

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia**

**DANIEL ORLANDO BUENO**

**AVALIAÇÃO TEÓRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE A  
EBULIÇÃO CONVECTIVA EM MICROCANAIS MICRO/NANOESTRUTURADOS**

Belo Horizonte

2020

DANIEL ORLANDO BUENO

**AVALIAÇÃO TEÓRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE A  
EBULIÇÃO CONVECTIVA EM MICROCANAIS MICRO/NANOESTRUTURADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, em Associação Ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Fockink da Silva

Belo Horizonte

2020

B928a Bueno, Daniel Orlando  
Avaliação teórica da transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais micro/nanoestruturados. / Daniel Orlando Bueno. – Belo Horizonte, 2020.  
137f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia em associação ampla com a Universidade Federal de São João Del Rei, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Fockink da Silva

#### Bibliografia

1. Transferência de Calor. 2. Ebulição Convectiva. 3. Escoamento Bifásico. I. Silva, Evandro Fockink da. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 621.4022



**ALUNO: Daniel Orlando Bueno**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA: NÍVEL MESTRADO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:**

***Avaliação Teórica da Transferência de Calor Durante a  
Ebulição Convectiva em Microcanais  
Micro/Nanoestruturados***

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Evandro Fockink da Silva**

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Departamento de Engenharia Mecânica (Sala 100) do CEFET-MG, campus II, em 23 de agosto de 2019, às 14:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Evandro Fockink da Silva  
(orientador - CEFET-MG)

Prof. Dr. Paulo Eduardo Lopes Barbieri  
CEFET-MG

Prof. Dr. Raphael Nunes de Oliveira  
DEMEC/UFMG

Belo Horizonte, 23 de agosto de 2019

*DEDICO ESTE TRABALHO À MINHA FAMÍLIA,  
ESPECIALMENTE AOS MEUS PAIS E IRMÃ, À MINHA  
NAMORADA LORENA, AOS MEUS AMIGOS PESSOAIS  
E DO MESTRADO EM ENGENHARIA DA ENERGIA.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Em seguida, agradeço à minha família, meus pais Orlando e Sirlene, por todo apoio de sempre, tanto com os recursos materiais ao longo da vida, como também com os exemplos que me educaram como ser humano.

Agradeço também à minha irmã Letícia, em quem confio extremamente em seu potencial para vencer os seus objetivos.

Outro agradecimento é direcionado à minha namorada, Lorena, pelo apoio emocional durante esse período e as muitas vezes em que passamos pouco tempo juntos devido às obrigações da vida.

Ao meu orientador Evandro Fockink da Silva, agradeço pelos conhecimentos transmitidos e também pelo excelente diálogo e amizade.

A todos os professores que passaram pela minha vida educacional. Sem vocês esse trabalho nunca seria possível.

Ao CEFET-MG por toda minha história construída na instituição, desde os meus 14 anos. Além disso, agradeço pela bolsa de estudos que contribuiu significativamente para a minha vida e para a execução deste trabalho.

Por fim, agradeço aos meus avós paternos, minha avó materna, e à minha bisavó Valentina, pessoa admirável e fonte do meu maior exemplo. A senhora sempre estará em meu coração, Vó Tina.

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em  
procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos”.

(Marcel Proust)

## RESUMO

O presente estudo tem como objetivo avaliar teoricamente o desempenho da troca de calor durante a ebulição convectiva em microcanais micro/nanoestruturados por técnicas de revestimento de superfície, processos químicos e micro/nanoeletromecânicos. Este trabalho tem viés investigativo e computacional. A metodologia adotada consistiu, inicialmente, em pesquisa bibliográfica sobre o contexto da área de microcanais e ebulição convectiva, com base na qual analisaram-se as variadas técnicas de fabricação para obtenção de superfícies micro/nanoestruturadas em microcanais. Categorizaram-se três métodos para tal: revestimentos de superfície com materiais especiais, processos químicos e sistemas micro/nanoeletromecânicos. Selecionaram-se diversos trabalhos de pesquisa sobre o estado da arte de microcanais micro/nanoestruturados. Em seguida, foram escolhidas cinco correlações, baseadas em microtubos normais disponíveis na literatura recente. Na sequência, essas correlações foram comparadas através de um banco de dados com 873 pontos experimentais, provenientes de estudos com os fluidos operacionais R134a e água em microcanais normais e micro/nanoestruturados. Feito isso, constatou-se que uma dessas correlações, Fang et al. (2017), possuiu ampla faixa de ajuste ao banco de dados caracterizado (100%), para bandas de ajuste aos dados experimentais de  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ , contemplando também à parcela do banco de dados referente a microcanais micro/nanoestruturados.

**Palavras-Chave:** Ebulição Convectiva. Microcanais. Nanoestruturas. Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor.

## ABSTRACT

The present study aims to evaluate the performance on flow boiling heat transfer in micro/nanostructured microchannels modified by surface coating techniques, chemical and micro/nanoelectromechanical processes. This study has investigative and computational bias. The methodology adopted, initially, consisted in carrying out a bibliographical research on the microchannels and convective boiling context. Based on that, several manufacturing techniques were analyzed to obtain micro/nanostructured surfaces in microchannels. Three methods were categorized for this purpose: surface coatings using special materials, chemical processes and micro/nanoelectromechanical systems. Several research papers on state-of-the-art for micro/nanostructured microchannels were selected. Then, five correlations were chosen, based on typical microtubes available in recent literature. Thus, these correlations were compared through a database with 873 experimental points from studies with the working fluids R134a and water in normal and micro/nanostructured microchannels. As a result, one of these correlations, Fang *et al.* (2017), had a wide range of adjustment to the featured database (100%), in bands of adjustment to the experimental data of  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  and  $\pm 30\%$ , also considering the database for microchannels micro/nanostructured.

**Keywords:** Flow Boiling. Microchannels. Nanostructures. Convective Heat Transfer Coefficient.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – TENDÊNCIA DO FLUXO DE CALOR REQUERIDO EM UNIDADES CENTRAIS DE PROCESSAMENTO.....	22
FIGURA 2.1 – ESQUEMA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO LÍQUIDO-VAPOR EM UM TUBO.....	26
FIGURA 2.2 – REGIME DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE A EBULIÇÃO CONVECTIVA EM CANAIS CONVENCIONAIS PARA ESCOAMENTO VERTICAL. ....	30
FIGURA 2.3 – REGIME DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE A EBULIÇÃO CONVECTIVA EM MACROCANAIS PARA ESCOAMENTO HORIZONTAL.....	32
FIGURA 2.4 – GRANDEZAS DAS FORÇAS NA EBULIÇÃO CONVECTIVA DE ÁGUA,.....	36
FIGURA 2.5 – ESQUEMA COM AS FORÇAS DE PRESSÃO E DE TENSÃO SUPERFICIAL PARA O CRITÉRIO DA CONDIÇÃO DE ESTRATIFICAÇÃO.....	37
FIGURA 2.6 – EXPERIMENTO REALIZADO PARA CARACTERIZAR O DIÂMETRO (MM) EM QUE ACONTECE ESTRATIFICAÇÃO DE ÁGUA E AR. ....	38
FIGURA 2.7 – COMPARAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS DE DISTINÇÃO ENTRE MACRO E MICROCANAIS. ....	39
FIGURA 2.8 – PADRÕES DE ESCOAMENTO EM CANAIS DE REDUZIDO DIÂMETRO, R134A, $D = 2,1$ MM. ....	41
FIGURA 2.9 – MAPA DE ESCOAMENTO EBULIÇÃO CONVECTIVA EM MICROCANAL CIRCULAR, SEGUNDO REVELLIN E THOME (2007), R134A, $D_H = 0,5$ MM, $L = 70$ MM, $T_{SAT} = 30$ °C, $Q'' = 50$ kW/m <sup>2</sup> . IB: REGIME DE BOLHAS ISOLADAS; CB: REGIME DE BOLHAS COALESCENTES E; A: REGIME ANULAR. PD: REGIME DE SECAGEM DE PAREDE. ....	42
FIGURA 2.10 - ESQUEMÁTICO DO MÓDULO DE TESTES E DO DISSIPADOR DE CALOR.....	50
FIGURA 2.11 - EFEITOS DO TÍTULO DE VAPOR NO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA SUPERFÍCIES REVESTIDAS E SEM REVESTIMENTO.....	51
FIGURA 2.12 - COMPARAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE OS TIPOS DE SUPERFÍCIES PARA VELOCIDADE MÁSSICA DE 184 KG/M <sup>2</sup> S. ....	54
FIGURA 2.13 - (A) COMPONENTES PRINCIPAIS E (B) VISÃO EM CORTE DA MONTAGEM DO MÓDULO DE TESTE. ....	55
FIGURA 2.14 - FOTOGRAFIA DA SUPERFÍCIE SUPERIOR DO BLOCO DE COBRE (INFERIOR DO MICROCANAL), COM E SEM A INCLUSÃO DE REVESTIMENTOS DE NANOTUBOS DE CARBONO.....	56
FIGURA 2.15 - IMAGEM DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DAS NANOESTRUTURAS POROSAS COM TAMANHO ESTABILIZADO DE APROXIMADAMENTE 2 $\mu$ M.....	57
FIGURA 2.16 - IMAGEM DA PAREDE INTERNA DOS MICROCANAIS REVESTIDOS POR PHEMA (ATRAVÉS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA).....	58
FIGURA 2.17 - IMAGENS DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA PARA AS SUPERFÍCIES SEM TRATAMENTO SUPERFICIAL (A), COM TRATAMENTO POR MICROESTRUTURAS (B), NANOESTRUTURAS (C) E MICRO-NANOESTRUTURAS (D).....	61

FIGURA 2.18 - COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR OBTIDO PARA AS VELOCIDADES MÁSSICAS DE (A) 50 KG/M <sup>2</sup> S E (B) 125 KG/M <sup>2</sup> S.....	62
FIGURA 2.19 - SEÇÃO DE TESTES: (A) VISTA SUPERIOR; (B) VISTA FRONTAL E; (C) VISTA EXPLODIDA. AS DIMENSÕES ESTÃO EM MM.....	63
FIGURA 2.20 - COMPARAÇÕES DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (H), EM FUNÇÃO DO TÍTULO DE VAPOR PARA AS SITUAÇÕES (I) E (II), PARA DISTINTOS VALORES DE VELOCIDADE MÁSSICA. ....	65
FIGURA 2.21 - PROCESSO INTEGRADO DE MICRO/NANOFABRICAÇÃO PARA OBTENÇÃO DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS POR NANOFIOS DE SILÍCIO.....	68
FIGURA 2.22 - ILUSTRAÇÃO GERADA POR MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DAS NANOESTRUTURAS MONOLÍTICAS DE SILÍCIO FORMADAS NOS MICROCANAIS.....	69
FIGURA 5.1 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE SAITOH, DAIGUJI E HIHARA (2007), PARA $\emptyset \pm 10$ . ....	92
FIGURA 5.2 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE SAITOH, DAIGUJI E HIHARA (2007), PARA $\emptyset \pm 20$ . ....	92
FIGURA 5.3 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE SAITOH, DAIGUJI E HIHARA (2007), PARA $\emptyset \pm 30$ . ....	93
FIGURA 5.4 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE SAITOH, DAIGUJI E HIHARA (2007), PARA $\emptyset \pm 10$ .....	94
FIGURA 5.5 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE SAITOH, DAIGUJI E HIHARA (2007), PARA $\emptyset \pm 20$ .....	94
FIGURA 5.6 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE SAITOH, DAIGUJI E HIHARA (2007), PARA $\emptyset \pm 30$ .....	95
FIGURA 5.7 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE LI E WU (2010), PARA $\emptyset \pm 10$ .....	96
FIGURA 5.8 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE LI E WU (2010), PARA $\emptyset \pm 20$ .....	96
FIGURA 5.9 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE LI E WU (2010), PARA $\emptyset \pm 30$ .....	97
FIGURA 5.10 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE LI E WU (2010), PARA $\emptyset \pm 10$ . ....	98
FIGURA 5.11 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE LI E WU (2010), PARA $\emptyset \pm 20$ . ....	98
FIGURA 5.12 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE LI E WU (2010), PARA $\emptyset \pm 30$ . ....	99

FIGURA 5.13 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE MAHMOUD E KARAYIANNIS (2013), PARA $\emptyset \pm 10$ .	100
FIGURA 5.14 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE MAHMOUD E KARAYIANNIS (2013), PARA $\emptyset \pm 20$ .	100
FIGURA 5.15 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE MAHMOUD E KARAYIANNIS (2013), PARA $\emptyset \pm 30$ .	101
FIGURA 5.16 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE MAHMOUD E KARAYIANNIS (2013), PARA $\emptyset \pm 10$ .	102
FIGURA 5.17 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE MAHMOUD E KARAYIANNIS (2013), PARA $\emptyset \pm 20$ .	102
FIGURA 5.18 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE MAHMOUD E KARAYIANNIS (2013), PARA $\emptyset \pm 30$ .	103
FIGURA 5.19 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE FANG ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 10$ .	104
FIGURA 5.20 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE FANG ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 20$ .	104
FIGURA 5.21 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE FANG ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 30$ .	105
FIGURA 5.22 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE FANG ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 10$ .	106
FIGURA 5.23 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE FANG ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 20$ .	106
FIGURA 5.24 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE FANG ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 30$ .	107
FIGURA 5.25 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE TIBIRIÇÁ ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 10$ .	108
FIGURA 5.26 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE TIBIRIÇÁ ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 20$ .	108
FIGURA 5.27 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS COM A CORRELAÇÃO DE TIBIRIÇÁ ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 30$ .	109
FIGURA 5.28 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE TIBIRIÇÁ ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 10$ .	110
FIGURA 5.29 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE TIBIRIÇÁ ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 20$ .	110
FIGURA 5.30 - CURVA COMPARATIVA DO BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS COM A CORRELAÇÃO DE TIBIRIÇÁ ET AL. (2017), PARA $\emptyset \pm 30$ .	111

FIGURA A.1 - ESQUEMÁTICO DO PROCESSO DE PULVERIZAÇÃO CATÓDICA.....	126
FIGURA A.2 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA (A) DE UM <i>SPINNER</i> COM OS PROCEDIMENTOS DO PROCESSO DE REVESTIMENTO POR ROTAÇÃO DE MATERIAL FOTOSSENSÍVEL; (B) DERRAMAMENTO DE MATERIAL FOTORRESISTENTE; (C) ESPALHAMENTO DE MATERIAL FOTOSSENSÍVEL NA FASE ROTAÇÃO; (D) FORMAÇÃO DE REBARBA DE BORDA AO FINAL DA ROTAÇÃO; E (E) REMOÇÃO DA REBARBA DE BORDA.....	127
FIGURA A.3 – ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO POR PLASMA. ....	129
FIGURA A.4 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM CICLO DE DEPOSIÇÃO EM CAMADAS ATÔMICAS. .	131
FIGURA A.5 – ESQUEMÁTICO DE UM PROCESSO BÁSICO DE FOTOLIGRAFIA: (A) DEPOSIÇÃO DO FILME FINO; (B) APLICAÇÃO DE MATERIAL FOTOSSENSÍVEL; (C) ALINHAMENTO E EXPOSIÇÃO; (D) DESENVOLVIMENTO; (E) GRAVAÇÃO DO FILME FINO; E (F) RETIRADA DE MATERIAL FOTOSSENSÍVEL.....	133
FIGURA A.6 – IMAGENS EME DE COMPONENTES MICROFLUÍDICOS ASSOCIADOS À GRAVAÇÃO DRIE: (A) E (B) ORIFÍCIO PARA MICROVÁLVULA; (C) UMA ESTRUTURA DE MICROMALHA PARA MICROCÉLULAS DE COMBUSTÍVEL; E (D) MATRIZ DE MICROCOLUMNAS EM ESTRUTURAS PARA MELHORIA EVAPORATIVA.....	136

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - VALORES DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR MEIO DE MECANISMOS DE CONVECÇÃO.....	22
TABELA 2.1 - TIPOS DE PROCESSOS EMPREGADOS PARA OBTENÇÃO DE SUPERFÍCIES MICRO/NANOESTRUTURADAS.....	47
TABELA 2.2 – ESTADO DA ARTE REFERENTE À TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE A EBULIÇÃO CONVECTIVA EM MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS POR REVESTIMENTO DE SUPERFÍCIE COM MATERIAIS ESPECIAIS, PROCESSOS QUÍMICOS E SISTEMAS MICRO/NANOELETROMECÂNICOS.....	70
TABELA 3.1 - FATOR DE DEPENDÊNCIA DO FLUIDO PARA A CORRELAÇÃO DE FANG ET AL. (2017).....	84
TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICA DA BASE DE DADOS ADOTADA.....	88
TABELA 5.1 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA O BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NORMAIS..	113
TABELA 5.2 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA O BANCO DE DADOS DE MICROCANAIS NANOESTRUTURADOS.....	114
TABELA A.1 – TIPOS COMUNS DE REAGENTES PARA ATAQUE QUÍMICO EM GRAVAÇÃO A SECO. ....	134
TABELA A.2 – TIPOS COMUNS DE REAGENTES PARA ATAQUE QUÍMICO EM GRAVAÇÃO MOLHADA...	137

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Siglas

ALD	- <i>Atomic Layer Deposition</i> (Deposição em camadas atômicas)
CAD	- Desenho Assistido por Computador
CAM	- Manufatura Assistida por Computador
CEFET-MG	- Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CI	- Circuitos Integrados
CNC	- Comando Numérico Computadorizado
CNT	- Nanotubo de Carbono
CTC	- Coeficiente de Transferência de Calor
DLC	- Nanopartículas de: <i>dimond-like carbon</i>
DNB	- <i>Departure from Nucleate Boiling</i> (Crise de Ebulição)
DOA	- Superfície com: <i>Diamond particles, Omegabond epoxy, Alcohol</i>
DRIE	- <i>Deep Reactive Ion Etching</i> (Gravação profunda por íons reativos)
EME	- Escaneamento Microscópico Eletrônico
FCC	- Fluxo Crítico de Calor
iCVD	- Deposição Química de Vapor com Iniciação
MAD	- Desvio Absoluto Médio
MFO	- Material Fotossensível
MRD	- Desvio Relativo Médio
MU	- Microusinagem
ONB	- <i>Onset of Nucleate Boiling</i> (Inicialização da Nucleação de Bolhas)
OST	- <i>octadecyltrichlorosilane</i>
PDMS	- Revestimento: <i>polydimethylsiloxane</i>
pHEMA	- Revestimento: <i>polyhydroxy-ethylmethacrylate</i>
pPFDA	- <i>polyperfluorodecylacrylate</i>
PQ	- Processos Químicos
PQM	- Polimento Químico-Mecânico
RA	- Energia de Radiofrequência

RF	- Radiofrequência
RIE	- <i>Reactive Ion Etching</i> (Gravação por íons reativos)
RSME	- Revestimento de Superfície com Materiais Especiais
SMEM/SNEM	- Sistemas Micro/Nanoeletromecânicos
TMA	- <i>Trimethylaluminum</i>
UCP	- Unidades Centrais de Processamento
UFRJ	- Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
USA	- Estados Unidos da América
USP	- Universidade de São Paulo

### Letras Latinas

$A$	- Área	$m^2$
$c_p$	- Calor específico à pressão constante	$J/(kg.K)$
$d_b$	- diâmetro de desprendimento de bolhas	$m$
$D_H$	- Diâmetro Hidráulico	$m$
$D_{tr}$	- Diâmetro de Transição	$m$
$F_{ci}$	- Fator Convectivo de Intensificação	-
$F_f$	- Fator de dependência do fluido	-
$F_p$	- Força de pressão Estática	$N$
$F_S$	- Fator de Supressão de bolhas para Ebulição Nucleada	-
$F_{TS}$	- Força de Pressão Horizontal devido à Tensão Superficial	$N$
$g$	- Aceleração gravitacional	$m/s^2$
$G$	- Velocidade Mássica	$kg/(m^2.s)$
$h$	- Coeficiente de Transferência de Calor	$W/(m^2.K)$
$i_{lv}$	- Calor Latente de Vaporização	$J/kg$
$J$	- Velocidade Superficial	$m/s$
$k$	- Condutividade Térmica	$W/(m.K)$
$L$	- Comprimento	$m$
$M$	- Massa molecular	$kg/kmol$
$\dot{m}$	- Vazão mássica	$kg/s$
$n; N$	- Expoente para Correlações Assintóticas; tamanho amostral	-

$P$	- Pressão	Pa
$P_R$	- Pressão Reduzida	-
$Q$	- Vazão Volumétrica	m <sup>3</sup> /s
$q''$	- Fluxo de Calor	W/m <sup>2</sup>
$R$	- Raio	m
$R_p$	- Rugosidade superficial	m
$Rt$	- Resistência Térmica	K/W
$t$	- Tempo	s
$T$	- Temperatura	K
$u$	- Velocidade	m/s
$\Psi$	- Volume	m <sup>3</sup>
$x$	- Título de vapor em escoamentos	-

### Letras Gregas

$\Delta$	- Variação	-
$\alpha$	- Fração de vazio	-
$\beta$	- Fração Volumétrica	-
$\epsilon$	- Banda limítrofe de erro	-
$\sigma$	- Tensão Superficial	N/m
$\rho$	- Densidade	kg/m <sup>3</sup>
$\theta$	- Inclinação do tubo; Ângulo de Contato	°
$\mu$	- Viscosidade Dinâmica	Pa.s
$\mu_w$	- Viscosidade Dinâmica na temperatura da parede do microcanal	Pa.s
$\phi$	- Porcentagem de locação de dados	%

### Números adimensionais

$Bd$	- Número de Bond	$Bd = \frac{g(\rho_l - \rho_v)D_H^2}{\sigma}$
$Bo$	- Número de Ebulição	$Bo = \frac{q''}{Gi_{lv}}$

$Co$	- Número de Confinamento	$Co = \frac{1}{D_H} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_L - \rho_V)}}$
$EO$	- Número de Eötvös	$EO = \frac{g \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot D_H^2}{\sigma}$
$Fr_{lo}$	- Número de Froude para situação de apenas escoamento líquido	$Fr_{lo} = \frac{G^2}{g D_H \rho_l^2}$
$La$	- Número de Laplace	$La = \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_L - \rho_V)}}$
$La_l$	- Número de Laplace para fase líquida	$La_l = \sigma D_H \rho_l / \mu_l^2$
$Pr_l$	- Número de Prandtl para a fase Líquida	$Pr_l = c_{p,l} \mu_l / k_l$
$Re_{lo}$	- Número de Reynolds para escoamento apenas líquido	$Re_{lo} = G D_H / \mu_l$
$Re_l$	- Número de Reynolds para a fase Líquida	$Re_l = G_l D_H / \mu_l$
$Re_v$	- Número de Reynolds para a fase vapor	$Re_v = G_v D_H / \mu_v$
$We_v$	- Número de Weber para a fase vapor	$We_v = \frac{G_v^2 D_H}{\sigma \rho_v}$
$X_{ll}$	- Parâmetro de Lockhart-Martinelli (laminar-laminar)	$X_{ll} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,5} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu_v}{\mu_l}\right)^{0,1}$
$X_{lt}$	- Parâmetro de Lockhart-Martinelli (laminar-turbulento)	$X_{lt} = 18,65 Re_v^{-0,4} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu_v}{\mu_l}\right)^{0,1}$
$X_{tl}$	- Parâmetro de Lockhart-Martinelli (turbulento-laminar)	$X_{tl} = 0,05362 Re_v^{0,4} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu_v}{\mu_l}\right)^{0,1}$
$X_{tt}$	- Parâmetro de Lockhart-Martinelli (turbulento-turbulento)	$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu_v}{\mu_l}\right)^{0,1}$

## Subscritos

$1D$	- Linear
$2D$	- Superficial

<i>3D</i>	- Volumétrica; Tridimensional
<i>b</i>	- Bifásico
<i>crit</i>	- Crítica
<i>ec</i>	- Ebulição Convectiva
<i>en</i>	- Ebulição Nucleada
<i>exp</i>	- Experimental
<i>f</i>	- Fluido
<i>i</i>	- Contador do Somatório
<i>L;l</i>	- Fase Líquida
<i>LJ</i>	- Deslizamento Fase Líquida
<i>p</i>	- Parede
<i>pi</i>	- Interna da Parede
<i>pred</i>	- Predito
<i>sat</i>	- Saturação
<i>tr</i>	- Transição
<i>V;v</i>	- Fase Vapor
<i>VJ</i>	- Deslizamento Fase Vapor

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	Objetivos.....	23
1.2	Justificativa.....	23
1.3	Organização do trabalho.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1	Considerações iniciais.....	25
2.2	Fundamentos do escoamento interno bifásico.....	25
2.2.1	Fração de vazio.....	25
2.2.2	Fração Volumétrica.....	27
2.2.3	Título de vapor em escoamentos.....	27
2.2.4	Velocidade mássica.....	28
2.2.5	Velocidade Superficial.....	28
2.2.6	Velocidade de deslizamento.....	29
2.3	Fundamentos da ebulição convectiva.....	29
2.4	Critérios para distinção entre macro e microcanais.....	33
2.5	Padrões de escoamento em microcanais.....	40
2.6	Coeficiente de transferência de calor.....	43
2.6.1	Modos de transferência de calor na ebulição convectiva em microcanais.....	44
2.7	Métodos para obtenção de superfícies micro/nanoestruturadas em microcanais.....	45
2.8	Estudos sobre ebulição convectiva em microcanais micro/nanoestruturados.....	47
2.8.1	Trabalhos RSME.....	47
2.8.2	Trabalhos de Processos Químicos.....	54
2.8.3	Trabalhos SMEM/SNEM.....	66
2.8.4	Resumo e conclusões dos trabalhos selecionados sobre ebulição convectiva em microcanais micro/nanoestruturados.....	70
3	CORRELAÇÕES.....	77

3.1	Contextualização sobre as correlações para previsão do CTC .....	77
3.1.1	Correlações de adição .....	77
3.1.2	Correlações assintóticas .....	78
3.1.3	Correlações baseadas em padrões de escoamento .....	79
3.2	Correlações para predição do CTC na ebulição convectiva em microcanais .....	79
3.2.1	Correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007).....	79
3.2.2	Correlação de Li e Wu (2010).....	81
3.2.3	Correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013) .....	82
3.2.4	Correlação de Fang et al. (2017).....	83
3.2.5	Correlação de Tibiriçá et al. (2017) .....	84
4	METODOLOGIA .....	87
4.1	Base de dados adotada .....	87
4.2	Métricas de erro e porcentagens de ajuste .....	88
4.2.1	MAD – Desvio Absoluto Médio.....	89
4.2.2	MRD – Desvio Relativo Médio .....	89
4.2.3	Porcentagem de ajuste dos valores de CTC .....	89
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
5.1	Valores de CTC para a correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007).....	91
5.1.1	Banco de dados: microcanais normais .....	91
5.1.2	Banco de dados: microcanais nanoestruturados.....	93
5.2	Valores de CTC para a correlação de Li e Wu (2010).....	95
5.2.1	Banco de dados: microcanais normais .....	95
5.2.2	Banco de dados: microcanais nanoestruturados.....	97
5.3	Valores de CTC para a correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013) .....	99
5.3.1	Banco de dados: microcanais normais .....	99
5.3.2	Banco de dados: microcanais nanoestruturados.....	101
5.4	Valores de CTC para a correlação de Fang et al. (2017) .....	103
5.4.1	Banco de dados: microcanais normais .....	103

5.4.2	Banco de dados: microcanais nanoestruturados .....	105
5.5	Valores de CTC para a correlação de Tibiriçá et al. (2017) .....	107
5.5.1	Banco de dados: microcanais normais .....	107
5.5.2	Banco de dados: microcanais nanoestruturados .....	109
5.6	Resultados estatísticos e discussão .....	111
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	115
6.1	Propostas para trabalhos futuros .....	116
	REFERÊNCIAS .....	117
	APÊNDICE A Métodos para modificações superficiais em microcanais .....	125

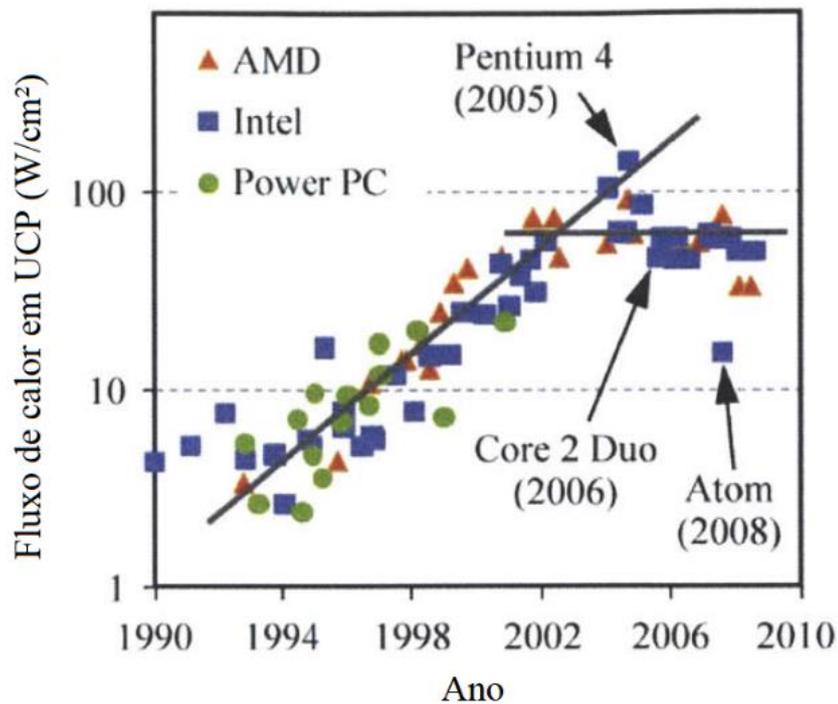
# 1 INTRODUÇÃO

A transferência de calor por meio de ebulição convectiva em microcanais (tubos com diâmetros inferiores a 3 mm) apresenta-se como assunto de pesquisa em destaque nos últimos anos. Isso se deve, dentre outros fatores, às várias aplicações industriais, como por exemplo no setor microeletrônico, em que existe a necessidade da dissipação de calor em regiões cada vez mais reduzidas (RIBATSKI, 2014).

Além do mais, os estudos nessa área levam à observação da melhor eficiência energética na troca de calor com a utilização de microcanais. Isso é explicado pelo aumento no coeficiente de transferência de calor (CTC) comparado aos tubos convencionais (diâmetros maiores que 3 mm). Também é importante destacar que, devido às características estruturais dos tubos de diâmetro reduzido, estes podem operar com pressões elevadas e possuem uma maior área de contato superficial por unidade de volume com a aplicação de fluido refrigerante (TIBIRIÇÁ, 2011).

A Figura 1.1 ilustra um exemplo que trata da tendência na densidade de potência em unidades centrais de processamento (UCP). Nesta figura percebe-se que, entre os anos de 1990 e 2005 houve um aumento progressivo no fluxo de calor requerido pelos circuitos integrados (CI) até o valor de  $100 \text{ W/cm}^2$ . A partir desse período, as abordagens típicas para a gestão térmica de UCP não foram capazes de dissipar fluxos tão altos e, assim, a indústria adotou novos projetos para a sua redução, como o multi-core (processador de vários núcleos). No entanto, de acordo com THOME (2006), os desafios no gerenciamento térmico tenderiam a crescer nos anos subsequentes a 2010 e, dessa forma, os circuitos integrados ultrapassariam uma densidade de potência térmica de  $300 \text{ W/cm}^2$ . Com isso, seriam necessários pesquisa e desenvolvimento em tecnologias para uma melhor dissipação de calor em CI. De acordo com TIBIRIÇÁ (2011), um dos mecanismos mais eficientes para a remoção de calor se refere à ebulição convectiva, como pode ser observado na Tabela 1.1, na qual se verifica os valores para o coeficiente de transferência de calor em variados tipos de convecção.

Dentro desse contexto, um aspecto importante refere-se à adição de nanoestruturas nas superfícies dos canais com diâmetro reduzido. Esse fator caracteriza-se por haver um incremento no CTC para a ebulição nucleada. No entanto, para a ebulição convectiva, ainda não existe conclusão definitiva sobre o efeito das mudanças nas características da superfície em microcanais (KARAYIANNIS e MAHMOUD, 2017).

**Figura 1.1** – Tendência do fluxo de calor requerido em Unidades Centrais de Processamento.

Fonte: Adaptado de Pop (2010 apud Chu, 2013, p. 2).

**Tabela 1.1** - Valores de coeficientes de transferência de calor por meio de mecanismos de convecção.

Mecanismo físico	CTC (W/m <sup>2</sup> K)
Convecção natural	
Gases	5 - 25
Líquidos	50 - 1000
Convecção forçada	
Gases	25 - 250
Líquidos	
Canais convencionais	50 - 10 <sup>4</sup>
Microcanais	500 - 5.10 <sup>5</sup>
Ebulição nucleada	300 - 5.10 <sup>4</sup>
Ebulição convectiva	300 - 10 <sup>6</sup>
Condensação	10 <sup>3</sup> - 1,5.10 <sup>5</sup>

Fonte: Tibiriçá (2011, p. 20).

Alguns métodos de fabricação para realizar esse procedimento podem ser resumidamente destacados pelas seguintes técnicas: microusinagem, revestimento de superfície com materiais especiais, ataque químico e sistemas micro/nano-eletromecânicos. Dentre os tipos de aplicações dos últimos métodos, encontram-se a oxidação, fotolitografia, gravação por íons reativos e gravação profunda por íons reativos para desenvolvimento de superfícies nanoporosas (KIM et al., 2015).

## 1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar teoricamente o desempenho da troca de calor na ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados por técnicas de revestimento de superfície, processos químicos e micro/nanoeletromecânicos. Além do objetivo principal, como objetivos específicos listam-se:

- I. Investigar e analisar teoricamente o contexto de microcanais e ebulição convectiva;
- II. Analisar métodos de fabricação de superfícies nanoestruturadas em microcanais;
- III. Avaliar e selecionar correlações para o coeficiente de transferência de calor na ebulição convectiva em microcanais; e
- IV. Comparar o desempenho da transferência de calor por convecção através dos estudos da literatura e das correlações selecionadas.

## 1.2 Justificativa

A contribuição em nível social deste trabalho consiste na melhor compreensão da transferência de calor em microcanais nanoestruturados por técnicas de revestimento de superfície, processos químicos e micro/nanoeletromecânicos. Isso permitiria uma avaliação mais confiável dos tipos de nanoestruturas a serem empregados em aplicações reais nas indústrias.

Além disso, existe uma escassez de trabalhos no Brasil que tratam dessa área de pesquisa, sendo que a concentração de estudos brasileiros está presente na USP (São Carlos), UFRJ e UFSC.

### 1.3 Organização do trabalho

A estrutura deste trabalho é composta de: introdução, fundamentação teórica e revisão bibliográfica, seleção e descrição de correlações para microcanais, avaliação comparativa das correlações selecionadas e, por fim, conclusões e recomendações.

No capítulo 1 (introdução) são contextualizados os assuntos da área de transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados, sendo também apresentados os objetivos do trabalho, sua justificativa e a organização estrutural do texto.

O capítulo 2 (revisão bibliográfica e fundamentação teórica) trata dos conceitos básicos para o desenvolvimento da dissertação. Nele são apresentados aspectos da transferência de calor (como o coeficiente de transferência de calor), fundamentos da ebulição convectiva, microcanais e seus padrões de escoamento para ebulição convectiva. São descritos também os métodos mais usuais para a fabricação de micro/nanoestruturas para as superfícies dos canais de dimensões reduzidas, bem como a apresentação de trabalhos selecionados das duas últimas décadas sobre a transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados.

O capítulo 3 (Correlações) apresenta as características das correlações utilizadas na literatura para a previsão do CTC em microcanais, bem como evidencia a seleção de algumas correlações.

O capítulo 4 (Metodologia) trata da definição de banco de dados adotado e a métrica de erro empregada para realizar comparações entre as correlações.

O capítulo 5 (Resultados e Discussão) expõem os resultados provenientes da aplicação das correlações selecionadas ao banco de dados adotado e, posteriormente, realiza-se a comparação e discussão por meio de métrica estatística.

Por último, o capítulo 6 (Conclusões e recomendações) expõe as conclusões obtidas por meio da revisão bibliográfica realizada e da avaliação comparativa das correlações para o CTC. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Considerações iniciais**

A revisão bibliográfica e fundamentação teórica teve sua estrutura definida da seguinte maneira:

- Apresentação sucinta dos conceitos para escoamento bifásico;
- Apresentação dos princípios fundamentais para a ebulição convectiva;
- Critérios para a distinção entre tubos convencionais e microcanais;
- Padrões de escoamento para a ebulição convectiva;
- Coeficiente de transferência de calor para a ebulição convectiva;
- Métodos para obtenção de superfícies micro e nanoestruturadas em microcanais;
- Estado da arte sobre a transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados por revestimento com materiais especiais, processos químicos e micro/nanoeletromecânicos.

### **2.2 Fundamentos do escoamento interno bifásico**

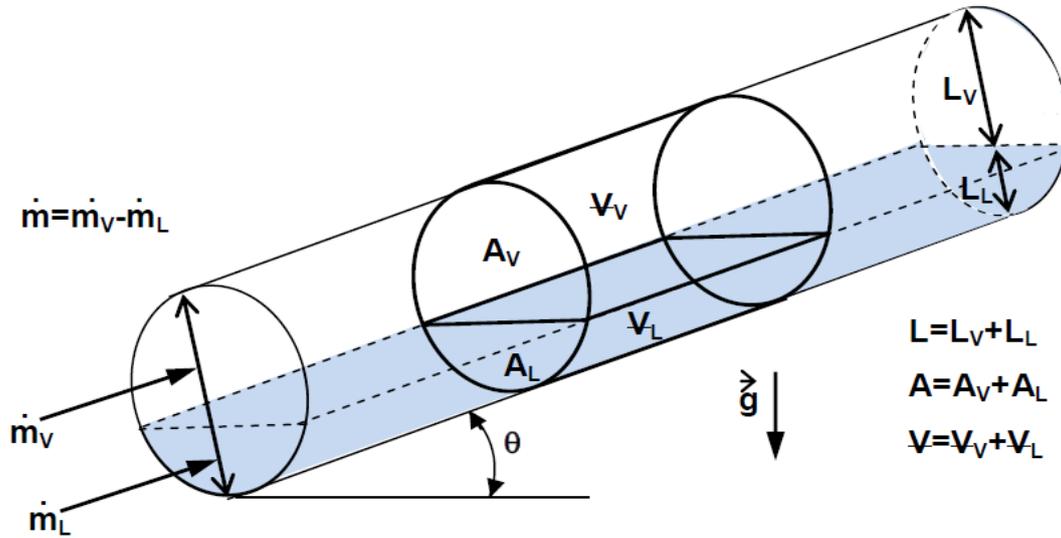
A finalidade desta sessão é apresentar parâmetros descritivos do escoamento bifásico, tomando como base as definições estabelecidas na literatura.

#### **2.2.1 Fração de vazio**

A fração de vazio, refere-se a um parâmetro importante em escoamentos bifásicos. Isso porque tal fator está associado à perda de pressão, à transição do padrão de escoamento e também ao coeficiente de transferência de calor (DA SILVA, 2012, p. 35).

A Figura 2.1, evidencia de forma esquemática um escoamento líquido-vapor internamente a um tubo. A partir dessa ilustração, consegue-se definir a fração da fase de vapor em um escoamento bifásico diante de domínios de espaço diferentes, como são mostrados na Figura 2.1, e por meio das seguintes relações:

**Figura 2.1** – Esquema do escoamento bifásico líquido-vapor em um tubo.



Fonte: Adaptado de Ribatski (2014, p. 5).

- Fração de vazio linear ( $\alpha_{1D}$ ): definida em uma única dimensão delimitada pela superfície interior ao duto no decorrer de uma seção transversal. É caracterizada pela média temporal da fração espacial linear instantânea para a fase vapor, que pode ser definida como a razão entre o comprimento em que acontece a fase vapor e o segmento de reta total por meio do qual ocorre o escoamento bifásico, conforme a equação (2.1).

$$\alpha_{1D} = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} \frac{L_V}{L} dt \quad (2.1)$$

- Fração de vazio superficial ( $\alpha_{2D}$ ): diante de uma seção transversal em um tubo, refere-se à média temporal da fração espacial instantânea de superfície para a fase vapor. É definida pela razão entre a área tomada pela fase vapor e a área interior total do tubo, adotando-se a variável  $\alpha$ , conforme a equação (2.2).

$$\alpha_{2D} = \alpha = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} \frac{A_V}{A} dt \quad (2.2)$$

- Fração de vazio volumétrica ( $\alpha_{3D}$ ): caracterizada para um trecho qualquer da tubulação, em que consiste na média temporal da fração espacial instantânea de volume para a fase

vapor. Define-se pela razão entre o volume tomado pela fase vapor e o volume total ao decorrer do comprimento determinado da tubulação, conforme a equação (2.3).

$$\alpha_{3D} = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} \frac{V_V}{V} dt \quad (2.3)$$

A fração de vazio volumétrica é comumente determinada por meio do método de fechamento rápido de válvulas, o qual se refere no fechamento de duas válvulas simultaneamente. Isso bloqueia o escoamento e delimita um segmento da tubulação em que a fase líquida é drenada posteriormente e seu volume verificado. Dessa forma, fazendo-se a diferença desse valor com o volume total do trecho da tubulação especificada, encontra-se o volume tomado pela fase vapor.

Para casos de escoamento completamente desenvolvido, regime permanente e quando as frações de vazio superficial e volumétrica são calculadas para amostras de tempo significantes do escoamento, os valores de ambas as frações são similares.

