



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Alex Célio Sant'Ana

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA CONDENSAÇÃO EM
SUPERFÍCIES METÁLICAS VERTICAIS
REVESTIDAS COM NANOTUBOS DE CARBONO
OU TRATADAS COM PLASMA CORONA NA
PRESENÇA DE GASES NÃO CONDENSÁVEIS**

Florianópolis, Brasil
2020

Alex Célio Sant'Ana

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA CONDENSAÇÃO EM
SUPERFÍCIES METÁLICAS VERTICAIS REVESTIDAS COM
NANOTUBOS DE CARBONO OU TRATADAS COM PLASMA
CORONA NA PRESENÇA DE GASES NÃO CONDENSÁVEIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Alexandre Kupka da Silva, Ph.D.

Coorientador: Prof. Cristiano Binder, Dr.

Florianópolis, Brasil
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sant'Ana, Alex Célio

Estudo experimental da condensação em superfícies metálicas verticais revestidas com nanotubos de carbono ou tratadas com plasma corona na presença de gases não condensáveis / Alex Célio Sant'Ana ; orientador, Alexandre Kupka da Silva, coorientador, Cristiano Binder, 2020.

131 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Transferência de calor. 3. Mudança de fase. 4. Condensação. 5. Tratamento e revestimento de superfície. I. da Silva, Alexandre Kupka. II. Binder, Cristiano. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Alex Célio Sant'Ana

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA CONDENSAÇÃO EM
SUPERFÍCIES METÁLICAS VERTICAIS REVESTIDAS COM
NANOTUBOS DE CARBONO OU TRATADAS COM PLASMA
CORONA NA PRESENÇA DE GASES NÃO CONDENSÁVEIS**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Aloisio Nelmo Klein, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Saulo Güths, Dr.
Universidade de Federal de Santa Catarina

Prof. Júlio César Passos, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Prof. Alexandre Kupka da Silva, Ph.D.
Orientador

Florianópolis, 16 de março de 2020

À minha família, por todo amor, carinho e apoio. Mãe, sua compreensão e dedicação foi que deram, em muitos momentos, a determinação para seguir. Pai, sua presença sempre significou a certeza de que não estou sozinho nessa caminhada. Meu irmão, Fonso, sua presença me faz sempre buscar a minha melhor versão, espero que sinta orgulho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de utilizar este espaço para agradecimento a todos que foram importantes para minha formação e conclusão desta etapa:

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela oportunidade e todo espaço físico e intelectual disponível. Deixo aqui meu agradecimento especial a todos os servidores que fazem desta instituição um universo completamente único. Obrigado a todo o pessoal da limpeza, da segurança, os técnicos e demais que fazem com que este ambiente seja tão produtivo e criativo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) por todo o suporte laboratorial, técnicos e professores. Aos laboratórios ao qual convivi e me propiciaram suporte para que este trabalho fosse concluído. Aos técnicos que em algum momento dessa jornada me auxiliaram direta ou indiretamente. Por fim, aos professores, agradeço cada ensinamento e cada segundo de seus tempos despendidos em função de me auxiliarem e auxiliarem o crescimento científico e tecnológico do nosso país, vocês me enchem de orgulho.

Aos professores Alexandre Kupka da Silva e Cristiano Binder pela orientação e coorientação, respectivamente. Ao professor Cristiano por ter aceitado o convite e cooperar com o desenvolvimento desta dissertação, criando uma parceria entre os laboratórios e assim, avanço científico, incrementando o grupo de pesquisas. Ao Professor Alexandre que durante a graduação, quando participei da primeira turma de Termodinâmica II ministrada por você em Araranguá realizou enorme impacto na minha vida e carreira. Quando resolvi seguir no mestrado da Engenharia Mecânica fez questão de abrir as portas do laboratório e me fazer parte desse ambiente e desse grupo de pesquisas. Também por todos os ensinamentos e orientações para que este trabalho fosse concluído da melhor maneira possível. Obrigado!

Aos membros da Banca por aceitarem o convite de avaliar o documento, despendendo tempo e dedicação a este trabalho. Vocês são referências em suas respectivas áreas e é uma honra poder contar com vocês para esta função.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo suporte financeiro para a pesquisa desenvolvida neste trabalho.

Ao curso de Engenharia de Energia da UFSC e todos os presentes no campi de Araranguá, onde deixei parte da minha história e ajudei a construir parte da história do curso e do campi. Professores, vocês me ajudaram a tornar o profissional que sou, através de seus ensinamentos, gerando meu crescimento profissional e pessoal, são exemplos de carreira e vida. Fica a certeza de que cada um de vocês deixou algum ensinamento. Busco e continuarei buscando absorver o positivo de cada pessoa que

passa pela minha vida. Espero reler este documento em alguns anos e ver que continuei evoluindo, parte disso é consequência de vocês. Obrigado, obrigado Araranguá!

Aos colegas do Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN), os qual compartilhei muitos momentos, sem a companhia, parceria e ajuda de vocês esta etapa não seria tão divertida e motivadora. Hoje tenho certeza de que a maior qualidade deste grupo de pesquisas são as pessoas, vocês são incríveis! Um grande carinho por cada um de vocês: Adônis, Adriano, Arthur Pandolfo e Kleyton, Bruno, Carlos, Daniela, Felipe, Giovanni, Gustavo, Indyanara, Juliano, Leonardo, Luigi, Luiz, Olivia, Paulo, Rosângela, Ruan, Scussel, Thaís, Victor e Vinícius. Vocês são incríveis, toda sorte e todo o mundo para vocês.

Aos colegas do Laboratório de Materiais (LABMAT): Artur, Tainá, Tainan e demais. Em especial ao Thiago, que muitas das vezes me auxiliou no desenvolvimento do trabalho, abrindo mão de seu tempo e dedicando esforço máximo neste trabalho. Thiago, você é um excelente pesquisador e foi incrível trabalhar este período com você, obrigado pelas ideias e ensinamentos.

A meus familiares por estarem comigo em momentos importantes dessa caminhada, sempre apoiando e auxiliando, me dando força para seguir com dedicação. Em especial os meus pais e meu irmão, eu amo vocês e esse documento não é uma conquista unicamente minha, sem vocês nada disso aqui seria possível, acredito que este título é nosso. Sintam-se parte deste trabalho, espero que tenham orgulho da pessoa e profissional que eu sou. Eu Amo vocês, obrigado por tudo!

A todos que não estão citados neste texto, mas que em algum momento desta caminhada enviaram boas vibrações e bons sentimentos, obrigado.

If you knew what you had was rare, you would never waste it.

Walker, Julie Burns

RESUMO

Para se avaliar experimentalmente tratamentos de superfície para a finalidade de condensação, no regime de convecção natural e na presença de gases não condensáveis (ar atmosférico), fez-se necessária a construção, validação e utilização de bancada de ensaios. Utilizou-se revestimento de nanotubos de carbono e tratamento com plasma corona para o uso em condensadores. O revestimento com nanotubos de carbono apresenta característica superhidrofóbica, porém, possui alta adesão superficial. Já o tratamento com plasma corona apresenta molhabilidades distintas, variando bruscamente de acordo com os parâmetros e com as condições ambientes. Neste trabalho, avaliou-se a utilização de diferentes gases na aplicação com plasma corona, porém, apenas o tratamento com gás R-134a apresentou durabilidade mínima para a aplicação, sendo avaliado experimentalmente. O tratamento com esse gás torna a superfície superhidrofóbica e completamente repelente ao líquido. O principal enfoque do trabalho está em avaliar o desempenho desses revestimentos para quantificar e comparar seus desempenhos na condensação. Para tanto, caracterizaram-se as superfícies estudadas, de modo a possuir a maior quantidade de informações. A caracterização das amostras foi feita por meio da medição dos ângulos de contato (estático e dinâmico), da quantificação de rugosidade e da análise qualitativa por imagem de alta ampliação no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Além de avaliar superfícies com revestimentos de nanotubos de carbono e tratamento com plasma corona, este trabalho avalia a influência da variação da temperatura da superfície, da temperatura ambiente e da umidade relativa na condensação. Também foram avaliadas amostras de aço inoxidável AISI-316L, sendo que para as revestidas com nanotubos de carbono também foram avaliados diferentes acabamentos de superfície. Na avaliação das variações dos parâmetros da bancada obtiveram-se ganhos na massa coletada e no coeficiente de transferência de calor (HTC) para redução na temperatura de superfície, aumento na temperatura ambiente e aumento na umidade relativa. Entre as superfícies estudadas, as que obtiveram melhor taxa de massa coletada foram as amostras de aço inoxidável processada com lixa 220, nanotubos com lixa 600 e plasma corona. A superfície com pior desempenho dentre todas avaliadas foi a de aço inoxidável polida sem tratamento ou revestimento. O HTC obtido experimentalmente para todas as amostras de teste foram constantes, divergindo do obtido através do balanço de calor.

Palavras-chaves: transferência de calor; condensação; revestimentos e tratamentos; superfície; nanotubos de carbono; plasma corona.

ABSTRACT

To evaluate experimentally surface treatments for the purpose of condensation, in the natural convection regime and in the presence of non-condensable gases (atmospheric air), it was necessary to build, validate and use a test condensation chamber. Carbon nanotube coating and corona plasma treatment were used, both recent and innovative in condensers. The coating with carbon nanotubes has a superhydrophobic characteristic, however, it has high surface adhesion. Corona plasma treatment, on the other hand, presents distinct wettability, varying sharply according to parameters and ambient conditions. In this work, the use of different gases in the application with corona plasma was evaluated, however, only the treatment with R-134a gas showed minimum durability for the application, being evaluated experimentally. Treatment with this gas turns the surface superhydrophobic and completely repellent to the liquid. The main focus of the work is on evaluating the performance of these surface treatments to quantify and compare their performance in condensation. Therefore, the studied surfaces were characterized, in order to have the greatest amount of information. The characterization of the samples was made by measuring the contact angles (static and dynamic), the roughness quantification and the qualitative analysis by means of high magnification images in the Scanning Electron Microscope (SEM). In addition to evaluating surfaces with carbon nanotube coatings and treatment with corona plasma, this work evaluates the influence of the surface temperature, the ambient temperature and the relative humidity in the condensation. Samples of AISI-316L stainless steel were also evaluated, and for those coated with carbon nanotubes, different surface finishes were also evaluated. In the evaluation of the variations of the chamber parameters, improvements were obtained in the collected mass and in the heat transfer coefficient (HTC) to reduce the surface temperature, increase the ambient temperature and increase the relative humidity. Among the surfaces studied, the ones that obtained the best collected mass rate were the stainless steel samples processed with 220 sandpaper, nanotubes with 600 sandpaper and corona plasma. The surface with the worst performance among those evaluated was the polished stainless steel without treatment or coating. The HTC obtained experimentally for all evaluated samples were constant, differing from the obtained by heat balance.

Keywords: heat transfer; condensation; coatings and treatments; surface; carbon nanotubes; corona plasma.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Corte transversal da gota.	32
Figura 2 – Modelos de gotas para superfícies rugosas.	32
Figura 3 – gota na iminência do movimento.	34
Figura 4 – Escala de molhabilidade.	34
Figura 5 – Modos de condensação.	36
Figura 6 – Comparativo condensação em película e em gotas.	37
Figura 7 – Modelo escoamento na superfície.	38
Figura 8 – Modelo de crescimento de gotas.	40
Figura 9 – Modelo da resistência a transferência de calor para DWC.	41
Figura 10 – Comparativo diferentes autores.	42
Figura 11 – Perfilometro de agulha.	53
Figura 12 – Funcionamento interferômetro óptico.	54
Figura 13 – Simplificação da bancada de condensação.	58
Figura 14 – Bancada de condensação.	59
Figura 15 – Sistema de resfriamento.	60
Figura 16 – Bloco de cobre, vista frontal.	60
Figura 17 – Distribuição dos sensores na bancada.	61
Figura 18 – Transdutor de fluxo de calor gradiente tangencial.	62
Figura 19 – Equipamentos auxiliares da bancada.	63
Figura 20 – Transiente para estabilidade, temperatura ambiente e umidade relativa.	64
Figura 21 – Umidade relativa constante, temperatura variável.	65
Figura 22 – Temperatura constante, umidade relativa variável.	65
Figura 23 – Teste 1 - 12 horas.	66
Figura 24 – Teste 1 - Massa coletada.	66
Figura 25 – Repetibilidade para amostra de aço inoxidável AISI-316L aleatório.	68
Figura 26 – Lixadeira.	70
Figura 27 – Esquemático de aumento da granulometria.	70
Figura 28 – Esquema de um sistema de reator a plasma de corrente contínua.	71
Figura 29 – Método de aplicação do plasma corona.	72
Figura 30 – Pontos de medição do ângulo de contato.	73
Figura 31 – Medição do ângulo de contato estático.	73
Figura 32 – Medição do ângulo de contato dinâmico.	74
Figura 33 – Interferômetro óptico.	75
Figura 34 – Área de medição de topografia via interferômetro.	75

Figura 35 – Esquemático 2D.	75
Figura 36 – Esquemático 3D.	76
Figura 37 – Esquemático MEV.	76
Figura 38 – Amostragem de aproximação MEV para lixa 1200 com nanotubos de carbono.	77
Figura 39 – Balanço de calor na superfície de teste.	79
Figura 40 – Tratamento dos dados obtidos pela balança.	80
Figura 41 – Balanço de calor na superfície de teste.	81
Figura 42 – Ângulo de contato estático do primeiro quadrante para AI-Polido.	84
Figura 43 – Ângulo de contato de avanço do primeiro quadrante para AI-Polido, $\theta=67,97^\circ$	84
Figura 44 – ângulo de contato de recuo do primeiro quadrante para AI-Polido, $\theta=17,22^\circ$	84
Figura 45 – Ângulo de contato do primeiro quadrante da amostra de AC+NT Lixa 1200.	85
Figura 46 – Ângulo de contato para tratamento com plasma corona com R-134a, $\theta=180,00^\circ$	86
Figura 47 – Interferometria - 3D - Aço inoxidável AISI-316L.	89
Figura 48 – MEV - Aço inoxidável AISI-316L.	89
Figura 49 – Revestimento com nanotubos de carbono com aproximação de 3000 vezes.	89
Figura 50 – Superfície com nanotubos de carbono, alta aproximação.	90
Figura 51 – Massa de condensado coletado para amostra AI-Polido.	92
Figura 52 – Variação de T_{sup} para AI-Polido.	93
Figura 53 – Variação de T_{amb} para AI-Polido.	93
Figura 54 – Variação de ϕ para AI-Polido.	93
Figura 55 – HTC para variação de T_{sup}	94
Figura 56 – HTC para variação de T_{amb}	94
Figura 57 – HTC para variação de ϕ	95
Figura 58 – Condensação para diferentes acabamentos superficiais de aço inoxidável.	96
Figura 59 – HTC para diferentes acabamentos superficiais de aço inoxidável.	97
Figura 60 – Condensação para diferentes acabamentos superficiais de AC com revestimento de nanotubos de carbono.	98
Figura 61 – HTC para amostras de AC com revestimento de nanotubos de carbono.	98
Figura 62 – Condensação para AI com tratamento com plasma corona com R-134a.	100
Figura 63 – HTC para AI com tratamento com plasma corona com R-134a.	100
Figura 64 – Comparativo entre os extremos para cada padrão avaliado.	101

Figura 65 – HTC comparativo entre os extremos para cada padrão avaliado. . . .	101
Figura 66 – Aço inoxidável - Lixa 220.	102
Figura 67 – AC + Nanotubos de carbono - Lixa 600.	102
Figura 68 – AI + Plasma corona com R-134a - Lixa 600.	102
Figura 69 – Calibração Fluxímetro.	115
Figura 70 – Curva de calibração do fluxímetro.	116
Figura 71 – Comparativo de temperatura medida e após correção TR 102. . . .	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos com revestimentos de superfície.	28
Tabela 2 – Trabalhos com superfícies híbridas.	28
Tabela 3 – Trabalhos com superfícies híbridas.	51
Tabela 4 – Trabalhos com superfícies híbridas.	52
Tabela 5 – Parâmetros da bancada nos testes da superfície aleatória.	67
Tabela 6 – Combinação de superfícies e parâmetros avaliados no trabalho. . . .	78
Tabela 7 – Combinação de superfícies e parâmetros avaliados no trabalho. . . .	79
Tabela 8 – Ângulos de contato obtidos sobre amostras de aço inoxidável.	84
Tabela 9 – Ângulos de contato obtidos sobre amostras de aço carbono.	85
Tabela 10 – Ângulos de contato obtidos sobre amostras de aço carbono + nanotubos de carbono.	86
Tabela 11 – Ângulos de contato obtidos sobre amostras de aço inoxidável, antes a após tratamento com plasma corona.	86
Tabela 12 – Ângulos de contato obtidos sobre amostras testadas na bancada de condensação.	87
Tabela 13 – Parâmetros rugosos das superfícies.	88
Tabela 14 – Dados da bancada de condensação parâmetros variáveis.	92
Tabela 15 – Parâmetros da bancada com AI	95
Tabela 16 – Parâmetros da bancada com AC+NT.	97
Tabela 17 – Parâmetros da bancada para AI+PC-Lixa 600	99
Tabela 18 – Valores de temperatura calibrados em °C, PT-100 do sistema de resfriamento.	114
Tabela 19 – Valores de temperatura calibrados em °C, demais PT-100.	114
Tabela 20 – Valores de temperatura calibrados em °C, PT-100 do sistema de resfriamento.	116
Tabela 21 – Valores de temperatura calibrados em °C, demais PT-100.	116
Tabela 22 – Índices de correção, PT-100 do sistema de resfriamento.	117
Tabela 23 – Índices de correção, demais PT-100.	117
Tabela 24 – Incertezas na medição do fluxo de calor através do fluxímetro.	120
Tabela 25 – Incertezas na medição de temperatura na seção de testes.	120
Tabela 26 – Incertezas na medição de temperatura ambiente.	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Aço Carbono
AI	Aço Inox
Al	Alumínio
Banho	Banho térmico
PVDC	Cloreto de polivinilideno
Cu	Cobre
HCu	Cobre de alta condutividade
HTC	Fluxo de calor - do inglês <i>Heat Flux</i>
HTC	Coeficiente de transferência de calor - do inglês <i>Heat Transfer Coefficient</i>
FWC	Condensação em filme - do inglês <i>Filmwise Condensation</i>
DWC	Condensação em gotas - do inglês <i>Dropwise Condensation</i>
DBD	Descarga de Barreira Dielétrica
DP	Desvio Padrão Amostral
d-Si	Dióxido de Silício
E	Eletodo
FB	Folha de Bananeira (Bioinspirado)
GNC	Gás(es) Não Condensável(is)
GV	Gerador de Vapor
LabMat	Laboratório de Materiais
LEPTEN	Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão
Lt	Latão
M	Média
M. Nobres	Metais Nobres
ESEM	Microscópio Eletrônico - do inglês <i>Environmental Scanning Electron Microscope</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NT	Nanotubos de carbono
Ni	Níquel
pt	Pasta térmica
P.Corona e PC	Plasma corona
Pol.	Poliméricos
PTFE	Politetrafluorestileno
PT	Pós-testes
PID	Proporcional, Integral Derivativo
Si	Silício
Ti	Titânio
UR	Umidade relativa

Vap. Sat. Vapor Saturado
Vap. Sup. Vapor Superaquecido

LISTA DE SÍMBOLOS

z	Altura (m)
A	Área
c_{pl}	Calor específico do líquido ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
c_{pv}	Calor específico do vapor ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
h_{lv}	Calor latente de vaporização (J kg^{-1})
h'_{lv}	Calor latente de vaporização corrigido (J kg^{-1})
Q	Calor transferido (W)
h	Coefficiente de transferência de calor ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
\bar{h}	Coefficiente de transferência de calor médio ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
U	Coefficiente global da transferência de calor ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
xeL	Comprimento (m)
k	Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
R	Constante do gás ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
I	Corrente (A)
ΔT	Diferença de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
r	Fator de rugosidade
q''	Fluxo de calor (W m^{-2})
f_2	Fração de área da gota em contato com o gás nas cavidades
f_1	Fração de área da gota em contato com o sólido
g	Gravidade (m s^{-2})
I_C	Incerteza combinada
I_A	Incerteza do tipo A
I_B	Incerteza do tipo B
I_{exp}	Incerteza expandida
y	Largura (m)
Δd	Limitação física da medição
m	Massa (kg)
N	Número de pontos
P	Potência (W)
P	Pressão (Pa)
	PT-100
R_{pt}	Resistência da pasta térmica (K W^{-1})
R_s	Resistência da superfície (K W^{-1})
R_c	Resistência do cobre (K W^{-1})
R_{eq}	Resistência equivalente (K W^{-1})
R_{ku}	Rugosidade de <i>kurtosis</i>

S_{ku}	Rugosidade de <i>kurtosis</i> para superfície
R_{sk}	Rugosidade de assimetria - em inglês <i>Skewness</i>
S_{sk}	Rugosidade de assimetria para superfície - em inglês <i>Skewness</i>
R_a	Rugosidade média (m)
S_a	Rugosidade média para superfície (m)
R_q	Rugosidade RMS - do inglês <i>Root Mean Square</i> (m)
S_q	Rugosidade RMS para superfície - do inglês <i>Root Mean Square</i> (m)
★	Sensor de umidade
DAQ	Sistema de aquisição e controle - do inglês <i>Data Acquisition</i>
<i>old</i>	Superfície após série de ensaios
<i>new</i>	Superfície nova, assim que produzida
\dot{m}	Taxa de massa (kg s^{-1})
T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$ ou K)
t	Tempo (s)
V	Tensão elétrica (V)
V	Volume molar ($\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$)

Alfabeto grego

θ	Ângulo de contato ($^{\circ}$)
σ_{SB}	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \text{ W/m}^2\text{K}^{-4}$)
ϵ	Emissividade
δ	Espessura da camada limite (m)
$\Delta\theta$	Histerese do ângulo de contato ($^{\circ}$)
ρ	Massa específica (kg m^{-3})
σ	Tensão superficial (N m^{-1})
ω	Umidade absoluta
ϕ	Umidade Relativa
μ	Viscosidade (N s m^{-2})

Números adimensionais

Nu	Nusselt (–)
Π_k	Pi adimensional (–)
Pr	Prandtl (–)
Re	Reynolds (–)

Sobrescrito

* Corrigido

Subescrito

∞ e amb	Ambiente
A	Avanço
BC	Balanco de Calor
CB	Cassie e Baxter
d	Direito
e	Esquerdo
flux	Fluxímetro
<i>l</i>	Líquido
<i>lv</i>	Líquido-Vapor
<i>med</i>	Medido
po	Ponto de orvalho
R	Recuo
<i>ref</i>	Referencia
sat	Saturação
sat@ P_v	Saturação à pressão de vapor
β	Singularidade que o ar pode conter a mesma temperatura
α	Singularidade que o ar possui
<i>sl</i>	Sólido-Líquido
<i>sv</i>	Sólido-Vapor
sub	Sub-resfriamento
s e sup	Superfície
<i>v</i>	Vapor
W	Wenzel

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Objetivos	29
1.2	Estrutura do trabalho	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	Ângulo de contato e molhabilidade	31
2.1.1	Modelo de Young-Laplace	31
2.1.2	Modelos rugosos	32
2.1.3	Ângulo de contato dinâmico	33
2.1.4	Escala de molhabilidade	34
2.2	Condensação	35
2.2.1	Condensação em película	36
2.2.2	Condensação em gotas	39
2.2.3	Gases não condensáveis	42
2.2.4	Revestimentos e tratamentos de superfície	46
2.3	Aspectos rugosos	53
2.3.1	Medição topografia de superfície	53
2.3.2	Quantificação da rugosidade	54
2.3.3	Medidas para área	56
3	BANCADA DE CONDENSAÇÃO	57
3.1	Descrição dos componentes da bancada	58
3.2	Medição	60
3.3	Controle	62
3.4	Validação e repetibilidade	63
3.4.1	Condições ambientais	64
3.4.2	Repetibilidade de resultados	65
4	MATERIAIS E MÉTODOS	69
4.1	Produção das superfícies de teste	69
4.1.1	Acabamento superficial	69
4.1.2	Revestimento e tratamento de superfície	70
4.2	Caracterização superficial	72
4.2.1	Ângulo de contato	72
4.2.2	Interferometria	74
4.2.3	Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV	76

4.3	Condensação	77
4.3.1	Análises	77
4.3.2	Correção de erros - Evaporação	79
4.3.3	Tratamento das medições	80
5	RESULTADOS	83
5.1	Caracterização	83
5.1.1	Ângulo de contato	83
5.1.2	Topografia de superfície	87
5.2	Condensação	90
5.2.1	Parâmetros variáveis	90
5.2.2	Comparativo Aço Inoxidável	95
5.2.3	Comparativo Aço Carbono + Nanotubos de Carbono	97
5.2.4	Tratamento com plasma corona	99
5.2.5	Comparativo entre os destaques de cada padrão avaliado	100
6	CONCLUSÃO	103
	REFERÊNCIAS	105
	APÊNDICES	111
	APÊNDICE A CALIBRAÇÃO	113
	A.0.1 Termoresistência PT-100	113
	A.0.2 Fluxímetro	114
	A.1 Dados brutos da calibração dos PT-100	116
	APÊNDICE B INCERTEZAS	119
	B.1 Fluxímetro	119
	B.2 Termorresistências PT-100	120
	APÊNDICE C PROCEDIMENTOS EXPERIMENTÁIS	123
	C.1 Abrasão por lixa e polimento	123
	C.2 Tratamento dos dados obtidos na interferometria óptica	124
	C.3 Ensaios de condensação	124
	C.4 Ensaios de evaporação	125

1 INTRODUÇÃO

A transferência de calor está presente em inúmeros processos naturais e industriais. Dentre seus modos, destaca-se a utilização da transferência por mudança de fase, sendo esta, através de ebulição ou condensação, ocorrendo de maneira natural ou forçada. A transferência de calor associada a mudança de fase apresenta vantagens do ponto de vista de eficiência termodinâmica quando comparada aos processos monofásicos (CAREY, 1992). A mudança de fase ocorre em processos naturais, como a evaporação e precipitação de água na atmosfera terrestre (CAREY, 1992) e em processos industriais, como em caldeiras, reatores nucleares, equipamentos de refrigeração, bombas de calor, reatores e condensadores de instalações petroquímicas. Dentre as principais aplicações, destaca-se o uso em usinas químicas e de energia (COLLIER; THOME, 1994).

A condensação é definida como o processo em que o vapor é convertido em líquido. Há dois modos de condensação: em película ou em gotas. A condensação em película ocorre quando a superfície resfriada é completamente coberta por uma película de líquido. A condensação em gotas ocorre quando gotas isoladas são formadas e entre elas existe uma fração da superfície em contato direto com o vapor, possuindo coeficiente de transferência de calor (HTC - do inglês, *Heat Transfer Coefficient*) muito maior do que a condensação em película, podendo ser cinco vezes maior (TANNER et al., 1965). Em um grande número de aplicações, a condensação se dá na presença de gases não condensáveis (GNC) que possuem grande efeito de redução no HTC (MA et al., 2008).

Desta maneira, diversos trabalhos estudam a utilização de revestimentos de superfície para favorecer a condensação em gotas, dentre eles se destacam os apresentados na Tabela 1, que traz os autores, o substrato base, o revestimento e o ganho no HTC comparado ao da condensação em película sobre o substrato. É importante ressaltar que todos os trabalhos apresentados nessa tabela estão em diferentes regimes e condições.

Trabalhos mais recentes sugerem a utilização de superfícies híbridas (com mais de um modo de condensação na mesma superfície: gota e película) por possuir perspectiva de aumento no HTC e na taxa de condensado quando comparado com os modos de condensação completamente em película e em gotas. A Tabela 2 apresenta trabalhos que utilizaram superfícies híbridas. O ganho no HTC apresentado na tabela é comparativo com a condensação completamente em gotas. É importante ressaltar que os trabalhos apresentados nas Tabelas 1 e 2 serão descritos com maior riqueza de detalhes na Subseção 2.2.4.

Tabela 1: Trabalhos com revestimentos de superfície.

Autor(es)	Substrato	Revestimento	Aumento no HTC
Marto et al. (1986)	Tubos de cobre, cobre-níquel e titânio	Polímeros	$\leq 6x$
Holden et al. (1987)	Tubos de latão, cobre, cobre-níquel e titânio	Polímeros	$\leq 10x$
Haraguchi et al. (1991)	Superfície de cobre	PVDC ¹	$\leq 20x$
Ma et al. (2002)	Tubos de latão, cobre, aço inoxidável e aço carbono	PTFE ²	$< 29x$

1—cloreto de polivinilideno 2—politetrafluoretileno

Tabela 2: Trabalhos com superfícies híbridas.

Autor(es)	Substrato	Revestimento	Padrão	Inc. h
Ghosh et al. (2014)	Alumínio polido	Trat. ácido	FB	20%
Peng et al. (2015)	Cobre polido	Jato de areia	Listras	$\leq 23\%$
Lee et al. (2016)	Cobre polido	Trat. sol-gel	Listras	$\leq 20\%$
Mahapatra et al. (2016)	Alumínio polido	Trat. ácido	FB	30%
Oestreich et al. (2019)	Aço inoxidável	NeverWet TM	Veios	-

Onde: FB é o padrão bioinspirado em Folhas de bananeira.

Para poder avaliar a condensação, no regime de convecção natural e na presença de gases não condensáveis (ar atmosférico), para diferentes amostras de estudo fez-se necessária a construção, validação e utilização da bancada de ensaios, descrita no Capítulo 3. O projeto da bancada, tomou por base de conhecimento a desenvolvida por Oestreich (2017).

Buscou-se tratamentos com pouca ou nenhuma publicação na utilização em condensação, limitando-se a escolha do tratamento ao conhecimento e domínio da produção das amostras.

Dentre as opções avaliadas e com possibilidades de produção destacou-se o uso do revestimento com nanotubos de carbono. O trabalho de Nicola et al. (2015) traz informações de que este revestimento possui características interessantes, tornando a superfície superhidrofóbica (este termo será explicado na Subseção 2.1.4) e possuir alta adesão entre o líquido e a superfície.

A utilização do tratamento com plasma corona se deu por ser uma nova tecnologia, em desenvolvimento, e apresentar características de molhabilidade da superfície muito distintas, variando bruscamente de acordo com os parâmetros e condições utilizados na aplicação. No caso da amostra avaliada neste trabalho, utilizou-se a aplicação do plasma na presença do gás R-134a, tornando a superfície superhidrofóbica e repelente ao líquido.

O principal enfoque do trabalho está em avaliar essas tecnologias recentes para quantificar e comparar seus desempenhos na condensação. Para tanto, é necessário conhecimento das superfícies estudadas, caracterizando-as, de modo a possuir a maior quantidade de informações possível.

Para se obter informações da superfície fez-se a caracterização das amostras, por meio da medição dos ângulos de contato (estático e dinâmico), quantificação de rugosidade e análise qualitativa através de imagem de alta ampliação.

Além de avaliar superfícies com revestimentos de nanotubos de carbono e tratamento com plasma corona, este trabalho avalia a influência da variação da temperatura da superfície, da temperatura ambiente e da umidade relativa na condensação. Foram avaliadas também amostras de aço inoxidável AISI-316L. Para as amostras de aço inoxidável e revestidas com nanotubos de carbono foram avaliados diferentes acabamentos de superfície.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é investigar experimentalmente a condensação no regime de convecção natural na presença de ar atmosférico (GNC) para amostras de aço inoxidável AISI-316L e aço carbono 1006, com revestimentos de nanotubos de carbono e tratamento com plasma corona.

Para atingir o objetivo principal, diversos objetivos específicos deverão ser cumpridos:

- Revisar extensamente a literatura no estado da arte do entendimento da condensação em convecção natural na presença de gases não condensáveis e revestimentos superficiais;
- Caracterizar as superfícies no âmbito quantitativo e qualitativo;
- Aplicar nanotubos de carbono como revestimento de superfície para diferentes acabamentos;
- Avaliar diferentes variações de plasma corona.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2, será apresentada uma breve revisão bibliográfica, introduzindo inicialmente o conceito de molhabilidade, seguido de um breve descritivo dos mecanismos de condensação, bem como os tipos de condensação e influência da presença de não condensáveis neste fenômeno. Também serão apresentados alguns trabalhos mais recentes, que tratam de revestimentos para superfície.

No Capítulo 3, será apresentada a bancada. Inicialmente serão descritos a bancada de ensaios e os componentes utilizados para funcionamento, serão descritos os métodos de calibração dos sensores de medição e o controle das variáveis envolvidas na transferência de calor. Por fim, é analisada a repetibilidade dos resultados obtidos.

No Capítulo 4, serão apresentados os métodos utilizados na caracterização da superfície, tendo sido analisados três aspectos: os ângulos de contato estático e dinâmico, a análise quantitativa através de interferometria óptica e a análise qualitativa utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Para finalizar o capítulo, está apresentada a metodologia aplicada aos ensaios na bancada de condensação.

No Capítulo 5, estão apresentados os resultados e sua discussão. Inicialmente, estão apresentados os dados para variação das condições e, em sequência, um comparativo entre as superfícies de aço inoxidável AISI-316L, com revestimento de nanotubos de carbono e tratada com plasma corona. Por fim, um comparativo entre os destaques de cada padrão avaliados.

No Capítulo 6, está apresentada a conclusão deste trabalho, com uma breve discussão e apresentando sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, estão dispostos nos Apêndices informações complementares ao trabalho, sendo eles, o quadro de distribuição elétrica e eletrônica, os dados complementares da calibração dos sensores e os parâmetros de incerteza associados aos sistemas de medição.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentado o estudo teórico e de revisão bibliográfica, apresentando os modelos e equacionamentos mais relevantes para o estado da arte, primeiramente introduzindo a molhabilidade e ângulo de contato, seguindo com a condensação, apresentando alguns trabalhos que utilizam a aplicação de revestimentos e, por fim, retratando a caracterização da topografia de superfície através dos aspectos rugosos.

2.1 ÂNGULO DE CONTATO E MOLHABILIDADE

A afinidade entre o líquido e uma superfície é chamada de molhabilidade e pode ser quantificada através do ângulo de contato, θ (CAREY, 1992). Logo, a molhabilidade da superfície está ligada à capacidade de o líquido manter contato com a superfície através da interação molecular (OLIVEIRA, 2011). A molhabilidade da superfície cresce com a queda do ângulo de contato, ou seja, a tendência de um líquido se espalhar aumenta com a queda do θ (GOULD, 1964).

Nesta seção serão apresentados os modelos mais disseminados na literatura para ângulo de contato, apresentando o modelo de Young, os modelos desenvolvidos por Wenzel e Cassie-Baxter para superfícies rugosas, a definição de ângulo de contato dinâmico e a escala de molhabilidade de uma superfície.

2.1.1 MODELO DE YOUNG-LAPLACE

Na Figura 1 está apresentado um corte da gota depositada na superfície, pode-se verificar a existência das três fases: sólido, líquido e vapor. O ângulo gerado entre a interface líquido-vapor e a superfície é definido como ângulo de contato, medido através do líquido no ponto triplo, ponto onde as três fases se encontram. Sabe-se que o ponto triplo faz parte de uma linha, chamada usualmente de linha de contato (CAREY, 1992). Na figura σ representa as tensões superficiais, g a gravidade e os subíndices sl , sv e lv representam as interfaces sólido-líquido, sólido-vapor e líquido-vapor, respectivamente (GOULD, 1964).

Desenvolvendo o balanço de forças no ponto triplo (OLIVEIRA, 2011), obtém-se a Equação 2.1, que é muitas vezes referenciada como fórmula de *Neumann*, mas é comumente chamada de *equação de young* (CAREY, 1992).

$$\sigma_{lv} \cdot \cos \theta = \sigma_{sv} - \sigma_{sl} \quad (2.1)$$

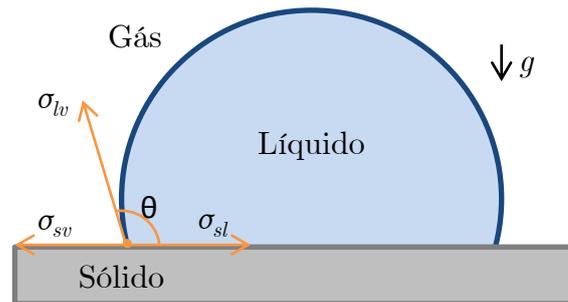


Figura 1: Corte transversal da gota.

Esse equacionamento baseia-se em uma superfície homogênea e lisa, livre de imperfeições. Para superfícies rugosas existem modelos que representam melhor o equacionamento e serão apresentadas a seguir.

