} Pr^{0,9955}\, Re^{1,23}$	Considera efeitos de temperatura e tamanho de partícula, para nanofluidos de Al_2O_3-água.
Li e Peterson (2007)	$\frac{(k_{eff} - (k_b))}{k_b} = 0,764\phi + 0,0187(T) - (273,15) - 0,462$	Relaciona a condutividade térmica efetiva do nanofluido à temperatura e à fração volumétrica. Faixa de temperatura de 27 °C a 36 °C, para frações de volume de 2,6 e 10%.
Mintsa *et al.* (2009)	$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1,72\phi + 1,0$	Fração de volume de partículas (ϕ) pode ser encontrada por regressão linear simples. Modelo é aplicável para nanofluidos de 47 nm Al_2O_3.
Corcione (2011)	$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 4,4R_e^{0,4} P_r^{0,66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0,03} \phi^{0,66}$	Ampla faixa de intervalo de diâmetro, fração volumétrica e temperatura (10 - 150 nm; 0,002 - 0,09 vol%; e, 294 - 324 K).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

2.3.2 Viscosidade dos Nanofluidos

A viscosidade é um parâmetro essencial para aplicações térmicas que envolvem fluidos de qualquer natureza (MAHBUBUL *et al*., 2018). Além da queda de pressão, a potência de bombeamento depende diretamente da viscosidade do fluido (SHAHSAVANI; AFRAND; KALBASI, 2018).

Ainda de acordo com Shahsavani, Afrand e Kalbasi (2018), o coeficiente de transferência de calor convectivo é influenciado pela viscosidade. De forma que, a viscosidade precisa da mesma atenção que a condutividade térmica.

Técnicas para medição da viscosidade

Um fluido é definido como uma substância que se deforma continuamente quando submetido a uma tensão. A propriedade chamada viscosidade está relacionada à taxa de deformação deste fluido, podendo ainda ser caracterizada como a resistência ao movimento de escoar (fluir) de um material. Ela é importante nas várias aplicações da engenharia, como: processos de lubrificação, transferência de calor e potência necessária para o bombeamento de um fluido relacionada à perda de pressão por efeitos dissipativos.

As nanopartículas são mais densas que os fluidos-base, como seriam de se esperar e, consequentemente, a viscosidade dos nanofluidos é superior à dos fluidos-base. Tendo em vista a utilização de nanofluidos em trocadores de calor, é essencial determinar sua viscosidade para calcular a queda de pressão e o coeficiente de transferência de calor. No caso de fluidos newtonianos, como é o caso dos nanofluidos em concentrações reduzidas, a viscosidade é constante, isto é, independe da taxa de deformação e do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento. Neste caso, a viscosidade pode ser determinada a partir do coeficiente angular de uma reta em um gráfico relacionando a tensão de cisalhamento e a respectiva taxa de deformação do fluido.

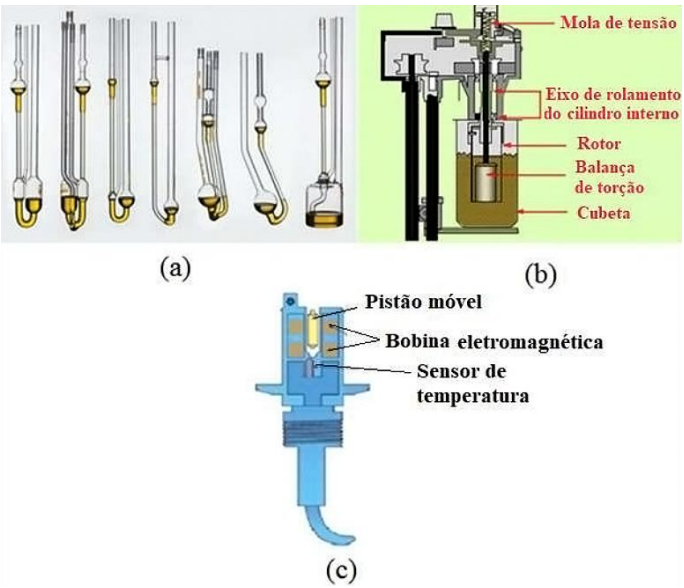
Existem vários tipos de viscosímetros, entre os quais se destacam pela sua importância e aplicação, o viscosímetro capilar, o viscosímetro tipo pistão (NGUYEN *et al*., 2008; LEE *et al*., 2008) e o viscosímetro rotacional (DAS; PUTRA; ROETZEL, 2003). O viscosímetro do tipo pistão consiste de um pistão metálico que se move dentro de uma câmara preenchida com o fluido, sob influência de um campo eletromagnético oscilante. Assim, para cada intensidade

de campo, a oscilação do pistão é proporcional à viscosidade do fluido em estudo; um detalhe deste tipo de medição é que o fluido permanece à temperatura constante durante a medição.

O viscosímetro capilar tem seu funcionamento baseado na equação de Hagen-Poiseulle, atuando na medição do tempo que o fluido leva para fluir através de um tubo de pequeno diâmetro (tubo capilar). O tempo decorrido é diretamente proporcional à viscosidade cinemática desse fluido.

No viscosímetro rotacional, a viscosidade é determinada através da velocidade angular de uma parte móvel separada pelo líquido de prova de uma parte fixa. Esse tipo de viscosímetro pode apresentar as geometrias cone-placa e placa-placa. Nos viscosímetros de geometria placa-placa ou também denominados de cilindros concêntricos, a parte fixa é, em geral, a parede do próprio recipiente cilíndrico onde está o líquido. A parte móvel pode apresentar o formato de palhetas ou de um cilindro. A Figura 10 mostra os tipos de viscosímetros mais utilizados: (a) capilar, (b) rotacional de cilindro coaxial do tipo Couette e (c) pistão.

Figura 10 - Tipos de viscosímetros: (a) capilar, (b) rotacional de cilindro coaxial do tipo Couette e (c) pistão



Fonte: Oliveira (2018).

A viscosidade dos nanofluidos aumenta à medida que a concentração das nanopartículas aumenta e é inversamente proporcional à temperatura. A Tabela 5 apresenta alguns resultados experimentais obtidos da literatura.

Tabela 5 - Resultados experimentais para a viscosidade de nanofluidos (continua)

Autores	Nanofluido	Diâmetro (nm)	Concentração (vol%)	Faixa de temperatura	Resultados
Lee *et al*. (2008)	Al_2O_3-água	30	0,01 - 0,3	21 - 39 ºC	Aumento de 2,9% para Ø = 0,3 vol%

Tabela 5 - Resultados experimentais para a viscosidade de nanofluidos (conclusão).

Murshed *et al*. (2008)	Al_2O_3-água	80	4,3 e 5,0	20 - 60 ºC	Aumento de 60%
Anoop *et al*. (2009)	Al_2O_3-água Al_2O_3-EG CuO-EG	100 152	0,5 - 6	20 - 50 ºC	Valor do pH causa variações nos valores de viscosidade
Chandrasekar e Suresh (2010)	Al_2O_3-água	43	0,33 - 5	25 ºC	Viscosidade aumenta linearmente com o incremento da concentração
Kole e Dey (2011)	CuO-óleo lubrificante	40	0,5 - 2,5	10 - 80 ºC	Aumento de 3 vezes em relação ao fluido-base
Karimi *et al*. (2011)	Al_2O_3-água CuO-água	13 - 47 29	0,5 - 10 5 - 15	5 - 70 ºC	Viscosidade efetiva é função da temperatura, concentração volumétrica e tamanho da nanopartícula
Meriläinen *et al*. (2013)	Al_2O_3-água	14 - 53	0,5 - 4	10 - 50 ºC	65% de incremento em relação ao fluido-base
Oliveira *et al*. (2014)	Ag-água	10 - 80	0,1 - 0,3	Ambiente	4% de incremento em relação ao fluido-base
Agarwal *et al*. (2015)	Al_2O_3-querosene	0,05 - 0,5	13 e 50	25 - 65 ºC	13,4% de incremento em relação ao fluido-base
Turgut *et al*. (2016)	Al_2O_3-água	1 - 3	10 e 30	Ambiente	107% de incremento em relação ao fluido-base
Chiam *et al*. (2017)	Al_2O_3-água e Etileno glicol	0,01 - 10	8 - 120	30 - 70 ºC	Decréscimo na viscosidade com o aumento da porcentagem de etileno glicol
Elcioglu *et al*. (2018)	Al_2O_3-água	1 - 3	10 e 30	20 - 50 ºC	Decréscimo da viscosidade dinâmica com o aumento da temperatura
Khodadadi, Toghraie e Karimipour (2019)	MgO-água	0,1 - 1,2	20	25 - 60 °C	Viscosidade relativa aumenta com o aumento da temperatura e concentração

Fonte: Adaptado de Motta (2012).

Métodos de predição da viscosidade de nanofluidos

A maioria dos métodos propostos para estimar a viscosidade de soluções contendo partículas são derivados do modelo de Einstein (1906). Este modelo se baseia em análises do fenômeno de difusão de partículas de um soluto em uma solução diluída com o objetivo de obter estimativas para o diâmetro das partículas do soluto. Einstein (1906) adotou um cálculo hidrodinâmico para o escoamento de um fluido incompressível, com base nas equações de Navier-Stokes, a fim de obter a viscosidade efetiva do fluido. No modelo adotado, as moléculas do soluto (partículas) são esferas rígidas e não interagentes. Este modelo é indicado para concentrações inferiores a 2% e é mostrado na Tabela 6, juntamente com outros modelos clássicos para predição da viscosidade de fluidos.

Tabela 6 - Modelos clássicos de predição da viscosidade

Autores	Formulação
Einstein (1906)	$\mu_{eff} = (1 + 2{,}5\varphi_p)$
Mooney (1934)	$\mu_{eff} = exp\left(\frac{2{,}5\varphi_p}{1 - k\varphi_p}\right) = \left\{1 + \frac{2}{5\varphi_p} + \left[\frac{3}{125} + \left(\frac{2}{5k}\right)\right]\varphi_p^{2+\cdots}\right\}$ 1,35 < k < 1,91
Eilers (1941)	$\mu_{eff} = \mu_f\left[1 + \frac{1{,}25\varphi_p}{1-\varphi_p/0{,}78}\right] = (1 + 2{,}5\varphi_p + 4{,}75\varphi_p^2 + \cdots)$
Saito (1950)	$\mu_{eff} = \mu_f\left[1 + \frac{1{,}25\varphi_p}{1-\varphi_p}\varphi_p\right] = (1 + 2{,}5\varphi_p + 4{,}75\varphi_p^2 + \cdots)$
Brinkman (1952)	$\mu_{eff} = \frac{1}{\left(1\ \varphi_p\right)^{2/5}} = (1 + 2{,}5\varphi_p + 4{,}375\varphi_p^2 + \cdots)$
Frankel e Acrivos (1967)	$\mu_{eff} = \left(\frac{9}{8}\frac{(\varphi_p/\varphi_{pmax})^{1/3}}{1\ (\varphi_p/\varphi_{pmax})^{1/3}}\right)$
Lundgren (1972)	$\mu_{eff} = \frac{1}{\left(1\ \varphi_p\right)^{2/5}} = (1 + 2{,}5\varphi_p + 6{,}275\varphi_p^2 + \cdots)$
Batchelor (1977)	$\mu_{eff} = (1 + \pi\varphi_p + k_H\varphi_p^2) = (1 + 2{,}5\varphi_p + 6{,}2\varphi_p^2)$
Graham (1981)	$\mu_{eff} = \left(1 + 2{,}5\varphi_p\right) + \left[\frac{4{,}5}{(h/r_p)(2\ h/r_p)^2}\right]$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Além dos modelos clássicos mostrados na Tabela 6, outros pesquisadores também propuseram modelos para predição da viscosidade dos nanofluidos, como os citados na Tabela 7.

Tabela 7 - Modelos de predição para a viscosidade dos nanofluidos

Autores	Formulação
Wang *et al*. (1999)	$\mu_{nf} = (1 + 7{,}3\phi_v + 123\phi_v^2)\mu_f$
Maiga *et al*. (2004)	$\mu_{nf} = (1 - 0{,}19\phi_v + 306\phi_v^2)\mu_f$
Corcione (2011)	$\mu_{nf} = \left(\frac{1}{1 - 34{,}87(d_p/d_f)^{-0{,}3}\,\phi_v^{1{,}03}}\right)\mu_f$

Fonte: Motta (2012).

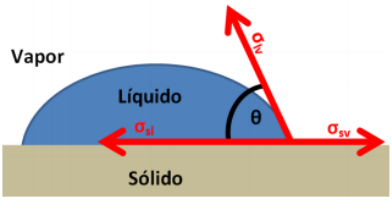
Dentre os modelos mais recentes, Maiga *et al*. (2004) consideraram as características hidrodinâmicas e térmicas de nanofluidos submetidos a um escoamento no interior de um tubo uniformemente aquecido. Já, o modelo empírico de Corcione (2011) baseou-se em dados experimentais para nanofluidos.

Ainda de acordo com Oliveira (2018), além da concentração de nanopartículas, que influencia na determinação da viscosidade levando a um incremento significativo, fatores, como a adição de surfactantes diretamente no fluido-base, pode afetar significativamente a viscosidade de nanofluidos.

2.4 Ângulo de Contato e Molhabilidade

De acordo com Kiyomura *et al*. (2015) a interação entre um sólido e dois ou mais fluidos é denominada de molhabilidade. A molhabilidade de uma superfície está relacionada ao balanço de energia interfacial sólido-líquido-vapor. O balanço de energia baseia-se nas equações de forças de Young (YOUNG, 1805) e na equação de energia de Dupré (DUPRÉ, 1869). As forças coesivas atuam entre moléculas iguais e resultam na tensão superficial de líquidos e sólidos, quando imersos em vácuo, enquanto as forças adesivas atuam entre moléculas diferentes e resultam na tensão superficial relacionada à interação de gases ou líquidos com sólidos. A maneira mais simples de se observar este fenômeno é quando uma gota líquida está em equilíbrio com o vapor e com a superfície sólida (Figura 11), na qual é possível observar a existência de uma região comum às três fases, conhecida como ponto de contato triplo (JOHNSON; DETTRE, 1993).

Figura 11 - Gota líquida em equilíbrio com uma superfície sólida



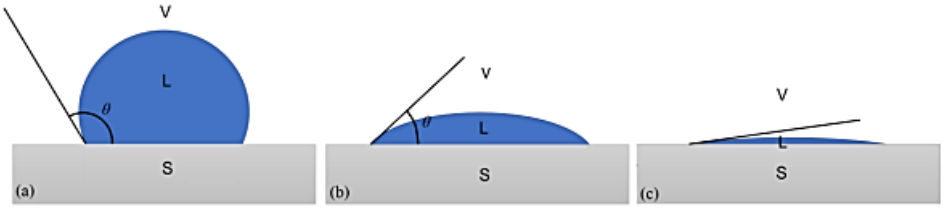
Fonte: Kiyomura (2016).

O ângulo resultante desta configuração, entre a interface líquido-vapor e a superfície sólida é denominado de ângulo de contato estático (θ). O ângulo de contato estático e as tensões superficiais específicas de cada fase estão relacionados pela equação de Young-Dupré (Eq. 2):

$$\cos\theta = \frac{\sigma sv - \sigma sl}{\sigma lv} \qquad (2)$$

Graças a esta relação de Young-Dupré (Eq. 2) é possível determinar o grau de molhabilidade de uma superfície; quanto menor o valor do ângulo de contato estático (θ) mais molhante é a superfície, de forma que um padrão para a molhabilidade pode ser estabelecido em função do ângulo, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Configurações para uma gota líquida em contato com uma superfície sólida. (a) Não molhante; (b) Molhante; (c) Completamente molhante



Fonte: Kiyomura (2016).

Ainda, quando o fluido que interage com a superfície é água, o grau de molhabilidade de uma superfície pode ser definido da seguinte forma:

- Superfície Hidrofóbica; $\theta \geq 90°$ (Figura 12a);
- Superfície Hidrofílica; $\theta < 90°$ (Figura 12b);
- Superfície superhidrofílica; $\theta \cong 0°$ (Figura 12c).

A molhabilidade, por consequência o ângulo de contato estático, é influenciada por vários fatores como, rugosidade do substrato, reações químicas e físicas entre líquido e sólido, tempo de contato entre superfície e líquido e temperatura.

Diversas técnicas experimentais são utilizadas para a medição do ângulo de contato estático em superfícies sólidas, sendo as principais descritas no item a seguir.

2.4.1 Técnicas para Medição do Ângulo de Contato

Vários métodos foram desenvolvidos para determinação experimental do ângulo de contato e, consequentemente, determinação da molhabilidade de superfícies e fluidos diversos (LUZ; RIBEIRO; PANDOOLFELI, 2008).

Entre os métodos podem ser citados os métodos de medição por tensiometria; que envolve forças de interação ao se mergulhar uma placa lisa a um fluido de trabalho, conforme descrito em (BENDURE, 1973; MIYAMA *et al*., 1997; RAME, 1997; KRISHNAN *et al*., 2005; STROBEL; LYONS, 2011). E, também, o método por medição direta por goniômetro ou captura de imagem do perfil de uma gota séssil formada sobre uma superfície sólida (através do gotejamento com auxílio de uma micropipeta e agulha) descritos em Taggart, Taylor e Ince (1929); Ellison e Zisman (1954); Erbil *et al*. (1999); McHale *et al*. (2001); Netto (2013) e Kiyomura *et al*. (2015).

Os principais métodos de medição de ângulos de contato serão descritos brevemente a seguir.

<u>Medição direta por goniômetro</u>

A técnica amplamente usada de medição do ângulo de contato é a medição direta do ângulo tangencial no ponto de contato triplo em um perfil de gota séssil. Bigelow, Pickett e Zisman (1946) montaram um instrumento simples e conveniente, que eles chamaram de “telescópio-goniômetro” para medir ângulos de contato de vários líquidos em superfícies polidas.

Mais tarde, o primeiro goniômetro de ângulo de contato comercial, projetado pela W.A. Zisman, foi fabricado pela empresa de instrumentos Ramé-Hart™ no início dos anos 60 (Figura 13). O equipamento consiste em um apoio horizontal para acoplar uma amostra sólida ou líquida, uma pipeta micrométrica, uma fonte de iluminação e um telescópio equipado com um ocular do transferidor. A medição é obtida alinhando a tangente do perfil de gota séssil no

ponto de contato com a superfície e lendo o transferidor através da ocular. Ao longo dos anos, modificações do equipamento foram feitas para melhorar a exatidão e precisão. Uma câmera pode ser integrada para tirar fotografias do perfil de queda, de modo a medir o ângulo de contato dinâmico (LEJA; POLING, 1960).

O uso de ampliações relativamente altas permite um exame detalhado do perfil de interseção (SMITHWICH, 1988). Uma seringa acionada por motor pode ser usada para controlar a taxa de adição e remoção de líquido para estudar ângulos de contato avançados, retráteis ou dinâmicos (KWOK *et al*., 1996).

Este método óptico direto é vantajoso devido à sua simplicidade e ao fato de serem necessárias apenas pequenas quantidades de líquido (alguns microlitros) e pequenos tamanhos de substratos (superfícies com alguns milímetros quadrados).

Figura 13 - Goniômetro Ramé-Hart™.

Fonte: Goniômetro Ramé-Hart (2019).

Por outro lado, há um risco/impacto relativamente maior de impurezas devido ao pequeno tamanho do substrato e volume de líquido. Quanto à precisão e reprodutibilidade, a medição depende da consistência do operador na atribuição da linha tangente, o que pode levar a um erro significativo e inconsistências entre vários usuários. Assim, faz-se necessário estabelecer diretrizes gerais para os operadores.

Uma luz de fundo é sempre usada para auxiliar a observação, enquanto uma fonte de luz específica é selecionada para evitar o aquecimento indesejado do líquido ou do substrato. Para um substrato relativamente grande, os ângulos de contato devem ser medidos em vários pontos para fornecer um valor médio representativo de toda a superfície.

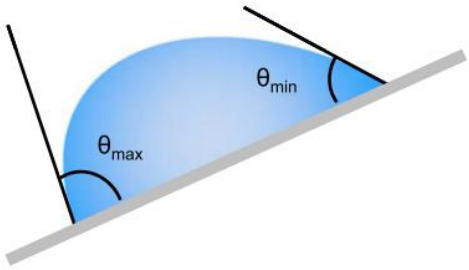
O método de goniômetro direto sofre de outra limitação grave, pois os pequenos ângulos de contato (abaixo de 20°) não podem ser medidos com precisão devido à incerteza de se atribuir uma linha tangente quando o perfil da gota é quase plano. Além disso, o dispositivo de captação de imagem apenas se concentra na maior seção meridiana da gota séssil, o que significa que a imagem do perfil reflete apenas o ângulo de contato no ponto em que o plano do meridiano cruza a linha de contato triplo.

A heterogeneidade ou rugosidade da superfície pode causar variações do ponto de contato ao longo da linha de contato trifásica. É geralmente reconhecido que a medição direta dos ângulos de contato da gota séssil com um telescópio-goniômetro pode produzir uma precisão de aproximadamente ± 2°, conforme descrito por Neumann e Good (1979) e por Hunter (2001). Idealmente, as medidas do ângulo de contato devem ser feitas dentro de uma câmara fechada para excluir a contaminação do ar e estabelecer uma pressão de vapor de equilíbrio do líquido a ser testado (condição obrigatória quando o fluido de trabalho é volátil).

A medição da histerese do ângulo de contato também tem sido recomendada para caracterizar a superfície do substrato através da inclinação da superfície em relação um plano de referência. O método do "plano inclinado" foi introduzido por McDougall e Ockrent (1942), os quais modificaram o método da gota séssil para obter tanto ângulos de contato de avanço como de recuo inclinando a superfície sólida até que a gota começasse a se mover.

Os ângulos de contato obtidos no ponto mais baixo da superfície inclinada, θ_{max}, e no ponto mais alto, θ_{min}, são considerados como ângulos de contato de avanço e recuo, respectivamente (Figura 14). Este método foi usado por Extrand e Kumagai (1996) e Kumagai (1997) para estudar a histerese do ângulo de contato de líquidos em uma variedade de superfícies poliméricas, incluindo pastilhas de silício e elastômeros.

Figura 14 – Ilustração do método do "plano inclinado"



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Langmuir e Schaeffer (1937) usaram a reflexão especular de uma gota para medir o ângulo de contato. Aqui, uma fonte de luz acima da linha de contato triplo é rotacionada em torno da gota séssil até a altura em que pequenas alterações fazem a luz refletida da gota desaparecer ou aparecer abruptamente.

O grau de rotação indica o ângulo de contato. Este método foi posteriormente refinado por Fort e Patterson (1967) e Patterson (1985) e pode ser usado tanto com gotas sésseis e meniscos sobre placas planas ou dentro de tubos, com uma precisão de ± 1°.

Método de bolha cativa

Em vez de formar uma gota líquida séssil sobre o substrato, uma bolha de ar é formada sobre o substrato que está imerso no fluido de trabalho. O ângulo de contato formado pela bolha de ar no líquido também pode ser medido diretamente.

A técnica foi introduzida por Taggart, Taylor e Ince (1930) e é amplamente conhecida como o método da bolha cativa (*Captive Bubble Method*). Normalmente, uma pequena quantidade de ar (aproximadamente 0,05 ml) é injetada no fluido para formar uma bolha de ar sobre a superfície sólida. Semelhante ao método da gota séssil, a agulha deve permanecer na bolha de modo a não perturbar o equilíbrio e, também, para evitar que a bolha se desloque sobre a superfície sólida, caso a placa não esteja perfeitamente horizontal.

O método da bolha cativa tem a vantagem de minimizar a contaminação da interface sólido-vapor. Além disso, é muito mais fácil monitorar a temperatura do fluido se comparado ao método da gota séssil, tornando possível analisar a dependência do ângulo de contato com a temperatura. No entanto, devido à natureza do método, este requer muito mais líquido do que o método da gota séssil.

Método de equilíbrio de Wilhelmy

O método de equilíbrio de Wilhelmy (1863) é uma técnica amplamente utilizada que, indiretamente, mede o ângulo de contato. Quando uma placa fina e lisa é mergulhada verticalmente em um líquido, a mudança na força peso é detectada na balança, resultante da combinação das forças de empuxo e forças de adesão (Figura 15). A força de molhamento f é definida como:

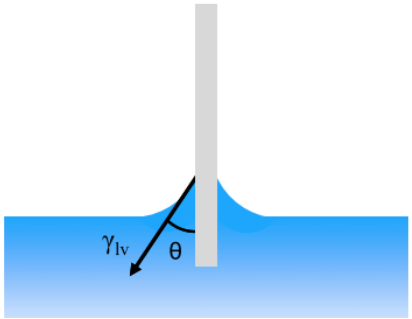
$$f = \gamma_{lv}\, p\, cos\theta \qquad (3)$$

onde γ_{lv} é a tensão superficial do líquido, p é o perímetro da linha de contato e θ é o ângulo de contato. Consequentemente, a força total F será:

$$F = \gamma_{lv}\ cos\theta - V\Delta\rho g \qquad (4)$$

onde V é o volume do líquido deslocado, $\Delta\rho$ é a diferença na densidade entre o líquido e o ar (ou um segundo líquido) e g é a aceleração da gravidade.

Figura 15 - Ilustração do método de medição do ângulo de contato de Wilhelmy



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Assim, sendo a tensão superficial do líquido e o perímetro sólido conhecidos, o valor do ângulo de contato pode ser prontamente calculado. Em casos raros, quando o ângulo de contato é zero e o perímetro é conhecido, a força medida está relacionada diretamente à tensão superficial do líquido.

<u>Tubo capilar</u>

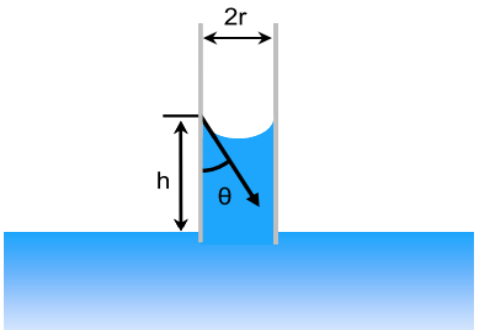
Em circunstâncias em que tanto a superfície interna quanto a externa do tubo capilar são feitas exatamente do mesmo material, o método de balanço Wilhelmy pode ser usado para medir o ângulo de contato. O perímetro do tubo capilar deve ser a soma dos perímetros internos e externos. Em geral, o método de balanço Wilhelmy pode ser aplicado a uma ampla variedade de placas, hastes, fios, tubos e capilares.