### 2.2.2 Fração Volumétrica

De acordo com Ribastski (2014, p. 7), em algumas aplicações, tais como na indústria petroleira, faz-se necessário utilizar a fração volumétrica da fase vapor ( $\beta$ ) na caracterização do escoamento. Essa variável é definida como a razão entre a vazão volumétrica da fase vapor e a vazão volumétrica total (resultado da soma entre as vazões volumétricas das fases líquida e vapor). A equação 2.4 refere-se a essa situação.

$$\beta = \frac{Q_V}{Q_V + Q_L} \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Título de vapor em escoamentos

O título de vapor ( $x$ ) se refere à razão entre as vazões mássicas da fase vapor e a vazão mássica total, segundo Ribastski (2014, p. 7), como é mostrado na equação (2.5).

$$x = \frac{\dot{m}_V}{\dot{m}_V + \dot{m}_L} \quad (2.5)$$

#### 2.2.4 Velocidade mássica

De acordo com Ribastski (2014, p. 7), a velocidade mássica ( $G$ ) é caracterizada como a razão entre a vazão mássica correspondente de cada fase e a área da seção transversal do escoamento, como está apresentada pelas equações (2.6) e (2.7), respectivas para as fases vapor e líquida:

$$G_V = \frac{\dot{m}x}{A} \quad (2.6)$$

$$G_L = \frac{\dot{m}(1-x)}{A} \quad (2.7)$$

com a velocidade mássica total da mistura,  $G$ , sendo a soma das velocidades mássicas  $G_V$  e  $G_L$ , equação (2.8).

$$G = G_V + G_L \quad (2.8)$$

#### 2.2.5 Velocidade Superficial

Ainda segundo Ribastski (2014, p. 8), a velocidade superficial ( $J$ ) de cada fase refere-se à velocidade que a fase apresentaria se escoasse de forma isolada em um tubo com a mesma seção transversal, conforme as equações (2.9) e (2.10).

$$J_V = \frac{Q_V}{A} = \alpha u_V \quad (2.9)$$

$$J_L = \frac{Q_L}{A} = (1 - \alpha)u_L \quad (2.10)$$

em que  $u_L$  e  $u_V$  correspondem às velocidades reais das fases líquida e de vapor. Assim, seus valores são superiores aos das velocidades superficiais para cada fase, respectivamente. A

velocidade superficial da mistura (velocidade superficial total) consiste na soma das velocidades superficiais de cada fase, equação (2.11).

$$J = J_V + J_L \quad (2.11)$$

### 2.2.6 Velocidade de deslizamento

Por último, a velocidade de deslizamento ( $u$ ) consiste na diferença entre a velocidade real da fase correspondente e a velocidade superficial total (RIBASTSKI, 2014, p. 8). Sendo assim, os valores das velocidades de deslizamento para as fases vapor e líquida, respectivamente, estão representados pelas equações (2.12) e (2.13), respectivamente.

$$u_{vJ} = u_v - J \quad (2.12)$$

$$u_{lJ} = u_l - J \quad (2.13)$$

## 2.3 Fundamentos da ebulição convectiva

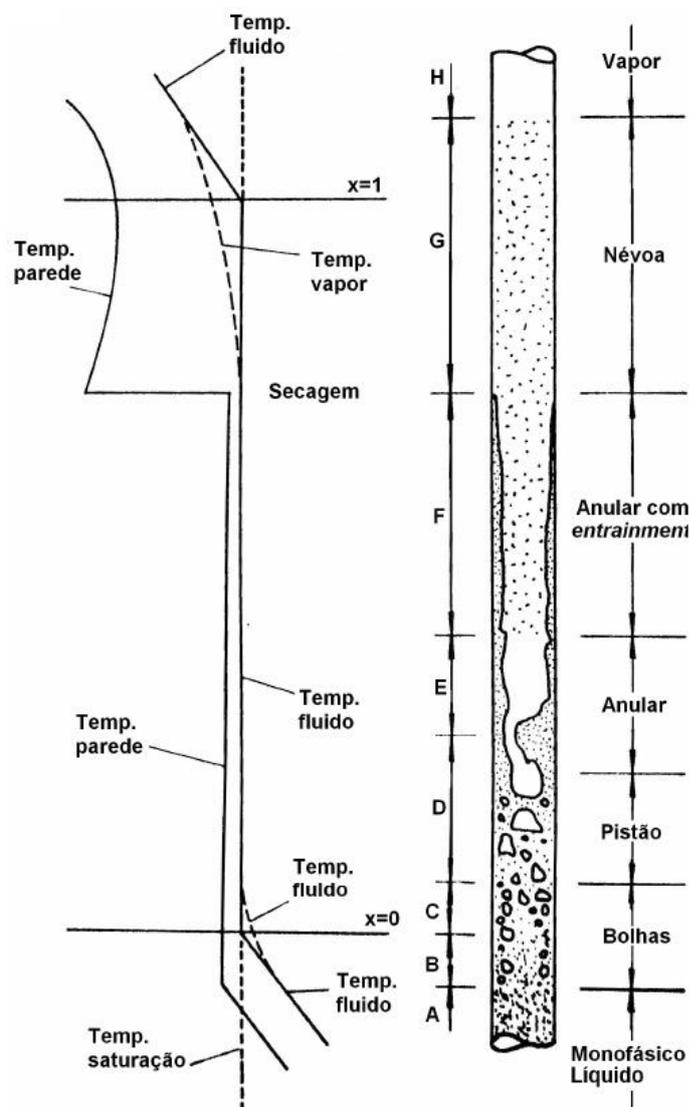
Segundo Collier e Thome (1994), a ebulição convectiva é definida como a adição de calor a um escoamento forçado de líquido, de tal maneira que aconteça geração de vapor. Em um escopo geral, as aplicações que envolvem esse mecanismo possuem um elevado coeficiente de transferência de calor, pequena diferença de temperatura entre a superfície e o fluido escoante e gradientes de temperatura ao longo do trocador de calor inferiores àqueles presentes em escoamentos monofásicos. No entanto, existe uma perda de pressão também superior comparada com as situações de escoamento monofásico (RIBASTSKI, 2014, p. 22).

No mecanismo da ebulição convectiva, a taxa de transferência de calor corresponde à combinação dos efeitos de convecção forçada (baseados no fluxo de massa do sistema), e também de ebulição nucleada (decorrentes da nucleação de bolhas de vapor junto à parede) (TIBIRIÇÁ, 2011, p. 5).

A ebulição convectiva se verifica em duas situações: saturada e sub-resfriada. Em ambas as condições existem, simultaneamente, as fases líquida e vapor. A situação de saturação se caracteriza quando a temperatura do fluido corresponde à temperatura de saturação relacionada

à pressão do escoamento. No caso de condição sub-resfriada, a temperatura média do fluido, na seção transversal, é inferior à temperatura de saturação do fluido associada à pressão do escoamento. A Figura 2.2, a seguir, ilustra os padrões de escoamento durante a ebulição convectiva em macrocanais com fluido escoante na vertical e também caracteriza a relação desse tipo de escoamento aos seus mecanismos de transferência de calor.

**Figura 2.2** – Regime de transferência de calor durante a ebulição convectiva em canais convencionais para escoamento vertical.



Fonte: Collier e Thome (1994 apud Tibiriçá, 2011, p. 6).

Inicialmente, na região A, o fluido se encontra na fase líquida em regime monofásico, com transferência de calor forçada. À medida que calor é transferido para o fluido, começa-se

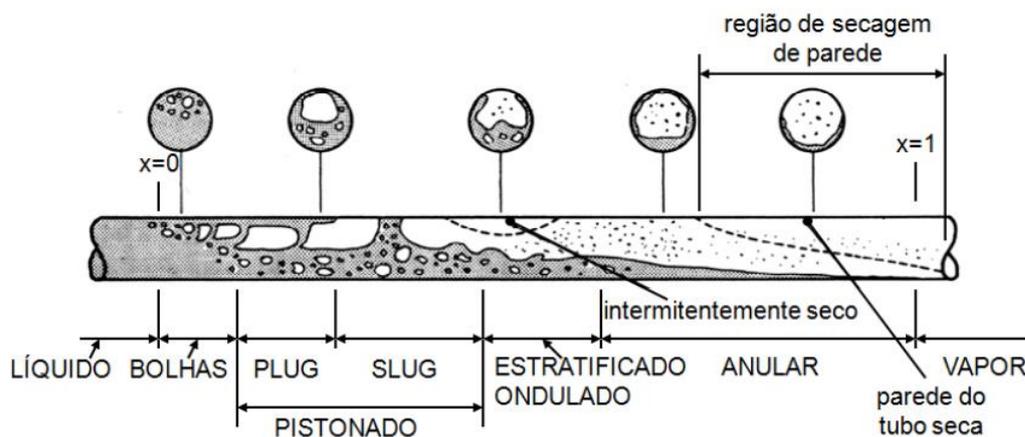
a formação de bolhas com o fluido ainda no estado sub-resfriado, na região B denominada de escoamento em bolhas. A partir dessa situação, com o incremento do título de vapor de equilíbrio termodinâmico, o tipo de escoamento passa a acontecer no estado de saturação. Os mecanismos de transferência de calor para as regiões B e C são similares àqueles observados em ebulição nucleada em piscina.

Kandlikar (2005) aponta que tais mecanismos também são encontrados no regime anular, em que se formam microbolhas no filme líquido junto à parede. Tratando-se da região D, devido ao crescimento rápido de bolhas acontece coalescência e, assim, a formação de pistões de vapor, com diâmetros próximos ao do canal. O mecanismo de transferência de calor por convecção através do filme líquido se torna responsável por parte do calor transferido, à medida que os pistões de vapor crescem. Aumentando-se o título de vapor, o padrão do escoamento anular se estabelece, nas regiões E e F. Nesse caso, o mecanismo de troca de calor por convecção através do filme líquido se torna dominante. A evaporação de líquido ocorre de maneira livre na interface líquido-vapor, até o ponto de secagem total da superfície interior do tubo, como representado na região G. Nela, o coeficiente de transferência de calor diminui drasticamente, o que leva a um aumento da temperatura da parede em casos de imposição do fluxo de calor. São observadas gotículas de líquido suspensas na fase de vapor, formadas no início do regime anular. Essas pequenas gotas são denotadas na literatura inglesa por *entrainment* e, eventualmente, depositam-se na parede do tubo decorrendo no seu resfriamento (BARBOSA et al., 2002). Por último, acontece a evaporação de toda a fase líquida e o escoamento se torna completamente monofásico na fase de vapor.

Já para o caso dos padrões de escoamento durante a ebulição convectiva em tubos horizontais, como apresentado na Figura 2.3, as diferenças básicas comparadas aos padrões em tubos verticais estão associadas, principalmente, à estratificação do líquido em consequência dos efeitos de gravidade. Assim, acontece o regime estratificado, no qual a transferência de calor na região inferior do tubo decorre pela combinação de efeitos da ebulição nucleada e convecção forçada para a fase líquida, enquanto que, para a parte superior do tubo, ocorre convecção forçada para a fase vapor. Nos escoamentos horizontais, os efeitos de gravidade também fazem com que as bolhas e os pistões de vapor se concentrem na região do hemisfério superior do tubo. Além disso, os fatores gravitacionais contribuem para que a espessura do filme líquido ao longo do perímetro em uma determinada seção transversal diminua ascendentemente, o que leva a maiores coeficientes de transferência de calor na parte superior do canal. Além do mais, a secagem da superfície acontece de forma progressiva à medida em que a espessura do filme líquido decresce, partindo do ápice do tubo. Nessa região de secagem

progressiva, Wojtan et al. (2005) caracterizou um padrão de escoamento adicional, chamado de secagem de parede.

**Figura 2.3** – Regime de transferência de calor durante a ebulição convectiva em macrocanais para escoamento horizontal.



Fonte: Collier e Thome (1994 apud Ribastki, 2014, p. 25).

Um aspecto relevante em ebulição convectiva consiste na determinação da região aquecida, com base na qual o processo de formação de bolhas se inicializa. Para que se inicie a ebulição, precisa-se que a temperatura da parede seja maior que a temperatura de saturação do fluido escoante. Em condição de ebulição convectiva sub-resfriada, a nucleação de bolhas começa com o valor da temperatura média do líquido menor que a sua temperatura de saturação. Já no caso de ebulição convectiva saturada, a formação de bolhas pode acontecer com temperaturas médias do fluido superiores à temperatura de saturação. Nesse contexto da inicialização da formação de bolhas, o primeiro conjunto de bolhas que surgem é denotado como ONB (*Onset of Nucleate Boiling*). Em ambos os casos (condições sub-resfriada e saturação), para que ocorra a formação de bolhas, necessita-se que a temperatura da parede ultrapasse um valor mínimo em relação à temperatura de saturação. Vários trabalhos são encontrados na literatura para determinar os critérios de cálculos para a temperatura de ONB em macrocanais. Entre eles estão Bergles e Rohsenow (1964), Davis e Anderson (1966) e Kandlikar et al. (2005). Neste último, a temperatura de ONB ( $\Delta T_{sat,ONB}$ ) pode ser expressa pela equação (2.14).

$$\Delta T_{sat,ONB} = T_P - T_{sat} = \sqrt{\frac{8,8 \cdot \sigma \cdot T_{sat} \cdot q''}{\rho_V \cdot i_{LV} \cdot k_L}} \quad (2.14)$$

em que  $T_P$  é a temperatura na parede,  $T_{sat}$  se refere à temperatura de saturação,  $q''$  é o fluxo de calor. Para essa equação, as propriedades do fluido devem ser calculadas baseadas na pressão local do escoamento. De acordo com Kandlikar (2005), tal critério pode ser empregado tanto em macrocanais como também em canais de reduzido diâmetro.

Uma condição específica, em que também ocorre uma redução acentuada do coeficiente de transferência de calor se refere à ebulição em filme. Nela acontece a formação de um filme de vapor entre a parede e a fase líquida. Isso gera um aumento rápido da temperatura da parede, o que pode conduzir, eventualmente, à queima do tubo (*burnout*). Tal situação pode ocorrer em escoamentos sub-resfriados, bem como em escoamentos saturados com pequenos títulos de vapor. Esse caso é comumente denominado como crise de ebulição ou DNB (*Departure from Nucleate Boiling*). O efeito de secagem e também a crise de ebulição são os mecanismos responsáveis pela delimitação do valor máximo de transferência de calor para fluido escoante em um tubo, o qual é denominado de fluxo crítico de calor (FCC).

## 2.4 Critérios para distinção entre macro e microcanais

Quando são comparados os canais convencionais com os tubos de reduzido diâmetro, verificam-se, para a ebulição convectiva, comportamentos distintos para a transferência de calor, perda de pressão, bem como para regimes de escoamento. Sendo assim, nem todos os conceitos estabelecidos para tubos normais são dedicados aos microcanais.

A transição entre os comportamentos de micro e macroescala para a ebulição convectiva é comumente tratada na literatura especializada. Ao decorrer das duas últimas décadas (inclusive a atual), diversos critérios foram propostos para distinguir a transição mencionada. Inicialmente os estudos basearam-se em métodos de fabricação e na aplicação do trocador de calor. Uma abordagem mais atual trata uma metodologia mecanicista, considerando efeitos inerciais, de arrasto sobre as bolhas coalescidas e também o seu grau de confinamento por meio da relação entre o diâmetro do desprendimento de uma bolha em um meio infinito e as dimensões características do canal. Outros métodos consideram a molhabilidade do líquido relacionada ao ângulo de contato que em caso de diâmetros reduzidos pode manter molhado todo o interior superficial do canal (LEÃO, 2014, p. 46).

Baseados em processos de fabrica o para tubos trocadores de calor e no diâmetro característico, Mehendal, Jacobi e Shah (2000), seguiram a classifica o a seguir: microcanais (1 a 100  $\mu\text{m}$ ), mesocanais (100  $\mu\text{m}$  a 1 mm), macrocanais (1 a 6 mm) e canais convencionais ( $D_H > 6$  mm). Posteriormente, Kandlikar e Grande (2003) propuseram uma classifica o baseadas na faixa de diâmetro característico com base nas aplica es dos canais, bem como nos efeitos de rarefa o de gases. Sendo assim, para esse caso, os canais convencionais possuem  $D_H > 3$  mm. Os minicanais são tratados por aqueles com diâmetros hidráulicos entre 3 mm e 200  $\mu\text{m}$ , t picos de trocadores de calor compactos. Os microcanais compreendem-se por diâmetros hidráulicos entre 200 e 10  $\mu\text{m}$ , enquanto que os canais de transi o são divididos em microcanais de transi o ( $10 \geq D_H > 1$   $\mu\text{m}$ ), nanocanais de transi o ( $1 \geq D_H > 0,1$   $\mu\text{m}$ ) e canais moleculares ( $D_H \leq 0,1$   $\mu\text{m}$ ). Mesmo que Kandlikar e Grande (2003) estabeleceram esse critério para escoamento monofásico de um gás, eles também recomendam sua utiliza o para escoamentos de líquidos e de líquido-vapor.

Salienta-se que as classifica es relacionadas a processos de fabrica o e aplica es não evidenciam altera es de comportamentos em parâmetros de projetos, tais como a perda de pressão, o coeficiente de transferência de calor e o fluxo crítico de calor. Dessa forma, torna-se razoável a não ado o dessas classifica es para o desenvolvimento de metodologias de previsão para esses parâmetros e, de acordo com Tibiriça (2011), deve-se dispor de um critério apropriado baseado em fatores fenomenológicos.

Kew e Cornwell (1997), baseados no grau de confinamento de uma bolha no interior de um canal, estabeleceram a transi o entre macro e microcanais com rela o   dimensão característica e ao diâmetro de desprendimento de uma bolha em um meio infinito. O Número de Confinamento ( $Co$ )   dado pela equa o (2.15). De acordo com esse critério, efeitos de confinamento são relevantes para números de confinamento superiores a 0,5.

$$Co = \frac{1}{D_H} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_L - \rho_V)}} \quad (2.15)$$

Triplet et al. (1999) também empregaram um critério baseado no Número de Confinamento. Para esse caso, definiram-se como microcanais os tubos com  $Co \geq 1$ . Tal critério fundamenta-se no fato de que, para escoamentos bifásicos no interior de dutos com diâmetros hidráulicos inferiores a constante de Laplace ( $La$ ), os efeitos de tensão superficial predominam em rela o aos efeitos de inércia e gravidade. Assim, a razão de deslizamento entre as fases  

reduzida, resultando na inexistência de instabilidades interfaciais de Taylor, as quais são predominantes em escoamentos líquido-vapor em macroescala. O valor da constante de Laplace está caracterizado pela equação (2.16).

$$La = \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_L - \rho_V)}} \quad (2.16)$$

Com base em análise dos mecanismos envolvidos durante a transição entre padrões de escoamento, Ullman e Brauner (2007) verificaram que os métodos de transição empregados para tubos convencionais não são adequados quando o Número de Eötvös,  $Eo$ , é menor que 1,6. O valor de  $Eo$  é definido pela razão entre as forças de empuxo e de tensão superficial e corresponde ao inverso do grau de confinamento ao quadrado, como mostra a equação (2.17). Assim, de acordo com essa metodologia, os microcanais são aqueles que possuem escoamentos com um Número de Confinamento inferior a 1,26.

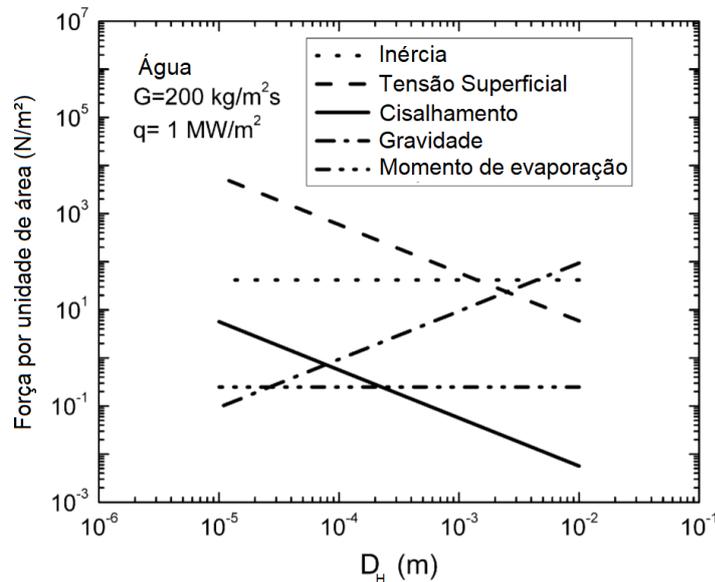
$$Eo = \frac{g \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot D_H^2}{\sigma} \quad (2.17)$$

Celata (2008) observou que, em condições de microgravidade, os critérios de transição já mencionados com a abordagem do grau de confinamento de bolhas fornecem um diâmetro de transição com valor infinito. Isso indicaria que a ebulição convectiva, em microgravidade, corresponderia sempre a um fenômeno de microescala, independente do diâmetro do tubo. Reportou-se que o diâmetro do desprendimento de bolhas, nas condições estabelecidas, depende da velocidade mássica e do título de vapor, não somente dos efeitos de gravidade. Sendo assim, esses parâmetros poderiam também ser considerados para o desenvolvimento do critério de transição.

Kandlikar (2010) avaliou a ordem de grandeza de diversas forças associadas aos escoamentos bifásicos, entre as quais estão as forças de cisalhamento, tensão superficial, inércia, gravidade e variação da quantidade de movimento (momento linear). A Figura 2.4 ilustra uma comparação dessas variáveis supracitadas, com base na evaporação de interface para velocidade mássica de 200 kg/m<sup>2</sup>s. Nesta figura consegue-se perceber que a força da tensão superficial se sobrepõe em relação as forças de gravidade. Além disso, verifica-se que, em diâmetros hidráulicos, próximos de 3 mm existe um equilíbrio entre as forças inercial, superficial e de gravidade.

**Figura 2.4** – Grandezas das forças na ebulição convectiva de água,

$$G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}, q'' = 1 \text{ MW/m}^2.$$



Fonte: Adaptado de Kandlikar (2010).

De forma equivalente a Celata (2008), Harirchian e Garimella (2010) incorporaram ao critério de transição a velocidade superficial do escoamento. Isso porque o diâmetro de desprendimento de bolhas e o estabelecimento de condições de confinamento são influenciados intensamente por esse parâmetro. Com isso, a transição entre canais convencionais e tubos de reduzido diâmetro dependem do produto entre os Números de Bond (semelhante ao número de Eötvös) e Reynolds, que foi denominado por Número de Confinamento Convectivo, quando assumido um escoamento de líquido. Os autores verificaram que, para valores inferiores a 160 do produto mencionado, considera-se a condição de microescala. Isso baseado no fato de que o coeficiente de transferência de calor se modificava devido à influência da dimensão do canal, o que não foi observado para valores superiores a 160 do número de confinamento convectivo.

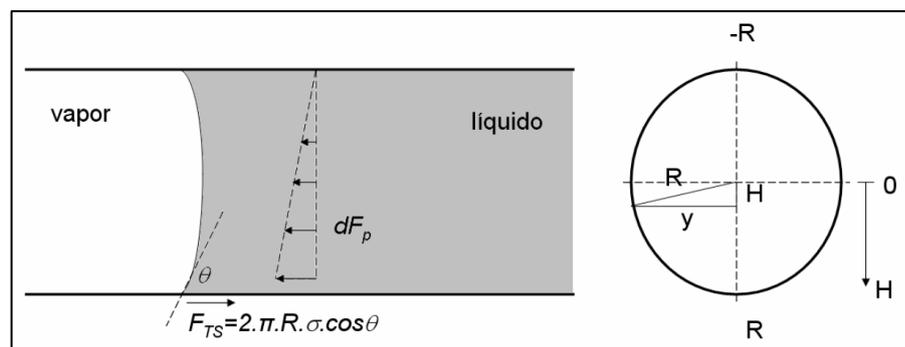
De acordo com Ong e Thome (2011), as propriedades do fluido, tais como a tensão superficial, densidade de fases e viscosidade consistem em fatores que afetam a transição entre os padrões de escoamento. Os experimentos executados pelos autores tiveram condições de temperatura de saturação de 25 °C e 35 °C, bem como tubos com diâmetros de 1,03 mm, 2,20 mm, 3,04 mm. Os fluidos utilizados referiram-se aos refrigerantes R134a, R236 e R245fa. Constatou-se que os efeitos de tensão superficial predominam sobre os efeitos gravitacionais para números de confinamento superiores a unidade. Enquanto que, para números de confinamento inferiores a 0,34, ocorre predominância oposta comparada ao caso anterior. Outro aspecto analisado consistiu na observação de somente três padrões de escoamento para os

diâmetros inferiores, representados por bolhas isoladas, bolhas coalescentes e anular. Observou-se o padrão pistonado apenas para o tubo de maior diâmetro (3,04 mm), em que se constatou um número de confinamento de 0,34. Dessa forma, esse valor para o número de confinamento foi utilizado para limitar a condição de macroescala.

Tibiricá (2011), baseado em estudos próprios para canais circulares com diâmetros de 1,0 e 2,3 mm, determinou três critérios para distinguir os efeitos de macro e microescala. Esses critérios foram embasados na ausência de escoamento estratificado e na tendência de uniformidade do filme líquido para o caso de escoamento anular ao decorrer do perímetro. De acordo com o autor, sua classificação procurou identificar as características que fossem diretamente importantes para o coeficiente de transferência de calor, fluxo crítico e perda de pressão. Os critérios propostos são válidos apenas para canais horizontais, porém salienta-se que a transição entre micro e macroescala é também dependente do padrão de escoamento.

O primeiro critério proposto por Tibiricá (2011) considera um pistão de líquido estático que, em situações de microescala, não caracteriza a estratificação do escoamento no duto. A transição é sujeita à condição mínima necessária para o equilíbrio de forças estáticas para o pistão mencionado, em que se realiza um balanço de forças de pressão estática ( $F_p$ ) e a componente horizontal da força devido à tensão superficial ( $F_{TS}$ ) no contato entre a interface e a parede (na linha de contato triplo líquido-vapor-sólido). Essa situação é ilustrada pela Figura 2.5.

**Figura 2.5** – Esquema com as forças de pressão e de tensão superficial para o critério da condição de estratificação.



Fonte: Tibiricá (2011, p. 134).

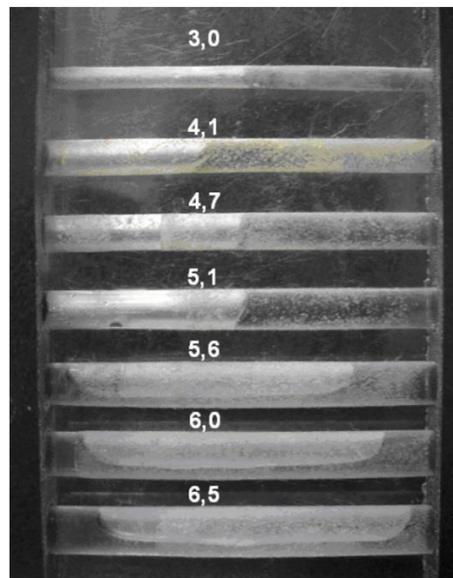
Resolvendo numericamente a equação do balanço de energia para as condições propostas, consegue-se encontrar o diâmetro máximo em que não se observa o padrão de escoamento estratificado.

O segundo critério proposto por Tibiri  (2011) também trata da ocorrência do padrão estratificado como condi o para a transi o entre micro e macrocanais. Para tal, ele considera as hipóteses similares a Felcar, Ribatski e Jabardo (2007), as quais consistiram nos efeitos de capilaridade que estariam associados   forma o de uma zona de líquido no interior do tubo. Isso impossibilitaria o estabelecimento do padrão de escoamento estratificado e, dessa forma, a transi o entre macro e microescala aconteceria para um diâmetro do canal ( $D_{tr}$ ) maior que a altura capilar, conforme a seguinte equa o (2.18).

$$D_{tr} = 2 \cdot La \cdot \sqrt{\cos \theta} \quad (2.18)$$

Como forma de valida o dos métodos propostos, Tibiri  (2011) realizou experimentos em uma placa de acrílico com furos de diâmetros distintos, que continham água e ar, como ilustrado pela Figura 2.6.

**Figura 2.6** – Experimento realizado para caracterizar o diâmetro (mm) em que acontece estratifica o de água e ar.



Fonte: Tibiri  (2011, p. 137).

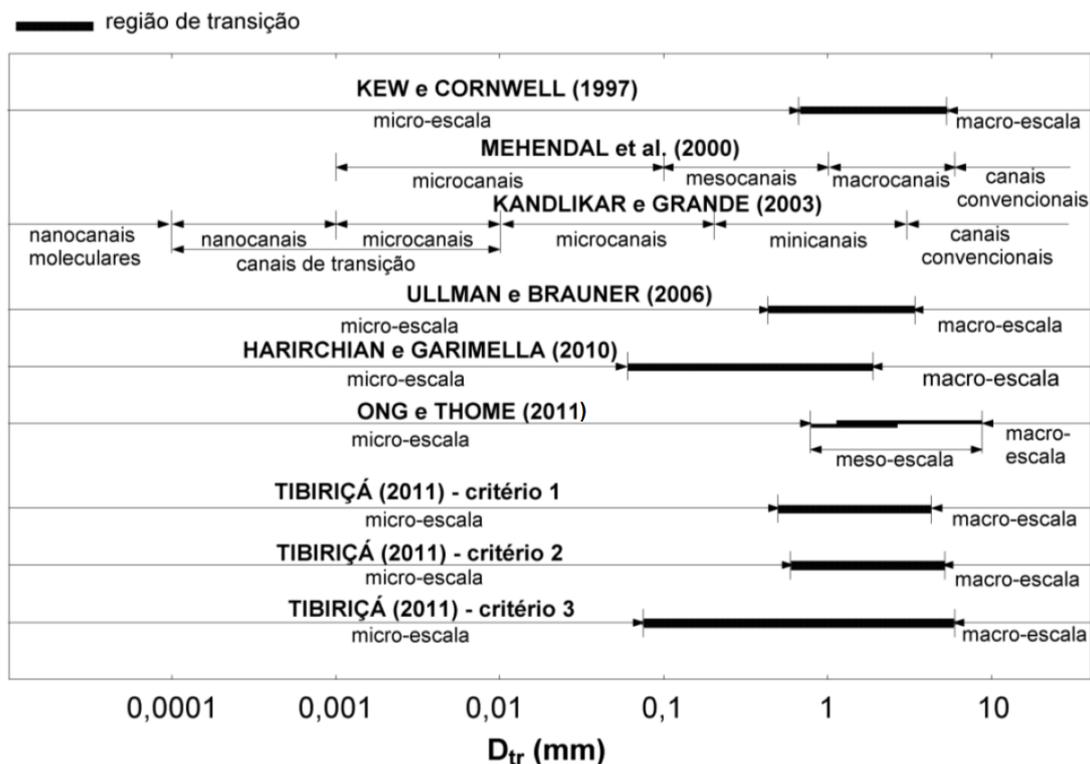
Baseando-se na figura, existe estratifica o do escoamento para diâmetros superiores a 5,6 mm. Tal valor   próximo ao resultado de 5,5 mm calculado pela equa o (2.17), para um ângulo de contato mensurado pelo autor de 60 . Mesmo os valores caracterizados para o segundo critério serem quase equivalentes ao valor experimental, Tibiri  (2011) afirma sobre a importância de se considerar os efeitos inerciais.

O último critério apresentado por Tibiriçá (2011) fundamenta-se nos estudos de Kandlikar (2010). Nesse caso a distinção entre macro e microescala está associada à uniformidade do filme líquido ao decorrer do perímetro do duto. Para o autor, em diâmetros reduzidos, as forças de tensão superficial e as forças inerciais são predominantes sobre as outras forças. Sendo assim, assumiu-se como condições de microescala quando as forças gravitacionais fossem inferiores a 5% das forças de tensão superficial. O critério de transição avalia a ordem da magnitude das forças importantes durante a ebulição convectiva em canais, conforme a equação (2.19), em que se encontra o diâmetro de transição entre micro e macroescala.

$$D_{tr} = \frac{La}{2\sqrt{5}} \quad (2.19)$$

A Figura 2.7, elaborada por Ribatski (2014), evidencia as comparações entre os critérios de distinção entre micro e macrocanais tratados. Para a construção dessa ilustração, o autor considerou as condições experimentais apresentadas a seguir: canais circulares, velocidade mássica entre 50 e 1000 kg/m<sup>2</sup>s, fluidos R134a, CO<sub>2</sub> e água, aceleração da gravidade de 9,81 m/s<sup>2</sup> e pressões reduzidas na faixa de 0,001 a 0,8.

**Figura 2.7** – Comparação entre os critérios de distinção entre macro e microcanais.



Fonte: Adaptado de Ribatski (2014, p. 47).

## 2.5 Padrões de escoamento em microcanais

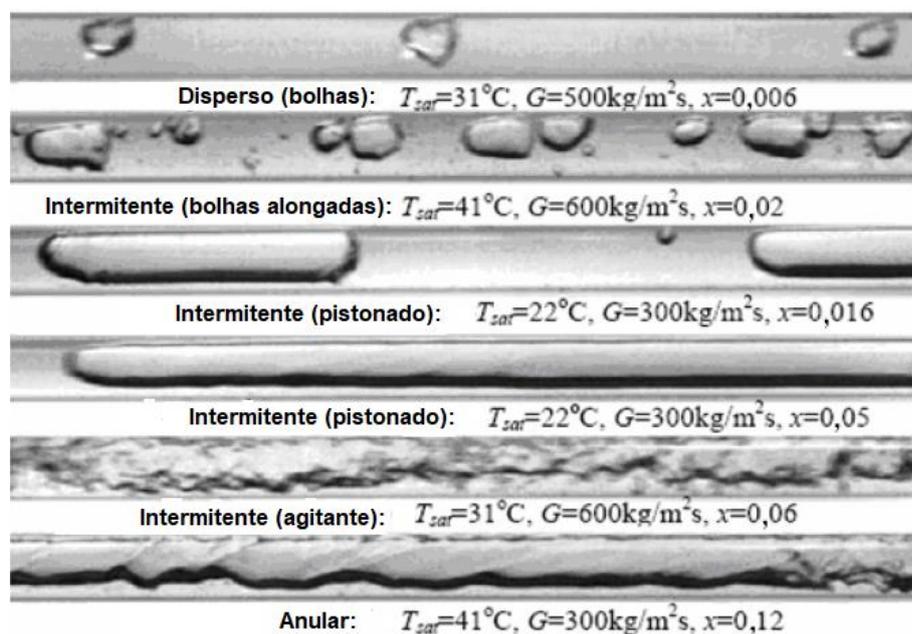
As características do escoamento em canais de reduzido diâmetro durante a ebulição convectiva são assuntos de pesquisa comuns na literatura especializada. De acordo com Ribatski (2014, p. 48), tais fatores “parecem definir o comportamento do coeficiente de transferência de calor”, o que aumenta a especulação sobre a influência dessas características na melhoria da eficiência energética em trocadores de calor que utilizam microcanais.

Os padrões de escoamento em microcanais são particulares, quando comparados aos tubos normais. Isso porque o escoamento estratificado, verificado em macrocanais horizontais, não está presente em canais de pequeno diâmetro. Essa constatação, de acordo com Da Silva (2012), é observada, por exemplo, em trabalhos de Suo e Griffith (1964), Tripplet et al. (1999), Sheng e Palm (2001) e Serizawa, Feng e Kawara (2002).

Os pioneiros a estudar as particularidades do escoamento em microcanais foram Suo e Griffith (1964). Os autores utilizaram tubos com diâmetros entre 0,514 e 0,795 mm, em que se observaram os padrões de bolhas, pistonado e anular. A relevante sugestão que Suo e Griffith (1964) realizaram se referiu aos efeitos de tensão superficial, que predominariam sobre os efeitos gravitacionais.

Em um âmbito geral, os escoamentos em microcanais geralmente verificados são, de forma progressiva: bolhas dispersas, bolhas alongadas, pistonado, agitante e anular. Essa avaliação se referiu aos critérios adotados para definir os padrões de escoamento especificados por Tripplet et al. (1999). Um exemplo da caracterização mencionada está ilustrado na Figura 2.8, em que Arcanjo, Tibiriçá e Ribatski (2010) obtiveram resultados dos padrões de escoamento em condições laboratoriais controladas.

Considerando os métodos pioneiros para previsão do padrão de escoamento, Barnea et al. (1983) obtiveram resultados experimentais para dutos verticais e horizontais, com diâmetros na faixa de 4 e 12 mm. Os autores se basearam no modelo de Taitel e Dukler (1976), os quais definiram critérios para o padrão de escoamento embasados em aspectos fenomenológicos. Taitel e Dukler (1976) assumiram o aparecimento de uma ondulação no filme líquido a partir do padrão estratificado ondulado para anular-intermitente, o que ocasionaria no bloqueio da seção segundo a teoria de instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Já Barnea et al. (1983) consideraram, de forma análoga, os efeitos gravitacionais e de tensão superficial na transição entre o escoamento estratificado e intermitente.

**Figura 2.8** – Padrões de escoamento em canais de reduzido diâmetro, R134a, D = 2,1 mm.

Fonte: Adaptado de Arcanjo, Tibiriçá e Ribatski (2010).

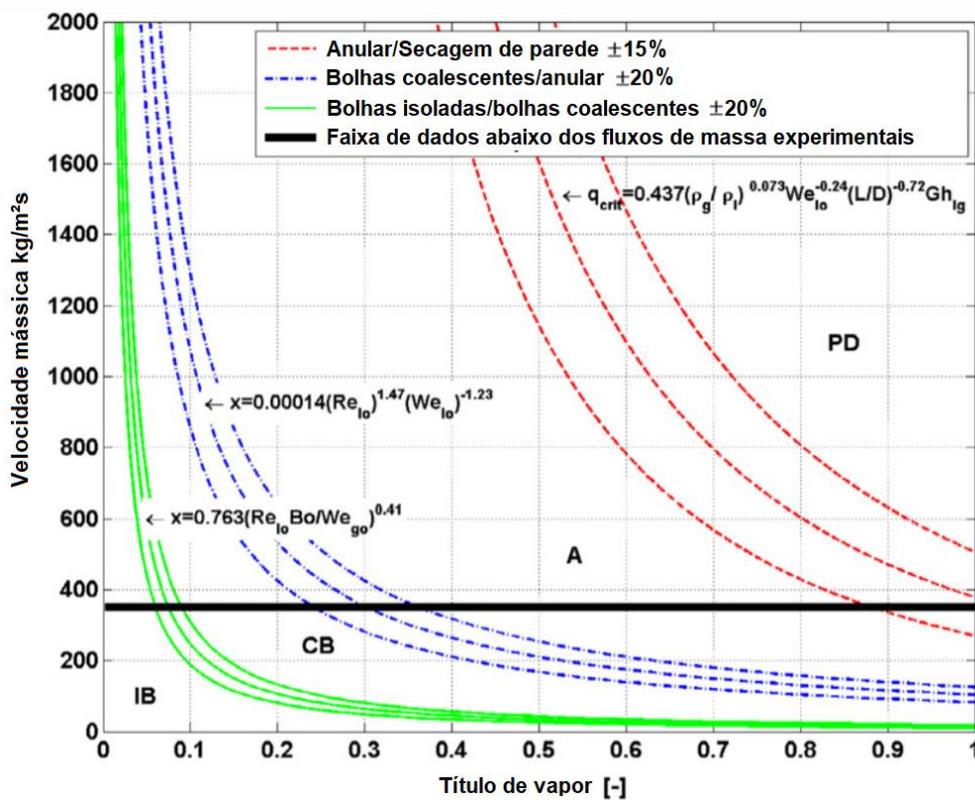
Felcar, Ribatski e Jabardo (2007) também se basearam no método de Taitel e Dukler (1976). Eles tiveram a finalidade em compreender tal método para tubos de reduzido diâmetro. Sendo assim, utilizaram dados experimentais de escoamento ar e água provenientes de dez laboratórios distintos, para o desenvolvimento de um método generalista. Os autores consideraram efeitos de capilaridade e molhabilidade na transição entre os padrões de escoamento em microcanais, aspectos esses não importantes em tubos normais. Felcar, Ribatski e Jabardo (2007) propuseram os seguintes padrões de escoamento: escoamentos dispersos, escoamentos anulares, escoamentos intermitentes, escoamentos estratificados. A transição de escoamentos intermitentes para anulares é apontada com base na fração de vazio superficial, que é dependente dos Números de Weber e Eötvös.

Coleman e Garimella (1999) trataram sobre o efeito de forma bem como do diâmetro do tubo para caracterizar as transições dos padrões de escoamento. Esse trabalho permitiu identificar a influência desses fatores para diâmetros entre 1,3 a 5,5 mm. Além disso, observou-se a minimização drástica dos efeitos de escoamento estratificado à medida que se reduz o diâmetro do duto. Os autores também utilizaram nomenclaturas distintas daquelas empregadas até então para os padrões de escoamento e propuseram novos critérios para a transição dos regimes de escoamento.

Revellin e Thome (2007b) utilizaram os refrigerantes R134a e R245fa, tubos com diâmetros entre 0,509 e 0,790 mm e, assim, encontraram um mapa de escoamento com três

regiões de transição: bolhas isoladas/bolhas coalescentes, bolhas coalescentes/anular e anular/secagem de parede. A transição entre os padrões de bolhas coalescentes/anular foi considerada para uma frequência de bolhas praticamente nula. A Figura 2.9 ilustra os quatro padrões estabelecidos e considerados pelos autores para as condições apresentadas.

**Figura 2.9** – Mapa de escoamento ebulição convectiva em microcanal circular, segundo Revellin e Thome (2007), R134a,  $D_H = 0,5$  mm,  $L = 70$  mm,  $T_{sat} = 30$  °C,  $q'' = 50$  kW/m<sup>2</sup>. IB: regime de bolhas isoladas; CB: regime de bolhas coalescentes e; A: regime anular. PD: regime de secagem de parede.



Fonte: Adaptado de Revellin e Thome (2007b).

Ong e Thome (2009) se basearam nas técnicas desenvolvidas por Revellin e Thome (2007b). Dessa maneira, foram obtidos resultados para três tipos de refrigerantes (R134a, R245fa e R236) para um tubo em formato circular e disposição horizontal, possuindo 1,03 mm de diâmetro. Embasados nesses valores e somado aos efeitos de temperatura de saturação, realizaram-se modificações nos métodos propostos por Revellin e Thome (2007a).

Logo após, os mesmos autores avaliaram a transição de padrões de escoamento a partir de resultados experimentais verificados para microcanais horizontais com três diâmetros distintos (1,03; 2,20 e 3,04 mm) e três tipos de refrigerantes (R134a, R136 e R245fa). Ong e

Thome (2011) encontraram três padrões específicos de escoamento: bolhas isoladas, bolhas coalescentes e anular. O método se caracterizou pelo número de confinamento e pelo número de Froude. De acordo com Ribatski (2014, p. 52), “a viscosidade do líquido e do vapor, a razão de densidades, e os números de Reynolds e Weber foram considerados com o intuito de capturar efeitos viscosos, de tensão superficial e atrito”. Além disso, observou-se que esse método não consegue distinguir o escoamento estratificado para intermitente-anular.

Em um contexto mais atual, Sempértegui-Tapia (2011) utilizou a mesma bancada empregada no trabalho de Tibiriçá (2011). Em seu trabalho adotou-se uma abordagem objetiva, utilizando-se o algoritmo k-means para investigar escoamentos bifásicos. Esse programa computacional caracterizou os padrões de escoamento por meio de grupos de dados com características médias similares. Os dados foram obtidos de forma simultânea por meio de um sistema de sinais elétricos provenientes de componentes montados junto ao tubo: um microtermopar em contato com o escoamento; um microtransdutor de pressão piezoelétrico (para determinar a variação local de pressão); um conjunto fotosensor emissor-receptor (perpendiculares a seção de visualização). Os agrupamentos realizados pelo algoritmo k-means (método objetivo) foram parecidos com os padrões de escoamentos verificados por visualizações através de uma câmera de alta velocidade (método subjetivo). Esses padrões observados foram categorizados como: bolhas, intermitente (bolhas alongadas e agitante) e anular.

## 2.6 Coeficiente de transferência de calor

O coeficiente de transferência de calor é definido de acordo com lei de resfriamento de Newton, como está caracterizado pela equação (2.20):

$$h = \frac{q''}{T_{pi} - T_f} \quad (2.20)$$

Observa-se que, quanto menor o valor desse parâmetro, maior é a resistência térmica de transferência de calor entre um fluido e uma determinada superfície, definida pela equação (2.21).

$$Rt = \frac{1}{h \cdot A} \quad (2.21)$$

O desenvolvimento de métodos que permitam a diminuição do valor de resistência térmica tem sido um problema de pesquisa desafiador para engenheiros e pesquisadores envolvidos com projetos de trocadores de calor. O decréscimo da resistência térmica por meio do aumento do valor do coeficiente de transferência de calor permite o incremento da eficiência de resfriamento, o que minimiza a área de troca de calor e leva à possibilidade de elevar o grau de compacidade do trocador (TIBIRIÇÁ, 2011, p. 19).