2.1.2 MODELOS RUGOSOS

Quando se trata da caracterização de molhabilidade de uma superfície, inúmeros aspectos devem ser levados em consideração. Estudiosos avaliaram a interferência da rugosidade no ângulo de molhamento de uma superfície, dentre eles se destacam os modelos de Wenzel e Cassie-Baxter, pois tratam o molhamento de maneira distinta e são os mais disseminados na literatura. A Figura 2 representa o modelo de Wenzel e o modelo de Cassie-Baxter. O modelo de Wenzel (Figura 2a) considera que toda a área sólida interna a linha de contato está em contato com o líquido. Por outro lado, o modelo desenvolvido por Cassie-Baxter (Figura 2b) considera que a gota entra em contato apenas com o topo das asperezas, deixando pequenos volumes de ar entre a superfície e a gota.

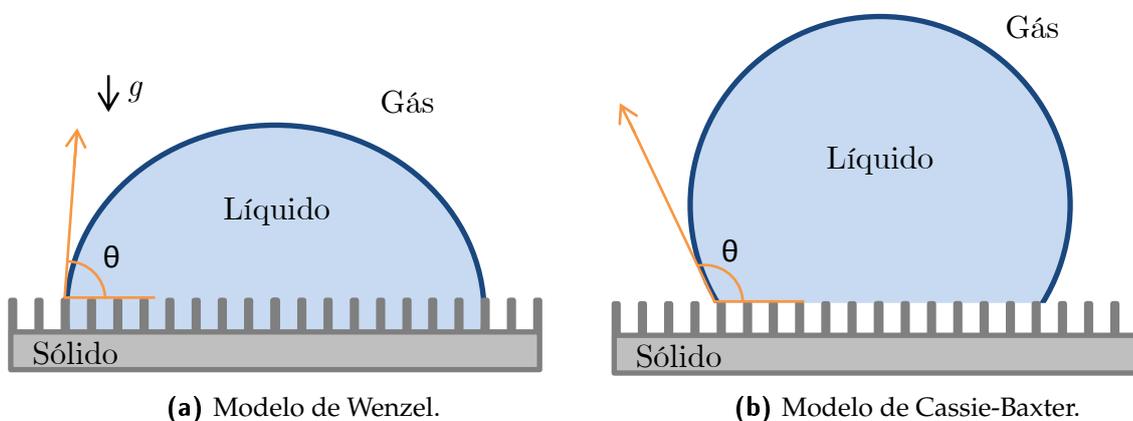


Figura 2: Modelos de gotas para superfícies rugosas.

O modelo desenvolvido por Wenzel (1936 apud LAW; ZHAO, 2016) possui como característica acentuar a molhabilidade da superfície. Ou seja, se a superfície é favorável

ao molhamento, a mesma sendo rugosa é ainda mais molhante, o mesmo acontece para superfície com baixa molhabilidade, se tornando ainda menos molhante.

A obtenção do ângulo de contato de Wenzel (θ_W) é dada pela Equação 2.2, onde r representa o fator de rugosidade, que é definido como a razão entre a superfície real (toda a área molhada) e a superfície geométrica (área projetada, disco formado pela linha tripla), i.e., $r = \text{superfície real} / \text{superfície geométrica}$ (WENZEL, 1936).

$$\cos \theta_W = r \cdot \cos \theta \quad (2.2)$$

Cassie e Baxter (1944 apud KANDLIKAR; SHOJI; DHIR, 1999) estenderam a aplicação do modelo de Wenzel (1936) para superfícies porosas. O ângulo de contato de Cassie e Baxter (θ_{CB}) observado em uma superfície é composto por fração de área da gota em contato com o sólido e em contato com o gás nas cavidades, ocupando fração de área de f_1 e f_2 , respectivamente. Pode-se obter θ_{CB} através da Equação 2.3.

$$\cos \theta_{CB} = (f_1 \cdot \cos \theta) - f_2 \quad (2.3)$$

Na literatura existem outros autores que definem modelos diferentes para obtenção do ângulo de contato e podem ser encontrados facilmente em publicações feitas por Kandlikar, Shoji e Dhir (1999), Law e Zhao (2016) e Mittal (2015), entre outros.

2.1.3 ÂNGULO DE CONTATO DINÂMICO

Os modelos apresentados anteriormente correspondem ao chamado ângulo de contato estático, para uma gota em repouso sobre a superfície. Para processos dinâmicos este único parâmetro não caracteriza completamente a molhabilidade (MITTAL, 2015). Devendo-se medir também o ângulo de contato dinâmico, também conhecido como histerese do ângulo de contato.

A histerese do ângulo ($\Delta\theta$) de contato é obtida através da diferença entre o ângulo de avanço (θ_A) e o ângulo de recuo (θ_R), mostrado na Figura 3 e através da Equação 2.4 (MITTAL, 2015), sendo θ_A o maior e θ_R o menor ângulo de contato neste processo (MIN; WEBB, 2001).

A Figura 3 exemplifica uma gota sobre uma superfície inclinada na iminência do movimento, apresentando θ_A e θ_R .

$$\Delta\theta = \theta_A - \theta_R \quad (2.4)$$

É importante ressaltar que existem diferentes formas de medir o ângulo de contato dinâmico. O procedimento utilizado para tal medição no presente trabalho será apresentado na Subseção 4.2.1.

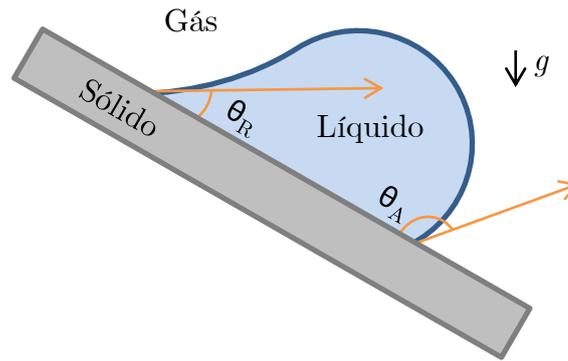


Figura 3: gota na iminência do movimento.

Fonte: Adaptado de Mittal (2015).

2.1.4 ESCALA DE MOLHABILIDADE

Como apresentado anteriormente a molhabilidade da superfície está diretamente ligada ao ângulo de contato.

De modo a criar uma nomenclatura para as superfícies através de sua característica molhante, define-se como sendo (OLIVEIRA, 2011):

- Superhidrofílico possui $\theta < 10^\circ$
- Hidrofílico possui $10^\circ < \theta < 90^\circ$
- Hidrofóbico possui $90^\circ < \theta < 150^\circ$
- Superhidrofóbico possui $150^\circ < \theta$

Esses modelos são apresentados na Figura 4.

Regime	Superhidrofílico	Hidrofílico	Hidrofóbico	Superhidrofóbico
Diagrama da gota				
Âng. contato	$\theta < 10^\circ$	$10^\circ < \theta < 90^\circ$	$90^\circ < \theta < 150^\circ$	$\theta < 150^\circ$

Figura 4: Escala de molhabilidade.

Pode-se concluir que uma superfície superhidrofílica tem maior tendência a condensação em película, enquanto uma superfície superhidrofóbica tem maior tendência a condensação em gotas (OLIVEIRA, 2011). É importante ressaltar que esse não é o único parâmetro utilizado para definir a molhabilidade de uma superfície,

principalmente sobre um processo dinâmico, por exemplo, a histerese do ângulo de contato já foi apresentada neste trabalho e possui enorme importância.

2.2 CONDENSAÇÃO

A condensação é o processo no qual o vapor é convertido em líquido e ocorre quando a temperatura do vapor é reduzida até a sua temperatura de saturação, formando o condensado (BERGMAN et al., 2011; CENGEL; GHAJAR, 2009). O processo de condensação é utilizado em muitos sistemas térmicos pois possui capacidade de transferir uma grande quantidade de calor devido a grande diferença da energia interna (entalpia) específica entre os estados líquido e vapor (BEJAN; KRAUS, 2003), quando se opera na temperatura de saturação com mudança de fase ocorre a transferência de calor latente.

Existem duas maneiras distintas de condensação, homogênea e heterogênea, apresentados na Figura 5. A homogênea ocorre quando vapor condensa independente de contato com outro componente ou fluido resfriado. Um exemplo é quando o vapor forma a névoa ou neblina (Figura 5c) ou quando entra em contato com o líquido frio (Figura 5d) (CENGEL; GHAJAR, 2009). A condensação heterogênea ocorre quando o vapor encontra uma superfície ou outra substância que esteja a temperatura abaixo da saturação, sendo este: sólido, líquido ou gasoso. As Figuras 5a e 5b apresentam à condensação heterogênea em superfícies verticais, na primeira a condensação em película (FWC, do inglês, *Filmwise Condensation*) e a segunda a condensação em gotas (DWC, do inglês, *Dropwise Condensation*) (BERGMAN et al., 2011). O coeficiente de transferência de calor por DWC pode ser de uma a duas ordens de grandeza superior a FWC. Uma série de estudos mostra a dificuldade em se garantir a DWC por longos períodos de tempo (BEJAN; KRAUS, 2003).

Na FWC, uma película de líquido que se forma sobre a superfície e desliza no decorrer do comprimento, possuindo espessura crescente, esta película gera resistência à transferência de calor. O calor transferido do vapor para a superfície deve passar pela resistência gerada, ou seja, o vapor não se encontra diretamente em contato com a superfície. De modo a reduzir o efeito da resistência gerada pela película, indica-se trabalhar com comprimentos curtos ou tubos (CENGEL; GHAJAR, 2009).

Na DWC, as gotas crescem e coalescem até adquirirem tamanho suficiente para escoar (por arrasto ou pela gravidade) e por possuir troca de calor diretamente entre o vapor e a superfície a condensação em gotas apresenta um maior coeficiente de transferência de calor (CENGEL; GHAJAR, 2009).

De modo a obter a condensação em gotas, numerosos trabalhos utilizam aditivos ao vapor e tratamentos de superfície. Alguns destes serão apresentas no decorrer dessa seção. Existem trabalhos que utilizam a combinação dos modos de condensação na

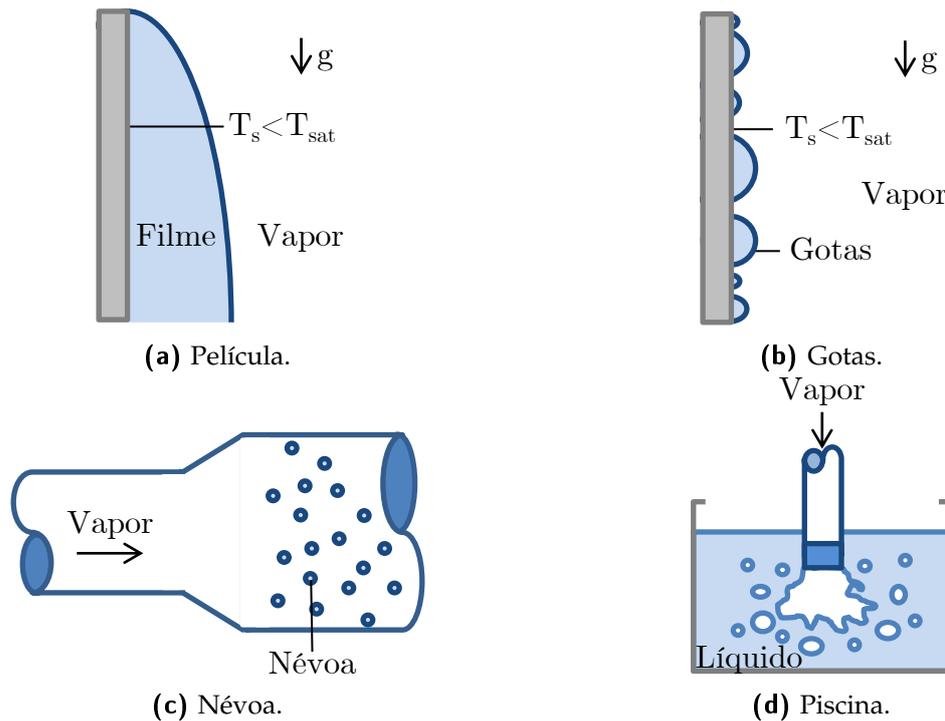


Figura 5: Modos de condensação.

Fonte: Adaptado de Bergman et al. (2011).

mesma superfície (chamada de híbrida), estes trabalhos indicam ganhos significativos no HTC por limitarem o tamanho das gotas e drenarem-nas sem que se tornem grande o suficiente para que apresentem alguma resistência à transferência de calor.

A Figura 6 apresenta o comparativo entre o coeficiente de transferência de calor (HTC, também apresentado como h) para condensação em gotas (DWC) e em película (FWC) para diferentes níveis de temperatura de sub-resfriamento ($\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_s$, onde T_{sat} é a temperatura de saturação e T_s é a temperatura da superfície). Pode-se averiguar através da figura que a DWC possui HTC superior a FWC para a maioria das temperaturas de sub-resfriamento.

No decorrer desta seção será dado enfoque à condensação heterogênea sobre superfície, apresentando inicialmente o referencial teórico para condensação em película, posteriormente para condensação em gotas. Será apresentada a influência de gases não condensáveis na condensação e, por fim, serão apresentados alguns trabalhos referentes à utilização de revestimentos superficiais para a condensação e estudos mais inovadores que utilizam a condensação em superfícies híbridas.

2.2.1 CONDENSAÇÃO EM PELÍCULA

A transferência de calor durante a condensação ocorre através da liberação do calor latente de vaporização h_{lv} . Rohsenow (1956 apud CENGEL; GHAJAR, 2009) demonstrou que o sub-resfriamento do líquido pode ser contabilizado e, de maneira

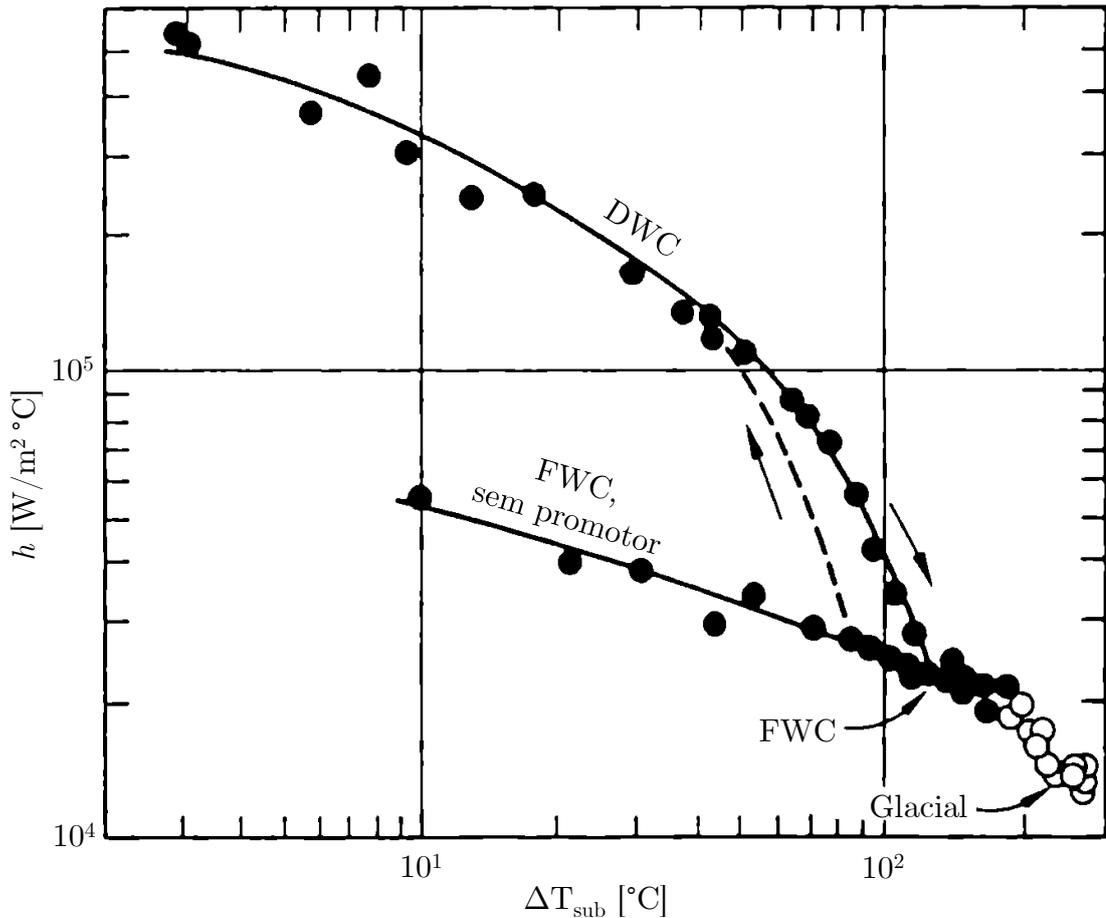


Figura 6: Comparativo condensação em película e em gotas.

Fonte: adaptado de Collier e Thome (1994).

semelhante ao sub-resfriamento de superfície, pode-se analisar o superaquecimento do vapor, onde a temperatura do vapor T_v deve ser reduzida à T_{sat} para que a condensação ocorra, temos então a Equação 2.5, que corrige o h_{lv} .

$$h'_{lv} = h_{lv} + 0,68 \cdot c_{pl}(T_{sat} - T_s) + c_{pv}(T_v - T_{sat}) \quad (2.5)$$

onde c_{pl} é o calor específico do líquido, c_{pv} é o calor específico do vapor. Sabendo que a temperatura do líquido varia entre T_s e T_{sat} , então as propriedades do líquido devem ser coletadas à temperatura de filme, $(T_s + T_{sat})/2$. O mesmo acontece para as propriedades do vapor, a $(T_v + T_{sat})/2$, com exceção de h_{lv} que deve ser avaliado à temperatura de saturação.

Logo, temos que o calor transferido para a superfície pode ser expresso pela Equação 2.6.

$$Q_{superficie} = \bar{h} \cdot A_s(T_v - T_v) = \dot{m} \cdot h'_{lv} \quad (2.6)$$

onde A_s é a área da superfície e \dot{m} é a taxa de condensação.

O primeiro modelo desenvolvido para explicar e quantificar a condensação em placa vertical isotérmica foi desenvolvido por Nusselt (1916 apud KANDLIKAR; SHOJI; DHIR, 1999).

A Figura 7 apresenta a distribuição real (Figura 7a) e o modelo de Nusselt (Figura 7b), nela estão apresentados os perfis de velocidade e de temperatura para a condensação em película. Pode-se verificar que a espessura da camada de líquido (δ) e a taxa de condensado (\dot{m}) aumentam no decorrer do comprimento x . Pode-se averiguar que para que a condensação ocorra a interface líquido-vapor deve estar na temperatura de saturação T_{sat} e para isso a temperatura da superfície obrigatoriamente deve estar abaixo da temperatura de saturação ($T_s < T_{sat}$). A distribuição da velocidade, $u(y)$, possui esse perfil devido à tensão superficial entre a camada de líquido e a superfície, onde o líquido em contato imediato com a superfície está em condição de não deslizamento (BERGMAN et al., 2011).

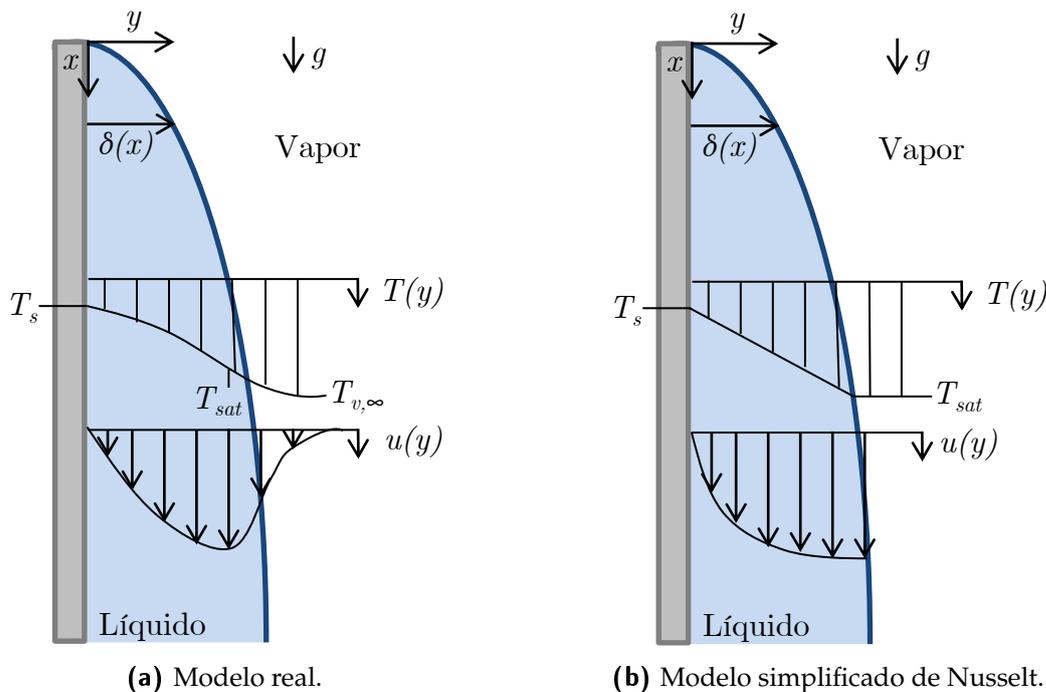


Figura 7: Modelo escoamento na superfície.

Fonte: adaptado de Bergman et al. (2011).

Considerações do modelo de Nusselt (CAREY, 1992): (1) escoamento é movido pela força da gravidade e pelos efeitos viscosos; (2) escoamento laminar; (3) propriedades constantes; (4) sub-resfriamento do líquido é desconsiderado; (5) momento e energia através da advecção no condensado são desconsiderados; (6) vapor é estacionário e não gera arrasto; (7) desconsiderado gradiente de temperatura no vapor; (8) a tensão superficial na interface líquido vapor é desconsiderada; (9) a transferência de calor através da película ocorre apenas por condução (convecção é negligenciada).

A partir dessas considerações de Nusselt, o número de Nusselt é obtido para a condensação em película sobre a superfície (CENGEL; GHAJAR, 2009; BERGMAN et al., 2011; CAREY, 1992), apresentado na Equação 2.7.

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}_L \cdot L}{k_l} = 0,943 \left[\frac{\rho_l \cdot g(\rho_l - \rho_v)h_{lv} \cdot L^3}{\mu_l \cdot k_l(T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4} \quad (2.7)$$

Para se considerar os efeitos de superaquecimento do vapor e sub-resfriamento da superfície deve-se substituir h_{lv} pelo coeficiente de calor latente de vaporização modificado h'_{lv} .

2.2.2 CONDENSAÇÃO EM GOTAS

A condensação em gotas ocorre quando a superfície não é completamente coberta com líquido. Esse modo de condensação apresenta ganhos no coeficiente de transferência de calor. Para que a condensação em gotas ocorra, existem métodos para sua promoção. O primeiro método é a injeção de fluido não molhante juntamente com o vapor, sendo depositado na superfície durante a condensação e induzindo assim que a superfície se torne não molhante. O segundo método é através da modificação da superfície, por polimento ou limpeza com cera ou graxa. O terceiro é a aplicação de material não molhante na superfície, revestindo-a, com polímeros de baixa energia superficial ou mesmo com metais nobres como ouro e prata (CAREY, 1992).

Este terceiro método se destaca por apresentar maior durabilidade quando comparado aos outros dois, que com o decorrer do processo de condensação acabam sendo influenciados drasticamente pela contaminação da superfície, até que retornem ao modo de condensação em película. Ou seja, a aplicação de revestimento sobre a superfície possui maior durabilidade temporal sem perder suas características de molhamento.

A condensação em gotas consiste na ocorrência destas, que se formam, crescem e coalescem com as adjacentes. Quando adquirem tamanho suficiente são removidas da superfície através da força gravitacional ou da força de arrasto. As gotas rolam ou deslizam pela superfície levando consigo todo o líquido que está em seu caminho, deixando a superfície novamente exposta diretamente ao vapor. Essa reexposição direta da superfície ao vapor torna o coeficiente de transferência de calor por condensação em gotas tão atrativo (CENGEL; GHAJAR, 2009).

Para melhor entendimento de como as gotas são formadas sobre uma superfície dois modelos estão presentes na literatura. O primeiro foi desenvolvido por Eucken (1937 apud CAREY, 1992) que relata que as gotas (em escala micrométrica) são geradas em pequenos sítios de nucleação que no decorrer do crescimento, coalescem e escoam, repetindo-se o ciclo, este modelo pode ser representado pela Figura 8a. O segundo

modelo, desenvolvido por Jakob (1936 apud CAREY, 1992) mostra que a condensação em gotas inicialmente começa com a formação de uma camada fina de líquido e com a condensação contínua acontece a ruptura da película de líquido (baseado nas tensões superficiais) formando-se gotas que crescem, coalescem e escoam, repetindo-se o ciclo, apresentado na Figura 8b.

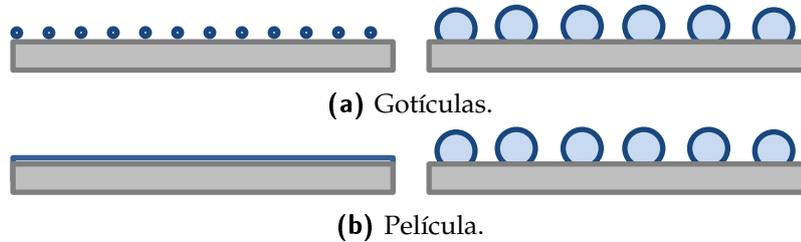


Figura 8: Modelo de crescimento de gotas.

Fonte adaptado de Huang, Zhang e Wang (2015).

Em comparação à condensação em gotas, a condensação em película apresenta maior resistência à transferência de calor em decorrência da camada de líquido sobre a superfície. Desse modo, na condensação em gotas as áreas molhadas apresentam resistência à transferência de calor, sendo que gotas maiores possuem resistências significativamente maiores do que as pequenas. A Figura 9 apresenta o esquemático da condensação sobre uma superfície com diferentes tamanhos de gotas e apresenta também um esquemático de barras que traz no eixo das abscissas o inverso das resistências de cada gotas.

A principal correlação para quantificar o fluxo de calor ou o coeficiente de transferência de calor na condensação em gotas foi desenvolvida por Isachenko (1962 apud MERTE, 1973) (Equações 2.8 e 2.9) e modificada por Peterson (1966 apud MERTE, 1973) (Equação 2.10), onde o número de Nusselt é representado pela Equação 2.11 e as variáveis são apresentadas nas Equações 2.12 e 2.13.

$$\text{Nu}^* = 1,6 \cdot 10^{-4} (\text{Re}^*)^{-0,84} \Pi_k^{1,16} \text{Pr}_l^{1/3} \quad (2.8)$$

para $8 \cdot 10^{-4} < \text{Re} < 3,3 \cdot 10^{-3}$

$$\text{Nu}^* = 2,5 \cdot 10^{-6} (\text{Re}^*)^{-1,57} \Pi_k^{1,16} \text{Pr}_l^{1/3} \quad (2.9)$$

para $3,3 \cdot 10^{-3} < \text{Re} < 1,8 \cdot 10^{-2}$

$$\text{Nu}^* = 1,46 \cdot 10^{-6} (\text{Re}^*)^{-1,63} \Pi_k^{1,16} \text{Pr}_l^{1/2} \quad (2.10)$$

onde

$$\text{Nu}^* = \frac{2h\sigma T_v}{\rho_l h_{lv} k_l (T_v - T_s)} \quad (2.11)$$

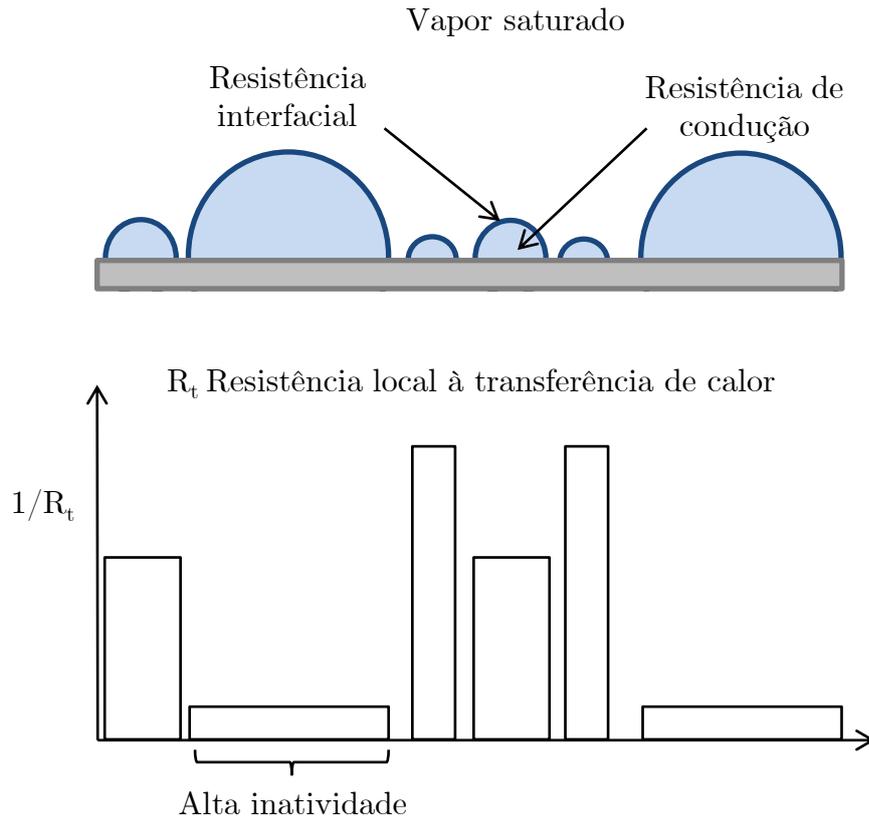


Figura 9: Modelo da resistência a transferência de calor para DWC.

Fonte: adaptado de Carey (1992).

$$\text{Re}^* = \frac{k_l(T_v - T_s)}{\mu_l h_{lv}} \quad (2.12)$$

$$\Pi_k = -\frac{2\sigma T_v}{\mu_l^2 h_{lv}} \cdot \frac{d\sigma}{dT} \quad (2.13)$$

e Pr_l é o número de Prandtl do líquido. Todas as variáveis são avaliadas à temperatura de saturação e essa correlação é aplicável ao intervalo de $1,65 < \text{Pr}_l < 23,6$ e $7,8 \cdot 10^{-4} < \Pi_k < 2,65 \cdot 10^{-2}$.

Segundo apresentado por Rose (2002), no decorrer dos anos uma série de trabalhos publicados apresentam divergências entre os resultados experimentais na condensação em gotas. A Figura 10 traz à tona a dispersão entre os resultados apresentados por inúmeros autores, todos à pressão próxima da atmosférica. A figura apresenta no eixo das ordenadas o fluxo de calor e no eixo das abscissas apresenta o ΔT sendo a diferença entre a temperatura do vapor e a temperatura da superfície.

A variação entre os resultados obtidos pelos autores está associada à imprecisão na medição da temperatura de superfície, a presença de gases não condensáveis na condensação (que será descrito na Subseção 2.2.3), a geometria do aparato experimental, a inserção de ventilação próxima à superfície e a taxa de condensação (ROSE, 2002).

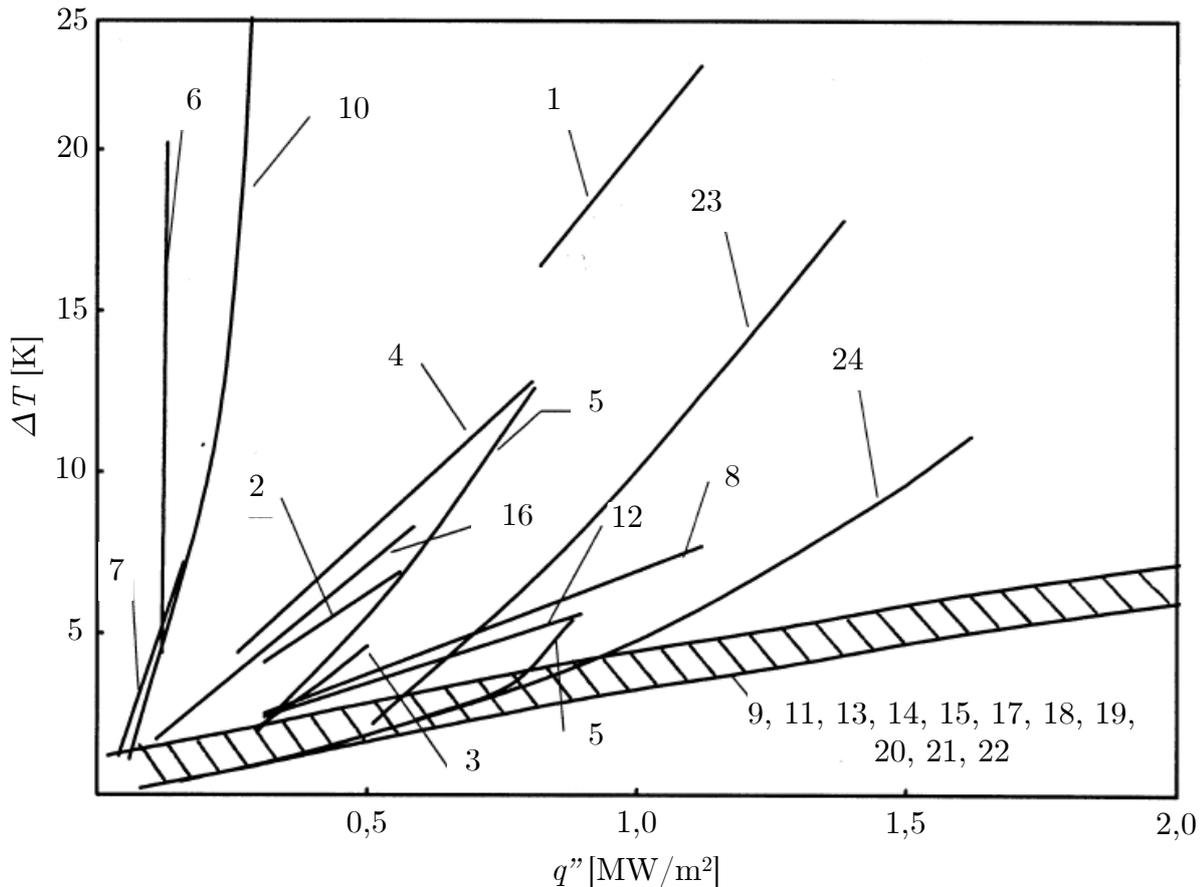


Figura 10: Comparativo diferentes autores.

Fonte: Rose (2002).

Tudo isto demonstra que para avaliar a condensação deve-se diminuir o número de variáveis no processo, analisando cada variável de maneira isolada.

2.2.3 GASES NÃO CONDENSÁVEIS

A presença de uma pequena quantidade de gás não condensável (GNC) no vapor acarreta no aumento significativo da resistência à transferência de calor, diminuindo assim o HTC. A concentração do GNC próximo à interface líquido-vapor aumenta, dificultando com que o vapor entre em contato direto com a película de líquido e condense (COLLIER; THOME, 1994). Uma fração mássica de 0,5 % pode causar uma queda no fluxo de calor de mais de 50 % comparado com a condensação em vapor puro (COLLIER; THOME, 1994; HUANG; ZHANG; WANG, 2015). A influência da quantidade de GNC é reduzida quando se aumenta a velocidade em que o ar úmido entra em contato com a superfície. Neste caso, é possível afirmar que a influência dos GNC na transferência de calor por condensação em convecção natural é maior do que no regime de convecção forçada (STEPHAN, 1992).

A quantidade de vapor que a massa de ar possui pode ser definida de duas

maneiras, através da umidade absoluta, ω , que é a relação entre a massa total de vapor e de ar seco ou através da umidade relativa, ϕ , que é a relação entre a quantidade de vapor contida no ar e a máxima quantidade de vapor que o ar pode conter a uma mesma temperatura, podendo ser expressa pela Equação 2.14 (ÇENGEL et al., 2006).

$$\phi = \frac{m_\alpha}{m_\beta} = \frac{P_\alpha V / R_\alpha T}{P_\beta V / R_\alpha T} = \frac{P_\alpha}{P_\beta} \quad (2.14)$$

onde os subíndices α e β representam a singularidade que o ar possui e que o ar pode conter à mesma temperatura, respectivamente.