Para um capilar vertical com seção transversal suficientemente estreita (ilustrado na Figura 16), o menisco pode ser considerado esférico e a altura capilar, h, é dada pela equação:

$$h = 2\Delta\rho\gamma_{lv} g r cos\theta \qquad (5)$$

Onde γ_{lv} é a tensão superficial do líquido e r é o raio do tubo, g é a constante de aceleração da gravidade, e $\Delta\rho$ é a diferença na densidade entre o líquido e o vapor. O ângulo de contato pode ser calculado usando os valores de h e r medidos experimentalmente.

Figura 16 - Ilustração de um tubo capilar imerso em um líquido



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Essa relação entre ângulo de contato, altura capilar e raio é conhecida como a regra Jurin, nomeada por James Jurin, que estudou este efeito em 1718. Para tubos relativamente largos e transparentes, a técnica de reflexão Langmuir-Schaeffer pode ser usada diretamente para medir o ângulo de contato (GOOD; PASCHECK, 1978).

<u>Análise da forma da gota</u>

Diversos métodos foram desenvolvidos para determinar a tensão superficial do líquido e o ângulo de contato a partir da forma de uma gota séssil, gota pendente ou bolha cativa. Idealmente, a forma de uma gota de líquido depende dos efeitos combinados das forças interfaciais e gravitacionais.

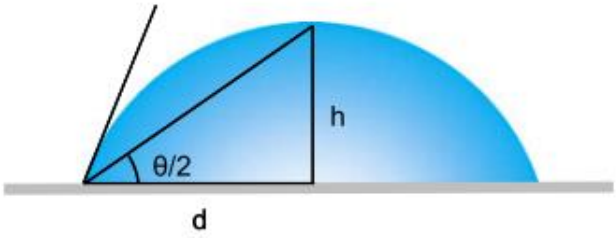
A tensão superficial tende a minimizar a área da superfície tornando a gota esférica, enquanto a gravidade a deforma de duas formas: (i) alongando uma gota pendente e/ou (ii) achatando uma gota séssil. Esse equilíbrio entre tensão superficial e forças externas (como a gravidade) é refletido matematicamente na equação de capilaridade de Laplace, que oferece a possibilidade de determinar a tensão superficial, analisando a forma da gota.

O método *θ/2* já foi amplamente usado para analisar o perfil de uma gota séssil. Nesta análise, a gota líquida é assumida como parte de uma esfera. Geometricamente, o ângulo de contato pode ser calculado medindo o diâmetro da gota e a altura do ápice (Figura 17):

$$\frac{\theta}{2} = tan^{-1}\left(\frac{h}{d}\right) \quad (6)$$

Este método produz resultados razoáveis, quando a gota líquida é extremamente pequena. No entanto, a suposição da forma esférica não pode ser aplicada se a forma da gota for grande o suficiente para ser afetada pela gravidade.

Figura 17 - Demonstração do método *θ/2*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Bashforth e Adams (1892) foram os primeiros a usar a equação de Laplace para analisar a forma dos perfis de gotículas. Eles geraram manualmente uma coleção de perfis de gotas sésseis de acordo com diferentes valores de tensão superficial e raios de curvatura. Assim, a tarefa de determinar a tensão superficial tornou-se uma simples interpolação de suas tabelas (processo que foi melhorado com o avanço da informática).

<u>Análise axissimétrica da gota (*Axisymmetric Drop Shape Analysis*, ADSA)</u>

De acordo com Yuan e Lee (2013), acredita-se ser uma das técnicas mais precisas para medição do ângulo de contato. Com uma reprodutibilidade de ± 0,2°, o método ADSA melhorou a precisão da medição do ângulo de contato em uma ordem de grandeza, quando comparado com medições de tangente direta. O princípio básico do método ADSA é encontrar o melhor perfil teórico que corresponda ao perfil de gota extraído de uma imagem obtida experimentalmente, a partir da qual a tensão superficial, o ângulo de contato, o volume de queda e a área da superfície podem ser calculados.

Tabela 8 - Comparação dos métodos de medição do ângulo de contato reportado por diferentes autores (continua).

Autor (ano)	Método	Resultado (Precisão)
Biolè e Bertola (2015)	Goniômetro	± 3°
Biolè, Wang e Bertola (2016)	Gota séssil e ajuste polinomial de curva	± 5°

Tabela 8 - Comparação dos métodos de medição do ângulo de contato reportado por diferentes autores (conclusão)

Waldman, Li e Hu (2016)	Gota séssil e ajuste polinomial e linear da borda da gota por rotina em MatLab®.	± 4°
Mirzaei (2017)	Gota séssil e ajuste polinomial de curva por rotina computacional	± 1°
Simmchen e Malgaretti (2017)	Gota Séssil com Dataphysics (Filderstadt, Germany) Contact Angle System OCAH 230 com software SCA20 (solução comercial)	Não reportado
Liu *et al*. (2018)	Gota séssil e ajuste polinomial e linear da borda da gota por rotina em MatLab®.	Não reportado
Kim *et al*. (2018)	Goniometro (KRUSS, DSA30).	± 0,3°
Abdul *et al*. (2018)	Bolha cativa, imageJ	Não reportado
Hernaiz *et al*. (2019)	Goniômetro Universal (ASTRONICS Technologies Pte. Ltd., Singapore)	± 0,5°

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em todos os métodos apresentados na Tabela 8, os autores se referem ao cuidado com a correta identificação do ponto triplo (ponto de contato das regiões sólido, líquido e ar) já que a partir deste ponto é que são determinadas as retas da linha de base e tangente ao contorno da gota (ou bolha, ou inclinação do menisco em tubo capilar e placa de Wilhelmy).

Drelich (2019) reporta os diversos métodos para determinação dos ângulos de avanço e recuo, incluindo os desafios para a correta medição dos pontos de contato, para maior grau de confiabilidade no processo de caracterização da interação superfície-fluido.

Hernaiz *et al*. (2019); apesar de apresentar uma alta precisão na medida dos ângulos (precisão informada pelo fabricante do equipamento utilizado), tem o ajuste da medida do ângulo feita manualmente por visualização da gota (método goniômetro).

Os métodos estudados para realização deste trabalho apresentam uma desvantagem, pois dependem da experiência e destreza do operador para determinação do ponto triplo e, consequentemente, do ângulo de contato. Desta forma, o presente trabalho visa o desenvolvimento de um sistema de aquisição de imagens e pós-processamento que facilite a determinação dos pontos de contato triplo e ângulo de contato, bem como, o desenvolvimento de um processo confiável e de baixo custo para desenvolvimento de outras pesquisas nesta área.

2.5 Influência do Uso de Nanofluidos sobre o Coeficiente de Transferência de Calor

O fato dos nanofluidos apresentarem maiores condutividade e difusividade térmicas tem atraído o interesse da comunidade científica em inúmeras áreas, como a microeletrônica, microfluidica, transporte, manufatura, assistência médica, entre outros. É por isso que nos últimos anos surgiram vários estudos sobre o efeito dos nanofluidos no coeficiente de transferência de calor (CTC) e no fluxo de calor crítico (FCC) em ebulição nucleada e convectiva. A Tabela 9 descreve, esquematicamente, estes estudos sobre ebulição nucleada com nanofluidos encontrados na literatura.

Tabela 9 - Estudos sobre o efeito dos nanofluidos na ebulição nucleada (continua)

Autores	Fluido-base	Nanopartículas Diâmetro	Concentração volumétrica	Parâmetro estudado	Efeito do nanofluido
You *et al* (2003)	Água	Al_2O_3	0 a 0,05 g/l	CTC FCC	Igual Incremento 200-400%
Das *et al* (2003)	Água	Al_2O_3/75 nm	1 a 4 vol %	CTC	Decréscimo
Bang e Chang (2005)	Água	Al_2O_3/75 nm	1, 2 e 3 vol %	CTC FCC	Decréscimo Incremento 10-40%
Wen e Ding (2005)	Água	Al_2O_3/27 e 56 nm	1, 6 vol %	CTC	Incremento 41-47%
Kim *et al* (2007)	Água	Al_2O_3, TiO_2/ 47 e 23 nm	0,00001 - 0,1 vol %	CTC FCC	Decréscimo Incremento 100%
Kedzierski e Gong (2009)	R134a e água	CuO/35 nm Al_2O_3/20 a 30 nm	0,5 e 1 wt%	CTC FCC	Incremento 20 a 275% Incremento 30%
Kwark *et al*. (2010)	Água	Al_2O_3, CuO/139, 143 nm	0,001 - 1 g/l	CTC FCC	Decréscimo Incremento ate 80%
Peng *et al*. (2010)	Água	CNT/15 - 80 nm	0 a 5 wt%	CTC	Incremento 61%
Suriyawong e Wongwises (2010)	Água	TiO_2/21 nm	0,00005 a 0,01 vol %	CTC	Incremento
Jung *et al*. (2012)	Água	Al_2O_3/45 nm	0,001; 0,01 e 0,1 vol %	CTC	Decréscimo
Yang e Liu (2011)	Água	SiO/30 nm	0,5; 1; 1,5; 2 e 2,5 vol %	CTC	Decréscimo
Sheikhbahai *et al*. (2012)	Água e Etileno glicol	Fe_3O_4/50 nm	0,01 e 0,1 vol %	CTC	Decréscimo
Kole e Dey (2012)	Etileno glicol	ZnO	---	CTC	Incremento
Raveshi *et al*. (2013)	Água DI, Água-etileno glicol	Alumina	0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75 vol %	CTC	Incremento de até 64% para 0,75% concentração.
Ahn *et al*. (2013)	Água	Óxido de grafeno	0,0005 wt%	FCC	Incremento 320%
Park (2014)	Água	Al_2O_3/50 nm	0,01% vol%	CTC	120% de incremento
Parl *et al*. (2014)	Água	Al_2O_3/10 - 5 nm	0,001 – 0,1 vol%	CTC	Incremento para baixas concentrações
Vafaei (2015)	Água	Al_2O_3/10 - 5 nm	0,001 – 0,1 vol%	FCC	Incremento

Tabela 9 - Estudos sobre o efeito dos nanofluidos na ebulição nucleada (conclusão)

Sakashita (2015)	Água	TiO_2/25 nm	0,002 wt%	FCC	200% de incremento
Sarafraz, Kiani, Hormozi (2016)	Água-etileno glicol	ZrO_2/20 - 25 nm	0,025 - 0,1 vol%	FCC CTC	Incremento para ambos parâmetros
Sayahi e Bahram (2016)	Água	Al_2O_3/10 nm	0,03 wt%	CTC	56% de incremento
Manetti *et al*. (2017)	Água deionizada	Al_2O_3/10 nm	0,0007 e 0,007 vol%	CTC	75% de incremento para superfícies lisas
Dareh *et al*. (2017)	Água deionizada	Al_2O_3/20 - 25 nm	0,0025 - 0,01 vol%	FCC	Incremento de 20 a 25 %
Ciloglu (2017)	Água deionizada	SiO_2/20 nm	0,01; 0,05 e 0,1 vol%	FCC	Incremento de 45%
Kshirsagar e Shrivastava (2018)	Água destilada	Al_2O_3/10 nm	0,3 - 1,5 wt%	FCC	Incremento de 87% na concentração de 1,5 wt%
Kangude e Srivastava (2019)	Água deionizada	SiO_2/18 nm	0,005 e 0,01 vol%	CTC	Incremento

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como observado na Tabela 9, a maioria dos autores utilizam água e/ou etileno glicol como fluido de trabalho. As nanopartículas usadas variam desde Al_2O_3, FeO, ZnO, óxido de grafeno, CNT's, CuO e SiO. As concentrações variam de 0,00001 até 6% em concentração volumétrica.

A Tabela 9 também indica resultados contraditórios e inconsistentes em relação ao efeito do nanofluido no CTC. Por outro lado, todos os autores que estudaram o efeito do nanofluido sobre o FCC concordam que há um aumento significativo nesse, mesmo ocorrendo diferenças percentuais entre os valores de acréscimo obtidos (de 30 a 400%).

Como consequência da observação de deposição de nanopartículas sobre a superfície aquecida relatada por diferentes autores (Tab. 9), pesquisadores estudaram o processo de ebulição, em regime de ebulição nucleada, sobre superfícies nano e microestruturadas (Tabela 10).

Tabela 10 - Estudos experimentais para ebulição nucleada em superfície aquecida com deposição de nanopartículas (continua)

Autores	**Superfície nanoestruturada**	**Fluido**	**Condições experimentais**	**Efeito nanoestrutura**
Forrest *et al*. (2010)	SiO_2, Substrato de fio de níquel de 0.25 mm de diâmetro e placa de aço inoxidável	Água deionizada	q'' = até 80 kW/m^2	Incremento de até 100% no CTC em sup. hidrofóbicas; decréscimo nas hidrofílicas; incremento > 100% no FCC

Tabela 10- Estudos experimentais para ebulição nucleada em superfície aquecida com deposição de nanopartículas (conclusão)

Hendricks *et al*. (2010)	ZnO e substrato de Cu e Al	Água	*q''* = até 1000 kW/m²	Incremento no CTC; incremento no FCC
Kim *et al*. (2010)	ZnO (nanorods) e substrato de silicone	Água	*q''*= até 2400 kW/m²	Incremento do CTC; incremento do FCC
Yao *et al*. (2011)	CuNWs e SiNWs e substrato de Silício	Água	*q''* = até 1400 kW/m²	Incremento de 3 vezes do CTC
Warrier *et al*. (2011)	CuNWs (20 µm altura x 200 nm diâmetro) e substrato de silicone	HFE-7200	*q''* = até 220 kW/m²	Incremento do FCC
Ahn *et al*. (2012)	Oxidação anódica Substrato de zircônio	Água	*q''*= até 1900 kW/m²	90% incremento do FCC
Liu e Yang (2013)	Al de 150 µm e substrato de cobre	Metanol	*q''* = até 700 kW/m²	56% de incremento do CTC; incremento do FCC
Saeidi e Alemrajabi (2013)	Oxidação anódica e alumínio	Água	*q''*= até 1800 kW/m²	159% incremento do CTC, 8% incremento do FCC
Demir *et al*. (2014)	Si (*nanorods* com 850 nm diâmetro e 800, 1800 e 3200 nm comprimento) e substrato de Si	Água	*q''* = até 230 kW/m²	Incremento entre 120% e 254% no CTC
Dong *et al*. (2014)	Estrutura com micro e nano cavidades e *chip* de silicone	Etanol	*q''* = até 650 kW/m²	Incremento CTC; Incremento FCC
Heitich *et al*. (2014)	Maguemita e Molibdênio e substrato de Constantan	Água	*q''* = até 1000 kW/m²	Incremento FCC; Incremento no CTC (maguemita)
Souza *et al*. (2014)	Maguemita (10 nm e 80 nm) e substrato de cobre	HFE-7100	*q''*= até 80 kW/m²	Incremento de 55% no CTC (10 nm) e decréscimo de 29% (80 nm)
Sarangi, Weibel e Garimella (2015)	*Free-particle* ou *sintered powder coatings*	FC-72	*q''* = até 160 kW/m²	Incremento no CTC em 50%
Dharmendra *et al*. (2016)	Nanotubos de carbono e substrato de cobre	Água	*q''* = até 1420 kW/m²	Incremento de 40% sobre CTC
Ray, Deb e Bhaumik (2016)	Nanofios de TiO_2 em superfície de cobre	R134a	*q''* = até 180 kW/m²	Incremento de 81,3% no CTC para nanofios de 450 nm de comprimento
Kiyomura *et al*. (2017)	Maguemita e substrato de cobre	Água deionizada	*q''* = até 800 kW/m²	Decréscimo no CTC após o fluxo de 400 kW/m²
Gheitaghy *et al*. (2017)	Superfícies porosas eletrodepositadas (cavidades na faixa de 10 a 50 nm)	Água	*q''* = até 1400 kW/m²	60% de incremento no CTC
Cao *et al*. (2018)	Superfície de cobre microaletada e nanoestruturada com óxido de FeMn	FC-72	*q''* = até 2000 kW/m²	Aumento de 100% no FCC
Cao *et al*. (2019)	Eletrodeposição de cobre e zinco sobre superfície de cobre cilíndrica	HFE-7200	*q''* = até 2000 kW/m²	100% de aumento no CTC e aumento inexpressivo no FCC

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como observado na Tabela 10, o fluido de trabalho usado pela maioria dos estudos da literatura é água, mas também há estudos com metanol, HFE-7100 e FC-72. Como superfícies de testes foram usadas: fios de níquel, placas de cobre, de alumínio, silício e zircônio. Os nanofluidos usados para a nanoestruturação da superfície aquecida incluem: silício, cobre, alumínio, nitrato de cromo, maguemita, nanofios de cobre (CuNWs) e óxido de zinco.

Nolan *et al*. (2013) desenvolveram um estudo de CTC e FCC em superfícies de cobre nanoestruturadas levando em consideração a densidade de sítios de nucleação e o ângulo de contato. As superfícies nanoestruturadas foram criadas através da técnica de eletrodeposição. Para superfícies nanoestruturadas, verificou-se um aumento no FCC de 142% e no CTC de 33% comparado a uma superfície de cobre lisa. De acordo com os autores, a redução no ângulo de contato e o aumento dos sítios de nucleação ativos nas superfícies testadas foram responsáveis pelo aumento no CTC e no FCC.

Souza *et al*. (2014) testaram um substrato de cobre nanoestruturado com maguemita de 10 nm e 80 nm de espessura. Eles usaram o HFE-7100 como fluido de trabalho. Esses autores verificaram um acréscimo de 55% no CTC para a superfície nanoestruturada com maguemita de 10 nm e, para a superfície nanoestruturada com maguemita de 80 nm, verificaram um decréscimo de até 29% no CTC. As conclusões desse estudo apontaram para o fato de que a microestrutura da superfície nanoestruturada, correspondendo à quantidade e tamanho de defeitos superficiais, influencia o processo de transferência de calor.

O efeito dos parâmetros característicos da superfície, incluindo a rugosidade (R_a), o ângulo de contato sólido-líquido e a razão de área de transferência de calor efetiva (definida pelos autores como a razão entre a área de transferência de calor real e a sua área projetada, r) sobre o CTC foram analisadas por Li *et al*. (2015). Os autores indicaram que o CTC aumenta à medida que r aumenta e seu intervalo de aumento foi basicamente o mesmo com o aumento do intervalo do ângulo de contato.

O uso de diferentes revestimentos estruturais para a transferência de calor por ebulição da piscina foi discutido por Orman, Kapjor e Vantúch (2017). Existem alguns tipos mais comuns de tais revestimentos, tais como malhas, pós sinterizados e fibras, destacando-se as microestruturas em malha (*mesh*) devido às suas vantagens para uso em projetos que envolvem mudança de fase, como trocadores de calor.

Prakash e Prasanth (2018) mostraram que o FCC não pode ser evitado em aplicações de transferência de calor por ebulição; em vez disso, pode ser adiado pela aplicação de nanofluidos e técnicas de modificação de superfície. Os autores usaram a nano modificação superficial para melhorar a ebulição em piscina e compararam os resultados experimentais com as

previsões teóricas. Assim, relataram que os modelos teóricos não representam satisfatoriamente os resultados experimentais.

Recentemente, Liang e Mudawar (2019) forneceram uma visão abrangente de artigos publicados sobre o aprimoramento passivo da ebulição em piscina usando diferentes técnicas de modificação de superfície, e mostraram que a adição de surfactante ao líquido de base desloca a região de ebulição nucleada da curva de ebulição para superaquecimentos de superfície inferior, promovendo, assim, uma incipiência de ebulição anterior e aumentando o calor de ebulição nucleada coeficiente de transferência, e que, apesar do significativo aumento transferência de calor com a maioria dos nanofluidos, há muitas descobertas contraditórias sobre a influência dos nanofluidos na ebulição nucleada. Apesar dos potenciais benefícios de transferência de calor dos nanofluidos, existem várias preocupações práticas sérias que devem ser consideradas com cuidado, antes da implantação em aplicações práticas de refrigeração.

A diferença entre os resultados dos diferentes estudos apresentados, provavelmente, deve-se a diversos fatores como:

- Método de fabricação do nanofluido;
- Material e tamanho da nanopartícula e concentração do nanofluido;
- Experimentos instáveis para temperaturas elevadas devido à falha dos estabilizadores;
- Possível aglomeração e deposição das nanopartículas e estabilizadores na superfície aquecida acarretando uma alteração das cavidades ativas de nucleação, modificação da molhabilidade e a formação de resistência térmica adicional, sendo esse o fenômeno apontado como a maior desvantagem dos nanofluidos por Vafaei e Borca-Tasciuc (2014).

Assim, torna-se importante o aprimoramento das técnicas de preparação e caracterização dos nanofluidos, bem como, dos métodos de predição das propriedades termofísicas existentes na literatura. Além disso, faz-se necessário o desenvolvimento de uma rotina computacional que permita a análise do formato da gota para determinação do ângulo de contato estático e da interação fluido-superfície com maior precisão. Desta forma, será possível uma análise mais aprofundada da influência das propriedades termofísicas e concentração de nanofluidos, bem como, das características geométricas da superfície aquecedora sobre o ângulo de contato, a molhabilidade e o coeficiente de transferência de calor em processo por ebulição.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O objetivo neste capítulo é o de apresentar e explanar os passos seguidos para obtenção dos resultados, desde a descrição dos fluidos e superfícies utilizadas, a bancada experimental projetada e construída, o código computacional implementado e o processo de obtenção das imagens para análise dos ângulos de contato dos fluidos, nas diferentes superfícies, finalizando com a validação do processo e suas respectivas incertezas.

3.1 Preparação dos Nanofluidos

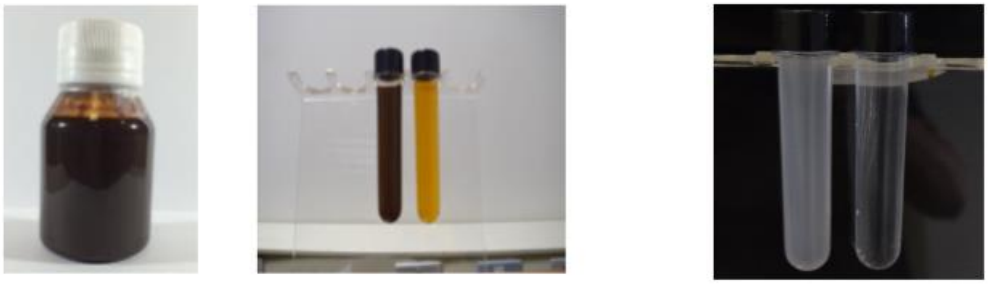
Para o presente estudo foram preparados dois nanofluidos: Fe_2O_3-Água (maguemita-água) e Al_2O_3-Água (alumina-água). Ambos foram preparados em duas concentrações, definidas como baixa e alta concentração, sendo: 0,029 g/l (baixa concentração) e 0,29 g/l (alta concentração).

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 γ-Fe_2O_3 com diâmetro médio de 10 nm e concentração volumétrica de 29 g/l (Figura 18a), 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 (Figura 18b), a partir de uma mistura com água deionizada, seguido de uma agitação em banho ultrassônico (UNIQUE, 25 kHz) por 3 horas.

As concentrações escolhidas de alta (0,29 g/l) e baixa (0,029 g/l) se deram devido ao cuidado experimental de somente diluir o nanofluido de maguemita, recebido na concentração de 29 g/l, de forma que as propriedades pudessem ser determinadas em função da concentração tendo o nanofluido base como referência.

O nanofluido de alumina foi preparado pelo método de duas etapas, também nas mesmas concentrações dos nanofluidos de maguemita, 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 (Figura 18c) para efeitos de comparação dos resultados experimentais. Por fim, os nanofluidos foram agitados em banho ultrassônico por 3 horas.

Figura 18 - Nanofluidos utilizados no presente estudo. (a) Fe_2O_3-água, concentração de 29 g/l; (b) Fe_2O_3-água, concentração de 0,29 g/l e 0,029 g/l, respectivamente; (c) Al_2O_3-água, concentrações de 0,29 g/l e 0,029 g/l, respectivamente



(a) (b) (c)

Fonte: Manetti (2017).

A condutividade térmica e a viscosidade dos nanofluidos foram avaliadas utilizando diferentes equipamentos e métodos. Estes estão detalhados nas seções 4.1 e 4.2.

3.2 Preparação das Superfícies

As superfícies utilizadas foram fabricadas com cobre eletrolítico (grau de pureza 99,9%), por apresentar ótima condutividade térmica, com geometria cilíndrica sendo:

- uma lisa (polida mecanicamente com pasta abrasiva de óxido de alumínio, correspondendo a uma rugosidade média da superfície, R_a = 0,05 μm);
- uma rugosa (polida com lixa #600, correspondendo a uma rugosidade média da superfície, R_a = 0,23 μm);
- duas superfícies lisas com deposição de nanopartículas de alumina (por meio do processo de ebulição de Al_2O_3-água em baixa e alta concentração);
- duas superfícies rugosas com deposição de nanopartículas de alumina (por meio do processo de ebulição de Al_2O_3-água em baixa e alta concentração);
- duas superfícies lisas com deposição de nanopartículas de maguemita (por meio do processo de ebulição de Fe_2O_3-água em baixa e alta concentração);
- duas superfícies rugosas com deposição de nanopartículas de alumina (por meio do processo de ebulição de Fe_2O_3-água em baixa e alta concentração);

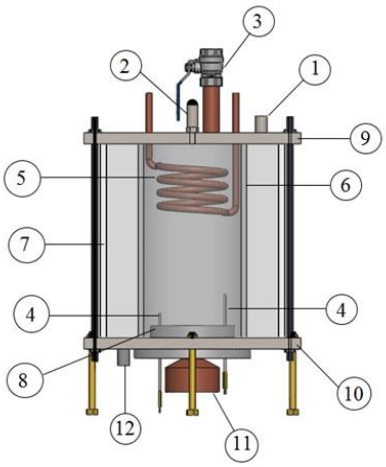
Inicialmente, todas as superfícies foram polidas utilizando pasta abrasiva de óxido de alumínio (superfícies lisas) e lixa #600 (superfícies rugosas). Antes do processo de deposição, todas as superfícies foram limpas com acetona e secas usando jato de ar comprimido.