A previsão teórica para valores do CTC na ebulição convectiva em canais de dimensão reduzida consiste em um grande desafio, de acordo com Tibiriçá (2011, p. 20). Um dos diversos motivos que explicam essa problematização refere-se aos muitos parâmetros que influenciam o CTC. Segundo o autor, entre os fatores que afetam o CTC estão: fluxo de calor, velocidade mássica, título de vapor, temperatura de saturação, tipo de fluido, direção do escoamento (se horizontal, vertical ou inclinado), diâmetro hidráulico e formato do tubo (circular, quadrado), aceleração da gravidade, instabilidades do escoamento, material e rugosidade interna do canal, características da microestrutura superficial do canal, vibrações na tubulação, presença de impurezas, etc.

### ***2.6.1 Modos de transferência de calor na ebulição convectiva em microcanais***

Os mecanismos de transferência de calor em microcanais estão diretamente relacionados aos padrões de escoamento (RIBATSKI, WOJTAN; THOME, 2006).

No escoamento em bolhas, para as condições sub-resfriadas e saturadas, os mecanismos de nucleação de bolhas predominam, bem como a transferência de calor por convecção forçada.

Para o escoamento pistonado, de acordo com Thome, Dupont e Jacobi (2004), os mecanismos preponderantes são a condução (através do filme líquido que se encontra entre a parede e o pistão de vapor) e a convecção forçada (durante a passagem de um pistão de líquido). Segundo Kandlikar (2010), a condução através do filme líquido representa 20% da transferência de calor total, sendo a parcela restante baseada em efeitos de condução transiente no líquido superaquecido que se localiza na parte frontal ao pistão de vapor.

Tratando-se do escoamento anular, de acordo com Qu e Mudawar (2003), o mecanismo responsável pela maior parte da transferência de calor corresponderia à condução por meio do filme líquido com evaporação na interface. Kandlikar et al. (2005) estudou os efeitos de nucleação de microbolhas na região do filme líquido e, assim, alegaram um efeito conjugado de condução e nucleação de bolhas como os fatores predominantes pela transferência de calor acentuada em canais de reduzido diâmetro.

No regime de escoamento em névoa, existe uma intensificação da transferência de calor monofásica devido à deposição e consequente evaporação de gotículas de líquido que se localizam na superfície do tubo.

## 2.7 Métodos para obtenção de superfícies micro/nanoestruturadas em microcanais

Nas últimas décadas, o rápido crescimento de tecnologias associadas a modificações de superfícies, bem como o aprimoramento de métodos de fabricação na área microfluídica, tem gerado uma melhoria na transferência de calor durante a ebulição em superfícies micro/nanoestruturadas (KIM et al., 2015).

Os sistemas micro/nanofluídicos podem ser definidos, segundo Prakash e Yeom (2014, p. 1), como aqueles dispositivos com componentes funcionais numa faixa dimensional entre 1 e 100  $\mu\text{m}$  para microfluídica, enquanto a nanofluídica insere-se no intervalo dimensional entre 1 e 100 nm. Já para Song, Cheng e Zhao (2018, p. 1), o conceito de microfluídica consiste nos sistemas que comumente manipulam uma pequena quantidade (micro- ou nanolitro) de algum tipo de fluido (seja líquido ou vapor).

De acordo com Kim et al. (2015), os métodos de fabricação para obtenção de superfícies micro/nanoestruturadas podem ser classificados em quatro categorias:

- Microusinagem (MU);
- Revestimento de superfície com materiais especiais (RSME);
- Processos químicos (PQ); e
- Sistemas Micro/nanoeletromecânicos (SMEM/SNEM).

Tratando-se dessa classificação, os métodos de microusinagem se referem àqueles que retiram mecanicamente e de forma organizada e especificada quantidade pequena de material para obtenção de uma nova estrutura em escala micro/nanométrica. Essa técnica, de acordo com Kim et al. (2015), expandiu-se a partir da metade do século passado, com o advento de tecnologias computacionais analógicas e digitais. Isso possibilitou a utilização de máquinas com comando numérico computadorizado (CNC) associadas aos avanços em CAD/CAM (desenhos assistidos por computador/manufaturas assistidas por computador), o que resultou em equipamentos automáticos para trabalhar com geometrias cada vez mais complexas.

Atualmente, os dispositivos tecnológicos mais comuns para a manufatura em microusinagem consistem em usinagem a laser, impressoras 3D (três dimensões), polimentos e sistemas de jateamento para controle confiável da rugosidade.

Já as técnicas relacionadas aos revestimentos de superfícies com materiais especiais foram aprimoradas nas últimas décadas e os pesquisadores tem conseguido alcançar melhorias na transferência de calor durante a ebulição. Diversos processos utilizando materiais, tais como óxidos metálicos, nanopartículas, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, nanotubos de carbono (CNT), óxidos de grafeno, entre outros, são aplicados aos equipamentos microfluídicos (KIM et al., 2015).

Com relação aos processos químicos, de acordo com Kim et al. (2015), a oxidação de metais, silício, polímeros, entre outros materiais, geram melhorias na molhabilidade líquida (*liquid wettability*) das superfícies. Sendo assim, com os avanços das tecnologias em gravação química (*chemical etching*), a gravação fotoquímica tem assumido papel importante em aplicações de transferência de calor, como por exemplo na impressão de trocadores de calor em placas de circuitos elétricos.

Outro método empregado em um contexto mais recente se trata da utilização de sistemas micro/nanoeletromecânicos para modificação de superfícies. Essa técnica, segundo Kim et al. (2015), tem facilitado o desenvolvimento de pequenas estruturas da ordem de 10 nm a 100 µm, em aplicações com materiais como silício, polímeros, metais e cerâmicas. Basicamente, as técnicas SMEM/SNEM compreendem-se pela deposição e padronização de materiais utilizando os processos de fotolitografia e gravação (*etching*), o que gera uma fabricação em larga-escala com confiabilidade dimensional.

Como uma forma de sintetizar os estudos realizados por Kim et al. (2015), que trouxeram uma revisão de trabalhos relacionados às categorias supracitadas para modificação de superfícies, elaborou-se a Tabela 2.1, com os tipos de processos empregados para cada uma dessas categorias. Neste presente estudo, para exemplificação, são detalhadas no Apêndice A algumas das técnicas RSME, PQ e SMEM/SNEM, que se encontram dispostas na Tabela 2.1, com texto sublinhado e em negrito.

**Tabela 2.1** - Tipos de processos empregados para obtenção de superfícies micro/nanoestruturadas.

MICROUSINAGEM	REVESTIMENTOS DE SUPERFÍCIE COM MATERIAIS ESPECIAIS	PROCESSOS QUÍMICOS	SMEM/SNEM
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polimento</li> <li>• Jateamento</li> <li>• Corte vertical</li> <li>• Laminação</li> <li>• Fresagem de precisão CNC</li> <li>• Usinagem a laser</li> <li>• Eletroerosão</li> <li>• Nanoimpressão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deposição a vapor</li> <li>• <u>Pulverização catódica</u></li> <li>• <u>Ebulição de nanofluido (com nanopartículas)</u></li> <li>• <u>Revestimento por rotação</u></li> <li>• <u>Revestimento por imersão</u></li> <li>• Calcinação</li> <li>• Evaporador de feixe de elétrons</li> <li>• Sinterização por difusão a seco</li> <li>• Revestimento por ultrassom</li> <li>• <u>Tratamento a plasma</u></li> <li>• Deposição eletrolítica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gravação química</li> <li>• Gravação eletrolítica</li> <li>• Anodização</li> <li>• <u>Deposição eletroquímica</u></li> <li>• Eletrólise assistida por partículas metálicas</li> <li>• <u>Fotolitografia</u></li> <li>• <u>Oxidação</u></li> <li>• Deposição química de vapor</li> <li>• <u>Deposição em camadas atômicas</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Gravação a seco</u></li> <li>• <u>Gravação molhada</u></li> <li>• <u>Gravação por íons reativos</u></li> <li>• <u>Gravação profunda por íons reativos</u></li> <li>• Fotolitografia ultravioleta profunda</li> </ul>

Fonte: Kim et al. (2015).

## 2.8 Estudos sobre ebulição convectiva em microcanais micro/nanoestruturados

Nesta sessão são descritos 22 trabalhos publicados nas duas últimas décadas sobre a ebulição convectiva em microcanais micro/nanoestruturados. Esses estudos foram provenientes de pesquisas realizadas na base de dados SCOPUS (Elsevier), bem como em citações efetuadas em artigos de revisão, tais como em Shojaeian e Koşar (2015), Kandlikar (2016) e Karayiannis e Mahmoud (2017). Enfatizam-se as três categorias de métodos de fabricação destacados na seção 2.7, as quais consistem em RSME, PQ e SMEM/SNEM.

### 2.8.1 Trabalhos RSME

Inicialmente são tratados os estudos realizados por Ammerman e You (2001). Nesse caso, investigaram-se as melhorias de desempenho durante a ebulição convectiva em microcanais com revestimentos de superfície microporosos. O fluido empregado no escoamento consistiu no refrigerante FC-87, aplicado a um tubo horizontal de perfil quadrado, com área de seção transversal de  $2 \times 2$  mm e 80 mm de comprimento aquecido. O aquecimento

se deu por meio de um aquecedor elétrico (filme fino resistivo), disposto ao longo do lado inferior do canal. A superfície do canal foi testada com e sem a presença de revestimentos microporosos. Na situação de porosidade, a alteração superficial foi realizada por meio da técnica de revestimento de superfície comumente denominada por DOA (*Diamond particles, Omegabond epoxy, Alcohol*), a qual utiliza um material constituído por partículas de diamante, epóxi e álcool. Curvas sobre a ebulição convectiva foram geradas para velocidades mássicas de 500 a 5.000 kg/m<sup>2</sup>s, em níveis de temperatura na entrada da seção de testes numa faixa de 2 a 31°C. As comparações realizadas com e sem a adição de microporosidades à superfície levaram a constatação de um aumento no fluxo crítico de calor de 36% para o caso de revestimento. Além disso, o coeficiente de transferência de calor melhorou significativamente, para o caso de revestimento microporoso, com o início da ebulição para baixos valores da diferença entre a temperatura da parede e a temperatura de saturação do fluido.

Choi et al. (2011) investigaram os efeitos do ângulo de contato (*wettability*) em ebulição convectiva de água em um único canal retangular com diâmetro hidráulico de 500 µm. As dimensões estruturais do canal consistiram em 503 µm × 507 µm × 50 mm. O microtubo foi construído com vidro fotossensível, o qual consiste em um material hidrofílico, além de apresentar ângulo de contato de 25°. Para tornar a superfície hidrofóbica, empregou-se um revestimento superficial por *octadecyltrichlorosilane*, apresentando um ângulo de contato de 105°. As condições para o experimento consistiram em duas velocidades mássicas de 25 kg/m<sup>2</sup>s e 75 kg/m<sup>2</sup>s, uma faixa de título de vapor entre 0 e 0,3, e um intervalo de fluxo de calor de 10 a 430 kW/m<sup>2</sup>. O CTC para o microcanal com superfície hidrofóbica apresentou valores menores para faixas iniciais do título de vapor (entre 0 e 0,2) comparados à situação de superfície hidrofílica, na velocidade mássica de 25 kg/m<sup>2</sup>s. O oposto ocorreu para a situação de título de vapor superior a 0,2. Tratando-se dos experimentos para a velocidade mássica de 75 kg/m<sup>2</sup>s, os valores de CTC no microtubo com superfície revestida hidrofóbica foram superiores ao caso superficial hidrofílico, para qualquer faixa de título de vapor.

Liu et al. (2011) estudaram os efeitos da molhabilidade em ebulição convectiva de água em um único microcanal de silício. A modificação de superfície do microtubo ocorreu de forma a utilizar três processos: (i) manufatura do canal por meio de gravação por plasma a seco, resultando em uma superfície hidrofílica com ângulo de contato de 36°; (ii) revestimento da superfície inferior do canal com um material de baixa energia (*perfluoro decyltrichlorosilane*), o que levou a uma característica hidrofóbica, com ângulo de contato de 103°; (iii) revestimento da superfície com uma matriz de nanofios de silício, o que gerou uma camada hidrofílica com ângulo de contato 0°. As características estruturais que compunham o canal foram 105 µm ×

1000  $\mu\text{m} \times 30 \text{ mm}$ . As velocidades mássicas do escoamento estiveram na faixa de 50 a 583  $\text{kg/m}^2\text{s}$ . Distintos padrões de escoamentos bifásicos foram observados. Para o microcanal (iii), verificaram-se inúmeras bolhas pequenas na fase de iniciação da ebulição, sem coalescência.

No caso (i), a formação de bolhas ocorreu de forma a nuclear, crescer e coalescer, estabelecendo-se bolhas alongadas. Para o microtubo (ii), bolhas de pequeno formato não foram observadas frequentemente, como verificado pela situação (i). Pelo contrário, observaram-se bolhas alongadas que se formavam na fase de iniciação da ebulição. Para esse caso, o fluxo de calor utilizado para iniciação da ebulição (301  $\text{kW/m}^2$ ) consistiu em um valor maior comparado à situação de superfície hidrofílica (280  $\text{kW/m}^2$ ). Isso sugere o fato da formação de bolhas alongadas na fase inicial da ebulição para o caso (i), ao passo que a fase líquida na transição para o estado de ebulição apresentava alta energia. Sendo assim, concluiu-se que os diâmetros de desprendimento de bolhas para superfícies hidrofóbicas parecem ser maiores que aqueles observados em superfícies hidrofílicas.

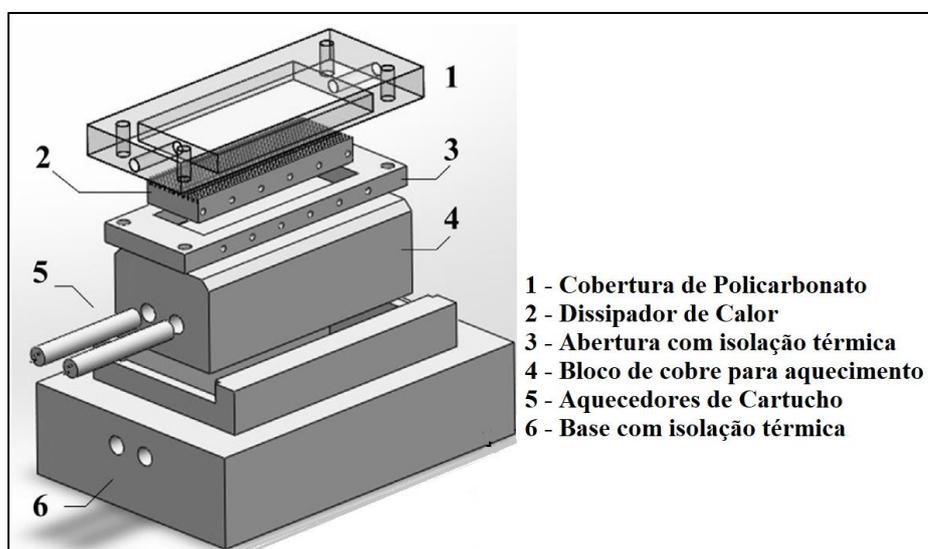
Phan et al. (2012) investigaram os efeitos da molhabilidade durante a transferência de calor por ebulição convectiva de água em um canal retangular com diâmetro hidráulico de 0,96 mm, sendo seu aspecto dimensional 5 mm x 500  $\mu\text{m}$  x 180 mm. O microtubo foi construído a partir de um bloco de vidro, com sua base consistindo de um pírex, sendo a superfície interna modificada por meio de deposição de nanopartículas. Cada tipo de nanopartícula ocasionou um ângulo de contato distinto. Para as nanopartículas de óxido de silício, o valor do ângulo de contato consistiu em 26°, enquanto que para os casos de nanopartículas de titânio, 49°, nanopartículas de DLC (*dimond-like carbon*), 63°, e nanopartículas de óxido de silício dopado com carbono, 104°. As características operacionais se referiram a uma velocidade mássica de 100  $\text{kg/m}^2\text{s}$ , uma faixa de fluxo de calor de 30 a 80  $\text{kW/m}^2$  e valores para o título de vapor de até 0,2.

Os resultados obtidos para a transferência de calor levaram à constatação de que, para todos os tipos de superfícies alteradas, o coeficiente de transferência de calor incrementou-se até um valor máximo em situações de título de vapor próximas ao valor de 0,015. Após esse número, o coeficiente de transferência de calor decrescia com o aumento do título. Ressalta-se que, o maior valor de aquisição para o título de vapor consistiu em um resultado inferior a 0,06. A superfície mais hidrofílica (revestida por óxido de silício) apresentou o menor CTC, sendo pouco determinante para o título de vapor e fluxo de calor. Por outro lado, linhas separadas indicando um nítido fluxo de calor foram verificadas para as outras superfícies modificadas. Para a superfície hidrofóbica (revestida por óxido de silício dopado com carbono), bolhas foram visualizadas, mesmo para a situação de título de vapor negativo. Os autores atribuíram esse

fenômeno à grande quantidade de vapor confinada dentro das cavidades (para superfícies com ângulo de contato de  $0^\circ$ ). Assim, uma rápida coalescência ocorreu e resultou em uma formação de bolhas alongadas, com partes de secagem localizadas, que geraram uma deterioração na taxa de transferência de calor (após o valor de pico) no microcanal hidrofóbico. Em contrapartida, a diminuição da taxa de transferência de calor nos canais hidrofílicos revestidos por nanopartículas de titânio e DLC (decréscimo no CTC após o valor de pico) foi atribuída, segundo Phan et al. (2012), aos efeitos de capilaridade. Esses efeitos mantiveram a espessura do filme líquido parcialmente imutável enquanto o título de vapor e o fluxo de calor aumentavam.

Bai, Tang e Tang (2013) construíram microcanais dispostos paralelamente, com superfície revestida por meio de sinterização por pó de cobre. As dimensões estruturais desses microtubos consistiram em  $400 \mu\text{m} \times 900 \mu\text{m} \times 32 \text{mm}$ , para a quantidade de 15 microcanais por amostra, sendo preparadas quatro amostras. Três delas (#1, #2 e #3) foram fabricadas com revestimento superficial metálico poroso composto de dendritos de pó de cobre, com diâmetros de 30, 55 e 90  $\mu\text{m}$ , respectivamente, sendo a última amostra (#0) constituída pela superfície sem revestimento. O processo de sinterização para obtenção de revestimento de superfície conduziu-se à  $900^\circ\text{C}$  durante 30 minutos. Esses microcanais foram utilizados em um dissipador térmico composto por cobertura de policarbonato, bloco de cobre para aquecimento e dois aquecedores de cartucho, como ilustrado na Figura 2.10. A medição de temperatura ao longo da direção axial foi possível por meio de seis termopares do tipo K. O fluido de trabalho para o escoamento referiu-se ao etanol anidro, com pureza de 99,8%.

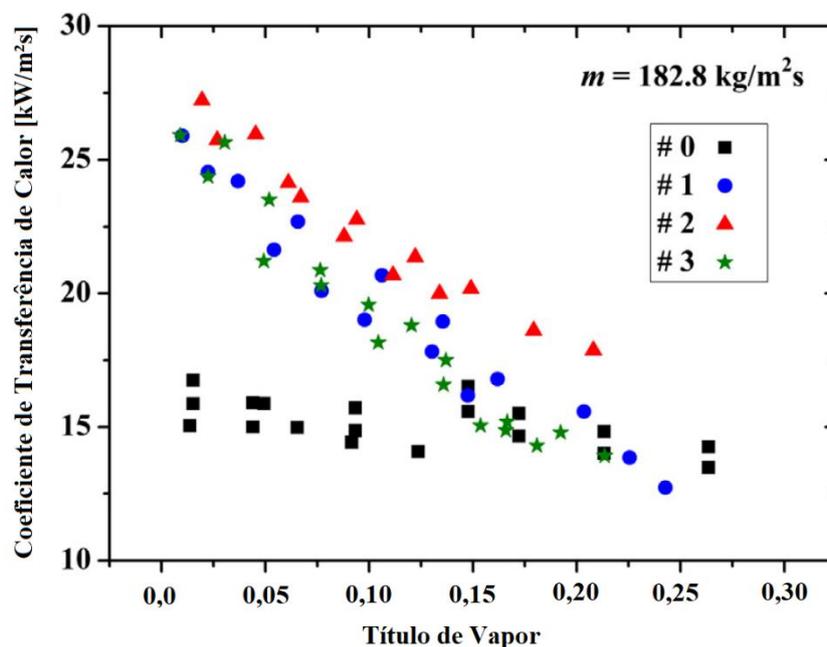
**Figura 2.10** - Esquemático do módulo de testes e do dissipador de calor.



Fonte: Adaptado de Bai, Tang e Tang (2013).

Para a velocidade mássica de  $182 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , obtiveram-se curvas associadas ao fluxo de calor, perdas de pressão e também ao coeficiente de transferência de calor. Na Figura 2.11 verifica-se a curva do CTC em função do título de vapor. Observa-se a partir dessa ilustração que, para os experimentos que utilizam microtubos com revestimentos superficiais (#1, #2 e #3) ocorreram melhores eficiências na troca de calor quando comparados ao experimento com microcanais sem revestimentos (#0), para um valor de título de vapor inferior a 0,15.

**Figura 2.11** - Efeitos do título de vapor no coeficiente de transferência de calor para superfícies revestidas e sem revestimento.



Fonte: Adaptado de Bai, Tang e Tang (2013).

Morshed, Paul e Khan (2013) investigaram as características da transferência de calor em escoamentos monofásicos e bifásicos de água no interior de um microcanal retangular com dimensões geométricas de  $360 \mu\text{m} \times 5 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$ . Esse microtubo compõe um módulo de testes constituído por uma placa de cobertura superior (plástico policarbonato), um bloco de alojamento do dissipador (plástico policarbonato), dissipador de calor de cobre (C10100), aquecedor de cartucho (potência de 100 W), cobertura de isolamento térmica (cerâmica) e uma placa de cobertura inferior (plástico policarbonato). Seis termopares do tipo K foram dispostos em orifícios localizados no bloco de cobre, em que se determinou a temperatura superficial através da leitura desses dispositivos. Um revestimento nanocomposto de  $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$  foi desenvolvido na superfície superior do bloco de cobre, ou seja, na parte inferior do microcanal,

em que ocorreu o aquecimento através do aquecedor de cartucho. As velocidades mássicas empregadas nos experimentos consistiram em três patamares: 33, 70 e 142 kg/m<sup>2</sup>s. Elas foram utilizadas para a situação de revestimento superficial e também quando não existiu revestimento na superfície superior do bloco de cobre. De acordo com os testes executados, verificaram-se que, para os casos de revestimentos superficiais, o aumento no CTC na ebulição convectiva chegou a valores próximos de 100% quando comparados à situação sem revestimento de superfície. Atribuiu-se essa melhoria, de acordo com os autores, ao fato das modificações morfológicas de superfície.

Edel e Mukherjee (2015) estudaram a dinâmica da ebulição convectiva em um microcanal para diferentes fluxos de calor. O fluido utilizado referiu-se à água, com 0,001% de volume correspondente a nanopartículas de alumina. A seção de testes apresentou um perfil transversal com uma geometria ligeiramente trapezoidal, com a parte inferior 40 μm menor que a parte superior do duto. As dimensões nominais da sessão transversal consistiram em 266 μm × 201 μm, para um diâmetro hidráulico de 229 μm, com 25,4 mm de comprimento. Utilizou-se uma vazão mássica de operação constante no valor de 0,41 ml/min. A deposição de nanopartículas ocorreu durante 160 min, para cada teste realizado. As potências dos microaquecedores localizados junto ao canal foram ajustadas para dois fluxos de calor: 130 kW/m<sup>2</sup> e 300 kW/m<sup>2</sup>.

Os resultados encontrados pelos pesquisadores apontaram um aumento na densidade de nucleação de bolhas com a deposição de nanopartículas na superfície interna do microcanal, sendo que a máxima nucleação de bolhas ocorreu para a situação de baixo fluxo de calor. Além disso, os dados levantados pelos autores confirmaram a estabilização do escoamento devido esse aumento da densidade de nucleação de bolhas. Além do mais, a característica de absorção gerada pelas porosidades do revestimento por nanopartículas reduziu a secagem de parede e melhorou a transferência de calor (consequentemente, o CTC) durante o padrão de bolhas alongadas.

Karimzadehkhoei et al. (2017) investigaram as características da ebulição convectiva sub-resfriada de nanofluidos em microescala. Para isso, utilizou-se uma seção de testes composta por um microtubo circular de aço inoxidável, com diâmetro de entrada de 502 μm e diâmetro de saída de 717 μm. Além disso, empregou-se um sistema CC de aquecimento (Xantrex Techlonolgy Inc., USA) para prover o fluxo de calor ao canal de dimensão reduzida, por meio de efeito Joule. Quatro termopares do tipo K também foram usados no experimento, ao longo da seção de testes. Um nanofluido à base de água com nanopartículas esféricas de γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (gama-alumina), fabricadas pela Ionic Liquids Technologies (empresa localizada na

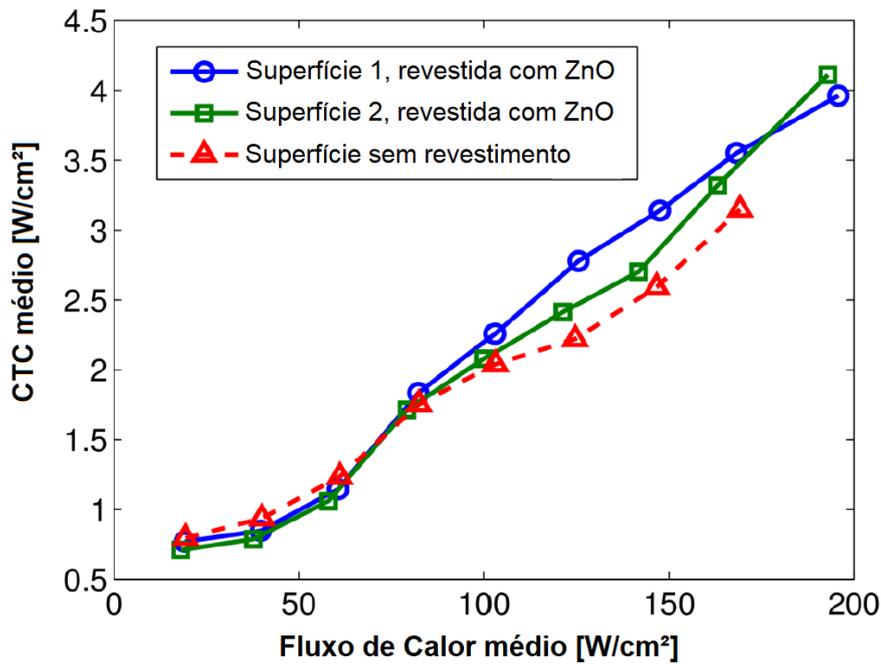
Alemanha), bem como constituído pelo surfactante dodecil sulfato de sódio, mais conhecido como SDS (*sodium dodecyl sulfate*), foi utilizado como fluido operacional. Isso gerou uma deposição de nanopartículas, que aumentou a transferência de calor ao longo do microcanal em aproximadamente 7% para baixos valores (0,05 % e 0,2%) de fração mássica de nanopartículas em água, quando utilizados fluxos de calor baixo e alto, respectivamente. Já para nanofluidos com um valor de fração mássica superior a 0,5%, aconteceu uma deterioração na transferência de calor próxima de 12%.

Ruiz et al. (2017) apresentaram um estudo experimental da transferência de calor durante a ebulição convectiva de água destilada em um microcanal espiral empregado como dissipador térmico. Efeitos de molhabilidade, sub-resfriamento e vazões mássicas foram considerados nesse trabalho. As dimensões geométricas do dispositivo de microescala consistiram em 300  $\mu\text{m}$  de altura e raio da espiral de 10 mm.

Dois diferentes tipos de superfícies foram utilizados para o estudo, sendo a primeira delas composta por cobre sem revestimento, enquanto que a segunda superfície se constituiu por nanoestruturas de óxido de zinco. A técnica empregada no revestimento superficial para a segunda situação referiu-se a síntese hidrotérmica, que envolve a deposição de nanopartículas por meio de imersão em solução especificada sobre uma superfície polida de cobre. O processo de imersão aconteceu durante 10 horas. O revestimento gerado apresentou característica altamente hidrofílica, com um ângulo de contato de aproximadamente 10 graus. As velocidades mássicas empregadas nos testes variaram na faixa de 184 a 716  $\text{kg/m}^2\text{s}$ , com fluxos de calor entre 150 e 301  $\text{W/cm}^2$ .

O maior valor para o CTC ocorreu em uma ebulição com escoamento forçado completamente saturada, com pequenas características de sub-resfriamento, sendo a transferência de calor influenciada pela ebulição nucleada. A comparação entre o microcanal de cobre sem revestimento, com outros dois microcanais com revestimento de ZnO, apontaram melhorias significativas para a situação de deposição superficial de óxido de zinco. Um exemplo disso consistiu em um caso de velocidade mássica igual a 184  $\text{kg/m}^2\text{s}$ , em que ocorreu aumento de aproximadamente 25% no CTC para a situação de revestimento de superfície, para fluxo de calor em cerca de 105  $\text{W/cm}^2$ , como pode ser observado na Figura 2.12. Além disso, o fluxo de calor mais elevado foi alcançado durante a ebulição convectiva parcialmente sub-resfriada, de 301  $\text{W/cm}^2$ , com uma temperatura média da superfície em torno de 134  $^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 2.12** - Comparação do coeficiente de transferência de calor entre os tipos de superfícies para velocidade mássica de 184 kg/m<sup>2</sup>s.



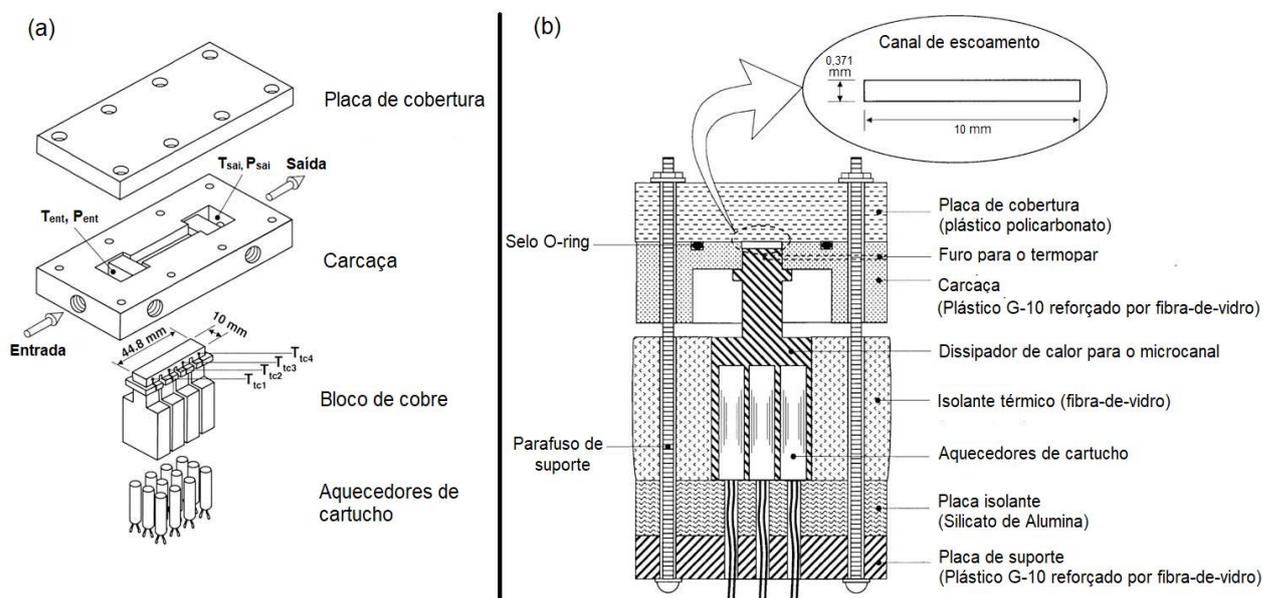
Fonte: Adaptado de Ruiz et al. (2017).

### 2.8.2 Trabalhos de Processos Químicos

Experimentos realizados por Khanikar, Mudawar e Fisher (2009) avaliaram as melhorias na transferência de calor com a inclusão de revestimento por nanotubos de carbono (CNT – *carbon nanotubes*) na face inferior de um canal de dimensão reduzida retangular. Para isso, utilizaram água como fluido operacional, aplicada a uma superfície sem revestimento e também em três superfícies revestidas separadamente, porém com a mesma cobertura superficial por CNT.

O microtubo apresenta diâmetro hidráulico de aproximadamente 0,715 mm, em uma configuração estrutural de 0,371 mm × 10 mm × 44 mm. Esse microcanal esteve disposto juntamente de um módulo de testes composto por um bloco de cobre isento de oxigênio, uma carcaça de isolamento térmica plástica com reforço de fibra-de-vidro G-7, uma placa de cobertura termoplástica de *polyetherimide* (GE Ultem 1000), além de doze aquecedores de cartucho. A Figura 2.13a ilustra os componentes principais do módulo de testes mencionado. Já a Figura 2.13b evidencia uma vista em corte da montagem completa do módulo de testes. Observa-se, pela Figura 2.13b, as dimensões da seção transversal do microcanal, bem como a isolamento térmica efetuada da montagem.

**Figura 2.13** - (a) Componentes principais e (b) visão em corte da montagem do módulo de teste.



Fonte: Adaptado de Khanikar, Mudawar e Fisher (2009).

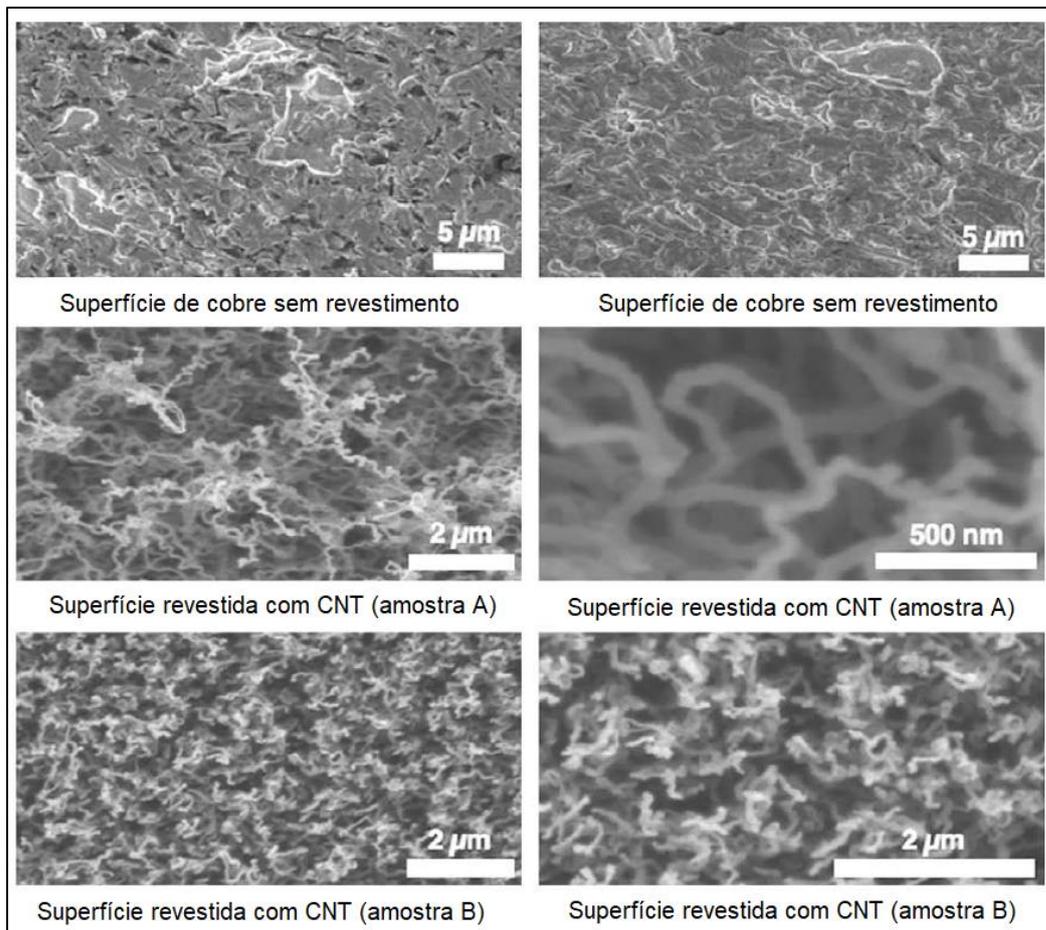
As condições operacionais para esse estudo consistiram em duas situações. Na primeira, a temperatura de entrada da água deionizada se referiu a 30 °C, a para velocidades mássicas de 86, 227 e 368 kg/m<sup>2</sup>s, número de Reynolds entre 76 e 327 e pressão de saída de 1,13 bar. Já para a segunda condição de operação a temperatura na entrada consistiu em 60 °C, as velocidades mássicas foram de 86, 228 e 368 kg/m<sup>2</sup>s, números de Reynolds na faixa de 131 a 562 e a pressão de saída de 1,13 bar. O revestimento superficial por nanotubos de carbono se deu por meio de algumas etapas.

Inicialmente foi realizada a preparação da superfície com três camadas metálicas catalisadoras, constituídas por 60 nm de titânio, seguida de 10 nm de alumínio e, por último, 3 nm de ferro. Após isso, utilizou-se um reator SEKI AX5200S para aplicação de micro-ondas para deposição química de vapor por plasma. Nesse processo utilizou-se um protocolo para o crescimento dos CNT: recozimento, ignição do plasma de hidrogênio e a introdução de carbono contendo alguns tipos de gases. Depois de aplicado o critério, obtiveram-se os nanotubos de carbono na superfície do bloco de cobre, com diâmetros de aproximadamente 60 nm. A Figura 2.14 ilustra diversas imagens com a aplicação de um microscópio eletrônico de varredura das superfícies tratadas nesse estudo.

Os resultados experimentais foram obtidos por meio de um sistema de vídeo de alta velocidade, para capturar o padrão de escoamento bifásico, bem como os fenômenos de

interface nas paredes do microcanal. Observou-se a iniciação da ebulição na região inferior do microtubo. Além disso, existiram diferenças consideráveis de influência quando comparadas altas e baixas velocidades mássicas durante a ebulição. Outro fator verificado se referiu às mudanças da morfologia do revestimento superficial à medida que ocorreriam os testes para ocasiões de velocidades mássicas altas, como o valor de  $368 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Isso alterou o comportamento da transferência de calor, sendo que, primeiramente ocorria melhorias na transferência de calor (devido ao aumento de área, ocasionado pela disposição nanoestruturas em formato de “escamas de peixe”). Após a execução de diversos testes, essa elevação na transferência de calor começou a decrescer.

**Figura 2.14** - Fotografia da superfície superior do bloco de cobre (inferior do microcanal), com e sem a inclusão de revestimentos de nanotubos de carbono.



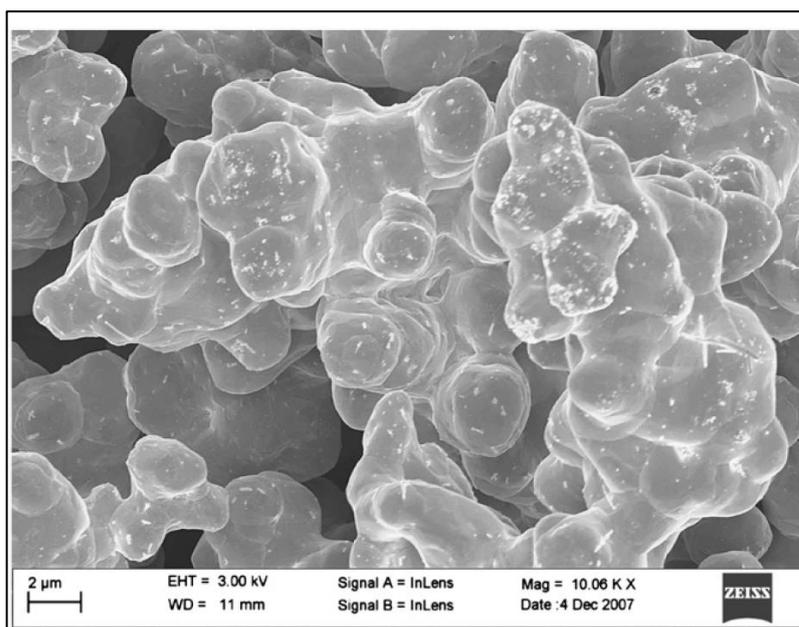
Fonte: Adaptado de Khanikar, Mudawar e Fisher (2009).

Khodabandeh e Furberg (2010) estudaram a transferência de calor em um evaporador do tipo termossifão com a adesão superficial de estruturas micro e nanoporosas. O aspecto geométrico desse dispositivo consistiu em dois tipos, com duas variantes de evaporadores

aplicados a mesma planta de testes. O primeiro microcanal, com dimensões  $5,1 \times 1,7 \times 30$  mm (diâmetro hidráulico de 2,5 mm), apresentou revestimentos de superfície, ao passo que o segundo microtubo, com geometria  $5,1 \times 1,6 \times 30$  mm (diâmetro hidráulico de 2,4 mm), constituiu-se apenas pela estrutura de cobre, sem revestimento. Para o fornecimento de energia ao sistema, usou-se uma fonte de alimentação elétrica (TTi, EX752 Multi-Mode PSU), enquanto que, para a aferição de temperatura, acoplaram-se ao decorrer do evaporador, três termopares do tipo T. O fluido de trabalho foi o refrigerante R134a, em uma pressão reduzida de 0,16 (correspondente a 6,5 bar), sendo a temperatura de saturação de aproximadamente  $24,2$  °C. O microcanal que compõe o evaporador foi filmado por uma câmera de alta velocidade (Redlake, MotionXtra, HG-LE), com uma taxa de quadros por segundo entre 1000 e 2000 fps, em um intervalo de tempo de 0,5 a 1 segundo. Tratando-se do revestimento poroso aplicado ao microtubo, a técnica empregada para realizar tal feito consistiu na deposição eletroquímica. Nesse caso, ocorreu crescimento de dendritos de cobre sobre a superfície do canal de pequeno diâmetro hidráulico, como pode ser visualizado pela Figura 2.15, por meio de um microscópio eletrônico de varredura.

Constataram-se, após a realização dos experimentos, melhorias significativas na transferência de calor para o caso de revestimento superficial (CTC com valor de pico em  $4,8$  W/cm<sup>2</sup>K para um fluxo de calor de  $25$  W/cm<sup>2</sup>) comparado à situação sem revestimento (CTC de aproximadamente  $2$  W/cm<sup>2</sup>K).