Çengel et al. (2006) apresentam o orvalho, que é um exemplo de condensação que ocorre de maneira natural, gerado durante a queda de temperatura causada pelo anoitecer (pressão constante, atmosférica). A quantidade de vapor que o ar consegue armazenar durante o dia (quente) é maior que para noite (fria), logo, quando resfriado o vapor condensa em qualquer superfície com temperatura abaixo da saturação, como folhas e galhos. A partir desse conhecimento define-se como temperatura de ponto de orvalho T_{po} a temperatura em que o vapor condensa quando resfriado à pressão constante, esta é a temperatura de saturação da água à pressão de vapor, representado pela Equação 2.15.

$$T_{po} = T_{sat} @ P_v \quad (2.15)$$

De modo a quantificar a transferência de calor por condensação na presença de gases não condensáveis, faz-se o balanço de calor na superfície condensadora, representado pela Equação 2.16.

$$Q = A_s \cdot \dot{m} \cdot h'_{lv} + A_s \cdot \bar{h}(T_{amb} - T_{sat}) \quad (2.16)$$

onde \bar{h} é o coeficiente médio de transferência da calor por convecção e A_s a área da superfície. Nesta equação, o primeiro termo após a igualdade é referente à transferência de calor por mudança de fase e o segundo termo pela convecção da massa de ar. Esta equação foi desenvolvida por Stephan (1992) e não considera os termos de radiação. A radiação em problemas no regime de convecção natural representa parcela significativa na transferência de calor. De modo a quantificar o calor total trocado pela superfície, adiciona-se à equação o termo referente à transferência de calor por radiação e é feita a correção no termo referente à mudança de fase. Com essas considerações, temos a Equação 2.17.

$$Q = A_s \cdot \dot{m} \cdot h'_{lv} + A_s \cdot \bar{h}(T_{amb} - T_{sat}) + A_s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_{SB}(T_{amb}^4 - T_{sup}^4) \quad (2.17)$$

onde σ_{SB} é a constante e Stefan-Boltzmann e ε é a emissividade do ambiente, para corpo negro, unitário. O primeiro termo à direita da igualdade representa a transferência de calor do vapor para a superfície através de calor sensível e latente. O segundo

representa a transferência de calor por convecção da massa de ar e o terceiro representa a transferência de calor por radiação, entre o ambiente e a superfície. A transferência de calor total trocada é representada pelo termo Q , que pode ser definido como $Q = h_{BC} A_s (T_{amb} - T_{sup})$, onde h_{BC} representa o coeficiente global de transferência de calor através do balanço de calor.

A seguir estão apresentados alguns trabalhos da literatura que avaliaram a condensação na presença de GNC, organizados em ordem cronológica pelo autor.

Sparrow e Eckert (1961) analisaram a influência do superaquecimento do vapor e a presença de GNC na condensação, em ambos os casos desconsiderou-se a convecção natural. Concluíram que o superaquecimento do vapor representa uma elevação na transferência de calor, porém, com baixa representatividade para a maioria das aplicações práticas. De maneira qualitativa observaram que a presença de uma pequena quantidade de GNC causa grande redução na transferência de calor. É importante ressaltar que a redução encontrada experimentalmente foi menor do que a prevista.

Al-Diwany e Rose (1973) investigaram experimentalmente a condensação em placa plana na presença de GNC, sendo eles: ar, argônio, neônio e hélio. Desenvolveu-se um modelo através das camadas limites para a mistura vapor-ar a baixas concentrações, utilizado para prever o fluxo de calor para os diferentes gases. Para a mistura vapor-ar o modelo obteve boa concordância com os resultados experimentais. Para os demais os gases com massa molar superior ao da água (argônio e neônio) o modelo apresenta grandes diferenças para baixas concentrações. Para o hélio, que possui massa molar muito inferior ao da água, os resultados obtidos não são satisfatórios, apresentando altos índices de incerteza, porém, os resultados experimentais gerados incrementam a base de dados para desenvolvimento de um modelo que melhor se adequa.

Huhtiniemi e Corradini (1993) examinaram experimentalmente a condensação em placa plana variando a velocidade que a mistura vapor-GNC atinge a superfície (de 1 a 3 m/s), a inclinação de ataque da superfície (0° - 90° , onde 0° o escoamento é paralelo e 90° o escoamento é normal à superfície) e a fração mássica de GNC no vapor (de 0 a 0,87). O máximo coeficiente de transferência de calor encontrado foi de $6200 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, para vapor puro. Constatou-se que a transferência de calor aumenta com a elevação da velocidade, para frações mássicas de 0,24 a 0,87 o HTC variou de 100 a 600 $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ e para altas concentrações de vapor, a influência da orientação da superfície se mostrou baixa.

Hasanein, Kazimi e Golay (1996) avaliaram a condensação em escoamento forçado no interior de tubo vertical de aço inoxidável. Avaliaram-se as misturas vapor-hélio e vapor-hélio-ar experimentalmente e desenvolveu-se uma correlação para quantificar o HTC. Para a mistura vapor-hélio, variou-se o número de Reynolds de aproximadamente 6000 a 24000, com fração mássica de hélio de 0,022 a 0,2 e temperatura de mistura de entrada de 100 a 130 °C. Para a mistura vapor-hélio-ar

variou-se o número de Reynolds de aproximadamente 6500 a 26500, fração mássica de hélio de 0,023 a 0,2 e de ar de 0,045 a 0,2 e temperatura de mistura de entrada de 100 a 130 °C. O experimento obtém o HTC local e os parâmetros controlados. Concluiu-se que a correlação desenvolvida possui resultados muito bons e pode ser utilizada para prever o HTC local para a configuração estudada.

Kuhn, Schrock e Peterson (1997), assim como Hasanein, Kazimi e Golay (1996), estudaram a condensação em tubo de aço inoxidável vertical com escoamento forçado de vapor, vapor-ar e vapor-hélio, utilizando 3 diferentes correlações, que utilizam o método do fator de degradação, a teoria da camada limite difusiva e o modelo de transferência de condutância mássica, respectivamente. O primeiro modelo apresenta acurácia de engenharia satisfatória mas sem representar bem a fenomenologia. Os outros dois modelos por serem mais complexos apresentam maior concordância com os valores obtidos experimentalmente. Para a primeira correlação obteve-se uma concordância entre os valores obtidos e os resultados experimentais de 7,4 %, 17,6 % e 13 % para vapor puro, vapor-ar e vapor-hélio, respectivamente, os dois modelos seguintes apresentaram melhora significativa, obtendo para o segundo modelo 8,4 % e 6,1 % de divergência para vapor-ar e vapor-hélio, respectivamente, e o último modelo obteve 6,4 % e 3,2 % para vapor-ar e vapor-hélio, respectivamente.

Al-Shammari, Webb e Heggs (2004) analisaram a condensação em tubos de cobre dispostos na vertical com escoamento forçado e comparou-se com balanço de energia para vapor puro e mistura de vapor-ar, obtendo erro de 15 % na comparação entre o resultados experimentais. Os autores atribuem essa diferença à baixa precisão na medição da temperatura da superfície fria, aumentando significativamente o erro aplicado ao balanço de energia. Eles relatam também que a resistência à transferência de calor para o vapor puro pode ser desconsiderado por ser muito baixo, porém, com a adição de ar a resistência sobe significativamente, principalmente na porção de entrada do tubo, onde a queda no coeficiente de transferência de calor se mostrou maior.

Oh e Revankar (2006) examinaram experimentalmente e teoricamente a condensação em tubo de aço inoxidável tipo 304. A mistura vapor-ar escoava internamente ao tubo onde calor é transferido da mistura para o tubo, o tubo está submerso em um tanque de água, transferindo-se então calor para a água através da ebulição, ou seja, condensando internamente e evaporando externamente. A parte inicial do tubo é revestida com isolante térmico, sendo considerada seção de testes apenas a região após o isolamento, plenamente desenvolvido. Desenvolveu-se um modelo analógico de calor e massa para condensação em película anular na presença de GNC. Este modelo considera o transporte de calor, massa e momento. Comparando-se com os resultados experimentais obteve-se uma divergência no HTC local de 18,7 %, portanto, conclui-se que a não melhora na predição do HTC local se dá pela consideração nas correlações de que o regime está plenamente desenvolvido.

Wu et al. (2017) desenvolveram um equacionamento para condensação externa no regime de convecção forçada para tubo horizontal e convecção natural em placa plana na vertical, com a mistura vapor-ar, validando os equacionamentos com trabalhos experimentais publicados anteriormente. O modelo desenvolvido para convecção natural foi obtido através da combinação termodinâmica e solução integral para condensação desenvolvida por Al-Diwany e Rose (1973) e da análise da condensação de vapor puro, desenvolvido por Nusselt. Para o estudo com convecção forçada no tubo obteve-se diferença entre os valores experimentais e calculados de 15%. Para o caso com convecção natural em placa plana os resultados possuem boa concordância, isso quando a massa molar do gás é superior à massa molar do vapor, para concentrações de vapor abaixo de 0,1. A influência do GNC na condensação é maior na convecção natural.

2.2.4 REVESTIMENTOS E TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE

A utilização de tratamentos e revestimentos de superfície para incremento do coeficiente de transferência de calor em condensadores tem ganho notoriedade com o passar dos anos. Isto se dá devido à busca pelo aumento da eficiência em ciclos termodinâmicos e em trocadores de calor, portanto, o tema possui relevância do ponto de vista energético e financeiro.

Será apresentado a seguir parte do estado da arte ligado à aplicabilidade de tratamentos e revestimentos, em ordem cronológica. Inicialmente estão apresentados os trabalhos que tratam exclusivamente de revestimentos e tratamentos de superfície e posteriormente trabalhos que avaliam superfícies híbridas. Finalizando a subseção, estão apresentadas duas tabelas com dados importantes dos trabalhos revisados.

Marto et al. (1986) investigaram a durabilidade do efeito da DWC gerada a partir de 4 revestimentos poliméricos e dois metais nobres (ouro e prata) em tubos de: cobre de alta condutividade, titânio e cobre-níquel. Realizaram-se testes de períodos maiores que doze mil horas, obtiveram-se ganhos no HTC seis vezes maior quando comparado à condensação em película. Os resultados obtidos foram definidos por qualidade e durabilidade da condensação em gotas. A condutividade térmica do substrato não interfere na molhabilidade e a espessura do revestimento polimérico de 0,1 μm manteve a DWC muito boa para tempos acima de dois anos.

Holden et al. (1987) avaliaram a aplicação de 14 revestimentos poliméricos sobre tubos de: latão, cobre, cobre-níquel e titânio pelo período de vinte e duas mil horas. Os tubos foram dispostos na horizontal com escoamento vertical de vapor no sentido de cima para baixo, com velocidade aproximada de 2 m s^{-1} . Os revestimentos geram o aumento no coeficiente de transferência de calor de 5 a 8 vezes. Dentre os revestimentos estudados, o que apresenta maior ganho no HTC (acima de oito vezes) é o *NEDOX*,

desenvolvido comercialmente pela *General Magnaplate Corporation*, com espessura de 5 μm ; porém, após vinte e quatro horas de ensaio o revestimento apresenta escurecimento, indicando reação química entre o revestimento e o ambiente. Segundo os autores, dentre os revestimentos utilizados, os que apresentaram as melhores alternativas de aplicação a longos tempos foram: flúor-epóxi e flúor-acrílico, que geram aumento de 2 e 5 vezes no HTC, respectivamente. O NRL C-6 flúor-epóxi, desenvolvido pela *Griffith and the Naval Research Laboratory* com espessura de 5 μm a 10 μm , obteve oxidação na superfície; entretanto, a oxidação da superfície não causou quaisquer queda no HTC. O NRL flúor-acrílico é um revestimento experimental (não comercial), que apresenta maiores ganhos no HTC e não apresenta sinais de degradação para qualquer tempo de teste, acima de vinte mil horas.

Haraguchi et al. (1991) estudaram a aplicação de revestimento de PVDC (cloreto de polivinilideno) sobre superfície de cobre, avaliando a variação da espessura do revestimento, de 0,05; 0,10; 0,25 e 0,5 μm . Cada superfície passa por um período de testes de oitenta e três horas. O revestimento com 0,5 μm obteve ganhos no HTC de calor de mais de 20 vezes, sendo comparado diretamente ao revestimento de ouro. A conclusão do trabalho é de que para promover a condensação em gotas o revestimento estudado experimentalmente apresenta altos HTC, comparado ao ouro, porém, pensando na aplicação em larga escala é economicamente mais viável.

Ma et al. (2002) analisaram diferentes aplicações do revestimento de PTFE (politetrafluoretileno) em tubos de: latão, cobre, aço inoxidável e aço carbono. Variaram-se os parâmetros utilizados no método de aplicação (adesão dinâmica por feixe de íons-DIMI). Os resultados experimentais indicam aumento de 1,6-28,6 vezes para tratamento em tubos de latão quando comparado à condensação em película. O método de aplicação do revestimento tem forte importância na sua durabilidade e está ligado à adesão do revestimento no metal.

Ma et al. (2008) desenvolveram estudo para avaliar a presença de GNC na condensação, pressão de operação e temperatura de sub-resfriamento da superfície para substratos de cobre e alumínio. Utilizou-se como revestimento flúor-carbono. Variou-se a concentração molar de ar de 0,5 % a 5 %, a pressão de 100 kPa e 160 kPa e a temperatura de sub-resfriamento de 10 °C a 45 °C. Observou-se que a presença de GNC para concentrações molar menores de que 0,85 % o calor latente é o principal promotor da transferência de calor, podendo negligenciar o calor sensível. O aumento na pressão de operação causa o aumento no HTC. O aumento da temperatura de sub-resfriamento gera uma pequena queda no coeficiente de transferência de calor. Dentre os parâmetros avaliados neste trabalho conclui-se que as características de transferência de calor são afetada pela temperatura de sub-resfriamento, pressão de operação e outros fatores da condensação na presença de GNC, porém, o fator dominante é a concentração mássica de ar, apresentando alta degradação no HTC para pequenas concentrações.

Trabalhos mais recentes avaliaram a utilização de revestimentos buscando incremento no coeficiente de transferência de calor utilizando as chamadas superfícies híbridas, elevando o HTC quando comparado a condensação em gotas. A principal característica das superfícies híbridas é, em sua maioria, utilizar parte da superfície para formar a condensação em gotas e parte em película. Operando com ambas as características na mesma superfície, pode-se controlar o tamanho máximo da gota, limitando a sua resistência à transferência de calor. Deste modo os seguintes trabalhos apresentados utilizam superfícies híbridas, porém o enfoque de relação com este trabalho é a variedade de revestimentos.

Ma (2003) analisaram a utilização de revestimento de flúor orgânico com espessuras maiores que $1\ \mu\text{m}$ sobre tubos de latão com acabamento superficial produzido por lixa 800, criando-se assim listras no tubo, mantendo a proporção de 50% de área para cada padrão. Operou-se com o tubo na vertical e sobre regime de convecção natural com vapor de água. O número de listras no tubo variou de 2 a 16, obtendo incremento no HTC de 1,27 a 1,96 vezes comparado à condensação no tubo de latão, respectivamente. Observou-se que o maior HTC foi encontrado para a o tubo completamente coberto com o revestimento estudado, chegando a ganhos superiores a 2,5 vezes. A conclusão importante deste trabalho é que se pode aumentar o fluxo de calor variando como são divididas as frações de área na superfície; neste caso nenhuma delas superou a condensação completamente em gotas.

Ghosh et al. (2014) analisaram superfícies híbridas com padrão de listras com oito diferentes larguras e uma superfície bio-inspirada em folhas de bananeira, utilizando como substrato alumino polido (hidrofílico) e tratamento em parte da superfície com processo químico de banho com ácido hidro-clorídrico (super-hidrofílico). Conseguiu-se para o padrão bio-inspirado um aumento de 19% na taxa de massa coletada e de 20% no HTC quando comparado à superfície com condensação completamente em gotas (alumínio polido). Particularmente para condições de umidade alta, verificou-se que o padrão bio-inspirado supera a taxa de condensado em 9% e o HTC em 5% comparada à superfície com padrão de listras de maior eficiência dentre todas as testadas e, para o caso com umidade mais baixa, mostrou-se tão eficiente quanto o padrão de listras.

Peng et al. (2015) investigaram superfícies com listras possuindo como substrato cobre polido e tratamento com jato de areia, avaliando experimentalmente a influência do tamanho máximo de gotas e a distribuição de densidade em superfícies híbridas na transferência de calor, com a combinação hidrofóbica-hidrofílica. Resultados indicam que o aumento na largura da listra hidrofóbica acarreta no aumento do tamanho máximo de gotas e diminuição da densidade de gotas. A transferência de calor para a superfície híbrida ótima é 23% maior do que para a superfície completamente com DWC para um sub-resfriamento de $2\ ^\circ\text{C}$. O incremento da transferência de calor para a superfície híbrida é reduzido com o aumento do sub-resfriamento. Encontrando-se ganhos no

coeficiente de transferência de calor de 23 %, 11 % e 7 % para sub-resfriamento de 2 °C, 4 °C e 6 °C, respectivamente. Logo, a ótima largura para a listra hidrofóbica para aperfeiçoar a troca térmica existe e é reduzida com o aumento da listra hidrofílica.

Lee et al. (2016) examinaram superfícies híbridas com padrão de listras, variando a largura do revestimento (de 1,5 mm a 5,5 mm) e mantendo a do substrato sempre em 5 mm. A superfície possui formato de disco com diâmetro de 30 mm. Avaliou-se a disposição da superfície (horizontal e vertical), padrão de listras e temperatura de sub-resfriamento. O substrato utilizado foi cobre polido e tratou-se parte da superfície através do método sol-gel com nanopartículas de silício (40 nm), gerando uma superfície super-hidrofóbica. Para as disposições horizontal e vertical apresentaram-se ganhos no HTC de 1,2 e 2,8 vezes, respectivamente, comprovando-se que as superfícies híbridas podem aumentar significativamente a transferência de calor. O aumento no sub-resfriamento da superfície reduz a largura ótima do revestimento. Logo, a partir dos resultados obtidos, conclui-se que superfícies com padrão de molhabilidade podem ser aplicadas para um melhor desempenho na transferência de calor por condensação.

Mahapatra et al. (2016) deram continuidade ao trabalho desenvolvido por Ghosh et al. (2014), com o padrão bio-inspirado em folhas de bananeira e realizando pequenos ajustes na disposição dos caminhos de escoamento de condensado. Manteve-se como substrato o alumínio polido e o tratamento por banho de ácido hidro-clorídrico (super-hidrofílico). Para as superfícies de comparação, com condensação completamente em gotas (superhidrofóbico) utilizou-se um processo químico de modificação do alumínio. Este padrão favorece o escoamento do condensado por capilaridade e aumenta significativamente a transferência de calor por DWC a partir da redução do diâmetro de partida das gotas. Os resultados para essa superfície apresentaram ganhos de 30 % no HTC quando comparados a DWC. Logo, este padrão apresenta ganhos favoráveis na transferência de calor, além de ser escalável devido à facilidade de produção.

Orejon et al. (2017) examinaram superfícies de silício estruturadas com micro-pilares. Os pilares mantiveram a relação de altura-diâmetro, variando-se o espaçamento. Para pilares com maiores espaçamentos a condensação ocorre inicialmente em gotas, porém, assim que entra em regime permanente toda a superfície opera com película de condensado. A medida que o espaçamento entre os pilares diminui, inicia-se a condensação em gotas nos topos dos pilares e em película aos arredores, o autor chama como sendo a condensação simultânea, em gotas e em película. No trabalho realizado, avaliou-se que quanto maior o aproveitamento da área com condensação em gotas, maior é a transferência de calor. Porém, para o caso de espaçamentos muito pequenos a película gerada entre os pilares não é suficiente para escoar todo o condensado, causando inundação da superfície e acarretando novamente

na condensação completamente em película. Conclui-se que o espaçamento ótimo depende diretamente da inclinação da superfície para favorecer a troca térmica e a drenagem de todo condensado gerado.

Oestreich et al. (2019) investigaram o padrão inspirados em folhas (veios, ou mesmo, espinha de peixe), utilizando com substrato aço inoxidável AISI-316L com revestimento do produto comercial NeverWet[®], com porcentagem de cobertura de 0%, ~30%, ~50%, ~70% e 100%. Avaliaram também a variação da temperatura de superfície e da umidade relativa na condensação. Os resultados indicam que para variação na umidade relativa de 60% para 70% e de 70% para 80% um aumento na taxa de condensado é de 20% e 25%, respectivamente. Para a redução na temperatura de superfície de 17,6 °C para 12,6 °C e de 12,6 °C para 6,6 °C, um aumento na taxa de condensado é de 20% e 2%, respectivamente. Os resultados para fração de área de ~70% apresentaram ganhos na taxa de massa coletada que variam de 7,4% a 17,5% quando comparado à superfície completamente revestida. Os autores concluem que apenas os resultados apresentados não devem servir como comprovação de incremento das taxas de calor e massa, mas são de imensa notoriedade, servindo como base de dados e indicativos.

As tabelas apresentadas à seguir apresentam dados importantes dos trabalhos revisados. Separados em duas tabelas, na Tabela 3 estão apresentados dados dos ensaios, informando o fluido de trabalho, o modo de condensação e o método de resfriamento da seção de teste. Na Tabela 4 estão apresentados dados das seções de testes, informando o substrato, o tratamento/revestimento da superfície (Trat./Rev.), ângulos de contato ($\theta \uparrow$ e $\theta \downarrow$ sendo o maior e menor ângulo de contato, respectivamente) e uma pequena ilustração simplificada que representa o padrão utilizado nos teste.

Os índices na Tabela 4 significam: Ti-Titânio, Cu-Cobre, Ni-Níquel, HCu-Cobre de alta condutividade, Lt-Latão, AI-Aço inoxidável, AC-Aço Carbono, Al-Alumínio, Si-Silício, d-Si- Dióxido de Silício, Pol.-Poliméricos e M. Nobres-Metais Nobres.

Tabela 3: Trabalhos com superfícies híbridas.

Autor(es)	Fluido	Convecção	Resfriamento
Completamente Revestido			
Marto et al. (1986)	Vap. Sat.	Forçada	Banho
Holden et al. (1987)	Vap. Sat.	Forçada	Banho
Haraguchi et al. (1991)	Vap. Sat.	Forçada	Banho
Ma et al. (2002)	Vap. Sat.	Natural	Banho
Ma et al. (2008)	Ar Úmido	Natural	Banho
Superfícies Híbridas			
Ma (2003)	Vap. Sat.	Natural	Banho
Leu, Lin e Wu (2006)	Vap. Sup.	Forçada	Banho
Varanasi et al. (2009)	Vap. Sat.	Natural	ESEM
Grooten e Geld (2012)	Ar Úmido	Forçada	Banho
Chatterjee et al. (2013)	Vap. Sat.	Forçada	Banho
Peng et al. (2014)	Vap. Sat.	Natural	-
Ghosh et al. (2014)	Ar Úmido	Natural	Peltier
Peng et al. (2015)	Vap. Sat.	Natural	Banho
Lee et al. (2016)	Ar Úmido	Natural	Banho
Mahapatra et al. (2016)	Ar Úmido	Natural	Peltier
Orejon et al. (2017)	Vap. Sat.	Natural	ESEM
Oestreich et al. (2019)	Ar Úmido	Natural	Peltier

Onde: Vap. Sat.- Vapor Saturado, Vap. Sup.-Vapor Superaquecido, Banho-Banho térmico e ESEM-Microscópio Eletrônico (do inglês, Environmental Scanning Electron Microscope).

Tabela 4: Trabalhos com superfícies híbridas.

Autor(es)	Substrato	Trat./Rev.	$\theta \uparrow$	$\theta \downarrow$	Ilustração
Completamente Revestido					
Marto et al. (1986)	Ti, Cu-Ni e HCu	Pol. e M. Nobres	-	-	
Holden et al. (1987)	Lt, Cu, Cu-Ni e Ti	Polimérico	-	-	
Haraguchi et al. (1991)	Cu	Polivinilideno	-	-	
Ma et al. (2002)	Lt, Cu, Al e AC	PTFE	>95	-	
Ma et al. (2008)	Cu e Al	Flúor-Carbono	85,2	-	
Superfícies Híbridas					
Ma (2003)	Lt	Flúor Orgânico	~100	-	
Leu, Lin e Wu (2006)	d-Si	1-Dodecanethoil	105	20	
Varanasi et al. (2009)	d-Si	Fluorosilane	110	25	
Grooten e Geld (2012)	PVDF	Ti	65,1	56	
Chatterjee et al. (2013)	Cu	Teflon AF	115	60	
Peng et al. (2014)	Cu	PFA/Cr ₂ O ₃	120	70	
Ghosh et al. (2014)	Al	Banho Ácido	78	0	
Peng et al. (2015)	Cu	Jato de Areia	120	50	
Lee et al. (2016)	Cu	Si	155	105	
Mahapatra et al. (2016)	Al	Banho Ácido	78	0	
Orejon et al. (2017)	Si	-	-	50	
Oestreich et al. (2019)	Al	NeverWet [®]	157	76	

Onde: ● e ○ representam o superfície tratada/coberta e o substrato puro, respectivamente.

2.3 ASPECTOS RUGOSOS

Superfícies produzidas por métodos de engenharia apresentam uma série de irregularidades e possuem diferentes métodos para avaliar as suas características rugosas. Dentre as principais maneiras de modificar a rugosidade de uma superfície se encontram os processos de polimento, abrasão e tratamentos físicos e químicos.

No decorrer desta seção serão apresentados os métodos de medição e os modelos de quantificação dos aspectos de rugosidade, bem como os principais índices.

2.3.1 MEDIÇÃO TOPOGRAFIA DE SUPERFÍCIE

A topografia de uma superfície é obtida de dados que indicam as coordenadas da superfície, podendo ser obtida através de uma linha ou de uma área.

No perfilmetro de contato, uma pequena agulha, percorre a superfície por uma linha. A posição da agulha é coletada obtendo as coordenadas através de monitoramento via transdutor de medição. Para esse método existem uma série de limitações que estão diretamente ligadas à modificação direta que esta agulha realiza na superfície e à física de não conseguir representar exatamente a superfície (Δd representa a limitação física na medição), que pode ser visualizada na Figura 11 (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

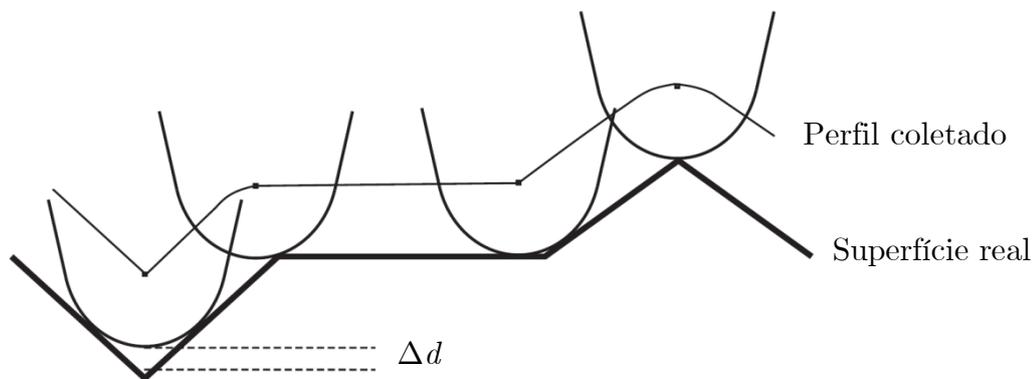


Figura 11: Perfilmetro de agulha.

Fonte: Hutchings e Shipway (2017).

Outro método de coleta de dados amplamente disseminado é baseado na medição óptica, com a utilização de um interferômetro óptico, que tem seu funcionamento apresentado na Figura 12, onde um feixe de luz é dividido em dois, um deles é direcionado para uma superfície de referência e é refletido para o sensor, o segundo feixe reflete na superfície a ser analisa e retorna direcionado também ao sensor. Com a medição do sensor, o equipamento converte a informação em dados de coordenadas tridimensionais da superfície (é importante ressaltar que a figura possui simplificações drásticas para melhor entendimento da medição). Esses dados são

coletados para uma área. Alguns equipamentos possuem um sistema de varredura em que a superfície se move e são coletados dados de uma área ainda maior, deixando a representação da superfície melhor (THOMAS, 1999).

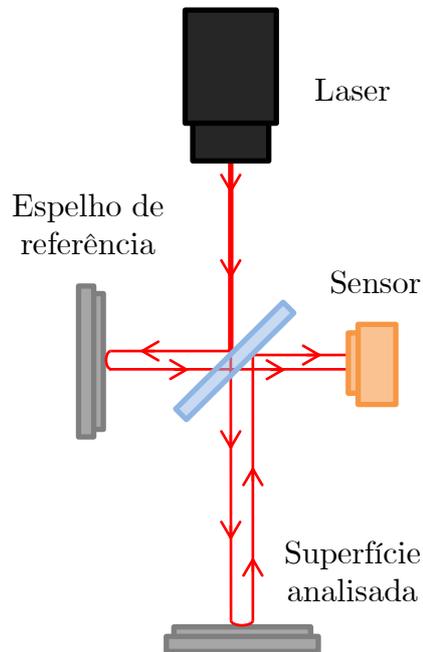


Figura 12: Funcionamento interferômetro óptico.

Utilizando-se a medição através do método óptico tem-se maior qualidade de resultados, pois representa melhor a superfície não possuindo contato direto. Uma das restrições à utilização do sistema óptico é de que a superfície deve possuir refletividade, pois caso contrario o retorno do feixe não ocorre, ocasionando na perda de dados e assim falha na medição.

Outro método de avaliar a rugosidade de superfície muito disseminada é a utilização de Microscópio Eletrônico de Varredura. Através da utilização do MEV pode-se avaliar a superfície de maneira qualitativa, comparando-as para altos níveis de aproximação (neste trabalho, aproximações de 3 mil vezes para comparativo e de até 80 mil vezes para avaliar o crescimento dos nanotubos de carbono).

2.3.2 QUANTIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE

É importante diferenciar a rugosidade de uma superfície, que são irregularidades em pequena escala, e o erro de forma, também chamado de ondulações, que são variações na superfície em maior escala. A distinção entre a rugosidade e as ondulações são arbitrárias e estão associadas à escala de irregularidades da superfície (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Para definição da rugosidade é necessário remover as ondulações e irregularidades da superfície, avaliando exclusivamente a rugosidade. Faz-se isso

aplicando filtragem nos dados coletados. Com esse proposito existem muitas medições quantitativas que podem ser derivadas dos dados coletados através do perfil da superfície.

A medida mais comum para quantificação rugosidade de superfície é a rugosidade média, R_a . De acordo com Leach (2014) a rugosidade média pode ser definida como o desvio absoluto com relação à linha média. Formalmente, pode-se descrever o R_a através da Equação 2.18.

$$R_a = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |z(x)| dx \quad (2.18)$$

onde z é a altura da superfície no decorrer do comprimento (em x) e o comprimento varia da origem a L . Normalmente pontos espaçados igualmente ao longo do perfil são representados por uma função contínua, podendo ainda ser expresso pela Equação 2.19.

$$R_a \cong \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |Z_i| \quad (2.19)$$

onde Z_i é a altura no ponto i e N é o numero de pontos medidos ao longo de x .

Outro parâmetro comum para quantificação da topografia de superfície é a rugosidade RMS (do inglês, Root Mean Square), R_q , que é definida por Leach (2014) como sendo o desvio quadrático médio com relação à linha média, apresentado para pontos discretos pela Equação 2.20.

$$R_q \cong \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Z_i^2} \quad (2.20)$$

Os índices apresentados, R_a e R_q , não apresentam informações como espaçamento ou irregularidades da superfície. Para uma melhor descrição da topografia da superfície são necessárias informações sobre a distribuição das alturas da superfície e espacial de picos e vales.

Segundo Hutchings e Shipway (2017). a rugosidade de assimetria (em inglês, *skewness*), R_{sk} , define a assimetria do perfil, definindo-se para pontos discretos na Equação 2.21.

$$R_{sk} \cong \frac{1}{R_q^3} \cdot \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Z_i^3 \right] \quad (2.21)$$

o valor de R_{sk} é determinado pela diferença entre a linha média e a distribuição da rugosidade. Superfícies dominadas por picos possuem assimetria positiva e por vales negativa.

A assimetria de *kurtosis* (do grego, que significa cume, montanha ou corcunda) é uma medida da nitidez do pico do perfil e pode ser descrita pela rugosidade de *kurtosis*, R_{ku} . Expresso para pontos discretos pela Equação 2.22 (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

$$R_{ku} \cong \frac{1}{R_q^4} \cdot \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Z_i^4 \right] \quad (2.22)$$

Diferente do valor de R_{sk} o valor de R_{ku} não se faz distinção entre os valores de pico e vale do perfil. R_{ku} é sempre positivo pois a informação da altura está elevada a uma quarta potência. Ambos os valores podem ser obtidos diretamente do perfil da superfície.

2.3.3 MEDIDAS PARA ÁREA

Todo o equacionamento apresentado nessa seção é referente a dados em duas dimensões, portanto é importante apresentar como se dá o cálculo dos aspectos de superfície para uma área.

Os parâmetros utilizados tradicionalmente para descrever um perfil linear podem ser estendidos para perfis de área. Por exemplo, para a rugosidade média, S_a temos a Equação 2.23 (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

$$S_a = \frac{1}{A} \cdot \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (2.23)$$

De maneira similar ao perfil linear, para uma superfície pode-se apresentar uma simplificação considerando os dados como sendo discretos. Apresentado na Equação 2.24.

$$S_a \cong \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |Z_i| \quad (2.24)$$

Todos os outros parâmetros equivalentes podem ser obtidos de maneira similar à apresentada para a rugosidade média.

A literatura apresenta variação na representação, onde, o índice S é utilizado no lugar do índice R , de modo a indicar que se trata da rugosidade obtida através de uma área e não de um perfil linear.

3 BANCADA DE CONDENSAÇÃO

Para análise da condensação em superfícies fez-se necessária a construção, elaboração e controle de uma bancada de ensaios. Neste capítulo, será apresentada a bancada, sendo também apresentadas as dimensões e disposição dos equipamentos e componentes utilizados para a operacionalidade, bem como a funcionalidade e os métodos de calibração utilizados. Por fim, está descrita e apresentada a avaliação da repetibilidade e estabilidade das variáveis e resultados.

A bancada de ensaios possui as seguintes dimensões internas: 65 cm × 65 cm × 50 cm (largura, profundidade e altura, respectivamente). Produzida internamente com compensado naval e revestida com tinta esmalte preto fosco, isolante térmico (lã de rocha) e camada externa de compensado laminado, também preto fosco, sendo completamente isolada do ambiente externo.

Na parede frontal, está instalada uma porta com borracha de vedação e abertura de 180 graus. No centro da parede direita está fixada uma janela de visualização em acrílico com dimensões de 12 cm × 8 cm (horizontal e vertical, respectivamente); no centro da parede esquerda, há uma abertura de dimensões 8 cm × 8 cm onde é fixado o sistema de resfriamento. Na parte posterior externa à bancada está anexado o quadro elétrico e eletrônico. Além dessas aberturas, existem pequenos orifícios por onde passam os cabos elétricos e de sinal, a entrada do vapor e o suporte que faz a conexão entre a balança e o condensado coletado no interior da câmara.

Para a construção dessa bancada utilizou-se como referência a bancada desenvolvida por Oestreich (2017) em sua dissertação, e posteriormente apresentada de maneira simplificada por Oestreich et al. (2019). A Figura 13 apresenta de maneira simplificada da bancada de condensação.

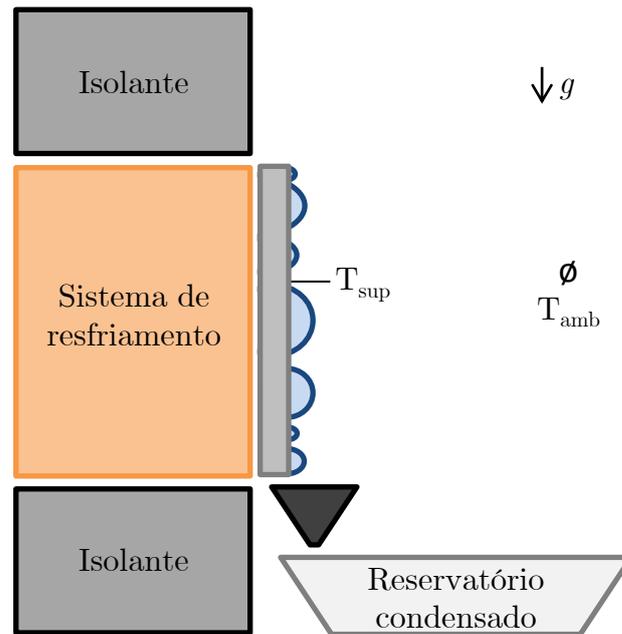


Figura 13: Simplificação da bancada de condensação.