Conforme estudado por Kiyomura (2016), para garantir a uniformidade da nanocamada sobre a superfície de aquecimento e evitar o *boiling time effect* sobre o processo de deposição das nanopartículas, o processo de ebulição foi mantido por um período de 3 horas para cada superfície nanoestruturada testada. Após o processo de deposição por meio da ebulição do nanofluido, este foi removido da câmara de ebulição (Figura 19) e a superfície de aquecimento - sem a remoção da camada de nanopartículas depositada - foi caracterizada juntamente com as superfícies originais (lisa e rugosa). A caracterização das amostras foi realizada para obter informações estruturais, da composição química que se utilizou de microscopia eletrônica de varredura – MEV por meio do EVO LS15 Zeiss®, bem como a rugosidade média, R_a, obtida por meio do rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ 301 com um intervalo de medição de -200 a +150 μm e resolução de ± 0,005 μm, os parâmetros utilizados foram escolhidos de modo a obter a rugosidade mais fidedigna, sendo utilizado o comprimento de *Cut-off* de 0.08mm e raio da ponta da agulha de 0,5 μm).

Para cada superfície (fabricada sem nanoestruturação e nanoestruturada) testada, o ângulo de contato foi aferido a partir de imagens de uma gota séssil, utilizando-se a metodologia desenvolvida pelo presente trabalho.

A câmara de ebulição (Figura 19) consiste em uma cuba de vidro com espessura de 5 mm e dimensões 170 x 170 x 180 mm^3 envolvendo um tubo de vidro (borossilicato) de 90 mm de diâmetro interno, 180 mm de altura e 10 mm de espessura.

Figura 19 - Câmara de ebulição utilizada para o processo de nanoestruturação das superfícies

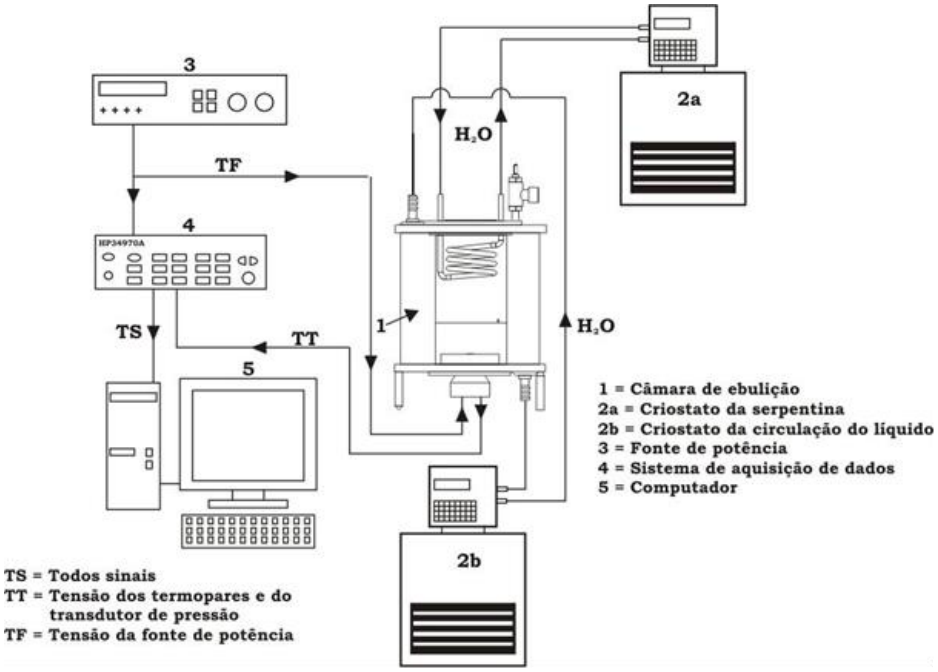


1) Saída do escoamento forçado de água
2) Transdutor de pressão
3) Válvula para carregamento do fluido de trabalho
4) Termopares no líquido e no vapor
5) Condensador
6) Tubo de vidro
7) Cuba de vidro
8) Peça de politetrafluoretileno
9) Chapa de aço inoxidável superior
10) Chapa de aço inoxidável inferior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

Fonte: Manetti (2017).

A Figura 20 mostra um desenho esquemático da bancada experimental indicando os principais componentes tais como, a câmara de ebulição, banhos termostáticos, fonte de alimentação, sistema de aquisição de dados e o computador para recebimento dos dados.

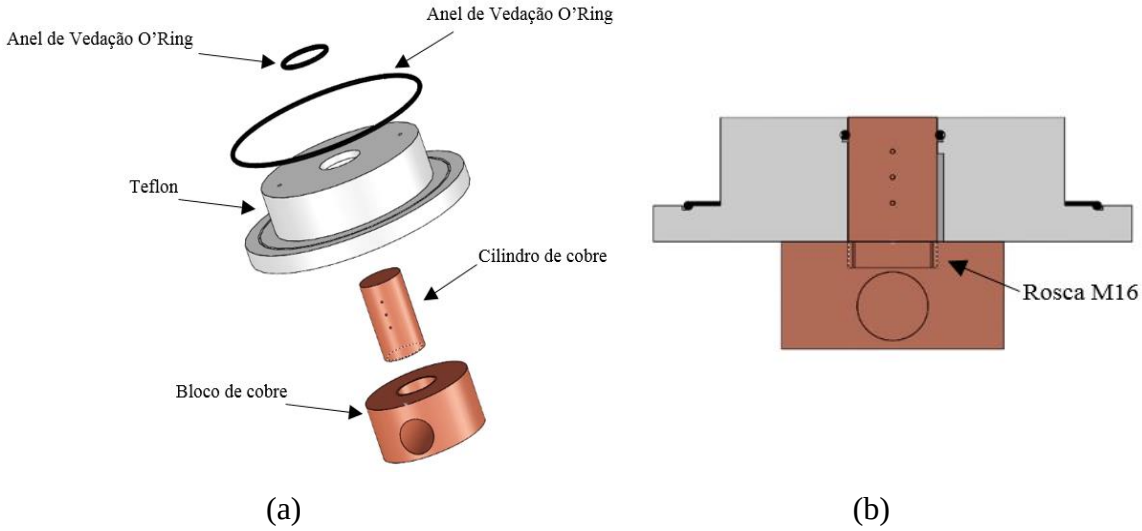
Figura 20 - Desenho esquemático do aparato experimental



Fonte: Manetti (2017).

A superfície de testes consiste de um bloco de cobre (20 mm de diâmetro e 60 mm de altura) com três termopares tipo K fixados na parte cilíndrica para determinar a temperatura da parede e o fluxo de calor. O bloco de cobre é aquecido por uma resistência elétrica tipo cartucho com uma potência máxima de 300 W. O isolamento térmico da seção de teste consiste em politetrafluoretileno e vermiculita.

Figura 21 - Seção de testes. (a) vista explodida e (b) vista do corte transversal



Fonte: Manetti (2017).

O fluxo de calor aplicado foi crescente (100 a 800 kW/m^2) e para assegurar regime permanente, os testes tiveram uma duração de 1350 s (22,5 minutos) para cada fluxo de calor aplicado, mas apenas os dados de temperatura para os últimos 500 s (8,33 minutos) do intervalo de teste foram considerados.

A validação do aparato experimental para os testes em ebulição (necessários para o processo de nanoestruturação das superfícies) seguiram o mesmo procedimento adotado por Kiyomura (2016) e Manetti (2017).

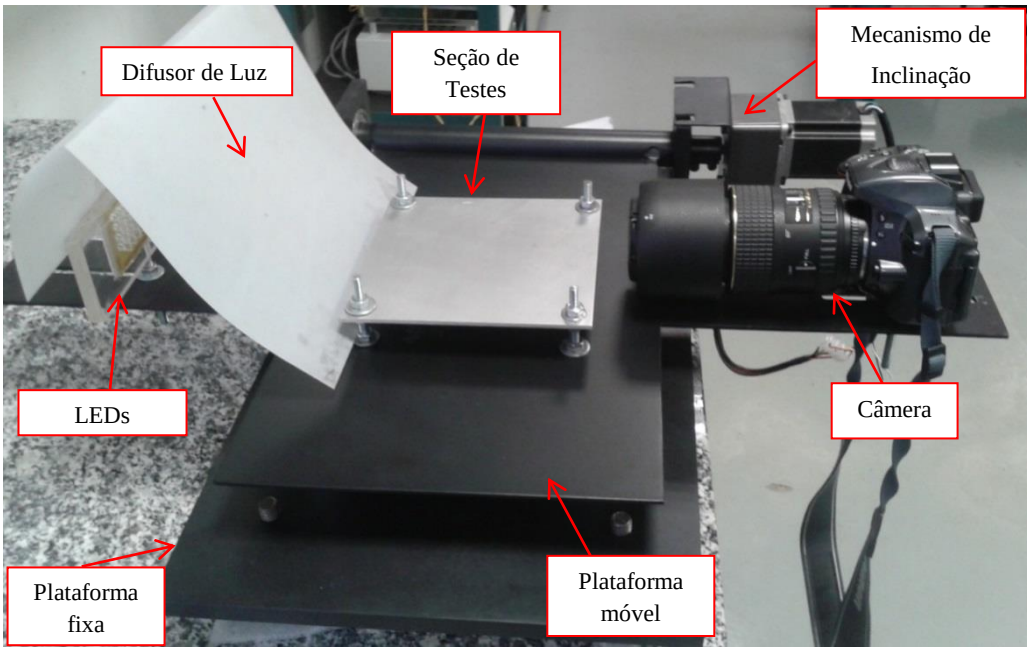
A incerteza na temperatura foi de ± 0,4 ºC. Para todas as superfícies testadas, a incerteza experimental para o fluxo de calor variou de 15,0% a 1,7%, e para o coeficiente de transferência de calor variou de 17,5% para 3,1%, respectivamente (MANETTI *et al*., 2017; MOGAJI *et al*., 2017).

3.3 Descrição do Aparato Experimental para Medição do Ângulo de Contato

O aparato experimental, Figura 22, foi construído com o intuito de obter imagens para que, a partir destas, fosse possível determinar o ângulo de contato do fluido em diferentes condições de superfície de teste. Este é composto de uma base (aço SAE 1020), que sustenta todo aparato, dotada de pés reguláveis para garantir o correto nivelamento da mesma independente da superfície em que seja colocada; mancais de rolamento que sustentam o eixo ligado ao motor de passo, responsável pela inclinação da base superior na qual está posicionada

a 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 (Figura 22).

Figura 22 - Aparato experimental para aquisição de imagens e medição do ângulo de contato



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O motor de passo utilizado é de modelo NEMA 23 (AK23-R200) e foi escolhido devido sua faixa de torque (300 kgf.cm) e seu baixo consumo de corrente e tensão (2.1 A/fase e 34 V/fase, respectivamente), tendo ainda ângulo de passo de 1,8º e 200 passos, facilitando qualquer posicionamento desejado durante sua movimentação. Como o movimento de inclinação da bancada deveria ser suave e com velocidade controlada, utilizou-se um Driver Motor Ponte H L298N conectado a um potenciômetro para o controle dos parâmetros de funcionamento do sistema.

Para a fonte luminosa vários testes foram realizados, com diferentes tipos de luzes, tais como luzes comerciais de cor branca, filtros para luz branca de cores diversas, porém sem sucesso. Da literatura observou-se a utilização de LED's de coloração específica, por exemplo: Rainho Neto (2011) utilizou a cor azul para obter ganhos em contraste no contorno de gotas para análise de molhabilidade em diversas superfícies; Jalalahmadi (2013) utilizou a coloração vermelha, também se referindo ao grau de contraste conseguido com este procedimento. Assim, no presente trabalho a coloração escolhida foi a verde, por ser uma cor primária de fácil captação por parte dos sensores da câmera digital e por apresentar bons resultados

de contraste. Por ser uma luz de emissão direta, fez-se necessário a utilização de um difusor dos raios luminosos para que não houvesse ofuscamento da imagem.

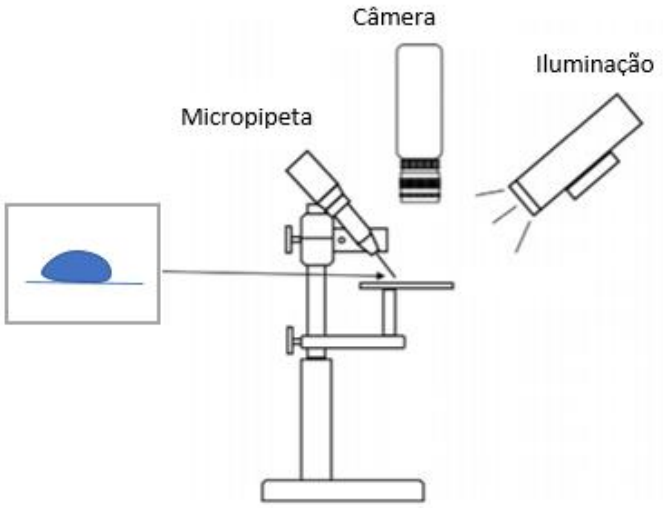
A planicidade/nivelamento da base é garantida por um relógio apalpador com resolução de 2 µm e, segundo o fabricante Mitutoyo, com erro de indicação/repetibilidade igual a 1 µm e nível linear de precisão de 200mm x 0,02 mm/m de marca Strich Ausschlag.

A câmera digital utilizada é de modelo comercial DSLR D5300 NIKON equipada com lente macro Tokina AT-X M100 PRO D com as seguintes configurações para os testes: Abertura: f/7,1; Tempo de exposição: 1/1600 s; ISO: 1250; Distância focal: 100 mm. Os suportes da câmera e fonte luminosa são dotados de rasgos que permitem a movimentação de ambas, quando necessário, para melhor ajuste de foco e iluminação da gota sobre o substrato.

O procedimento adotado para avaliar o ângulo de contato está descrito na seção 3.3.1.

Para as análises de velocidade de espalhamento foi utilizado o mesmo procedimento de gotejamento, porém a câmera utilizada para captação das imagens foi de alta velocidade, modelo Photron FASTCAM SA3 posicionada acima do substrato, conforme diagrama da Figura 23 (procedimento também utilizado por Santos Filho *et al*., 2018). As imagens foram gravadas até o instante de tempo em que não houve mais mudança na área molhada da superfície - a frequência de gravação de foi de 500 fps (*frames per second*), suficiente para visualização da interação entre a gota e superfície.

Figura 23 - Desenho esquemático do aparato experimental para avaliação da velocidade de espalhamento

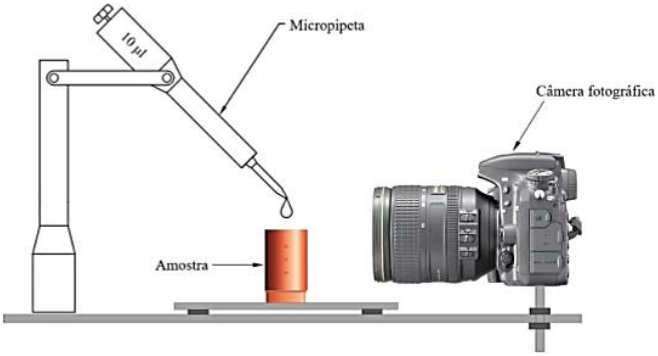


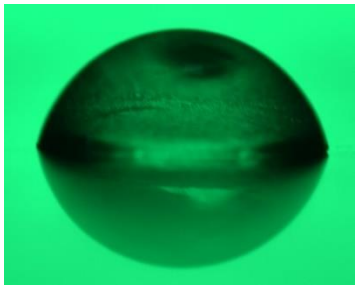
Fonte: Adaptado de Santos Filho *et al*. (2018)

3.3.1 Procedimento Experimental para Medição do Ângulo de Contato

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 10 µl, utilizando uma micropipeta posicionada sobre a amostra, de modo que a gota seja posicionada perpendicularmente à superfície de teste. Então, as imagens da gota sobre a superfície foram capturadas, conforme diagrama e imagem da Figura 24.

Figura 24 - Diagrama do procedimento experimental para obtenção das imagens de gotas sésseis. (a) procedimento de gotejamento; (b) ajuste de foco em corpo de prova (amostra) de validação





(a) (b)

Fonte: Adaptado de Nunes (2018).

Como pode ser visto na Figura 24b, há a reflexão do contorno do corpo de prova, sendo este efeito necessário para a correta identificação do ponto triplo (JALALAHMADI, 2013). Biolè e Bertola (2015), Biolè, Wang e Bertola (2016), e também Kim *et al*. (2018) se referiram aos problemas de contorno, das imagens obtidas em câmeras de alta velocidade, que necessitam de pré-tratamento antes da medição do ângulo e cuidados com o ajuste das mesmas devido ao baixo contraste e pouca iluminação das imagens resultantes.

Após a obtenção das imagens, as mesmas foram editadas a fim de serem analisadas na rotina computacional desenvolvida para este fim. A edição consistiu em cortar os espaços ao redor da gota para facilitar o processo de visualização e marcação do ponto triplo.

Descrição do método de análise

A fim de evitar variações e erros provocados pelos *softwares* de pós-processamento de imagens os quais dependem do operador, foi desenvolvida, em *software* MatLab®, uma rotina de pós-processamento de imagem para reconhecimento da interface da gota e determinação do ângulo de contato.

O programa baseia-se na conversão binária da imagem e no preenchimento do interior da gota. Esta conversão é definida por um valor de *threshold* (que varia de 0 a 1) que pode ser ajustado pelo usuário no código do programa para compensar a carência de iluminação da imagem, sendo valores próximos à zero para fotos mais escuras e próximas a 1 para fotos mais claras. O valor médio de 0,5 foi estipulado como padrão do programa.

Em seguida, é realizado o reconhecimento dos *pixels* que representam o contorno entre a região líquida e gasosa de maneira digital. Os dois pontos triplos são indicados por meio de uma entrada fornecida pelo usuário com o cursor do mouse e determinam a reta que representa numericamente o substrato. Por fim, um método de integração é aplicado nos pontos obtidos gerando um ajuste de curva polinomial e o ângulo de contato é determinado.

A rotina computacional do pós-processamento das imagens engloba as seguintes etapas:

1. Aquisição da imagem;

2. Transformação da imagem para monocromática, para permitir a fácil identificação de pixels;

3. Remoção dos pontos escuros de dentro do contorno da gota. Esse fenômeno geralmente ocorre com gotejamento de nanofluidos ou gotas com valores baixos de ângulo de contato, acarretando em sombreamento na parte interna que o *software* interpreta como sendo um vazio levando a erros na medida;

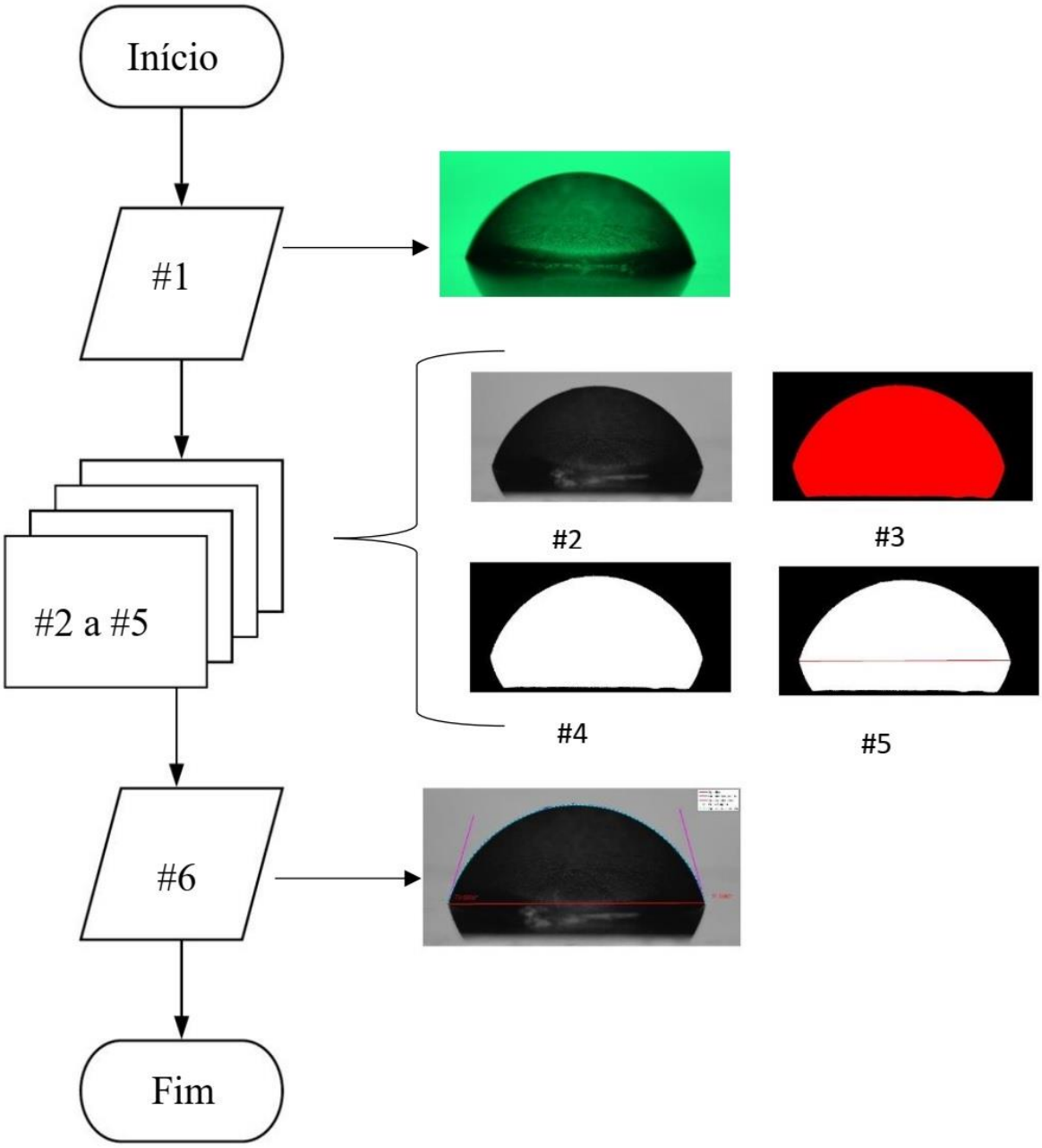
4. Preenchimento, na cor vermelha, de todo o volume do corpo da gota de modo a serem evidentes para o usuário quais pontos de contato triplo escolher;

5. Determinação dos pontos de contato triplo, criando uma linha de base; de acordo com o contorno criado pela densidade de pixels, uma curva polinomial é ajustada na borda da imagem. A linha de base é transformada em um vetor de comprimento entre os pontos determinados inicialmente;

6. Vetor tangente é traçado para os pontos colocados pelo usuário na linha de base e o ângulo formado entre o vetor e a linha de base representa o ângulo de contato da gota séssil.

A Figura 25 representa, por meio de um fluxograma, os passos descritos e seus respectivos resultados.

Figura 25 - Procedimento para o pós-processamento da imagem de uma gota séssil, incluindo a medição do ângulo de contato



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Ressalta-se que, para o resultado obtido ser coerente, foi necessária uma boa iluminação e também que a câmera estivesse posicionada paralelamente à gota, evitando distorções na imagem. O código desenvolvido é mostrado em detalhes no Apêndice A.

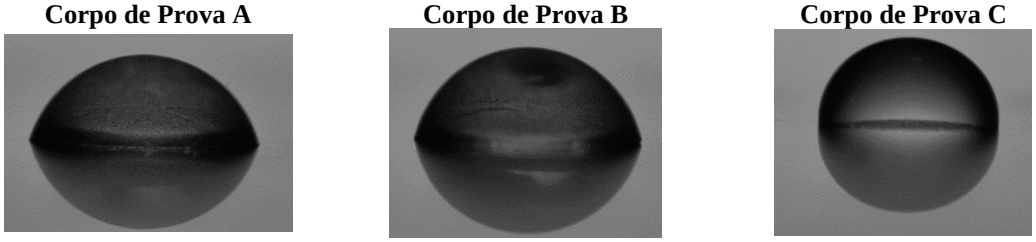
A validação do código foi realizada por meio da comparação com ângulos previamente conhecidos de corpos semiesféricos de vidro, com formas semelhantes à imagem 2D da gota posicionada na seção de testes.

3.3.2 Validação do Aparato Experimental e Procedimento para Determinação do Ângulo de Contato

Conforme Cunha, Mogaji e Cardoso (2017), a validação do algoritmo implementado no *software* MatLab® foi realizada por meio da comparação com ângulos conhecidos de corpos semiesféricos de vidro (corpos A, B e C, Figura 26). O processo de validação foi baseado naquele desenvolvido por Netto *et al*. (2013), Kiyomura *et al*. (2015) e Maneti (2017).

Figura 26 - Corpos semiesféricos usados para validação das medidas do ângulo de contato

Corpo de Prova A **Corpo de Prova B** **Corpo de Prova C**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Três operadores distintos e independentes, analisaram cada imagem e mediram seu ângulo de contato usando o algoritmo de pós-processamento de imagem proposto, sem terem informações dos resultados entre si. A Tabela 11 compara o ângulo de contato com base nas medidas e o respectivo valor estimado por relações geométricas. O baixo valor do erro absoluto médio (MAE, *mean absolute error*) confirma que o presente método de análise é válido e preciso.

Tabela 11 - Resultados da medida do ângulo de contato para os corpos de prova semiesféricos simulando gotículas

	Corpo de Prova A (º)	Corpo de Prova B (º)	Corpo de Prova C (º)
Operador 1	75,6	76,0	93,9
Operador 2	73,3	76,8	94,8
Operador 3	73,3	77,6	94,5
Valor Médio (θ_{exp})	74,1	76,8	94,4
Valor Calculado (θ_{calc})	73,8	77,9	94,9
$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\lvert\frac{\theta_{calc} - \theta_{exp}}{\theta_{calc}}\right\rvert$	0,3%	1,4%	0,5%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Este capítulo versa a respeito de todas as análises realizadas no presente trabalho, desde as relacionadas às propriedades termofísicas dos nanofluidos utilizados; a influência da concentração e das alterações superficiais causadas pela deposição de nanopartículas nas superfícies (durante o processo de ebulição); e, a relação do ângulo de contato nos resultados experimentais encontrados e discutidos por Kiyomura (2016), Maneti (2017) e Nunes (2018) - trabalhos realizados em conjunto pelo grupo de pesquisa *Nest-n* (Núcleo de Estudos em Transferência de Calor e Nanotecnologia) - os quais necessitaram de análises de ângulo de contato para suas discussões.

4.1 Condutividade Térmica

As análises de condutividade térmica contaram com auxílio das análises realizadas no Laboratório de Compósitos e Cerâmicas Funcionais – LaCCeF, da Unesp de Presidente Prudente, pelos professores responsáveis Profª. Drª. Silvania Lanfredi Nobre e Prof. Dr. Marcos Augusto de Lima Nobre, bem como as análises realizadas pelo grupo de pesquisa coordenado pelo Prof. Dr. Gherhardt Ribatski (EESC/USP). Ambas as análises foram realizadas com o equipamento Hukseflux TP-08 *probe*, o qual realiza a medição a partir do método do fio quente transiente. A incerteza de medição do equipamento é de ±3% (Figura 27).