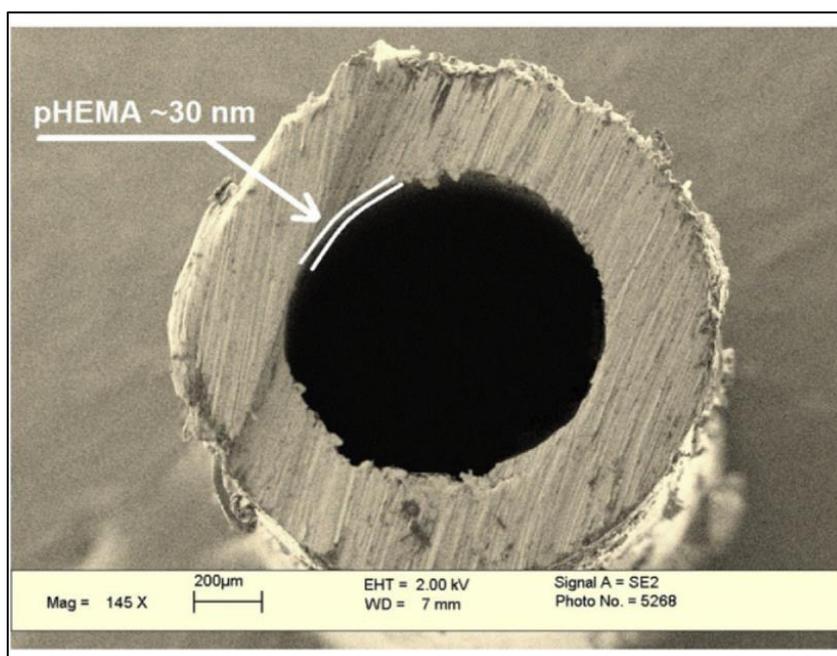
**Figura 2.15** - Imagem de microscópio eletrônico de varredura das nanoestruturas porosas com tamanho estabilizado de aproximadamente  $2$   $\mu$ m.



Fonte: Khodabandeh e Furberg (2010).

Kaya et al. (2013) conduziram um estudo experimental que tratou sobre a ebulição convectiva sub-resfriada em microcanais circulares com revestimento superficial interno de pHEMA (*polyhydroxy-ethylmethacrylate*). Esse tipo de modificação de superfície foi possível através da técnica de deposição química de vapor, sendo que o material aderente se refere a um polímero, cuja espessura resultante caracterizou-se em aproximadamente 30 nm, como está ilustrado na Figura 2.16.

**Figura 2.16** - Imagem da parede interna dos microcanais revestidos por pHEMA (através de microscópio eletrônico de varredura).



Fonte: Kaya et al. (2013).

Os parâmetros dimensionais dos canais consistiram em três valores distintos para os diâmetros hidráulicos 249, 507 e 998  $\mu\text{m}$ , nos quais realizaram-se testes experimentais com e sem a presença do revestimento mencionado. As velocidades mássicas empregadas nos experimentos foram de 10.000 e 13.000  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ , tomando como fluido de trabalho a água deionizada. Dois termopares Omega<sup>TM</sup> foram instalados, respectivamente, na entrada e na saída do canal de reduzido diâmetro. O fornecimento de calor para os microtubos se deu por meio de uma fonte de alimentação de corrente contínua (efeito Joule). Os testes experimentais resultaram em observações, tais como a melhoria da ordem de 109% na transferência de calor para as superfícies revestidas comparadas às superfícies sem revestimento por pHEMA. Isso, segundo os autores, deveu-se ao fato de que os revestimentos de superfície por nanopelículas

de pHEMA reduziram o ângulo de contato da superfície interna dos tubos (superfície hidrofílica), além de aumentar a nucleação de bolhas.

Çikim et al. (2014) utilizaram os mesmos microtubos aplicados no estudo de Kaya et al. (2013) e, assim, investigaram as possíveis melhorias na transferência de calor promovidas pelo revestimento de superfície pHEMA. Isso de forma a variar as espessuras do revestimento interno (50 nm, 100 nm e 150 nm). Água deionizada foi empregada como fluido operacional, além de se estabelecerem duas velocidades mássicas de trabalho (5.000 e 20.000 kg/m<sup>2</sup>s). Os testes experimentais possibilitaram resultados que comparassem as situações sem revestimento e com revestimento por pHEMA. Para o caso de revestimento houve uma elevação de 126,2% na transferência de calor em contrapartida à situação de tubo sem revestimento interno. A explicação para esse fato, segundo os pesquisadores, consistiu no acréscimo da densidade de nucleação de bolhas e na incidência de bolhas que partem da superfície do canal devido à porosidade do revestimento.

Yang et al. (2014) investigaram o fenômeno da ebulição convectiva em microcanais revestidos por nanofios de silício. Para tal, utilizaram água deionizada como fluido de operação, para velocidades mássicas diversas, na faixa de 160 a 404 kg/m<sup>2</sup>s. O dispositivo para teste experimental é composto por um conjunto de cinco microtubos de dimensões 200 µm × 250 µm × 10 mm, fabricados através de processo de nanofabricação no qual uma pastilha de silício é conectada a um conjunto de pirex. Os microcanais foram nanoestruturados superficialmente por meio de deposição eletroquímica aperfeiçoada para que os nanofios de silício crescessem nas paredes verticais e inferior dos tubos. Utilizaram-se nanopartículas de prata como catalisadores no processo eletroquímico.

Os testes experimentais foram executados de maneira a comparar as melhorias no CTC para as situações com e sem revestimento por nanofios de silício, no padrão de escoamento anular. Para a situação com revestimento, ocorreram aumentos de até 326% no CTC, na situação de velocidade mássica de 389 kg/m<sup>2</sup>s. De acordo com os pesquisadores desse estudo, a significativa ebulição nucleada promovida, a renovação do filme líquido na região da interface da parede, a superfície super-hidrofílica, bem como a melhoria na evaporação de filme fino (*thin-film evaporation*), apontaram como as razões fundamentais para o melhoramento da transferência de calor durante a ebulição convectiva.

Nedaei et al. (2017) realizaram experimentos em ebulição convectiva sub-resfriada, para microcanais circulares de aço inoxidável com duas variações de diâmetros internos: 600 e 889 µm. Além disso, os microtubos apresentaram comprimento de 40 mm, com região útil de 20 mm. A deposição química de vapor com iniciação (iCVD) foi utilizada para realizar a adesão

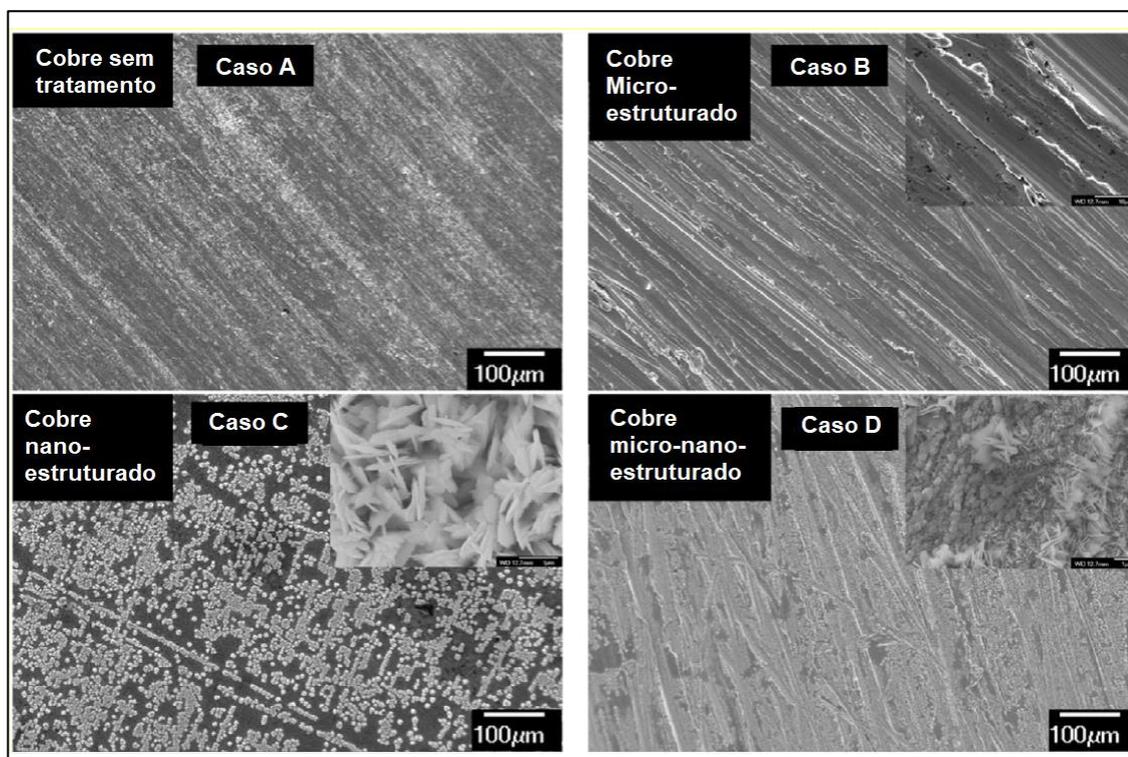
de revestimento à superfície interna dos microtubos mencionados. Nesta técnica, vapores iniciais e monômeros são introduzidos a um sistema a vácuo sem purificação e com ausência de solventes para realizar a polimerização. O tipo de composto gerado sobre a estrutura de aço inoxidável consistiu no pPFDA (*polyperfluorodecylacrylate*), um tipo de polímero, com duas medidas de espessuras de revestimento (50 e 160 nm), para cada variação de diâmetro interno.

Os testes experimentais foram conduzidos para três valores de velocidades mássicas distintos, sendo eles 6.000, 7.000 e 8.000 kg/m<sup>2</sup>s. Sendo assim, realizaram-se comparações dos aparatos com superfícies revestidas e também para as superfícies sem a presença de pPFDA. Com base nos resultados obtidos, as superfícies com adesão de pPFDA apresentaram benefícios consideráveis no desempenho da transferência de calor, sendo a situação que gerou à máxima melhoria no CTC (61%) na vazão mássica de 8.000 kg/m<sup>2</sup>s e diâmetro interno de 889 µm. As razões para um acréscimo do CTC nos casos de revestimento por pPFDA, comparado aos casos sem revestimento, segundo os autores, relacionaram-se com o aumento nos sítios de nucleação de bolhas devido à molhabilidade da superfície e às porosidades no lado interno do microcanal. Além disso, constaram-se que os revestimentos mais espessos (160 nm) tiveram uma contribuição determinante no aumento do CTC (para situações de baixa molhabilidade). Portanto, segundo os pesquisadores, iCVD consiste em um método realizável e confiável para modificações de superfícies de canais em micro e nanoescala.

Sadaghiani et al. (2017) investigaram o desempenho durante a ebulição convectiva em microcanais com superfícies micro e nanoestruturadas com o propósito de avaliar as taxas de remoção de calor em dispositivos eletrônicos. Efeitos das dimensões das estruturas superficiais, tais como as 3 situações empregadas de alteração de superfície nesse estudo (caso B – superfície microestruturada; caso C – superfície nanoestruturada e; caso D – superfície hierarquicamente micro e nanoestruturada), foram analisadas para um microcanal retangular de geometria 14 mm × 15 mm × 0,5 mm (com alta taxa de aspecto). Além disso, para o caso A, usou-se a superfície original do tubo de cobre, sem revestimento.

A Figura 2.17, caracteriza as situações de superfícies mencionadas. Para o caso B, as superfícies foram revestidas através de método de lixamento mecânico, com a formação de sulcos em microescala. Em contrapartida, para o caso C, utilizou-se processo simples de oxidação por imersão em água quente, o que gerou as nanoestruturas (óxidos de cobre de aproximadamente 15nm de espessura). Para o caso D, aconteceu a junção progressiva das técnicas de modificação de superfície mencionadas (casos B e C), respectivamente. Isso concretizou em revestimento superficial, hierarquicamente organizado, micro e nanoestruturado.

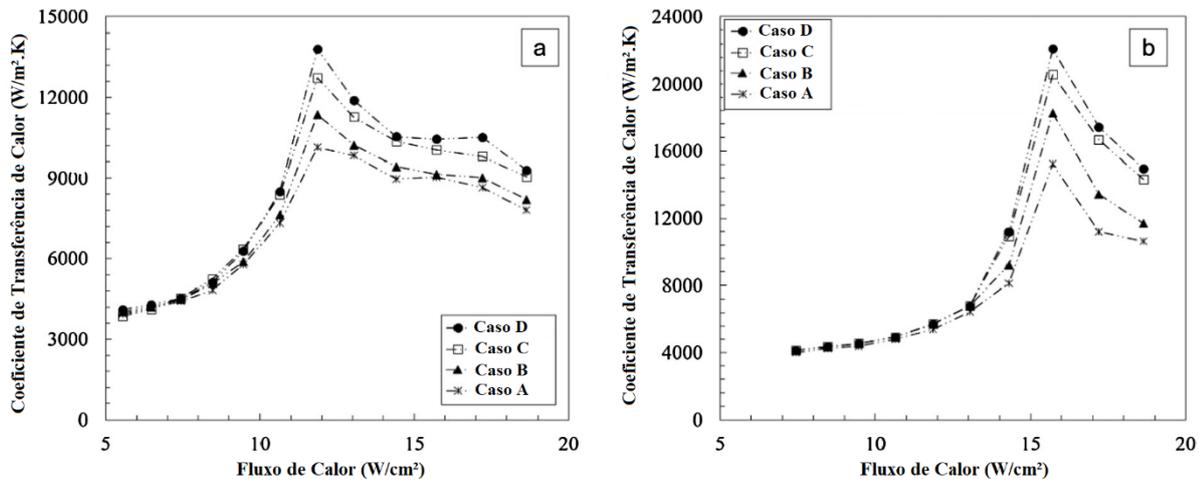
**Figura 2.17** - Imagens de microscópio eletrônico de varredura para as superfícies sem tratamento superficial (A), com tratamento por microestruturas (B), nanoestruturas (C) e micro-nanoestruturas (D).



Fonte: Adaptado de Sadaghiani et al. (2017).

As velocidades mássicas de água destilada fixadas pelo experimento referiram-se aos valores de 50, 75, 100 e 125 kg/m<sup>2</sup>s. Os resultados obtidos para duas dessas velocidades mássicas (50 e 125 kg/m<sup>2</sup>s) caracterizaram o CTC em função do fluxo de calor, como está ilustrado pela Figura 2.18. Para essa situação, os aumentos máximos em percentagem ocorreram para a velocidade mássica de 50 kg/m<sup>2</sup>s, em que aconteceram melhorias de 16%, 25% e 36%, respectivamente para os casos B, C e D, comparados ao caso A. No entanto, os maiores valores para o CTC aconteceram na velocidade mássica de 125 kg/m<sup>2</sup>s, com valor máximo para o caso D (superfície micro e nanoestruturada). Além do mais, outros resultados foram gerados por meio desse estudo e, assim, elaboraram-se dois mapas de escoamento. Com isso, constatou-se que a morfologia da superfície interna do microcanal referiu-se a um fator preponderante para alterações nos mecanismos de transferência de calor. Além disso, através de imagens térmicas obtidas, verificou-se um incremento na frequência de partida de bolhas para as superfícies estruturadas, sendo a temperatura mais uniformemente distribuída nos casos de nanoescala (C e D).

**Figura 2.18** - Coeficiente de Transferência de Calor obtido para as velocidades mássicas de (a) 50 kg/m<sup>2</sup>s e (b) 125 kg/m<sup>2</sup>s.



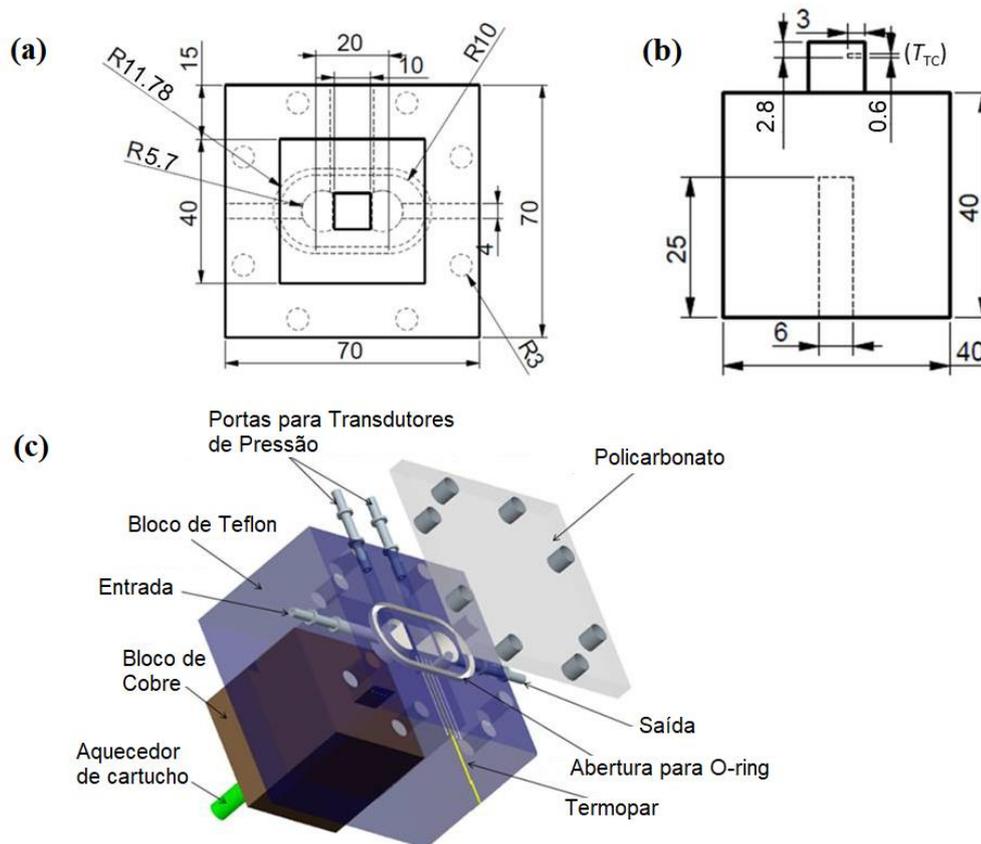
Fonte: Adaptado de Sadaghiani et al. (2017).

Gosh et al. (2018) estudaram os efeitos na ebulição convectiva com a utilização de um método de oxidação química para modificações de superfícies em microcanais. As dimensões dos seis microtubos retangulares empregados no experimento apresentaram seção transversal de 500  $\mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ , com 10 mm de comprimento, os quais juntos ocuparam uma área de 1 cm  $\times$  1 cm, sobre um dissipador térmico de cobre. A seção de testes foi constituída por um bloco de cobre, um isolamento térmico de Teflon<sup>TM</sup> e uma placa de cobertura de policarbonato (Lexan<sup>®</sup>). Os microcanais foram manufacturados utilizando a superfície superior do bloco de cobre, por meio de microfresamento CNC. Utilizou-se um aquecedor de cartucho (Omega, HDC 00004) para prover o fluxo de calor para o experimento, que foi instalado na parte inferior do bloco de cobre. A parte referente ao aquecimento foi inserida dentro do bloco de Teflon para isolamento. As superfícies dos microcanais foram alteradas através de nanoestruturas de óxido de cobre provenientes das seguintes etapas: tratamento amostral, *masking*, preparação de solução e reação química.

Finalizado o processo de obtenção de nanoestruturas de CuO (com espessura de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$ ), iniciaram-se os testes experimentais, com velocidades mássicas de 362 kg/m<sup>2</sup>s, água como fluido operacional e medições de temperatura através de um termopar do tipo J, colocado 2,8 mm abaixo do microcanal e 5 mm distante da entrada para o escoamento. Foram também empregados transdutores de pressão (Omega-PX81D0-010D5T e Omega-PX303-030A5V), para medir pressões diferenciais e absolutas (respectivamente)

correspondentes à entrada e saída do microtubo. A Figura 2.19 ilustra a seção de testes empregada no estudo.

**Figura 2.19** - Seção de testes: (a) vista superior; (b) vista frontal e; (c) vista explodida. As dimensões estão em mm.



Fonte: Adaptado de Gosh et al. (2018).

Os testes experimentais foram realizados para a situação de revestimento superficial com nanoestruturas de CuO e também para o caso sem revestimento. Para a última situação, obtiveram-se como resultados curvas de temperatura e pressão em função do tempo que, segundo os autores, estiveram associadas aos padrões de escoamento durante a ebulição convectiva. Isso com um comportamento similar para ambas as variáveis (pressão e temperatura), o que caracterizaria um mesmo mecanismo para governar o comportamento mencionado. Para o caso de superfície nanoestruturada, aconteceram também similaridades no comportamento associado aos padrões de escoamento, no entanto, a transferência de calor para o caso nanoestruturado apresentou melhorias comparada à situação superficial sem revestimento. Isso, de acordo com os pesquisadores, referiu-se ao fato do aumento da

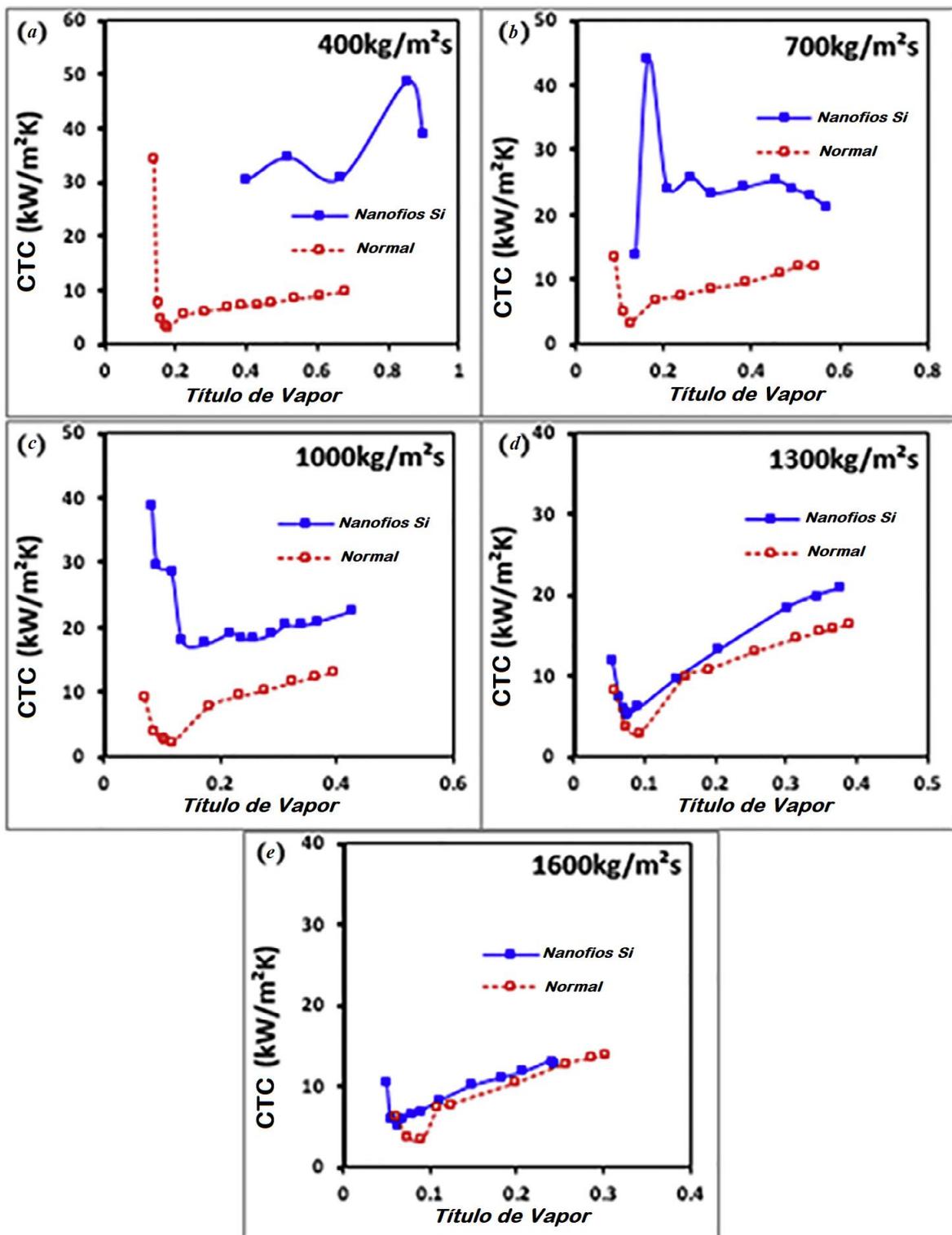
molhabilidade que manteve estável a região de filme-fino líquido do escoamento. Além do mais, as cavidades formadas pelas nanoestruturas antecipavam o início de nucleação de bolhas (ONB), em contrapartida ao caso sem a presença de óxido de cobre na superfície dos microcanais. Por último, os pesquisadores apontaram que os resultados obtidos pelo estudo consistiriam em um sinal sugestivo e de encorajamento para otimizações da geometria de dissipadores de calor, com a finalidade de investigar, de maneira mais aguda, o potencial dos microcanais nanoestruturados.

Experimentos realizados por Alam et al. (2018) levaram à investigação do desempenho durante a ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados por nanofios de silício. Para tal, utilizaram-se cinco microtubos de silício, dispostos de forma paralela. Cada microcanal apresentou dimensões estruturais de  $220\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m} \times 10\ \text{mm}$ , sendo obtidos através de técnica comum de microfabricação apresentada por Yang et al. (2014), na qual uma pastilha de silício é acoplada a uma pastilha de pirex. Já se tratando do revestimento de superfície dos microtubos, as nanoestruturas de silício (nanofios) foram produzidas por meio da técnica de eletrodeposição química, empregando nanopartículas de prata como material catalisador. Além disso, os nanofios de silício passaram posteriormente por um processo natural de oxidação, o que resultou em uma superfície com ângulo de contato de aproximadamente zero grau (super-hidrofílica). Um resistor, o qual serviu como aquecedor e termistor de temperatura, foi aderido à parte inferior do chip de silício. A seção de testes ainda foi constituída por uma carcaça de cobre, transdutores de pressão e termopares do tipo K (para a entrada e saída do escoamento).

Os experimentos foram conduzidos em uma faixa de velocidades mássicas entre 400 e 1600  $\text{kg/m}^2\text{s}$  e valores para o fluxo de calor até aquele correspondente ao fluxo crítico de calor. Além disso, utilizaram-se também duas câmeras de alta velocidade ligadas a um microscópio ótico (com aumento de  $400\times$ ), com taxas de quadros por segundo no intervalo de 4.000 a 70.000fps. O fluido de trabalho para esse estudo referiu-se ao HFE-7100, o qual possui características dielétricas.

Diante das características experimentais supracitadas, tratando-se da análise sobre transferência de calor, compararam-se duas situações superficiais: microcanais com a ausência das nanoestruturas (*i*) e com a presença de revestimento de nanofios de silício (*ii*), como está ilustrado na Figura 2.20. Nela percebeu-se que as superfícies com nanoestruturas compostas por nanofios de silício melhoraram o valor do coeficiente de transferência de calor em velocidades mássicas baixas. Em contrapartida, o desempenho na troca de calor diminuiu

**Figura 2.20** - Comparações do coeficiente de transferência de calor ( $h$ ), em função do título de vapor para as situações (i) e (ii), para distintos valores de velocidade mássica.



Fonte: Adaptado de Alam et al. (2018).

drasticamente com o incremento da velocidade mássica. Por exemplo, o CTC aumentou em 176%, de um valor de  $8,5 \text{ kW/m}^2\text{K}$  (superfície sem nanoestrutura) para  $23,5 \text{ kW/m}^2\text{K}$

(superfície com nanofios de Si), para um mesmo valor de título de vapor e velocidade mássica, respectivamente, 0,3 e 700 kg/m<sup>2</sup>s (Figura 2.20b). Essa melhoria na eficiência energética com a utilização das nanoestruturas para baixos valores de velocidades mássicas, segundo os autores, deveu-se ao fato da estabilização do regime de escoamento anular e também ao filme fino de evaporação ao longo de toda a extensão da camada limite para o microcanal nanoestruturado.

### **2.8.3 Trabalhos SMEM/SNEM**

Choi et al. (2008) estudaram os efeitos da molhabilidade durante a ebulição convectiva em microcanal de vidro fabricado por sistema microeletromecânico (SMEM). Esse microcanal faz parte de uma seção de testes também composta por um microaquecedor de filme fino de ouro. Para a obtenção do microaquecedor usou-se o processo de fotolitografia. Esse componente responsabilizou-se por fornecer calor ao sistema, além de auxiliar no processo de medição de temperatura (atuando como termistor). Tratando-se do microcanal de vidro, este passou por alguns processos até se estabelecer como uma geometria retangular. Inicialmente, uma vez que o vidro se refere a um material amorfo, utilizou-se um tipo especial desse material denominado vidro fotossensível, já que esse composto pode ser cristalizado por raios ultravioleta (UV) com tratamento adicional. Terminado a etapa de exposição ao UV, aconteceu o processo de cristalização (com temperaturas próximas de 580 °C). Na sequência, ocorreu a plainagem da superfície com a utilização de polimento químico-mecânico (PQM), seguida de ataque químico com ácido fluorídrico e, posteriormente, nova plainagem superficial por PQM com o objetivo de controlar a altura do canal. Feito isso, sabendo-se que a superfície de vidro seria originalmente hidrofílica (ângulo de contato de 25°), aderiu-se a ela uma camada única automontada de OST (*octadecyltrichlorosilane*), o que tornou a superfície com característica hidrofóbica (ângulo de contato de ~105°).

O comprimento do canal de reduzido diâmetro consistiu em 50 mm, para diâmetros hidráulicos de 481 µm e 544 µm, respectivamente para as situações de superfície hidrofílica e hidrofóbica. Descreve-se ainda que, a seção de testes possuiu termopares do tipo T e transdutores de pressão (Setra 209), na entrada e saída do escoamento no microcanal, além de uma câmera de alta velocidade, com taxa de quadros por segundo de 30 a 500fps. As velocidades mássicas empregadas nesse estudo referiram-se a 8 kg/m<sup>2</sup>s, com uma potência de aquecimento na faixa de 80 a 200 mW, sendo empregado água deionizada como fluido operacional. Os resultados obtidos apontaram uma troca de calor mais eficiente durante a ebulição convectiva saturada para a superfície hidrofóbica, o que caracterizou uma constatação

oposta aos estudos anteriores avaliados pelos autores. Segundo Choi et al. (2008), essa discrepância se deveu ao novo padrão de escoamento visualizado para os procedimentos experimentais executados, que facilmente geraram gotículas de líquido.

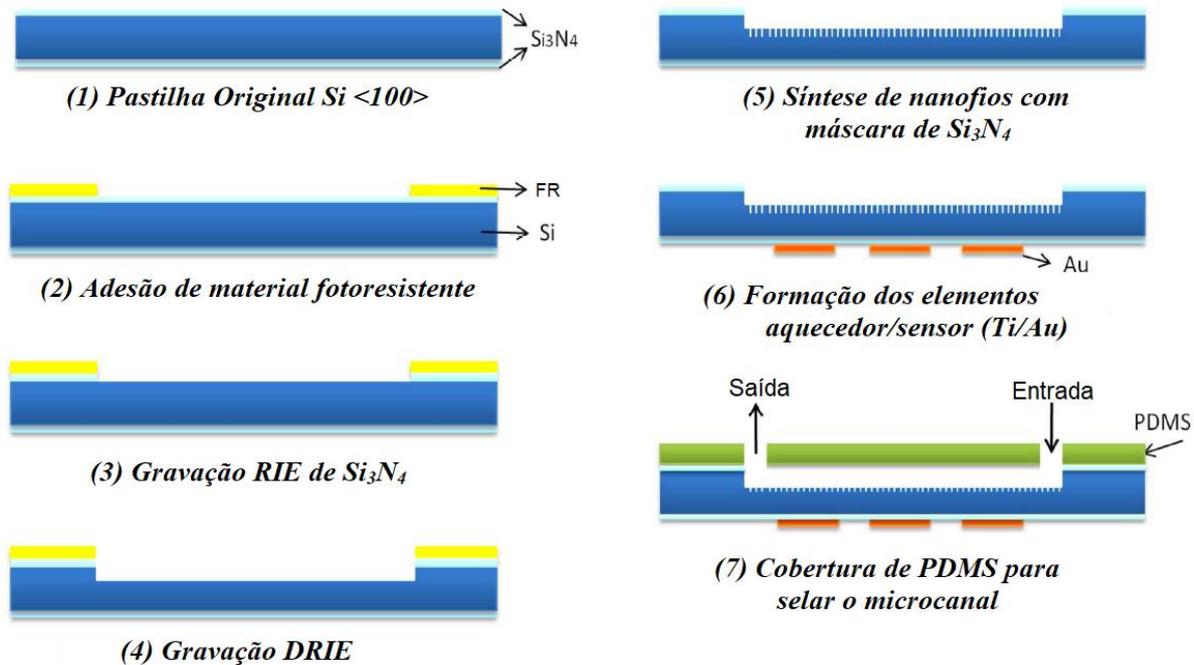
Li et al. (2012) investigaram os efeitos das nanoestruturas na transferência de calor durante a ebulição convectiva em dissipador térmico composto de microcanais. Para isso, utilizaram-se 14 canais, dispostos de forma paralela e igualmente espaçados por 90  $\mu\text{m}$ , com duas tipologias de superfície: a primeira, sem a presença de revestimento interno superficial; a segunda, com revestimento superficial, composto por nanofios de silício. O processo de obtenção dos canais de reduzido diâmetro hidráulico consistiu em etapas nas quais as técnicas SMEM/SNEM foram preponderantes. Inicialmente, utilizou-se uma pastilha de silício <100>, em que se aderiu material fotorresistente. Posteriormente, ocorreu um procedimento de gravação RIE, por meio de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , seguido de gravação DRIE. Para a obtenção das nanoestruturas, aconteceu uma síntese de nanofios de silício através de uma máscara de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Cada microcanal apresentou uma geometria de 250  $\mu\text{m}$   $\times$  200  $\mu\text{m}$   $\times$  20 mm. Além disso, a matriz composta pelos microtubos também foi constituída por um revestimento de *polydimethylsiloxane* (PDMS) e por três chips (de filme fino de ouro, na parte inferior) que atuaram como elementos de aquecimento e sensores (termistores), para mensurar a temperatura na entrada, meio e saída dos microcanais.

A Figura 2.21 ilustra o processo de fabricação até a caracterização do microcanal nanoestruturado. Levando-se em consideração os testes experimentais, adotaram-se velocidades mássicas nas faixas de 119 a 571  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  e temperaturas de entrada do fluido (água deionizada) de 30 e 60  $^\circ\text{C}$ . Para quantificar o desempenho durante a ebulição convectiva, os coeficientes de transferência de calor foram calculados para ambas as situações de superfície caracterizadas.

Os resultados evidenciaram uma tendência de decréscimo para o CTC em função do superaquecimento da parede do canal, o que é uma abordagem típica para a transferência de calor em regimes de escoamento anular. Além do mais, percebeu-se que o valor do CTC é maior para a situação de superfície nanoestruturada e altas velocidades mássicas (por exemplo, 238, 357 e 571  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ). Porém, para a velocidade mássica de 119  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ , a transferência de calor se tornou menor que para o caso sem revestimento. Segundo os autores, isso pode ser explicado pela evolução do padrão de escoamento anular para distintas velocidades mássicas em superfícies revestidas por nanofios de Si. Para baixos valores de velocidades mássicas, o filme líquido desaparece de forma mais rápida em superfície nanoestruturada e, conseqüentemente,

leva a uma secagem de parede que acarreta em um desempenho na transferência de calor inferior comparado ao microcanal sem revestimento.

**Figura 2.21** - Processo integrado de micro/nanofabricação para obtenção de microcanais nanoestruturados por nanofios de silício.



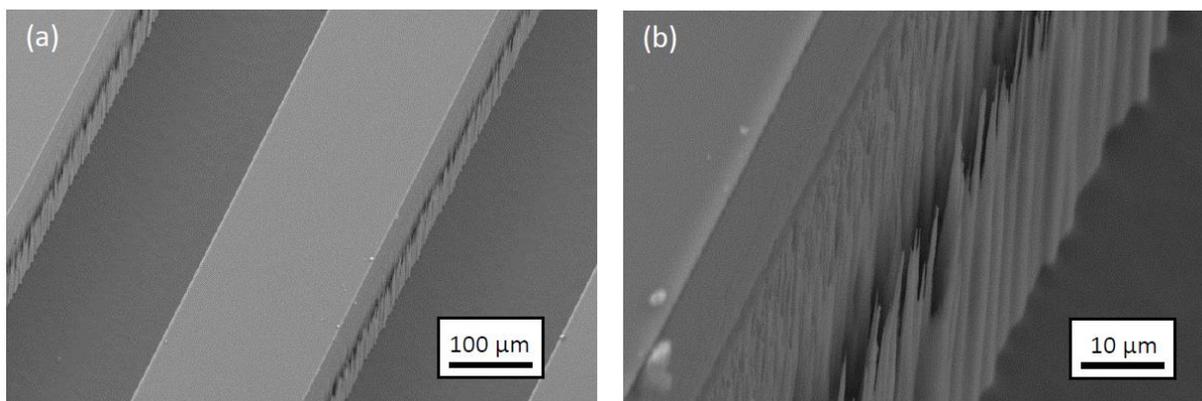
Fonte: Adaptado de Li et al. (2012).

Yang et al. (2015) estudaram a integração de nanoestruturas monolíticas em microcanais com a finalidade de melhorar a transferência de calor durante a ebulição convectiva de fluido dielétrico HFE-7000. Sendo assim, fabricaram-se duas configurações de microcanais: com e sem a presença de revestimentos superficiais (nanoestruturas de silício). Os microtubos de silício foram processados seguindo algumas etapas, as quais progressivamente consistiram em DRIE, RIE e, novamente, DRIE.

A Figura 2.22 ilustra imagens de microscópio eletrônico de varredura da matriz de nanoestruturas formadas nos microcanais. Por fim, aderiu-se aos microtubos, para realizar a cobertura dos canais, uma pastilha de pirex de vidro, em suas partes superiores. Além disso, uma camada de filme fino de alumínio foi pré-depositada na parte inferior dos microcanais, como elemento aquecedor e termistor, para prover, respectivamente, fluxo de calor e medição da temperatura média. Os microcanais apresentaram geometrias de 250  $\mu\text{m}$  x 220  $\mu\text{m}$  x 10  $\mu\text{m}$ . Dois sensores de pressão Omega™ FLV 4604 foram empregados, além de outros dois

termopares do tipo K, para medirem pressão e temperatura, respectivamente, na entrada e saída do escoamento para os microtubos.

**Figura 2.22** - Ilustração gerada por microscópio eletrônico de varredura das nanoestruturas monolíticas de silício formadas nos microcanais.



Fonte: Yang et al. (2015).

As condições experimentais no ambiente da seção de testes referiram-se aos valores de 1 bar, para a pressão, e 22 °C, para a temperatura. Os dados do experimento foram coletados através de um sistema de aquisição Agilent™ 34970A.

Como resultados foram obtidas as temperaturas das paredes dos canais em função do fluxo de calor efetivo, em diferentes velocidades mássicas, dentro da faixa de 1018 a 1867 kg/m<sup>2</sup>s. Nesse caso, as melhorias da transferência de calor com a utilização de nanoestruturas superficiais foram mais significantes em valores baixos de velocidade mássica, quando se realiza a comparação com os microcanais sem revestimento de superfície. Além disso, as resistências térmicas dos microcanais (dissipadores térmicos) também foram calculadas em função do fluxo de calor efetivo. Para essa situação, verificou-se que a resistência térmica foi reduzida em até 31%, para um fluxo de massa de 1018 kg/m<sup>2</sup>s, para a comparação supracitada.

Bandhauer e Bevis (2016) investigaram o aumento do fluxo de calor durante a ebulição convectiva para matrizes de lasers de diodo. Para tal, necessitou-se construir um aparato experimental, com 125 pequenos canais, cujo processo de fabricação se deu por meio de técnicas SMEM (*Bosh Plasma Etching*, um tipo de técnica DRIE), para alteração de substrato de silício. Os microcanais empregados para esse estudo tiveram dimensões de 45 µm x 200 µm x 4,95 µm, com um diâmetro hidráulico de 73,4 µm. Para prover a alimentação de calor ao sistema, um aquecedor de filme resistivo de platina foi depositado na parte inferior da seção de

testes, o que simulou um típico laser de diodo. A temperatura superficial do aquecedor foi aferida utilizando um pirômetro infravermelho.

As condições experimentais consistiram em velocidades mássicas no intervalo de 735 e 2230 kg/m<sup>2</sup>s, com o refrigerante R134a como fluido de operação, em temperaturas de saturação entre 15 e 25 °C. A potência de alimentação foi limitada ao valor de 111,6 W, o que gerou uma temperatura média de aproximadamente 60 °C. Sendo assim, os coeficientes de transferência de calor foram obtidos de acordo com a taxa de calor, estimativas de temperaturas de saturação, medições de temperaturas termográficas infravermelhas e um modelo matemático.

Os resultados experimentais apontaram um coeficiente de transferência de calor médio de 58,1 kW/m<sup>2</sup>K, que ocorreu para um fluxo de calor aproximado de 950 W/cm<sup>2</sup>. Esse valor para o CTC, segundo os autores, foi maior que resultados previamente reportados para o mesmo perfil experimental, com diâmetros hidráulicos maiores.

#### **2.8.4 *Resumo e conclusões dos trabalhos selecionados sobre ebulição convectiva em microcanais micro/nanoestruturados***

Na Tabela 2.4, apresentam-se, de forma resumida, os trabalhos pesquisados e escolhidos durante as duas últimas décadas a respeito da transferência de calor em microcanais micro/nanoestruturados. Para isso, são descritos os autores dos estudos, as categorias em que os trabalhos se enquadram, as características mais importantes durante a execução dos estudos e, por fim, os comentários e conclusões fundamentais para cada trabalho.

**Tabela 2.2** – Estado da arte referente à transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados por revestimento de superfície com materiais especiais, processos químicos e sistemas micro/nanoeletromecânicos.

AUTOR	CATEGORIA	CARACTERÍSTICAS	COMENTÁRIOS/CONCLUSÕES
Ammerman e You (2001)	RSME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcanal horizontal de perfil quadrado: 2 mm × 2 mm e 80 mm;</li> <li>• Fluido: FC-87;</li> <li>• Aquecimento elétrico (filme fino resistivo);</li> <li>• Revestimento microporoso – DOA (diamante, epóxi e álcool);</li> <li>• Velocidades mássicas: 500 a 5.000 kg/m<sup>2</sup>s;</li> <li>• Temperaturas de entrada: 2 a 31 °C;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoria significativa do CTC para o caso de revestimento microporoso, com o início da ebulição para baixos valores da diferença entre a temperatura da parede e a temperatura de saturação do fluido;</li> </ul>

**Tabela 2.4 (continuação)** – Estado da arte referente à transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados por revestimento de superfície com materiais especiais, processos químicos e sistemas micro/nanoeletromecânicos.