3.1 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DA BANCADA

Para a operação da bancada, uma série de equipamentos e componentes se fez necessária. Estes estão apresentados a seguir com um breve descritivo de suas aplicações:

- Termoresistência PT-100 - Medir temperatura;
- Transdutor de fluxo de calor ou fluxímetro de calor - Mensurar fluxo de calor através da superfície;
- Sensor de umidade relativa - Medir umidade relativa ambiente;
- Resistência helicoidal - Manter temperatura ambiente constante;
- Gerador de vapor - Manter umidade relativa constante;
- Pastilha Peltier - Resfriar superfície de teste;
- Fonte variável de corrente contínua - Alimentar pastilha Peltier;
- Balança de precisão - Medir massa de condensado;
- Sistema de controle e aquisição de dados (*DAQ - Data Acquisition*) - Controlar e adquirir dados da bancada;
- Relés de estado sólido - Chavear a alimentação da resistência helicoidal e do gerador de vapor;

- Ventoinhas - Homogenizar o interior da bancada e aumentar a troca de calor no lado quente do Peltier;
- Dissipador de calor aletado - Dissipar o calor proveniente do sistema de resfriamento da superfície;
- Dimmers - Reduzir a potência entregue à resistência helicoidal e ao gerador de vapor;
- Microcomputador - Operar, controlar e adquirir os dados;
- Câmera - Adquirir imagens do fenômeno.

A Figura 14 apresenta uma ilustração interna da bancada de testes, apresentando a disposição dos componentes presentes.

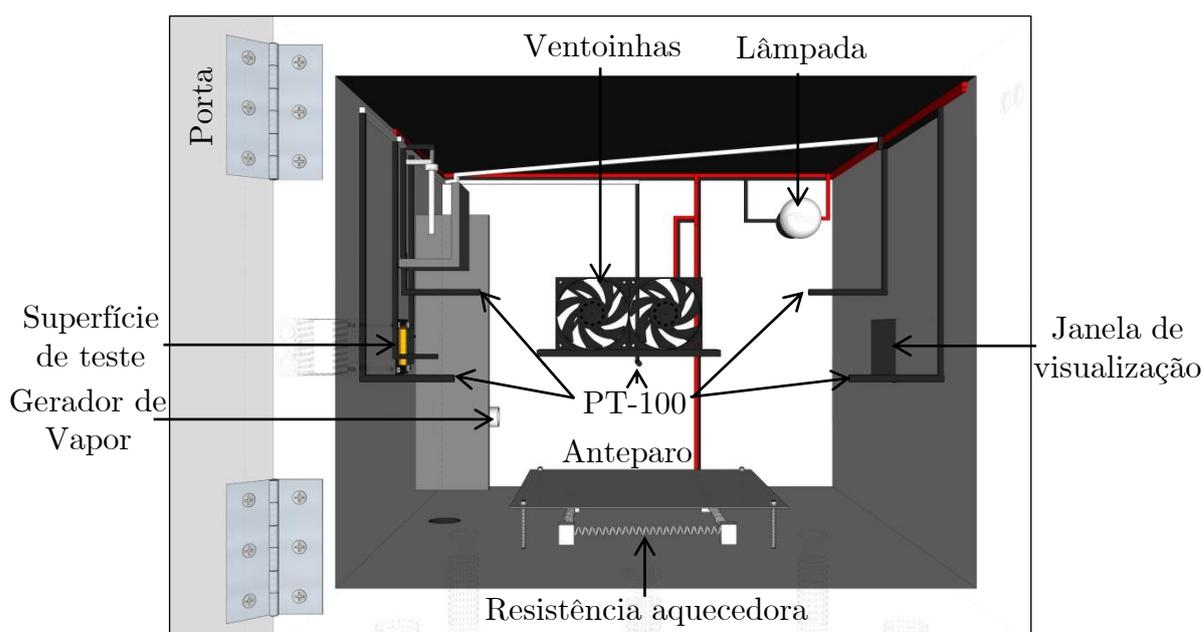


Figura 14: Bancada de condensação.

O sistema de resfriamento utilizado para manter a temperatura da superfície de teste constante possui uma série de componentes, apresentados na Figura 15, onde as Figuras 15a e 15b apresentam o sistema de resfriamento explodido e montado, respectivamente. É importante ressaltar que em todos os contatos térmicos utilizou-se pasta térmica a fim de reduzir a resistência de contato e isolou-se todo o sistema (do dissipador aletado ao bloco de cobre) com espuma (isolante térmico). Faz parte do sistema de resfriamento também a fonte de alimentação da pastilha Peltier (não apresentada na figura), porém, ela alimenta o resfriador e faz parte do controle da temperatura da superfície.

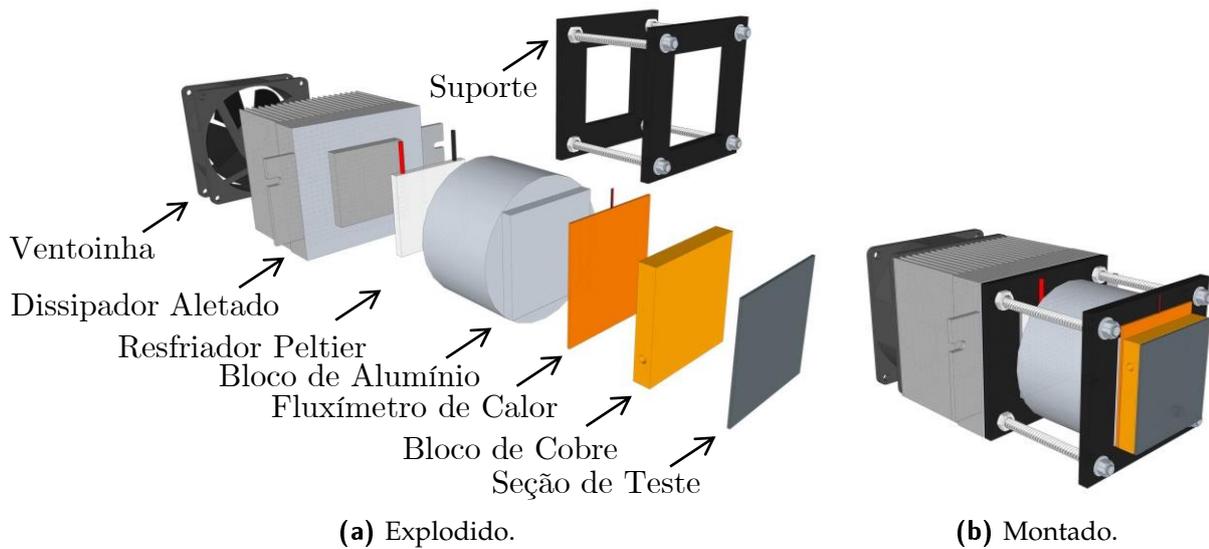


Figura 15: Sistema de resfriamento.

3.2 MEDIÇÃO

A construção da bancada, assim como todo o sistema de medição foi desenvolvido pelo autor, com conhecimento prévio da bancada de Oestreich (2017). No decorrer desta subseção serão descritas a distribuição dos componentes e a medição das variáveis da bancada.

Na medição de temperatura utilizam-se termorresistências PT-100. O método de calibração da termorresistências está descrito no Apêndice A.0.1 e as incertezas associadas à medição de temperatura estão apresentadas no Apêndice B. A Figura 16 apresenta a distribuição dos PT-100 pela vista frontal do bloco de cobre (onde é anexada a seção de teste, possuindo espessura de 50 mm) e a Figura 17 apresenta a distribuição dos cinco PT-100 e do sensor de umidade relativa na bancada, onde a Figura 17a apresenta a vista superior e a Figura 17b a vista frontal.

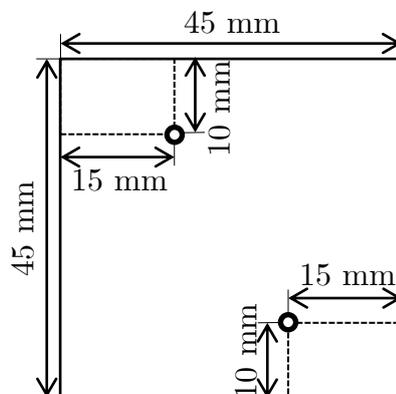


Figura 16: Bloco de cobre, vista frontal.

onde \bullet representam os PT-100.

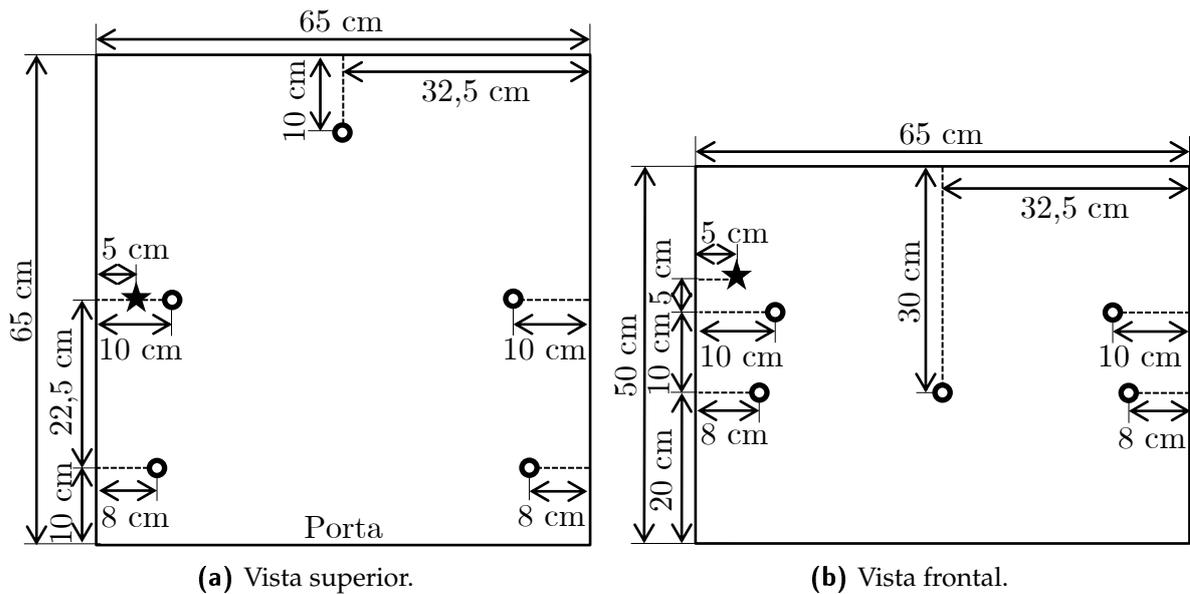


Figura 17: Distribuição dos sensores na bancada.

onde ○ e ★ representam os PT-100 e o sensor de umidade, respectivamente.

A umidade relativa (UR) é medida com auxílio do transmissor de umidade relativa com a incerteza de 2,5 %. É importante ressaltar que existe um anteparo frente ao sensor de umidade de modo a garantir a menor interferência possível nas medições.

Para coleta da massa de condensado gerada utiliza-se uma balança de precisão, com precisão de 0,001 g. A balança está localizada externamente à bancada (na parte inferior) e a massa coletada fica disposta em um reservatório interno. Para a conexão física entre a balança e o reservatório de massa coletada existe um suporte, ou seja, sobre a balança está o suporte e sobre ele o reservatório do condensado. De modo a garantir que apenas o condensado gerado na superfície seja coletado, instalou-se logo abaixo da superfície um funil.

Para a medição do fluxo de calor através da superfície de teste utiliza-se um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial, produzido no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT-UFSC). Seu princípio de funcionamento consiste em desviar as linhas de calor, gerando um gradiente de temperatura no plano tangencial ao de medição. Esse gradiente é medido por termopares ligados em série (tipo T, cobre/constantan) (CARCIOFI; GÜTHS; LAURINDO, 2002). No Apêndice A.0.2 está descrito o método de calibração deste fluxímetro. A Figura 18 apresenta o fluxímetro, onde as Figuras 18a e 18b apresentam a vista lateral (onde se pode verificar as linhas de calor) e a vista aberta, respectivamente.

Os métodos de calibração das termorresistências PT-100 e do fluxímetro de calor são apresentados no Apêndice A.

Para a aquisição dos dados utilizou-se uma unidade de aquisição, comutação e registro de dados contando com 2 *slots* de comunicação destinados à aquisição de

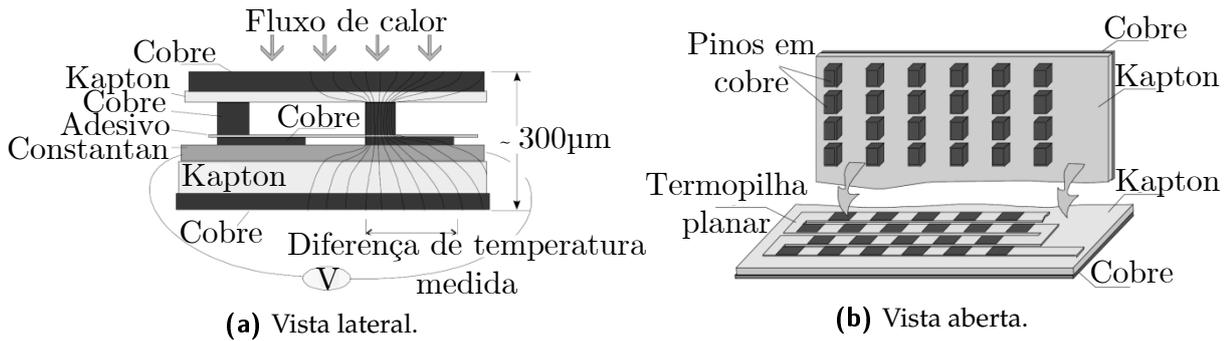


Figura 18: Transdutor de fluxo de calor gradiente tangencial.

Fonte: Carciofi, Güths e Laurindo (2002).

dados. A comunicação entre o sistema de aquisição e o microcomputador se deu por meio de software de comunicação.

Para a massa coletada, devido ao fato de a balança possuir comunicação direta com o computador, não necessitando passar pelo *DAQ*, utiliza-se código em linguagem *Python* através do software *Spyder* (*free-software*).

Os dados de medição da temperatura, umidade relativa e fluxo de calor foram coletados em intervalos de 3 s (obtidos pelo *DAQ*), e, de massa em intervalos de 5 s (conexão direta via *Python*).

3.3 CONTROLE

O controle da bancada se dá por meio do *DAQ* e de equipamentos auxiliares. A comunicação do computador com o sistema de aquisição e controle é o mesmo utilizado no sistema de medição, operando com um terceiro *slot* (controle). O conjunto computador e sistema de aquisição coleta os dados medidos e reporta ao controlador informações para a estabilidade das variáveis da bancada, a faixa de estabilização é definido previamente pelo operador.

O controle das condições ambientais busca tornar constante e homogênea a temperatura ambiente, umidade relativa e temperatura da superfície de teste. A temperatura de superfície apresentada no decorrer do trabalho é uma média aritmética entre os dois PT-100 e a temperatura ambiente entre os cinco PT-100.

Para o controle da temperatura interna utiliza-se um relê de estado sólido e um *dimmer* (potência nominal de 2 kW) para o controle da potência entregue à resistência helicoidal, através do sistema *on – off*. Para controle da umidade relativa usa-se um gerador de vapor (produzido com uma resistência de 1kW), um relê de estado sólido e um *dimmer* (para controle da potência entregue ao gerador de vapor), ocorrendo também a utilização do sistema *on – off*. A capacidade de armazenamento do gerador de vapor foi elevada através da fabricação pelo autor de um reservatório com maior

capacidade.

Para o controle da temperatura da superfície utiliza-se um controlador PID (Proporcional, Integral Derivativo) e uma fonte de tensão variável, que responde aos valores definidos pelo controlador. No controlador PID, a variável de entrada é a temperatura média da superfície, que retorna o valor de tensão a ser alimentado o sistema de resfriamento (com a pastilha Peltier). Os ganhos Proporcional, Integral e Derivativo foram definidos inicialmente como 7,0; 2,0 e 0,5; respectivamente e após 1 hora é modificado para 2,0; 2,0 e 0,5.

Para garantir propriedades internas homogêneas e uniformes, utilizam-se duas ventoinhas. Localizadas, na parede do fundo, dispersando o ar úmido direcionado a parede, reduzindo assim, a interferência da movimentação da massa de ar na seção de testes. Para garantir que não haja escoamento de ar, um anteparo físico existe na lateral da seção de testes.

A Figura 19 apresenta os equipamentos auxiliares à utilização da bancada. É importante ressaltar que alguns componentes citados no texto fazem parte do quadro elétrico e eletrônico e não estão na figura (como os relés). O índice GV representa o gerador de vapor.

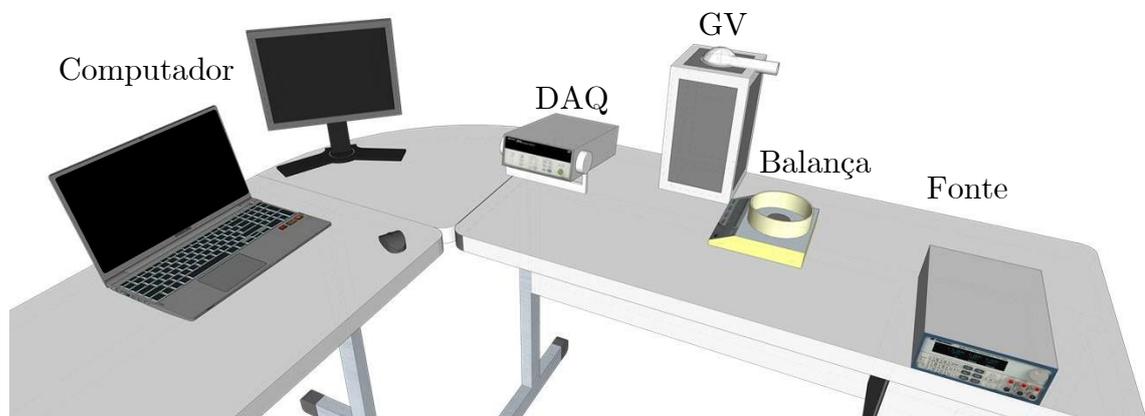


Figura 19: Equipamentos auxiliares da bancada.

3.4 VALIDAÇÃO E REPETIBILIDADE

Nesta seção está descrita a metodologia utilizada para validar a estabilidade das variáveis e a repetibilidade dos resultados. Os parâmetros analisados foram: temperatura ambiente e umidade relativa. Em sequência realizaram-se três testes com uma superfície de aço inoxidável AISI-316L aleatória (não caracterizada) para avaliação da repetibilidade dos resultados. Todas as variáveis envolvidas foram analisadas.

3.4.1 CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Para avaliar a estabilidade da temperatura ambiente e da umidade relativa (condições ambiente) utilizou-se o seguinte procedimento:

1. Determinar temperatura e umidade relativa através do software de controle e aquisição de dados;
2. Aguardar até que as propriedades se tornem estáveis (após 120 min);
3. Fazer coleta de dados pelo período de 12 minutos, a cada três segundos;
4. Repetir o procedimento para uma nova configuração de temperatura e umidade relativa.

A Figura 20 apresenta os dados obtidos para o transiente, onde se definiu a temperatura ambiente (T_{amb}) em 50 °C e umidade relativa em 80 % pelo período de 120 min. Pode-se verificar que a partir dos ~40 min estas propriedades já se tornam constantes obtendo a estabilidade. Para os testes que serão apresentados a seguir, serão apresentados os dados em forma de tabela, apresentando a média e os desvios padrões de cada variável.

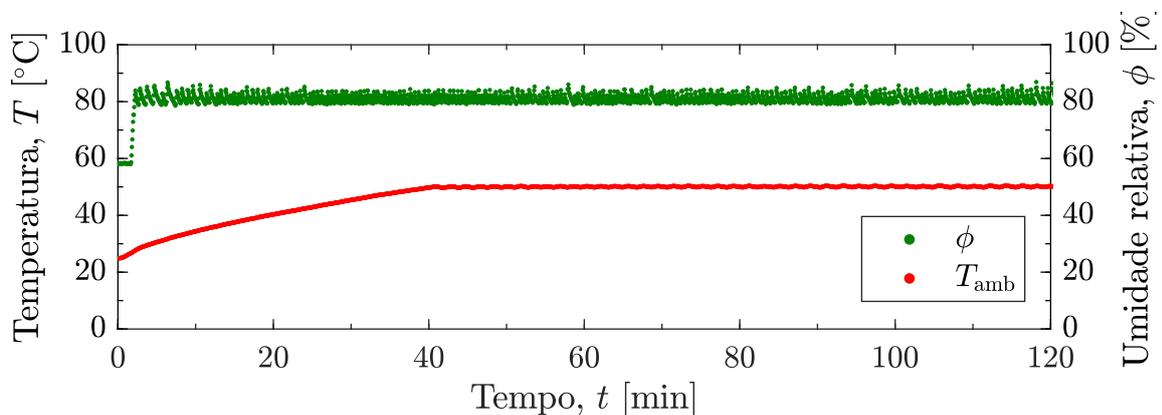


Figura 20: Transiente para estabilidade, temperatura ambiente e umidade relativa.

As Figuras 21 e 22 apresentam os resultados obtidos através do procedimento descrito. A Figura 21 apresenta diferentes patamares de T_{amb} para uma mesma ϕ e a Figura 22 apresenta diferentes patamares de UR para uma mesma T_{amb} . Pode-se ressaltar baseado nessas figuras, que a bancada de ensaio garante estabilidade de T_{amb} e ϕ para diferentes combinações ambientes. Na mudança entre um patamar e outro existe regime transiente, similar ao apresentado anteriormente, logo, estas figuras apresentam apenas dados coletados após estabilidade (120 min).

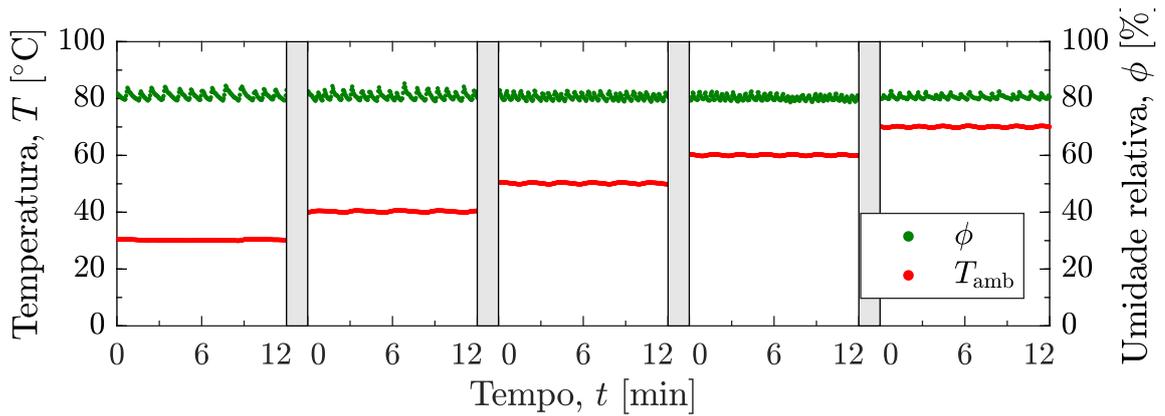


Figura 21: Umidade relativa constante, temperatura variável.

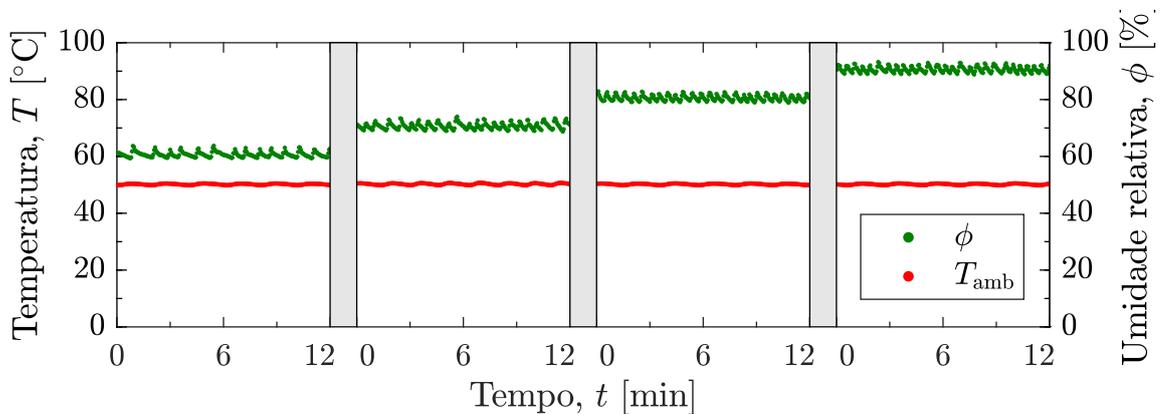


Figura 22: Temperatura constante, umidade relativa variável.

3.4.2 REPETIBILIDADE DE RESULTADOS

Para validação da repetibilidade dos resultados realizaram-se três testes com a superfície aleatória. Primeiramente, a superfície de teste foi fixada ao sistema de resfriamento com pasta térmica, realizando-se o primeiro teste (Teste 1). Em sequência removeu-se a superfície do sistema de resfriamento, fez-se limpeza das áreas de contato e fixou-se novamente a superfície, voltando a repetir o teste (Teste 2). Para realização do terceiro e último teste, seguiu-se o mesmo procedimento do segundo, obtendo então o último teste (Teste 3). É importante ressaltar que para a análise de estabilidade das condições ambientais (apresentadas anteriormente) esperou-se até que as propriedades entrassem em regime permanente (~ 120 min.). Os dados dos testes são obtidos apenas após o período de ~ 420 min. (7 horas), garantindo total estabilidade dos parâmetros. Após atingir estabilidade, são coletados dados durante 5 horas de teste.

As Figuras 23a e 23b apresentam os dados obtidos pelo sistema de aquisição de dados utilizados para o período completo de um teste (o primeiro teste, Teste 1), mostrando na Figura 23a que após ~ 1 h as temperaturas ambiente e da superfície e a umidade relativas já atingiram regime permanente e a Figura 23b apresenta o fluxo

de calor medido através do fluxímetro, HF (do inglês, *Heat Flux*), com maior inércia, chegando ao regime permanente apenas após ~ 2 h, acredita-se que esta inércia está associada ao crescimento e coleta do condensado na superfície.

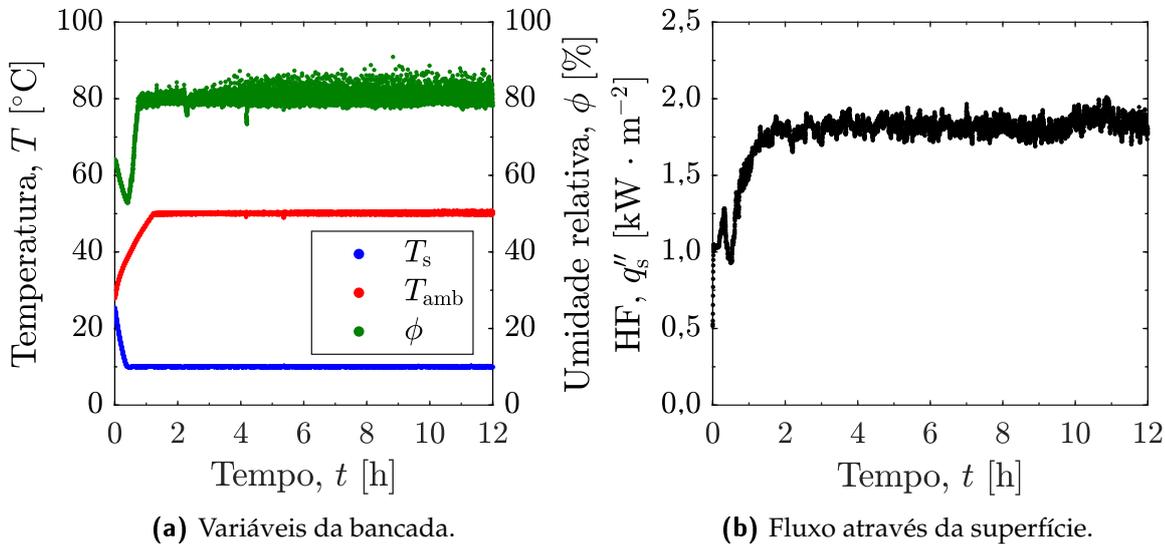


Figura 23: Teste 1 - 12 horas.

A Figura 24 apresenta os dados obtidos através da coleta da massa pela balança, pode-se constatar que a coleta de massa possui algum ruído causado pelo ambiente e pelo método de coleta do condensado. Pode-se averiguar que assim que condensado começa a ser gerada a taxa de coleta se torna quase que constante. Nesta Figura estão apresentados 12 h de coleta, mas utiliza-se como dados do teste apenas as últimas 5 h, garantindo estabilidade da coleta.

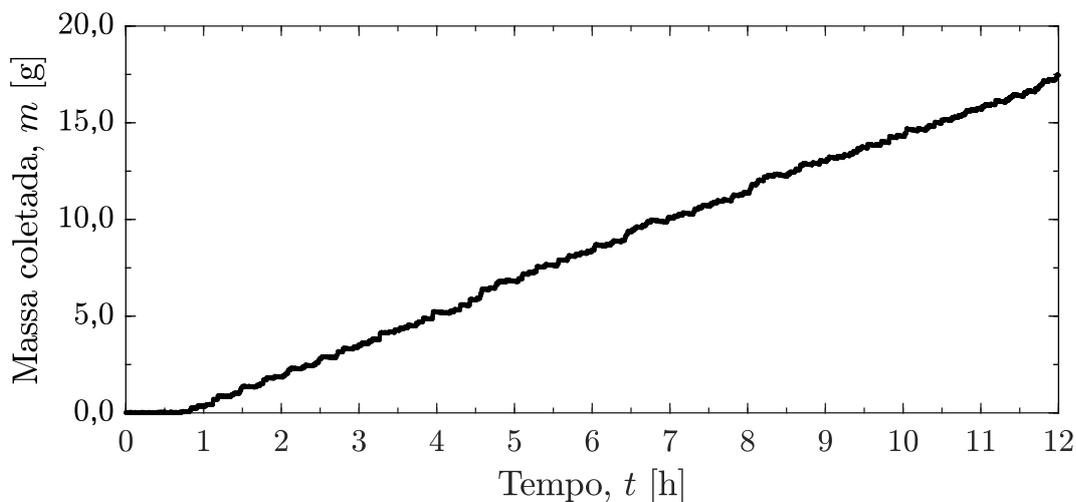


Figura 24: Teste 1 - Massa coletada.

Os dados obtidos durante as 5 horas finais dos testes (regime estável) para a superfície aleatória são apresentados na Figura 25. Na Figura 25a observa-se uma

tendência de aumento na variação da temperatura ambiente com o decorrer do tempo de teste. Podendo estar ligado à inércia gerada no sistema de aquisição e controle dos dados, que, com o decorrer dos experimentos, acaba gerando pequenos atrasos na coleta, não a cada 3 s, como definido pelo operador. A Figura 25b apresenta os dados para a temperatura da superfície, quando comparada a estabilidade da temperatura ambiente, pode-se verificar uma diminuição na variação e esta diferença se dá devido ao controle da T_{sup} ser realizado pelo PID. Na Figura 25c verifica-se a estabilidade da umidade relativa, esta possui variação e está diretamente ligada à inércia do sistema gerador de vapor e o método de acionamento deste. A Figura 25d apresenta a última das variáveis coletadas pelo sistema de aquisição que é o fluxo de calor através do transdutor de fluxo de calor (fluxímetro). Nela podemos ver que as medidas para os três testes são constantes, acredita-se que a variação nesses dados se deve à dinâmica associada ao crescimento e escoamento do condensado gerado e também, devido à variação nas condições ambientes. A Figura 25e apresenta os dados brutos de massa de condensado medida pela balança. A partir da filtragem dos dados obtêm-se a Figura 25f que apresenta a média, representada pela linha, e o desvio padrão, representado pela região sombreada.

É importante ressaltar que o reservatório do condensado coletado está alocado no interior da bancada de testes, estando sujeito a evaporação. Neste momento do trabalho não serão apresentados os dados referentes à evaporação, quantificada pelo autor e apresentada no decorrer do trabalho, mais especificamente na Seção 5.2.

A Tabela 5 apresenta os valores médios e os desvios padrão para cada uma das coletas de dados. Para os valores de massa coletada estão apresentados os valores absolutos de coleta para o período de avaliação (5 horas). Onde M representa a média e DP o desvio padrão amostral.

Tabela 5: Parâmetros da bancada nos testes da superfície aleatória.

Teste	T_s [°C]		T_{amb} [°C]		ϕ [%]		q''_s [kW · m ⁻²]		m [g]
	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP	M
1	10,00	0,06	50,14	0,23	80,54	1,80	1,82	0,05	7,95
2	10,02	0,20	50,14	0,19	80,58	1,39	1,84	0,06	8,39
3	10,00	0,10	50,18	0,23	80,68	1,65	1,88	0,05	7,36
Média	10,01	0,14	50,16	0,22	80,60	1,63	1,85	0,06	7,90

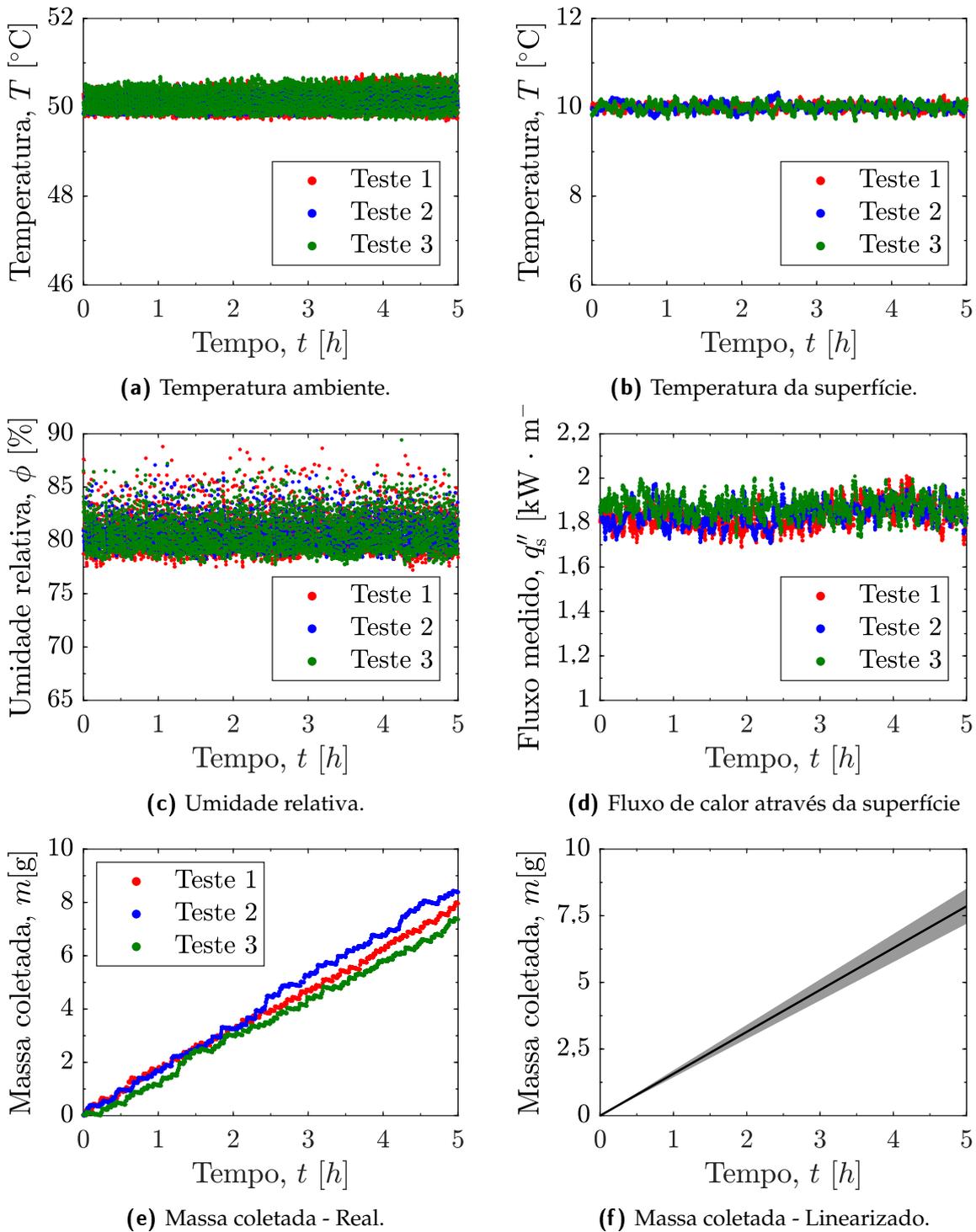


Figura 25: Repetibilidade para amostra de aço inoxidável AISI-316L aleatório.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão descritos os materiais e métodos utilizados para a conclusão deste trabalho. Inicialmente, está descrita a metodologia utilizada na produção das superfícies. Subsequentemente, estão apresentados os métodos utilizados para caracterização da superfície e, por fim, o método utilizado nos ensaios de condensação, os parâmetros definidos e a operacionalidade da bancada.