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 12, para o fluido-base (água deionizada) e todas as concentrações de nanofluidos de alumina e maguemita estudados, nas concentrações baixa e alta, conforme definidos no presente trabalho. Para fim de comparação, uma concentração de 2,9 g/l também foi testada.

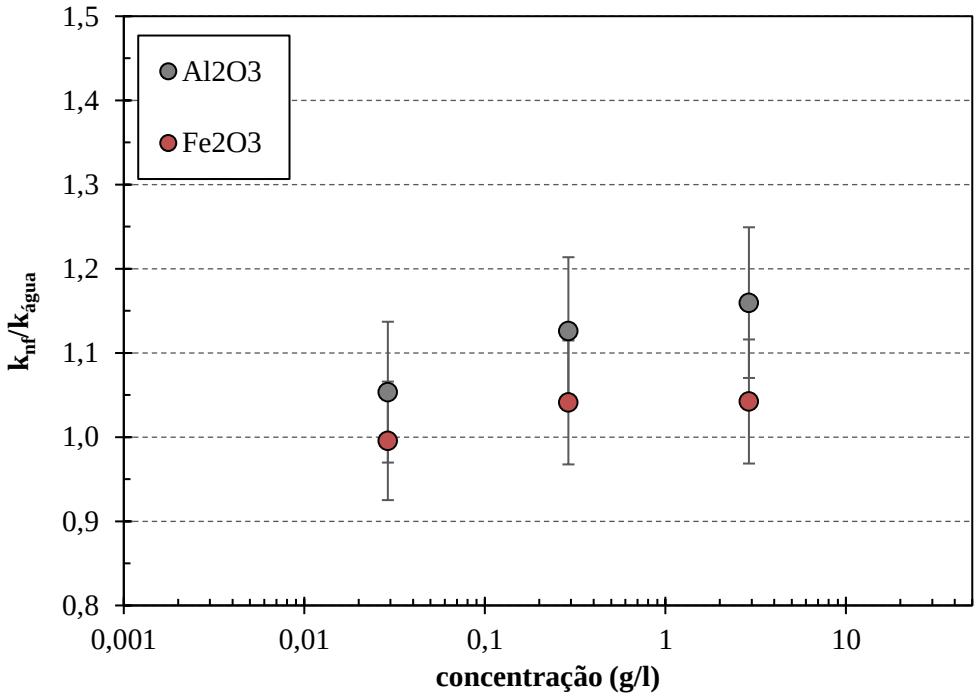
Tabela 12 - Medidas de condutividade térmica, em $W.m^{-1}K^{-1}$, dos fluidos utilizados no presente estudo

Medida	Água deionizada (DI)	Al_2O_3 0,029 g/l	Al_2O_3 0,29 g/l	Al_2O_3 2,9 g/l	Fe_2O_3 0,029 g/l	Fe_2O_3 0,29 g/l	Fe_2O_3 2,9 g/l
1	0,596	0,629	0,663	0,715	0,597	0,628	0,635
2	0,599	0,628	0,658	0,698	0,598	0,629	0,621
3	0,602	0,636	0,703	0,671	0,594	0,614	0,617
Média	0,599	0,631	0,675	0,695	0,596	0,624	0,624

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os valores da condutividade térmica efetiva, $k_{nf}/k_{água}$, obtidos pela razão entre os valores médios experimentais dos nanofluidos e o valor médio para a água, são apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Condutividade térmica efetiva dos nanofluidos utilizados, a T = 300 K



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

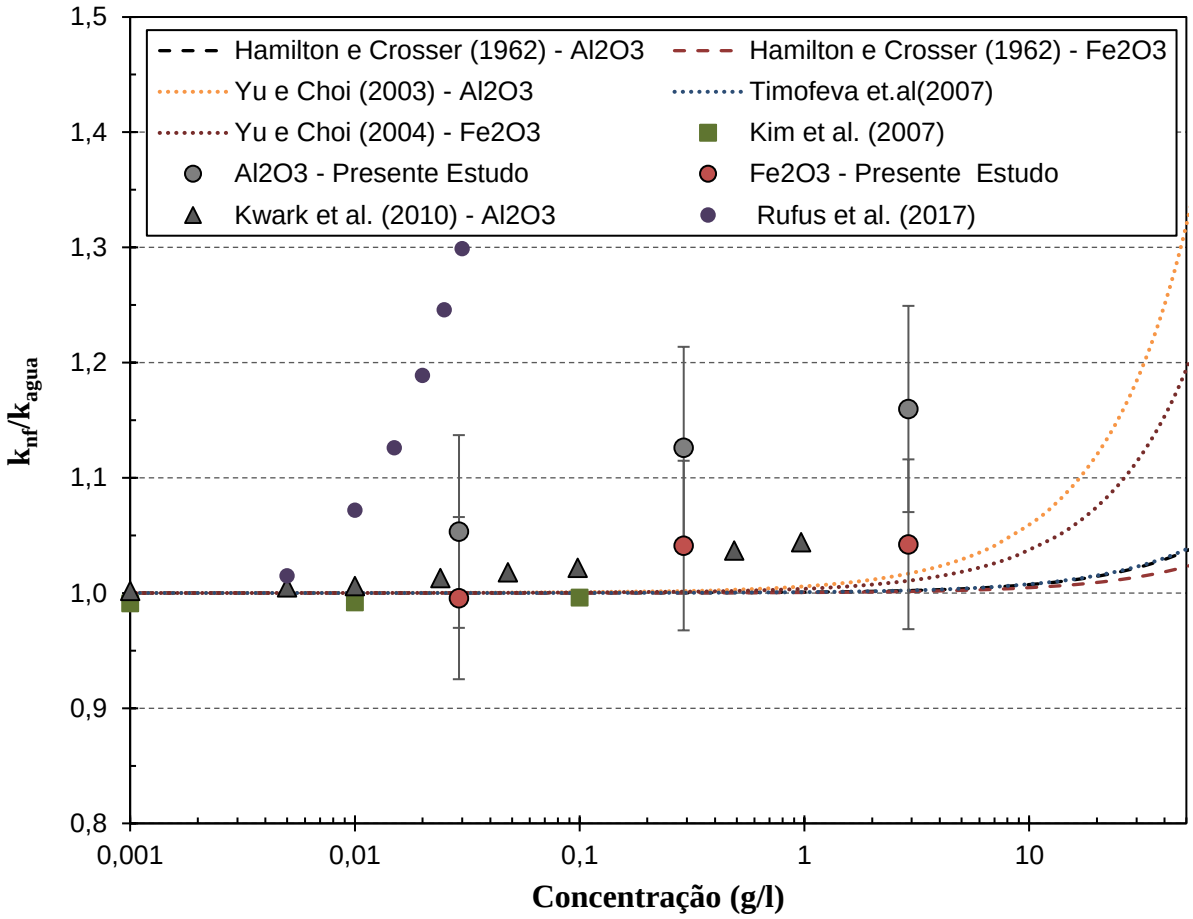
A partir da Figura 27 é possível verificar que a variação da condutividade térmica nas concentrações de 0,029 e 0,29 foram respectivamente 5% e 12%, para o nanofluido Al_2O_3-água e, 0% e 4%, para o nanofluido Fe_2O_3-água. Ou seja, a condutividade térmica dos nanofluidos nas concentrações preparadas para os ensaios de ebulição, 0,029 e 0,29 g/l, possuem valores próximos ao da água (fluido-base).

Destaca-se que a concentração de 2,9 g/l somente foi utilizada para estudo das propriedades termofísicas, e não foram utilizadas em testes de ebulição devido à baixa estabilidade desta concentração (sedimentação em curto período de tempo, após preparação). Por este motivo são apresentadas três concentrações na Figura 27, mas somente duas dessas (as de 0,029 g/l e 0,29 g/l - baixa e alta concentrações, respectivamente) foram usadas para nanoestruturação das superfícies de testes por meio do processo de ebulição.

4.1.1 Comparação com Dados da Literatura

A partir da revisão bibliográfica e dos dados experimentais obtidos foi possível obter parâmetros de comparação com resultados de outros pesquisadores. A Figura 28 apresenta uma comparação dos dados experimentais de condutividade térmica efetiva para nanofluidos de Al_2O_3-água e Fe_2O_3-água com modelos teóricos e com dados experimentais de outros autores, em função da concentração em massa de nanopartículas.

Figura 28 - Comparação entre dados experimentais de outros autores, aqueles obtidos no presente estudo e correlações usuais para a condutividade térmica efetiva dos nanofluidos (linhas pontilhadas)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os dados experimentais mostrados na Figura 28 divergem de autor para autor. Essa divergência, segundo Özerinç, Kakaç e Yazıcıoğlu (2010), pode ser explicada pelo método de preparação e estabilização de cada nanofluido (utilização ou não de surfactantes), tamanho

médio e formato das nanopartículas, temperatura e, no caso das correlações apresentadas, terem sido desenvolvidas a partir de diferentes combinações fluido-base/nanopartículas.

4.2 Viscosidade

Devido à baixa concentração e tamanho das nanopartículas dispersas no fluido-base, não foi possível obter, pelo método disponível ao autor, as alterações de viscosidade devido à dispersão das nanopartículas. Para o método utilizado (reômetro modelo LVDV-IIIU da Brokfield, do tipo cone-placa), a viscosidade sempre se igualou à do fluido-base (água deionizada, para o presente estudo).

4.3 Ângulo de Contato

A fim de obter o comportamento da interação dos fluidos com as diferentes superfícies testadas no presente estudo, as análises seguiram a ordem apresentada nas Tabelas 13 e 14, utilizando-se do próprio método desenvolvido pelo presente trabalho e apresentado no Capítulo 3, de gotejamento, aquisição de imagens e pós-processamento na rotina computacional implementada.

A Tabela 13 apresenta o comportamento do ângulo de contato da água deionizada, do nanofluido Al_2O_3-água (baixa e alta concentrações) e do nanofluido Fe_2O_3-água (baixa e alta concentrações) sobre as superfícies sem deposição (superfícies originais limpas) lisas e rugosas.

Já, a Tabela 14 apresenta as superfícies após o processo de nanoestruturação, por meio da ebulição do nanoflido Al_2O_3-água (baixa e alta concentração) ou do nanofluido Fe_2O_3-água (baixa e alta concentração) analisadas utilizando gotas de água deionizada.

Tabela 13 - Interação superficial entre superfícies não nanoestruturadas e gotas de água ou nanofluidos em diferentes concentrações (continua)

Superfícies	**Rugosidade, R_a (µm)**	**Descrição**	**Ângulo de contato estático (°)**	**Interação Gota - Superfície**
Superfície lisa	0,05	Superfície lisa sem deposição e gota de água deionizada	95°	

Tabela 13 - Interação superficial entre superfícies não nanoestruturadas e gotas de água ou nanofluidos em diferentes concentrações (continuação)

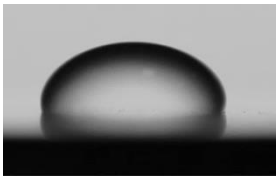
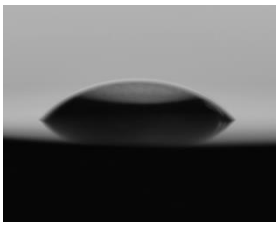
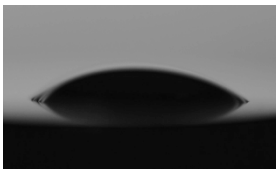
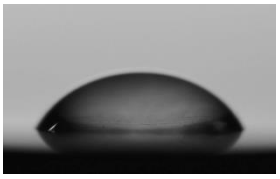
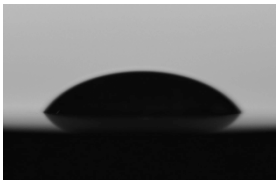
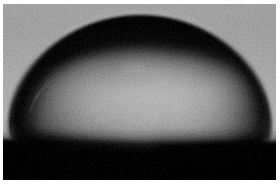
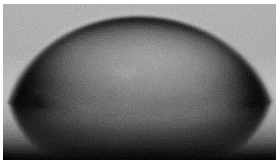
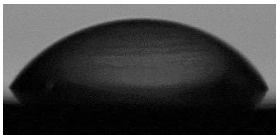
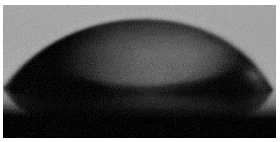
Superfície Rugosa	0,23	Superfície rugosa sem deposição e gota de água deionizada	75°	
Superfície lisa	0,05	Gota de Fe_2O_3-água com 0,029 g/l (nanofluido de baixa concentração)	36°	
Superfície lisa	0,05	Gota de Fe_2O_3-água com 0,29 g/l (nanofluido de alta concentração)	28°	
Superfície Rugosa	0,23	Gota de Fe_2O_3-água com 0,029 g/l (nanofluido de baixa concentração)	65°	
Superfície Rugosa	0,23	Gota de Fe_2O_3-água com 0,29 g/l (nanofluido de alta concentração)	51°	
Superfície lisa	0,05	Gota de Al_2O_3-água com 0,029 g/l (nanofluido de baixa concentração)	81°	
Superfície lisa	0,05	Gota de Al_2O_3-água com 0,29 g/l (nanofluido de alta concentração)	69°	

Tabela 13 - Interação superficial entre superfícies não nanoestruturadas e gotas de água ou nanofluidos em diferentes concentrações (conclusão)

Superfície Rugosa	0,23	Gota de Al_2O_3-água com 0,029 g/l (nanofluido de baixa concentração)	59°	
Superfície Rugosa	0,23	Gota de Al_2O_3-água com 0,29 g/l (nanofluido de alta concentração)	53°	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 14 - Interação superficial entre superfícies nanoestruturadas (por meio da ebulição de nanofluidos em diferentes concentrações) e gotas de água deionizada (continua)

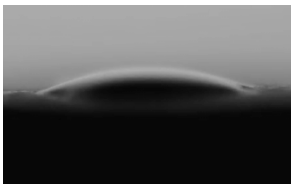
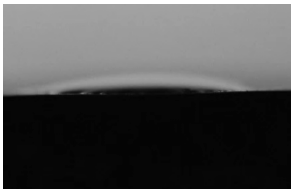
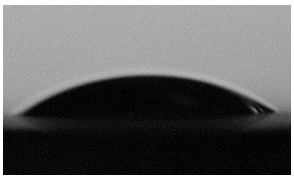
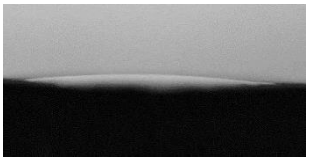
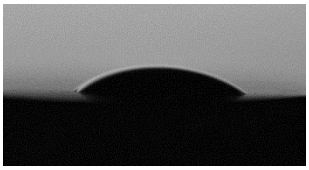
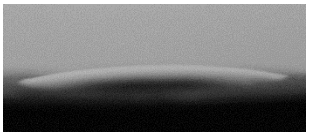
Superfícies	**Rugosidade, R_a (µm)**	**Descrição**	**Ângulo de contato estático (°)**	**Interação Gota - Superfície**
Lisa nanoestruturada com nanofluido de Fe_2O_3 de baixa concentração	0,18	Superfície lisa com deposição por meio do processo de ebulição de 0,029 g/l de nanofluido de maguemita.	21°	
Lisa nanoestruturada com nanofluido de Fe_2O_3 de alta concentração	0,80	Superfície lisa com deposição por meio do processo de ebulição de 0,29 g/l de nanofluido de maguemita.	<10°	
Rugosa nanoestruturada com nanofluido de Fe_2O_3 de baixa concentração	0,23	Superfície rugosa com deposição por meio do processo de ebulição de 0,029 g/l de nanofluido de maguemita.	20°	
Rugosa nanoestruturada com nanofluido de Fe_2O_3 de alta concentração	0,80	Superfície rugosa com deposição por meio do processo de ebulição de 0,29 g/l de nanofluido de maguemita.	<10°	

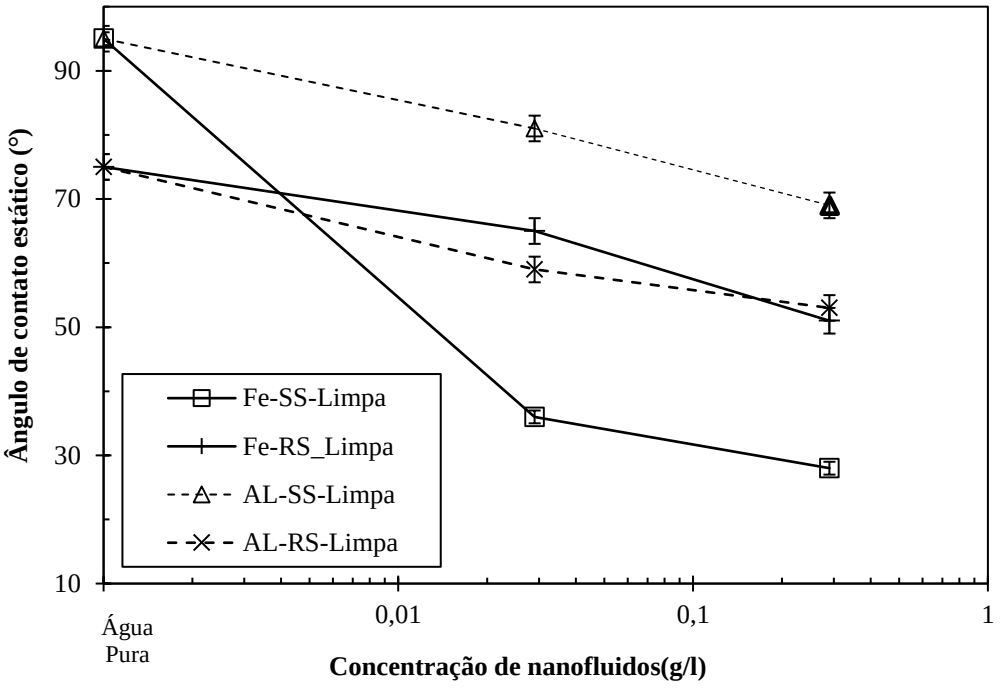
Tabela 14 - Interação superficial entre superfícies nanoestruturadas (por meio da ebulição de nanofluidos em diferentes concentrações) e gotas de água deionizada (conclusão)

Lisa nanoestruturada com nanofluido de Al_2O_3 de baixa concentração	0,24	Superfície lisa com deposição por meio do processo de ebulição de 0,029 g/l de nanofluido de alumina.	38°	
Lisa nanoestruturada com nanofluido de Al_2O_3 de alta concentração	0,61	Superfície lisa com deposição por meio do processo de ebulição de 0,29 g/l de nanofluido de alumina.	<10°	
Rugosa nanoestruturada com nanofluido de Al_2O_3 de baixa concentração	0,28	Superfície rugosa com deposição por meio do processo de ebulição de 0,029 g/l de nanofluido de alumina.	35°	
Rugosa nanoestruturada com nanofluido de Al_2O_3 de alta concentração	0,68	Superfície rugosa com deposição por meio do processo de ebulição de 0,29 g/l de nanofluido de alumina.	<10°	

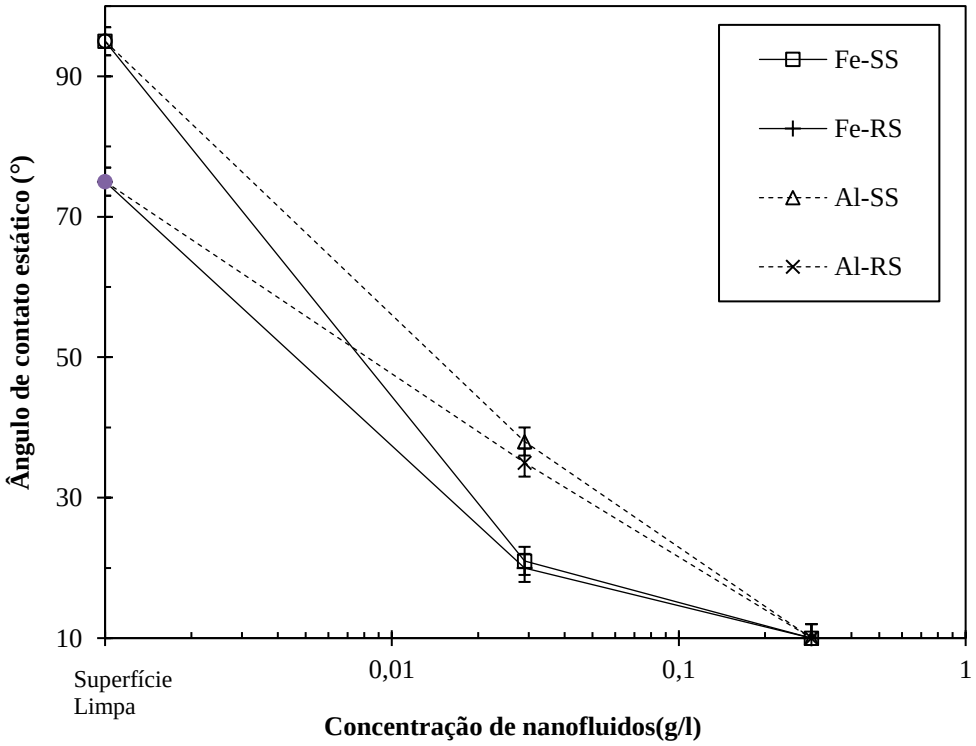
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Das análises acima, pode-se observar que além da condição original do substrato ou superfície, a concentração do nanofluido utilizado também afeta o comportamento do ângulo de contato; observa-se uma significativa redução no ângulo de contato estático com o aumento da concentração de ambos nanofluidos, para ambos os casos apresentados nas Tabelas 13 e 14. Graficamente, este efeito pode ser visto Figura 29, a seguir.

Figura 29 - Influência da concentração de nanofluidos sobre o ângulo de contato estático; (a) gotas de nanofluidos sobre as superfícies não nanpestrutuadas; (b) gota de água deionizada sobre as superfícies nanoestruturadas.** SS corresponde à superfície lisa (*smooth surface*); RS corresponde à superfície rugosa (*rough surface*)



(a)



(b)

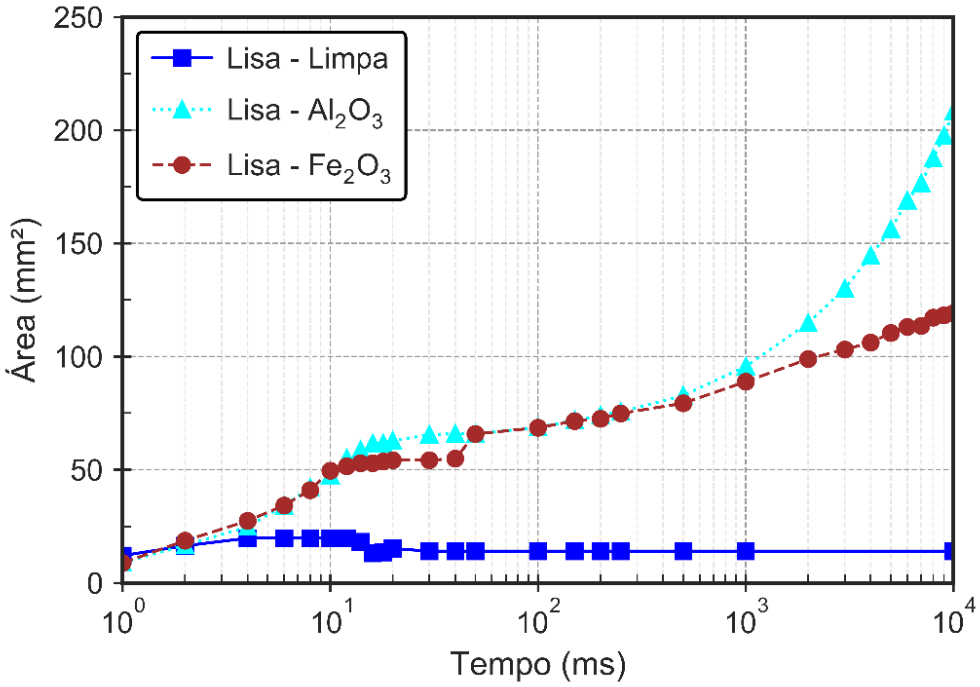
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A partir da análise da Figura 29a, ambos os nanofluidos aumentam a molhabilidade da superfície devido à mudança na tensão superficial, causada pela adição de nanopartículas no fluido-base (BHUIYAN *et al.*, 2015). No entanto, o aumento da molhabilidade é mais pronunciado nas superfícies nanoestruturadas, produzidas pelo processo de ebulição dos nanofluidos (Figura 29b). Além desse comportamento hidrofílico, a camada de nanopartículas depositadas sobre a superfície de aquecimento (nanocamada) aumenta a rugosidade média da superfície, principalmente, para a condição de superfície original lisa e nanofluido de alta concentração (Tabela 14).

A rugosidade da superfície e o ângulo de contato estático dependem do tipo e da concentração do nanofluido utilizado. À medida que aumenta a concentração do nanofluido; a rugosidade da superfície, a molhabilidade e a espessura da nanocamada depositada também aumentam.

A molhabilidade das superfícies com comportamento hidrofílico ($\theta < 10°$) foi analisada por meio da área de espalhamento da gota em função do tempo após o gotejamento (Figuras 30 e 31), partindo do instante inicial em que a gota toca a superfície até a não observância de alteração de área molhada.