AUTOR	CATEGORIA	CARACTERÍSTICAS	COMENTÁRIOS/CONCLUSÕES
Choi et al. (2008)	SMEM/SNEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcanais de vidro fotossensível com diâmetros hidráulicos de 481 e 544 <math>\mu\text{m}</math>, com comprimento de 50 mm;</li> <li>• As técnicas de revestimento de superfície corresponderam a diversos processos, os quais foram mais importantes: exposição ultravioleta, plainagem por PQM, ataque químico, adesão de OST. Dessa forma, resultou em dois tipos de superfícies: hidrofílicas (ângulo de contato de <math>25^\circ</math> e hidrofóbica (ângulo de contato de <math>\sim 105^\circ</math>);</li> <li>• Velocidade mássica: 8 <math>\text{kg/m}^2\text{s}</math>;</li> <li>• Fluido operacional: água deionizada.</li> <li>• Potências de aquecimento: 80 a 200 mW;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Troca de calor mais eficiente durante a ebulição convectiva saturada para o caso de superfície hidrofóbica;</li> </ul>
Khanikar, Mudawar e Fisher (2009)	PQ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microtubo retangular: 0,371 mm <math>\times</math> 10 mm <math>\times</math> 44 mm;</li> <li>• Fluido: água;</li> <li>• Revestimento superficial CNT (nanotubos de carbono com diâmetros aproximados de 60 nm).</li> <li>• Duas situações operacionais: (i) temperatura de entrada de <math>30^\circ\text{C}</math>, velocidades mássicas de 86, 227 e 368 <math>\text{kg/m}^2\text{s}</math>, número de Reynolds entre 76 e 327 e pressão de saída de 1,13 bar; (ii) temperatura de entrada de <math>60^\circ\text{C}</math>, velocidades mássicas de 86, 228 e 368 <math>\text{kg/m}^2\text{s}</math>, número de Reynolds entre 131 e 562 e pressão de saída de 1,13 bar;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iniciação da ebulição na região inferior do microtubo;</li> <li>• Alteração morfológica dos revestimentos superficiais à medida do tempo para velocidades mássicas altas (368 <math>\text{kg/m}^2\text{s}</math>). Isso modificou o desempenho da troca de calor, ocorrendo melhoria até certo ponto e decréscimos no CTC depois da execução de vários testes;</li> </ul>
Khodabandeh e Furberg (2010)	PQ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dois microcanais (evaporadores do tipo termossifão).</li> <li>• Diâmetros para cada microtubo: 5,1 <math>\times</math> 1,7 <math>\times</math> 30 mm (superfície com microporosidades por deposição eletroquímica – dendritos de cobre) e 5,1 <math>\times</math> 1,6 <math>\times</math> 30 mm (superfície de cobre, sem revestimento).</li> <li>• Fluido de trabalho: refrigerante R134a;</li> <li>• Pressão reduzida de 0,16 (6,5 bar);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoria no CTC para situação de revestimento superficial. Por exemplo, valor de pico de 4,8 <math>\text{W/cm}^2\text{K}</math> para o CTC, para um fluxo de calor de 25 <math>\text{W/m}^2</math> (superfície com revestimento), enquanto que, para a mesma condição e superfície sem revestimento, o CTC foi próximo de 2 <math>\text{W/cm}^2\text{K}</math>.</li> </ul>

**Tabela 2.4 (continuação)** – Estado da arte referente à transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados por revestimento de superfície com materiais especiais, processos químicos e sistemas micro/nanoeletromecânicos.

AUTOR	CATEGORIA	CARACTERÍSTICAS	COMENTÁRIOS/CONCLUSÕES
Choi et al. (2011)	RSME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microtubo retangular: 503 <math>\mu\text{m} \times 507 \mu\text{m} \times 50 \text{ mm}</math>;</li> <li>• Fluido: água;</li> <li>• Material do microcanal: vidro fotossensível (superfície com ângulo de contato de <math>25^\circ</math> - hidrofílica);</li> <li>• Revestimento de superfície: <i>octadecyltrichlorosilane</i> (ângulo de contato de <math>105^\circ</math> - superfície hidrofóbica);</li> <li>• Velocidades mássicas: 25 a 75 <math>\text{kg/m}^2\text{s}</math>;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maiores valores de CTC para títulos de vapor inferiores a 0,2 e velocidade mássica de 25 <math>\text{kg/m}^2\text{s}</math>, para a superfície hidrofílica;</li> <li>• Maiores valores de CTC para qualquer faixa de título de vapor na velocidade mássica de 75 <math>\text{kg/m}^2\text{s}</math>, para a superfície hidrofóbica.</li> </ul>
Liu et al. (2011)	RSME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcanal retangular: 105 <math>\mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m} \times 30 \text{ mm}</math>;</li> <li>• Fluido: água;</li> <li>• Três tipos de superfícies internas: hidrofílica (ângulo de contato de <math>36^\circ</math>), hidrofóbica (ângulo de contato de <math>103^\circ</math>) e super-hidrofílica (matriz de nanofios de carbono, com ângulo de contato próximo de <math>0^\circ</math>);</li> <li>• Velocidades mássicas: 50 a 583 <math>\text{kg/m}^2\text{s}</math>;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diâmetros em que as bolhas se desprendem em superfícies hidrofóbicas parecem ser maiores que aqueles observados em superfícies hidrofílicas.</li> </ul>
Li et al. (2012)	SMEM/SNEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 14 microcanais paralelos (dissipador térmico), com geometria por canal de: 250 <math>\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m} \times 20 \text{ mm}</math>;</li> <li>• Técnicas de revestimentos de superfície mais importantes adotadas: RIE e DRIE, cuja estrutura resultante consistiu em nanofios de silício;</li> <li>• Fluido de trabalho: água deionizada;</li> <li>• Velocidades mássicas: 119 a 571 <math>\text{kg/m}^2\text{s}</math>;</li> <li>• Temperaturas de entrada do fluido: 30 e 60 <math>^\circ\text{C}</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tendência de decréscimo do CTC em função do superaquecimento da parede do canal (abordagem típica em regime de escoamento anular);</li> <li>• Valor de CTC maior para situações de revestimento de superfície e velocidades mássicas altas (238; 357 e 571 <math>\text{kg/m}^2\text{s}</math>), comparado aos canais não revestidos;</li> <li>• CTC menor para baixa velocidade mássica (119 <math>\text{kg/m}^2\text{s}</math>), comparado ao caso sem revestimento (filme líquido desaparece de forma mais rápida com velocidades mássicas baixas, o que gera um aumento na secagem da parede).</li> </ul>

**Tabela 2.4 (continuação)** – Estado da arte referente à transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados por revestimento de superfície com materiais especiais, processos químicos e sistemas micro/nanoeletromecânicos.

AUTOR	CATEGORIA	CARACTERÍSTICAS	COMENTÁRIOS/CONCLUSÕES
Phan et al. (2012)	RSME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcanal retangular de vidro (pírex): 5 mm x 500 <math>\mu\text{m}</math> x 180 mm;</li> <li>• Fluido: água;</li> <li>• Quatro tipos de superfícies modificadas por deposição de nanopartículas: óxido de silício (ângulo de contato de 26°); titânio (ângulo de contato de 49°); nanopartículas DLC (ângulo de contato de 63°); e óxido de silício dopado com carbono (ângulo de contato de 104°);</li> <li>• Velocidade mássica: 100 kg/m<sup>2</sup>s;</li> <li>• Fluxo de calor: 30 a 80 kW/m<sup>2</sup>;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valores máximos para o CTC na faixa de título de vapor entre 0,005 e 0,015;</li> <li>• A superfície mais hidrofílica (óxido de silício) apresentou o menor valor de CTC.</li> <li>• As superfícies hidrofílicas (titânio e DLC) apresentaram os melhores valores para o CTC. No entanto, a diminuição do CTC após valor máximo ocorreu devido a efeitos de capilaridade.</li> <li>• Para a superfície hidrofóbica, verificou-se a formação de bolhas alongadas (secagem localizada) após valor de pico do CTC. Isso deteriorou o CTC.</li> </ul>
Bai, Tange e Tang (2013)	RSME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 15 microcanais retangulares paralelos, com dimensões unitárias: 400 <math>\mu\text{m}</math> x 900 <math>\mu\text{m}</math> x 32 mm;</li> <li>• Quatro amostras, sendo três delas com modificação superficial por sinterização por pó de cobre e diâmetros de dendritos de 30, 55 e 90 <math>\mu\text{m}</math>, respectivamente. Também apresenta uma amostra sem revestimento superficial;</li> <li>• Fluido: etanol anidro, com pureza de 99,8%.</li> <li>• Velocidade mássica selecionada: 182 kg/m<sup>2</sup>s;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As amostras com revestimentos de superfície apresentaram melhores valores de CTC comparadas ao caso sem revestimento superficial, para valores de título de vapor inferiores a 0,15.</li> <li>• Verificou-se que, para as situações com revestimento, o melhor valor de CTC ocorreu para a amostra com diâmetro de dendritos de 55 <math>\mu\text{m}</math>.</li> </ul>
Kaya et al. (2013)	PQ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Três tipos de microcanais circulares: diâmetros hidráulicos de 249, 507 e 998 <math>\mu\text{m}</math>, com e sem revestimento de superfície.</li> <li>• Tipo de revestimento superficial: pHEMA;</li> <li>• Fluido de trabalho: água deionizada;</li> <li>• Velocidades mássicas: 10.000 e 13.000 kg/m<sup>2</sup>s.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoria da ordem de 109% na transferência de calor para as superfícies revestidas, comparadas àquelas sem revestimento;</li> <li>• Revestimentos de superfície reduziram o ângulo de contato (superfícies hidrofílicas) e aumentaram a nucleação de bolhas.</li> </ul>
Morshed, Paul e Khan (2013)	RSME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcanal retangular (dimensões de 360 <math>\mu\text{m}</math> x 5 mm x 26 mm) contido em um módulo de testes;</li> <li>• Revestimento nanocomposto de Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (na superfície inferior do microtubo);</li> <li>• Velocidades mássicas: 33, 70 e 142 kg/m<sup>2</sup>s;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento próximo de 100% no valor do CTC durante a ebulição convectiva para o caso de revestimento de superfície comparado à superfície sem alteração superficial (devido às modificações morfológicas de superfície);</li> </ul>

**Tabela 2.4 (continuação)** – Estado da arte referente à transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados por revestimento de superfície com materiais especiais, processos químicos e sistemas micro/nanoeletromecânicos.

AUTOR	CATEGORIA	CARACTERÍSTICAS	COMENTÁRIOS/CONCLUSÕES
Çikim et al. (2014)	PQ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microtubos aplicados por Kaya et al (2013);</li> <li>• Espessuras variadas do revestimento interno por pHEMA: 50 nm, 100 nm e 150 nm;</li> <li>• Fluido de trabalho: água deionizada;</li> <li>• Velocidades mássicas: 5.000 e 20.000 kg/m<sup>2</sup>s;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoria da ordem de 126,2% da transferência de calor para as superfícies revestidas, em contrapartida aos tubos sem revestimentos;</li> <li>• Acréscimo na densidade de nucleação de bolhas e na incidência de bolhas que partem da superfície do canal devido à porosidade do revestimento.</li> </ul>
Yang et al. (2014)	PQ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinco microcanais de dimensões unitárias: 200 µm × 250 µm × 10 mm;</li> <li>• Tipo de revestimento superficial: nanoestruturas de nanofios de silício (processo de deposição eletroquímica, com nanopartículas de prata como catalisador);</li> <li>• Fluido de trabalho: água deionizada;</li> <li>• Velocidades mássicas: 160 a 404 kg/m<sup>2</sup>s;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de 326% para o CTC para superfície revestida, em comparação à superfície sem revestimento, na velocidade mássica de 389 kg/m<sup>2</sup>s, padrão de escoamento anular;</li> <li>• Razões apontadas para o melhoramento do CTC: significativa ebulição nucleada, renovação do filme líquido na região de interface da parede, superfície super-hidrofílica, melhoria na evaporação de filme fino.</li> </ul>
Edel e Mukherjee (2015)	RSME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcanal com perfil transversal e geometria ligeiramente trapezoidal (sessão transversal nominal de 266 µm × 201 µm, comprimento de 25,4 mm e diâmetro hidráulico de 229 µm);</li> <li>• Vazão mássica constante de água: 0,41 ml/min;</li> <li>• Deposição superficial de nanopartículas de alumina durante 160 min.</li> <li>• Fluxos de calor: 130 kW/m<sup>2</sup> e 300 kW/m<sup>2</sup>;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máxima nucleação de bolhas para a situação de baixo fluxo de calor (estabilidade do escoamento devido ao aumento na densidade de nucleação);</li> <li>• Redução da secagem da parede devido às porosidades da superfície modificada: melhoria do CTC, durante o padrão de bolhas alongadas.</li> </ul>
Yang, et al. (2015)	SMEM/SNEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcanais retangulares de silício: 250 µm x 220 µm x 10 mm;</li> <li>• Superfícies modificadas, de maneira progressiva, pelas técnicas: DRIE, RIE e, por fim, DRIE (nanoestruturas de silício);</li> <li>• Fluido: HFE-7000 (características dielétricas);</li> <li>• Velocidades mássicas: 1018 a 1867 kg/m<sup>2</sup>s;</li> <li>• Condições ambientais: pressão de 1 bar, temperatura de 22 °C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhorias na transferência de calor, com a utilização de nanoestruturas, foram mais significantes em situações de baixos valores para a velocidade mássica, comparado ao caso sem revestimento;</li> <li>• Resistência térmica reduzida nas superfícies revestidas em até 31%, para uma velocidade mássica de 1018 kg/m<sup>2</sup>s, em contrapartida à situação de ausência de revestimento.</li> </ul>

**Tabela 2.4 (continuação)** – Estado da arte referente à transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados por revestimento de superfície com materiais especiais, processos químicos e sistemas micro/nanoeletromecânicos.

AUTOR	CATEGORIA	CARACTERÍSTICAS	COMENTÁRIOS/CONCLUSÕES
Bandhauere Bevis (2016)	SMEM/SNEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 125 microcanais retangulares, com dimensões unitárias: 45 <math>\mu\text{m}</math> x 200 <math>\mu\text{m}</math> x 4,95 <math>\mu\text{m}</math>, com diâmetro hidráulico de 73,4 <math>\mu\text{m}</math>;</li> <li>• Processo de fabricação por meio de <i>Bosh Plasma Etching</i>, um tipo de técnica DRIE;</li> <li>• Velocidades mássicas: 735 a 2230 <math>\text{kg}/\text{m}^2\text{s}</math>;</li> <li>• Fluido operacional: R134a;</li> <li>• Potência de alimentação: 111,6 W;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente de transferência de calor médio de 58,1 <math>\text{kW}/\text{m}^2\text{K}</math>, o qual ocorreu para um fluxo de calor aproximado de 950 <math>\text{W}/\text{cm}^2</math>;</li> <li>• Segundo os pesquisadores, esse valor de CTC foi maior que resultados prévios reportados para as mesmas características experimentais, com diâmetros hidráulicos maiores.</li> </ul>
Karimzadehkhoei et al. (2017)	RSME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microtubo circular de aço inoxidável: diâmetro de entrada de 502 <math>\mu\text{m}</math> e diâmetro de saída de 717 <math>\mu\text{m}</math>;</li> <li>• Fluido de trabalho: nanofluido à base de água com nanopartículas esféricas de <math>\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3</math> com surfactante SDS. Isso gerou deposição superficial de nanopartículas;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de 7% no CTC para o caso de frações mássicas de 0,05 e 0,2% de nanopartículas em água.</li> <li>• Deterioração de 12% no CTC para casos com frações mássicas superiores a 0,5%.</li> </ul>
Nedaei et al. (2017)	PQ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcanais circulares de aço: diâmetros internos de 600 e 889 <math>\mu\text{m}</math>, comprimento de 40 mm (região útil de 20 mm);</li> <li>• Método de revestimento de superfície: iCVD (com duas espessuras, sendo elas de 50 e 160 nm);</li> <li>• Velocidades mássicas: 6.000, 7.000 e 8.000 <math>\text{kg}/\text{m}^2\text{s}</math>;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máxima melhoria do CTC (61%) na velocidade mássica de 8.000 <math>\text{kg}/\text{m}^2\text{s}</math> e diâmetro do canal de 889 <math>\mu\text{m}</math>, para a superfície revestida, quando comparada ao caso sem revestimento;</li> <li>• Aumento na nucleação de bolhas devido à molhabilidade e à porosidade superficial;</li> <li>• Contribuição mais determinante de estruturas revestidas mais espessas (160 nm) no aumento do CTC, em situação de baixa molhabilidade.</li> </ul>
Ruiz et al. (2017)	RSME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcanal espiral: 300 <math>\mu\text{m}</math> de altura e raio da espiral de 10 mm;</li> <li>• Fluido: água destilada;</li> <li>• Tipos de superfícies: cobre sem revestimento e cobre com nanoestruturas de óxido de zinco (ângulo de contato de 10°; técnica de alteração superficial por síntese hidrotérmica – imersão durante 10 horas);</li> <li>• Velocidades mássicas: 184 a 716 <math>\text{kg}/\text{m}^2\text{s}</math>;</li> <li>• Fluxos de calor: 150 a 301 <math>\text{W}/\text{cm}^2</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior valor de CTC ocorreu para ebulição saturada, com pequenos indícios de sub-resfriamento (influência predominante de ebulição nucleada).</li> <li>• Melhorias no CTC para o caso de revestimento comparado ao caso de superfície apenas de cobre. Um exemplo consistiu no aumento de 25% no CTC, para um fluxo de calor de 105 <math>\text{W}/\text{cm}^2</math>.</li> </ul>

**Tabela 2.4 (conclusão)** – Estado da arte referente à transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais nanoestruturados por revestimento de superfície com materiais especiais, processos químicos e sistemas micro/nanoeletromecânicos.

AUTOR	CATEGORIA	CARACTERÍSTICAS	COMENTÁRIOS/CONCLUSÕES
Sadaghiani et al. (2017)	PQ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcanal retangular: <math>14 \times 15 \times 0,5</math> mm (alta taxa de aspecto);</li> <li>• Quatro situações de revestimentos superficiais:               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ caso A: superfície original do tubo de cobre, sem revestimento;</li> <li>→ caso B: lixamento mecânico, promotor de sulcos em microescala;</li> <li>→ caso C: oxidação por imersão em água, o que resultou em nanoestruturas de óxido de cobre com 15 nm de espessura;</li> <li>→ caso D: junção das técnicas dos casos B e C;</li> </ul> </li> <li>• Fluido de trabalho: água destilada;</li> <li>• Velocidades mássicas: 50, 75, 100 e 125 kg/m<sup>2</sup>s;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para a velocidade mássica de 50 kg/m<sup>2</sup>s, ocorreram melhorias no CTC de 16%, 25% e 36%, respectivamente, para os casos B, C e D, comparados ao caso A.</li> <li>• Os maiores valores para o CTC aconteceram na velocidade mássica de 125 kg/m<sup>2</sup>s, com valor máximo para o caso D;</li> <li>• Aumento na frequência de partida de bolhas para as superfícies estruturadas, sendo mais predominante nos casos C e D (nanoescala).</li> </ul>
Gosh et al. (2018)	PQ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seis microtubos retangulares com dimensões unitárias de: <math>500 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m} \times 10 \text{mm}</math>;</li> <li>• Revestimento de superfície dos microcanais por oxidação química, com a obtenção de nanoestruturas de CuO (espessura próxima a <math>1 \mu\text{m}</math>);</li> <li>• Fluido operacional: água;</li> <li>• Velocidade mássica: 362 kg/m<sup>2</sup>s.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para o caso de superfície nanoestruturada: melhorias no CTC, comparadas ao caso sem revestimento. Isso devido aos efeitos de aumento da molhabilidade que mantiveram estável a região de filme fino líquido do escoamento. Além disso, as cavidades da nanoestrutura antecipam o ONB;</li> <li>• Pesquisas apontam um sinal de encorajamento para otimizações da geometria de dissipadores de calor, de forma a investigar em caráter mais agudo o potencial dos microcanais;</li> </ul>
Alam et al. (2018)	PQ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinco microcanais retangulares, com dimensões unitárias: <math>220 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m} \times 10 \text{mm}</math>;</li> <li>• Técnica de revestimento superficial: eletrodeposição química (nanopartículas de prata como catalisador), formando nanoestruturas de silício (nanofios); após isso, passaram por um processo natural de oxidação, o que resultou em ângulo de contato de <math>0^\circ</math> (superfície super-hidrofílica);</li> <li>• Fluido de trabalho: HFE-7100 (características dielétricas);</li> <li>• Velocidades mássicas: 400 a 1600 kg/m<sup>2</sup>s;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoria do CTC para superfícies nanoestruturadas comparadas aos casos sem revestimento, em baixas velocidades mássicas, em contrapartida ao decréscimo no CTC para velocidades mássicas elevadas;</li> <li>• Exemplo: velocidade mássica baixa, de 700 kg/m<sup>2</sup>s e título de vapor, de 0,3, resultou num aumento de 176% no CTC, comparando o caso de revestimento superficial com aquele sem nanofios de silício na superfície do canal.</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 3 CORRELAÇÕES

O capítulo 3 teve sua estrutura definida como está caracterizado a seguir:

- Apresentação do contexto relacionado às correlações para predição do coeficiente de transferência de calor durante a ebulição em escoamentos forçados que utilizam canais de reduzido diâmetro;
- Correlações selecionadas na literatura para predição do CTC em microcanais.

### 3.1 Contextualização sobre as correlações para previsão do CTC

Existem inúmeras correlações e modelos disponíveis na literatura para a ebulição saturada e subresfriada em escoamentos. Dentro desse contexto, muitos pesquisadores têm se dedicado em desenvolver modelos para microcanais, tomando como base a ebulição em canais convencionais. Uma grande parte desses estudos considera a contribuição de dois mecanismos para a ebulição em escoamentos forçados: ebulição nucleada e ebulição convectiva (CHENG; XIA, 2017). Segundo Ribatski (2014, p. 131), métodos que trabalham com esses efeitos de superposição “parecem ainda ser os mais adequados”.

As correlações para previsão do coeficiente de transferência de calor podem, geralmente, ser divididas em três grupos: correlações de adição (*summation correlations*), correlações assintóticas e modelos baseados em padrões de escoamento (CHENG; XIA, 2017). Além disso, existem as correlações estatísticas de formato tradicional, baseadas em números adimensionais, tais como: Número de Weber ( $We$ ), Número de Reynolds ( $Re$ ), Número de Bond ( $Bd$ ), Número de Ebulição ( $Bo$ ), Número de Confinamento ( $Co$ ), Número de Prandtl ( $Pr$ ), entre outros. A seguir, são apresentados sucintamente os três grupos de correlações mais comuns citados por Cheng e Xia (2017).

#### 3.1.1 Correlações de adição

As correlações que correspondem ao somatório das contribuições das ebulições nucleada e convectiva são consideradas por Cheng e Xia (2017) como correlações de adição (*summation correlations*). Um dos estudos pioneiros que tratam desse assunto se refere ao

modelo proposto por Chen (1966). A equação (3.1) caracteriza o formato da correlação mencionada.

$$h_b = F_{ci}h_{ec} + F_s h_{en} \quad (3.1)$$

$h_b$ ,  $h_{ec}$  e  $h_{en}$  representam os coeficientes de transferência de calor durante a ebulição em escoamentos bifásico, convectivo e nucleado, respectivamente; enquanto que,  $F_{ci}$  diz respeito ao fator convectivo de intensificação e  $F_s$  consiste no fator de supressão de bolhas para ebulição nucleada.

### 3.1.2 Correlações assintóticas

As correlações baseadas em abordagem assintótica consistem naquelas em que o coeficiente de transferência de calor é assumido como um dos dois mecanismos a ser de maior dominância, como está apresentado na equação (3.2). Assim, verifica-se que, para esses tipos de correlações, o coeficiente de transferência de calor bifásico ( $h_b$ ) aproxima-se assintoticamente do valor de CTC convectivo ( $h_{ec}$ ) ou nucleado ( $h_{en}$ ).

$$h_b = [(F_{ci}h_{ec})^n + (F_s h_{en})^n]^{1/n} \quad (3.2)$$

em que  $n$  refere-se a um coeficiente com valor numérico maior ou igual a 1. Para o caso no qual  $n = 1$ , a abordagem assintótica se equivale às correlações de adição.

Exemplo de aplicação dessa abordagem consiste no modelo preditivo do CTC proposto por Steiner e Taborek (1992), que segue a estrutura da equação (3.2), em que o valor de  $n$  é aproximadamente igual a 3. Segundo Steiner e Taborek (1992),  $n$  refere-se a um coeficiente que distingue a faixa de transição entre os componentes convectivos e nucleados do modelo. Sendo assim, de acordo com os autores, valores elevados de  $n$  indicariam uma transição abrupta, enquanto pequenos valores para  $n$  alargariam a região de transição. Para tubos comerciais (com diâmetros acima de 3 mm), os valores recomendados de  $n$  ficariam entre 2,5 e 3,5.

### 3.1.3 Correlações baseadas em padrões de escoamento

Tratando-se dos modelos baseados nos regimes de escoamento (vide seção 2.5), durante a ebulição convectiva em microcanais existem diversas abordagens que tratam sobre o desenvolvimento de correlações para esse tipo de situação. Uma delas consiste nas correlações baseadas em modelos assintóticos apropriados para padrões de escoamento específicos. Isso foi realizado por Wojtan, Ursenbacher e Thome (2005), Cheng, Ribatski e Thome (2008), além de diversos outros pesquisadores. Outra abordagem corresponde aos modelos mecanicistas, em que um dos estudos mais consistentes que tratam sobre a transferência de calor durante a ebulição em escoamento forçado diz respeito aos trabalhos apresentados por Thome (2004), referido como modelo de três zonas.

## 3.2 Correlações para predição do CTC na ebulição convectiva em microcanais

Nesta seção são abordadas cinco correlações selecionadas na literatura especializada, para a predição do coeficiente de transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais. Elas se referem a um contexto mais recente, sendo apresentadas em ordem cronológica. Além disso, essas equações escolhidas para o CTC são essencialmente correlações dos tipos de adição, assintóticas e também aquelas baseadas em números adimensionais. Outro aspecto importante sobre as correlações dispostas a seguir, refere-se ao fato de que se utilizou como critério de seleção, equações que predizem o CTC até a região imediatamente anterior ao título de vapor correspondente à secagem de parede (pré *dry out*).

### 3.2.1 Correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007)

Saitoh, Daiguji e Hihara (2007) propuseram uma correlação de adição modificada para o CTC durante a ebulição convectiva de R134a para o regime de escoamento pré secagem de parede, conforme equação (3.1). Isso foi realizado a partir da correlação proveniente dos estudos de Stephan e Abdelsalam (1980). Foram ajustados pontos experimentais para uma faixa de variação de diâmetro entre 0,51 e 10,92 mm. O termo do coeficiente de transferência de calor associado ao regime convectivo ( $h_{ec}$ ) foi estimado por meio da equação de Dittus-Boelter (para valores de Número de Reynolds para fase líquida -  $Re_l$  - superiores a 1000), ou

por meio da equação  $h_{ec} = 4,36k/D_H$  (para  $Re_l < 1000$ , quando o escoamento é laminar). O valor do Número de Reynolds para fase líquida é dado por  $Re_l = G_l D_H / \mu_l$ . Já o valor de  $h_{ec}$ , baseado na equação de Dittus-Boelter para essa situação, é caracterizado pela equação (3.3).

$$h_{ec} = 0,023 \frac{k_l}{D_H} \left( \frac{G_l D_H}{\mu_l} \right)^{0,8} \left( \frac{c_{p,l} \mu_l}{k_l} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.3)$$

em que  $\mu$  representa a viscosidade dinâmica,  $k$  consiste na condutividade térmica e  $c_p$  é o calor específico à pressão constante. Tratando-se do termo referente ao coeficiente de transferência de calor para a parcela nucleada ( $h_{en}$ ), este foi determinado de acordo com Stephan e Abdelsalam (1980):

$$h_{en} = 207 \frac{k_l}{d_b} \left( \frac{q'' d_b}{k_l T_{sat}} \right)^{0,745} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,581} Pr_l^{0,533} \quad (3.4)$$

em que  $Pr_l = c_{p,l} \mu_l / k_l$  representa o número de Prandtl para a fase líquida e  $d_b$ , diâmetro de desprendimento de bolhas, é dado pela seguinte equação:

$$d_b = 0,51 \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{0,5} \quad (3.5)$$

em que  $\sigma$  se refere à tensão superficial na temperatura de saturação.

Os parâmetros  $F_{ci}$  e  $F_s$ , correspondentes à intensificação da parcela convectiva e supressão da parcela nucleada, respectivamente, foram ajustados e propostos da seguinte maneira:

$$F_{ci} = 1 + \frac{X^{-1,05}}{1 + We_v^{-0,4}} \quad (3.6)$$

$$F_s = \frac{1}{1 + 0,4(Re_l \cdot F_{ci}^{1,25} \times 10^{-4})^{1,4}} \quad (3.7)$$

em que  $X$  consiste no parâmetro de Lockhart-Martinelli, sendo calculado para situações líquido laminar-vapor turbulento ( $X_{lt}$ ) e líquido turbulento-vapor turbulento ( $X_{tt}$ ), de acordo com  $Re_l$  e  $Re_v$  de transição iguais a 1000. As equações para os valores de  $X$  estão evidenciadas na sequência:

$$X_{lt} = 18,65 Re_v^{-0,4} \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,5} \left( \frac{\mu_v}{\mu_l} \right)^{0,1} \quad (3.8)$$

$$X_{tt} = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,5} \left( \frac{\mu_v}{\mu_l} \right)^{0,1} \quad (3.9)$$

Relata-se que, quando for um aspecto necessário, em correlações a serem apresentadas posteriormente, outros valores do parâmetro de Lockhart-Martinelli para situações líquido laminar-vapor laminar ( $Re_l < 1000$  e  $Re_v < 1000$ ) e líquido turbulento-vapor laminar ( $Re_l > 1000$  e  $Re_v < 1000$ ), são caracterizados subsequentemente:

$$X_{ll} = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0,5} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,5} \left( \frac{\mu_v}{\mu_l} \right)^{0,1} \quad (3.10)$$

$$X_{tl} = 0,05362 Re_v^{0,4} \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,5} \left( \frac{\mu_v}{\mu_l} \right)^{0,1} \quad (3.11)$$

O número de Weber para a fase vapor ( $We_v$ ), da equação (3.6), é caracterizado pela equação (3.12).

$$We_v = \frac{G_v^2 D_H}{\sigma \rho_v} \quad (3.12)$$

### 3.2.2 Correlação de Li e Wu (2010)

Mais de 3700 dados experimentais referentes à ebulição convectiva saturada em micro/minicanais foram coletados e ajustados por Li e Wu (2010), para uma gama de diversos tipos de fluidos, diferentes condições operacionais, e para diâmetros na faixa de 0,16 a 3,1 mm. Realizou-se o ajuste através do método de regressão, em que os Números de Reynolds, Ebulição

e Bond foram parâmetros fundamentais. A correlação proposta para o coeficiente de transferência de calor bifásico está caracterizada pela equação (3.13).

$$h_b = 334Bo^{0,3}(BdRe_l^{0,36})^{0,4} \frac{k_l}{D_H} \quad (3.13)$$

em que o Número de Ebulição ( $Bo$ ) é dado pela equação (3.14),

$$Bo = \frac{q''}{Gi_{lv}} \quad (3.14)$$

$i_{lv}$  refere-se ao calor latente de vaporização e o Número de Bond ( $Bd$ ) é caracterizado pela equação (3.15).

$$Bd = \frac{g(\rho_l - \rho_v)D_H^2}{\sigma} \quad (3.15)$$

### 3.2.3 *Correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013)*

De acordo com Mahmoud e Karayiannis (2013), existe uma elevada discrepância na literatura disponível sobre os desempenhos comparativos das correlações e modelos aplicados à ebulição convectiva em microescala. Sendo assim, os autores propuseram um estudo detalhado para escoamento de R134a em 21 correlações para predição do CTC em macro e microescala. Os dados experimentais utilizados para comparar as correlações, tiveram uma margem de diâmetros entre 1,1 — 0,52 mm, velocidades mássicas de 100—500 kg/m<sup>2</sup>s e um intervalo de pressão entre 6 —10 bar. Os efeitos do comprimento do canal também foram levados em consideração, admitindo três valores 150, 300 e 450 mm. O estudo comparativo levou à constatação de que nenhuma das 21 correlações predisse com exatidão o banco de dados utilizado. Sendo assim, os autores propuseram uma correlação de adição (conforme equação 3.1), somando os efeitos de ebulição convectiva e nucleada em escoamentos, baseando-se em 5152 pontos experimentais incluídos no estudo dos pesquisadores, bem como em trabalhos da literatura com as mesmas características do conjunto de dados utilizado previamente. Os diâmetros para o novo conjunto de dados ajustados foram de 4,26, 2,88 e 2,01 mm. Sendo assim, a seguir estão caracterizadas as equações para o CTC ajustadas.

$$h_{en} = 55P_R^{0,12-0,434 \ln R_p} (-\log P_R)^{-0,55} M^{-0,5} q''^{0,67} \quad (3.16)$$

$$h_{ec} = \begin{cases} 4,36 \frac{k_l}{D_H} \rightarrow Re_l < 2000 \\ 0,023 Re_l^{0,8} Pr_l^{0,4} \frac{k_l}{D_H} \rightarrow Re_l > 3000 \end{cases} \quad (3.17)$$

em que  $M$  se refere à massa molecular,  $Re_l = G_l D_H / \mu_l$ ,  $Pr_l = c_{p,l} \mu_l / k_l$ ,  $P_R = P / p_{crit}$  e  $R_p$  é a rugosidade superficial interna do canal (em metros). Já os valores correspondentes aos fatores convectivo e nucleado foram caracterizados no seguinte formato:

$$F_{ci} = \left[ 1 + \frac{(2,812 Co^{-0,408})}{X} \right]^{0,64} \quad (3.18)$$

$$F_s = \frac{1}{1 + 2,56 \times 10^{-6} (Re_l F_{ci}^{1,25})^{1,17}} \quad (3.19)$$

em que  $Co$  representa o Número de Confinamento dado pela equação (2.15), o parâmetro de Lockhart-Martinelli ( $X$ ) é dado pelas equações (3.8) — (3.11).

### 3.2.4 Correlação de Fang et al. (2017)

Fang et al. (2017) propuseram uma correlação generalista para o CTC durante a ebulição convectiva em microcanais, desenvolvida de acordo com o ajuste de 17.778 pontos experimentais disponíveis em 101 estudos da literatura, relativos a 13 diferentes tipos de fluidos operacionais. A correlação proposta na equação (3.20), segundo os autores, apresentou um avanço significativo na predição do CTC para a ebulição convectiva saturada, uma vez que possui um desvio absoluto médio de 4,5% para o conjunto experimental usado, com 68,1% e 89,7% de porcentagem de ajuste nas bandas de erros comparativas para valores de CTC preditos e experimentais de  $\pm 5\%$  e  $\pm 10\%$ , respectivamente. Na sequência, estão dispostas as equações matemáticas referentes à correlação obtida.

$$h_b = F_f M^{-0,18} Bo^{0,98} Fr_{lo}^{0,48} Bd^{0,72} \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,29} \left[ \ln \left( \frac{\mu_l}{\mu_{lw}} \right) \right]^{-1} \frac{k_l}{D_H} Y \quad (3.20)$$

$$Y = \begin{cases} 1 & \rightarrow P_R \leq 0,43 \\ 1,38 - P_R^{1,15} & \rightarrow P_R > 0,43 \end{cases} \quad (3.21)$$

em que  $Bo$ ,  $Bd$  são calculados de acordo com as equações (3.14) e (3.15), respectivamente.  $P_R = p/p_{crit}$  é a pressão reduzida. Os parâmetros  $\mu_{lf}$  e  $\mu_{lw}$  correspondem às viscosidades dinâmicas para líquidos na temperatura de saturação do fluido e na temperatura interna da parede, de maneira respectiva. A variável  $Fr_{lo}$  consiste no Número de Froude para a situação assumida de escoamento apenas líquido, representada pela equação (3.22).

$$Fr_{lo} = \frac{G^2}{gD_H\rho_l^2} \quad (3.22)$$

Já o parâmetro  $F_f$  diz respeito a um fator de dependência do fluido, dado pela Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** - Fator de dependência do fluido para a correlação de Fang et al. (2017).

FLUIDO	$F_f$ (-)	FLUIDO	$F_f$ (-)
R134a	1845	CO <sub>2</sub>	2260
R22	1850	NH <sub>3</sub>	1745
R245fa	1890	N <sub>2</sub>	1715
R1234yf	1690	Água	2035
R236fa	1770	R29	1825
R410A	1790	R32	1435
R407C	2065	Outros fluidos	1850

Fonte: Adaptado de Fang et al. (2017).

### 3.2.5 Correlação de Tibiriçá et al. (2017)

Tibiriçá et al. (2017) determinaram uma correlação simples, ajustada através do método dos mínimos quadrados, para uma faixa de diâmetro entre 0,38–2,32 mm. Realizaram-se inúmeras combinações de números adimensionais para o processo de ajuste. Eles tiveram como embasamento um conjunto de 3.902 pontos experimentais provenientes da literatura, para vários tipos de fluidos, entre eles os refrigerantes R134a, R1234yf, água, dióxido de carbono, propano. Os autores obtiveram a seguinte correlação:

$$h_b = 0,68 Pr_l^{0,5414} La_l^{0,1942} Re_{lo}^{0,5873} (1-x)^{-0,2446} Bo^{0,3544} \frac{k_l}{D_H} \quad (3.23)$$

em que  $Re_{lo} = GD_H/\mu_l$ ,  $Pr_l = c_{p,l}\mu_l/k_l$ . Além disso, o Número de Ebulição  $Bo$  é obtido por meio da equação (3.14), enquanto que o valor do Número de Laplace para fase líquida é dado por:  $La_l = \sigma D_H \rho_l / \mu_l^2$ .



## 4 METODOLOGIA

O capítulo 4 teve sua estrutura definida da seguinte maneira:

- Apresentação sintetizada do banco de dados utilizado para o presente trabalho, sendo incluídos trabalhos com adesão de micro/nanoestruturas nas superfícies dos microcanais;
- Caracterização do tratamento estatístico (métrica de erros e porcentagem de ajuste) para posterior avaliação comparativa dos resultados obtidos;

### 4.1 Base de dados adotada

A base de dados adotada neste trabalho consistiu na junção de diversos trabalhos experimentais disponíveis na literatura. O agrupamento de pontos experimentais teve como critério a coleta do coeficiente de transferência de calor, velocidade mássica, título de vapor em escoamento, temperatura de saturação ou pressão de saturação, e o fluxo de calor. Sendo assim, uma vez que a maioria dos dados podem ser visualizados apenas em gráficos dispostos como figuras ao longo dos trabalhos publicados na literatura, utilizou-se o programa computacional Webplotdigitizer® para realizar a aquisição dos pontos de interesse.

Para fins de avaliações comparativas, a base de dados foi idealizada a ser constituída de dois tipos de pontos experimentais: aqueles relacionados à ebulição convectiva em microcanais sem a presença de revestimento superficial e também aqueles referentes à ebulição convectiva em microcanais micro/nanoestruturados.

Para o primeiro caso, adotaram-se os estudos experimentais em microcanais sem modificações superficiais realizados por Bertsch, Groll e Garimella (2008), Wang, Chen e Groll (2009), Tibiriçá e Ribatski (2010), Mahmoud, Karayiannis e Kenning (2011), Oh e Son (2011). Foram selecionados 731 pontos experimentais. Todos esses trabalhos são direcionados ao fluido refrigerante R134a.

Na segunda situação, os pontos experimentais para microcanais micro/nanoestruturados foram coletados de estudos experimentais já tratados na seção 2.8. Sendo assim, por meio de um processo de investigação sobre quais seriam os trabalhos que apresentariam dados experimentais disponíveis úteis, ou seja, com todos os parâmetros necessários para aplicação

nas correlações, permitiu-se a determinação de um agrupamento de pontos experimentais para as categorias de modificação de superfície convencionadas neste trabalho. Devido à escassez de trabalhos que dispusessem das características experimentais necessárias disponíveis para utilização das correlações, foram selecionados pontos experimentais apenas dos estudos de Choi et al. (2011) e Phan et al. (2012), que utilizaram água como fluido de trabalho, totalizando 142 pontos experimentais.

Na Tabela 4.1, apresentam-se, resumidamente, os parâmetros relacionados à base de dados utilizada, bem como suas faixas operacionais.

**Tabela 4.1** – Característica da Base de Dados adotada.

BANCODE DADOS	TIPO DE MICROCANAL	FLUIDO	$D_H$ [mm]	$G$ [kg/m <sup>2</sup> s]	$q''$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$T_{SAT}$ (°C) OU $[P_{SAT} - kPa]$	NÚM. DE PONTOS
Bertsh et al. (2008)	Normal	R134a	1,09	20,3 – 81	25 – 10	[400 – 750 kPa]	21
Mahmoud et al. (2011)	Normal	R134a	1,1; 1,16	128 – 549	12,9 – 102	[800 kPa]	221
Oh e Son (2011)	Normal	R134a	1,77; 3,36; 5,35	200; 300	20; 30	5°C	40
Tibiriçá e Ribatski (2010)	Normal	R134a	2,3	200 – 600	5 – 35	22°C; 31°C; 41°C	85
Wang et al. (2009)	Normal	R134a	1,3	321 – 836	21,1 – 50	[65,1 – 72,7 kPa]	364
Choi et al. (2011)	Nanoestruturado	Água	0,5055; 0,5081	25; 75	41,6 – 369,83	100,26°C	47
Phan et al. (2012)	Nanoestruturado	Água	0,96	100	30 – 76	100°C	95
<b>TOTAL DE PONTOS</b>							<b>873</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Métricas de erro e porcentagens de ajuste

A métrica de erro empregada neste trabalho tem por objetivo verificar a adequação das correlações selecionadas em relação ao banco de dados determinado na seção anterior. Além disso, também se adotou para efeito de comparação das correlações, a faixa porcentual de adequação dos valores de CTC calculados em detrimento aos valores experimentais.

#### 4.2.1 MAD – Desvio Absoluto Médio

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{h_{pred,i} - h_{exp,i}}{h_{exp,i}} \right| \quad (4.1)$$

em que  $i$  é o parâmetro contador do somatório que representa o ponto analisado,  $N$  é o tamanho amostral,  $h_{pred}$  e  $h_{exp}$  correspondem aos coeficientes de transferência de calor preditivo e experimental, respectivamente.

#### 4.2.2 MRD – Desvio Relativo Médio

$$MRD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{h_{pred,i} - h_{exp,i}}{h_{exp,i}} \quad (4.2)$$

#### 4.2.3 Porcentagem de ajuste dos valores de CTC

Esse parâmetro, dado por  $\phi_{\pm\epsilon}$ , diz respeito à porcentagem de locação de dados à banda limítrofe de erro  $\pm\epsilon\%$  referente aos valores de CTC preditos em função dos valores de CTC experimentais. Para esse trabalho, adotaram-se bandas de erro de  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ .



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados referentes às correlações em detrimento aos pontos experimentais do banco de dados caracterizado na seção 4.1. No entanto, antes de evidenciar os resultados, ressaltam-se os procedimentos executados para obtenção os valores calculados para o coeficiente de transferência de calor.

Inicialmente, utilizando o banco de dados disponível, implementou-se um algoritmo padrão através do programa computacional EES®, cuja licença é disponível pelo CEFET-MG. Isso possibilitou aquisição das propriedades termofísicas dos fluidos operacionais, para cada situação distinta de pontos experimentais. Dessa maneira, conseguiu-se determinar todos os parâmetros necessários para aplicação das correlações caracterizadas na seção 3.2.

Para o tratamento de imagens, em parceria com o laboratório de Sinais e Sistemas do CEFET-MG, câmpus Divinópolis, utilizou-se o programa MATLAB®, através do qual foi possível gerar a comparação, através de imagens, dos valores de CTC calculados por meio das correlações, com os valores de CTC experimentais disponíveis no banco de dados desta pesquisa.