Toda a produção e a caracterização das superfícies estudadas foram realizadas nas instalações do Laboratório de Materiais (LabMat), localizado no bloco B da Engenharia Mecânica da UFSC, onde utilizou-se além das instalações e ferramentas, o conhecimento e o auxílio dos colaboradores, sempre muito prestativos.

4.1 PRODUÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE TESTE

As superfícies de testes foram produzidas pelo autor, onde se utilizou como substrato chapas de aço inoxidável AISI-316L e de aço carbono 1006, cortadas via corte a laser, com dimensões de 45 mm × 45 mm. A chapa de aço inoxidável possui espessura de 1 mm e a chapa de aço carbono de 0,9 mm.

Optou-se pela utilização de aço inoxidável devido a sua resistência contra corrosão e pelo aço carbono que, no entanto não é protegida do processo de corrosão, por ser o metal base para o revestimento de nanotubos de carbono pelo método aplicado.

Um dos objetivos no presente trabalho é o de avaliar o revestimento de superfície com nanotubos de carbono. Buscou-se comercialmente o material que apresenta o melhor crescimento e cobertura da superfície, sendo utilizado o método já consolidado de cobertura da superfície no LabMat.

Por fim, a busca por outros tratamentos e revestimentos continuou, surgindo, então, a oportunidade de avaliar outro tratamento promissor, o tratamento com plasma corona. Este tratamento demonstrou-se um desafio à parte por se tratar de uma metodologia não consolidada no grupo de pesquisa.

4.1.1 ACABAMENTO SUPERFICIAL

Todas as superfícies analisadas passaram por tratamento de abrasão/polimento com lixas de diferentes granulometrias. A lixadeira utilizada é composta por uma superfície onde a lixa é fixa e rotaciona, causando direcionamento na superfície. A lixadeira é representada na Figura 26.

Para que se atinja a granulometria desejada (maior granulometria, mais fina a lixa e mais polida a superfície), segue-se o procedimento apresentado no Apêndice C.1.

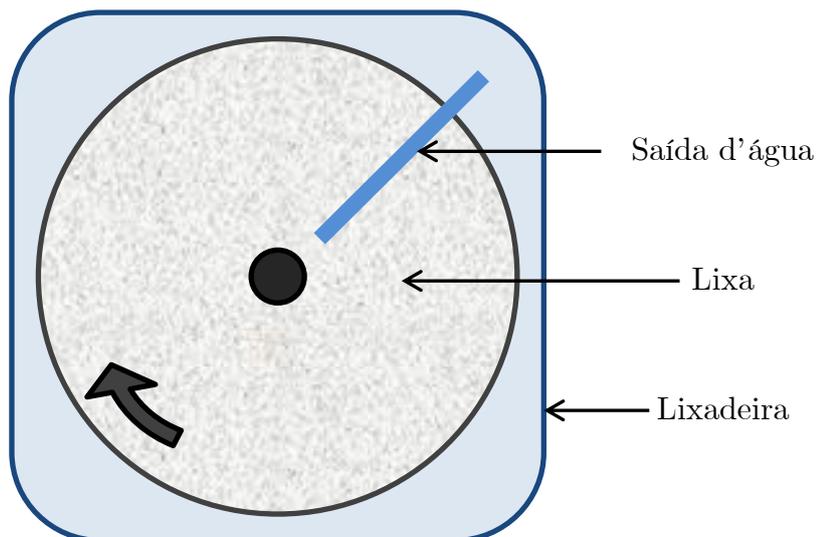


Figura 26: Lixadeira.

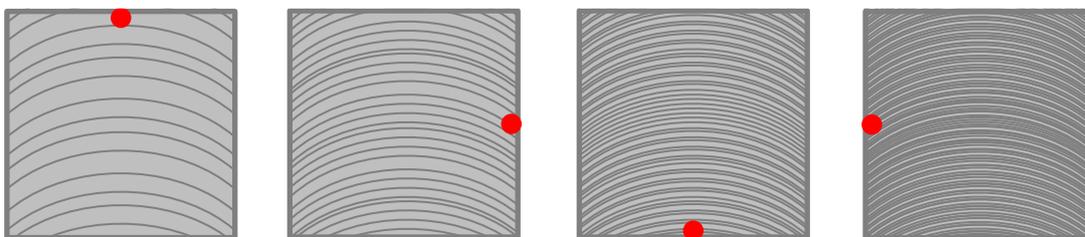


Figura 27: Esquemático de aumento da granulometria.

Após ser atingido o acabamento desejado, com lixa ou polimento, a superfície é limpa através de banho com água destilada e, posteriormente, imersa em álcool em banho ultrassônico pelo tempo de 15 min.. Por fim, a superfície passa por outro banho de álcool e é seca utilizando-se um secador de cabelo comercial.

Após limpeza, a superfície está pronta para a caracterização ou aplicação do revestimento ou tratamento. A seguir, serão apresentados de maneira simplificada os métodos e os tratamentos aplicados às superfícies.

4.1.2 REVESTIMENTO E TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE

Ambos os tratamentos foram realizados por pesquisadores do LabMat, onde o autor encaminhou as amostras previamente caracterizadas e acompanhou os tratamentos, contribuindo na produção direta apenas do tratamento com o plasma corona.

O crescimento de nanotubos de carbono na superfície de AC 1006 se dá através da deposição química por vapor. Realizou-se a metodologia apresentada por Pigosso (2019) na síntese de nanoestruturas carbonáceas através da utilização de reator a plasma de corrente contínua. Neste reator são controladas: temperatura e pressão ambiente; e atmosfera interna (composição química). Todo o sistema para a síntese de nanotubos de

carbono está apresentado na Figura 28. A câmara de plasma consta com um ânodo e um cátodo espaçados pela atmosfera. Neste procedimento o ânodo é aterrado (0 V) e o cátodo energizado negativamente (500 V), gerando assim o plasma. O procedimento para o tratamento pode ser descrito como: (1) realizar vácuo para retirada dos gases internos; (2) inserir os gases para composição atmosférica desejada (20 % metano e 80 % hidrogênio); (3) aquecer o reator a uma temperatura de 700 °C; (4) operar o tratamento por 180 min; (5) resfriar o reator naturalmente, através do desligamento das resistências aquecedoras; (6) voltar a atmosfera terrestre; por fim, retirar as superfície e fazer a limpeza do cátodo e do sensor de temperatura. Após este procedimento a superfície é caracterizada novamente e exposta aos testes de condensação.

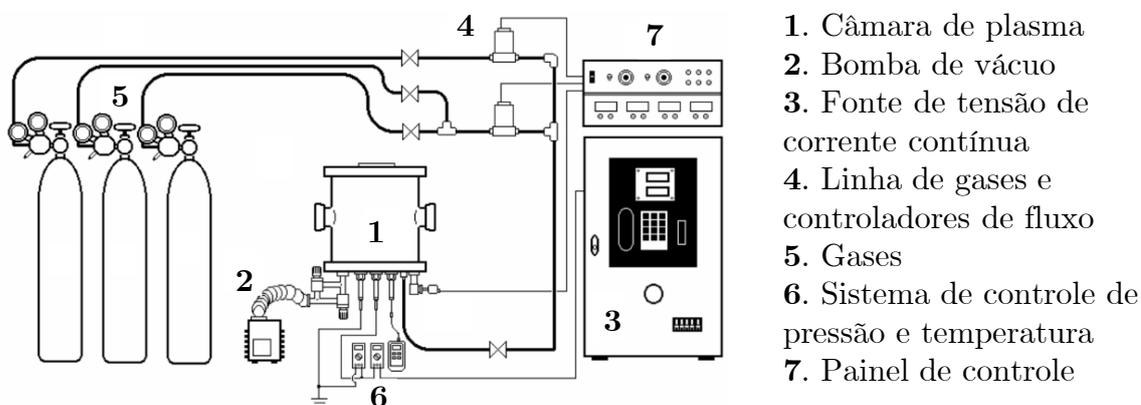


Figura 28: Esquema de um sistema de reator a plasma de corrente contínua.

Fonte: Adaptado por Pigosso (2019) de Pavanati et al. (2005).

O plasma corona é um plasma a frio amplamente utilizado para modificar as propriedades de superfícies, em sua maioria polímeros (LOPES et al., 2017). Este é produzido por descarga elétrica entre dois eletrodos separados por uma barreira dielétrica, DBD (Descarga de Barreira Dielétrica), à pressão atmosférica e temperatura ambiente. O sistema de descarga utilizado no presente trabalho é representado na Figura 29, onde os dois eletrodos são alimentados por uma fonte de alta tensão, controlando-se a distância e movimentação do eletrodo E_1 para aplicação em toda a área. Todas as aplicações da descarga corona foram realizadas na atmosfera ambiente (terrestre) inserindo-se por meio de um soprador a presença de gás. Neste trabalho avaliaram-se diferentes gases (argônio, oxigênio, nitrogênio e R-134a), porém, o único que se avaliou experimentalmente na condensação foi o R-134a ($C_2H_2F_4$, tetrafluoreatano). A inserção destes gases modifica as propriedades da superfície, porém, em muitos dos casos com efeito temporal muito curto (poucos minutos).

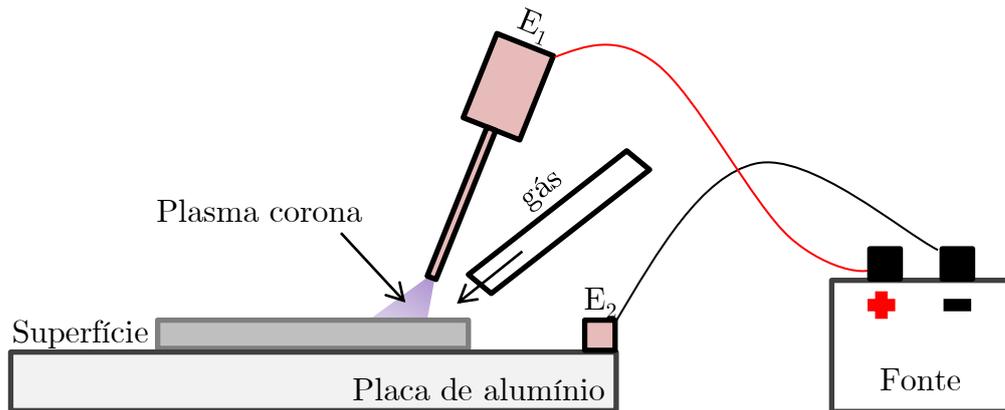


Figura 29: Método de aplicação do plasma corona.

E_1 e E_2 representam o eletrodo 1 e 2, respectivamente.

4.2 CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL

Nesta seção serão apresentados os métodos aplicados à caracterização das amostras de teste. Serão apresentados os equipamentos e os métodos utilizados para medição do ângulo de contato, obtenção dos parâmetros rugosos quantitativos e qualitativos. Todas as análises descritas no decorrer desta seção foram realizadas nas instalações do Laboratório de Materiais (LabMat), localizado no bloco B do Departamento de Engenharia Mecânica, na UFSC.

4.2.1 ÂNGULO DE CONTATO

Neste trabalho, foram analisados os ângulos de contato estático e dinâmico. Utilizou-se como ferramenta de trabalho o goniômetro (*DropShapeAnalyser*), modelo DAS25 da marca KRÜSS, onde, cada uma das superfícies foi subdividida em quatro pontos e fez-se a aquisição das imagens da gota (ou seja, quatro por superfícies). A disposição das gotas está apresentada na Figura 30.

Para a medição dos ângulos de contato utilizou-se a metodologia descrita pelo fabricante do equipamento, mostrada nas Figuras 31a, 31b, 32a e 32b que representam a medição dos ângulos de contato estático, imediatamente após a deposição da gota, depois do tempo de 60 s e também o ângulo de contato dinâmico, de avanço e recuo, respectivamente. Na medição do ângulo de contato estático é disposta sobre superfície uma gota com volume de $5\mu\text{L}$, sendo coletadas imagens imediatamente após a deposição e após o intervalo apresentado (60s). Na medição do ângulo de contato dinâmico (ou histerese do ângulo de contato), na medição do ângulo de avanço adiciona-se água, continuamente fazendo a aquisição das imagens e para medir o ângulo de recuo retira-se continuamente água fazendo, para cada ponto apresentado na

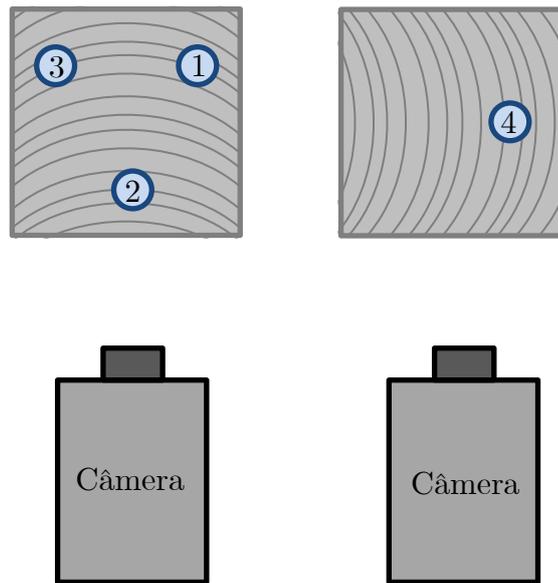


Figura 30: Pontos de medição do ângulo de contato.

Figura 32 uma série de imagem para avanço e recuo (4 por ponto para diminuir o erro de medição).

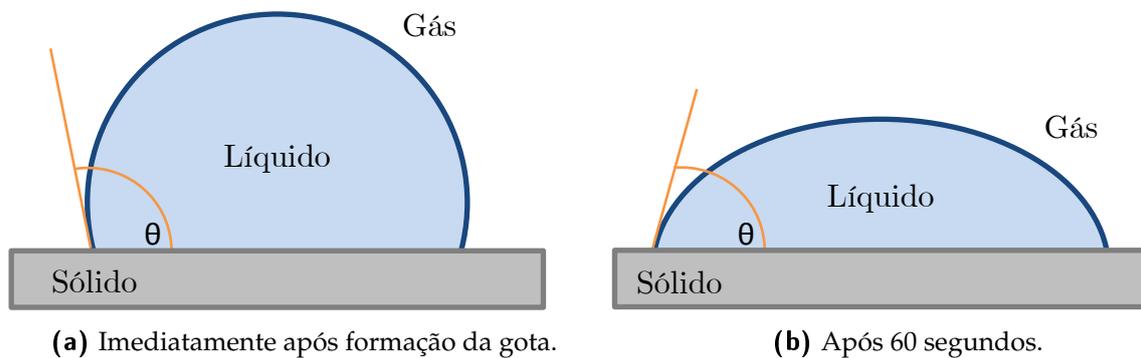


Figura 31: Medição do ângulo de contato estático.

Fonte: Adaptado de KRÜSS (2019)

Após a aquisição das imagens no goniômetro, utiliza-se como ferramenta para medição dos ângulos o software *ImageJ* (*free-software*), onde se entra com a imagem proveniente do goniômetro, obtendo o perfil da gota e resultando nos ângulos de contato direito (θ_d) e esquerdo (θ_e). O ângulo de contato para esta imagem é a média aritmética entre os dois, $\theta = (\theta_d + \theta_e) / 2$.

Para se obter o ângulo de contato, em cada imagem realizaram-se cinco medições, a fim de diminuir o erro associado à medição. Para medir o ângulo de contato estático, têm-se quatro pontos (4 imagens), sendo que para cada uma das imagens realizaram-se cinco medições, gerando no total de 20 valores obtidos de θ_d e θ_e . Para predição dos ângulos de avanço e recuo foram capturadas 4 imagens por ponto de medição, gerando um total de 16 imagens por superfície.

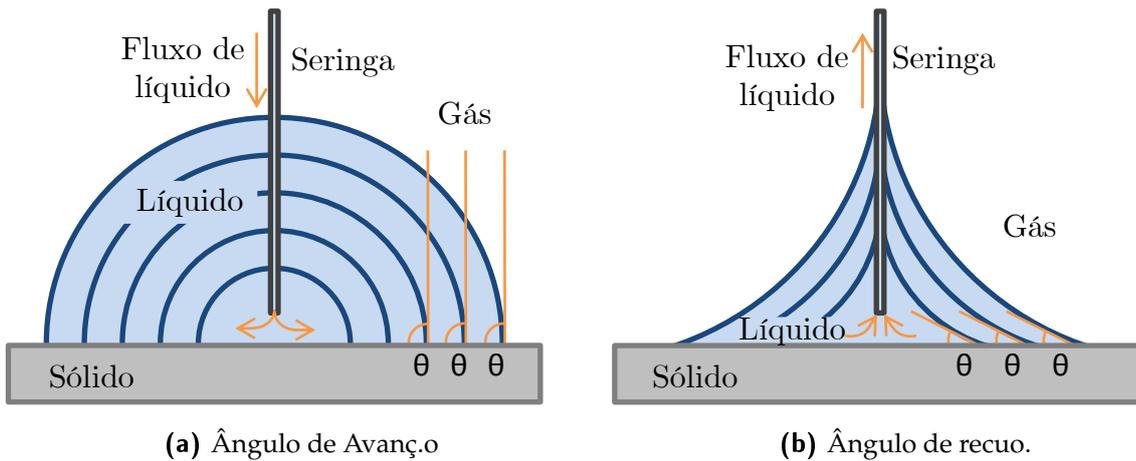


Figura 32: Medição do ângulo de contato dinâmico.

Fonte: Adaptado de KRÜSS (2019)

Resumindo, cada amostra possui 4 imagens para imediatamente após a deposição e 4 para após 60 segundos, para ângulo estático. Já para os ângulos de avanço e de recuo, obtiveram-se 4 imagens por ponto, gerando um total de 16 imagens de avanço e 16 imagens de recuo. O número total de imagens foi de 40 por superfície, sendo que cada uma delas teve as suas medições realizadas com 5 repetições. Obtendo-se um total de 200 medições por superfície.

Após todas as medições realizadas, filtrou-se os dados de modo a remover valores dispersos. O filtro aplicado foi a média geral mais e menos dois desvios padrões (amostrais).

4.2.2 INTERFEROMETRIA

Para mapear a topografia das superfícies utilizou-se como ferramenta o interferômetro óptico modelo *NewView 7300* (apresentado na Figura 33), da marca ZYGO. Assim como para medição do ângulo de contato, realizaram-se medições em 4 regiões por superfície, medindo-se áreas de 1 mm x 1 mm. As regiões medidas são definidas em 4 quadrantes, apresentados na Figura 34.

A partir dos dados obtidos no interferômetro obtém-se o mapa de topografia da superfície. Este método de caracterização foi escolhido por não necessitar de contato entre superfície e equipamento de medição. Também é importante ressaltar que as superfícies estudadas possuem refletividade suficiente para que se consiga uma boa base de informações.

Os dados coletados são executados no software *MoutainsMap* para quantificação dos aspectos rugosos e aquisição de imagens que representem a superfície. No software utiliza-se o procedimento apresentado no Apêndice C.2.

Após seguir o procedimento e obter imagens e parâmetros rugosos, calcula-se a



Figura 33: Interferômetro óptico.

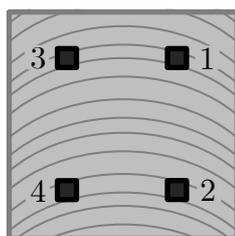


Figura 34: Área de medição de topografia via interferômetro.

média aritmética de cada parâmetro por superfície (4 quadrantes), resultando no valor médio. As Figuras 35 representa o perfil bidimensional, onde no eixo das ordenadas está o comprimento na superfície e no das abscissas a altura coletada. A Figura 36 representam o perfil tridimensional da superfície, ambos obtidos através da metodologia apresentada.

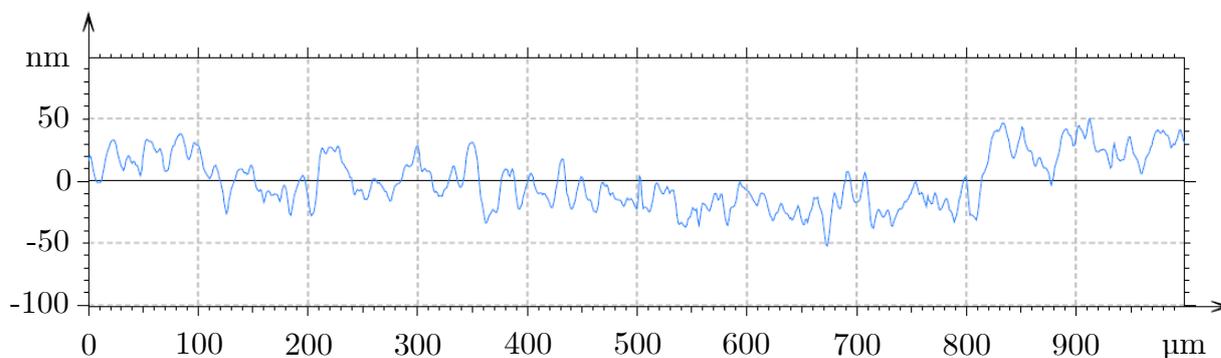


Figura 35: Esquemático 2D.

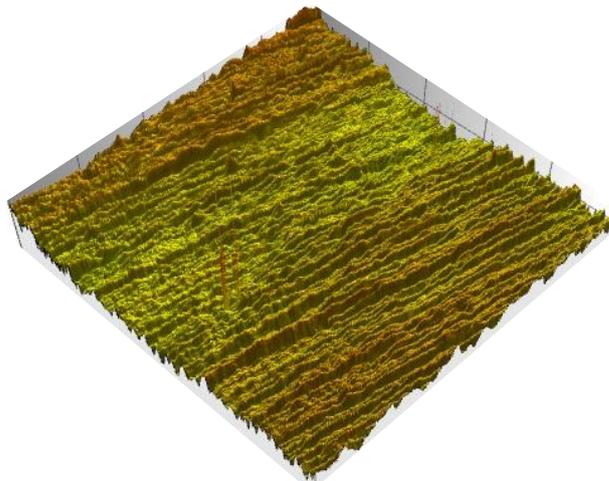


Figura 36: Esquemático 3D.

4.2.3 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA - MEV

Utilizou-se como ferramenta para análise qualitativa da superfície o Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo VEGA 3 da marca TESCAN Analytics, apresentado na Figura 37. Através do equipamento faz-se a captura de imagens para altos níveis de aproximação. Dentre todos os equipamentos utilizados na caracterização da superfície, o MEV é o único da qual o autor do presente trabalho não adquiriu conhecimento de operação, realizando sempre as medições acompanhado de profissional técnico habilitado para tal função.



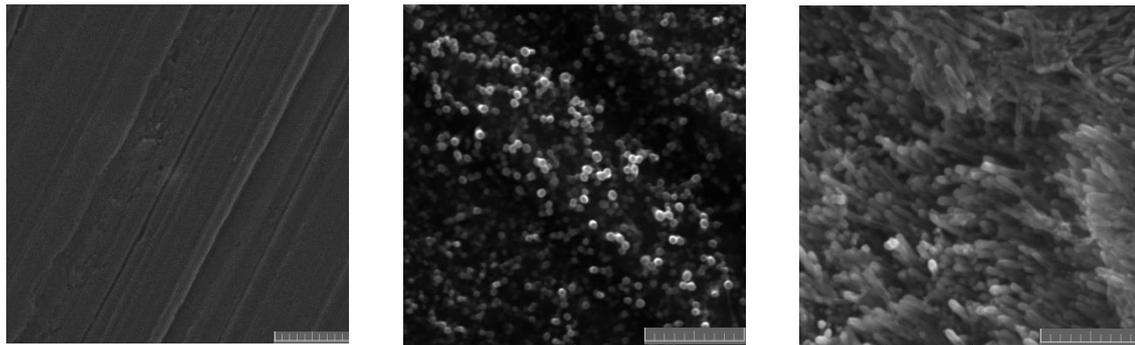
Figura 37: Esquemático MEV.

Fonte: TESCAN ANALYTICS (2019)

Para comparativo das amostras, serão analisadas imagens com aproximação de 3 mil vezes. Porém, para a análise do crescimento de nanotubos de carbono, formação e revestimento, trabalhou-se com aproximações de até 80 mil vezes.

A Figura 38 representa a amostra coberta com nanotubos de carbono para a lixa 1200, sendo a Figura 38a para aproximação de 3 mil vezes utilizada para comparativo

com as superfícies anterior ao tratamento, as Figuras 38b e 38c para a aproximação de 80 mil vezes podem ser utilizadas para melhor avaliação do revestimento da superfície com os nanotubos e a estrutura dos nanotubos. Na Figura 38b podem-se avaliar os diâmetros e na Figura 38c a estrutura morfológica de crescimento dos nanotubos de carbono. Para obtenção dos nanotubos inclinados e suas imagens fez-se uma pequena deformação física na superfície de aproximadamente 1 mm e se coletou as imagens das regiões laterais a esta deformação.



(a) 3 kx (escala 20 µm).

(b) 80 kx tops (escala 1 µm).

(c) 80 kx inclinado (escala 1 µm).

Figura 38: Amostragem de aproximação MEV para lixa 1200 com nanotubos de carbono.

4.3 CONDENSAÇÃO

Nesta seção, será descrita a metodologia aplicada na análise de condensação. Todos os ensaios foram elaborados nas instalações do Laboratório de Engenharia de processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN), localizado no terceiro andar do bloco A de Engenharia Mecânica da UFSC.

O procedimento experimental está descrito no Apêndice C.3. A seguir apresentam-se as análises que o autor busca e quais as combinações de parâmetros foram avaliados e, por fim, é apresentado o tratamento dos dados obtidos nos testes, os erros encontrados no decorrer dos experimentos e como foram remediados para que os dados finais apresentem maior confiabilidade.

4.3.1 ANÁLISES

Um total de 9 superfícies foram produzidas para testes, sendo 4 em aço inoxidável, 4 em aço carbono com revestimentos de nanotubos de carbono e 1 de aço inoxidável com tratamento de plasma corona. Todas as superfícies foram expostas aos testes de condensação com repetição de 3 vezes para uma mesma combinação de parâmetros. Os parâmetros padrões utilizados para comparativo entre as superfícies são: temperatura de superfície (t_{sup}) de 10 °C, temperatura ambiente (t_{amb}) de 50 °C e umidade relativa (ϕ) de 80 %.

Além do comparativo entre as superfícies, realizou-se a avaliação dos parâmetros controlados na bancada, sendo avaliada a influência da temperatura de superfície, temperatura ambiente e umidade relativa. Neste comparativo manteve-se a mesma superfície, aço inoxidável polido. Foram variados os parâmetros em três patamares, o padrão, um superior e um inferior para cada variável, mantendo-se os demais parâmetros constantes (padrão).

A Tabela 6 apresenta todos os testes realizados com suas configurações para conclusão deste documento. Cada linha apresenta uma análise e, para cada, realizaram-se 3 testes, cada um com período de exposição de 12 horas. Os índices apresentados na tabela e no decorrer do trabalho representam: AI-Aço Inoxidável AISI-316L, AC-Aço Carbono 1006, NT-Nantotubos de Carbono e P.Corona ou PC-Plasma Corona. O termo PT representa pós testes e será apresentado posteriormente.

Tabela 6: Combinação de superfícies e parâmetros avaliados no trabalho.

Amostra	T_{amb} (°C)	T_{sub} (°C)	ϕ (%)
AC+NT-Lixa 80	50	10	80
AC+NT-Lixa 220	50	10	80
AC+NT-Lixa 600	50	10	80
AC+NT-Lixa 1200	50	10	80
P.Corona-Lixa 600	50	10	80
AI-Lixa 220	50	10	80
AI-Lixa 600	50	10	80
AI-Lixa 1200	50	10	80
AI-Polido	50	10	80
AI-Polido	40	10	80
AI-Polido	60	10	80
AI-Polido	50	5	80
AI-Polido	50	20	80
AI-Polido	50	10	70
AI-Polido	50	10	90
AI-Polido-PT	50	10	80

Através das análises realizadas, obtiveram-se experimentalmente uma série de dados, que necessitam ser tratados, analisados e comparados. Além dos valores definidos pelo autor, obtém-se o fluxo de calor e o valor da massa de condensado coletada na balança. Com estes valores pode-se fazer o balanço de calor na superfície, considerando o volume de controle apresentado na Figura 39. Por meio do balanço de calor podemos comparar os dados obtidos experimentalmente com o estimado através de correlação.

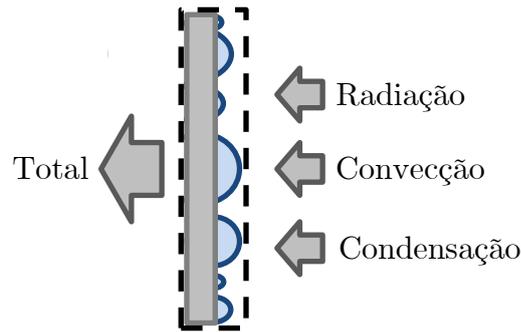


Figura 39: Balanço de calor na superfície de teste.

4.3.2 CORREÇÃO DE ERROS - EVAPORAÇÃO

Os experimentos possuem incertezas experimentais associadas ao processo experimental e perdas associadas ao experimento. Para remediar a principal incerteza associada ao experimento, realizou-se uma batelada de ensaios chamados de Evaporação na Tabela 7.

Tabela 7: Combinação de superfícies e parâmetros avaliados no trabalho.

Amostra	T_{amb} (°C)	T_{sub} (°C)	ϕ (%)
Evaporação	50	-	80
Evaporação	40	-	80
Evaporação	60	-	80
Evaporação	50	-	70
Evaporação	50	-	90

Após finalizar os ensaios, constatou-se que a massa de condensado coletada estava abaixo do esperado. Então, fez-se a análise da evaporação no reservatório do condensado, aberto ao ambiente interno da caixa. Portanto, realizaram-se os estudos de evaporação de modo a quantificar toda massa que evapora do reservatório.

Após alguns testes falhos (parte do condensado gerado não estava sendo coletada), a massa de condensado tornou-se constante. Logo, surgiu a necessidade de avaliar a evaporação, que, como será apresentado na Seção 5.2, representa valores significativos na taxa de condensação. Fez-se essa análise para todas as condições ambientes estudadas, porém, como a evaporação se mostrou linear com o tempo, realizaram-se testes de 12 horas apenas para a condição padrão. Para as demais condições realizaram-se ensaios de 3 horas, sendo a primeira hora considerada para atingir o regime permanente e as duas horas seguintes para coleta dos dados, com 3 testes por condição.

O procedimento utilizado nos testes de evaporação está descrito no Apêndice C.4. Após concluído o procedimento experimental, os dados são analisados. Toda a massa evaporada é adicionada à medida pela balança, apresentando a massa real coletada.

4.3.3 TRATAMENTO DAS MEDIÇÕES

Os dados coletados no experimento seguem alguns procedimentos para comparação. Para os valores de temperatura, umidade relativa e o fluxo de calor medido através do fluxímetro são consideradas as médias aritméticas de seus respectivos dados, apresentando o valor médio absoluto e o desvio padrão amostral.

Para os dados de coleta de massa, realizaram-se alguns tratamentos nos dados. Inicialmente os dados possuem uma série de ruídos (Figura 40a), tornando necessário aplicar uma filtragem nos dados coletados. Fez-se, então, uma linearização dos dados coletados em cada teste (Figura 40b), centralizadas na origem (Figura 40c). A partir das 3 retas obtiveram-se a média e o desvio padrão para cada caso estudado (Figura 40d). Logo, a Figura 40 apresenta de maneira exemplificada esse passo a passo para o tratamento dos dados coletados pela balança. Após a aplicação dessa metodologia pode-se comparar as amostras analisadas.

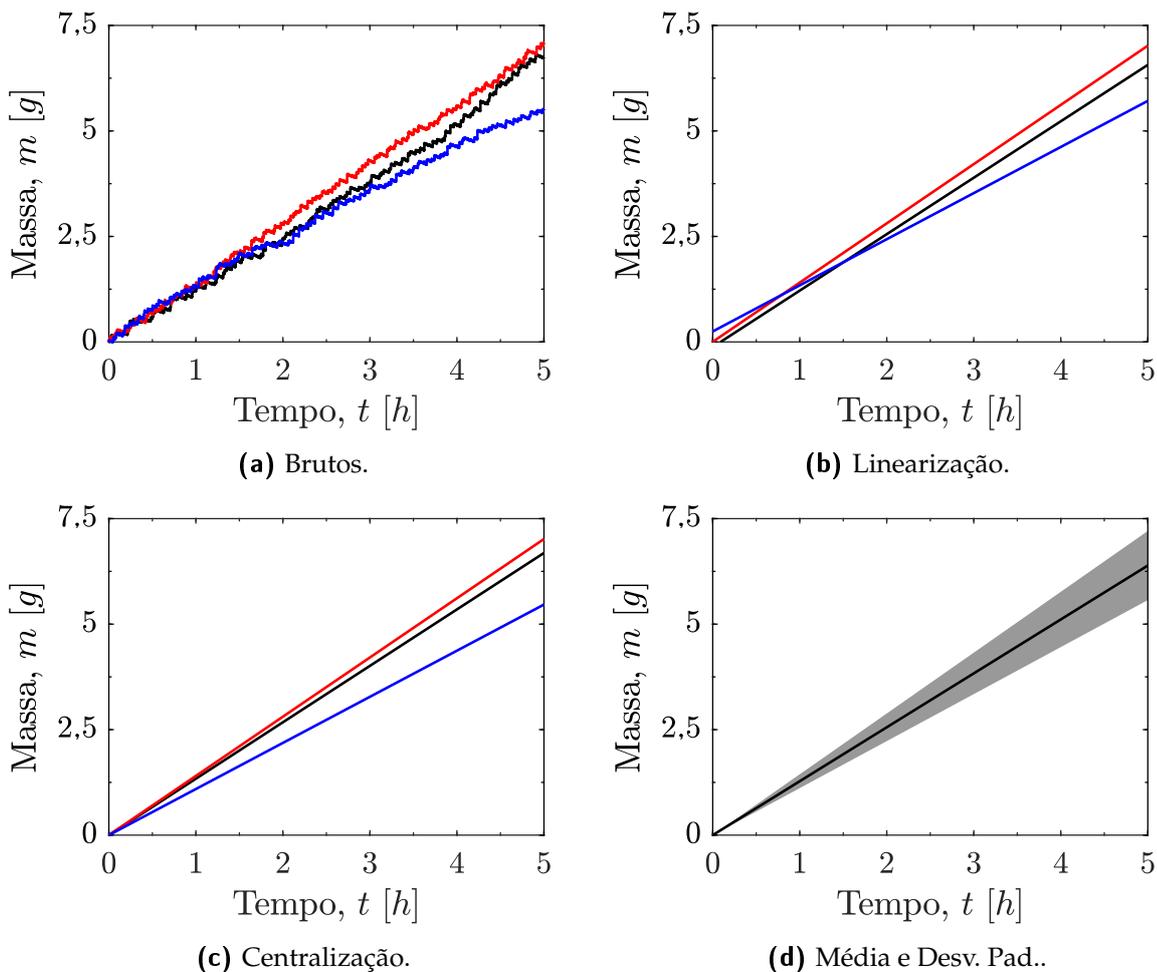


Figura 40: Tratamento dos dados obtidos pela balança.

Para a correção da temperatura da superfície, que é parcialmente diferente da temperatura medida ($T_{sup_{med}}$) no bloco de cobre, fez-se a análise da condução de calor

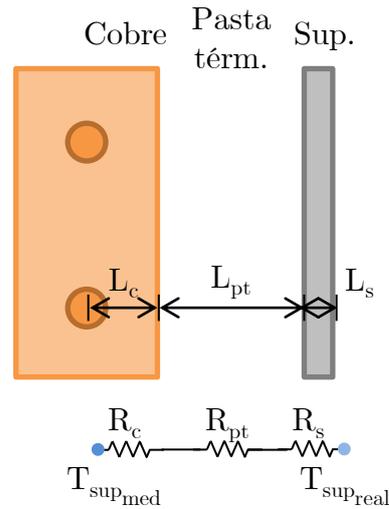


Figura 41: Balanço de calor na superfície de teste.

nos materiais. A Figura 41 apresenta o esquema da condução de calor entre o bloco de cobre (c), a pasta térmica (pt) e a superfície de teste (s).

Através da condução de calor, tem-se as Equações 4.1, 4.2 e 4.3 para obtenção da temperatura da superfície.

$$Q = UA \cdot (T_{sup_real} - T_{sup_med}) \quad (4.1)$$

$$UA = \frac{1}{R_{eq}} \quad (4.2)$$

$$R_{eq} = R_c + R_{pt} + R_s \quad (4.3)$$

onde todas as resistências são de condução, então podem ser expressas pela Equação 4.4.

$$R_a = \frac{L_a}{k \cdot A} \quad (4.4)$$

sendo que o subíndice a representa o material ao qual se deseja calcular a resistência e A é a área da superfície.