Figura 30 - Evolução da área molhada, usando uma gota de água deionizada, para superfícies lisas nanoestruturadas com Al_2O_3 ou Fe_2O_3 ao longo de 10^4 ms.
*Incluído o teste para a superfície lisa original (Lisa-Limpa) como referência

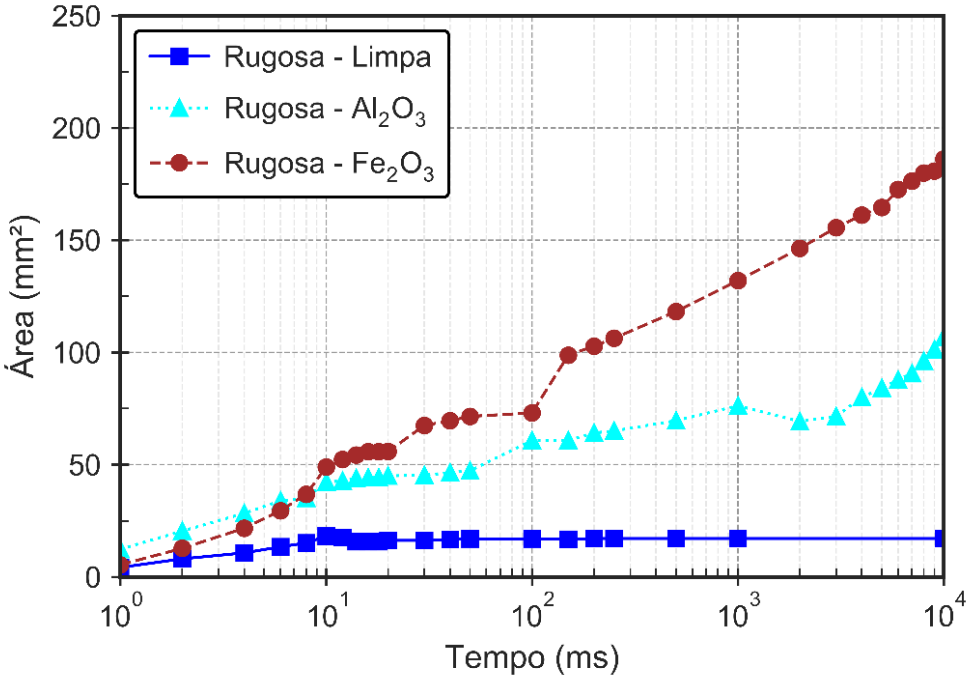


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para as superfícies nanoestruturadas, o efeito da capilaridade superficial - que "conduz" o volume da gota depositada na superfície - faz com que uma área maior seja molhada ao longo do tempo. Estuda -se que este efeito também pode interferir no coeficiente de transferência de calor e no fluxo de calor crítico (HU; LAI; DING, 2019; .KIM; LEE, 2019; CAO *et al*., 2019).

A superfície lisa nanoestruturada com o nanofluido de alumina (Al_2O_3) teve um comportamento mais molhante que a nanoestruturada com nanofluido de maguemita (Fe_2O_3), porém comportamento inverso foi observado para as superfícies rugosas (Figura 31).

Figura 31 - Evolução da área molhada, usando uma gota de água deionizada, para superfícies rugosas nanoestruturadas com Al_2O_3 ou Fe_2O_3 ao longo de 10^4 ms.
*Incluído o teste para a superfície rugosa original (Rugosa-Limpa) como referência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Além da análise de área molhada em função do tempo - a chamada velocidade de espalhamento -, outro parâmetro pode ser utilizado para analisar o efeito da nanoestruturação na interação superfície/fluido, o chamado fator ou índice de circularidade (I_c), proposto por Santos Filho *et al*. (2018) é dado por:

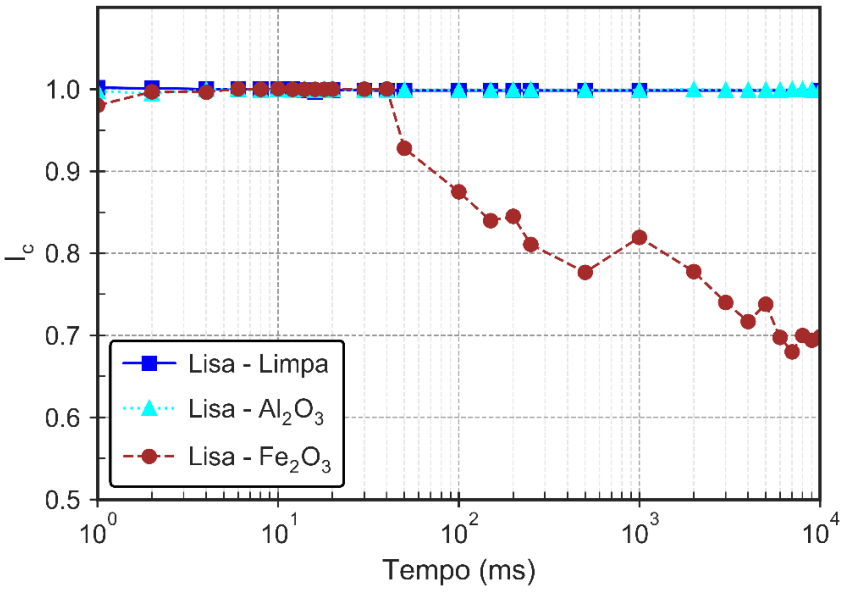
$$I_c = 4\pi \left(\frac{A_m}{P_m^2}\right) \tag{7}$$

onde A_m corresponde a área molhada da superfície, em [mm²] e, P_m, ao perímetro molhado, em [mm].

O parâmetro I_c mede o grau de uniformidade no espalhamento e varia de 0 a 1, em que valores muito abaixo de 1 determinam perfis irregulares de espalhamento e valores próximos a 1 indicam espalhamento uniforme. A análise de circularidade evidencia caminhos preferenciais de espalhamento do fluido sobre a superfície, interferindo diretamente no comportamento do CTC (o não espalhamento uniforme torna a superfície mais suscetível à ocorrência de pontos quentes – *hot spots*, levando estes pontos à secagem e consequentemente à uma diminuição do CTC)..

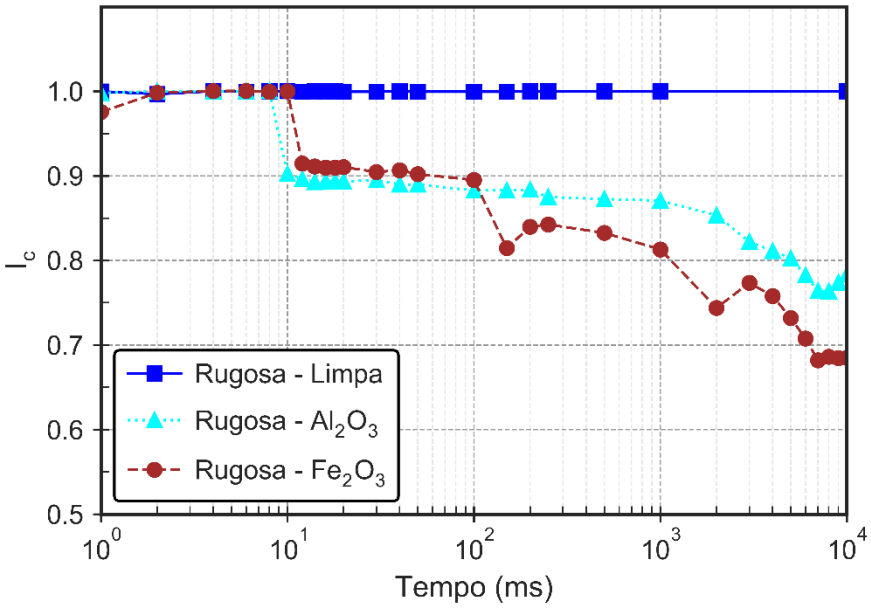
As Figuras 32 e 33 mostram os resultados da circularidade da gota d'água com os respectivos desvios padrões, para as superfícies lisas e rugosas, respectivamente, recobertas com nanopartículas de Al_2O_3 ou Fe_2O_3.

Figura 32 - Fator de circularidade para superfícies lisas nanoestruturadas com Al_2O_3 ou Fe_2O_3 ao longo de 10^4 ms.
*Incluída a análise para a superfície lisa original (Lisa-Limpa) como referência



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 33 - Fator de circularidade para superfícies rugosas nanoestruturadas com Al_2O_3 ou Fe_2O_3 ao longo de 10^4 ms.
*Incluída a análise para a superfície rugosa original (Rugosa-Limpa) como referência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

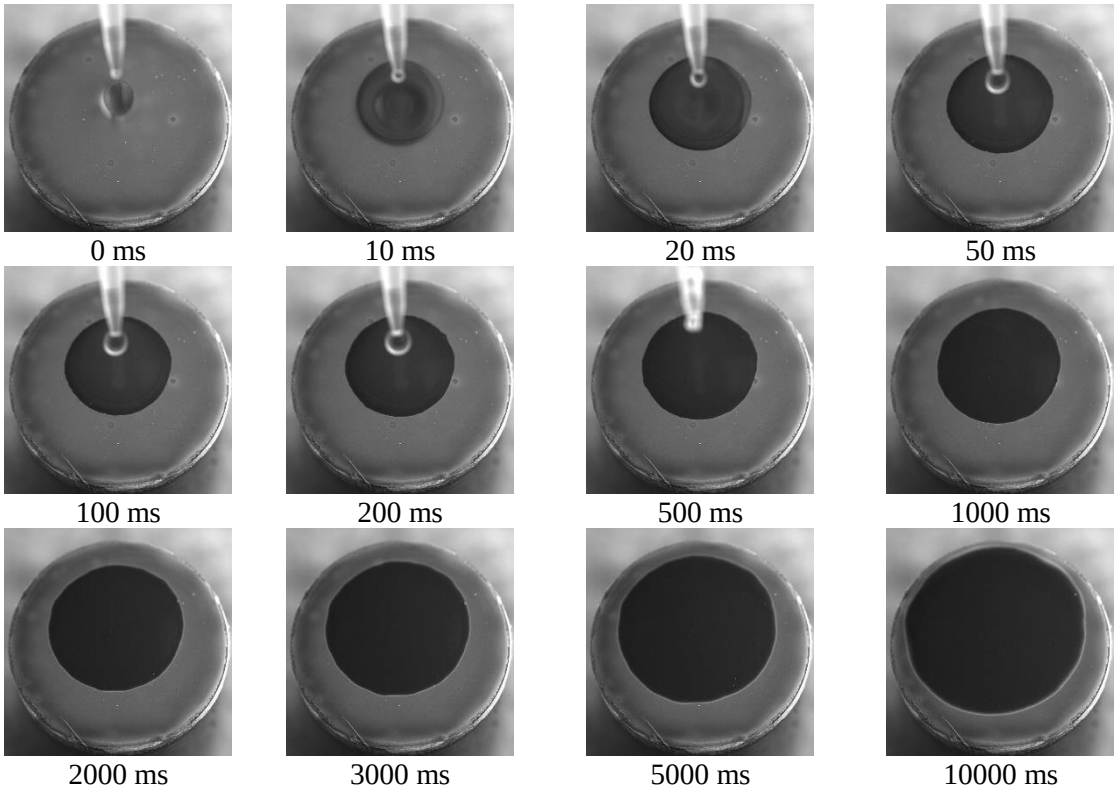
O fator de circularidade se deteriora ao longo do tempo, principalmente, para os casos com superfície rugosa (Figura 33), indicando um espalhamento desordenado do líquido sobre a superfície. Porém, para a superfície lisa nanoestruturada com o nanofluido de alumina (Figura 32), o fator de circularidade se manteve constante e próximo a 1, indicando um espalhamento uniforme por todo período de tempo analisado. Este comportamento para a superfície lisa nanoestruturada com alumina também foi reportado por Santos Filho *et al*. (2018), sendo justificado por uma nanoestruturação uniforme da superfície (sem a criação de grandes picos e vales topográficos devido a efeitos de aglomerações).

Ainda é possível observar nas figuras 32 e 33 que a após o instante 10^2 ms, o índice de circularidade apresenta um leve aumento e depois volta a cair, tanto para as amostras recobertas com nanopartículas de maguemita quanto de alumina, este comportamento acontece devido à momentânea acúmulo de fluido em cavidades maiores, o que faz com que relação entre área e perímetro molhados seja mais próximo de 1, porém este represamento entra em colapso, quando as cavidades transbordam fazendo com que o índice de circularidade volta a se deteriorar

A Figura 34 mostra a evolução temporal da área molhada para a superfície lisa recoberta com nanopartículas de Al_2O_3 (alta concentração), ratificando o valor encontrado para o I_c (no Apêndice B encontra-se a mesma análise para as demais superfícies com comportamen-

to hidrofílico, ou seja, superfícies lisas e rugosas nanoestruturadas com alumina ou maguemita de alta concentração).

Figura 34 - Evolução da área molhada em uma superfície lisa recoberta com nanopartículas de Al_2O_3 (alta concentração)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.4 Rugosidade

Como visto no Capítulo 2, a rugosidade afeta diretamente o comportamento do fluido, sendo refletido nos valores de ângulo de contato e na molhabilidade. Os processos de fabricação empregados bem como o processo de deposição das nanopartículas impõem à superfície alterações capazes de influenciar drasticamente o ângulo de contato, inclusive levando-o a valores próximos de zero (superfície completamente molhante). Por se tratar de alterações na escala micro e nano métrica, fez-se necessário a análise metalográfica das superfícies com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Tabela 15 - Análise das características das superfícies de aquecimento antes e depois dos ensaios de ebulição com nanofluidos (processo de nanoetsruturação empregado neste estudo) (continua)

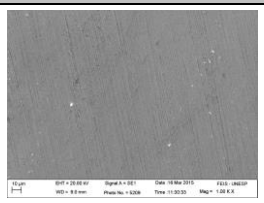
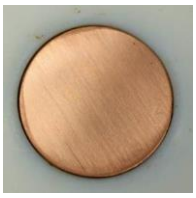
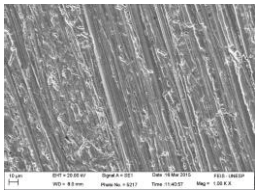
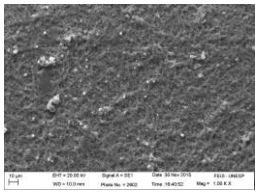
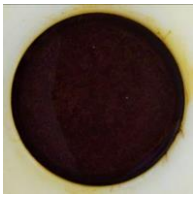
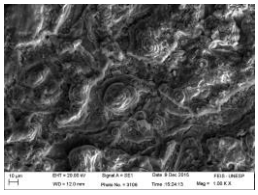
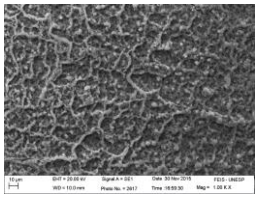
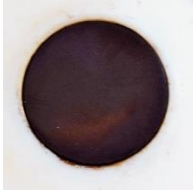
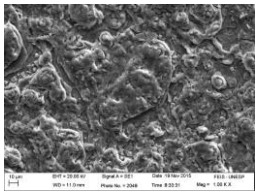
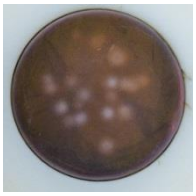
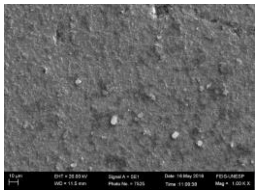
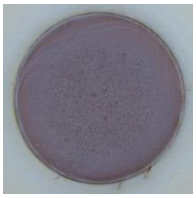
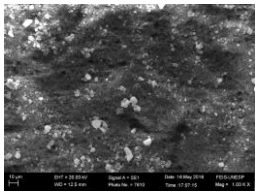
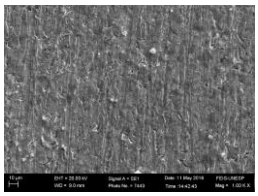
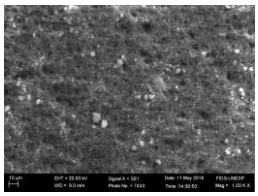
Superfícies		MEV	R_a (µm)
Lisa Limpa			0,05
Rugosa Limpa			0,23
Lisa Nanoestruturada Fe_2O_3 - baixa concentração			0,18
Lisa Nanoestruturada Fe_2O_3 - alta concentração			0,80
Rugosa Nanoestruturada Fe_2O_3 - baixa concentração			0,23
Rugosa Nanoestruturada Fe_2O_3 - alta concentração			0,80
Lisa Nanoestruturada Al_2O_3 - baixa concentração			0,24

Tabela 15 - Análise das características das superfícies de aquecimento antes e depois dos ensaios de ebulição com nanofluidos (processo de nanoetsruturação empregado neste estudo) (conclusão)

Lisa Nanoestruturada Al_2O_3 - alta concentração			0,61
Rugosa Nanoestruturada Al_2O_3 - baixa concentração			0,28
Rugosa Nanoestruturada Al_2O_3 - alta concentração			0,68

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

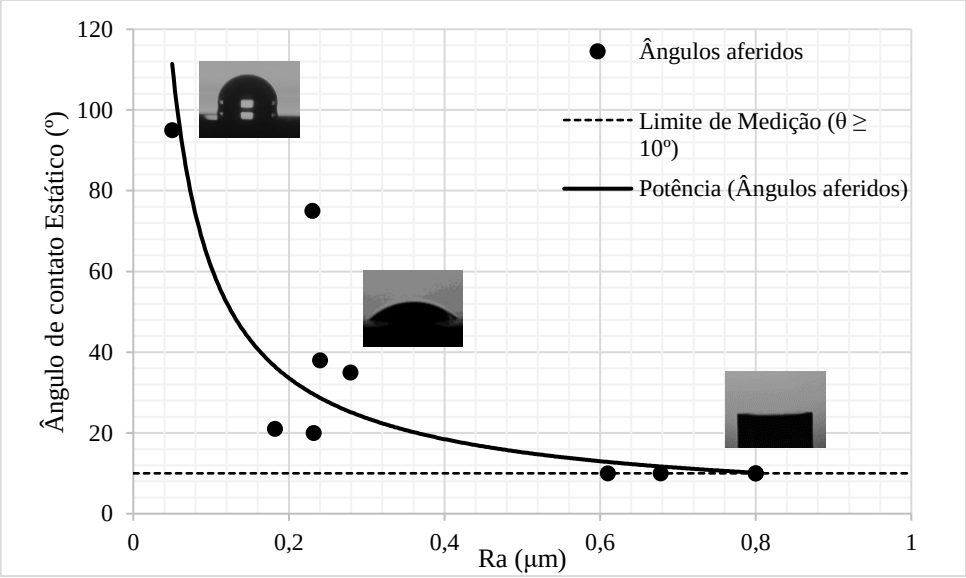
Observa-se na Tabela 15 que a rugosidade é fortemente dependente da concentração de nanofluido utilizado para o processo de nanoestruturação; à medida que a concentração mássica aumenta a rugosidade também aumenta, para ambos os nanofluidos testados.

Como pode ser visto, para as superfícies lisas observa-se uma alteração significativa no valor da rugosidade devido, provavelmente, à adição de imperfeições microestruturais sobre a superfície de teste. Já para as superfícies rugosas e baixos valores de concentração mássica, não há variações significativas na rugosidade, devido ao tamanho das nanopartículas serem muito menores que o tamanho das cavidades presentes na superfície de teste. Isto resulta no entupimento das cavidades levando, posteriormente, a uma menor eficiência na transferência de calor.

Observa-se da Tabela 15, que para nanofluidos de baixa concentração, a camada de nanopartículas depositada sobre as superfícies rugosas são bem menos irregulares quando comparadas àquelas de alta concentração, indicando uma taxa de deposição menor quando comparado ao caso de nanofluidos de alta concentração.

Sumarizando os dados obtidos experimentalmente, a Figura 35 relaciona a rugosidade da superfície aos valores de ângulo de contato obtidos (para $\theta > 10^o$). Pode-se observar um decréscimo significativo do ângulo de contato à medida que a rugosidade média, R_a, aumenta.

Figura 35 - Influência da rugosidade sobre o ângulo de contato estático

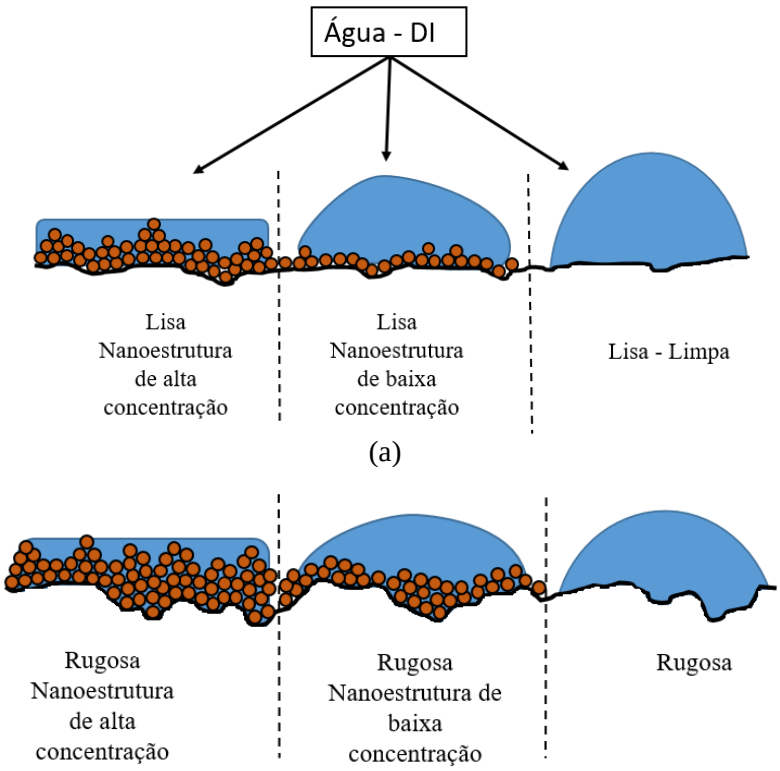


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Importante salientar que a Figura 35 apresenta uma tendência dos dados levantados, para os resultados de ebulição apresentados na figura 37, e observados ao longo de vários testes realizados durante a elaboração deste trabalho, os quais apresentaram o mesmo resultado, em que o aumento da rugosidade resulta em uma redução no ângulo de contato aferido.

Este fenômeno pode ser explicado pelo aumento de cavidades na superfície capazes de "romper" a tensão superficial da gota de água usada no teste, fazendo com que o ângulo de contato estático fosse 0° e houvesse um completo espalhamento. Segundo Vafaei (2015), a deposição de nanopartículas multiplica a quantidade de sítios de nucleação, sendo mais efetiva para o aumento do CTC e também para a molhabilidade (Figura 36). No entanto, as nanopartículas também podem "entupir" as microcavidades, se tornando menos efetivas para o aumento da molhabilidade (este efeito ocorreu nas amostras com deposição de nanopartículas a baixa concentração, tanto nas superfícies lisas quanto nas rugosas).

Figura 36 - Alterações superficiais devidas ao processo de ebulição de nanofluidos e suas influências sobre o ângulo de contato. (a) superfície lisa; (b) superfície rugosa



(b)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os efeitos da rugosidade, ângulo de contato e demais parâmetros sobre o coeficiente de transferência de calor serão abordados a seguir, na seção 4.5, a fim de complementar a análise feita até o momento e indicar diretrizes para aplicação dos nanofluidos e superfícies aqui testadas em processos térmicos em que se faça necessária mudança de fase (ebulição).

4.5 Influência dos Diferentes Parâmetros Estudados sobre o CTC em Ebulição em Piscina com o Uso de Nanofluidos

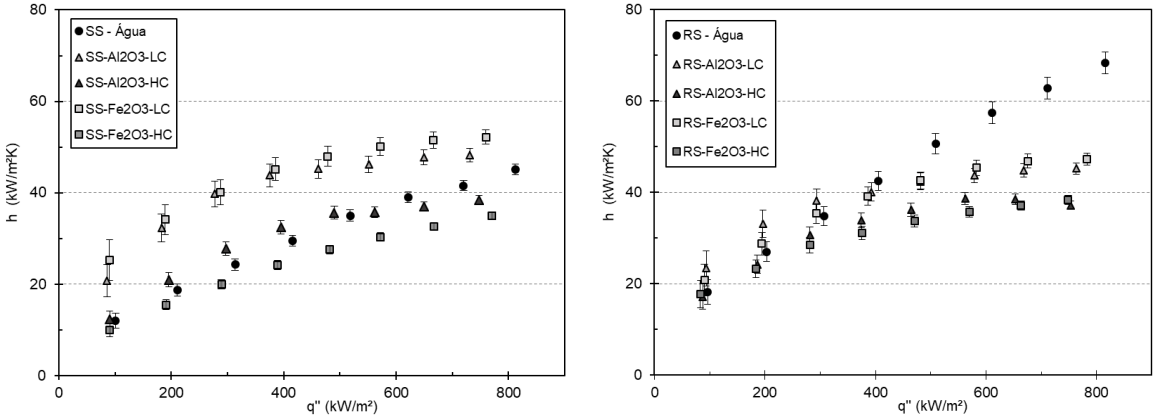
A presença de cavidades com diâmetros maiores influencia significativamente o CTC, pois de acordo com Griffith e Wallis (1960), cavidades com diâmetros maiores precisam de um menor superaquecimento, de forma que o número de sítios de nucleação ativos aumenta com o aumento da rugosidade, levando a uma redução da temperatura da superfície e, consequentemente, a um aumento no CTC.

Após os ensaios de ebulição realizados com nanofluidos de alumina e maguemita por Manetti (2017), os resultados mostraram que a melhora ou deterioração do CTC depende da concentração de nanopartículas e, principalmente, da condição original da superfície de aquecimento (antes do processo de ebulição).

A Figura 37 apresenta os resultados obtidos para o CTC em função do fluxo de calor aplicado (100 kW/m² a 800 kW/m²), para diferentes fluidos de trabalho (água e nanofluidos de alumina e maguemita) e condições superficiais: (a) superfícies lisas e (b) superfícies rugosas.

Figura 37 - Coeficiente de transferência de calor experimental para água e nanofluidos de Al2O3-água e Fe2O3-água, para diferentes concentrações. (a) superfície lisa. (b) superfície rugosa.*

*LC corresponde à baixa concentração (*low concentration*); HC corresponde à alta concentração (*high concentration*).



(a) (b)

Fonte: Manetti (2017).

Analisando os resultados tem-se que para as superfícies lisas e ambos os nanofluidos de baixa concentração ensaiados, ocorre um aumento no CTC, de 52% para alumina e 62% para maguemita (valores médios), em relação àqueles obtidos para água. Entretanto, para altas concentrações, o nanofluido de alumina apresentou leve aumento no CTC, de 15% até 400 kW/m², seguido de uma diminuição para fluxos de calor maiores; e, o nanofluido de maguemita apresentou um CTC menor do que o da água para todos os fluxos de calor aplicados.

Para as superfícies rugosas e para ambos os nanofluidos de baixa concentração ensaiados, ocorre um leve aumento no CTC até 300 kW/m² (aumento médio de 21% para alumina e 9% para maguemita quando comparados a água), seguido da diminuição para fluxos de calor

maiores. Para ambos os nanofluidos de alta concentração, a diminuição no CTC é observada desde os primeiros fluxos de calor aplicados.

Todas as curvas apresentadas - 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 aplicado.

Como mencionado, a deposição das nanopartículas desempenha um papel chave na ebulição. Assim, o aumento do CTC observado, 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, conforme observado nos resultados para rugosidade e ângulo de contatos das seções anteriores (Figura 38).