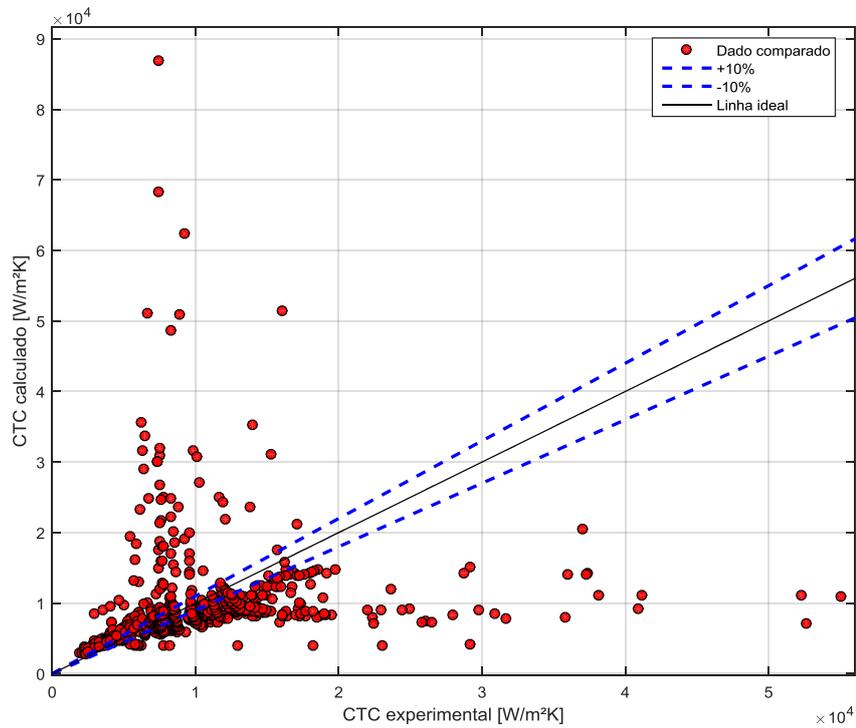
Nas subseções a seguir, apresentam-se os gráficos que caracterizam a comparação das correlações para o valor do coeficiente de transferência de calor com os dados experimentais.

### 5.1 Valores de CTC para a correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007)

#### 5.1.1 Banco de dados: microcanais normais

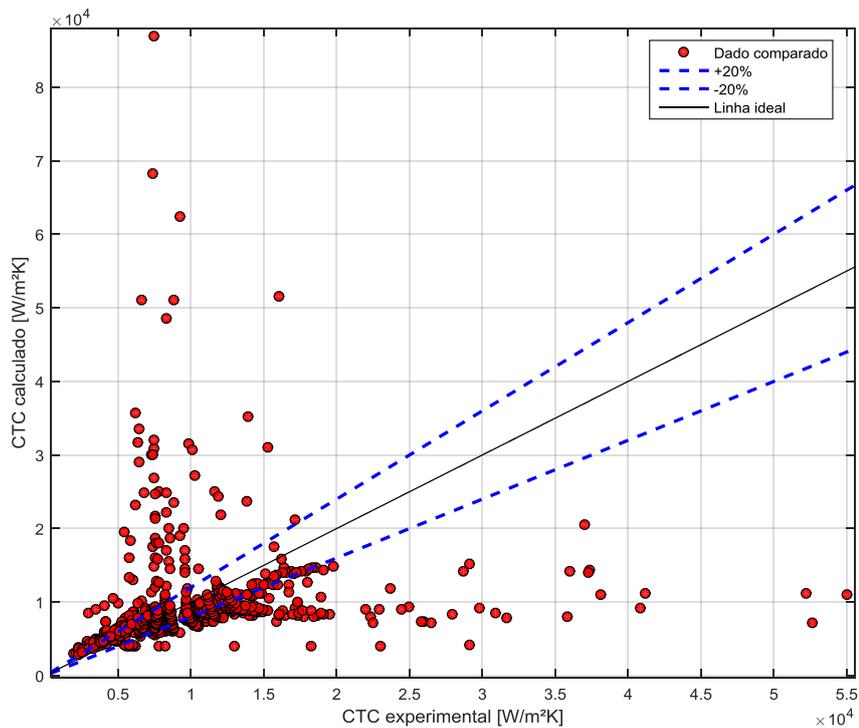
Neste item estão caracterizadas as comparações teórico-experimentais para a correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007), com os valores de CTC experimentais disponíveis no banco de dados para microcanais normais. As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 tratam sobre essa situação, respectivamente para uma banda em porcentagem de ajuste dos valores comparados em  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ .

**Figura 5.1** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007), para  $\phi_{\pm 10}$ .



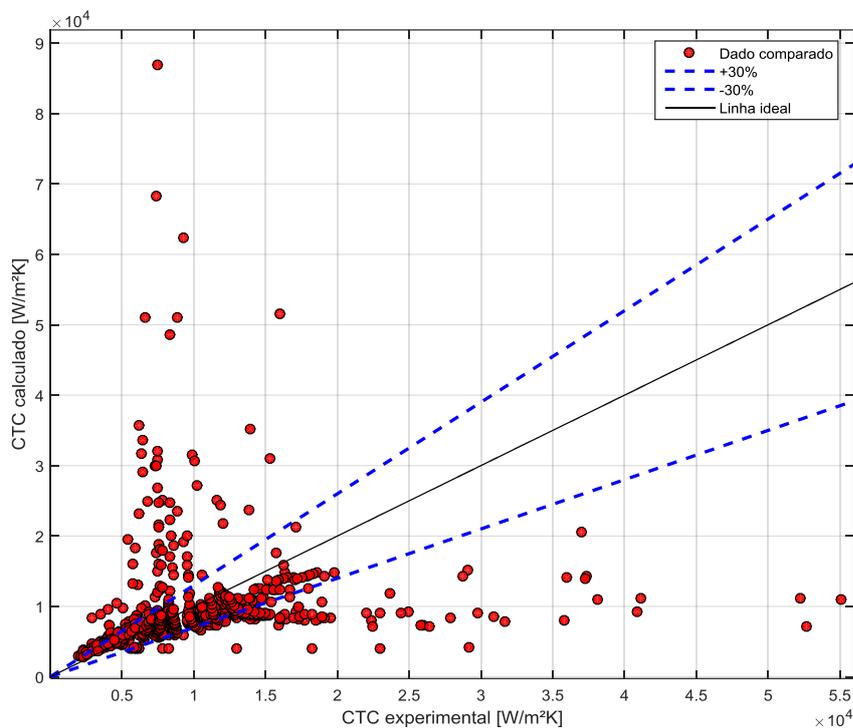
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.2** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007), para  $\phi_{\pm 20}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.3** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007), para  $\phi_{\pm 30}$ .

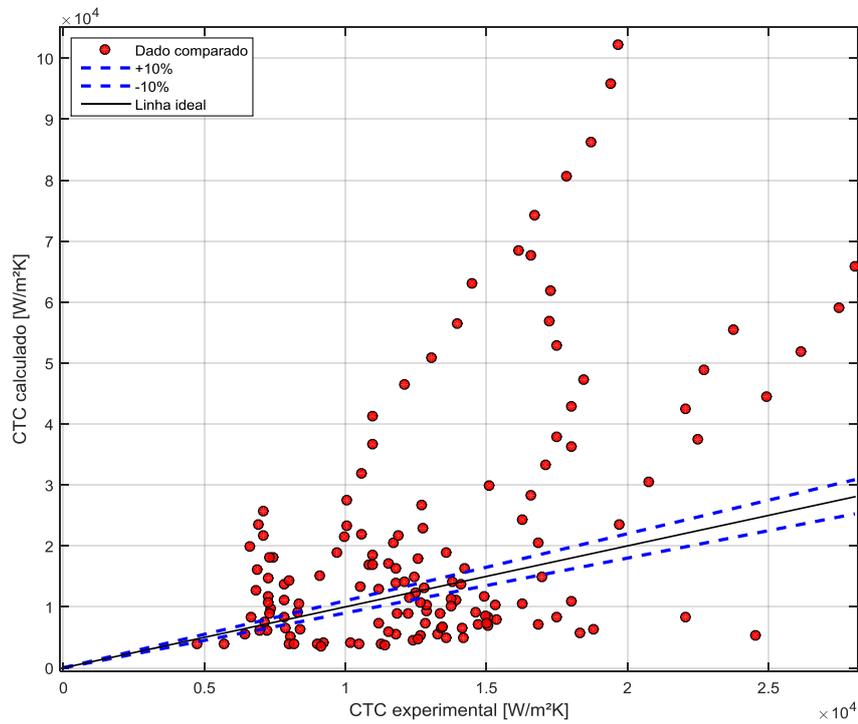


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.2 Banco de dados: microcanais nanoestruturados

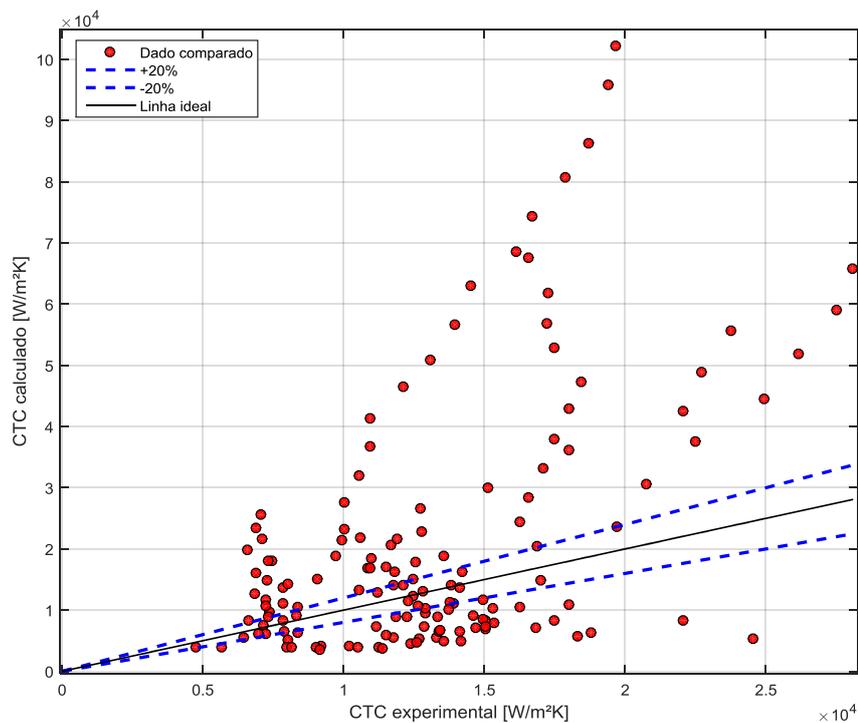
Neste item estão caracterizadas as comparações teórico-experimentais para a correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007), com os valores de CTC experimentais disponíveis no banco de dados para microcanais nanoestruturados. As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 tratam sobre esse caso, respectivamente para uma faixa de ajuste em porcentagem dos valores comparados em  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ .

**Figura 5.4** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007), para  $\Phi_{\pm 10}$ .



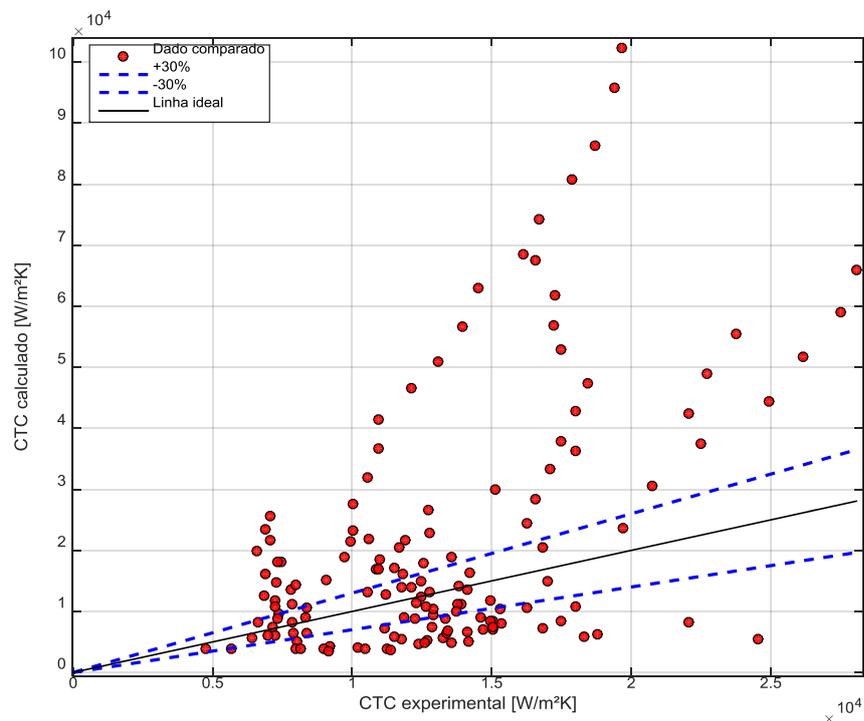
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.5** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007), para  $\Phi_{\pm 20}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.6** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Saitoh, Daiguji e Hihara (2007), para  $\phi_{\pm 30}$ .



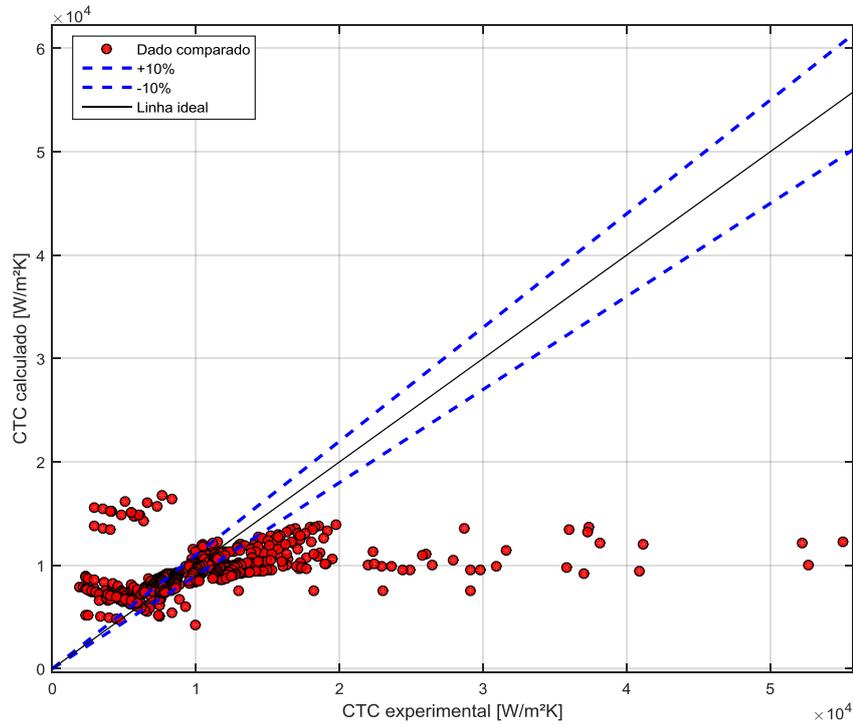
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.2 Valores de CTC para a correlação de Li e Wu (2010)

### 5.2.1 Banco de dados: microcanais normais

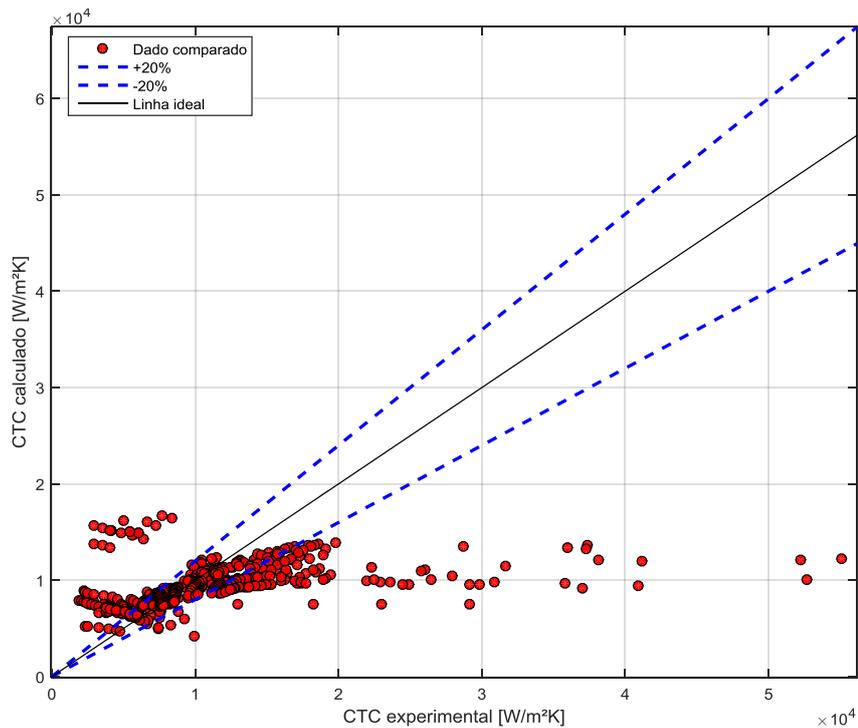
Neste item estão caracterizadas as comparações teórico-experimentais para a correlação de Li e Wu (2010), com os valores de CTC experimentais disponíveis no banco de dados para microcanais normais. As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 referem-se à essa situação, respectivamente para uma banda em porcentagem de ajuste dos valores comparados em  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ .

**Figura 5.7** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Li e Wu (2010), para  $\Phi_{\pm 10}$ .



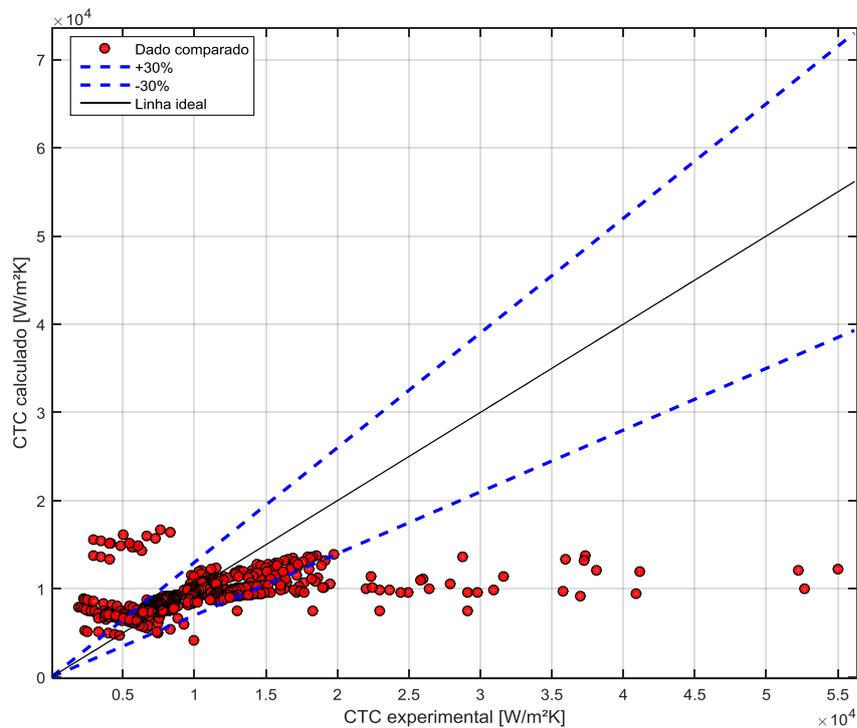
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.8** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Li e Wu (2010), para  $\Phi_{\pm 20}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.9** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Li e Wu (2010), para  $\phi_{\pm 30}$ .

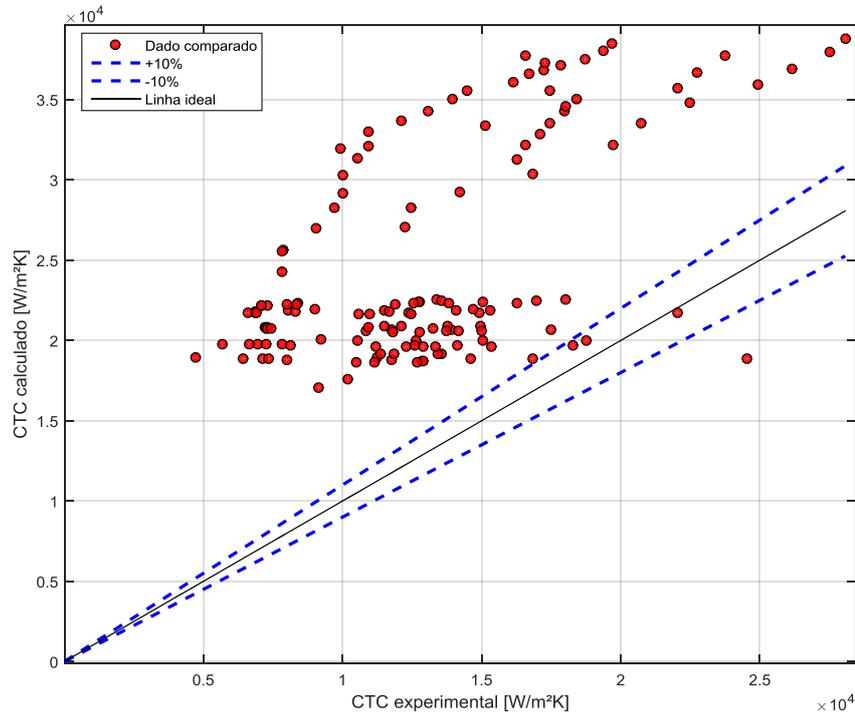


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.2 Banco de dados: microcanais nanoestruturados

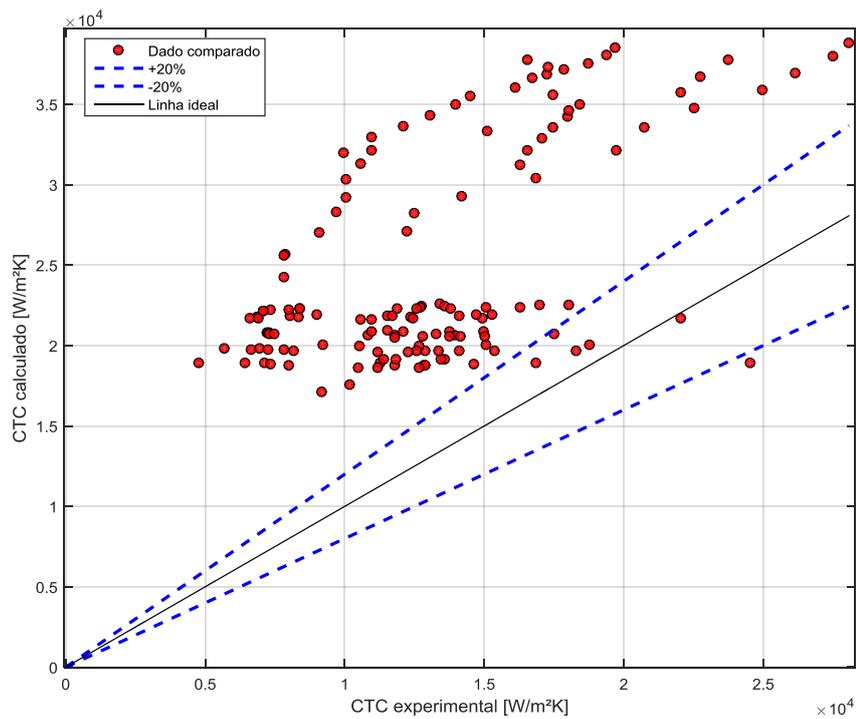
Neste item estão caracterizadas as comparações teórico-experimentais para a correlação de Li e Wu (2010), com os valores de CTC experimentais disponíveis no banco de dados para microcanais nanoestruturados. As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 ilustram esse caso, respectivamente para uma banda de ajuste em porcentagem dos valores comparados em  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ .

**Figura 5.10** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Li e Wu (2010), para  $\phi_{\pm 10}$ .



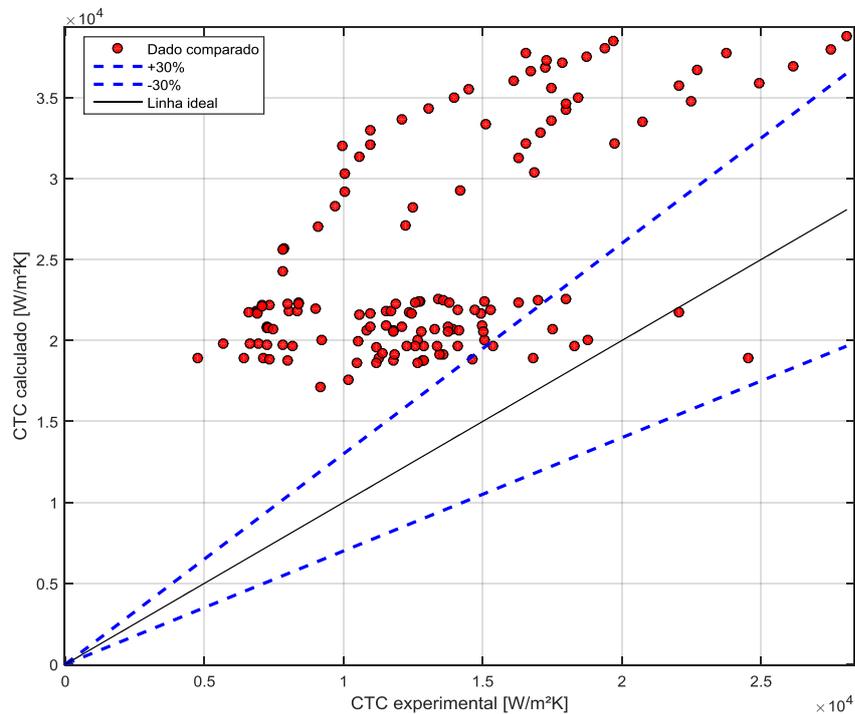
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.11** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Li e Wu (2010), para  $\phi_{\pm 20}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.12** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Li e Wu (2010), para  $\Phi_{\pm 30}$ .



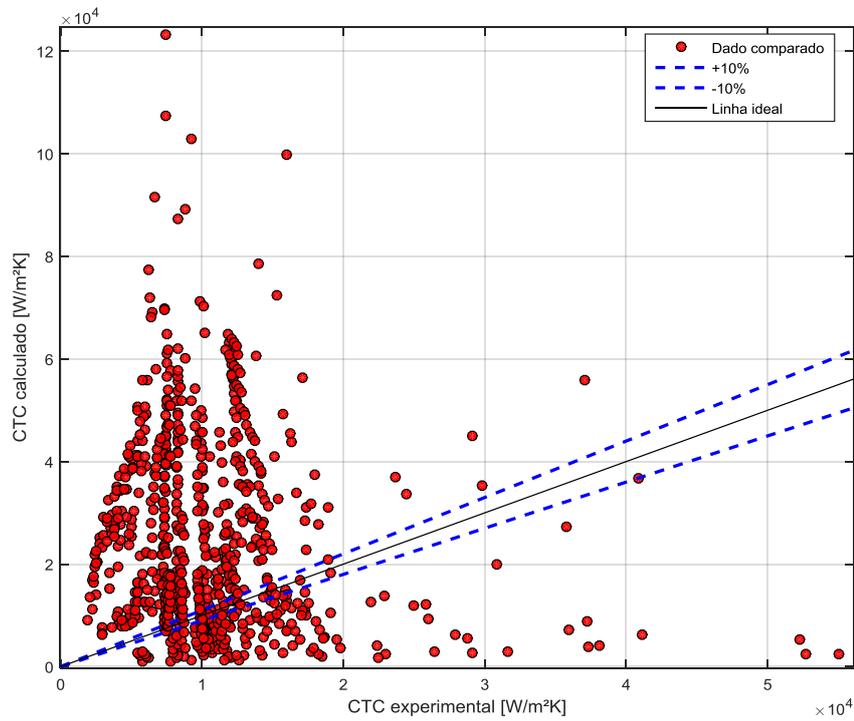
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3 Valores de CTC para a correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013)

#### 5.3.1 Banco de dados: microcanais normais

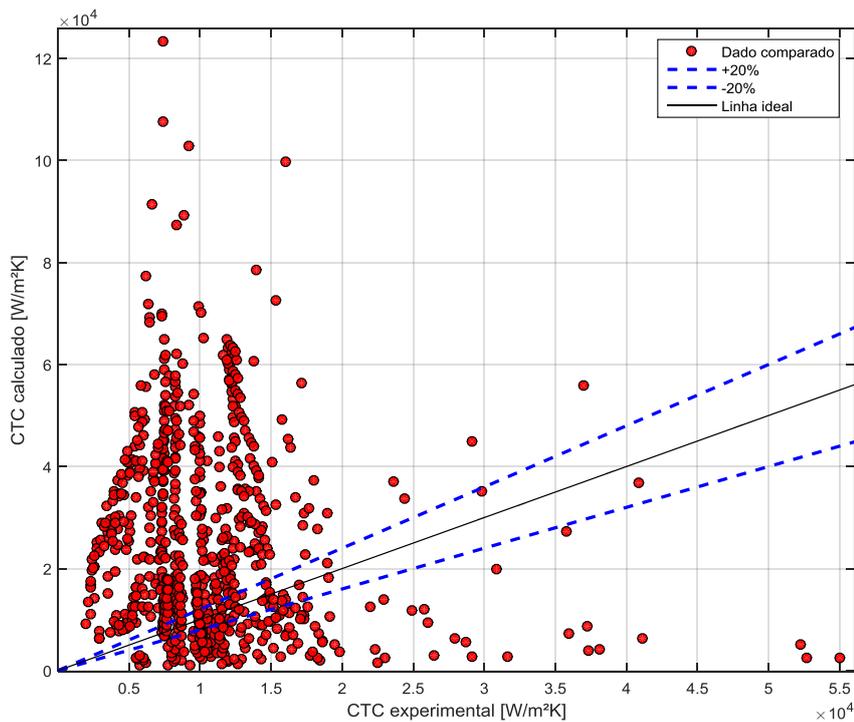
Neste item estão caracterizadas as comparações teórico-experimentais para a correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013), com os valores de CTC experimentais disponíveis no banco de dados para microcanais normais. As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 ilustram esse caso, respectivamente para uma banda de localização dos dados em porcentagem dos valores comparados em  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ .

**Figura 5.13** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013), para  $\phi_{\pm 10}$ .



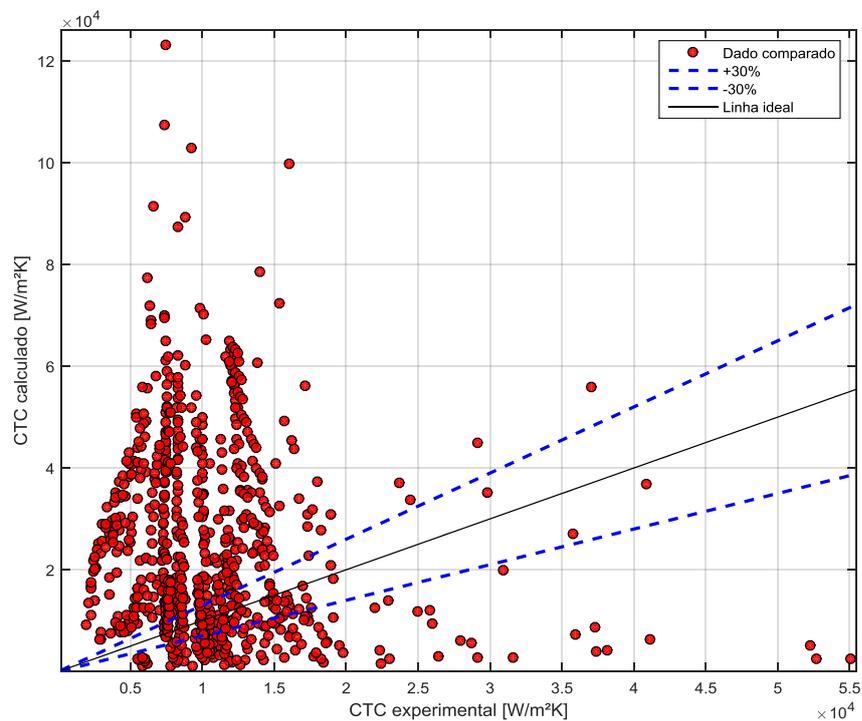
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.14** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013), para  $\phi_{\pm 20}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.15** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013), para  $\phi_{\pm 30}$ .

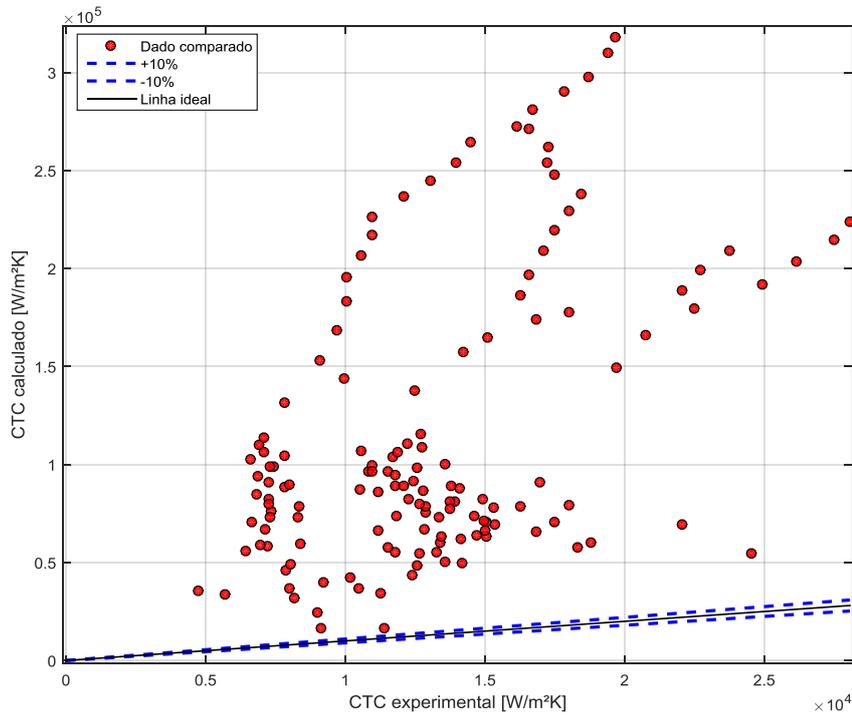


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3.2 Banco de dados: microcanais nanoestruturados

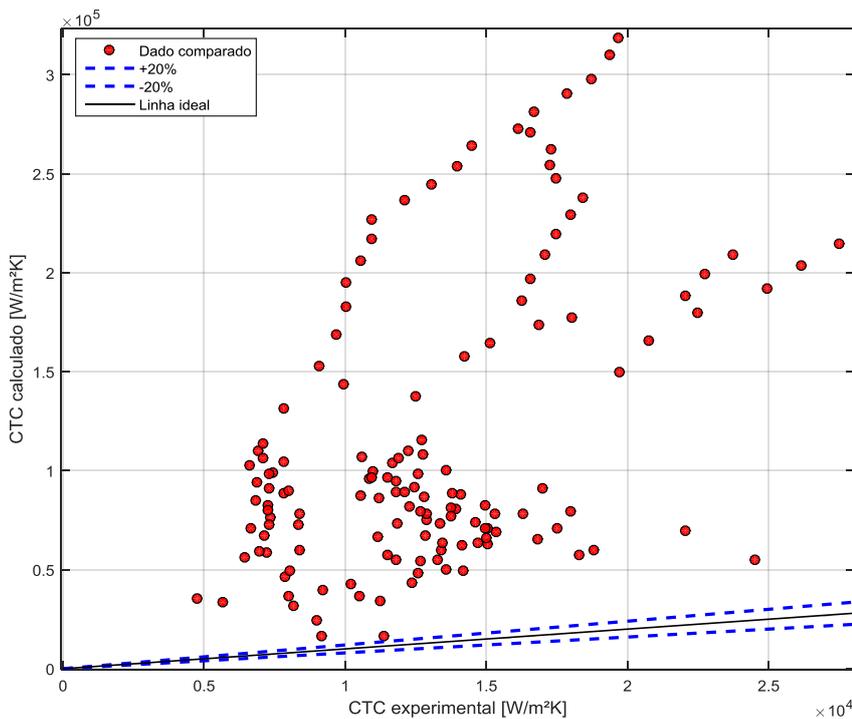
Neste item estão ilustradas as comparações teórico-experimentais para a correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013), com os valores de CTC experimentais disponíveis no banco de dados para microcanais nanoestruturados. As Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 tratam sobre essa situação, respectivamente para uma banda em porcentagem de ajuste dos valores comparados em  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ .

**Figura 5.16** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013), para  $\Phi_{\pm 10}$ .



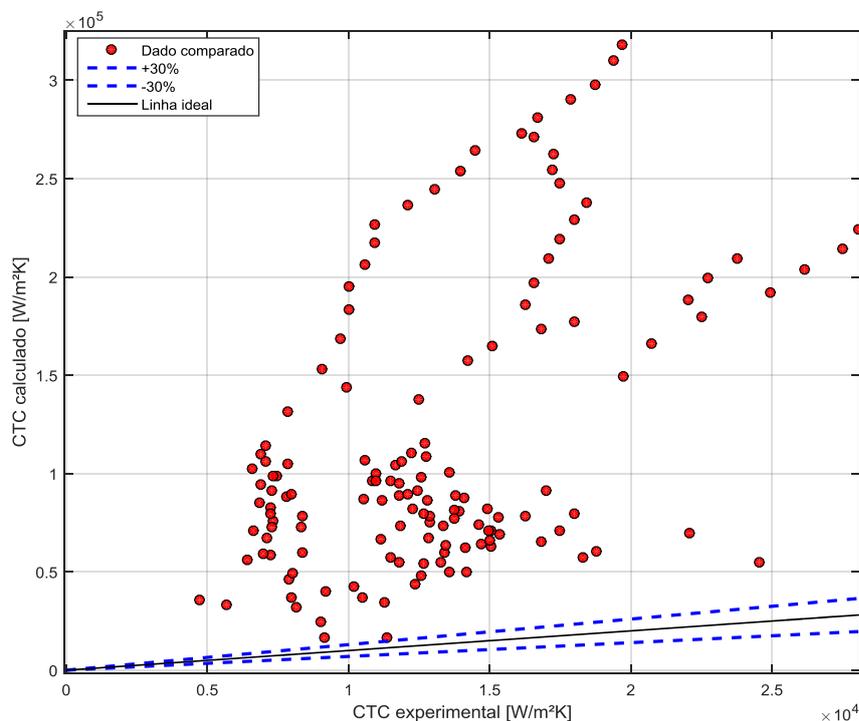
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.17** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013), para  $\Phi_{\pm 20}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.18** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Mahmoud e Karayiannis (2013), para  $\phi_{\pm 30}$ .



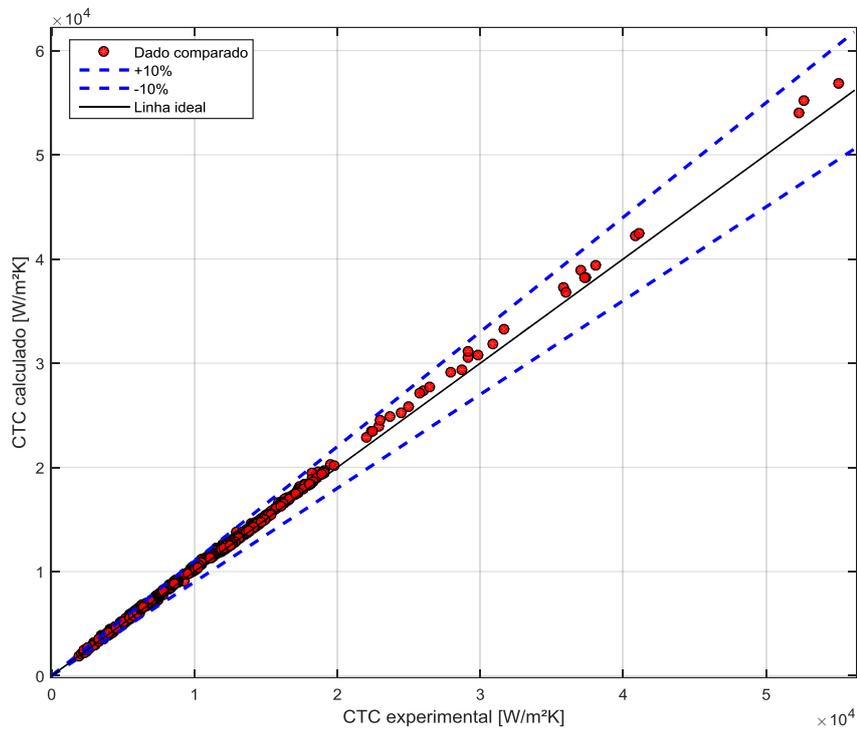
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.4 Valores de CTC para a correlação de Fang et al. (2017)

### 5.4.1 Banco de dados: microcanais normais

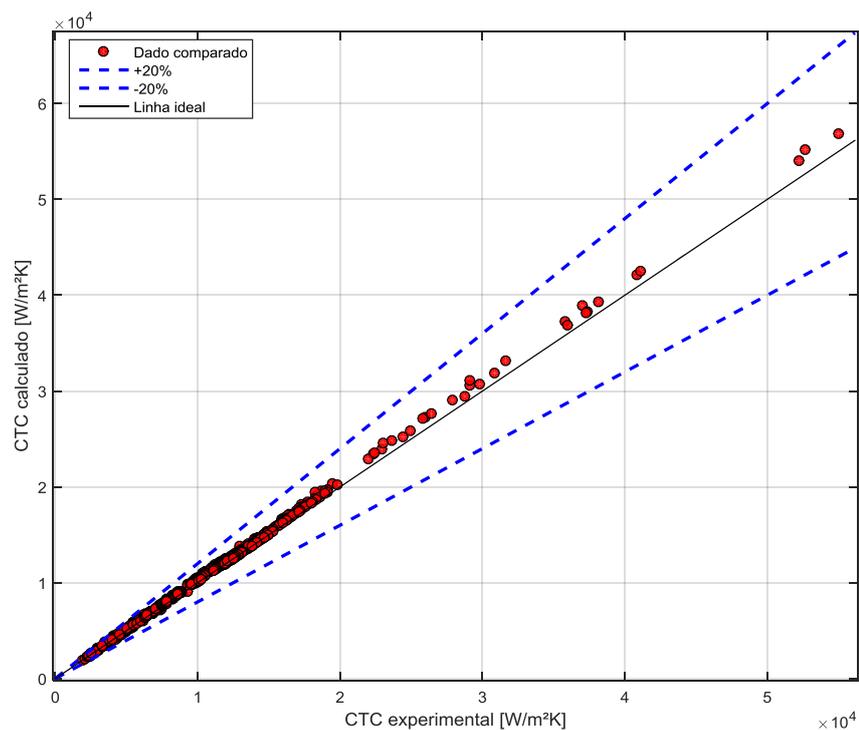
Neste item estão ilustradas as comparações teórico-experimentais para a correlação de Fang et al. (2017), com os valores de CTC experimentais disponíveis no banco de dados para microcanais normais. As Figuras 5.19, 5.20 e 5.21 tratam sobre essa situação, respectivamente para uma banda em porcentagem de ajuste dos valores comparados em  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ .

**Figura 5.19** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Fang et al. (2017), para  $\phi_{\pm 10}$ .



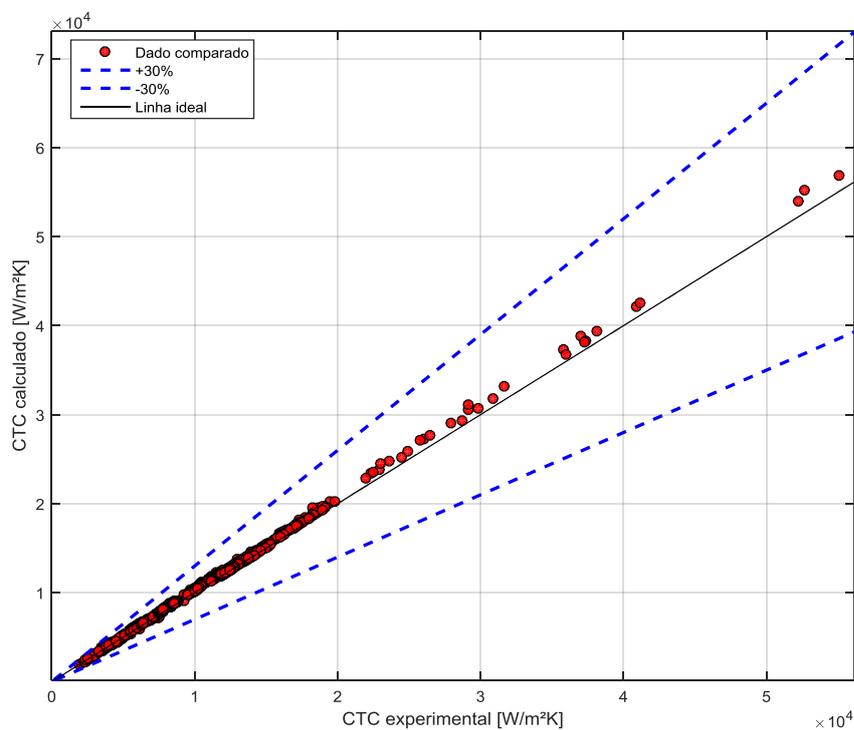
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.20** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Fang et al. (2017), para  $\phi_{\pm 20}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.21** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Fang et al. (2017), para  $\Phi_{\pm 30}$ .

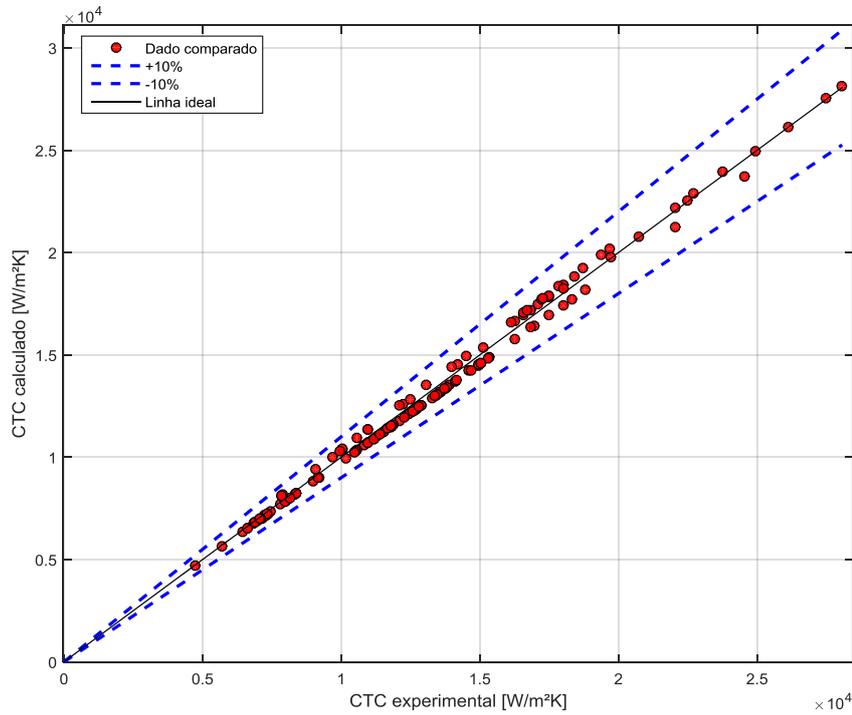


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.4.2 Banco de dados: microcanais nanoestruturados

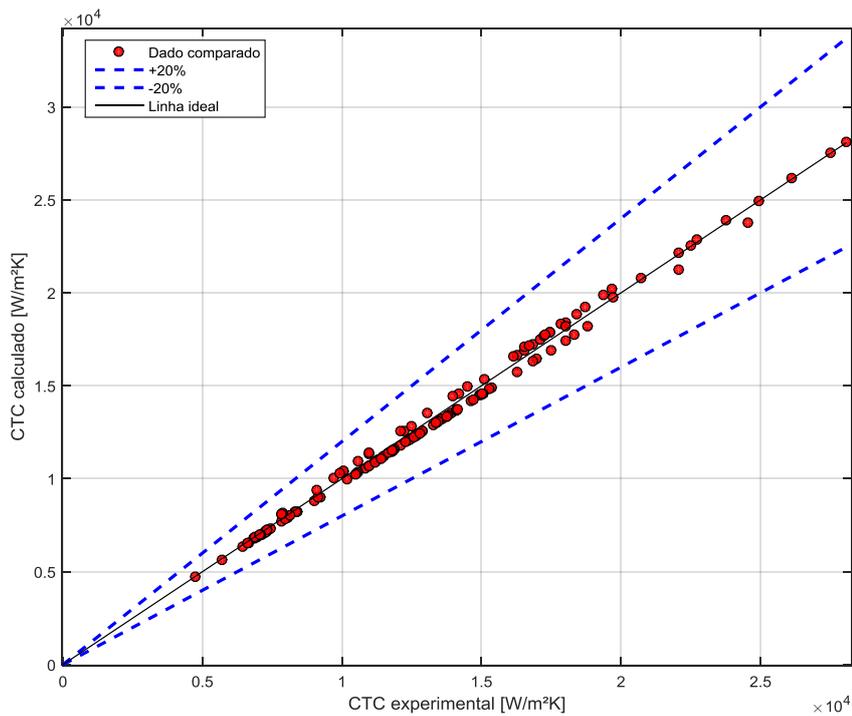
Neste item estão ilustradas as comparações teórico-experimentais para a correlação de Fang et al. (2017), com os valores de CTC experimentais disponíveis no banco de dados para microcanais nanoestruturados. As Figuras 5.22, 5.23 e 5.24 referem-se a essa situação, respectivamente para uma banda em porcentagem de ajuste dos valores comparados em  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ .

**Figura 5.22** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Fang et al. (2017), para  $\phi_{\pm 10}$ .



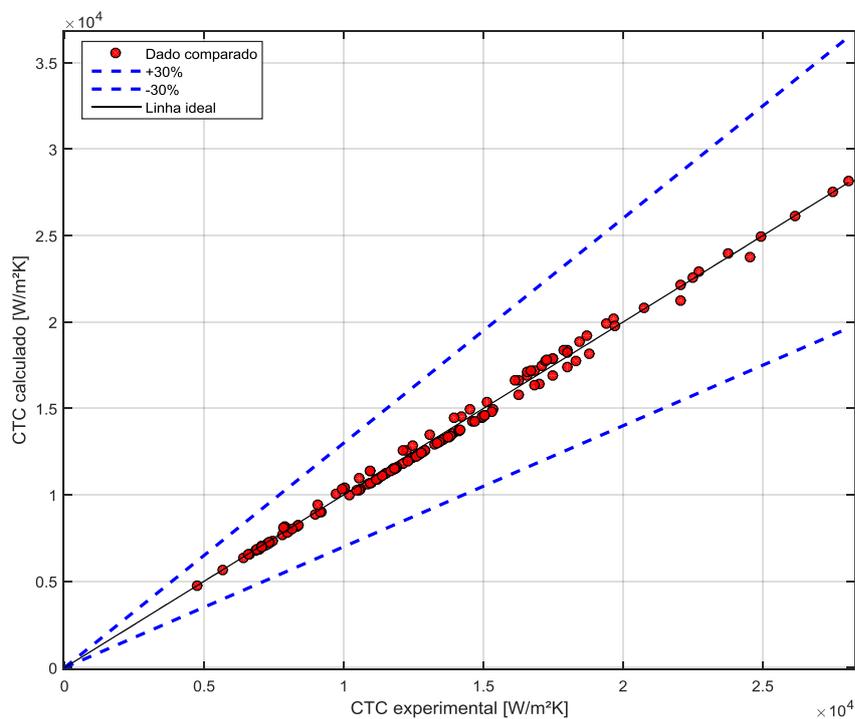
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.23** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Fang et al. (2017), para  $\phi_{\pm 20}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.24** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Fang et al. (2017), para  $\Phi_{\pm 30}$ .



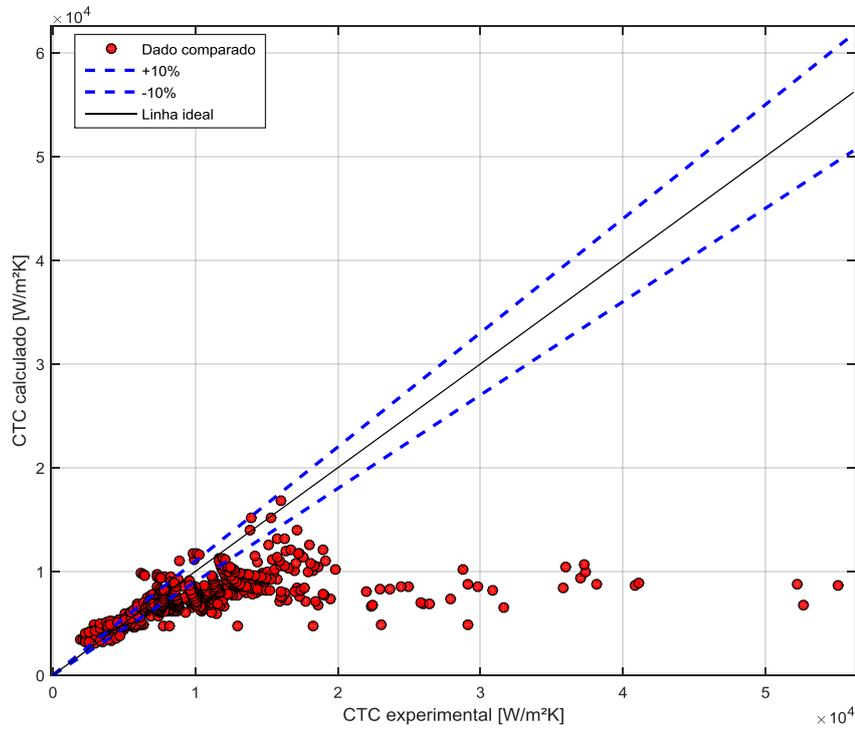
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.5 Valores de CTC para a correlação de Tibiriçá et al. (2017)

### 5.5.1 Banco de dados: microcanais normais

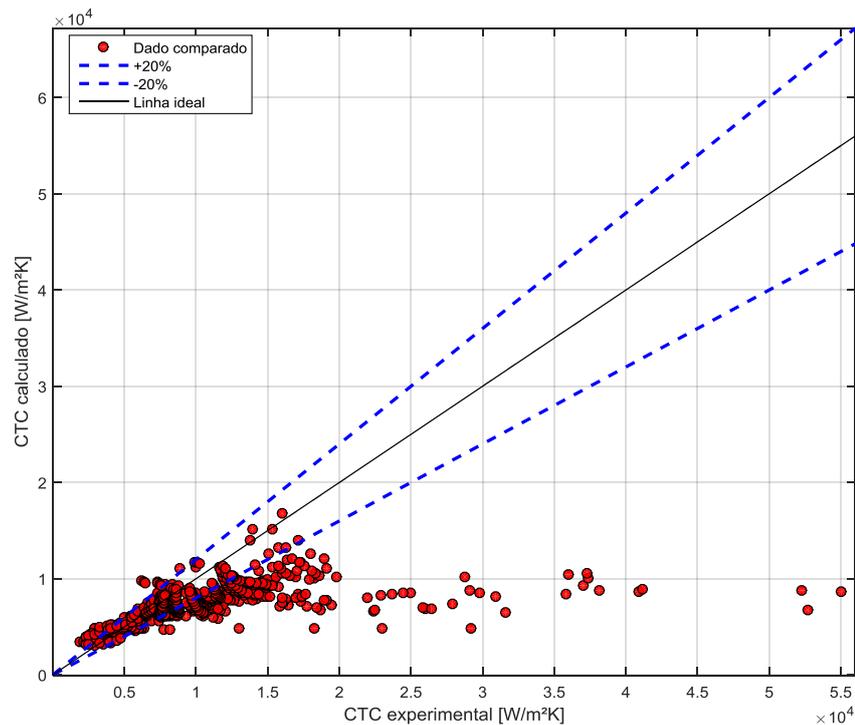
Neste item estão ilustradas as comparações teórico-experimentais para a correlação de Tibiriçá et al. (2017), com os valores de CTC experimentais disponíveis no banco de dados para microcanais normais. As Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 dizem respeito a essa situação, respectivamente para uma banda em porcentagem de ajuste dos valores comparados em  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ .

**Figura 5.25** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Tibiriçá et al. (2017), para  $\phi_{\pm 10}$ .



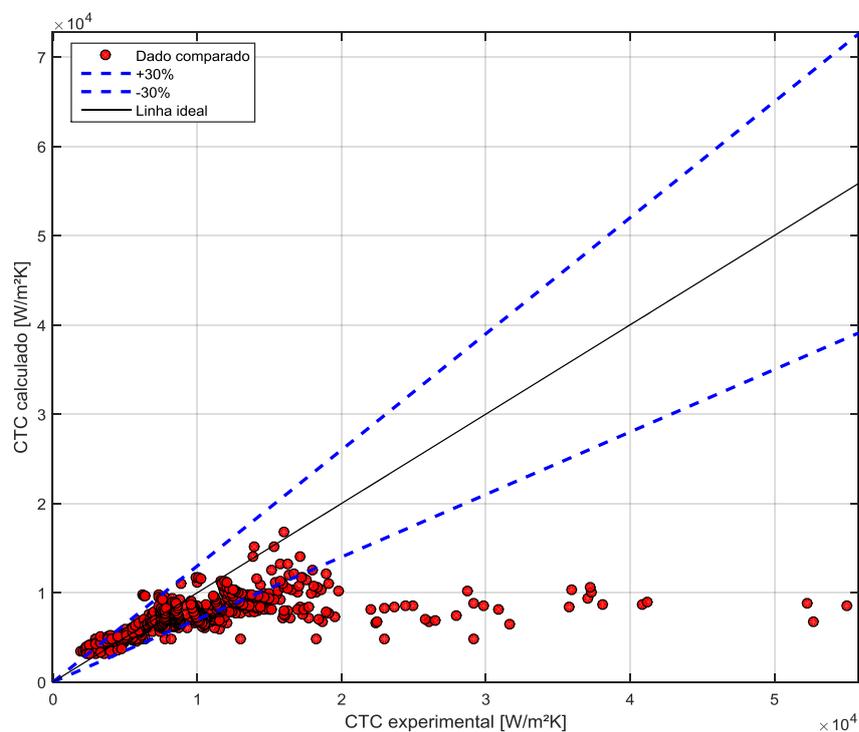
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.26** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Tibiriçá et al. (2017), para  $\phi_{\pm 20}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.27** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais normais com a correlação de Tibiriçá et al. (2017), para  $\phi_{\pm 30}$ .

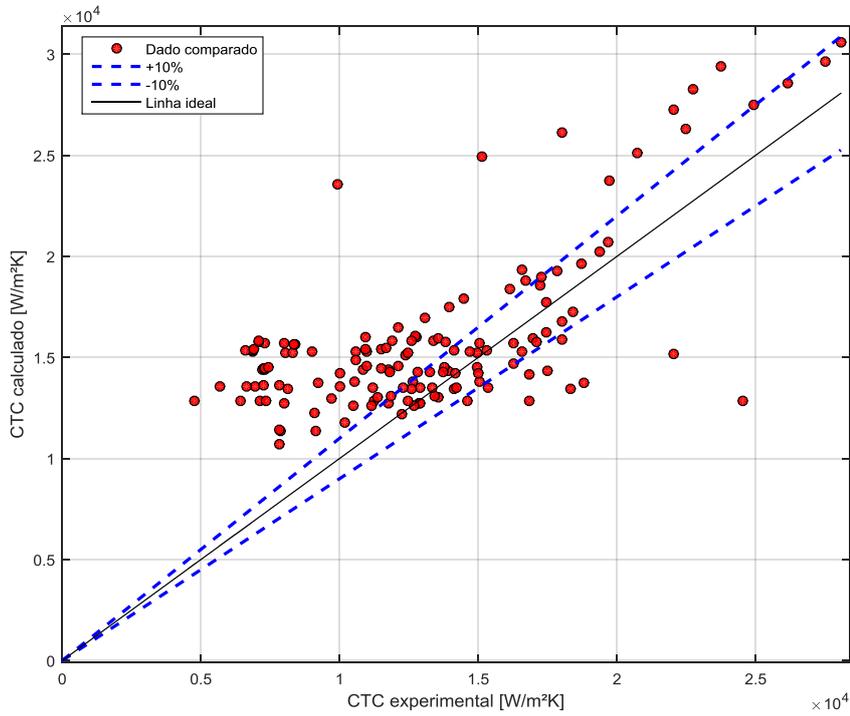


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.5.2 Banco de dados: microcanais nanoestruturados

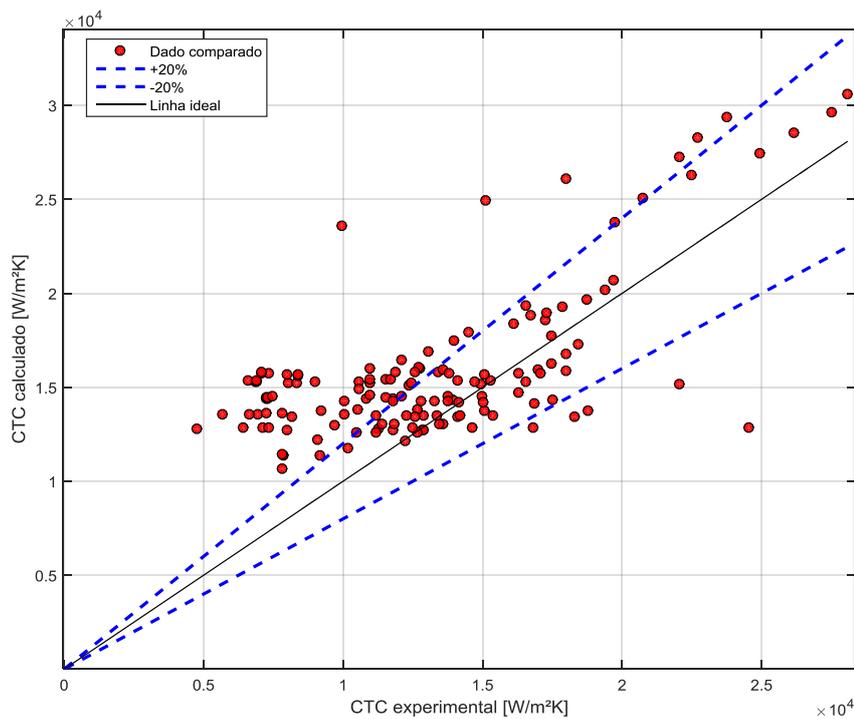
Neste item estão ilustradas as comparações teórico-experimentais para a correlação de Tibiriçá et al. (2017), com os valores de CTC experimentais disponíveis no banco de dados para microcanais nanoestruturados. As Figuras 5.28, 5.29 e 5.30 referem-se a essa situação, respectivamente para uma banda em porcentagem de ajuste dos valores comparados em  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 30\%$ .

**Figura 5.28** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Tibiriçá et al. (2017), para  $\phi_{\pm 10}$ .



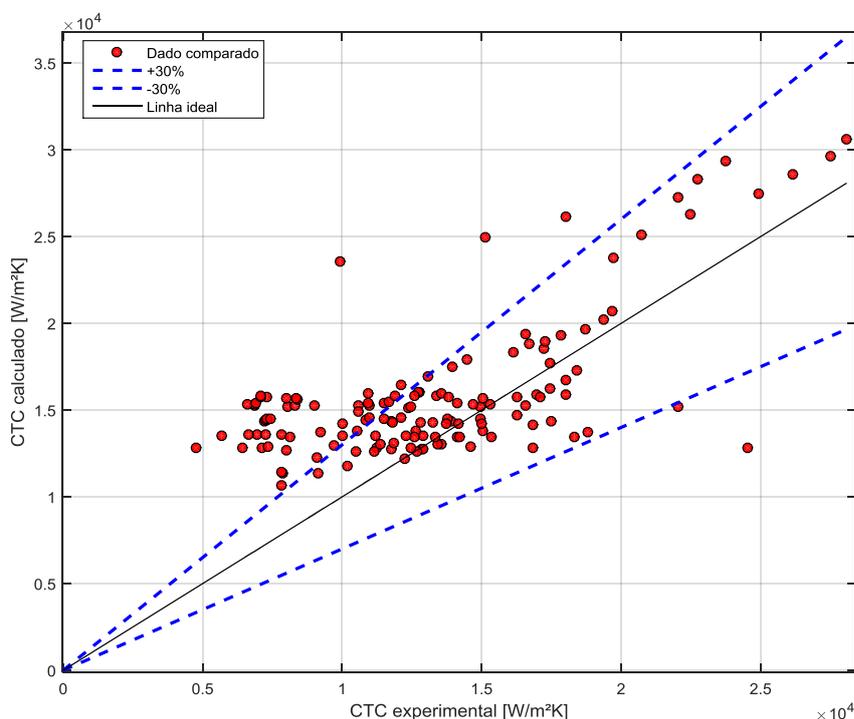
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.29** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Tibiriçá et al. (2017), para  $\phi_{\pm 20}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 5.30** - Curva comparativa do banco de dados de microcanais nanoestruturados com a correlação de Tibiriçá et al. (2017), para  $\phi_{\pm 30}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.6 Resultados estatísticos e discussão

Diante de todas as figuras apresentadas, também utilizando o programa MATLAB®, elaborou-se um algoritmo para calcular os valores estatísticos baseados na métrica de erro deste trabalho. A Tabela 5.1 apresenta os dados referentes ao banco de dados de microcanais normais, enquanto que a Tabela 5.2, traz os dados para o banco de dados de microcanais nanoestruturados.

Os resultados estatísticos levam à constatação de dispersão e/ou convergência dos valores de coeficiente de transferência de calor calculados em contrapartida aos valores de coeficiente de transferência de calor experimentais obtidos na literatura a uma banda de ajuste predeterminada. Sendo assim, quanto maior a quantidade de pontos inseridos nesta região de confiabilidade para os modelos matemáticos, menores foram os valores de MAD e MRD, e maiores os valores de  $\phi$ .

A partir disso, com os resultados disponíveis nas tabelas mencionadas anteriormente, constatou-se que a correlação para predição do coeficiente de transferência de calor durante a ebulição convectiva em microcanais proposta por Fang et al. (2017) superou todas as outras

correlações trabalhadas nesta pesquisa. Isso é explicado pelo fato de que, observando-se os valores de MAD e MRD para a correlação de Fang et al. (2017), em ambos os casos de microcanais (normais e nanoestruturados), verificaram-se que os parâmetros consistiram naqueles de menores resultados.

O mesmo aconteceu para todos os valores de  $\emptyset$ , sendo que os dados obtidos por meio da correlação de Fang et al. (2017) ajustaram-se em sua totalidade (100%) em todas as situações propostas neste trabalho. Dessa forma, a correlação de Fang et al. (2017) apresenta ser de grande valia, até mesmo para a situação de microcanais nanoestruturados, que possuem poucos bancos de dados disponíveis na literatura especializada com todos os parâmetros necessários para aplicação nas correlações de obtenção do CTC.

Uma explicação para a confiabilidade da correlação de Fang et al. (2017) se refere à quantidade de pontos (17.778) utilizados na concepção da correlação, para uma diversa gama de fluidos (13 tipos de fluidos). Além do mais, possui um parâmetro  $F_f$ , denominado fator de dependência do fluido, que implica no melhor ajuste estatístico da correlação baseado no tipo de fluido.

A segunda melhor correlação correspondeu àquela proposta por Tibiriçá et al. (2017), possuindo valores de  $\emptyset_{\pm 30}$  pouco superiores a 60%. Além disso, possuiu a maioria dos valores de MAD e MRD inferiores aos valores resultantes das demais correlações aplicadas.

Outra explicação que remete às melhores correlações constatadas, correspondentes aos estudos de Fang et al. (2017) e Tibiriçá et al. (2017), se refere ao contexto mais atual em que foram concebidas. Sendo assim, infere-se que os parâmetros empregados nos modelos matemáticos foram passíveis de informações mais consolidadas e, conseqüentemente, os seus resultados seriam mais confiáveis.

Tratando-se do restante das correlações utilizadas, não se recomenda seus usos para o banco de dados adotado devido à dispersão acentuada em relação à margem de ajuste de dados  $\emptyset$ .

Tabela 5.1 – Parâmetros estatísticos para o banco de dados de microcanais normais.

Correlação	Parâmetros	Banco de Dados					
		Bertsh et al. (2008)	Wang et al. (2009)	Tibiriçá e Ribatski (2010)	Oh e Son (2011)	Mahmoud et al. (2011)	TOTAL
Saitoh et al. (2007)	$\emptyset_{\pm 10\%}$	0%	28,57%	18,83%	22,50%	3,17%	18,61%
	$\emptyset_{\pm 20\%}$	14,29%	56,04%	48,24%	25%	23,53%	42,40%
	$\emptyset_{\pm 30\%}$	28,57%	76,09%	71,77%	37,50%	58,37%	66,76%
	MAD	12,06	113,36%	98,17	26,06	77,3	326,97
	MRD	12,06	16,83%	97,84	25,92	-62,28	90,37
Li e Wu (2010)	$\emptyset_{\pm 10\%}$	0%	46,15%	18,83%	7,50%	34,84%	36,11%
	$\emptyset_{\pm 20\%}$	0%	69,51%	31,77%	15%	56,56%	56,22%
	$\emptyset_{\pm 30\%}$	0%	93,41%	43,53%	22,50%	72,40%	74,69%
	MAD	44,62	49,29	33,03	47,05	51,41	225,41
	MRD	44,62	-26,77	28,37	45,34	-41,86	49,69
Mahmoud e Karayiannis (2013)	$\emptyset_{\pm 10\%}$	23,81%	6,32%	0%	0%	3,62%	4,92%
	$\emptyset_{\pm 20\%}$	33,33%	10,44%	0%	0%	13,57%	10,26%
	$\emptyset_{\pm 30\%}$	42,86%	14,84%	0%	0%	20,36%	14,77%
	MAD	12,43	817,55	508,56	196,88	158,54	1694,0
	MRD	11,13	802,67	508,56	196,88	1,03	1520,3
Fang et al. (2017)	$\emptyset_{\pm 10\%}$	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
	$\emptyset_{\pm 20\%}$	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
	$\emptyset_{\pm 30\%}$	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
	MAD	<b>1,38</b>	<b>8,24</b>	<b>2,36</b>	<b>0,59</b>	<b>8,55</b>	<b>21,12</b>
	MRD	<b>1,38</b>	<b>8,24</b>	<b>2,36</b>	<b>-0,44</b>	<b>8,55</b>	<b>20,08</b>
Tibiriçá et al. (2017)	$\emptyset_{\pm 10\%}$	23,81%	34,34%	50,59%	20%	2,26%	25,44%
	$\emptyset_{\pm 20\%}$	71,43%	61,81%	80%	50%	8,60%	47,47%
	$\emptyset_{\pm 30\%}$	90,48%	83,51%	92,94%	60%	32,13%	67,99%
	MAD	3,84	61,61	9,77	12,05	85,58	172,85
	MRD	-0,3098	-53,14	7,45	8,23	-85,28	-123,06

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 5.2** – Parâmetros estatísticos para o banco de dados de microcanais nanoestruturados.

Correlação	Parâmetros	Banco de Dados		
		Choi et al. (2011)	Phan et al. (2012)	TOTAL
Saitoh et al. (2007)	$\emptyset_{\pm 10\%}$	4,25%	6,32%	5,63%
	$\emptyset_{\pm 20\%}$	10,68%	18,95%	16,20%
	$\emptyset_{\pm 30\%}$	14,89%	29,47%	24,65%
	MAD	75,71	52,38	128,08
	MRD	74,78	3,72	78,50
Li e Wu (2010)	$\emptyset_{\pm 10\%}$	0%	3,16%	2,11%
	$\emptyset_{\pm 20\%}$	0%	5,26%	3,52%
	$\emptyset_{\pm 30\%}$	0%	9,47%	6,34%
	MAD	57,21	92,54	149,75
	MRD	53,21	92,05	149,26
Mahmoud e Karayiannis (2013)	$\emptyset_{\pm 10\%}$	0%	0%	0%
	$\emptyset_{\pm 20\%}$	0%	0%	0%
	$\emptyset_{\pm 30\%}$	0%	0%	0%
	MAD	585,78	567,94	1153,7
	MRD	585,78	567,94	1153,7
Fang et al. (2017)	$\emptyset_{\pm 10\%}$	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
	$\emptyset_{\pm 20\%}$	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
	$\emptyset_{\pm 30\%}$	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
	MAD	<b>1,12</b>	<b>2,15</b>	<b>3,2716</b>
	MRD	<b>1,12</b>	<b>-2,15</b>	<b>-1,03</b>
Tibiriçá et al. (2017)	$\emptyset_{\pm 10\%}$	40,42%	28,42%	32,39%
	$\emptyset_{\pm 20\%}$	53,19%	42,11%	45,77%
	$\emptyset_{\pm 30\%}$	70,21%	57,89%	61,97%
	MAD	10,83	39,77	50,6
	MRD	9,5	34,77	44,28

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A seguir são apresentadas as principais conclusões deste trabalho:

- Existem muitos critérios para definição da região de transição entre macro e microcanais. Dentre eles se encontram abordagens através de métodos de fabricação e na aplicação de trocadores de calor. Além disso, métodos mecanicistas foram também sugeridos, por exemplo, levando-se em consideração os efeitos inerciais, de arrasto sobre bolhas coalescidas e o grau de confinamento. Outros métodos elaborados tratam da questão da molhabilidade líquida associada ao ângulo de contato. No entanto, muitas divergências são verificadas para estabelecer a faixa de transição, o que caracteriza uma questão ainda desafiadora para os pesquisadores.
- Os métodos para obtenção de superfícies micro/nanoestruturadas em microcanais podem ser divididos em quatro categorias: microusinagem, processos químicos, revestimentos com materiais especiais e sistemas micro/nanoeletromecânicos. Cada método possui suas particularidades e dificuldades de implementação, sendo, de acordo com alguns pesquisadores, o elevado custo de fabricação um fator importante a ser considerado.
- Nos trabalhos revisados da literatura, identificaram-se os maiores valores em porcentagem das melhorias do CTC para cada método de modificação superficial em microcanais. Para o método RSME, a melhoria mais acentuada do CTC consistiu em aproximadamente 100%, comparado com situações sem revestimento superficial. Para o método PQ o valor mais elevado consistiu em 326% de melhoria. Por fim, para o método SMEM/SNEM, os melhores resultados observados para o coeficiente de transferência de calor referiram-se a 31%. Independentemente do método adotado, há um consenso da melhoria do CTC com a adesão de nanoestruturas aos microcanais.
- É possível verificar na literatura inúmeras correlações para predição do coeficiente de transferência de calor para a ebulição convectiva em canais de reduzido diâmetro. Porém, a maioria dessas correlações são referentes a microcanais normais. Não foram observadas na literatura especializada, durante este estudo, correlações que tivessem predições de CTC específicas para microcanais nanoestruturados.
- Por meio da avaliação comparativa das correlações convencionais para a predição do coeficiente de transferência de calor é possível verificar que, das cinco correlações utilizadas, a correlação proposta por Fang et al. (2017) gerou os melhores ajustes aos

dados experimentais, apresentando menores valores de MAD e MRD e porcentagens de 100% de ajuste às bandas de erro percentuais convencionadas. Outro fator relevante consistiu no fato desta correlação ter sido concebida através de estudos com 13 tipos de fluidos distintos e 17.778 pontos experimentais. Isso caracteriza a robustez deste modelo matemático. Sendo assim, infere-se que essa correlação pode ser indicada para determinação do CTC nos cálculos de trocadores de calor baseados em microcanais, tanto normais, quanto nanoestruturados.

## 6.1 Propostas para trabalhos futuros

Com base nos estudos realizados, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Investigação da influência das nanoestruturas dos microcanais nas correlações disponíveis na literatura especializada, variando-se parâmetros, tais como a utilização de fator de forma. Isso possibilitaria a obtenção de novas correlações baseadas em métodos já consolidados em microcanais normais, como por exemplo a modificação da correlação de Fang et al. (2017).
- Obtenção de correlações para a ebulição convectiva em microcanais baseadas em investigação experimental com a adesão de nanoestruturas utilizando algoritmos genéticos de otimização. Para tal, seriam necessários equipamentos de medições cada vez mais sofisticados objetivando, possivelmente, serem encontrados os parâmetros de maior influência relacionados às superfícies modificadas do canal.
- Aplicação de correlações baseadas na ebulição convectiva em microcanais para banco de dados de tubos convencionais estruturados (diâmetro hidráulico superior a 3 mm). Dessa forma, poderia ser investigada a utilização universal de correlações para o CTC durante a ebulição convectiva em escoamento interno em canais normais e de reduzido diâmetro.

## REFERÊNCIAS

- ALAM, T.; LI, W.; CHANG, W.; YANG, F.; KHAN, J.; LI, C. A comparative study of flow boiling HFE-7100 in silicon nanowire and plainwall microchannels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 124, p. 829-840, 2018.
- AMMERMAN, C. N.; YOU, S. M. Enhancing Small-Channel Convective Boiling Performance Using a Microporous Surface Coating. **Journal of Heat Transfer**, v. 123, p. 976-983, 2001.
- ARCANJO, R. B.; TIBIRIÇÁ, C. B.; RIBATSKI, G. Evaluation of flow patterns and elongated bubble characteristics during the flow boiling of halocarbon refrigerants in micro-scale channel. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 34, p. 766-775, 2010.
- BAI, P.; TANG, T.; TANG, B. Enhanced flow boiling in parallel microchannels with metallic porous coating. **Applied Thermal Engineering**, v. 58, p. 291-297, 2013.
- BANDHAUER, T. M.; BEVIS, T. A. High Heat Flux Boiling Heat Transfer for Laser Diode Arrays. **Proceedings of ASME 2016 14<sup>th</sup> International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels**, p. 1-10, Washington, DC, USA, 2016.
- BARBOSA, J.R.; HEWITT, G. F.; KÖNIG, G.; RICHARDSON, S. M. Liquid entrainment, droplet concentration and pressure gradient at the onset of annular flow in a vertical pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, n. 6, p. 943-961, 2002.
- BARNEA, D.; LUNINSKI, Y.; TAITEL, Y. Flow pattern in horizontal and vertical two-phase flow in small diameter pipes. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 61, p. 617-620, 1983.
- BERTSCH, S. S.; GROLL, E. A.; GARIMELLA, S. V. Refrigerant flow boiling heat transfer in parallel microchannels as a function of local vapor quality. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, p. 4775-4787, 2008.
- BERGLES, A. E.; ROHSENOW, W. M. The determination forced-convection surface boiling heat transfer. **Journal of Heat Transfer**, v. 86, p. 365-372, 1964.
- CARVALHO, C. L.; VARELA, J. A. Construção e Caracterização de um Equipamento para Deposição de Filmes pela Técnica de “Dip Coating”. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 14, n. 4, p. 115-119, 1999.
- CELATA, G. P. Single- and two-phase flow heat transfer in micropipes. **Proceedings of 5<sup>th</sup> European Thermal-Sciences Conference**, p. 1-15, Netherlands, 2008.
- CHEN, J. C. Correlations for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow. **I & E C Process Design and Development**, v. 5, n. 3, p. 322-329, 1966.
- CHENG, L.; RIBATSKI, G.; THOME, J. R. New prediction methods for CO<sub>2</sub> evaporation inside tubes: Part II – An updated general flow boiling heat transfer model based on flow patterns. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, p. 125-135, 2008.

CHENG, L.; XIA, G. Fundamental issues, mechanisms and models of flow boiling heat transfer in microscale channels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 108, p. 97-127, 2017.

CHOI, C.; KIM, D.; HUH, C.; KIM, M. Wettability effect on flow boiling in an MEMS-Based single glass microchannel. **Proceedings of 6<sup>th</sup> International ASME Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels**, p. 1-8, Darmstadt, Germany, 2008.

CHOI, C.; SHIN, J. S.; YU, D. I.; KIM, M. H. Flow boiling behaviors in hydrophilic and hydrophobic microchannels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 35, p. 816-824, 2011.

CHU, K.-H. **Micro and Nanostructured Surfaces for Enhanced Phase Change Heat Transfer**. 2013. Thesis (Ph. D. in Mechanical Engineering) - Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Massachusetts-USA.

ÇIKIM, T.; ARMAĞAN, E.; OZAYDIN-INCE, G.; KOŞAR, A. Flow Boiling Enhancement in Microtubes With Crosslinked pHEMA Coatings and the Effect of Coating Thickness. **Journal of Heat Transfer**, v. 136, p. 081504.1-11, 2014.

COLEMAN, J. W.; GARIMELLA, S. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 42, p. 2869-2881, 1999.

COLLIER, J.; THOME, J. R. **Convective Boiling and Condensation**. 3 ed. Oxford: Oxford University Press, 1994.

DA SILVA, J. D. **Estudo teórico-experimental da perda de pressão durante a ebulição convectiva de refrigerantes halogenados no interior de microcanais circulares**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.

DAVIS, E. J.; ANDERSON, G. H. The incipience of nucleate boiling in forced convection flow. **AIChE J.**, v. 12, p. 774-780, 1966.

EDEL, Z.; MUKHERJEE, A. Flow Boiling Dynamics of Water and Nanofluids in a Single Microchannel at Different Heat Fluxes. **Journal of Heat Transfer**, v. 137, p. 011501.1-9, 2015.

FANG, X.; WU, Q.; YUAN, Y. A general correlation for saturated flow boiling heat transfer in channels of various size and flow directions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 107, p. 972-981, 2017.

FARAZ, T.; ROOZEBOOM, F.; KNOOPS, H. C. M.; KESSELS, W. M. M. Atomic Layer Etching: What Can We Learn from Atomic Layer Deposition? **ECS Journal of Solid State Science and Technology**, v. 4, p. N5023-N5032, 2015.

- FELCAR, H. O. M.; RIBATSKI, G.; JABARDO, J. M. S. A gas-liquid flow pattern predictive method for macro and mini-scale round channels. **Proceedings of 10<sup>th</sup> UK Heat Transfer Conference**, p. 1-12, Edinburgh, Scotland, 2007.
- GHOSH, D. P.; SHARMA, D.; MOHANTY, D.; SAHA, S. K.; RAJ, R. Facile Fabrication of Nanostructured Microchannels for Flow Boiling Heat Transfer Enhancement. **Heat Transfer Engineering**, p. 1-12, 2018.
- HARIRCHIAN, S.; GARIMELLA, S. V. A comprehensive flow regime map for microchannel flow boiling with quantitative transition criteria. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, p. 3724-3735, 2010.
- KANDLIKAR, S.G. High flux removal with microchannels – A roadmap of challenges and opportunities. **Heat Transfer Engineering**, v. 26, p. 5-14, 2005.
- KANDLIKAR, S.G. Scale effects on flow boiling in microchannels: a fundamental perspective. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, n. 7, p. 1073-1085, 2010.
- KANDLIKAR, S.G. Mechanistic Considerations for Enhancing Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels. **Journal of Heat Transfer**, v. 138, p. 021504.1-16, 2016.
- KANDLIKAR, S.G., GRANDE, W.J. Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology. **Heat Transfer Engineering**, v. 24, p. 3-17, 2003.
- KANDLIKAR, S.G. GARIMELA, S.; LI, D.; COLIN, S.; KING, M.R.I. **Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels**. London (UK): Elsevier, 450 p., 2005.
- KARAYIANNIS, T. G.; MAHMOUD, M. M. Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications. **Applied Thermal Engineering**, n. 115, p. 1372-1397, 2017.
- KARIMZADEHKHOU EI, M.; SEZEN, M.; ŞENDUR, K.; MENGÜÇ, M. P.; KOŞAR. Subcooled flow boiling heat transfer of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluids in horizontal microtubes and the effect of surface characteristics and nanoparticle deposition. **Applied Thermal Engineering**, v. 127, p. 536-546, 2017.
- KAYA, A.; DEMIRYÜREK, R.; ARMAĞAN, E.; OZAYDIN-INCE, G.; SEZEN, M.; KOŞAR, A. Boiling heat transfer enhancement in mini/microtubes via polyhydroxyethylmethacrylate (pHEMA) coatings on inner microtube walls at high mass fluxes. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 23, p. 115017.1-11, 2013.
- KEW, P. A.; CORNWELL, K. Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels. **Applied Thermal Engineering**, v. 17, p. 705-715, 1997.
- KHANIKAR, V.; MUDAWAR, I.; FISHER, T. Effects of carbon nanotube coating on flow boiling in a micro-channel. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, p. 3805-3817, 2009.

KHODABANDEH, R.; FURBERG, R. Heat Transfer, flow regime and instability of a nano- and micro-porous structure evaporator in a two-phase thermosiphon loop. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, p. 1183-1192, 2010.

KIM, D. O.; YU, D. I.; JERNG, D. W.; KIM, M. H.; AHN, H. S. Review of boiling heat transfer enhancement on micro/nanostructured surfaces. **Experimental Thermal and Fluid Science**, n. 66, p. 173-196, 2015.

LEÃO, H. L. S. L. **Análise experimental dos efeitos do fluido e da orientação do escoamento no desempenho de dissipadores de calor baseados na ebulição convectiva em microcanais**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.

LI, W.; WU, Z. A general correlation for evaporative heat transfer in micro/mini-channels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, p. 1778-1787, 2010.

LI, D.; WU, G. S.; WANG, W.; WANG, Y. D.; LIU, D.; ZHANG, D. C.; CHEN, Y. F.; PETERSON, G. P.; YANG, R. Enhancing flow boiling heat transfer in microchannels for thermal management with monolithically-integrated silicon nanowires. **Nano Letters**, v. 12, p. 3385-3390, 2012.

LIU, T. Y.; LI, P. L.; LIU, C. W.; GAU, C. Boiling flow characteristics in microchannels with very hydrophobic surface to super-hydrophilic surface. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, p. 126-134, 2011.

MAHMOUD, M. M.; KARAYIANNIS, T. G.; KENNING, D. B R. Surface effects in flow boiling of R134a in microtubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, p. 3334-3346, 2011.

MAHMOUD, M. M.; KARAYIANNIS, T. G. Heat transfer correlation for flow boiling in small to micro tubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 66, p. 553-574, 2013.