As variáveis aplicadas são obtidas através de Bergman et al. (2011) com exceção da condutividade térmica (K) da pasta térmica, indicada pelo fabricante, sendo então: $L_c = 2,5 \text{ mm}$, $L_{pt} = 0,1 \text{ mm}$, $L_s(AI) = 1 \text{ mm}$, e $A = 4,5 \text{ cm} \times 4,5 \text{ cm}$, $L_s(AC) = 25 \text{ mm}$, $K_c = 401 \text{ W m}^{-1} \text{ K}$, $K_{pt} = 2,3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}$, $K_{AI} = 13,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e $K_{AC} = 60,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}$, onde os índices L , AI e AC representam o comprimento, aço inoxidável e aço carbono, respectivamente.

5 RESULTADOS

Esse capítulo se destina a apresentar os resultados e a discussão da caracterização das superfícies e os ensaios realizados na bancada de condensação. Todos os resultados foram obtidos através dos métodos apresentados no Capítulo 4.

5.1 CARACTERIZAÇÃO

A caracterização das superfícies se fez necessária de modo a mostrar os seus aspectos mais importantes. Inicialmente são apresentados os valores obtidos para os ângulos de contato, com imagens coletadas para predição. Em seguida, os parâmetros rugosos e, por fim, imagens obtidas pelo do MEV.

5.1.1 ÂNGULO DE CONTATO

Nesta subseção se apresentará os resultados obtidos para as medições dos ângulos de contato. Inicialmente os dados para as amostras de aço inoxidável, as revestidas com nanotubos de carbono (antes e após revestimento da superfície) e para a tratada com plasma corona (também antes e após tratamento). Por fim, uma tabela com os ângulos de contato das superfícies expostas aos ensaios de condensação.

AÇO INOXIDÁVEL

As fotografias apresentadas a seguir foram obtidas através do goniômetro e representam o primeiro quadrante da superfície de aço inoxidável polida. Os valores de θ indicados nas legendas são a média das cinco medições para cada imagem. Estes valores podem ser diferente das médias para a amostra, que é obtida entre a média dos 4 pontos de medição.

A Figura 42 mostra as imagens adquiridas, pode-se averiguar que com o decorrer do tempo de 60 s a gota tende a se espalhar e aumentar o contato com a superfície. As Figuras 43 e 44 apresentam as imagens de avanço e de recuo para o mesmo quadrante e amostra. Através destas figuras pode-se verificar o crescimento e recolhimento da gota seguindo o método apresentado pelo fabricante do goniômetro.

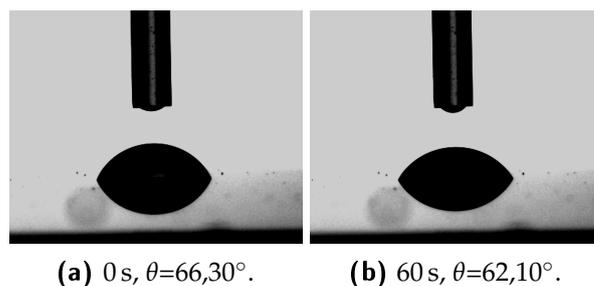


Figura 42: Ângulo de contato estático do primeiro quadrante para AI-Polido.

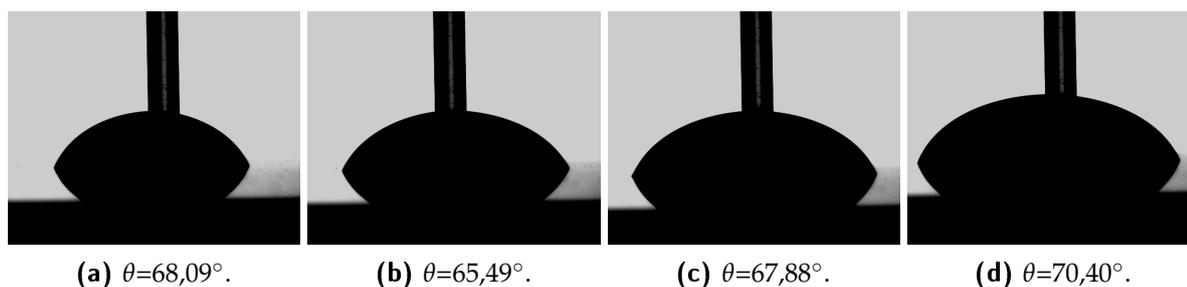


Figura 43: Ângulo de contato de avanço do primeiro quadrante para AI-Polido, $\theta=67,97^\circ$.

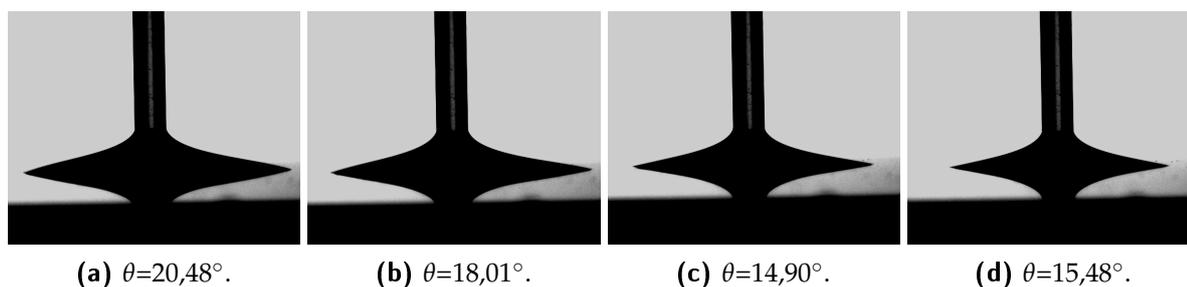


Figura 44: ângulo de contato de recuo do primeiro quadrante para AI-Polido, $\theta=17,22^\circ$.

Com os dados para os quatro quadrantes e após aplicação do filtro para remoção dos dados dispersos, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 8 onde estão as médias e os desvios padrões das medições dos ângulos de contato. Nesta tabela verifica-se que à medida que a superfície se torna mais polida (aumento da granulometria de lixa) os ângulos de contato tendem a diminuir, tornando a superfície mais molhante. Deve-se verificar que as amostras com lixa 220 e 600 possuem ângulos próximos, que avaliados os seus desvios padrões são consideravelmente iguais.

Tabela 8: Ângulos de contato obtidos sobre amostras de aço inoxidável.

Amostra	Estático 0 s (°)		Estático 60 s (°)		Avanço (°)		Recuo (°)	
	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP
AI-Lixa 220	93,16	7,95	92,17	7,51	97,83	3,10	32,28	6,75
AI-Lixa 600	97,06	2,23	95,06	2,01	96,93	1,66	38,47	7,75
AI-Lixa 1200	82,74	6,31	79,75	6,66	87,90	5,01	38,48	9,36
AI-Polido	66,34	2,46	64,69	3,04	71,40	2,91	19,56	4,56

AÇO CARBONO + NANOTUBOS DE CARBONO

Nas amostras de aço carbono revestidas com nanotubos de carbono foram avaliados os ângulos de contato antes e após o revestimento das superfícies. A Figura 45 exibe uma imagem para cada ângulo medido no primeiro quadrante após o revestimento com os nanotubos. Pode-se verificar pela Figura 45d que existe a formação de uma película de líquido, causada pela remoção da gota da superfície e não diminuição da sua área de contato.

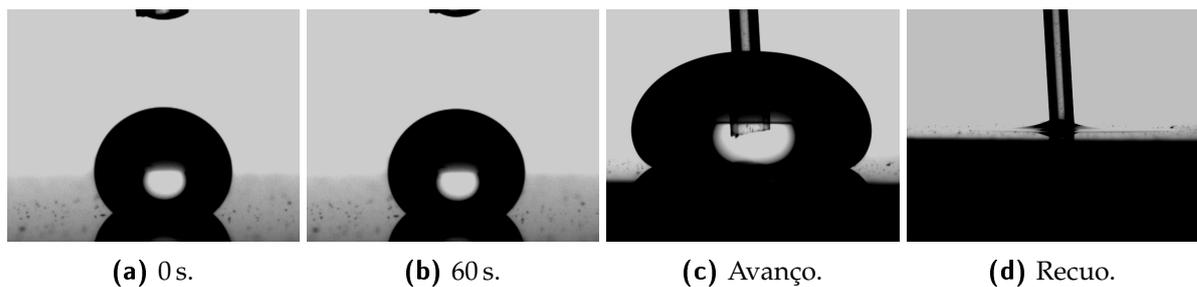


Figura 45: Ângulo de contato do primeiro quadrante da amostra de AC+NT Lixa 1200.

A Tabela 9 apresenta as médias e os desvios padrões dos ângulos de contato obtidos para as superfícies de aço carbono, utilizadas como substrato para revestimento com nanotubos de carbono. Deve-se averiguar que diferente dos ângulos apresentados para a amostra de aço inoxidável as amostras de aço carbono apresentam diminuição da molhabilidade com o aumento do polimento da superfície.

Tabela 9: Ângulos de contato obtidos sobre amostras de aço carbono.

Amostra	Estático 0 s (°)		Estático 60 s (°)		Avanço (°)		Recuo (°)	
	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP
AC-Lixa 80	57,41	8,26	55,33	7,39	65,24	9,30	0,00	0,00
AC-Lixa 220	86,10	4,67	81,57	4,27	90,55	2,62	15,72	6,49
AC-Lixa 600	88,19	2,03	86,18	2,30	90,02	1,99	35,67	4,87
AC-Lixa 1200	84,92	3,82	82,28	3,28	84,40	2,84	24,89	4,00

Após o revestimento com nanotubos de carbono foram realizadas novas medições dos ângulos de contato. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 10 onde se observam valores medidos muito próximos uns dos outros, indicando que independente do acabamento da superfície este revestimento torna as características molhantes similares. O revestimento da superfície com nanotubos de carbono apresenta característica hidrofóbica. Porém, quando avaliado o ângulo de recuo, pela figura apresentada anteriormente e pela tabela apresentada a seguir, se averigua que quando se remove o líquido, a superfície permanece com uma película de condensado, deixando-a com molhabilidade máxima.

Tabela 10: Ângulos de contato obtidos sobre amostras de aço carbono + nanotubos de carbono.

Amostra	Estático 0 s (°)		Estático 60 s (°)		Avanço (°)		Recuo (°)	
	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP
AC+NT-Lixa 80	136,34	0,63	136,18	0,66	150,77	1,45	0,00	0,00
AC+NT-Lixa 220	130,59	0,75	129,96	0,75	135,91	1,57	0,00	0,00
AC+NT-Lixa 600	131,88	0,74	131,26	0,66	139,32	1,71	0,00	0,00
AC+NT-Lixa 1200	136,78	0,49	136,16	0,61	147,83	1,66	0,00	0,00

AÇO INOXIDÁVEL + PLASMA CORONA

Por fim, avaliou-se uma superfície tratada com plasma corona, tendo como substrato aço inoxidável AISI-316L com acabamento superficial produzido com lixa de granulometria 600. No tratamento com plasma corona inseriu-se gás de R-134a para se obter característica molhante de superhidrofobicidade como será apresentado. A Figura 46 apresenta imagens coletadas sequencialmente, onde a sequência se inicia com a superfície entrando em contato com a gota e é retraída. Para gotas maiores, que se desprendem da seringa pela gravidade e possuem maior massa, a gota escoou a mínima inclinação da superfície, não sustentando o contato entre a superfície e o líquido.

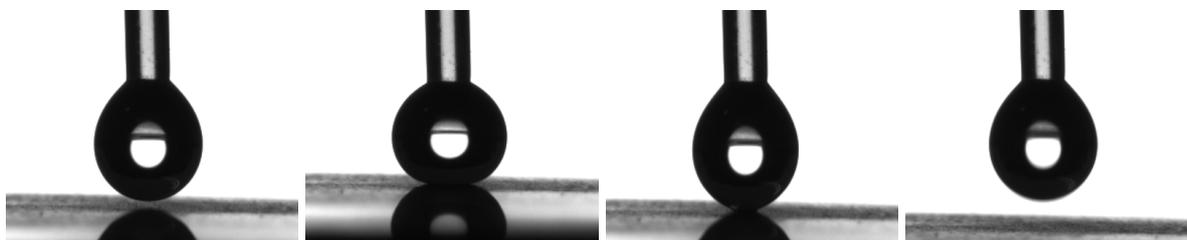


Figura 46: Ângulo de contato para tratamento com plasma corona com R-134a, $\theta=180,00^\circ$.

A Tabela 11 apresenta os valores médios e os desvios padrão para a superfície antes e após o tratamento com plasma corona. Os valores encontrados para o substrato são diferentes dos medidos anteriormente para a superfície similar (AI-Lixa600), demonstrando assim a importância de se caracterizar interindividual cada superfície. Pode-se verificar na tabela que a superfície após o tratamento com o plasma corona (na presença de R-134a) se torna superhidrofóbica, repelindo completamente o líquido, impedindo com que ele entre em contato ou possua adesão à superfície.

Tabela 11: Ângulos de contato obtidos sobre amostras de aço inoxidável, antes a após tratamento com plasma corona.

Amostra	Estático 0 s (°)		Estático 60 s (°)		Avanço (°)		Recuo (°)	
	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP
AI-Lixa 600	101,22	0,69	100,10	0,62	104,96	3,42	67,86	6,44
AI+PC-Lixa 600	180,00	0,00	180,00	0,00	180,00	0,00	180,00	0,00

AMOSTRAS TESTADAS NA CONDENSAÇÃO

Concluindo esta subseção está apresentada na Tabela 12, de maneira reduzida, todas as amostras avaliadas na bancada de condensação. Os resultados encontrados para a amostra de aço inoxidável indicam que o aumento na granulometria de lixa torna a superfície mais molhante. As superfícies com nanotubos de carbono possuem ângulos de contatos elevados (baixa molhabilidade). Porém, possuem alto poder de prendimento do líquido com a superfície (baixo ângulo de recuo), gerando uma película sobre a amostra. Essa informação é de extrema importância e deixa de ser reportada em muitos trabalhos. O tratamento com plasma corona na presença de R-134a torna a superfície completamente repelente ao líquido, gerando ângulo de contato máximo (180°). A gota não entra em contato com a superfície independente de tamanho ou peso, escoando ao mínimo ruído. Sobre este tratamento, é interessante ressaltar que o método de aplicação está em fase de estudo e o tratamento da superfície não acontece de maneira uniforme, havendo pequenas áreas com diferente molhabilidade.

Tabela 12: Ângulos de contato obtidos sobre amostras testadas na bancada de condensação.

Amostra	Estático 0 s (°)	Estático 60 s (°)	Avanço (°)	Recuo (°)
AI-Lixa 220	93,16	92,17	97,83	32,28
AI-Lixa 600	97,06	95,06	96,93	38,47
AI-Lixa 1200	82,74	79,75	87,90	38,48
AI-Polido	66,34	64,69	71,40	19,56
AC+NT-Lixa 80	136,34	136,18	150,77	0,00
AC+NT-Lixa 220	130,59	129,96	135,91	0,00
AC+NT-Lixa 600	131,88	131,26	139,32	0,00
AC+NT-Lixa 1200	136,78	136,16	147,83	0,00
AI+PC-Lixa 600	180,00	180,00	180,00	180,00

5.1.2 TOPOGRAFIA DE SUPERFÍCIE

Para a caracterização da topografia de superfície se utilizaram dois métodos. O primeiro método é quantitativo, com análise por interferometria óptica e o segundo qualitativo, através da análise de imagens geradas no MEV.

O estudo da topografia de superfície realizado via interferometria óptica, se fez sobre os materiais base, não sendo feito novamente após o tratamento da superfície. Isso se deve ao fato de que os tratamentos aplicados tornam a superfície pouco refletiva, não sendo possível a coleta de informações sobre ela. Os parâmetros rugosos utilizados para avaliação foram selecionados pelo autor e descritos na revisão bibliográfica do presente trabalho, Capítulo 2.

Na Tabela 13, estão apresentados os parâmetros para as superfícies utilizadas no presente estudo, reforçando que as superfícies com nanotubos e com plasma corona

tiveram apenas seu substrato caracterizado. Pode-se verificar que os parâmetros S_a , S_q e S_{sk} diminuem com o aumento do polimento para todos os substratos (AI e AC) e o parâmetro S_{ku} aumenta com o aumento do polimento da superfície apresentando dispersão neste último parâmetro apenas para a amostra de aço inoxidável polida.

Tabela 13: Parâmetros rugosos das superfícies.

Amostra	S_q (nm)	S_a (nm)	S_{sk}	S_{ku}
AI-Lixa 220	161,50	115,00	-0,08	8,39
AI-Lixa 600	16,40	12,10	-0,28	33,95
AI-Lixa 1200	12,75	9,19	-1,87	59,77
AI-Polido	20,07	10,79	-2,11	14,37
AC+NT-Lixa 80	480,50	357,50	-0,61	3,76
AC+NT-Lixa 220	233,00	178,50	-1,08	6,48
AC+NT-Lixa 600	69,15	42,05	-1,75	30,30
AC+NT-Lixa 1200	13,90	10,60	-0,73	75,90
AI+PC-Lixa 600	37,55	23,45	-1,93	46,50

Os dados obtidos nesta tabela podem ser comparados com a Figura 47 que representa as quatro superfícies de aço inoxidável com diferentes acabamentos de superfície, pode-se avaliar através dessa figura que à medida que se aumenta a granulometria das lixas as linhas de marcação se tornam menores. É interessante verificar que a amostra polida não possui qualquer direcionamento, como as demais amostras.

A fim de permitir uma análise qualitativa das superfícies, a Figura 48 apresenta imagens de alta aproximação geradas por meio do MEV de amostras de aço inoxidável. O fator de aproximação usado é de 3 mil vezes. Assim como visualizado anteriormente pode-se verificar a existência de linhas mais marcantes nas amostras com acabamento gerado por lixas de menor granulometria.

A Figura 49 representa a superfície de aço carbono com revestimento de nanotubos de carbono. A Figura 49a mostra o substrato com lixa 1200. A Figura 49b mostra a mesma superfície recoberta por nanotubos de carbono. A Figuras 49c representa a amostra coberta por nanotubos de carbono com lixa 80. Todas as imagens foram obtidas com aproximação de 3 mil vezes. Quando comparadas às imagens geradas para a amostra de aço inoxidável, essas amostras possuem o mesmo direcionamento e linhas promovidas pela rugosidade, mesmo após a deposição dos nanotubos de carbono. Pode-se verificar que para a amostra com aço carbono com lixa 1200 (substrato) existem pequenas manchas na imagem e acredita-se ser causada pela oxidação. Deve-se ressaltar que o procedimento utilizado para a deposição dos nanotubos remove toda e qualquer existência de oxidação sobre a superfície.

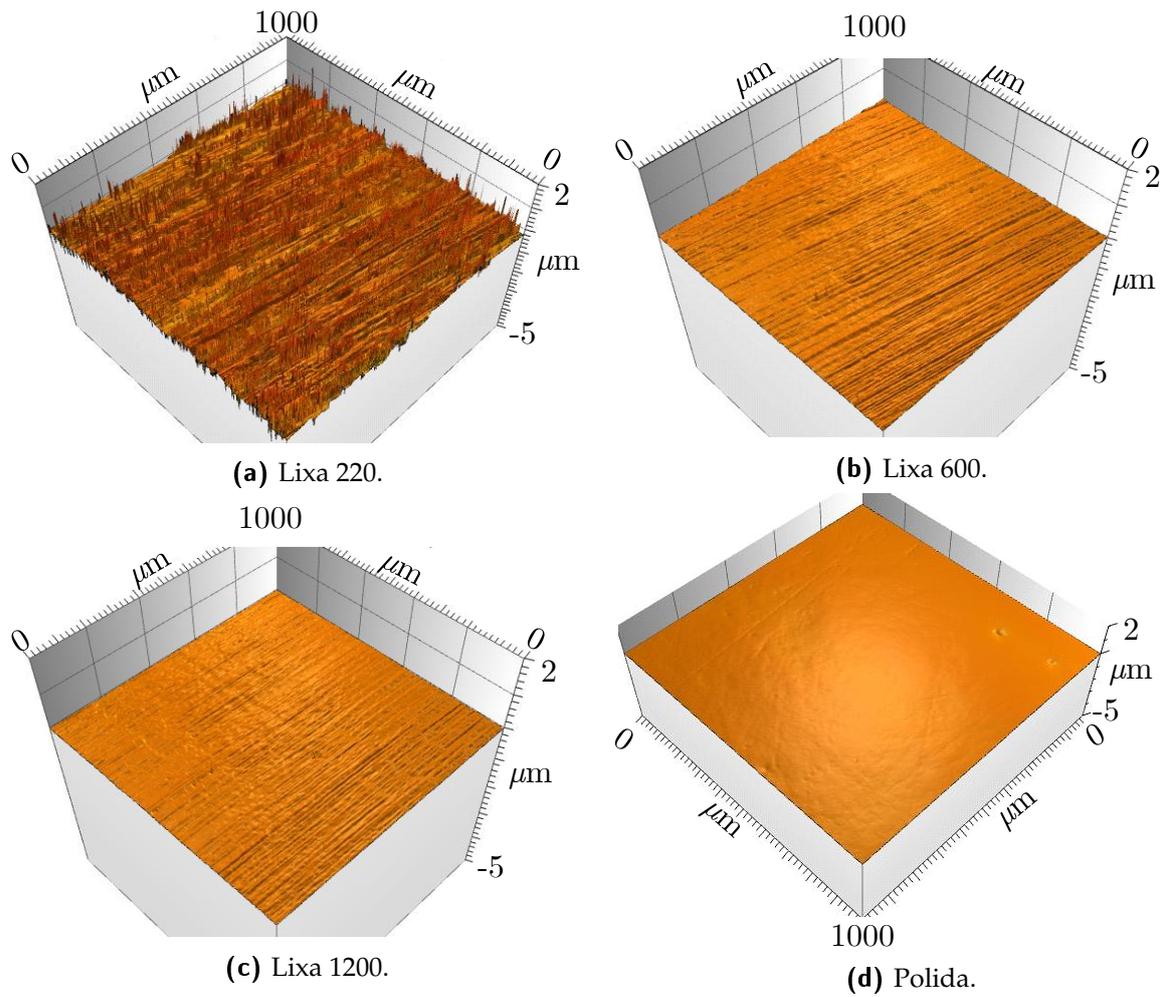


Figura 47: Interferometria - 3D - Aço inoxidável AISI-316L.

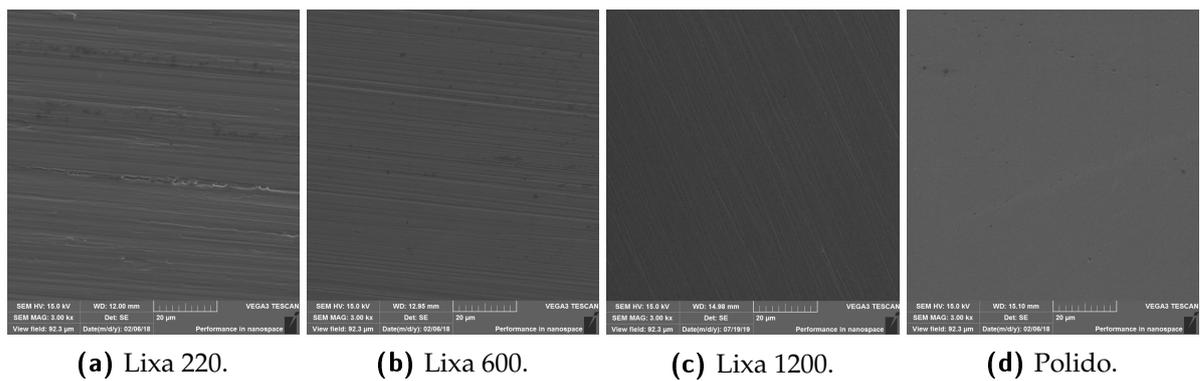


Figura 48: MEV - Aço inoxidável AISI-316L.

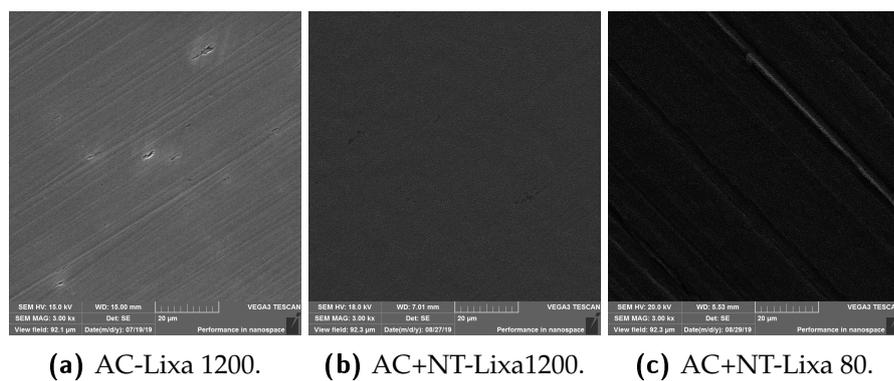


Figura 49: Revestimento com nanotubos de carbono com aproximação de 3000 vezes.

De modo a avaliar a formação e o crescimento dos nanotubos no revestimento da superfície, se fez a aquisição de imagens com maiores aproximações. Apresentadas na Figura 50, onde as Figuras 50a e 50b representam amostra de lixa 80 e as Figuras 50c e 50d de lixa 1200. As figuras com a legenda Lateral possuem aproximações de 60 mil vezes e as com legenda Topo 80 mil vezes. Neste trabalho não se deu enfoque aos padrões de formação dos nanotubos, não sendo realizadas medidas de quantificação através destas imagens.

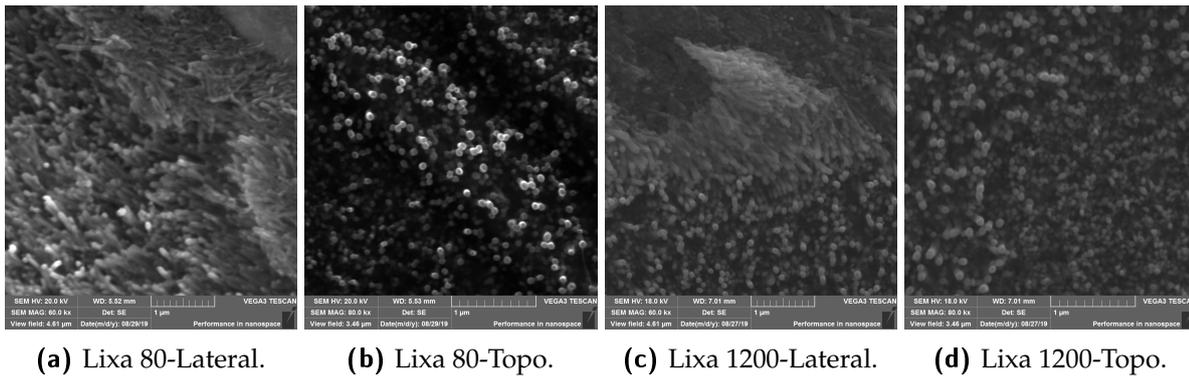


Figura 50: Superfície com nanotubos de carbono, alta aproximação.

5.2 CONDENSAÇÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados na bancada de condensação. Será apresentada a variação dos parâmetros da bancada, o comparativo entre o acabamento de superfície para o aço inoxidável e as amostras com revestimentos de nanotubos e, os resultados para o tratamento com plasma corona. Por fim, o comparativo entre as amostras que apresentam melhor e pior taxa de condensação para cada padrão estudado. O coeficiente de transferência de calor medido pelo fluxímetro é comparado ao obtido pela Equação 2.17.

Cada teste tem duração de 12h. Inicialmente, considerou-se que o sistema permaneceria 2h em regime transiente, resultando em 10h de dados em regime permanente. Entretanto verificou-se a existência de uma alta taxa de evaporação no armazenador de condensado. Como forma de se mitigar esse problema, são utilizadas 7h para se atingir o regime permanente e 5h de teste após isso.

5.2.1 PARÂMETROS VARIÁVEIS

Os parâmetros de operação foram definidos pelo autor utilizando como referência o trabalho de Oestreich et al. (2019). Definiu-se como padrão (referência) a temperatura ambiente, T_{amb} , de 50 °C, a temperatura de superfície, T_{sup} , de 10 °C e a umidade relativa, ϕ , de 80%, conforme a Tabela 6.

A Figura 51 apresenta as massas coletadas e a sua correção para a amostra de aço inoxidável polida na configuração de referência, para o período de regime permanente (ultimas 5 horas de teste). Onde a Figura 51a apresenta os dados de massa coletada e é importante comentar que existe um sombreado em torno da linha que representa o desvio padrão, porém, neste caso é baixo o DP e não é visível. Após conhecimento de que parte da massa disposta no reservatório de condensado se evapora, executaram-se experimentos para esta quantificação, a Figura 51b apresenta a massa evaporada para as mesmas condições. A Figura 51c apresenta a real massa condensada pela superfície neste período, que é a massa medida pela balança somada à massa que se evapora do reservatório. Por fim, a Figura 51d apresenta o comparativo entre a massa de condensado coletada para dois casos, *new* e *old*. Deve-se verificar que a superfície *old* apresenta maior desvio padrão (área sombreada) quando comparada à superfície *new*.

Para a análise variando-se os parâmetros T_{amb} , T_{sup} e ϕ , fixou-se a superfície e operaram-se 3 testes com a configuração de referência. Os 3 primeiros testes são descritos como *new*, que representa a superfície assim que produzida e caracterizada. Em seguida, operaram-se os testes variando cada parâmetro isoladamente. Por fim, realizaram-se novamente 3 testes na configuração padrão. Esta ultima análise é chamada de *old*. Os termos *new* e *old* serão apresentados apenas nesta subseção, utilizando-se para comparativo no restante do trabalho apenas a configuração aqui chamada de *new*. No restante do trabalho serão apresentados somente os dados de massa total, não se fazendo a separação entre as parcelas coletada e evaporada.

Para averiguar a influência de cada parâmetro na taxa de condensação e no coeficiente de transferência de calor, se fez a análise dos parâmetros da bancada, variando cada um isoladamente. Na variação de um parâmetro, os demais se mantiveram constantes e igual à configuração de referência.

A Tabela 14 apresenta os parâmetros da bancada para cada um dos ensaios apresentando as médias e os desvios padrões. Relembrando que os subíndices *new* e *old* representam a superfície assim que produzida e após uma série de testes, respectivamente. Pode-se avaliar nestas tabelas a variação nas propriedades da bancada, verificando-se, por exemplo, que as temperaturas de superfície possuem menor desvio padrão do que a temperatura ambiente, isso se justifica pelo método de controle dessas variáveis.

As Figuras 52, 53 e 54 apresentam os resultados de massa total coletada para variação da temperatura de superfície, temperatura ambiente e umidade relativa, respectivamente. Na Figura 52 é possível verificar um aumento na coleta de massa com a queda na temperatura de superfície, sendo mais significativa para a redução de 10 °C para 5 °C, indicando que quanto maior o sub-resfriamento da superfície maiores as taxas de massa coletada. Na Figura 53 verifica-se que quanto maior o superaquecimento do ambiente maiores são as taxas de massa coletada, sendo muito

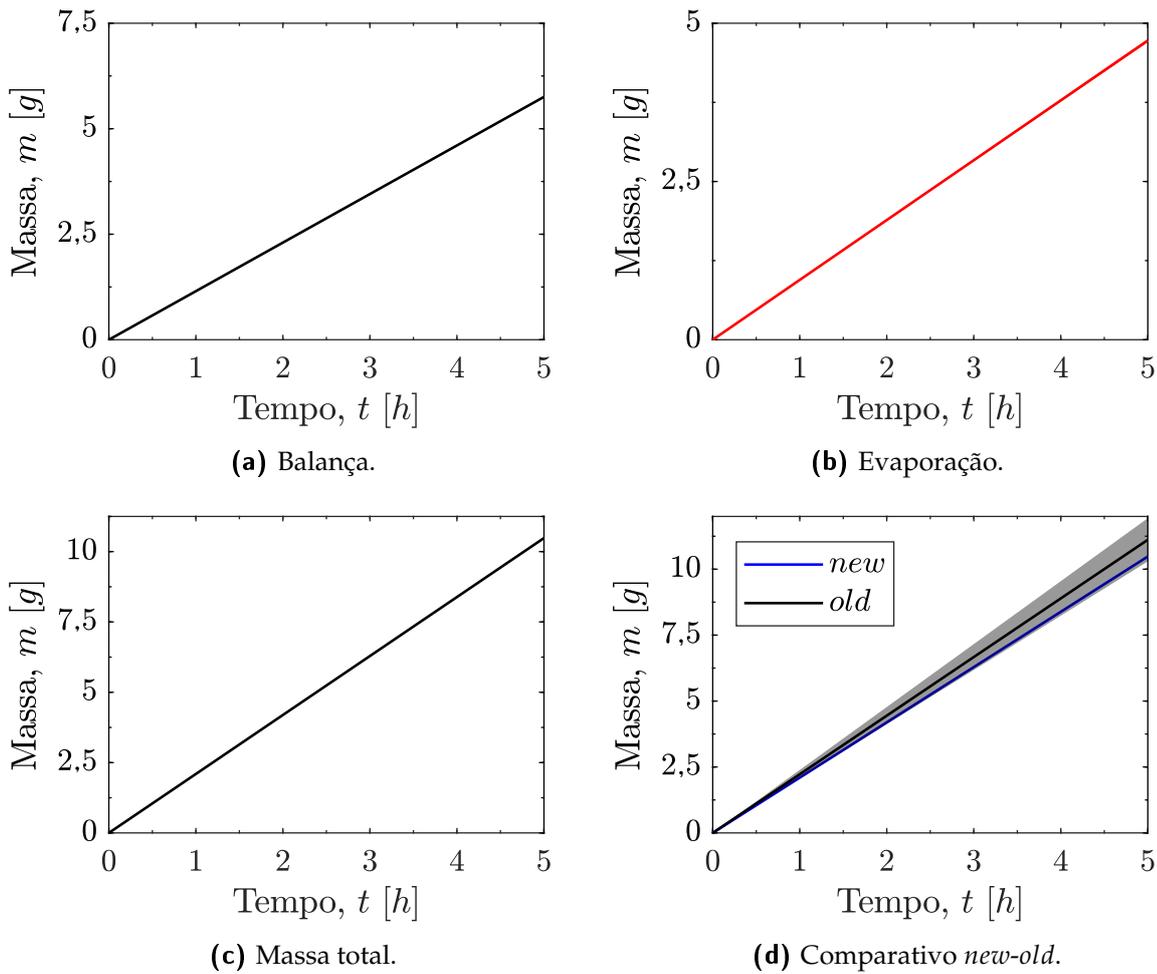


Figura 51: Massa de condensado coletado para amostra AI-Polido.

Tabela 14: Dados da bancada de condensação parâmetros variáveis.

Amostra	$T_{sup} (^{\circ}\text{C})$		$T_{amb} (^{\circ}\text{C})$		$\phi (\%)$	
	M	DP	M	DP	M	DP
<i>New</i>	10,24	0,10	50,23	0,29	80,82	1,07
<i>Old</i>	10,23	0,11	50,22	0,27	80,93	1,08
$T_{sup} = 5^{\circ}\text{C}$	5,27	0,11	50,22	0,28	80,89	0,77
$T_{sup} = 20^{\circ}\text{C}$	20,16	0,08	50,19	0,23	80,78	1,25
$T_{amb} = 40^{\circ}\text{C}$	10,17	0,08	40,29	0,25	80,95	0,91
$T_{amb} = 60^{\circ}\text{C}$	10,33	0,24	60,00	0,49	80,55	0,96
$\phi = 70\%$	10,21	0,10	50,22	0,27	70,93	1,19
$\phi = 90\%$	10,26	0,13	50,23	0,31	90,85	1,30

mais significativo o aumento no \dot{m} na variação da T_{amb} de 50°C para 60°C do que de 40°C para 50°C . A Figura 54 apresenta aumento taxa de massa condensada com o aumento da umidade relativa, de aproximadamente mesma ordem de grandeza para cada variação de patamar. Logo, $\dot{m} \uparrow$ quando $T_{sup} \downarrow$, $T_{amb} \uparrow$ e $\phi \uparrow$. Pode-se verificar nestas figuras também que as taxas de massa condensada nos padrões *new* e *old* estão com seus desvios padrões sobrepostos, o que indica que podem se considerar constantes.