Conforme também indicado por Vafaei (2015) e Maneti (2017), a alteração superficial tem um papel crucial para explicar os resultados encontrados para o CTC; por exemplo, a deposição de nanopartículas (baixa concentração) pode multiplicar a quantidade de sítios de nucleação no caso de superfícies lisas, melhorando o CTC e, nas superfícies rugosas, as nanopartículas podem bloquear totalmente as microcavidades, deteriorando o CTC, resultado também encontrado por Quan, Wang e Cheng (2017); além disso, o aumento da concentração dos nanofluidos gera uma aglomeração de nanopartículas sobre a superfície de testes, criando uma resistência térmica adicional à transferência de calor (efeito também percebido por Drelich, 2019).

Por fim, é relevante observar que apesar da molhabilidade aumentar (diminuição do ângulo de contato) juntamente com as concentrações dos nanofluidos e com a rugosidade, o coeficiente de transferência de calor se deteriora.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

5.1 Conclusões

No presente trabalho se realizou o desenvolvimento (concepção, projeção, construção e validação) de um aparato experimental para aquisição de imagens de gotas sésseis, e implementação de uma rotina computacional para análise do ângulo de contato para diferentes nanofluidos e condições superficiais.

Foi realizada também uma análise das principais propriedades termofísicas dos nanofluidos testados e da interação superfície-fluido (ângulo de contato, evolução da área molhada e fator de circularidade); bem como, uma análise das condições superficiais e características dos nanofluidos de alumina e maguemita sobre o comportamento térmico no processo de ebulição em piscina.

As análises foram realizadas para dois substratos base (correspondendo às superfícies lisas ou rugosas), dois nanofluidos (Al_2O_3-água ou Fe_2O_3-água) com concentrações diferentes (0,029 g/l e 0,29 g/l).

Como conclusões do presente trabalho tem-se que:

- O aparato experimental proposto para a medição do ângulo de contato foi construído e validado satisfatoriamente. A rotina computacional implementada para a medição do ângulo de contato é confiável e o baixo valor do erro médio absoluto confirma que o presente método de análise é válido.
- A camada depositada sobre a superfície de teste após o processo de ebulição do nanofluido acarreta em aumento notável na molhabilidade, observado pela diminuição no ângulo de contato estático.
- O fator de circularidade se deteriora ao longo do tempo, principalmente para os casos com superfície rugosa, indicando um espalhamento desordenado do líquido sobre a superfície. Entretanto, para a superfície lisa nanoestruturada com o nanofluido de alumina, o fator de circularidade se mantém constante e próximo a 1, indicando uma nanoestruturação uniforme da superfície (sem a criação de grandes picos e vales topográficos devido a efeitos de *clusters*).
- Os resultados das análises demonstram coerência em relação à influência do processo de deposição de nanopartículas sobre o CTC, em que as superfícies submetidas à ebulição dos nanofluidos de alta concentração, apesar de terem uma melhor molhabilida-

de, apresentam uma maior espessura da camada depositada levando ao decréscimo do coeficiente de transferência de calor.

- Para baixa concentração de nanofluido, o efeito das características microestruturais é dominante quando comparado ao efeito da resistência térmica da nanocamada formada sobre a superfície de aquecimento.
- A nanocamada formada por deposição de nanopartículas afeta tanto a rugosidade, quanto a molhabilidade. Observa-se que a nanocamada tem uma influência maior na molhabilidade da superfície do que a rugosidade da superfície original.
- A rugosidade da superfície tem efeito mais predominante sobre o comportamento da transferência de calor. Já, a molhabilidade possui um papel mais importante sobre o comportamento do fluxo de calor crítico, conforme também relatado por outros autores.

5.2 Recomendações Futuras

Como recomendações para trabalhos futuros têm-se:

- Revisão da rotina computacional para inclusão da medição de ângulos dinâmicos (avanço e recuo);
- Aplicação da metodologia de análise para determinação do ângulo de contato em escoamentos (ebulição convectiva);
- Aumentar o banco de dados experimental para diferentes fluidos de trabalho (nanofluidos) e condições superficiais (material, geometria e condições morfológicas) a fim de estabelecer uma relação entre os diferentes parâmetros abordados no presente estudo (uma correlação capaz de predizer o comportamento térmico em função destes parâmetros e suas interações).

REFERÊNCIAS

ABDUL, M.; SIDDIQUI, Q.; ALI, S.; FEI, H.; ROSHAN, H. Current understanding of shale wettability: A review on contact angle measurements. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 181. p. 1–11, 2018.

AGARWAL, D. K.; VAIDYANATHAN, A; KUMAR, S. S. Investigation on convective heat transfer behavior of kerosene-Al2O3 nanofluid. **Applied Thermal Engineering**, Kidlington, v. 84, p. 64–73, 2015.

AGARWAL, R.; VERMA, K.; AGRAWAL, KUMAR N.; *et al*. Synthesis, characterization, thermal conductivity and sensitivity of CuO nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, Kidlington, v. 102, p. 1024–1036, 2016.

AHMADI, H. A.; MIRLOHI, A.; NAZARI, M.A; GHASEMPOUR, R. A review of thermal conductivity of various nanofuids. **Journal of Molecular Liquids**. Amsterdam, v. 265, University of Shahrood, p. 181-188. 2018.

AHN, H. S.; PARK, G.; KIM, J. M.; *et al*. The effect of water absorption on critical heat flux enhancement during pool boiling. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 42, p. 187–195, 2012.

AHN, H. S.; KIM, J. M.; KIM, M. H. Experimental study of the effect of a reduced graphene oxide coating on critical heat flux enhancement. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 60, n. 1, p. 763–771, 2013.

AKHAVAN-BEHABADI, M. A.; HEKMATIPOUR, F.; MIRHABIBI, S. M.; *et al*. Experimental investigation of thermal-rheological properties and heat transfer behavior of the heat transfer oil-copper oxide (HTO-CuO) nanofluid in smooth tubes. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Kidlington, v. 68, p. 681–688, 2015.

ALIREZAIE A., HAJ MOHAMMAD M. H., ALIPOUR A., SALARI M. Do nanofluids affect the future of heat transfer? A benchmark study on the efficiency of nanofluids. **Energy the International Journal,** Melville, v.157, p. 979-989. 2018

ANOOP K. B.; KABELAC S.; SUNDARARAJAN T.; DAS SARIT K. Rheological and flow characteristics of nanofluids: influence of electroviscous effects and particle agglomeration. **Journal of Applied Physics**, Melville, v. 106, p. 1-8, 2009.

BANG, I C; HEUNG CHANG, S.. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al2O 3-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.

BASHFORTH, F.; ADAMS, J. C. **An attempt to test the theory of capillary action**. Cambridge: At the University Press, 1892.

BATCHELOR, G. K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 83, n. 1, p. 97-117, 1977.

BECK, M.P.; SUN, T.; TEJA, A. S. The thermal conductivity of alumina nanoparticles dispersed in ethylene glycol. **Fluid Phase Equilibria,** Amsterdam, v. 260, n. 2, p. 275–278, 2007.

BENDURE, R. L. Dynamic adhesion tension measurement. **Journal of Colloid Interface Science**, Maryland Heights, v. 42, p. 137–144, 1973.

BHATTACHARYA, P.; NARA, S.; VIJAYAN, P.; TANG, T; LAI, W.; PHELAN, P. E.; PRASHER, R.S.; SONG, D.W.; WANG, J. Characterization of the temperature oscillation technique to measure the thermal conductivity of fluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer,** Kidlington, v. 49. p. 2950-2956, 2006.

BHUIYAN, M. H. U.; SAIDUR, R.; AMALINA. M. A.; MOSTAFIZUR, R. M.; ISLAM, AKMS. Effect of nanoparticles concentration and their sizes on surface tension of nanofluids, **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 105, p. 431–437, 2015.

BIGELOW, W. C.; PICKETT, D.L.; ZISMAN, W. A. **Journal of Colloid Science**, Maryland Heights, v. 1, p. 513–538, 1946.

BIOLÈ, D.; BERTOLA, V. A goniometric mask to measure contact angles from digital images of liquid drops. **Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 467, p. 149-156, 2015. Doi: 10.1016/j.colsurfa.2014.10.060.

BIOLÈ, D.; WANG, M.; BERTOLA, V. Assessment of image processing methods to measure the apparent contact angle of liquid drops. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 76, p. 296–305, 2016.

BIZI-BANDOKI, P.; BENAYOUN, S.; VALETTE, S.; BEAUGIRAUD, B., AUTOUARD, E. Modifications of roughness and wettability properties of metals induce by femtosecond laser treatment. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 257, p. 5213-5218, 2011.

BORMASHENKO, E. Progress in understanding wetting transitions on rough surfaces. **Advances in colloid and interface science**, Amsterdam, v. 222, p. 92–103, ago. 2015. Doi: 10.1016/j.cis.2014.02.009.

BRINKMAN, H. C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions, **The Journal of Chemical Physics**, Melville, v. 20, 571, 1952.

BUONGIORNO, J.; CAHILL, D. G.; HIDROVO, C. H.; MOGHADDAM, S.; SCHMIDT, A. J.; SHI, L. Micro- and nanoscale measurement methods for phase change heat transfer on planar and structured surfaces. **Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering**, New York, v. 18, n. 3, p. 270-287, 2014. Doi: 10.1080/15567265.2014.883454.

CAO, L.; KIELY, J.; PIANO, M.; LUXTON, R. Facile and inexpensive fabrication of zinc oxide based bio-surfaces for c-reactive protein detection. **Scientific Reports**, London, v. 8, 12687, 2018**.**

CAO, Z.; WU, Z.; PHAM, A. D.; *et al*. Pool boiling of HFE-7200 on nanoparticle-coating surfaces: Experiments and heat transfer analysis. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 133, p. 548–560, 2019.

CHANDRASEKAR, M; SURESH, S. A Review on the Mechanisms of Heat Transport in Nanofluids. **Heat Transfer Engineering**, New York, v. 30:14, p. 1136-1150, 2009.

CHANDRASEKAR, M.; SURESH, S.; CHANDRA B., A. Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al2O3/water nanofluid. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 34, n. 2, p. 210–216, 2010.

CHAUPIS, J. E. R., **Simulação numérica de nanofluidos escoando no interior de dutos retos.** 2011. 164 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

CHITRA B.; KUMAR, K. S. Heat transfer enhancement using single base and double base nanofluids. **Journal of Molecular Liquids**, Amsterdam, v. 221, p. 1128–1132, 2016.

CHITRA, B.; KUMAR, K. Sathish. Heat transfer enhancement using single base and double base nanofluids. **Journal of Molecular Liquids**, Amsterdam, v. 221, p. 1128–1132, 2016.

CHIAM, H. W.; AZMI, W. H.; USRI, N. A.; MAMAT, R.; ADAM, N. M. Thermal conductivity and viscosity of Al2O3 nanofluids for different based ratio of water and ethylene glycol mixture. **Experimental Thermal Fluid Science**, Philadelphia, v. 81, p. 420–9, 2017.

CHOI, S. U. S. Enhancing Thermal Conductivity of Fluid with Nanoparticles, Developments and Applications of Non-Newtonian Flow, ASME. **Journal of Heat Transfer**, New York, v. 66, p. 99-105, 1995.

CHOI C, YOO HS, OH JM. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants. **Current Applied Physics**, Amsterdam, v. 8, 710–712, 2008.

CHON, C. H.; KIHM, K. D.; LEE, S. P.; CHOI, S. U. S. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al2O3) thermal conductivity enhancement. **Applied Physics. Letters**, Melville, v. 87, p. 153107, 2005.

CILOGLU, D. Experimental Investigation of Nucleate Pool Boiling Heat transfer of Nanofluids from a Hemispherical Surface. **Heat Transfer Engineering**, New York, v. 38, p. 10, p. 919-930, 2017.

CORCIONE, M. Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. **Energy Conversion and Management**, London, v. 52, n. 1, p. 789–793, 2011.

CUNHA, A. P.; MOGAJI, T. S.; CARDOSO, E. M. A Method for Measuring Contact Angle and for Analyzing the Surface Wettability. *In*: WORLD CONFERENCE ON EXPERIMENTAL HEAT TRANSFER, FLUID MECHANICS AND THERMODYNAMICS (ExHFT-9), 9th., 2017, Foz do Iguaçu. **Proceedings** […] Foz do Iguaçú: [*s. n.*], 2017.

DAREH, F. R.; HAGHSHENASFARD, M.; ESFAHANY, M. N.; JAZI, H. S. Experimental investigation of time and repeated cycles in nucleate pool boiling of alumina/water nanofluid on polished and machined surfaces. **Heat and Mass Tansfer**, New York, n. 6, p. 1653–1668, 2017. DOI: 10.1007/s00231-017-2266-2.

DAS, S. K.; PUTRA, N.; ROETZEL, W. Pool boiling characteristics of nano-fluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 46, n. 5, p. 851–862, 2003.

DEMIR, E.; IZCI, T.; ALAGOZ, A. S.; *et al*. Effect of silicon nanorod length on horizontal nanostructured plates in pool boiling heat transfer with water. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 82, n. 1, p. 111–121, 2014.

DEVENDIRAN, D. K.; AMIRTHAM, V. A., A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. **Valan Arasu Amirtham Department of Mechanical Engineering**, Thiagarajar College of Engineering, Madurai 625015, India, 2016.

DHARMENDRA, M.; SURESH, S.; KUMAR, C. S.; YANG, Q. Pool boiling heat transfer enhancement using vertically aligned carbon nanotube coatings on a copper substrate. **Applied Thermal Engineering**, Kidlington, v. 99, p. 61–71, 2016.

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

DRELICH, J. W. Contact angles: From past mistakes to new developments through liquid-solid adhesion measurements. **Advances in Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 267, p. 1–14, 2019.

DUPRÉ, A. M; DUPRÉ, P. **Théorie mécanique de la chaleur**. Paris: Gauthier-Villars, 1869.

EILERS, V. H. Die viskocitat von emulsionen hochviskoser stoffe als funktion der konzentration. **Kolloid Z**., Heidelberg, v. 97, p. 313–321, 1941.

EINSTEIN, A. Eine neue bestimmung der molek dimensionen. **Ann Phys**, Maryland Heights, v. 324, n. 2, p. 289–306, 1906.

ELCIOGLU, E. B.; YAZICIOGLU, A. G.; TURGUT, A.; ANAGUN, A. S. Experimental study and Taguchi Analysis on alumina-water nanofluid viscosity. **Applied Thermal Engineering**, Kidlington, v. 128, p. 973-981, 2018.

ELLISON, A. H.; ZISMAN, W. A. Wettability of halogenated organic solid surfaces. **Journal of Physical Chemistry**, Washington, v. 58, n. 3, p. 260–265, 1954.

ERBIL, H. Y.; MCHALE, G.; ROWAN, S. M.; *et al*. Determination of the Receding Contact Angle of Sessile Drops on Polymer Surfaces by Evaporation. **Langmuir**, Washington, v. 15, n. 21, p. 7378–7385, 1999.

EXTRAND, C W; KUMAGAI, Y. Advancing and Receding Contant Angle of PTFE. **Journal of Colloid and Interface Science**, Maryland Heights, v. 191, n. 191, p. 378–383, 1997.

FANG, X.; CHEN, Y.; ZHANG, H.; CHEN, W.; DONG, A.; WANG, R. Heat transfer and critical heat flux of nanofluid boiling: a comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** Kidlington, v. 62, p. 924–940, 2016. Doi: 10.1016/j.rser.2016.05.047.

FEDELE, L.; COLLA, L.; BOBBO, S. Viscosity and thermal conductivity measurements of water-based nanofluids containing titanium oxide nanoparticles. **International Journal of Refrigeration**, Kidlington, v. 35, p. 1359–66, 2012.

FORREST, E.; WILLIAMSON, E.; BUONGIORNO, J.; *et al*. Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 53, n. 1–3, p. 58–67, 2010.

FORT, T.; PATTERSON, H. T. A simple method for measuring solid-liquid contact angles. **Journal of Colloid Science**, Maryland Heights, v. 18, n. 3, p. 217–222, 1963.

FRANKEL, N. A.; ACRIVOS, A. On the viscosity of a concentrate suspension of solid spheres. **Chemical Engineering Science**, Kidlington, v. 22, p. 847–853, 1967.

GANVIR, R. B.; WALKE, P. V.; KRIPLANI, V. M. Heat transfer characteristics in nanofluid: a review. Department of Mechanical Engineering, G. H. Raisoni College of Engineering, 2017.

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.

GHEITAGHY, A.; SAFFARI, H.; GHASIMI, D.; GHASEMI. A. Effect of electrolyte temperature on porous electrodeposited copper for pool boiling enhancement. **Applied Thermal Engineering**, Kidlington, v. 113, p. 1097–1106, 2017.

GOOD, R. J.; PASCHECK, J. K. In: Wetting, Spreading and Adhesion, ed. by F. Paddy, **Academic Press**, New York, 1978, p. 147.

GRAHAM, A. On the viscosity of suspensions of solid spheres, **Applied. Scientific Research,** Dordrecht, v. 37, p. 275–286, 1981.

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.

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.

HEGDE, R. N.; RAO, S. S.; REDDY, R. P. Studies on nanoparticle coating due to boiling induced precipitation and its effect on heat transfer enhancement on a vertical cylindrical surface. **Experimental Thermal Fluid Science,** Philadelphia, v. 38, p. 229–36, 2012.

HEITICH, L. V.; PASSOS, J. C.; CARDOSO, E. M.; da SILVA, M. F.; KLEIN, A. N. Nucleate boiling of water using nanostructured surfaces. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Heidelberg, v. 36, p. 181-192, 2014.

HEMMAT, E. M.; SAEDODIN, S.; MAHIAN, O.; WONGWISES, S.; Thermal conductivity of Al2O3/water nanofluids, **Journal of Thermal Analysis Calorimetry**. Budapest, v. 117, n. 2, p. 675–681, 2014. DOI: 10.1007/s10973-014-3771-x.

HENDRICKS, T. J.; KRISHNAN, S.; CHOI, C.; CHANG, C.; PAUL, B. Enhancement of pool boiling heat transfer using nanostructured surfaces on aluminum and copper. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 53, p. 3357–3365, 2010.

HERNAIZ, M.; ALONSO, V.; ESTELLÉ, P. The contact angle of nanofluids as thermophysical property. **Journal of Colloid and Interface Science,** Maryland Heights, v. 547. p. 393-406, 2019.

HONG, T.-K.; YANG, H.-S.; CHOI, C. J., Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids, **Journal of Applied Physics**, Melville, v. 97, n. 6, p. 064311, 2005.

HU P., SHAN WL, YU F., *et.al.* Thermal conductivity of AlN- ethanol nanofluids. **International Journal of Thermophysics**, New York, v. 29, p. 1968–73, 2008.

HU, H.; LAI, Z.; DING, Guoliang. Influence of surface wettability on heat transfer and pressure drop characteristics of wet air in metal foam under dehumidifying conditions. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux Cedex v. 135, n. April 2018, p. 331–343, 2019.

HUNTER, R. J. **Foundations of Colloid Science**, 2nd ed. Oxford: Clarendon, 2001.

JALALAHMADI, G. **Development of a new methodology for contact angles measurement on monolayer of cells**. 2013. 151 f. Thesis (Master of Science) – The Graduate Faculty, The University of Akron, Akron, 2013.

JOHNSON, R. E.; DETTRE, R. H. Wetting of low-energy surfaces. *In*: **Wettability**. New York: Marcel Dekker, 1993. v. 49. (Surfactant Science Series).

JUNG, J. Y.; CHO, C.; LEE, W. H.; *et al*. Thermal conductivity measurement and characterization of binary nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 54, n. 9–10, p. 1728–1733, 2011.

JUNG, J.-Y.; KIM, E. S.; KANG, Y. T. Stabilizer effect on CHF and boiling heat transfer coefficient of alumina/water nanofluids. **Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 55, p. 1941–1946, 2011.

KAMALGHARIBI, M.; ZAMZAMIAN, S. AH; HORMOZI, F. Experimental Study of the Stability of Deionized Water Based Copper Oxide Nanofluid and Achievement to the Optimal Stability Conditions. **Amirkabir Journal of Mechanical Engineering**, Iran, v. 48, n. 1, p. 17–30, 2016.

KAMEL S. M., LEZSOVITS F., HUSSEIN A. M., MAHIAN O., WONGWISES S. Latest developments in boiling critical heat flux using nanofluids: A concise review. **International Communications in Heat and Mass Transfer,** Kidlington, v. 98, p. 59-66, 2018.

KANGUDE, P.; SRIVASTAVA, A. Performance of SiO2-water nanofluids for single bubble-based nucleate pool boiling heat transfer. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 138, p. 612-625, 2019.

KARIMI, H.; YOUSEFI, F.; RAHIMI, M. R. Correlation of viscosity in nanofluids using genetic Algorithm-neutral Network (GA-NN). **Heat and Mass Transfer**, Heidelberg, v. 47, n. 11, p. 1417-1425, 2011.

KATHIRAVAN, R.; KUMAR, R.; GUPTA, A.; CHANDRA, R. Preparation and pool boiling characteristics of copper nanofluids over a flat plate heater. **International Journal Heat Mass Transfer**, Kidlington, v. 53, p. 1673–81, 2010.

KEDZIERSKI, M. A.; GONG, M. Effect of CuO nanolubricant on R134a pool boiling heat transfer. **International Journal of Refrigeration**, London, v. 32, n. 5, p. 791–799, 2009.

KHAIRUL, M. A. *et al.* Application of nanofluids to enhance heat transfer in renewable energy systems. *In*: ASEAN AUSTRALIAN ENGINEERING CONGRESS (AAEC 2015): AUSTRALIAN ENGINEERING CONGRESS ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND RENEWABLE ENERGY, 3rd., 2015, Australia. **Proceedings** […] [*S. l.: s. n.*], 2015. p. 49.

KHAIRUL, M. A.; SHAH, K.; DOROODCHI, E.; *et al*. Effects of surfactant on stability and thermo-physical properties of metal oxide nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 98, p. 778–787, 2016.

KHAN, S. A.; ATIEH, M. A.; KOÇ, M. Micro-Nano Scale Surface Coating for Nucleate Boiling Heat Transfer: A Critical Review. **Energies**, Basel, v. 11, p. 3189, 2018.

KHODADADI, H.; TOGHRAIE, D.; KARIMIPOUR, A. Effects of nanoparticles to present a statistical model for the viscosity of MgO-Water nanofluid. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 342, p. 166-180, 2019.

KIM, H. D.; KIM, J.; KIM, M. H. 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.; KIM, H. D.; KIM, H.; *et al*. Effects of nano-fluid and surfaces with nano structure on the increase of CHF. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 34, n. 4, p. 487–495, 2010.

KIM, J. S.; GIRARD, A.; JUN, S.; LEE, J.; SEUNG, M. Y. Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer of water on hydrophobic surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Philadelphia, v. 118, p. 802-811, 2018.

KIM, J.; LEE, J. S. Effects of surface tension and inclined surface wettability on sliding bubble heat transfer. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 142, p. 77–88, 2019.

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. **Efeito das superfícies nano e micro estruturadas sobre a ebulição nucleada**. 2016, 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2016.

KIYOMURA, I. S.; MANETTI, L. L.; CUNHA, A. P.; RIBATSKI, G.; CARDOSO, E. M. An analysis of the effects of nanoparticles deposition on characteristics of the heating surface and on pool boiling of water. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 106, p. 666–674, 2017.

KOLE, M.; DEY, T. K. Thermal conductivity and viscosity of Al2O3 nanofluid based on car engine coolant. **Journal of Physics D: Applied Physics**, Bristol, v. 43-315501, 10pp, 2010.

KOLE, M.; DEY, T. K. Role of interfacial layer and clustering on the effective thermal conductivity of CuO-gear oil nanofluids. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 35, n. 7, p. 1490–1495, 2011.

KOLE, M.; DEY, T. K. Thermophysical and pool boiling characteristics of ZnO-ethylene glycol nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 62, p. 61–70, 2012.

KOO, J.; KLEINSTREUER, C. A new thermal conductivity model for nanofluids. **Journal of Nanoparticle Research**., Dordrecht, v. 6, n. 6, p. 577-588, 2004.

KOO, J.; KLEINSTREUER, C. Laminar nanofluid flow in micro-heat sinks. **International Journal Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 48, n. 13, p. 2652-2661, 2005.

KRISHNAN, A. LIU, Y.H.; CHA, P.; WOODWARD, R.; ALLARA, D., VOGLER, E. A. An evaluation of methods for contact angle measurement. **Colloids and Surfaces B**: **Biointerfaces,** Amsterdam, v. 43, p. 95–98, 2005.

KSHIRSAGAR, J. M., SHRIVASTAVA, R. Experimental Investigation of Nucleate pool boiling characteristics of high concentrated alumina/water nanofluids. **Heat Mass Transfer**, v. 54, n. , p. 1779–1790 2018.

KUMAR, D. H.; PATEL, H. E.; KUMAR, V. R. R; *et al*. Model for Heat Conduction in Nanofluids. **Physical Review Letters**, v. 93, n. 14, p. 1–4, 2004. Disponível em: <https:// 10.1103/physrevlett.93.144301>.

KUMAR, P. M.; KUMAR, J.; TAMILARASAN, R.; *et al*. Review on nanofluids theoretical thermal conductivity models. **Engineering Journal**, College Park, v. 19, n. 1, p. 67–83, 2015. Disponível em:<http:// 10.4186/ej.2015.19.1.67>.

KUMAR, N.; SONAWANE, S. S. Experimental study of thermal conductivity and convective heat transfer enhancement using CuO and TiO2 nanoparticles. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 76, p. 98–107, 2016.

KUMAR, C.S. S.; G. KUMAR, U.; ARENALES, M. R. M.; HSU, C.; SURESH, S.; CHEN, P. Elucidating the mechanisms behind the boiling heat transfer enhancement using nanostructured surface coatings. **Applied Thermal Engineering**, Kidlington, v. 137, p. 868-891. 2018.

KUMAR, N.; URKUDE, N.; SONAWANE, S. S.; SONAWANE, S. H.. Experimental study on pool boiling and critical heat flux enhancement of metal oxides based nanofluid. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 96, p. 37-42, 2018.

KWARK, S. M.; AMAYA, M.; YOU, S. M. Pool boiling heat transfer characteristics of nanocoating in various working fluids. *In*: ANNUAL IEEE SEMICONDUCTOR THERMAL MEASUREMENT AND MANAGEMENT SYMPOSIUM, 2011, [*S. l.*]. **Proceedings** […] [*S. l.: s. n.*], 2011. p. 146-154.

KWOK, D. Y.; LIN, R.; MUI, M.; *et al*. Low-rate dynamic and static contact angles and the determination of solid surface tensions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 116, n. 1–2, p. 63–77, 1996.