MEHENDAL, S. S.; JACOBI A. M.; SHAH, R. K. Fluid Flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design. **Applied Mechanics Reviews**, v. 53, p. 175-193, 2000.

MORSHED, A. K. M. M.; PAUL, T. C.; KHAN, J. Effect of Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coating on flow boiling performance of a microchannel. **Applied Thermal Engineering**, v. 51, p. 1135-1143, 2013.

NEDAEI, M.; MOTEZAKKER, A. R.; ZEYBEK, M. C.; SEZEN, M.; OZAYDIN-INCE, G.; KOŞAR, A. Subcooled flow boiling heat transfer enhancement using polyperfluorodecylacrylate (pPFDA) coated microtubes with different coating thickness. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 86, p. 130-140, 2017.

OH, H-K.; SON, C-H. Evaporation flow pattern and heat transfer of R-22 and R-134a in small diameter tubes. **Heat Mass Transfer**, v. 47, p. 703-717, 2011.

- ONG, C. L.; THOME, J. R. Flow boiling heat transfer of R134a, R236fa, R245fa in a horizontal 1.030 mm circular channel. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 33, p. 651-663, 2009.
- ONG, C. L.; THOME, J. R. Macro-to-micro channel transition in two-phase flow: Part I – Two-phase flow patterns and film thickness measurements. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 35, p. 37-47, 2011.
- PHAN, H. T.; CANEY, N.; MARTY, P.; COLASSON, S.; GAVILLET, J. Flow Boiling of Water on Nanocoated Surfaces in a Microchannel. **Journal of Heat Transfer**, v. 134, p. 020901.1-6, 2012.
- POP, E. Energy dissipation and transport in nanoscale devices. **Nano Res.**, v. 3, p. 147-169, 2010.
- PRAKASH, S; YEOM, J. **Nanofluidics and Microfluidics: Systems and Applications**. 1 ed. Kidlington, Oxford: William Andrew (Elsevier), 2014.
- QU, W.; MUDAWAR, I. Flow boiling heat transfer in two-phase microchannels heat sinks-II. Annular two phase flow model. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, p. 2773-2784, 2003.
- REVELLIN, R.; THOME, J. R. Adiabatic two-phase frictional pressure drops in microchannels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 31, p. 673-685, 2007a.
- REVELLIN, R.; THOME, J. R. A new type of diabatic flow pattern map for boiling heat transfer in microchannels. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 17, p. 788-796, 2007b.
- RIBATSKI, G. **Estudo da ebulição convectiva no interior de canais de dimensões reduzidas**. 2014. Tese (Professor Livre Docente) - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.
- RIBATSKI, G.; WOJTAN, L.; THOME, J. R. An analysis of experimental data and prediction methods for two-phase frictional pressure drop and flow boiling heat transfer in micro-scale channels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 31, p. 1-19, 2006.
- RUIZ, M.; KUNKLE, C. M.; PADILLA, J.; CAREY, V. P. Boiling Heat Transfer Performance in a Spiraling Radial Inflow Microchannel Cold Plate. **Heat Transfer Engineering**, v. 38, p. 1247-1259, 2017.
- SADAGHIANI, A. K.; SAADI, N. S.; PARAPARI, S. S.; KARABACAK, T.; KESKINOZ, M.; KOŞAR, A. Boiling heat transfer performance enhancement using micro and nano structured surfaces for high heat flux electronics cooling systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 127, p. 484-498, 2017.
- SAITOH, S.; DAIGUJI, H.; HIHARA, E. Correlation for boiling heat transfer of R134a in horizontal tubes including effect of tube diameter. **Heat and Mass Transfer**, v. 50, p. 5215-5225, 2007.

- SEMPÉRTEGUI-TÁPIA, D. F. **Estudo teórico-experimental dos padrões de escoamento durante a ebulição convectiva no interior de canais com diâmetro reduzido**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.
- SERIZAWA, A.; FENG, Z.; KAWARA, Z. Two-phase flow in microchannels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 26, p. 703-714, 2002.
- SHENG, C. H.; PALM, B. The visualization of boiling in small-diameter tubes. **Proceedings of Heat Transport and Transport Phenomena in Microsystems**, Banff, 2001.
- SHOJAEIAN, M.; KOŞAR, A. Pool boiling and flow boiling on micro- and nanostructured surfaces. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 63, p. 45-73, 2015.
- STEPHAN, K.; ABDELSALAM, M. Heat-transfer correlations for natural convection boiling. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 23, p. 73-87, 1980.
- STEINER, D.; TABOREK, J. Flow boiling heat transfer in vertical tubes correlated by an asymptotic model. **Heat Transfer Engineering**, v. 13, n. p. 43-69, 1992.
- SONG, Y.; CHENG, D.; ZHAO, L. **Microfluidics: Fundamentals, Devices, and Applications**. 1 ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2018.
- SUO, M.; GRIFFITH, P. Two-phase flow in capillary tubes. **Journal of Basic Engineering**, p. 576-582, 1964.
- TAITEL, Y; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE J.**, v. 22, p. 47-55, 1976.
- THERMAL CONDUCTIVE BONDING INC. **Whats is sputtering?** Disponível em: <http://www.tcbonding.com/sputtering.html>. Acesso em: 15 junho 2018.
- THOME, J. R. The New Frontier in Heat Transfer: Microscale and Nanoscale Technologies. **Heat Transfer Engineering**, v. 27, p. 1-3, 2006.
- THOME, J. R.; DUPONT, V.; JACOBI, A. M. Heat transfer model for evaporation in microchannels, Part I: presentation of the model. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, p. 3375-3385, 2004.
- TIBIRIÇÁ, C. B.; RIBATSKI, G. Flow boiling heat transfer of R134a and R245fa in a 2,3 mm tube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, p. 2459-468, 2010.
- TIBIRIÇÁ, C. B. **Estudo teórico-experimental da transferência de calor e do fluxo crítico durante a ebulição convectiva no interior de microcanais**. 2011. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.
- TIBIRIÇÁ, C. B.; ROCHA, D. M.; SUETH JR, I. L. S.; BOCHIO, G.; SHIMIZU, G. K. K.; BARBOSA, M. C.; FERREIRA, S. S. A complete set of simple and optimized correlations for microchannels flow boiling and two-phase flow applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 126, p. 774-795, 2017.

- TRIPLET, K. A.; GUIAASIAAN, S. M.; ABDEL-KHALIK, S. I.; SADOWSKI, D. L. Gas-liquid two-phase flow in microchannels. Part I. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 25, p. 395-410, 1999.
- ULLMANN, A.; BRAUNER, N. The prediction of flow pattern maps in minichannels. **Multiphase Science and Technology**, v. 19, p. 49-73, 2007.
- WANG, L.; CHEN, M.; GROLL, M. Flow boiling heat transfer characteristics of R134a in a horizontal mini tube. **J. Chem. Eng. Data**, v. 54, p. 2638-2645, 2009.
- WOJTAN, L.; URSENBACHER, T.; THOME, J. Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I – A new diabatic two-phase flow pattern map. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, p. 2955-2969, 2005.
- 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**, v. 83, n. 16, p. 3374-3376, 2003.
- YANG, F.; DAI, X.; PELES, Y.; CHENG, P.; KHAN, J.; LI, C. Flow boiling phenomena in a single annular flow regime in microchannels (I): Characterization of flow boiling heat transfer. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 68, p. 703-715, 2014.
- YANG, F.; LI, X.; LI, W.; LI, C. Integrate monolithic nanostructures in microchannels to enhance flow boiling heat transfer of HFE-7000. **Proceedings of ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems**, p. 1-6, San Francisco, California, USA, 2015.
- ZHANG, Z. L.; MACDONALD, N. C. A RIE process for submicron, silicone electromechanical structures. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 2, p. 31-38, 1991.



## **APÊNDICE A MÉTODOS PARA MODIFICAÇÕES SUPERFICIAIS EM MICROCANAIS**

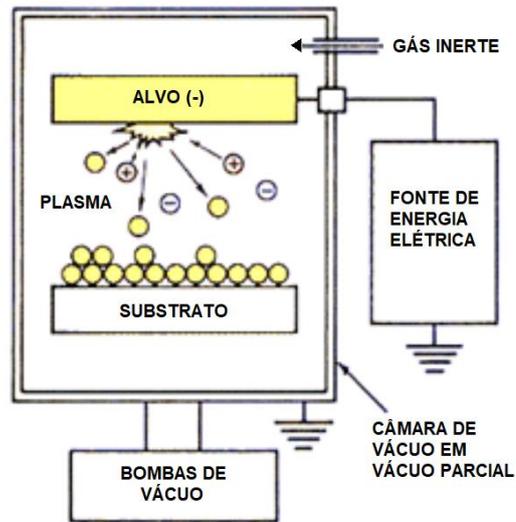
### **A.1 Métodos de modificação de superfície por revestimentos com materiais especiais**

As técnicas apresentadas na sequência, correspondem aos métodos RSME. Sendo assim, são destacados os processos: pulverização catódica (*sputtering*), evaporação (*evaporation*), revestimento por rotação (*spin coating*), revestimento por imersão (*dip coating*), ebulição de nanofluido com deposição de nanopartículas (*nanofluid boiling*), tratamento a plasma (*plasma treatment*).

#### **A.1.1 Pulverização catódica**

A pulverização catódica (*sputtering*) refere-se à remoção de átomos de um determinado material alvo sob bombardeamento de íons energéticos. Se a energia dos íons incidentes for maior que um certo valor de limiar, quantidade suficiente de energia pode ser cedida aos átomos da camada superficial do material alvo, provocando sua retirada. Sendo assim, independente da temperatura de fusão ou do calor de vaporização, a pulverização catódica pode ser utilizada de forma geral para qualquer tipo de material. Os átomos associados à pulverização catódica têm um grande fluxo de energia para um substrato (onde se forma um filme), retirando impurezas ligadas de forma fraca na superfície, bem como melhorando a adesão (tornando o filme mais denso). No entanto, uma vez realizado o bombardeamento de íons extremamente energéticos, podem ocorrer destruições indesejadas do substrato (Prakash e Yeom, 2014, p. 106). A Figura A.1 ilustra de forma simples o processo de pulverização catódica.

**Figura A.1** - Esquemático do processo de pulverização catódica.



Fonte: Adaptado de Thermal Conductive Bonding Inc. (2018).

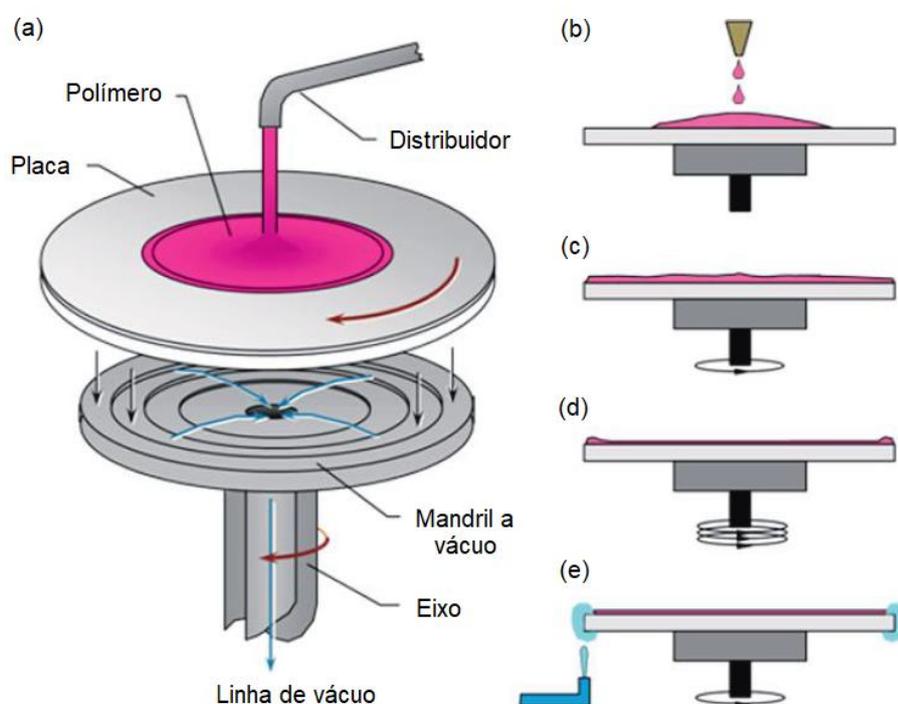
### A.1.2 Revestimento por rotação

O revestimento por rotação (*spin coating*) é, provavelmente, o método mais utilizado para realizar o depósito de uma película fina de revestimento a partir de materiais à base de soluções. Na indústria de semicondutores, alguns tipos de materiais, tais como polímeros e componentes fotossensíveis, são primeiramente depositados com a aplicação do revestimento por rotação. O equipamento que realiza a técnica de revestimento por rotação (*spinner*) geralmente é composto por um mandril a vácuo (placa plana de metal perfurada e conectada a uma linha de vácuo) e por um rotor que pode girar até uma velocidade máxima de 7500 a 10000 rpm em uma taxa de aceleração controlada (Prakash e Yeom, 2014, p. 102). A Figura A.2a ilustra um exemplo de revestimento por rotação com um material fotossensível (MFO) em uma placa fina de material semicondutor.

Depois de montada esta placa no centro do mandril a vácuo, gotas de material fotossensível são dispensadas exatamente no centro da placa, conforme a Figura A.2b. A camada líquida formada é espalhada para a borda da placa durante a etapa inicial de aceleração, na qual mais da metade do solvente pode evaporar, como mostrado na Figura A.2c. Dependendo do comportamento do polímero, pode levar alguns minutos para ser atingida uma espessura de equilíbrio. Vários fatores podem influenciar para a não ocorrência de uniformidade no filme resultante. Um deles consiste na viscosidade, que aumenta na fase de aceleração, e pode alterar a não uniformidade radial da espessura do filme resultante. O padrão de escoamento de ar ao redor do *spinner*, assim como a umidade ambiente, influenciam a taxa de evaporação e, por sua

vez, podem também modificar a espessura do filme. Devido à maior tensão superficial na borda da placa, materiais residuais (chamados de *edge bead*) são obtidos na borda da placa (Figura A.2d). Por fim, necessita-se efetuar a remoção dessa parte residual do filme nas bordas da placa. Uma maneira de se realizar isso consiste na utilização de pulverização com solvente, como está caracterizado na Figura A.2e.

**Figura A.2** – Ilustração esquemática (a) de um *spinner* com os procedimentos do processo de revestimento por rotação de material fotossensível: (b) Derramamento de material fotorresistente; (c) Espalhamento de material fotossensível na fase rotação; (d) formação de rebarba de borda ao final da rotação; e (e) remoção da rebarba de borda.



Fonte: Adaptado de Prakash e Yeom (2014, p. 103).

### A.1.3 Revestimento por imersão

A técnica de revestimento por imersão, ou ainda denominada no meio científico como *dip coating*, refere-se a um processo para obtenção de um filme de revestimento com a aplicação do mergulho de um substrato dentro de uma solução com determinada viscosidade. Após isso, o substrato é retirado com uma velocidade especificada, de tal forma que não existam vibrações

ou interferências. O processo de deposição é caracterizado por cinco estágios, ordenados da seguinte maneira: imersão, (iniciação) *start-up*, deposição, secagem e evaporação (Carvalho e Varela, 1999).

#### ***A.1.4 Ebulição de nanofluido com deposição de nanopartículas***

Esta técnica para revestimento de superfície é muito comum devido aos diversos estudos realizados ao longo dos últimos anos com a incorporação de nanopartículas aos fluidos, o que define um nanofluido (YOU, KIM e KIM, 2003). O método consiste em realizar um experimento, levando o nanofluido ao estado de ebulição e, dessa maneira, possibilitar que as nanopartículas que compõem esse tipo de fluido se depositem na parede da superfície requerida. Existem vários tipos de nanopartículas, sendo as mais utilizadas:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (gama-alumina),  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SiO}_2$  (KIM et al., 2015).

#### ***A.1.5 Tratamento a plasma***

O plasma consiste em um estado da matéria que é parcialmente ou totalmente ionizado e contém partículas carregadas de íons livres, elétrons, radicais e partículas neutras de átomos e moléculas. O tratamento a plasma é uma técnica que utiliza um gás ionizado para modificar uma superfície. Seus principais benefícios consistem no curto período de tratamento e a simples operação, o que torna esse método um dos mais eficientes para trabalhar superfícies de silício, vidro ou polímeros (SONG, CHENG e ZHAO, 2018, p. 132).

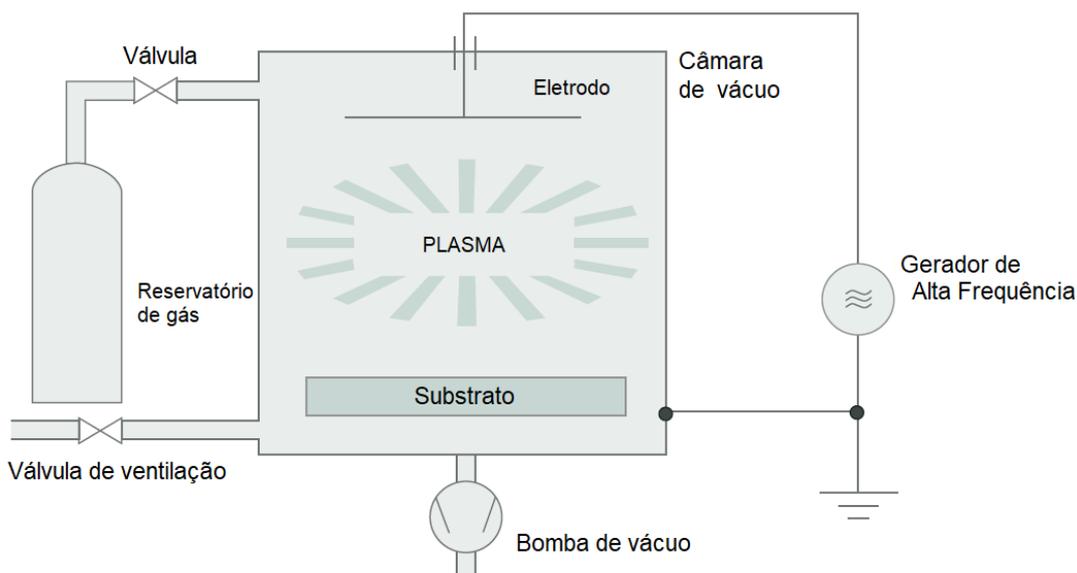
O plasma pode ser dividido em duas tipologias: térmico e não-térmico. O plasma térmico, também conhecido por plasma quente, de alta temperatura ou de equilíbrio, é quase totalmente ionizado, em que elétrons e partículas carregadas tem a mesma temperatura. A temperatura necessária para obter um plasma térmico corresponde à faixa de 4.000 a 20.000 K, que se referem a valores destrutivos para polímeros. Já para o plasma não-térmico, apenas uma pequena fração de moléculas de gás são ionizadas, em que íons e partículas neutras estão em uma temperatura extremamente baixa (possivelmente, menor que a temperatura da câmara de operação), embora as temperaturas dos elétrons possam atingir milhares de graus Celsius. O tipo de plasma empregado para modificações de superfície em dispositivos microfluídicos a base de polímeros refere-se ao plasma não-térmico, que pode ser gerado por meio de descarga

corona (campo elétrico de elevada energia), descarga em barreira dielétrica ou ainda descarga de alta frequência (SONG, CHENG e ZHAO, 2018, p. 132).

Um desafio prático na oxidação por plasma (*plasma oxidation*) de dispositivos microfluídicos a base de polímeros consiste no restabelecimento hidrofóbico. Ele pode ser causado por movimentos rastejantes de cadeias poliméricas da base para a superfície e também pelo rearranjo de cadeias poliméricas de alta mobilidade na temperatura da câmara de operação para minimizar a energia da superfície (SONG, CHENG e ZHAO, 2018, p. 132).

Outro tratamento a plasma se refere à polimerização por plasma (*plasma polymerization*), representado pela Figura A.3. Esse tipo de técnica trata-se de um processo em que ocorre a ionização de um gás monômero ao estado de plasma e, assim, acontece a polimerização, o que leva um revestimento de polímero em um substrato de modo a alterar as propriedades superficiais (SONG, CHENG e ZHAO, 2018, p. 133).

**Figura A.3** – Esquemático de um sistema de polimerização por plasma.



Fonte: Adaptado de SONG, CHENG e ZHAO (2018, p. 134)

## A.2 Métodos de modificação de superfície por processos químicos

As técnicas descritas a seguir se referem à categoria PQ. Diante disso, são destacados os processos para modificação de superfícies: deposição eletroquímica (*electrochemical deposition*), deposição em camadas atômicas (*atomic layer deposition*), oxidação térmica (*thermal oxidation*), fotolitografia.

### A.2.1 Deposição eletroquímica

A deposição eletroquímica, também denominada de eletrodeposição, ou ainda galvanoplastia, consiste em um processo de deposição de materiais condutores e semicondutores em um substrato (geralmente de material condutor) utilizando um campo elétrico e uma reação de redox. Uma corrente elétrica é usada para reduzir cátions de um material determinado em um eletrólito e revestir a superfície do eletrodo (cátodo). O anodo (contra-eletrodo) que é usado para fechar o circuito pela inserção de elétrons no eletrólito é tipicamente feito de platina. A deposição eletroquímica tem o benefício de produzir um filme condutor de centenas de microns. Essa tecnologia é relevante para os dispositivos microfabricados, uma vez que os materiais eletro galvanizados podem ser seletivamente depositados no substrato usando o filme fotocatalítico como uma camuflagem (PRAKASH e YEOM, 2014, p. 112).

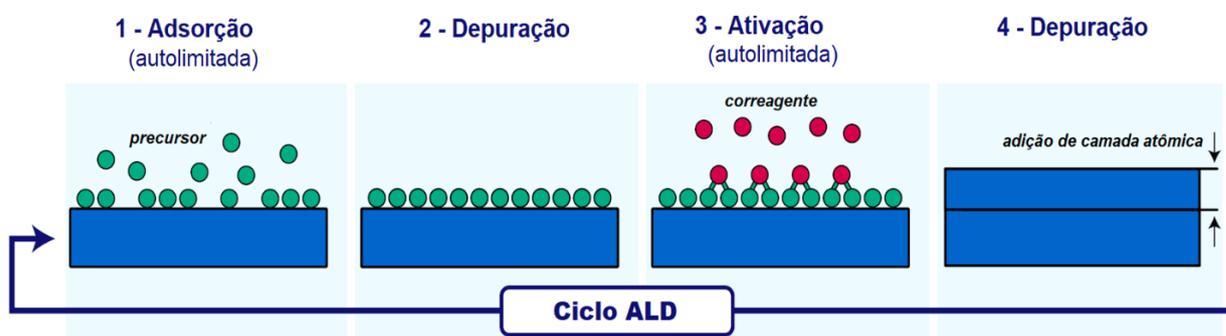
### A.2.2 Deposição em camadas atômicas

Refere-se a um tipo de deposição química de vapor utilizado para obtenção de filmes ultrafinos. Essa técnica (*atomic layer deposition - ALD*) merece uma atenção especial uma vez que ela provê um controle atômico confiável sobre as dimensões e, assim, assume uma aplicação relevante na área nanofluídica. A característica única da ALD consiste no fato de que a taxa de deposição é autolimitada e, dessa forma, a espessura final do filme depende do número de ciclos ALD, e não do tempo de exposição. As camadas que vão se depositando linha-por-linha são obtidas por meio de uma fonte de vapor pulsante em um reator, separadas por períodos de depuração, dividindo a reação química total em duas ou mais reações autolimitadas. A Figura A.4 representa, de forma esquemática, um ciclo ALD.

Para o caso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de alumínio ou alumina), TMA (*trimethylaluminum*) e água são utilizados como componentes precursores. TMA é primeiramente pulsado em direção à câmara de reação e forma uma única linha na superfície do substrato. Depois disso, um gás inerte, como por exemplo nitrogênio ou argônio, é injetado para ocorrer o processo de depuração, na qual são eliminados os subprodutos da reação e o TMA não reativo. Na sequência, uma parcela de vapor é pulsada para a câmara com o propósito de reagir com a primeira camada de TMA e formar um filme de alumina. A câmara de operação é novamente depurada com um gás inerte para remover os gases residuais do processo e, assim, completar

um ciclo. Os ciclos são repetidos quantas vezes forem necessários até atingir uma espessura requerida de filme de óxido de alumínio (PRAKASH e YEOM, 2014, p. 111).

**Figura A.4** – Ilustração esquemática de um ciclo de deposição em camadas atômicas.



Fonte: Adaptado de Faraz et al. (2015).

### A.2.3 Oxidação térmica

De acordo com Prakash e Yeom (2014, p. 103), uma razão fundamental para que o silício seja considerado um material dominante na indústria de semicondutores se refere à sua habilidade para formar um filme de óxido de alta qualidade ( $\text{SiO}_2$ ). Esse filme pode se aglomerar em substratos de silício devido a reações com o oxigênio ou vapor de água em temperaturas geralmente em torno de 1000 e 1200°C. As reações citadas são, respectivamente, caracterizadas a seguir:

- Oxidação a seco:  $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$
- Oxidação por vapor de água:  $\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$

O substrato de silício é consumido durante a reação, o que gera diminuição da espessura do substrato. No entanto, o seu volume geral associado com o filme se expande, ocorrendo aumento do sistema substrato/ $\text{SiO}_2$ .

### A.2.4 Fotolitografia

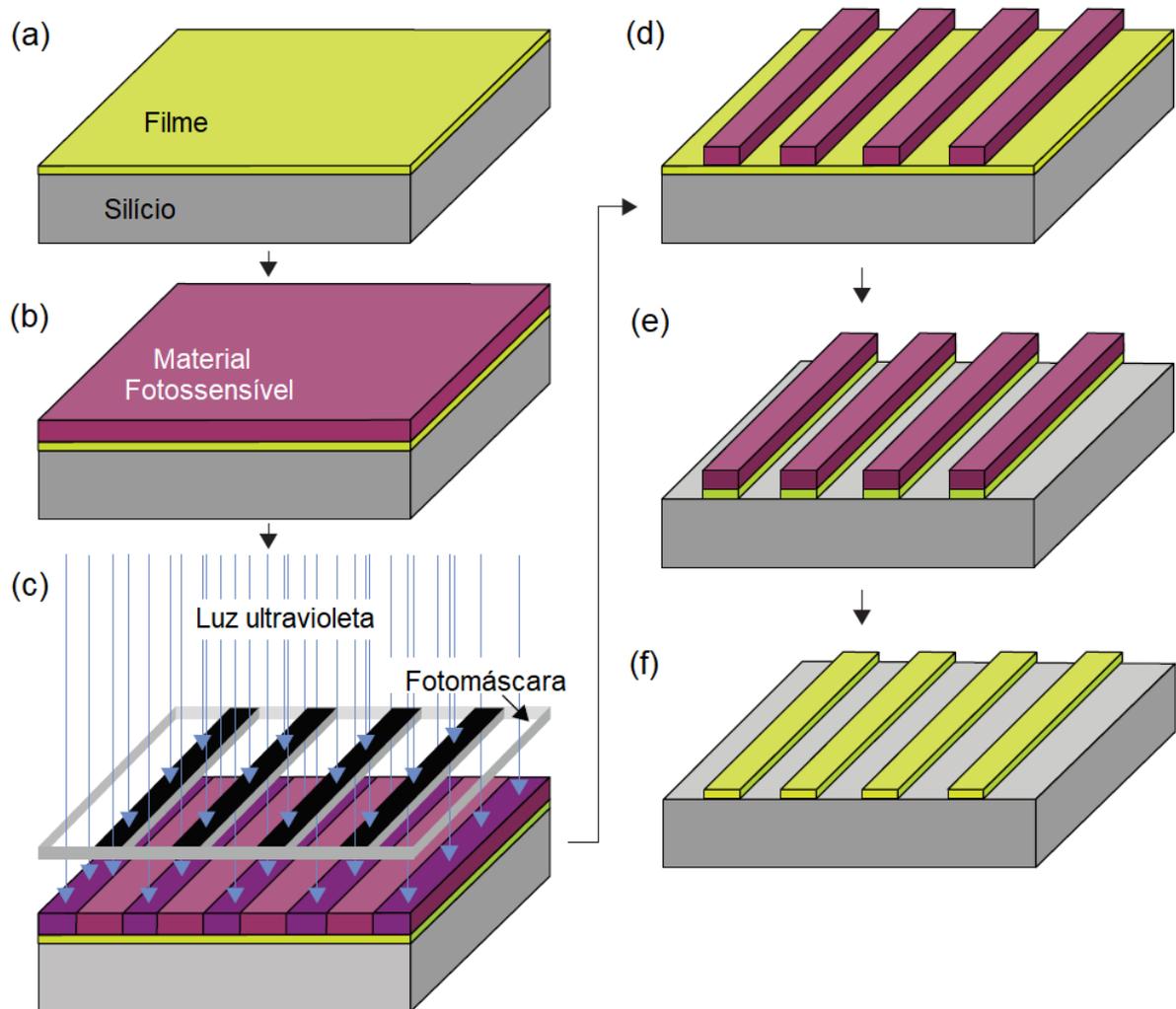
A fotolitografia, também conhecida como litografia ótica, consiste em um processo de criação de um padrão prescrito em um filme de material fotossensível através da exposição

seletiva desse filme à radiação. Dessa maneira, resulta-se na remoção ou das partes expostas ou não expostas de partes do filme. Esse método de fabricação é a tecnologia mais importante e utilizada em aplicações microeletrônicas e também em equipamentos que são constituídos de componentes micro/nanoeletromecânicos. Devido a essas razões, tem sido considerada a tecnologia de desenvolvimento de padrões superficiais com maior capacidade de manufatura em larga escala (produção em massa) (PRAKASH e YEOM, 2014, p. 88). Na fabricação de dispositivos micro/nanofluídicos, utiliza-se a técnica fotolitográfica em uma ou mais etapas da fase de construção do componente.

A Figura A.5 ilustra, em formato de esquema, um exemplo simplificado do processo de fotolitografia. As fases fundamentais de um processo fotolitográfico tratam-se de: (i) preparação do substrato; (ii) aplicação de material fotossensível; (iii) pré-aquecimento; (iv) alinhamento; (v) exposição; (vi) desenvolvimento; (vii) pós-aquecimento; (viii) processos subsequentes utilizando o material fotossensível como um filme de máscara; e (ix) eliminação de resíduos.

Na fase inicial, realiza-se a limpeza do substrato para remover contaminantes. Em muitos casos, a superfície do substrato é preparada com um composto que aumenta a capacidade de adesão a materiais fotossensíveis. Sendo assim, uma película de material fotossensível é revestida à superfície do substrato, por meio de revestimento por rotação ou pulverização. Feito isso, o filme acoplado é pré-aquecido para retirar os solventes, eliminar tensões residuais e também aumentar a sua adesão. Essa etapa é realizada com temperatura geralmente entre 60 e 120°C, de um minuto até dezenas de minutos. Terminado o pré-aquecimento, o filme de material fotossensível é sujeito a exposição com luz ultravioleta (tipicamente uma lâmpada de vapor de mercúrio de 10 a 20 mW). Dessa maneira, transfere-se a imagem de uma fotomáscara (com alinhamento) para a superfície do conjunto formado pelo substrato e material fotossensível, de acordo com a sensibilidade seletiva do filme. Após isso, dependendo do tipo de material fotossensível (positivo ou negativo), as regiões expostas à luz permanecem ou são eliminadas. Isso por meio de soluções alcalinas ou solventes orgânicos (respectivamente, baseado no tipo de MFO). Em seguida é realizada a remoção de linhas de materiais residuais, como por exemplo os compostos que aumentam a capacidade de adesão a MFO, por meio de limpeza com plasma de oxigênio. Por último, a camada restante de MFO é retirada por meio de uma solução para decapagem ou por meio de um sistema de gravação a seco (PRAKASH e YEOM, 2014).

**Figura A.5** – Esquemático de um processo básico de fotolitografia: (a) deposição do filme fino; (b) aplicação de material fotossensível; (c) alinhamento e exposição; (d) desenvolvimento; (e) gravação do filme fino; e (f) retirada de material fotossensível.



Fonte: Adaptado de Prakash e Yeom (2014, p. 90).

### A.3 Métodos de modificação de superfície por sistemas micro/nanoeletromecânicos

As técnicas destacadas posteriormente se tratam da metodologia SMEM/SNEM, da qual são descritos os processos: gravação a seco (*dry etching*), gravação molhada (*wet etching*), gravação por íons reativos (*reactive ion etching - RIE*), gravação profunda por íons reativos (*deep reactive ion etching -DRIE*).

### A.3.1 Gravação a seco

O processo de gravação a seco (*dry etching*) utiliza vapor ou plasma para remover materiais e depende de um ou mais dos seguintes mecanismos: gravação física (térmica ou por pulverização catódica), gravação reativa (por reações químicas) e fotodissociação (quebra de ligações moleculares por ação de energia radiante). Muitas técnicas de gravação a seco são resultantes de processos anisotrópicos, mas em alguns casos, tais como gravação por vapor de ácido fluorídrico aplicado em vidros ou o processo de gravação por difluoreto de Xenônio ( $\text{XeF}_2$ ) aplicado em silício monocristalino (PRAKASH e YEOM, 2014, p. 119). A Tabela A.1 trata dos substratos e reagentes para ataque químico na gravação a seco.

**Tabela A.1** – Tipos comuns de reagentes para ataque químico em gravação a seco.

SUBSTRATO	REAGENTES PARA ATAQUE QUÍMICO (PLASMA OU VAPOR)	TAXA DE EROSIÃO (NM/MIN)
Silício	$\text{SF}_6$ (RIE)	0,1 – 0,5
	$\text{SF}_6/\text{C}_4\text{F}_8$ (DRIE) (anisotrópico)	1 – 15
	$\text{XeF}_2$ (isotrópico)	0,1 – 10
Óxido de silício	$\text{CHF}_3 + \text{O}_2$	5 – 150
	$\text{CHF}_3 + \text{CF}_4 + \text{He}$	25 – 600
	Vapor de HF	66
Nitreto de silício	$\text{SF}_6$	150 – 250
	$\text{CHF}_3 + \text{CF}_4 + \text{He}$	200 – 600
Alumínio	$\text{Cl}_2 + \text{SiCl}_4$	100 – 150
	$\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3 + \text{CHCl}_3$	200 – 600
Titânio	$\text{SF}_6$	100 – 150
Tungstênio	$\text{SF}_6$	300 – 400
Cromo	$\text{Cl}_2$	5
MFO	$\text{O}_2$	350

Fonte: Adaptada de Prakash e Yeom (2014, p. 114).

### A.3.2 Gravação por íons reativos

O método de gravação por íons reativos (RIE) trata-se da técnica mais comum de gravação a seco para modificação de superfícies. Nela se utilizam plasmas excitados por radiofrequência (RF) de diversos tipos de materiais (ZHANG e MACDONALD, 1991).

Gases de alimentação que são introduzidos numa câmara de operação sofrem uma série de reações químicas para produzir o estado de plasma. Além disso, os compostos resultantes são transportados até o substrato a ser gravado.

O tema mais relevante em RIE consiste no fato de que os íons dissociados em plasma são acelerados até o substrato. Esse bombardeamento iônico auxilia na reação para gravação, que necessita ser lenta para ser efetiva. Outra característica refere-se ao perfil de gravação, que tende a ser anisotrópico, independente da orientação dos cristais que compõem a estrutura cristalina do substrato (no caso de silício monocristalino), e a seletividade de gravação é razoavelmente alta (PRAKASH e YEOM, 2014, p. 119).

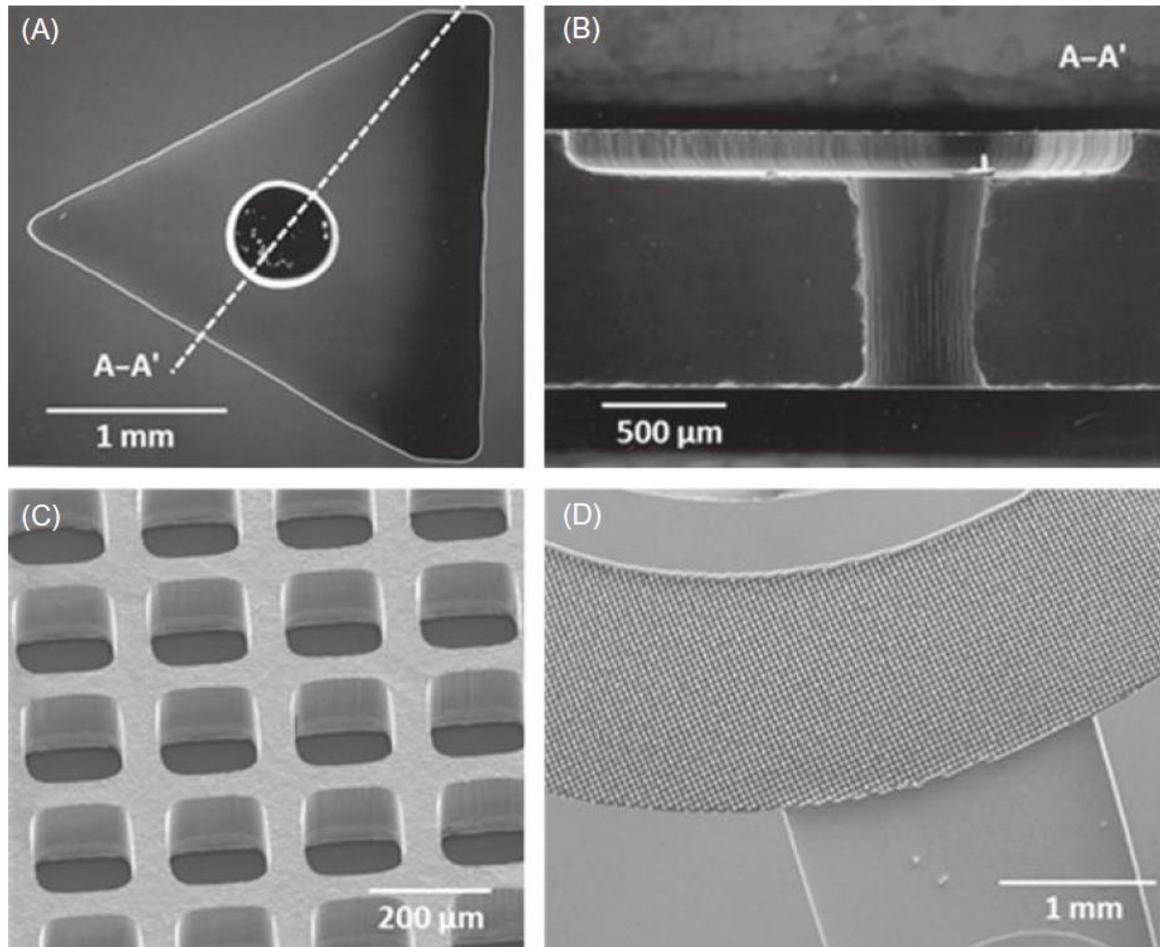
### ***A.3.3 Gravação profunda por íons reativos***

Como em muitos sistemas micro/nanoeletromecânicos ou dispositivos microfluídicos baseados em silício necessitam de uma gravação com alta razão de aspecto e/ou uma rápida taxa de gravação, a gravação profunda por íons reativos (DRIE) tem ganhado popularidade em pesquisas acadêmicas e industriais. Alguns recursos únicos da tecnologia DRIE permitem a criação de estruturas em três dimensões e com muitas características anisotrópicas, desde canais com alta razão de aspecto e com furos até matrizes com colunas. A Figura A.6 ilustra um exemplo de escaneamento microscópico eletrônico (EME) de elementos microfluídicos fabricados com a técnica DRIE (PRAKASH e YEOM, 2014, p. 119).

Na técnica convencional RIE, a densidade do plasma é limitada pela forma de acoplamento da energia de radiofrequência (RF) em direção ao plasma. Uma vez que a mesma fonte de geração de RF é utilizada para criar o plasma e acelerar íons, torna-se impossível controlar a densidade do plasma e a energia dos íons de forma separada. Em processos RIE de baixa temperatura, a produção de camadas passivas na parede lateral ocorre simultaneamente com a gravação do substrato. Isso torna o processo difícil de ser controlado, limitando a razão de aspecto requerida e a velocidade da gravação.

Já os processos DRIE usam duas fontes de RF distintas. Uma delas para induzir e gerar plasma, sendo que a outra é empregada para acelerar os íons de maneira vertical com uma tendência de controle independente do substrato. Esse desacoplamento da potência do plasma com a energia dos íons torna possível gerar uma alta densidade plasmática em regimes baixos de pressão.

**Figura A.6** – Imagens EME de componentes microfluídicos associados à gravação DRIE: (A) e (B) Orifício para microválvula; (C) uma estrutura de micromalha para microcélulas de combustível; e (D) matriz de microcolunas em estruturas para melhoria evaporativa.



Fonte: Prakash e Yeom (2014, p. 120).

#### A.3.4 Gravação molhada

No processo de gravação molhada (*wet etching*), um material sólido é reagido com um líquido de ataque químico (*etchant*) e, dessa forma, gerar subprodutos solúveis. Esse tipo de processo proporciona uma taxa de gravação mais rápida comparada à gravação a seco, além de acomodar mais camadas em cada batelada e ser adequado para produção em massa. Alguns tipos de soluções aquosas para ataque químico estão caracterizados na Tabela A.2, com seus respectivos substratos utilizados como materiais base. A taxa de erosão pode ser controlada pela concentração do reagente, bem como pela temperatura, sendo que altas concentrações e temperaturas aumentariam os valores dessa taxa.

A gravação molhada pode ser classificada em duas tipologias: isotrópica e anisotrópica. Isso de acordo com o tipo de material base e também com o reagente utilizado. Por exemplo, no caso isotrópico, os substratos de óxido de silício ou vidros possuem reagentes típicos, tais como o ácido fluorídrico (HF) ou BHF (*buffered HF*). Esse caso é extremamente popular na produção de chips microfluídicos de vidro. Já para a gravação molhada anisotrópica, um bom exemplo caracteriza-se pela exposição de substratos de silício cristalino a soluções alcalinas (como KOH, NaOH, LiOH).

**Tabela A.2** – Tipos comuns de reagentes para ataque químico em gravação molhada.

SUBSTRATO	SOLUÇÕES AQUOSAS PARA ATAQUE QUÍMICO	TAXA DE EROSÃO (NM/MIN)
Silício	HF + HNO <sub>3</sub> + CH <sub>3</sub> COOH (isotrópico)	1 – 20
	KOH (anisotrópico)	0,5 – 3
	EDP - <i>Ethylene diamine pyrocathecol</i> (anisotrópico)	0,75
	TMAH - <i>Tetramethylammonium hydroxide</i> (anisotrópico)	0,5 – 1,5
Óxido de silício	HF	2300
	5NH <sub>4</sub> F + 1NF ( <i>buffered HF</i> )	100
Nitreto de silício	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (quente)	5
Alumínio	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> + HNO <sub>3</sub> + CH <sub>3</sub> COOH	530
	HF	4
Ouro	KI + I <sub>2</sub>	660
Titânio	HF + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	100 – 880
Tungstênio	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	150
	K <sub>3</sub> Fe(CN) <sub>6</sub> + KOH + KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	34
Cromo	Ce(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> + CH <sub>3</sub> COOH	93
MFO	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	> 100.000
	Acetona	> 100.000

Fonte: Adaptada de Prakash e Yeom (2014, p. 114).