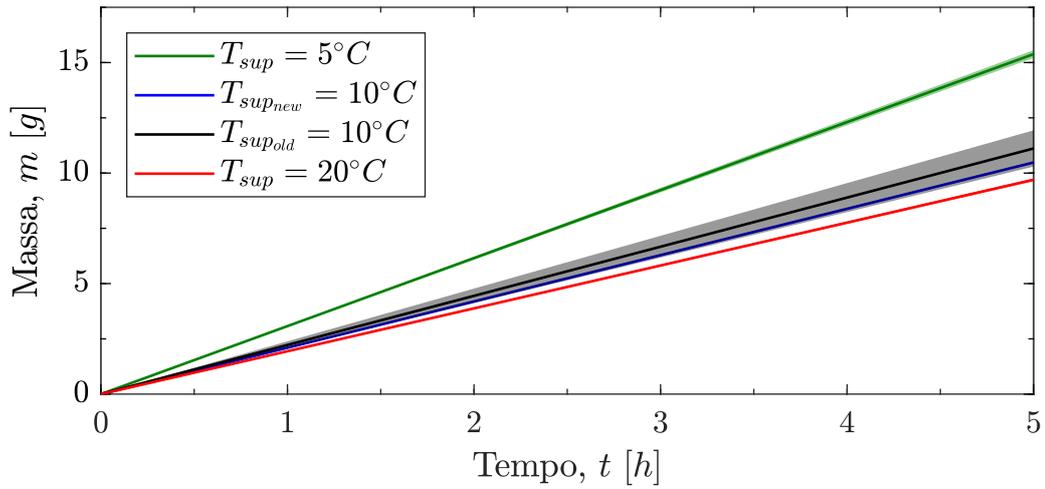


Figura 52: Variação de T_{sup} para AI-Polido.

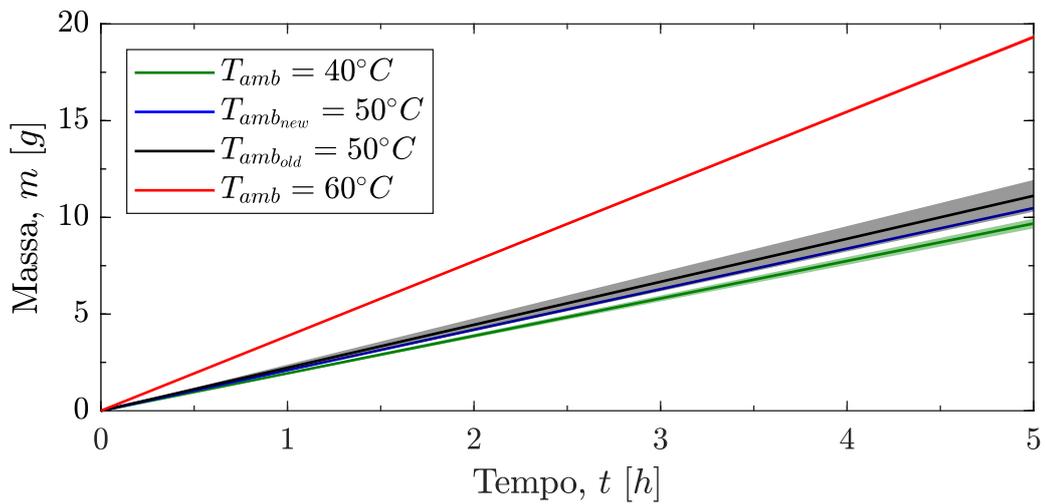


Figura 53: Variação de T_{amb} para AI-Polido.

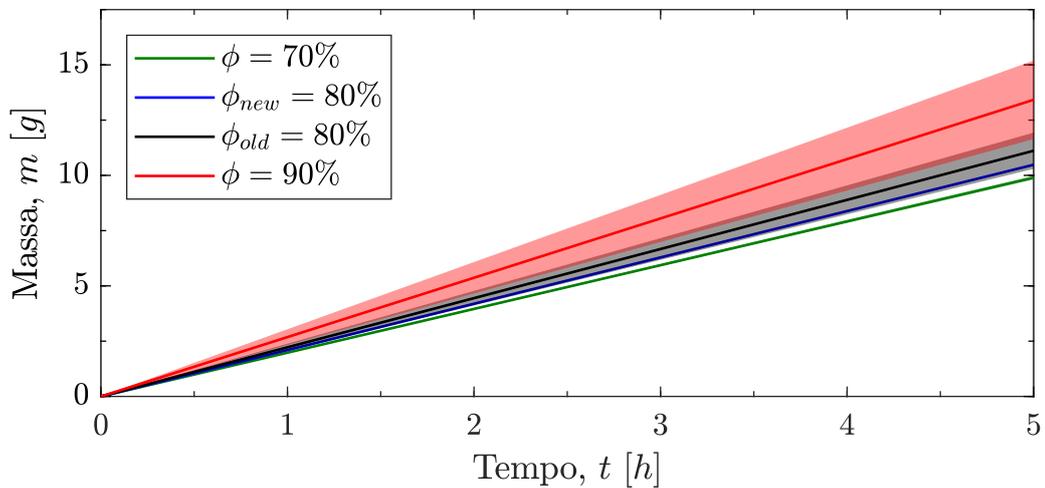


Figura 54: Variação de ϕ para AI-Polido.

As Figuras 55, 56 e 57 apresentam os valores do HTC medidos por meio do fluxímetro e obtidos através do balanço de calor (Equação 2.17), para variação da temperatura da superfície, temperatura ambiente e umidade relativa, respectivamente. Pode-se verificar que assim como para a taxa de condensado gerado nas superfícies o fluxo medido é maior quando se reduz a temperatura de superfície (Figura 55). O mesmo acontece para o caso da Figura 56 onde o HTC aumenta com o aumento da temperatura ambiente. Por fim, a Figura 57 mostra que quanto maior a umidade relativa maior é o HTC medido. Deve-se ressaltar que a análise avaliada é realizada apenas para o coeficiente de transferência de calor medido pela superfície, não avaliando o obtido por correlação, servindo este apenas para comparativo. Neste caso pode-se averiguar que, com aumento na taxa de condensação, tem-se o aumento no coeficiente de transferência de calor global, melhorando assim, a transferência de massa e de calor.

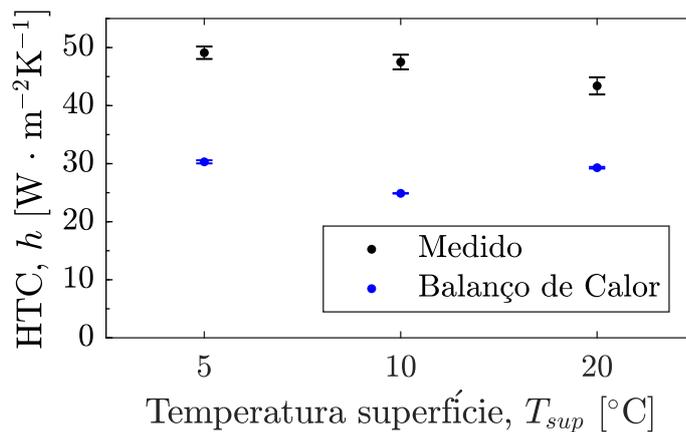


Figura 55: HTC para variação de T_{sup} .

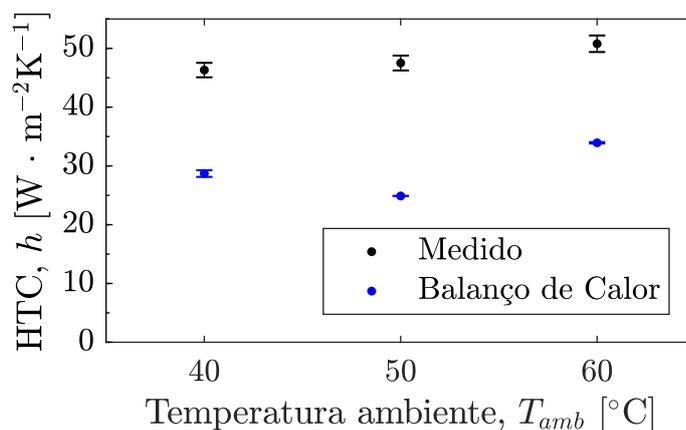


Figura 56: HTC para variação de T_{amb} .

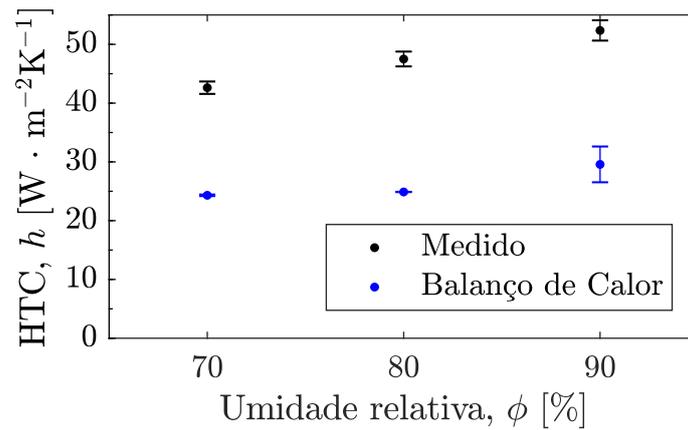


Figura 57: HTC para variação de ϕ .

Verifica-se variação apenas no HTC calculado via correlação. Por se tratar de um trabalho experimental, dar-se-á enfoque ao HTC medido, que é o real para as amostras de testes. O fato de a correlação não estimar precisamente o HTC pode estar associado a evaporação do condensado enquanto ainda na superfície ou mesmo a incertezas do próprio equacionamento.

5.2.2 COMPARATIVO AÇO INOXIDÁVEL

Nesta subseção são apresentados os resultados dos ensaios com superfícies de aço inoxidável AISI-316L com diferentes acabamentos de superfície. As variáveis do experimento serão apresentadas em forma de tabelas, seguidas por duas figuras, uma representando a coleta do condensado e outra apresentando os coeficientes de transferência de calor. É importante ressaltar que neste trabalho sempre será dado enfoque às duas principais aplicações das superfícies condensadoras, que estão diretamente correlacionadas, sendo: aumentar a massa condensada e a transferência de calor.

A Tabela 15 apresenta os valores médios e os desvios padrões dos parâmetros da bancada nos ensaios. Onde se pode verificar a repetibilidade entre os ensaios realizados.

Tabela 15: Parâmetros da bancada com AI

Amostra	$T_{sup}(^{\circ}C)$		$T_{amb}(^{\circ}C)$		$\phi(\%)$	
	M	DP	M	DP	M	DP
Lixa 220	10,24	0,11	50,20	0,26	80,84	2,06
Lixa 600	10,23	0,10	50,22	0,28	80,87	1,88
Lixa 1200	10,24	0,10	50,20	0,25	80,78	1,96
Polido	10,24	0,10	50,23	0,29	80,82	2,10

Os dados de massa coletadas são apresentados na Figura 58, onde cada cor representa um acabamento de superfície, sendo a linearidade as médias e as regiões

sombreadas os desvios padrões. Pode-se verificar, por comparação entre os dados obtidos, que quanto mais polida a superfície, menor é a taxa de condensado gerado por ela. Sendo a superfície com acabamento superficial com lixa 220 o que apresentou mais massa condensada e a que apresentou pior desempenho foi a amostra polida.

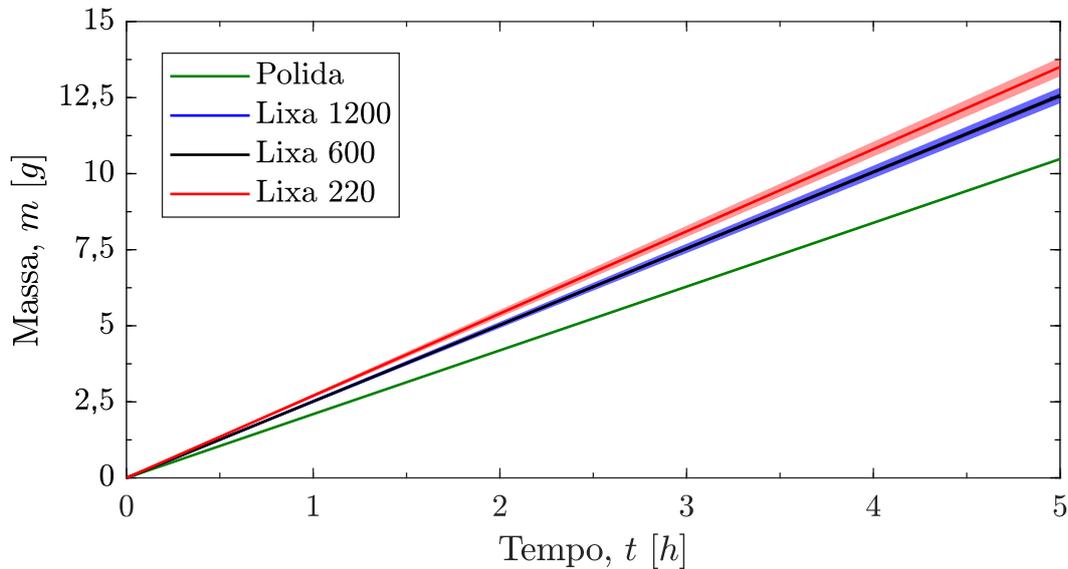


Figura 58: Condensação para diferentes acabamentos superficiais de aço inoxidável.

Pelos dados apresentados na figura, julga-se existirem dois principais mecanismos que auxiliam a formação e drenagem do condensado nas amostras de aço inoxidável. Um é a escala de rugosidade e o outro é a direcionalidade da superfície, causada pelo método de fabricação. Acredita-se que a rugosidade da superfície é ferramenta importante na condensação. Porém, para níveis de rugosidade menores que apresentados para lixa 600 deixa de ser determinante na condensação, explicando-se assim o fato de as duas lixas mais finas possuírem a mesma taxa de massa condensada. O outro fator que se acredita explicar os resultados é a direcionalidade da superfície, onde as amostras com acabamento de lixa possuem forte direcionamento, diferente da amostra polida que não possui qualquer direcionalidade. Sendo então, o direcionamento um mecanismo que facilita a geração e o escoamento do condensado.

A Figura 59 apresenta os dados do HTC para as amostras de aço inoxidável com diferentes acabamentos de superfície. Através desta figura podemos verificar que em nenhum dos casos o coeficiente de transferência de calor medido através do fluxímetro apresentou grandes variações. Acredita-se que isso se dá pelo fato de que a variação na massa coletada não foi grande o suficiente para que se apresentem variações significativas na medição do HTC. Ou seja, baseado nos resultados experimentais, pode-se averiguar que, independentemente do acabamento da superfície de aço inoxidável o HTC é constante.

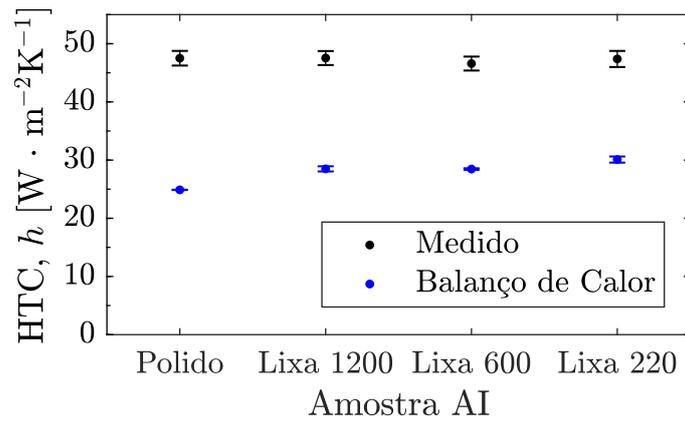


Figura 59: HTC para diferentes acabamentos superficiais de aço inoxidável.

5.2.3 COMPARATIVO AÇO CARBONO + NANOTUBOS DE CARBONO

No decorrer deste trabalho, avaliou-se a utilização de alguns tratamentos de superfície como ferramenta para melhorar a taxa de condensação, a transferência de calor ou mesmo as características molhantes da superfície. Proveniente da análise de gotas depositadas sobre filmes de nanotubos de carbono surgiu o interesse em estudar como esse tratamento poderia atuar na condensação. O fato de possuir elevados ângulos de contatos se mostrou bastante promissor e por ser um revestimento físico apresenta durabilidade temporal de exposição à condensação.

O substrato utilizado para o crescimento dos nanotubos de carbono se deu devido ao método de crescimento que se possui domínio (desenvolvido no LabMat), utilizando-se aço carbono. Não se optou por ensaios com o aço carbono sem tratamento em decorrência das características de oxidação do material, prejudicando a repetibilidade dos resultados, a avaliação da superfície e a durabilidade do material. Para os ensaios com nanotubos de carbono, as superfícies também possuem diferentes acabamentos superficiais, sendo um total de quatro superfícies. Os parâmetros medidos nos ensaios estão apresentados na Tabela 16, em valores médios e seus respectivos desvios padrões.

Tabela 16: Parâmetros da bancada com AC+NT.

Amostra	$T_{sup}(^{\circ}C)$		$T_{amb}(^{\circ}C)$		$\phi(\%)$	
	M	DP	M	DP	M	DP
Lixa 80	10,13	0,11	50,21	0,28	80,79	1,96
Lixa 220	10,13	0,11	50,22	0,29	80,85	2,03
Lixa 600	10,12	0,10	50,19	0,26	80,76	2,00
Lixa 1200	10,13	0,10	50,22	0,28	80,76	1,95

A Figura 60 apresenta os dados de massa coletada para cada superfície. Pode-se verificar nela que existe uma tendência oposta àquela apresentada pela superfície de aço

inoxidável. O autor presume que se dá pelo fato de a superfície coberta por nanotubos de carbono possuir alto poder de adesão com a gota (ângulo de recuo $\approx 0^\circ$). Logo, quanto maior a área real da superfície maior a capacidade de o líquido se prender à mesma. É interessante ressaltar que a amostra com Lixa 1200 diverge da conclusão apresentada pelo autor, podendo estar diretamente ligada a algum erro no procedimento experimental.

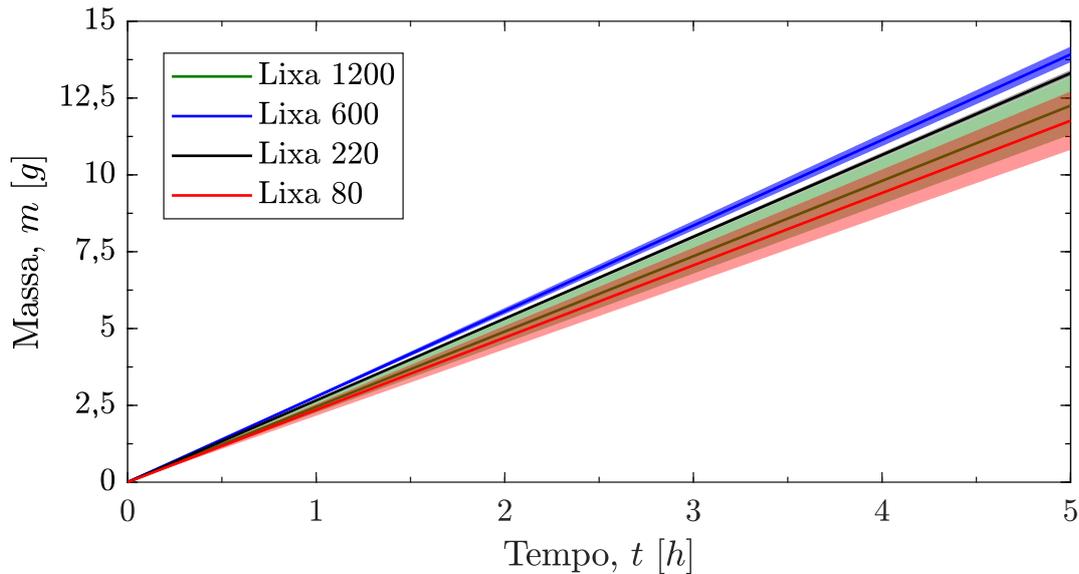


Figura 60: Condensação para diferentes acabamentos superficiais de AC com revestimento de nanotubos de carbono.

A Figura 61 apresenta os HTC para as amostras cobertas por nanotubos de carbono medido pelo fluxímetro e pela mesma equação já apresentada anteriormente. Pode-se verificar que assim como nas amostras de aço inoxidável as superfícies revestidas com nanotubos de carbono não apresentam diferentes valores no coeficiente de transferência de calor.

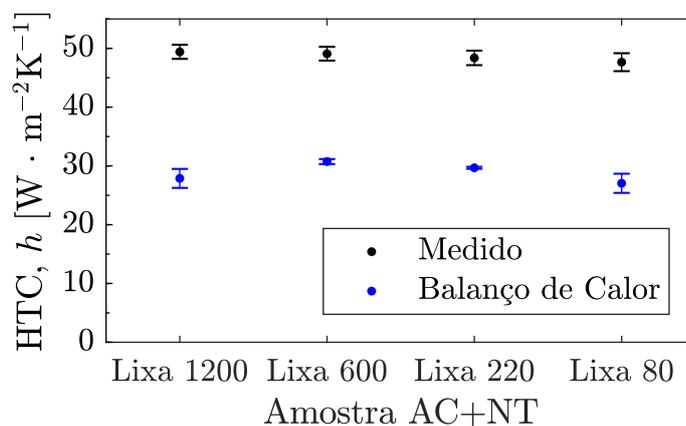


Figura 61: HTC para amostras de AC com revestimento de nanotubos de carbono.

5.2.4 TRATAMENTO COM PLASMA CORONA

O plasma corona apresenta características complexas do ponto de vista de molhabilidade da superfície, podendo variar seu efeito de acordo com a atmosfera ambiente, inserção de gases e outras variações. Esses aspectos não foram abordados neste trabalho por não pertencerem ao seu escopo.

Nos testes com atmosfera terrestre, resultaram em molhabilidade perfeita da superfície, porém, com pouca durabilidade (apenas alguns minutos). Durante o trabalho testaram-se além do ar, diferentes gases como: argônio, oxigênio, nitrogênio e R-134a, todos não inflamáveis e obtidos de cilindros. Dentre eles o único que apresentou diferença de molhabilidade em relação aos demais foi o R-134a, que forma (aparentemente) uma camada de revestimento sobre a superfície, deixando-a completamente repelente ao contato de líquido. Acredita-se que este revestimento gerado seja a formação de fluoreto de ferro pois o gás possui flúor, sendo este um composto muito estável, para confirmação desta hipótese é necessário a caracterização do revestimento. É de extrema importância deixar explícito que este tratamento está em processo de desenvolvimento e possui aplicação completamente manual, não possuindo padronização no tratamento da superfície. Apesar disso, as características apresentadas são extremamente motivadoras.

A Tabela 17 apresenta os dados médios e desvios padrões dos parâmetros da bancada para os ensaios. A Figura 62 apresenta a massa de condensado coletado para a superfície com o tratamento de plasma corona.

Tabela 17: Parâmetros da bancada para AI+PC-Lixa 600

Amostra	$T_{sup}(^{\circ}C)$		$T_{amb}(^{\circ}C)$		$\phi(\%)$	
	M	DP	M	DP	M	DP
Lixa 600	10,24	0,09	50,21	0,25	80,94	2,08

Estes resultados são comparados com as superfícies de aço inoxidável e com as cobertas por nanotubos de carbono na Subseção 5.2.5 e a Figura 63 apresenta os valores obtidos para o fluxo de calor através do fluxímetro (real que atravessa a superfície) e por meio do balanço de calor. Estes dados são comparados com os dados para as outras amostras estudadas na próxima subseção.

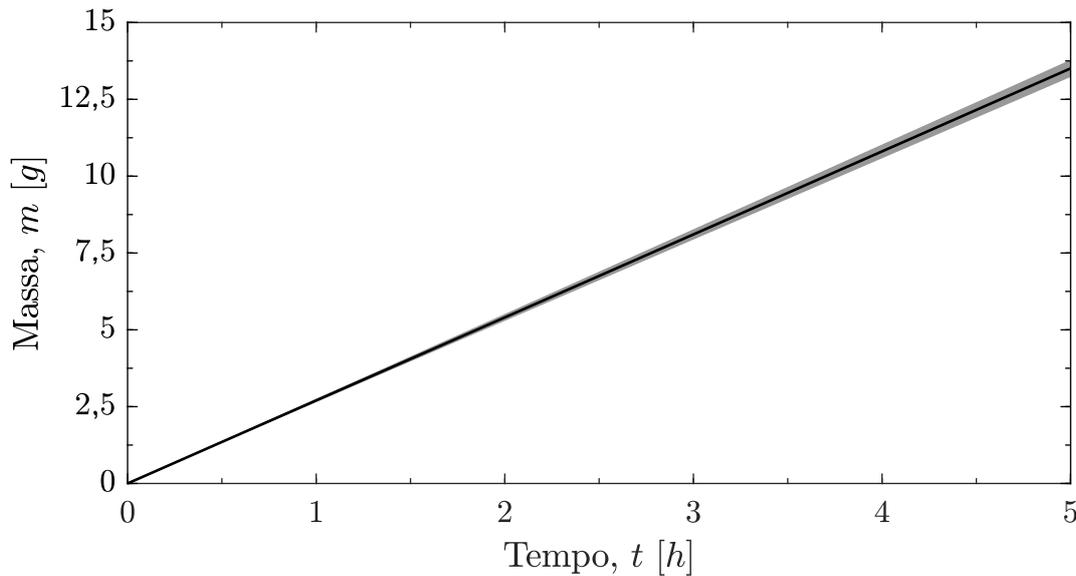


Figura 62: Condensação para AI com tratamento com plasma corona com R-134a.

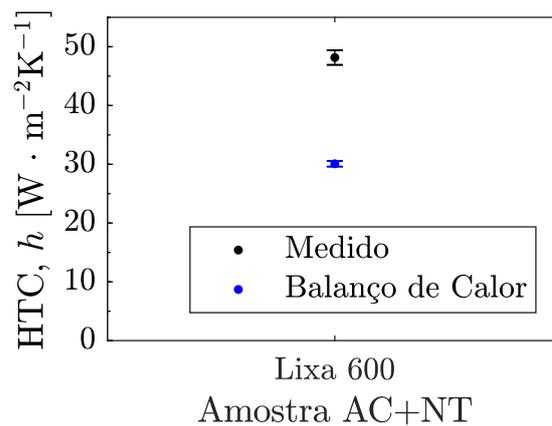


Figura 63: HTC para AI com tratamento com plasma corona com R-134a.

5.2.5 COMPARATIVO ENTRE OS DESTAQUES DE CADA PADRÃO AVALIADO

De modo a finalizar este capítulo, são apresentados nesta última subseção os dados extremos para cada tratamento e a sua comparação, podendo-se definir quais das superfícies estudadas favorecem a taxa de condensação e a transferência de calor.

A Figura 64 apresenta a taxa de condensação para as amostras definidas. Por meio da figura é possível averiguar que as três melhores superfícies de cada padrão (AI, NT e PC) possuem aproximadamente a mesma taxa de condensação quando se consideram os desvios padrões. Portanto, novos testes devem ser realizados para maior base de dados e comparação, focando-se nas amostras com características promissoras do ponto de vista de geração de condensado.

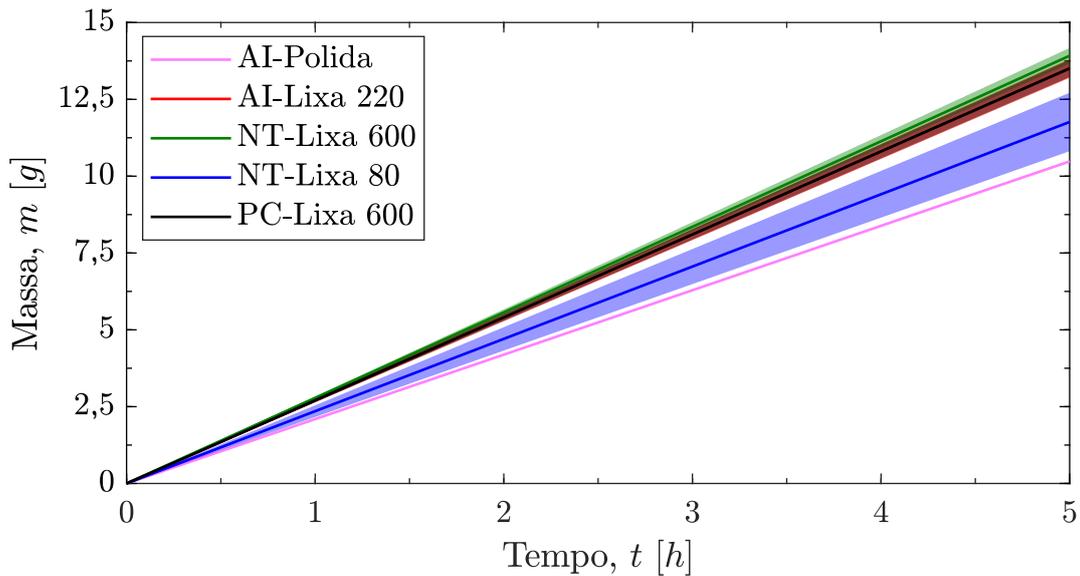


Figura 64: Comparativo entre os extremos para cada padrão avaliado.

A Figura 65 apresenta os fluxos de calor para essas mesmas amostras. Pode-se confirmar, com base na figura que os valores do HTC para todos os ensaios, com mesma configuração da bancada (referência), possuem o mesmo coeficiente de transferência de calor, não apresentando diferença significativa entre as amostras. Isto se dá pois a variação da massa coletada não é grande o suficiente de modo a gerar variação significativa no coeficiente de transferência de calor.

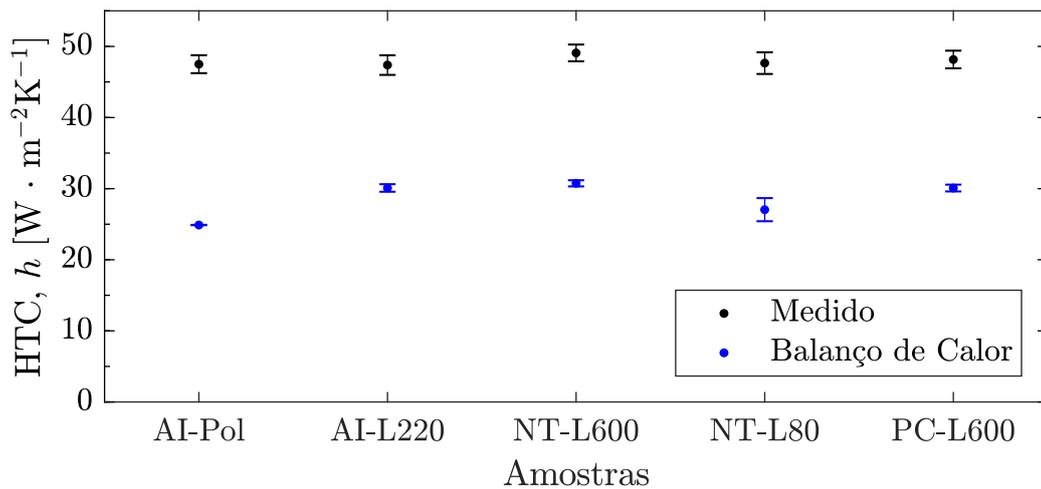


Figura 65: HTC comparativo entre os extremos para cada padrão avaliado.

De modo a complementar os resultados apresentam-se nas Figuras 66, 67 e 68 imagens da condensação para intervalos de tempos similares. Na Figura 66 está apresentada a condensação para a amostra de aço inoxidável com acabamento de lixa 220, onde se observa a condensação em gotas. Na Figura 67 está apresentada a

condensação na amostra com revestimento de nanotubos de carbono. Para a amostra com nanotubos de carbono assim que fixada (0) nota-se pequenas marcas nas regiões laterais, causada pelo método de fixação, outro ponto interessante é que apesar de apresentar altos ângulos de contato estáticos, todos os ensaios com este revestimento apresentaram a formação de uma película de líquido, causada pelo fato de possuir ângulo de recuo extremamente baixo. Na Figura 68 está apresentada a condensação na amostra tratada com plasma corona na presença de R-134a. Um aspecto importante é a degradação presente na superfície tratada, onde do instante 0 até o início das demais imagens (já em regime permanente) percebe-se alta degradação. Mais testes e novos padrões de tratamento devem ser realizados para reduzir significativamente o efeito desta.

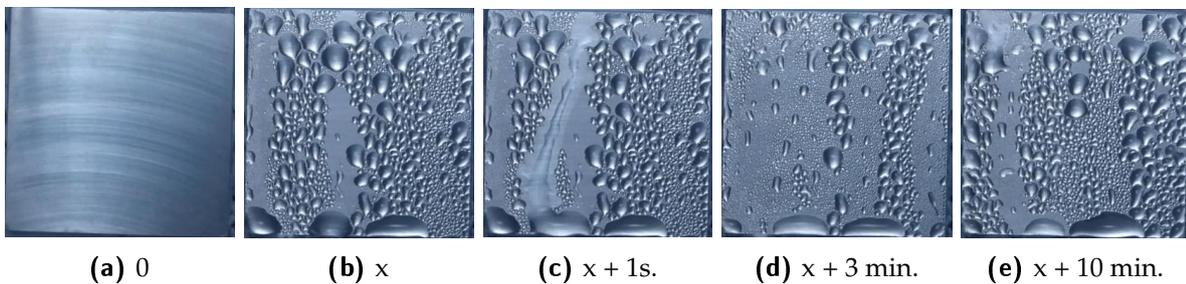


Figura 66: Aço inoxidável - Lixa 220.

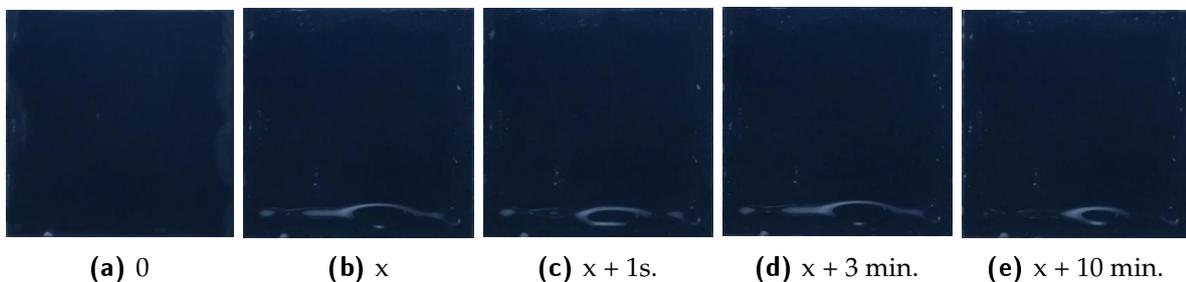


Figura 67: AC + Nanotubos de carbono - Lixa 600.

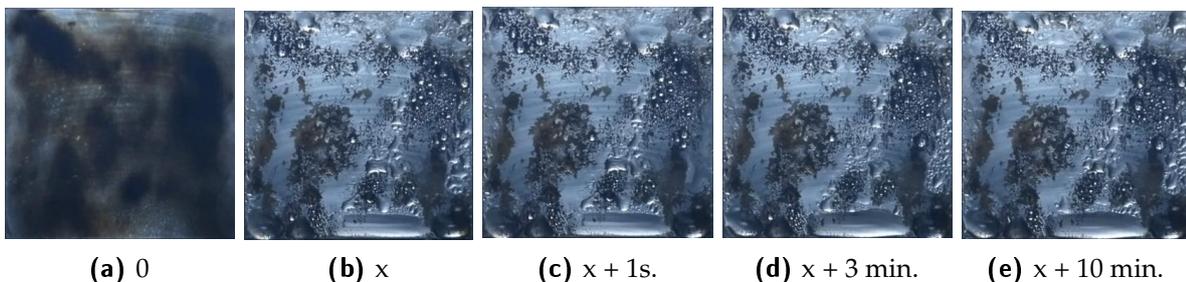


Figura 68: AI + Plasma corona com R-134a - Lixa 600.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho busca através de estudo experimental avaliar tratamentos de superfície para uso na transferência da calor por condensação. Para tal, se desenvolveu e montou uma bancada de ensaios, onde, se faz o controle das variáveis, sendo: temperatura ambiente, de superfície e umidade relativa. A bancada reporta uma série de dados para entendimento e discussão da condensação, como a temperatura ambiente e de superfície, umidade relativa, fluxo de calor através da superfície e massa de condensado gerada. Para que os resultados obtidos pela bancada tenham validade, fez-se análise de incertezas e avaliação da repetibilidade dos resultados, garantindo assim, que os resultados experimentais adquiridos são corretos.

Realizaram-se ensaios com três diferentes padrões, todos produzidos e caracterizados nas instalações do Laboratório de Materiais (LabMat). Superfícies de aço inoxidável AISI-316L com diferentes acabamentos de superfície, superfícies revestidas com nanotubos de carbono utilizando como substrato aço carbono 1006, também com diferentes acabamentos de superfície, e uma superfície de aço inoxidável com tratamento de plasma corona na presença de gás de R-134a ($C_2H_2F_4$).

Para a caracterização da superfície realizaram-se medições dos ângulos de contato estático e dinâmico (avanço e recuo) e análise topográfica, quantitativa e qualitativa. Quantificando-se os aspectos rugosos através da interferometria óptica e avaliando-se qualitativamente por imagens de alta aproximação utilizando como ferramenta o Microscópio Eletrônico de Varredura.