LANGMUIR, I.; SCHAEFER, V. J. The effect of dissolved salts on insoluble monolayers. **Journal of the American Chemical Society**, Washington, v. 59, n. 11, p. 2400-2414, 1937.

LEE, JI-H; HWANG, K. S.; JANG, S. P.; *et al*. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al2O3 nanoparticles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 51, n. 11–12, p. 2651–2656, 2008.

LEE, S. W.; PARK, S. D.; BANG, In Cheol. Critical heat flux for CuO nanofluid fabricated by pulsed laser ablation differentiating deposition characteristics. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 55, n. 23–24, p. 6908–6915, 2012.

LEJA, J.; POLING, G. W. On the interpretation of contact angle. *In*: MINERAL PROCESSING CONGRESS, 5th, 1960, London. **Proceedings** […] [*S. l.: s. n.*], 1960. p. 325

LEONG, K. C.; HO, J. Y.; WONG, K. K. A critical review of pool and flow boiling heat transfer of dielectric fluids on enhanced surfaces. **Applied Thermal Engineering**, Kidlington, v. 112, p. 999-1019, 2017.

LI, C. H.; PETERSON, G. P. Mixing effect on the enhancement of the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 50, n. 23–24, p. 4668–4677, 2007.

LI, Q.; XUAN, Y.. Experimental investigation on heat transfer characteristics of magnetic fluid flow around a fine wire under the influence of an external magnetic field. **Experimental Thermal and Fluid Science,** Philadelphia, v. 33, n. 4, p. 591–596, 2009.

LI, X.; CHEN, Y.; MO, S.; JIA, L.; SHAO, X. Effect of surface modification on the stability and thermal conductivity of water-based SiO2-coated graphene nanofluid. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 595, p. 6-10. 2014.

LI, Q.; KANG, Q. J.; FRANCOIS, M. M. Lattice Boltzmann modeling of boiling heat transfer: The boiling curve and the effects of wettability. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 85, p. 787–796, 2015.

LI, Y. F.; WU, C. J.; SHENG, Y. J.; TSAO, H. K. Facile manipulation of receding contact angles of a substrate by roughening and fluorination. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 135, p. 127-132, 2015.

LIANG, G.; MUDAWAR, I. Review of pool boiling enhancement by surface modification, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 128, p. 892-933, 2019.

LIU, C. F.; YANG, C. Y. Effect of space distance for boiling heat transfer on micro porous coated surface in confined space. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 50, p. 163–171, 2013.

LIU, Y.; LI, L.; LI, H.; HU, H. An experimental study of surface wettability effects on dynamic ice accretion process over an UAS propeller model. **Aerospace Science and Technology,** Issy les Moulineaux Cedex, v. 73, p. 164–172. 2018.

LUNDGREN, T. Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres, **Journal of Fluid Mechics**., Cambridge, v. 51, p. 273–299, 1972.

LUZ, A. P.; RIBEIRO, S.; PANDOOLFELI, V.C. Use of the wettability in the investigation of the corrosion behavior of the refractory material. **Cerâmica**, São Paulo, v. 54, p. 174-183, 2008.

MAHBUBUL I. M., KHAN, M. M. A., IBRAHIM N. I., ALI H. M., Al-SULAIMAN F. A., SAIDUR R. Carbon nanotube nanofluid in enhancing the efficiency of evacuated tube solar collector. **Renewable Energy,** Schenectady, v. 121. p. 36-44, 2018.

MAÏGA, S. E B; NGUYEN, C. T.; GALANIS, N.; *et al*. Hydrodynamic and thermal behaviours of a nanofluid in a uniformly heated tube. **Computational Studies**, Southampton, v. 5, n. 3, p. 453–462, 2004.

MANETTI, L. L. **Estudo teórico e experimental da influência de nanofluidos sobre a ebulição nucleada**. 2017. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Soleira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2017.

MANETTI, L.L., STEPHEN, M.T., BECK, P.A., CARDOSO, E.M., Evaluation of the heat transfer enhancement during pool boiling using low concentrations of Al2O3-water based nanofluid. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 87, p. 191-200, 2017.

MANIMARAN, R.; PALANIRADJA, K.; ALAGUMURTHI, N.; *et al*. Preparation and characterization of copper oxide nanofluid for heat transfer applications. **Applied Nanoscience,** Switzerland, v. 4, n. 2, p. 163–167, 2014.

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

MAXWELL, A. **JC**: A treatise on electricity and magnetism. [*S. l.*], 1873. v. 2.

MACDOUGALL, G.; OCKRENT, C. Surface energy relations in liquid/solid systems I. The adhesion of liquids to solids and a new method of determining the surface tension of liquids. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 180, n. 981, p. 151-173, 1942.

McHALE, G; ERBIL, H. Y; NEWTON, M. I; NATTERER, S. Analysis of shape distortions in sessile drops. **Langmuir**, Washington, v. 17, p. 6995–6998, 2001.

MERILÄINEN, A.; SEPPÄLÄ, A.; SAARI, K.; SEITSONEN, J. RUOKOLAINEN, J. PUISTO, S. Influence of particle size and shape on turbulent heat transfer characteristics and pressure losses in water-based nanofluids. **International Journal Heat and Mass Transfer**, v. 61, p. 439–48, 2013.

MINTSA, Honorine Angue; ROY, Gilles; NGUYEN, Cong Tam; *et al*. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 48, n. 2, p. 363–371, 2009.

MIRZAEI, M. A new method for measuring the contact angles from digital images of liquid drops. **Micron,** Iran, v. 102, p. 65–72, 2017.

MIYAMA, M.; YANG, Y. X.; YASUDA, T.; OKUNO, T; YASUDA, H. K. Static and dynamic contact angles of water on polymeric surfaces. **Langmuir**, Washington, v. 13, n. 20, p. 5494–5503, 1997.

MO, S.; CHEN, Y.; JIA, L.; LUO, X. Investigation on crystallization of TiO2 water nanofluids and deionized water. **Applied Energy**, Kidlington, v. 93, p. 65–70, 2012.

MOGAJI, T. S.; MANETTI, L. L.; KIYOMURA, I. S.; CARDOSO, E. M. Influence of heating mode on the nanoparticle deposition and on the boiling heat transfer using nanocoated surfaces. *In*: JOURNEYS IN MULTIPHASE FLOWS - JEM**,** 4., 2017, São Paulo. **Proceedings** […] São Paulo: [s. n.], 2017.

MOONEY, M. A shearing disk plastometer for unvulcanized rubber. 6. ed. [*S. l.*]: Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition, 1934. p. 147–151.

MOOSAVI, M.; GOHARSHADI, E. K; ABBAS, Y. Fabrication, characterization and measurement of some physicochemical properties of ZnO nanofluids. **International Journal Heat and Fluid Flow**, Philadelphia, v. 31, p. 599–605, 2010.

MOTTA, F C. **Caracterização da condutividade térmica, viscosidade dinâmica e ângulo de contato de nanofluidos-baseados em partículas de alumina-gama em água**. 2012. 107f. Tese (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MÜLLER R.H., Zetapotential und Partikelladung. *In*: **Laborpraxis**. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1996.

MURSHED, S. M. S., LEONG, K. C., YANG, C., Enhanced thermal conductivity of TiO2—water based nanofluids. **International Journal of Thermal Science,** Issy les Moulineaux Cedex, v. 44, n. 4, p. 367–373, 2005.

MURSHED, S. M. S.; LEONG, K.C.; YANG, C. Investigation of thermal condutivity of nanofluids. **International Journal of Thermal Science,** Issy les Moulineaux Cedex, v. 47, p. 560-568, 2008.

NAN, C. W.; LIU, G.; LIN, Y.; LI, M. Interface effect on thermal conductivity of carbon nanotube composites. **Applied Physics Letters**, Melville, v. 85, n. 16, p. 3549–3551, 2004.

NETTO, F.P.; MORAES, A. A. U.; RIBATSKI, U. The effects of the nanoparticle concentration and surface roughness on the contact angle of nanofluids. *In*: **international congress of mechanica**. 2013

NEUMANN, A. W.; GOOD, R. J. **Surface and Colloid Science**: experimental methods, vol. 11. ed. New York: Stromberg Plenum Publishing, 1979. v. 11. p. 31.

NGUYEN, C. T.; DESGRANGES, F.; GALANIS, N.; ROY, G.; MARÉ, T.; BOUCHER, S.; MINTSA, H. A. 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.

NOLAN, E.; RIOUX, R.; JIANG, P. X.; PETERSON, G. P.; LI, C. H. Experimental study of contact angle and active nucleation site distribution on nanostructure modified copper surface in pool boiling heat transfer enhancement. **Heat Transfer Research**, Danbury, v. 44, n. 1, 2013.

NUNES, J. M. **Análise experimental da ebulição nucleada em superfícies nanoestruturadas sob condições de confinamento**. 2018, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2018.

OLIVEIRA, G. A.; BANDARRA FILHO, E. P.; WEN, D. Synthesis and characterization of silver/water nanofluids. **High Temperatures-High Pressures**, Philadelphia, v. 43, n. 1, p. 69–83, 2014.

OLIVEIRA, L. R. **Síntese e Caracterização de Nanofluidos para aplicação em sistemas térmicos**. 2018. 250f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

ORMAN, L. J.; KAPJOR, A.; VANTÚCH, M. International scientific conference on sustainable, modern and safe transport. **Procedia Engineering,** Amsterdam, v. 192, p. 649-653, 2017.

ÖZERINÇ, S.; KAKAÇ, S.; YAZICIOĞLU, A. G. Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review. **Microfluid Nanofluid**, [*S. l.*], v. 8, p. 145–170, 2010.

PARK, S. D.; MOON, S. B.; BANG, In Cheol. 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.

PATTERSON, R. E. Hydrophobic silica formulations as antifoams. **Textile Chemist & Colorist**, Research Triangle Park, v. 17, n. 9, p. 27-30, 1985.

PAUL, G.; CHOPKAR, M.; MANNA, I.; *et al*. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 14, n. 7, p. 1913–1924, 2010.

PENG, H.; DING, G.; HU, H.; *et al*. Influence of carbon nanotubes on nucleate pool boiling heat transfer characteristics of refrigerant-oil mixture. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 49, n. 12, p. 2428–2438, 2010.

PHUOC, T. X; MEHRDAD, M. Experimental observations of the effects of shear rates and particle concentration on the viscosity of Fe2O3–deionized water nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 48, p. 1294–301, 2009.

PONMANI, S.; WILLIAM, J. K. M.; SAMUEL, R. *et al*. Formation and characterization of thermal and electrical properties of CuO and ZnO nanofluids in xanthan gum. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 443, p. 37–43, 2014.

PRAKASH, V.; DIWAN, R. K.; NIYOGI, U. K. Characterization of synthesized copper oxide nanopowders and their use in nanofluids for enhancement of thermal conductivity. **Indian Journal of Pure and Applied Physics**, New Delhi, v. 53, n. 11, p. 753–758, 2015.

PRAKASH, C. G. J.; PRASANTH, R. Enhanced boiling heat transfer by nano structured surfaces and nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** Kidlington, v. 82, Part 3, p. 4028-4043, 2018.

QUAN, X.; WANG, D.; CHENG, P. An experimental investigation on wettability effects of nanoparticles in pool boiling of a nanofluid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 108, p. 32–40, 2017.

RAINHO NETO, A. **Análise da ebulição nucleada da água contendo nanopartículas de alumina, maguemita ou nanotubo de carbono**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RAMÈ, E. The interpretation of dynamic contact angle measured by the Wilhelmy plate method. **Journal Colloid Interface Science**, Maryland Heights, v. 185, p. 245–251, 1997.

RASHIN N., M.; HEMALATHA, J. A novel ultrasonic approach to determine thermal conductivity in CuO-ethylene glycol nanofluids. **Journal of Molecular Liquids**, Amsterdam, v. 197, p. 257–262, 2014.

RAVESHI, M. R.; KESHAVARZ, A.; MOJARRAD, M. S.; *et al*. 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.

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

ROHINI PRIYA, K; SUGANTHI, K. S.; RAJAN, K. S. Transport properties of ultra-low concentration CuO-water nanofluids containing non-spherical nanoparticles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 55, p. 4734–43, 2012.

RUDYAK, V. Thermophysical Characteristics of Nanofluids and Transport Process Mechanisms. **Journal of Nanofluids**, **American Scientific Publishers**, v. 8, n. 1, p. 1-16, 2019.

RUFUS, A.; SREEJU, N.; PHILIP, D. Synthesis of biogenic hematite (α-Fe2O3) nanoparticles for antibacterial and nanofluid applications. **RSC Advances**, Cambridge, v. 6, n. 96, p. 94206-94217, 2016.

SAEIDI, D.; ALEMRAJABI, A. A. Experimental investigation of pool boiling heat transfer and critical heat flux of nanostructured surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 60, n. 1, p. 440–449, 2013.

SAHOOLI, M.; SABBAGHI, S. CuO Nanofluids: The Synthesis and Investigation of Stability and Thermal Conductivity. **Journal of Nanofluids**, Valencia, v. 1, n. 2, p. 155–160, 2013.

SAINI, D.; AGARWAL, G. DAS. Thermo-Physical Properties of Nano Fluids- A Review. **International Journal of Advances in Engineering Science and Technology**, Chennai, v. 5, n. 1, p. 39–45, 2016.

SAITO, N. Concentration dependence of the viscosity of high Polymer solutions. **Journal of Physical Society of Japan**., Tokyo, v. 5, p. 4–8, 1950.

SANTOS FILHO, E.; NASCIMENTO, F. J.; MOREIRA, D. C.; RIBATSKI, G. Dynamic wettability evaluation of nanoparticles-coated surfaces. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 92, p. 231–242, 2018.

SARAFRAZ, M. M., KIANI, T.; HORMOZI, F. Critical heat flux and pool boiling heat transfer analysis of synthesized zirconia aqueous nano-fluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer,** Kidlington, v. 70, p. 75–83, 2016.

SARANGI, S.; WEIBEL, J. A.; GARIMELLA, S. V. Effect of particle size on surface-coating enhancement of pool boiling heat transfer. **Internatioal Journal of Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 81 p. 103–113, 2015.

SARVIYA, R. M.; FUSKELE, Veeresh. review on thermal conductivity of nanofluids. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 4, n. 2, p. 4022–4031, 2017.

SAYAHI, T; BAHRAMI, M. Investigation on the effect of type and size of nanoparticles and surfactant on pool boiling heat transfer of nanofluids. **Journal of Heat Transfer,** New York, v. 138, n. 3, p. 031502, 2016.

SELVAKUMAR, P.; SURESH, S. Convective performance of CuO/water nanofluid in an electronic heat sink. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 40, p. 57–63, 2012.

SENTHILRAJA, S; K Vijayakumar - Digest Journal of; 2015, undefined. A comparative study on thermal conductivity of Al2O3/water, CuO/water and Al2O3–CuO/water nanofluids. **Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures**, Bucharest, v. 10, n. 4, p. 1449–1458, 2015.

SEUNG WON LEE, SEONG DAE PARK, In Cheol Bang, Critical heat flux for CuO nanofluid fabricated by pulsed laser ablation differentiating deposition characteristics. **International Journal of Heat Mass Transfer**, Kidlington, v. 55, n. 23–24, p. 6908–6915, 2012

SEZER, N.; MUATAZ, A.; KOÇ, M. A comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 344, p. 404-431. 2019.

SHAHSAVANI, E.; AFRAND, M.; KALBASI, R. Experimental study on rheological behavior of water–ethylene glycol mixture in the presence of functionalized multi-walled carbon nanotubes. **Journal of Thermal Analysis Calorimetry,** Budapest, v. 131, n. 2, p. 1177–1185, 2018.

SHEIKHBAHAI, M.; NASR ESFAHANY, M.; ETESAMI, N. Experimental investigation of pool boiling of Fe 3O 4/ethylene glycol-water nanofluid in electric field. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 62, p. 149–153, 2012.

SIDIK N.A.C., MOHAMMED H.A., ALAWI O.A., SAMION S., A review on preparation methods and challenges of nanofluids, **International Communications in Heat Mass Transfer**, Kidlington, v. 54, p. 115–125, 2014.

SIMMCHEN, J.; MALGARETTI P. Active Particle Accumulation at Boundaries: A Strategy to Measure Contact Angles. **ChemNanoMat**, Weinheim, v. 3, n. 11, p. 790-793, 2017.

SAKASHITA H. Pressure effect on CHF enhancement in pool boiling of nanofluids. **Journal of Nuclear Science and Technology**, Tokyo, v. 53, n. 6, p. 797-802. 2016.

SMITHWICH, R. W. Contact angle studies of microscopic mercury droplets on glass. **J. Colloid Interface Sci**., Maryland Heights, v. 123, 482, 1988.

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

SOUZA, R. R.; MANETTI, L. L.; KIYOMURA, I. S.; CARDOSO, E. M. Liquid/surface interaction during pool boiling of DI-water on nanocoated heating surfaces. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Heidelberg, v. 40, p. 514, 2018.

STROBEL, M.; LYONS, C. S. An essay on contact angles measurements. **Plasma Processes Polymers**, Weinheim, v. 8, p. 8–13, 2011.

SUGANTHI, K. S.; RADHA KRISHNAN, A. K.; ANUSHA, N.; RAJAN, K. S., Influence of nanoparticle concentration on thermo-physical properties of CuO-propylene glycol nanofluids. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology,** Valencia, v. 14, n. 6, p. 4602–4607, 2014.

SUGRUE, R.; BUONGIORNO, J.; MCKRELL, T. An experimental study of bubble departure diameter in subcooled flow boiling including the effects of orientation angle, subcooling, mass flux, heat flux, and pressure. **Nuclear Engineering and Design**, Amsterdam, v. 279, p. 182–188, 2014.

SUNDAR, L. Syam; FAROOKY, Md Hashim; SARADA, S. Naga; *et al.* Experimental thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based low volume concentration of Al2O3 and CuO nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 41, p. 41–46, 2013.

SUNDAR S., L.; VENKATA RAMANA, E.; SINGH, M. K.; Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al2O3 nanofluids for heat transfer applications: an experimental study. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Kidlington, v. 56, p. 86–95, 2014.

SUNIL, J.; VIGNESH, J.; VETTUMPERUMAL, R.; MAHESWARAN, R.; ARUL RAJA, R. A. The thermal properties of CaO-Nano fluids. **Vacuum**, Kidlington, v. 161, p. 383-388. 2019.

SURESH, S.; SELVAKUMAR, P.; CHANDRASEKAR, M.; SRINIVASA, R. V. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of Al2O3/water nanofluid under turbulent flow with spiraled rod inserts. **Chemical Engineering Process,** San Diego, v. 53, p. 24–30, 2012.

SURIYAWONG, A.; WONGWISES, S. Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO2-water nanofluids at very low concentrations. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 34, n. 8, p. 992–999, 2010.

TAGGART, A. F.; TAYLOR, T. C.; INCE, C. R. **Experiments with flotation reagents**. [*S. l.*]: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1929.

TAGGART, A**.** F**.**; TAYLOR, T**.** C**.**; KNOLL, A. F. **Chemical reactions in flotation**. [*S. l.*]: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1930.

TAJIK, B.; ABBASSI, A.; SAFFAR-AVVAL, M.; NAJAFABADI, M. A. Ultrasonic properties of suspensions of TiO2 and Al2O3 nanoparticles in water. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 217, p. 171-176, 2012.

TAMJID, E.; GUENTHER, B. H. Rheology and colloidal structure of silver nanoparticles dispersed in diethylene glycol. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 197, p. 49–53, 2010.

TIMOFEEVA, E. V.; GAVRILOV, A. N.; MCCLOSKEY, J. M.; TOLMACHEV, Y. V. Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory. **Physical Review E Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics**, College Park, v. E 76, p. 061203, 2007.

TURGUT, A.; SAGLANMAK, S.; DOGANA, Y. S. Experimental investigation on thermal conductivity and viscosity of nanofluids: particle size effect. **Journal of the Faculty Engineering Architeture of Gazi University,** College Park, v. 31, n. 1, p. 95–103, 2016.

ULCAY, M. S. CHF enhancement of Al2O3, TiO2 and Ag nanofluids and effect of nucleate pool boiling time. *In*: IEEE INTERSOCIETY CONFERENCE ON THERMAL AND THERMOMECHANICAL PHENOMENA IN ELECTRONIC SYSTEMS, 2014, [*S. l.*]. **Proceedings** […] Pistacaway: IEEE, 2014. p. 756–64.

VAFAEI, S.; BORCA-TASCIUC, T. Role of nanoparticles on nanofluid boiling phenomenom: nanoparticule deposition., **Chemical Engineering Research and Design**, London, v. 92, p. 842-856, 2014.

VAFAEI, S. Nanofluid pool boiling heat transfer phenomenon. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 277, p. 181–192, 2015.

VERMA, S.K., TIWARI, A. K., Progress of nanofluid application in solar collectors: A review. **Energy Conversion and Management**, London, v. 100, p. 324-346, 2015.

WALDMAN, R. M.; LI, H.; HU, H. An experimental investigation on the effects of surface wettability on water runback and ice accretion over an airfoil surface. *In*: AIAA ATMOSPHERIC AND SPACE ENVIRONMENTS CONFERENCE, 8th, 2016, Washington. **Proceedings** […] Washington: [*s. n.*], 2016.

WANG, X.; XU, X.; S. CHOI, S. U. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, Reston, v. 13, n. 4, p. 474-480, 1999.

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**, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 631–648, 2008b.

WARRIER, P.; SATHYANARAYANA, A.; JOSHI, Y.; *et al*. Screening and evaluation of mixture formulations for electronics thermal management using pool boiling. **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, Pistacaway, v. 1, n. 9, p. 1387–1394, 2011.

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

WILHELMY, L. Ueber die Abhängigkeit der Capillaritäts-Constanten des Alkohols von Substanz und Gestalt des benetzten festen Körpers. **Annalen der Physik**, Weinheim, v. 195, n. 6, p. 177-217, 1863.

XUAN, Y., LI, Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. **International Journal of Heat and Fluid Flow,** Philadelphia, v. 21, n. 1, p. 58–64, 2000.

YAMADA, E.; OTA, T. Effective thermal conductivity of dispersed materials. **Heat and Mass Transfer**, Heidelberg, v. 13, n. 1, p. 27–37, 1980.

YANG, X. F.; LIU, Z. H. Pool boiling heat transfer of functionalized nanofluid under subatmospheric pressures. **International Journal of Thermal Sciences**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 50, n. 12, p. 2402–2412, 2011.

YANG J.C., LI F.C., ZHOU W.W., HE Y.R., JIANG B.C., Experimental investigation on the thermal conductivity and shear viscosity of viscoelastic-fluid-based nanofluids, **International Journal of Heat and Mass Transfer,** Kidlington, v. 55, p. 3160–3166, 2012.

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

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.

YOUNG, T. An Essay on the Cohesion of Fluids. **Philosophical Transaction of the Royal Society of London**. London, v. 95, p. 65-87, 1805

YU, W.; CHOI, S. U. S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell Model. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 5, p. 167-171, 2003.

YU, W.; CHOI, S. U. S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Hamilton-Crosser Model. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 6, p. 355-361, 2004.

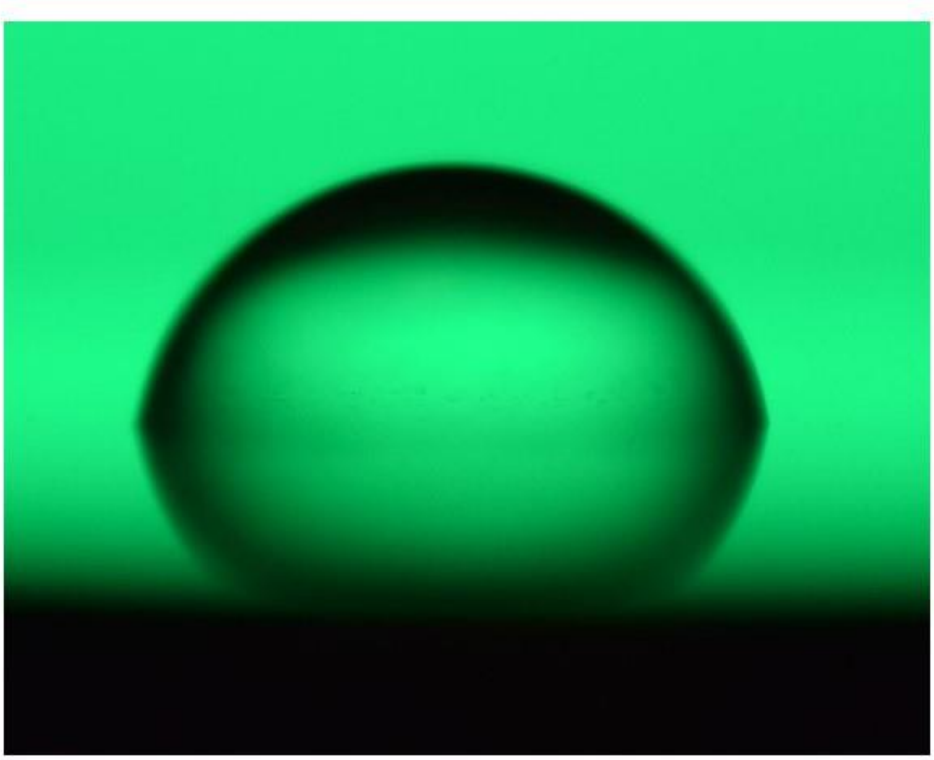
YUAN, Y.; LEE, T. R. Contact angle and wetting properties. In: BRACCO, G.; HOLST, B. (ed.). **Surface Science Techniques**, New York: Springer, 2013. v. 51, (Series in Surface Sciences Book).

Apêndice A – Rotina computacional desenvolvida, em Matlab®, para análises de ângulo de contato

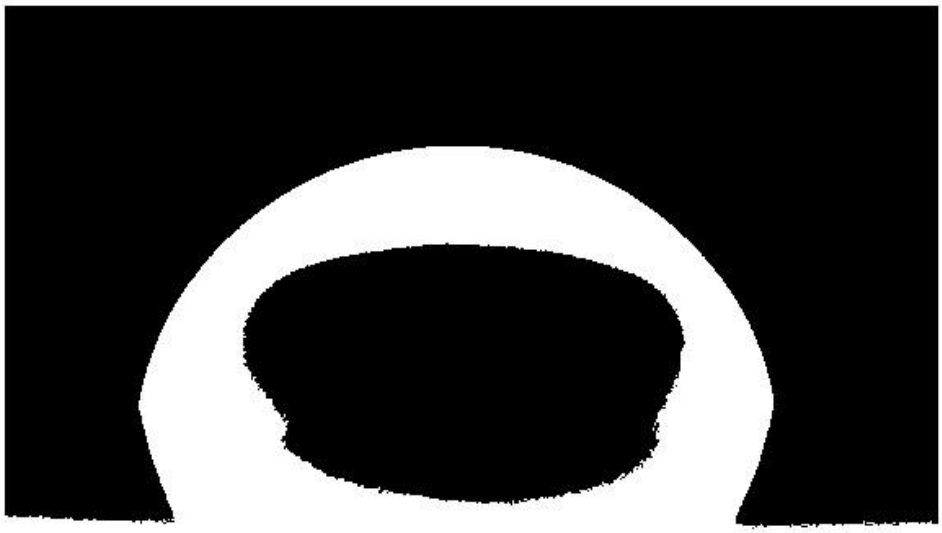
Conteúdo

- Diretório da imagem a ser analisada
- Mostra a imagem original
- Aplica limiar de corte (cores claras viram 1 e cores escuras viram 0)
- Remove a sombra do meio da bolha e remove pequenos pontos
- Encontra o formato da bolha
- Encontra a posição da base para remover (a base não interessa) e encontra o formato da bolha novamente
- Encontra o ponto máximo e mínimo a serem usados como referencia de medida e plota uma linha entre estes pontos
- Encontra o contorno da circunferência
- Calcula o angulo interno da extremidade ESQUERDA
- Calcula o angulo interno da extremidade DIREITA


```
clear
close all
clc

%% Diretório da imagem a ser analisada

file = 'F:\Drive\artigo exft\F1.jpg';
I = im2double(rgb2gray(imread(file)));

%% Mostra a imagem original

figure(1)
imshow(file)
```

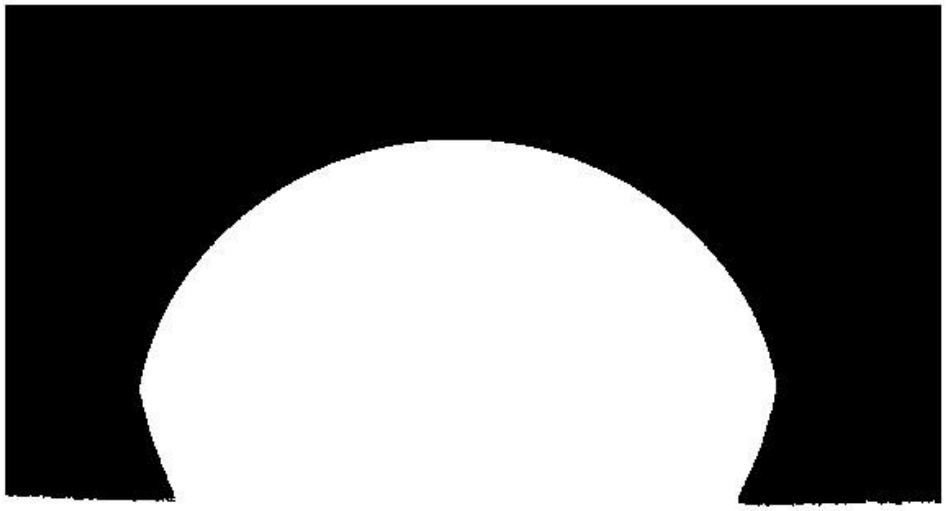


```
%% Aplica limiar de corte (cores claras viram 1 e cores escuras viram 0)

thershold = 0.5
dummy=~im2bw(I,thershold);

figure(2)
imshow(dummy)
```



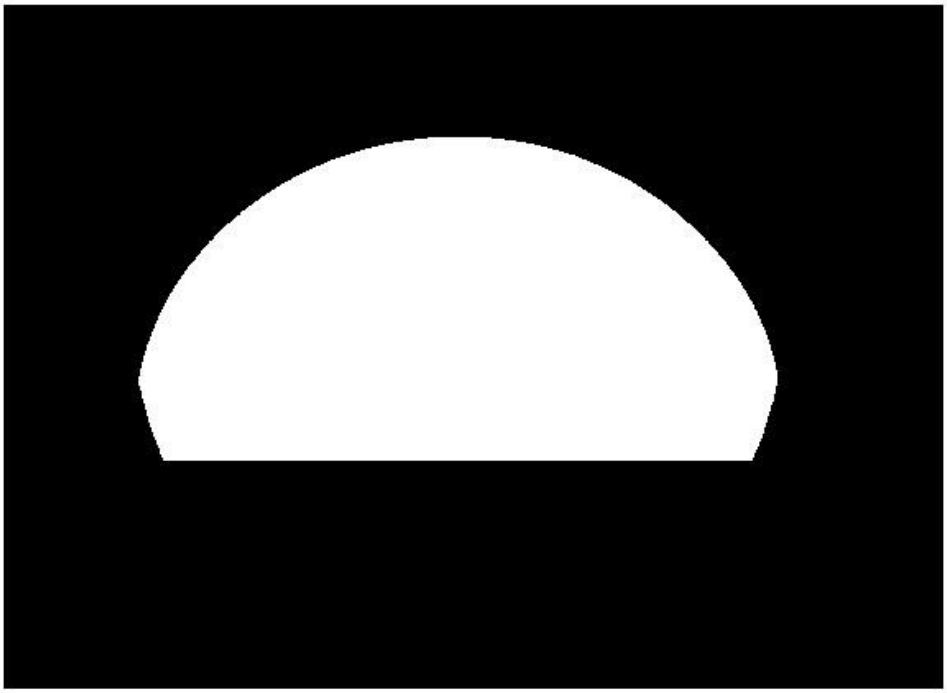
%% Remove a sombra do meio da bolha e remove pequenos pontos

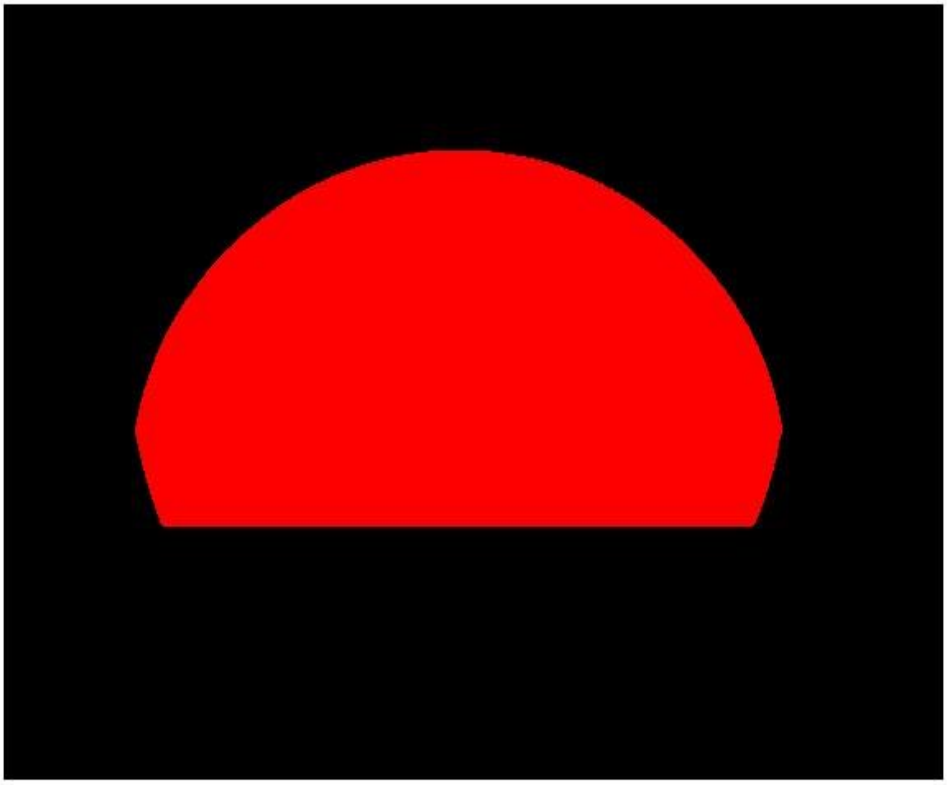
```
dummy = imfill(dummy, 'holes');
dummy = bwareaopen(dummy,100,4);

figure(3)
imshow(dummy)
```



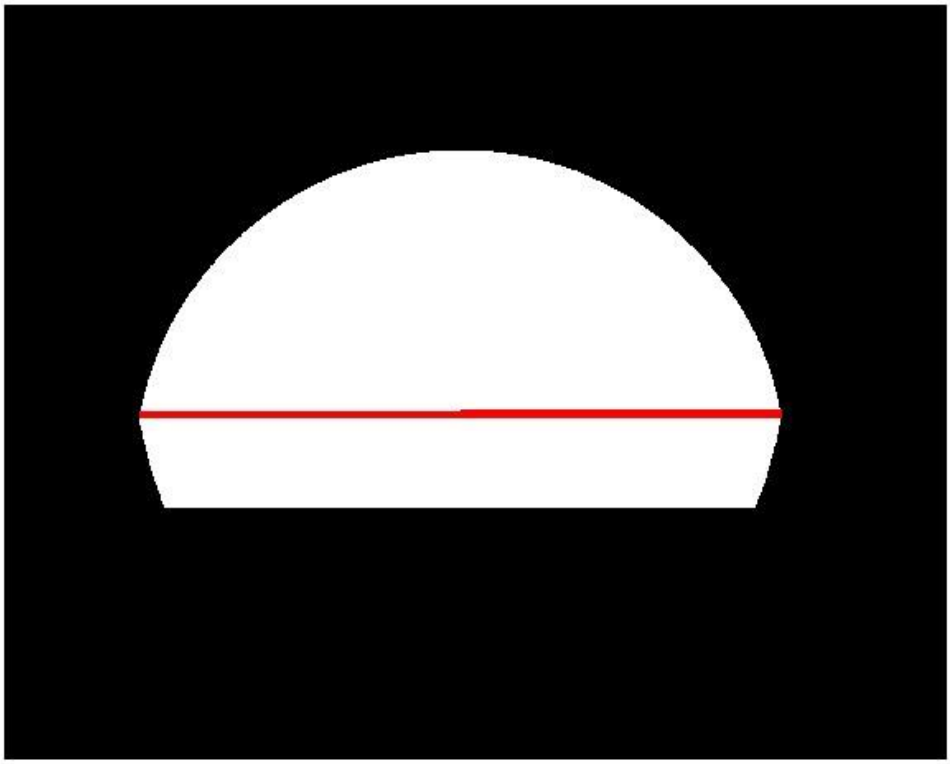
%% Encontra o formato da bolha

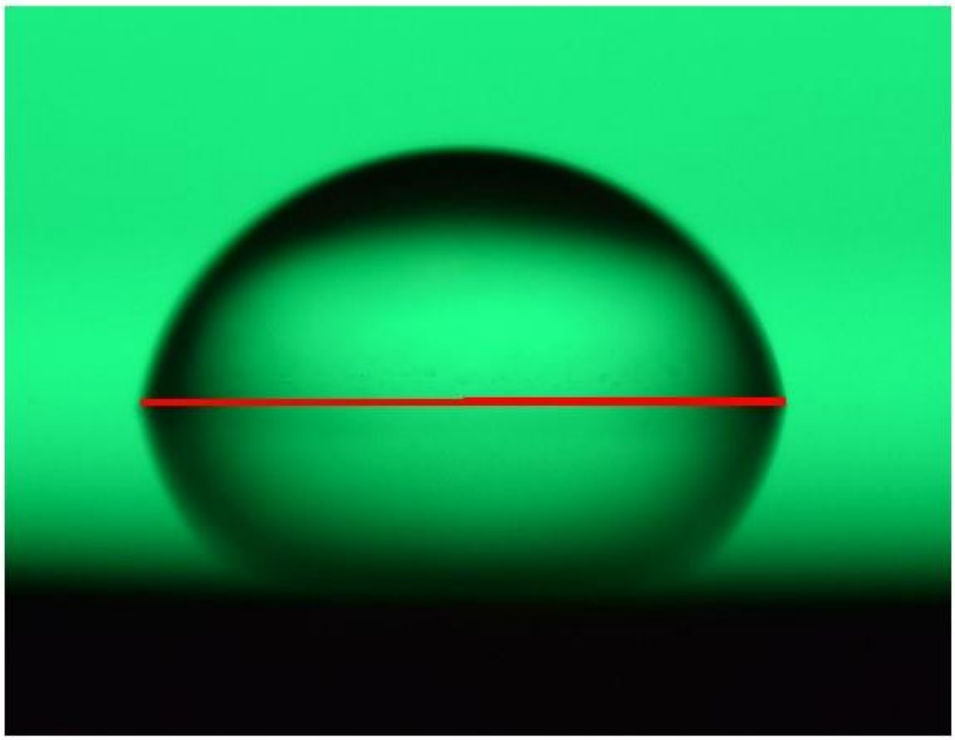
```
[row, col] =  find(dummy);

%  figure(4)
%  imshow(dummy)
%  hold on
%  plot(col,row,'.r')

%% Encontra a posição da base para remover (a base nao interessa) e encontra o formato da
bolha novamente

% [col_minimo_aux,col_maximo_aux] = ginput(2);
%
%
% col_minimo = col_minimo_aux(1);
% col_maximo = col_minimo_aux(2);
%
% row_minimo = col_maximo_aux(1);
% row_maximo = col_maximo_aux(2);



dummy(row(1)-4:end,:) = 0;

figure(5)
imshow(dummy)

[row, col] =  find(dummy);

figure(6)
imshow(dummy)
hold on
plot(col,row,'.r')
```



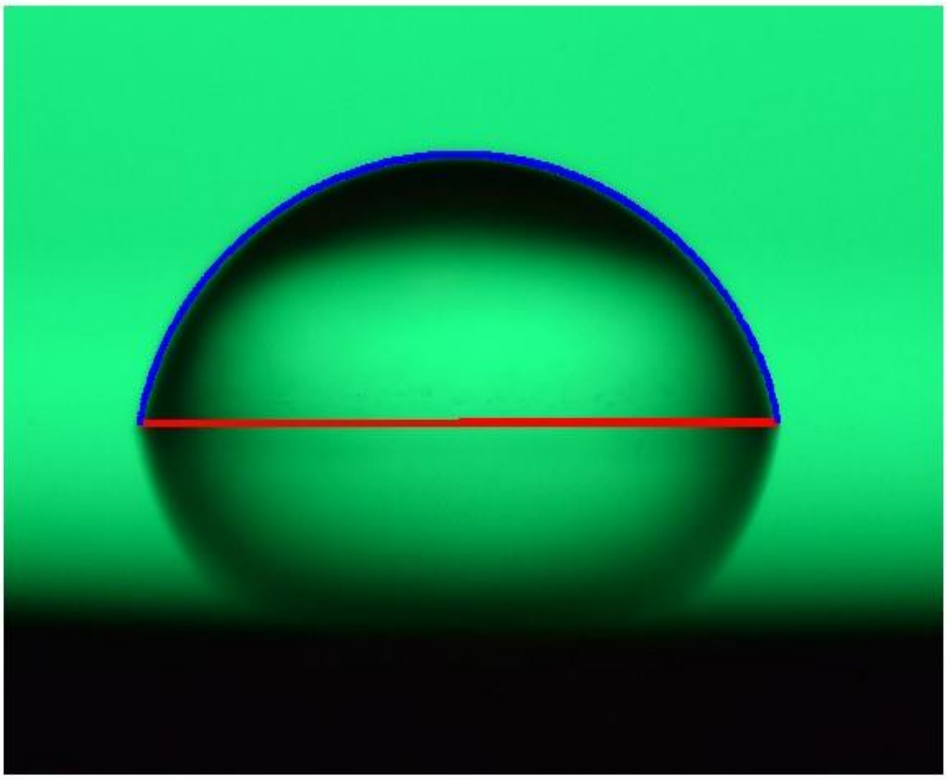


```
%% Encontra o ponto máximo e mínimo a serem usados como referencia de medida e plota
uma linha entre estes pontos

col_minimo = min(col);
col_maximo = max(col);

indice_minimo = find(col == col_minimo);
indice_maximo = find(col == col_maximo);

row_minimo = row(indice_minimo(1));
row_maximo = row(indice_maximo(1));

figure(7)
imshow(dummy)
hold on
plot([col_minimo, col_maximo],[row_minimo, row_maximo],'r','linewidth',3)

figure(8)
imshow(file)
hold on
plot([col_minimo, col_maximo],[row_minimo, row_maximo],'r','linewidth',3)
```

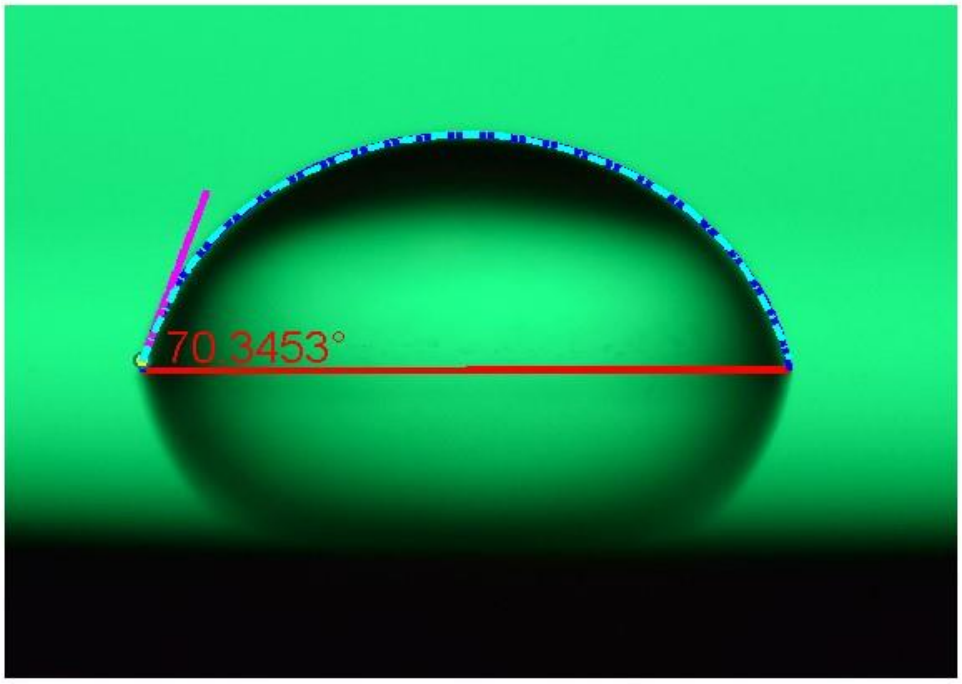




```
%% Encontra o contorno da circunferencia

curva = zeros(1,(col_maximo - col_minimo));
vetor_curva = col_minimo:col_maximo;

inc = 1;

for ii = col_minimo : col_maximo
    clear index
    index = find(col == ii);

    curva(inc) = min(row(index));
    inc = inc + 1;

    if (ii >= col_maximo), break; end
end

f = figure(9);
imshow(file)
hold on
plot([col_minimo, col_maximo],[row_minimo,
row_maximo],'r',vetor_curva,curva,'linewidth',3)
aH = gca;
```

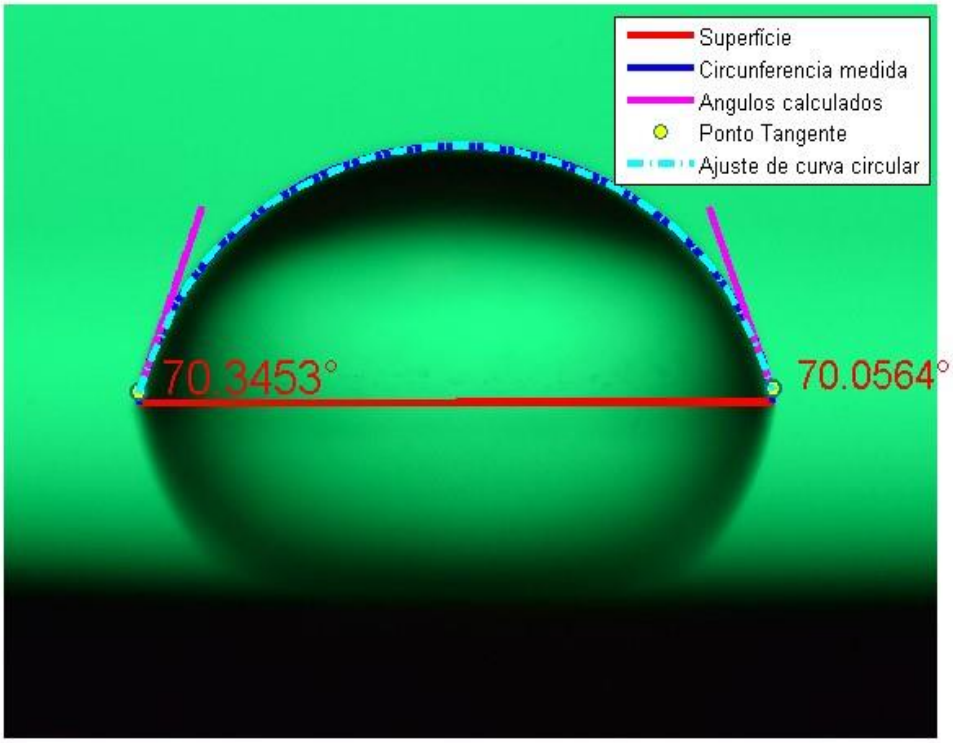


```
%% Calcula o angulo interno da extremidade ESQUERDA

t=vetor_curva;
y=curva;

p = polyfit(t,y,7);
x1 = linspace(t(1),t(end),5000);
y1 = polyval(p,x1);


dy=diff(y1)./diff(x1);
k=1; % point number 1
% tang=(t-t(k))*dy(k)+y(k);
tang=(x1-x1(k))*dy(k)+y1(k);
% h = line([t(1) t(100)],[tang(1) tang(100)],'color','m','linewidth',3);
plot(x1(1:500),tang(1:500),'color','m','linewidth',3)
hold on
scatter(x1(k),y1(k),80,'MarkerEdgeColor',[0 .5 .5],...
            'MarkerFaceColor',[1 1 0],...
            'LineWidth',1.5)

plot(x1,y1,'-.c','linewidth',3)
hold off

% Vetor unitário

% Vunit = Vgrande/norma(Vgrande)

X_vetor_curva = col_maximo-col_minimo;
Y_vetor_curva = row_maximo - row_minimo;

BaseUnitario_vetor_curva = sqrt(X_vetor_curva^2 + Y_vetor_curva^2);

% vetor_curva_unit = [X_vetor_curva/BaseUnitario_vetor_curva
Y_vetor_curva/BaseUnitario_vetor_curva];

X_curva =  x1(100) - x1(1);
Y_curva = tang(1) - tang(100);

BaseUnitario_curva = sqrt(X_curva^2 + Y_curva^2);

% curva_unit = [X_curva/BaseUnitario_curva Y_curva/BaseUnitario_curva];


produto_escalar = X_vetor_curva * X_curva + Y_vetor_curva * Y_curva;
Produto_normas = BaseUnitario_vetor_curva * BaseUnitario_curva;
teta1 = acosd(produto_escalar/Produto_normas);

text(col_minimo + 30,row_minimo - 30, [num2str(teta1) '°'],'Color','red','FontSize',20)
```




```
%% Calcula o angulo interno da extremidade DIREITA

t=vetor_curva;
y=curva;

p = polyfit(t,y,7);
x1 = linspace(t(1),t(end),5000);
y1 = polyval(p,x1);


dy=diff(y1)./diff(x1);
k=length(x1)-1; % point number 1
tang=(x1-x1(k))*dy(k)+y1(k);
hold on
plot(x1(end:-1:end-500),tang(end:-1:end-500),'color','m','linewidth',3);
scatter(x1(k),y1(k),80,'MarkerEdgeColor',[0 .5 .5],...
            'MarkerFaceColor',[1 1 0],...
            'LineWidth',1.5)
plot(x1,y1,'-.c','linewidth',3)
hold off

% Vetor unitário

% Vunit = Vgrande/norma(Vgrande)
```

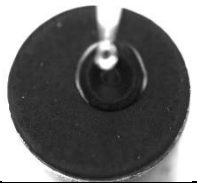
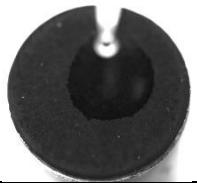
```
X_vetor_curva = col_maximo-col_minimo;
Y_vetor_curva = row_maximo - row_minimo;

BaseUnitario_vetor_curva = sqrt(X_vetor_curva^2 + Y_vetor_curva^2);

% vetor_curva_unit = [X_vetor_curva/BaseUnitario_vetor_curva
Y_vetor_curva/BaseUnitario_vetor_curva];

X_curva =  x1(end) - x1(end-650);
Y_curva = tang(end) - tang(end-650);

BaseUnitario_curva = sqrt(X_curva^2 + Y_curva^2);

% curva_unit = [X_curva/BaseUnitario_curva Y_curva/BaseUnitario_curva];


produto_escalar = X_vetor_curva * X_curva + Y_vetor_curva * Y_curva;
Produto_normas = BaseUnitario_vetor_curva *BaseUnitario_curva;
teta2 = acosd(produto_escalar/Produto_normas);

text(col_maximo + 30,row_maximo - 30, [num2str(teta2) '°'],'Color','red','FontSize',18)

legend('Superfície','Circunferencia medida','Angulos calculados','Ponto Tangente','Ajuste de
curva circular')
```


Superfície
Circunferencia medida
Angulos calculados
Ponto Tangente
Ajuste de curva circular
70.3453°
70.0564°

Apêndice B – Estudo da evolução da área molhada das superfícies nanoestruturadas

Assim como mostrado nas Figuras 32 e 33, as superfícies rugosas tiveram um comportamento para o índice de circularidade, I_c, menor que 1, indicando que o fluido tende a se espalhar de maneira irregular sobre a superfície devido a não uniformidade do espalhamento. Este efeito (menores valores de I_c com o passar do tempo) pode ser devido à falta de controle na uniformidade da nanoestruturação obtida pelo processo de ebulição de nanofluidos. Santos Filho *et al*. (2018) obtiveram resultados similares com a deposição de nanopartículas de alumina e óxido de titânio sobre placas de alumínio.

Figura 38 - Espalhamento de uma gota de água sobre as superfícies nanoestruturadas com maguemita e alumina de alta concentração.

Superfície rugosa nanoestruturada com nanofluido de alumina de alta concentração				
Superfície rugosa nanoestruturada com nanofluido de maguemita de alta concentração				
Superfície lisa nanoestruturada com nanofluido de maguemita de alta concentração				
				
0 ms	10 ms	100 ms	1000 ms	10000 ms

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.