Para as amostras de aço inoxidável com diferentes acabamentos de superfície averiguou-se que o polimento aumenta a molhabilidade (diminui os ângulos de contato). Como esperado, quanto mais polida a amostra, menores os parâmetros de rugosidades obtidos pelo interferômetro óptico. Isto é verificado também quando examinado as imagens produzidas no MEV.

As informações obtidas através da bancada de condensação, mostram que, quando os parâmetros da bancada foram variados, obtiveram-se ganhos na taxa de massa coletada e no coeficiente de transferência de calor. Ambos aumentam com a queda na temperatura de superfície, aumento da temperatura ambiente e aumento da umidade relativa.

Na análise da taxa de massa coletada na condensação para as superfícies de aço inoxidável, acredita-se existirem dois fatores determinantes: a rugosidade da superfície e a direcionalidade, causada pelo método de produção. Sendo observadas as maiores taxas de massa coletada para acabamento de superfície com lixa 220 e menor para a polida. Devido ao alto poder de adesão das amostras com nanotubos de carbono,

verifica-se que quanto maior a área real da superfície menor é a taxa de condensado gerado, apresentando dispersão para a amostra com lixa 1200. Ou seja, a amostra que gerou mais condensado foi com acabamento de superfície com lixa 600 e menor com lixa 220. Por fim, comparando-se as superfícies, as que obtiveram melhor desempenho na coleta de massa foram: a superfície de aço inoxidável-Lixa220, de nanotubos de carbono-Lixa600 e de plasma corona-Lixa 600, que apresentam uma taxa equivalente entre elas. Dentre todas as amostras analisadas, a com pior desempenho foi a superfície de AI-Polida.

Quando avaliado os coeficientes de transferência de calor através das superfícies, observa-se que independente do experimento este é constante, não foi observado variação de uma superfície para outra. Isso se dá pelo fato de que a diferença entre as massas coletadas é pequena, não gerando variação significativa no HTC. Por fim, a diferença entre os valores obtidos experimentalmente e o baseado na equação se dá pela evaporação de massa enquanto ainda sobre a superfície, gerando perda de massa de condensado. Não quantificada a perda de massa neste trabalho devido à complexidade.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pode-se elencar como sugestões para trabalhos futuros as seguintes:

- Avaliar aplicação do tratamento com plasma corona em diferentes rugosidades para verificar fixação;
- Dar enfoque nas superfícies com características específicas (duas ou três);
- Produzir e testar mais superfícies com o mesmo padrão (mínimo de três por padrão, reprodutibilidade);
- Avaliar novos tratamentos de superfície;
- Garantir reprodutibilidade dos tratamentos;
- Avaliar superfícies híbridas com nanotubos de carbono e tratamento corona;
- Avaliar e quantificar a evaporação de condensado na superfície (antes de coletado);
- Avaliar utilização das imagens e predição de HTC e taxa de massa condensada;

REFERÊNCIAS

- AL-DIWANY, H.; ROSE, J. Free convection film condensation of steam in the presence of non-condensing gases. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 16, n. 7, p. 1359–1369, 1973.
- AL-SHAMMARI, S.; WEBB, D.; HEGGS, P. Condensation of steam with and without the presence of non-condensable gases in a vertical tube. *Desalination*, Elsevier, v. 169, n. 2, p. 151–160, 2004.
- BEJAN, A.; KRAUS, A. D. *Heat transfer handbook*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003.
- BERGMAN, T. L. et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- CARCIOFI, B.; GÜTHS, S.; LAURINDO, J. Uso de transdutores de fluxo de calor no estudo da transferência de calor em alimentos embalados. *Ciênc. Tecnol. Aliment*, SciELO Brasil, v. 22, n. 3, p. 314–318, 2002.
- CAREY, V. P. *Liquid-vapor Phase-change Phenomena: An Introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfert Equipment*. [S.l.]: Hemisphere publishing corporation, 1992.
- CASSIE, A.; BAXTER, S. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday society*, Royal Society of Chemistry, v. 40, p. 546–551, 1944.
- ÇENGEL, Y. A. et al. *Termodinâmica*. [S.l.]: McGraw-Hill São Paulo, 2006.
- CENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. *Tranferência de Calor e Massa*. [S.l.]: Amgh Editora, 2009.
- CHATTERJEE, A. et al. Condensation heat transfer on patterned surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 66, p. 889–897, 2013.
- COLLIER, J. G.; THOME, J. R. *Convective boiling and condensation*. [S.l.]: Clarendon Press, 1994.
- EUCKEN, A. v. Energie-und stoffaustausch an grenzflächen. *Naturwissenschaften*, Springer, v. 25, n. 14, p. 209–218, 1937.
- GHOSH, A. et al. Enhancing dropwise condensation through bioinspired wettability patterning. *Langmuir*, ACS Publications, v. 30, n. 43, p. 13103–13115, 2014.
- GOULD, R. F. *Contact Angle, Wettability and Adhesion*. [S.l.]: American Chemical Society, 1964.
- GROOTEN, M.; GELD, C. Van der. Surface property effects on dropwise condensation heat transfer from flowing air-steam mixtures to promote drainage. *International Journal of Thermal Sciences*, Elsevier, v. 54, p. 220–229, 2012.
- GüTHS, S. *Análise de Incerteza*. [S.l.]: Material de aula da Disciplina: Experimentos e Ciências Térmicas, oferecida na pós graduação em Engenharia Mecânica - UFSC, 2017.

- HARAGUCHI, T. et al. The effect of polyvinylidene chloride coating thickness on promotion of dropwise steam condensation. *International journal of heat and mass transfer*, Elsevier, v. 34, n. 12, p. 3047–3054, 1991.
- HASANEIN, H.; KAZIMI, M.; GOLAY, M. Forced convection in-tube steam condensation in the presence of noncondensable gases. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 39, n. 13, p. 2625–2639, 1996.
- HOLDEN, K. et al. The use of organic coatings to promote dropwise condensation of steam. *Journal of heat transfer*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 109, n. 3, p. 768–774, 1987.
- HUANG, J.; ZHANG, J.; WANG, L. Review of vapor condensation heat and mass transfer in the presence of non-condensable gas. *Applied thermal engineering*, Elsevier, v. 89, p. 469–484, 2015.
- HUHTINIEMI, I. K.; CORRADINI, M. L. Condensation in the presence of noncondensable gases. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 141, n. 3, p. 429–446, 1993.
- HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2017.
- INMETRO. *Guia para expressão de incerteza de medição GUM 2008*. 2008. Available from: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/gum_final.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2020.
- ISACHENKO, V. Mechanism and criterial equations of heat transfer in condensation of steam in drops. *Teploenergetika*, v. 9, n. 9, p. 81–85, 1962.
- JAKOB, M. Film rupture theory of dropwise condensation. *Mech. Eng*, v. 58, p. 729, 1936.
- KANDLIKAR, S. G.; SHOJI, M.; DHIR, V. K. *Handbook of phase change: Boiling and condensation*. [S.l.: s.n.], 1999.
- KRÜSS. *Contact Angle - education theory*. 2019. <https://www.kruss-scientific.com/services/education-theory/glossary/contact-angle/>. Acesso em: 27 Mar. 2018.
- KUHN, S.; SCHROCK, V.; PETERSON, P. An investigation of condensation from steam–gas mixtures flowing downward inside a vertical tube. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 177, n. 1-3, p. 53–69, 1997.
- LAW, K.-Y.; ZHAO, H. *Surface wetting: characterization, contact angle, and fundamentals*. [S.l.]: Springer Switzerland, 2016.
- LEACH, R. *Fundamental principles of engineering nanometrology*. [S.l.]: Elsevier, 2014.
- LEE, Y.-A. et al. Orientation effects of nanoparticle-modified surfaces with interlaced wettability on condensation heat transfer. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 98, p. 1054–1060, 2016.
- LEU, T.-S.; LIN, H.-W.; WU, T.-H. Enhancement of phase change heat transfer by using surface energy patterning techniques. In: IEEE. *2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. [S.l.], 2006. p. 994–998.

- LOPES, S. A. et al. Propriedades de superfície introduzidas por plasma de rádio frequência (rf), descarga corona e spin-coating nos polímeros= pvdf, pdms e kapton= surface properties introduced by radio frequency (rf) plasma, corona discharge and spin-coating in polymers: Pvdf, pdms and kapton. 2017.
- MA, X. et al. Influence of processing conditions of polymer film on dropwise condensation heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 45, n. 16, p. 3405–3411, 2002.
- MA, X.-h. Condensation heat transfer of steam on vertical dropwise and filmwise coexisting surfaces with a thick organic film promoting dropwise mode. *Experimental heat transfer*, Taylor & Francis, v. 16, n. 4, p. 239–253, 2003.
- MA, X.-H. et al. Condensation heat transfer enhancement in the presence of non-condensable gas using the interfacial effect of dropwise condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 51, n. 7-8, p. 1728–1737, 2008.
- MAHAPATRA, P. S. et al. Key design and operating parameters for enhancing dropwise condensation through wettability patterning. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 92, p. 877–883, 2016.
- MARTO, P. et al. Evaluation of organic coatings for the promotion of dropwise condensation of steam. *International journal of heat and mass transfer*, Elsevier, v. 29, n. 8, p. 1109–1117, 1986.
- MERTE, J. H. Condensation heat transfer. *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, v. 9, p. 181–268, 1973.
- MIN, J.; WEBB, R. L. Condensate formation and drainage on typical fin materials. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier, v. 25, n. 3-4, p. 101–111, 2001.
- MITTAL, K. L. *Advances in contact angle, wettability and adhesion*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.
- NICOLA, F. D. et al. Super-hydrophobic multi-walled carbon nanotube coatings for stainless steel. *Nanotechnology*, IOP Publishing, v. 26, n. 14, p. 145701, 2015.
- NUSSELT, W. Die oberflächenkondensation des wasserdampfes. *VDI-Zs*, v. 60, p. 541, 1916.
- OESTREICH, J. et al. Experimental condensation study of vertical superhydrophobic surfaces assisted by hydrophilic constructal-like patterns. *International Journal of Thermal Sciences*, Elsevier, v. 135, p. 319–330, 2019.
- OESTREICH, J. L. Estudo da condensação em convecção natural de superfícies híbridas (superhidrofóbicas e hidrofílicas). *Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica*, Florianópolis, 2017.
- OH, S.; REVANKAR, S. T. Experimental and theoretical investigation of film condensation with noncondensable gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 49, n. 15-16, p. 2523–2534, 2006.

- OLIVEIRA, M. R. d. S. *Superfícies super-hidrofóbicas obtidas através de microestruturas litografadas*. Dissertation (Doctorate) — Universidade de São Paulo, 2011.
- OREJON, D. et al. Simultaneous dropwise and filmwise condensation on hydrophilic microstructured surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 114, p. 187–197, 2017.
- PAVANATI, H. C. et al. *Sinterização de ferro puro com enriquecimento superficial simultâneo de cromo em descarga elétrica em regime anormal*. Dissertation (Doctorate) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- PENG, B. et al. Analysis of condensation heat transfer enhancement with dropwise-filmwise hybrid surface: Droplet sizes effect. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 77, p. 785–794, 2014.
- PENG, B. et al. Experimental investigation on steam condensation heat transfer enhancement with vertically patterned hydrophobic–hydrophilic hybrid surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 83, p. 27–38, 2015.
- PETERSON, A. C. *Dropwise condensation of ethylene glycol*. Dissertation (Doctorate) — University of Illinois at Urbana-Champaign, 1966.
- PIGOSSO, T. *SÍNTESE DE NANOTUBOS DE CARBONO VIA DEPOSIÇÃO QUÍMICA A VAPOR ASSISTIDA POR PLASMA EM SUPERFÍCIES CATALÍTICAS DE AÇO AISI 1005 ENRIQUECIDAS COM MO*. 72 p. — Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- ROHSENOW, W. Effect of vapor velocity on laminar and turbulent film condensation. *Transactions of ASME*, p. 1645–1648, 1956.
- ROSE, J. Dropwise condensation theory and experiment: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 216, n. 2, p. 115–128, 2002.
- SPARROW, E.; ECKERT, E. Effects of superheated vapor and noncondensable gases on laminar film condensation. *AIChE Journal*, Wiley Online Library, v. 7, n. 3, p. 473–477, 1961.
- STEPHAN, K. *Heat transfer in condensation and boiling*. [S.l.]: Springer, 1992.
- TANNER, D. et al. Heat transfer in dropwise condensation—part i the effects of heat flux, steam velocity and non-condensable gas concentration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 419–426, 1965.
- TESCAN ANALYTICS. *TESCAN - VEGA3 - W source, EDX*. 2019. <https://www.tescan-analytics.com/en-us/analyse-de-surface/equipements/meb>. Acesso em: 20 Dec. 2019.
- THOMAS, T. R. *Rough surfaces*. [S.l.]: Imperial Coll., 1999.
- VARANASI, K. K. et al. Spatial control in the heterogeneous nucleation of water. *Applied Physics Letters*, AIP, v. 95, n. 9, p. 094101, 2009.

WENZEL, R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*, ACS Publications, v. 28, n. 8, p. 988–994, 1936.

WU, X. et al. Approximate equations for film condensation in the presence of non-condensable gases. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 85, p. 124–130, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os métodos utilizados e os resultados obtidos na calibração das termorresistências PT-100 e do transdutor de fluxo de calor. Os demais equipamentos e componentes utilizados na bancada não seguiram qualquer método de calibração por parte do autor, considerando-se, as incertezas descritas pelos fabricantes.

A.0.1 TERMORESISTÊNCIA PT-100

A calibração das termorresistências PT-100 foram realizadas utilizando uma fonte de calibração modelo CL134, da marca Ômega, considerando-se como temperatura de referência a apresentada pelo equipamento, que possui incerteza de 0,1 °C para o intervalo de temperatura de 0 °C a 537 °C.

Foram coletados dados durante o período de dez minutos com intervalo de coleta de cinco em cinco segundos, adquirindo-se um total de cento e vinte pontos por patamar de temperatura. O intervalo de temperatura medido na calibração foi selecionado de acordo com a funcionalidade de cada termorresistência PT-100 na bancada. Para os sensores localizados no bloco de cobre da seção de testes selecionou-se o intervalo de 0 °C a 20 °C, calibrou-se três sensores neste intervalo, dois para medição da temperatura de superfície e um extra. As demais termorresistências PT-100 foram calibradas no intervalo de 30 °C a 70 °C, sendo um total de 7 sensores, 5 para medição da temperatura interna e dois extras. É importante comentar que um dos extras é utilizado para medir a temperatura da sala, mesmo não calibrado neste intervalo. Para toda a calibração variou-se em intervalos de 5 °C.

A Equação A.1 apresenta a precisão dos PT-100, segundo a fabricante é válida para o intervalo de 0 °C à 150 °C.

$$\text{Incerteza} = \pm(0,1 + 0,0017 \cdot T) \quad (\text{A.1})$$

onde T é a temperatura em °C.

As Tabelas 18 e 19 apresentam os valores de temperatura obtidos após a correção de calibração para os PT-100 do sistema de resfriamento e dos demais, respectivamente, juntamente com a precisão calculada através da Equação A.1.

Tabela 18: Valores de temperatura calibrados em °C, PT-100 do sistema de resfriamento.

T_{ref}	107	108	109	Incerteza
0,00	-0,06	0,01	-0,03	$\pm 0,10$
5,00	5,03	4,98	5,00	$\pm 0,11$
10,00	10,00	9,95	9,99	$\pm 0,12$
15,00	15,16	15,13	15,13	$\pm 0,13$
20,00	19,87	19,93	19,90	$\pm 0,13$

Tabela 19: Valores de temperatura calibrados em °C, demais PT-100.

T_{ref}	101	102	103	104	105	106	110	Incerteza
30,00	29,61	29,89	29,74	29,42	29,19	29,30	29,32	$\pm 0,15$
35,00	35,22	35,08	35,19	35,30	35,50	35,41	35,57	$\pm 0,16$
40,00	40,87	40,32	40,70	41,24	41,87	41,59	41,85	$\pm 0,17$
45,00	44,86	45,06	44,79	44,79	44,50	44,63	44,27	$\pm 0,18$
50,00	49,81	49,93	49,79	49,77	49,57	49,65	49,42	$\pm 0,19$
55,00	54,57	54,66	54,67	54,47	54,35	54,40	54,40	$\pm 0,19$
60,00	59,71	59,76	59,81	59,63	59,56	59,59	59,65	$\pm 0,20$
65,00	64,97	64,98	65,01	64,94	64,94	64,94	65,02	$\pm 0,21$
70,00	70,37	70,33	70,31	70,44	70,52	70,49	70,51	$\pm 0,22$

A.0.2 FLUXÍMETRO

A calibração do transdutor de fluxo de calor é feita por meio da utilização de uma resistência elétrica (de filme, *skin heater*) fixada termicamente a uma das faces do fluxímetro. A outra face do fluxímetro está conectada a um bloco de cobre, com dimensão muito superior ao fluxímetro, de modo a tornar a temperatura constante para evitar fugas de calor pelas extremidades. O bloco de cobre é resfriado por duas ventoinhas. Sobre o conjunto placa de cobre-fluxímetro-resistência existe uma camada de isolante térmico (poliestireno) e acima do isolante térmico outra placa servindo de peso. Todos os contatos térmicos foram realizados com fina camada de pasta térmica 201 da marca Omega, com exceção do contato entre a resistência e o isolante. Nesta configuração, todo o calor gerado na resistência passa pelo fluxímetro. A Figura 69a apresenta o modo em que foi realizada a calibração (montado, com todas as conexões) e a Figura 69b apresenta em vista explodida, demonstrando os detalhes de montagem.

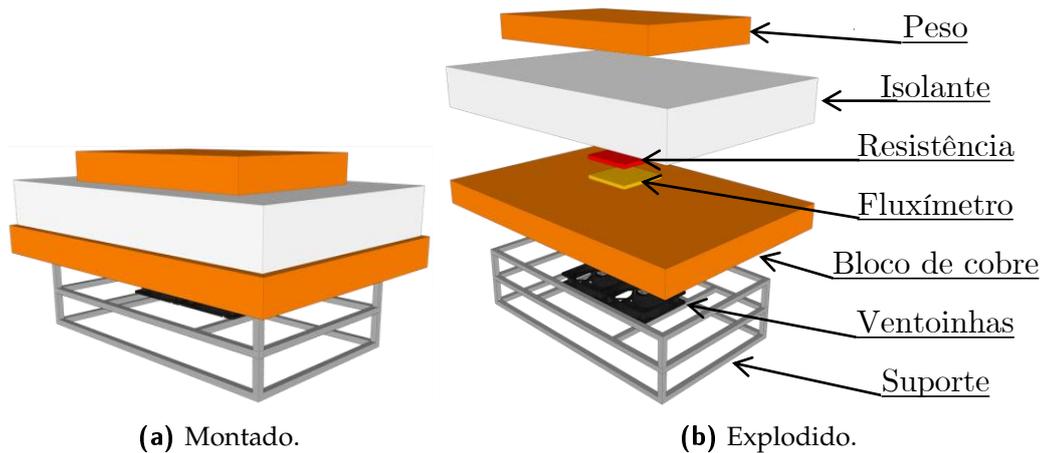


Figura 69: Calibração Fluxímetro.

Foram utilizadas diferentes tensões de alimentação para a resistência, gerando assim, diferentes potenciais elétricos e, por consequência, diferentes fluxos de calor. De maneira a chegar ao regime permanente, esperou-se que as medidas se estabilizassem, coletando-se posteriormente os dados de tensão do fluxímetro. A Figura 70 apresenta a relação entre a tensão medida no fluxímetro e o fluxo real imposto pela resistência, onde os pontos são os valores obtidos e a linearidade representa a medição do fluxo de calor através da correlação aplicada. A Equação A.2 representa a potência de alimentação da resistência e a Equação A.3 apresenta o fluxo de calor real, de onde foram obtidos os pontos da Figura 70.

$$P = V \cdot I \quad (\text{A.2})$$

$$q''_{\text{real}} = \frac{P}{A} \quad (\text{A.3})$$

onde P é a potência, V é a tensão de alimentação, I é a corrente de alimentação, q''_{real} é o fluxo de calor real e A é a área do fluxímetro.

A curva de conversão da tensão medida em fluxo de calor que representa a linearidade apresentada no gráfico é representada pela Equação A.4.

$$q'' = 496765,311325 \cdot V_{\text{flux}} + 0,5802056 \quad (\text{A.4})$$

onde q'' é o fluxo de calor e V_{flux} é a tensão elétrica medida no fluxímetro em Volts. Para o gráfico a linearização apresenta coeficiente de determinação, R^2 , de 0,999993.

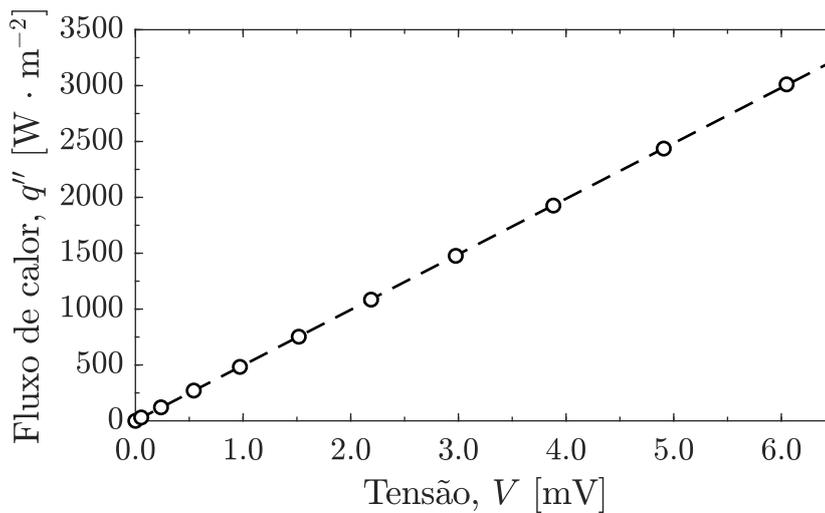


Figura 70: Curva de calibração do fluxímetro.

A.1 DADOS BRUTOS DA CALIBRAÇÃO DOS PT-100

Neste capítulo, estão apresentados os valores brutos obtidos pela calibração das termorresistências PT-100.

Nas Tabelas 20 e 21 estão apresentados os valores brutos das temperaturas para os sensores da superfície e para os demais sensores, respectivamente.

Tabela 20: Valores de temperatura calibrados em °C, PT-100 do sistema de resfriamento.

T_{ref}	107	108	109
0,00	2,61	1,87	1,34
5,00	7,17	6,46	6,08
10,00	11,63	11,05	10,78
15,00	16,25	15,84	15,63
20,00	20,48	20,27	20,13

Tabela 21: Valores de temperatura calibrados em °C, demais PT-100.

T_{ref}	101	102	103	104	105	106	110
30,00	28,51	28,38	28,76	28,32	28,39	28,37	29,34
35,00	32,48	32,22	32,92	32,08	32,26	32,26	33,84
40,00	36,48	36,11	37,11	35,88	36,17	36,18	38,36
45,00	39,30	39,62	40,22	38,15	37,79	38,11	40,10
50,00	42,80	43,23	44,03	41,33	40,90	41,31	43,81
55,00	46,17	46,74	47,75	44,34	43,84	44,33	47,39
60,00	49,81	50,52	51,66	47,64	47,03	47,63	51,17
65,00	53,53	54,39	55,62	51,03	50,34	51,03	55,04
70,00	57,35	58,36	59,66	54,55	53,76	54,56	58,99

A Equação A.5 apresenta a correção para os valores obtidos com relação aos medidos.

$$T_{\text{corrigida}} = A \cdot T_{\text{med}} + B \quad (\text{A.5})$$

Nas Tabelas 22 e 23 estão apresentados os índices A e B para os sensores da superfície e os demais sensores, apresentando também o R^2 .

Tabela 22: Índices de correção, PT-100 do sistema de resfriamento.

Sensor	A	B	R^2
107	1,1155	-2,9703	0,9997
108	1,0827	-2,0185	0,9995
109	1,0607	-1,4463	0,9991

Tabela 23: Índices de correção, demais PT-100.

Sensor	A	B	R^2
101	1,4135	-10,6901	0,9986
102	1,3488	-8,3794	0,9960
103	1,3130	-8,0252	0,9993
104	1,5640	-14,8802	0,9977
105	1,6288	-17,0515	0,9986
106	1,5732	-15,3337	0,9986
110	1,3893	-11,4436	0,9985

A Figura 71 apresenta a curva para a termorresistência 102 (TR 102), apresentando as linearizações e os pontos medidos e os após a correção através da equação apresentada. É válido lembrar que os valores corrigidos para todos os sensores de temperatura foram apresentados no Apêndice A.0.1.

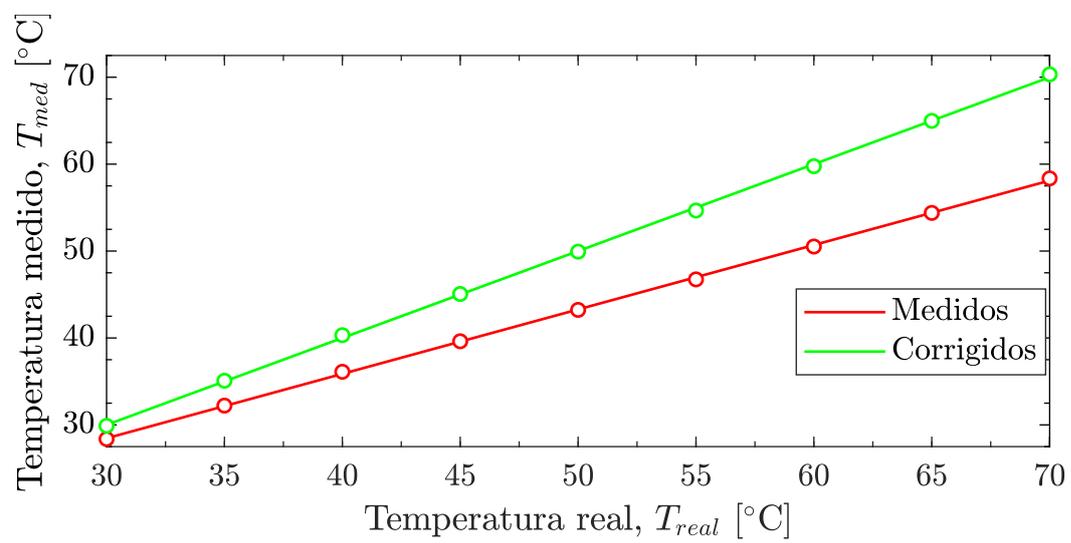


Figura 71: Comparativo de temperatura medida e após correção TR 102.

APÊNDICE B – INCERTEZAS

O cálculo das incertezas segue a metodologia desenvolvida por Güths (2017), utilizando como base para INMETRO (2008). Para cálculo da incerteza expandida segue-se o seguinte procedimento:

Calcula-se a incerteza associada a medição, TIPO A e a incerteza associadas aos instrumentos utilizados na calibração, TIPO B. Para se calcular a Incerteza do tipo A (I_A) utiliza-se o seguinte equacionamento:

$$I_A = \frac{Desv.Pad.}{\sqrt{n}} \quad (B.1)$$

onde *Desv.Pad.* é o desvio padrão das medições e *n* é o número de medições. No cálculo da incerteza do tipo B (I_B) utiliza-se o seguinte equacionamento:

$$I_B = \frac{I_{fab}}{k} \quad (B.2)$$

onde I_{fab} é a incerteza da fonte utilizada (descrita pelo fabricante) e k é o fator de abrangência, para distribuição normal $k=2$, .

Para se obter a incerteza combinada (I_C) faz-se:

$$I_C = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \quad (B.3)$$

e, por fim, para se obter a incerteza expandida (I_{exp}), faz-se:

$$I_{exp} = I_C \cdot k \quad (B.4)$$

B.1 FLUXÍMETRO

A partir da metodologia apresentada calculou-se a incerteza para cada ponto utilizado na calibração do fluxímetro. Para o cálculo da incerteza do tipo B, proveniente da fonte utilizada de alimentação para resistência em filme, seguiu-se o procedimento:

1. Calcular incerteza na medição da tensão

$$Incerteza_{tensão} = 0,01\% + 3mV \quad (B.5)$$

2. Calcular incerteza na medição da corrente

$$Incerteza_{corrente} = 0,01\% + 3mA \quad (B.6)$$

3. Calcular por efeito Joule o Fluxo de calor

$$q'' = \frac{V \cdot I}{A} \quad (\text{B.7})$$

4. Calcular o Fluxo de calor com a incerteza

$$q''_{\text{incerto}} = \frac{(V + \text{Incerteza}_{\text{tensão}}) \cdot (I + \text{Incerteza}_{\text{corrente}})}{A} \quad (\text{B.8})$$

5. Calcular a incerteza no Fluxo de calor

$$\text{Incerteza}_{\text{fluxo}} [\text{W/m}^2] = q''_{\text{incerto}} - q'' \quad (\text{B.9})$$

6. Calcular a incerteza no Fluxo de calor em %

$$\text{Incerteza}_{\text{fluxo}} [\%] = I_B = \frac{\text{Incerteza}_{\text{fluxo}} [\text{W/m}^2]}{q'' [\text{W/m}^2]} \cdot 100 \quad (\text{B.10})$$

Sendo apresentado as incertezas calculadas na Tabela 24 em termos de porcentagem e absolutos.

Tabela 24: Incertezas na medição do fluxo de calor através do fluxímetro.

I_A [%]	I_B [%]	I_C [%]	I_{exp} [%]	q'' [W/m^2]	I_{exp} [W/m^2]
0,073	2,982	2,983	5,965	30,24	1,80
0,022	1,511	1,511	3,023	120,86	3,65
0,009	1,015	1,015	2,030	270,91	5,50
0,005	0,762	0,762	1,523	482,94	7,36
0,006	0,611	0,611	1,223	753,05	9,21
0,002	0,510	0,510	1,020	1084,77	11,07
0,002	0,438	0,438	0,875	1476,43	12,92
0,001	0,384	0,384	0,767	1926,36	14,78
0,001	0,342	0,342	0,683	2436,58	16,65
0,001	0,307	0,307	0,615	3011,02	18,51

B.2 TERMORRESISTÊNCIAS PT-100

Para calculo das incertezas nas termorresistências PT-100 seguiu-se o mesmo procedimento já apresentado. A incerteza para a fonte de calibração utilizada (I_{fab}) é de 0,1 °C. As Tabelas 25 e 26 apresentam as incertezas nas medições das temperaturas em °C.

Tabela 25: Incertezas na medição de temperatura na seção de testes.

Temperatura [°C]	I_A [°C]	I_B [°C]	I_C [°C]	I_{exp} [°C]
0	0,002	0,050	0,050	0,100
5	0,004	0,050	0,050	0,100
10	0,007	0,050	0,050	0,101
15	0,005	0,050	0,051	0,101
20	0,005	0,050	0,050	0,101

Tabela 26: Incertezas na medição de temperatura ambiente.

Temperatura [°C]	I_A [°C]	I_B [°C]	I_C [°C]	I_{exp} [°C]
30	0,003	0,050	0,050	0,100
35	0,003	0,050	0,050	0,100
40	0,002	0,050	0,050	0,100
45	0,003	0,050	0,050	0,100
50	0,001	0,050	0,050	0,100
55	0,002	0,050	0,050	0,100
60	0,002	0,050	0,050	0,100
65	0,002	0,050	0,050	0,100
70	0,001	0,050	0,050	0,100

APÊNDICE C – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo estão descritos alguns procedimentos utilizados no decorrer deste trabalho.

C.1 ABRASÃO POR LIXA E POLIMENTO

Procedimento para acabamento de superfície:

1. Fixar lixa no suporte, ligar o ejetor de água e iniciar a rotação da lixa;
2. Fixar a superfície em suporte elaborado pelo autor, para facilitar o manuseio (ventosa);
3. Fazer o contato da superfície com a lixa, analisando o direcionamento da lixa e não movendo em quaisquer momentos a superfície;
4. Retirar e avaliar se a superfície está com todas as linhas de direcionamento no mesmo sentido;
5. Se estiver com a granulometria desejada, finalizar o procedimento com a limpeza. Senão, continua no procedimento;
6. Trocar a lixa para uma granulometria maior e fazer a rotação da superfície, conforme apresentado na Figura 27 (o ponto em vermelho representa a direcionalidade da superfície);
7. Fazer o processo de lixamento até que as marcas direcionais da lixa anterior desapareçam, de modo que restem apenas marcas de direcionamento da lixa atual;
8. Repetir o procedimento até que se atinja a granulometria desejada;

Para a superfície polida, após se atingir a lixa de granulometria de 1200 (grãos por cm^2) utiliza-se a politriz. No polimento, deixa-se de utilizar lixa, utilizando-se então pano de polimento e micropartículas para que ocorra abrasão da superfície (cada tamanho de micropartículas possui seu próprio pano de polimento). Após a lixa 1200, o polimento foi realizado com alumina de $0,3\ \mu\text{m}$ e posterior com alumina de $0,1\ \mu\text{m}$, definindo a superfície como polida após esse procedimento. No processo de polimento, a superfície é movimentada em rotações, não possuindo qualquer direcionamento.

C.2 TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS NA INTERFEROMETRIA ÓPTICA

Procedimento utilizado no software *MoutainsMap* para obtenção dos parâmetros rugosos:

1. Preencher os pontos faltantes com a média dos pontos vizinhos;
2. Nivelar a superfície pelo plano dos mínimos quadrados;
3. Remover ondulações aplicando filtro gaussiano;
4. Obter os parâmetros rugosos;
5. Adicionar ou remover parâmetros desejados pelo operador;
6. Gerar e editar imagens bi e tridimensionais da superfície;
7. Repetir para um novo pacote de dados (quadrante ou superfície).

C.3 ENSAIOS DE CONDENSAÇÃO

Os testes na bancada de condensação seguiram o procedimento explicado a seguir, subdividido em alguns passos, sendo: fixação da superfície, pré-experimentais, operacionais, pós-experimentais e conclusão.

Fixação da superfície: Assim que finalizada e pronta para iniciar os testes experimentais, a superfície é fixada no sistema de resfriamento com pasta térmica, que se encarrega do contato físico e térmico. Para cada superfície ou condição testada, foram realizados três testes, número suficiente para se obter os parâmetros estatísticos.

Pré-experimentais:

1. Abastecer com água deionizada o reservatório do gerador de vapor;
2. Anexar e instalar o sistema de coleta de condensado;
3. Ligar todo o aparato experimental: bancada, balança, fonte de tensão variável e DAQ;
4. Conferir operação dos sistemas de ventilação;
5. Definir os parâmetros experimentais: condição ambiente e ganhos do controlador PID.

Operacionais:

1. Ligar câmera para aquisição de imagem do regime transiente;

2. Após ser atingido o regime permanente, desligar câmera e recarregar a bateria;
3. Acompanhar visualmente o desenvolvimento e resposta do sistema no software de aquisição e controle;
4. Acompanhar frequentemente o sistema durante 12 h de testes (regime transiente de 7 horas + regime permanente de 5 horas);
5. Ligar novamente a câmera para coletar a última hora de teste.

- Pós-experimentais:**
1. Após o teste finalizado, desligar o aparato experimental;
 2. Retirar a massa de condensado gerado no reservatório;
 3. Secar a superfície com secador de cabelo comercial, modelo MAXX ion da marca TAIFF;
 4. Reiniciar o procedimento para um novo ensaio.

Conclusão: Após a finalização de três testes, a superfície é removida do sistema de resfriamento e realizada a limpeza da pasta térmica, deixando o sistema pronto para a fixação e reinicialização da experimentação para uma nova amostra.

Durante a execução dos testes é realizado o acompanhamento dos dados e, caso apresente disfunção ou falha operacional, o experimento é parado imediatamente, realizando os passos pós-experimentais e reiniciando um novo teste a partir dos pré-experimentais.

C.4 ENSAIOS DE EVAPORAÇÃO

O ensaio de evaporação foi elaborado seguindo o procedimento:

1. Ligar balança;
2. Fixar o sistema de coleta de condensado;
3. Ligar o restante do aparato experimental, com exceção da fonte de alimentação do sistema de resfriamento;
4. Checar o sistema de homogenização ambiente;
5. Fixar suporte para retirada do condensado gerado, com o cuidado para que não seja coletada a massa gerada na superfície;
6. Adicionar massa de água no reservatório (aproximadamente 20 g);
7. Fechar a porta da bancada;

8. Definir as condições ambientes (T_{amb} e ϕ), verificando se o sistema de resfriamento permanece desligado;
9. Iniciar o experimento pelos períodos apresentados anteriormente;
10. Repetir o procedimento para um novo teste.