

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

PATRICK WALTER RÜDIGER SCHEIDT

**ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E
DA SUPERFÍCIE DE TUBOS TROCADORES DE CALOR VERTICAIS QUE
ATUAM NO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO EM PELÍCULA DESCENDENTE**

FLORIANÓPOLIS

2023

PATRICK WALTER RÜDIGER SCHEIDT

**ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E
DA SUPERFÍCIE DE TUBOS TROCADORES DE CALOR VERTICAIS QUE
ATUAM NO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO EM PELÍCULA DESCENDENTE**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César Passos

Coorientador: M.e Arthur Kleyton Azevedo de Araújo

FLORIANÓPOLIS

2023

Scheidt, Patrick Walter Rüdiger

ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DA SUPERFÍCIE DE TUBOS TROCADORES DE CALOR VERTICAIS QUE ATUAM NO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO EM PELÍCULA DESCENDENTE / Patrick Walter Rüdiger Scheidt ; orientador, Júlio César Passos, coorientador, Arthur Kleyton Azevedo de Araújo, 2023.

75 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Evaporação em Película Descendente. 3. Transferência de Calor. 4. Superfície. 5. Tubos Verticais. I. Passos, Júlio César. II. de Araújo, Arthur Kleyton Azevedo . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. IV. Título.

PATRICK WALTER RÜDIGER SCHEIDT

**ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E
DA SUPERFÍCIE DE TUBOS TROCADORES DE CALOR VERTICAIS QUE
ATUAM NO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO EM PELÍCULA DESCENDENTE**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 12 de junho de 2023.

Prof. Cristiano Binder, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

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

Prof. Fernando Antônio Forcellini, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Tainan Daniel Andrioni
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Rafael Boschini A. Passarella
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho de conclusão de curso é dedicado à minha família, amigos e professores pelo suporte em todas as etapas da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, esposa Caroline, avô Ivo, avó Alice, mãe Penélope, padrasto Jean, madrinha Phyllis, tio Michel e *felis catus* Jorel por todo o amor, confiança e suporte.

Ao meu orientador Professor Dr. Júlio César Passos pela oportunidade, paciência, ensinamentos e auxílio durante a elaboração deste trabalho.

Ao meu co-orientador Eng. M.e. Arthur Kleyton pela amizade, suporte e todo conhecimento transmitido.

Aos colegas do Boiling, Eng. Rafael Passarella, Enga. Tayná Matos de Moraes, Felipe Emer, Rafael Máximo, Eng. Alexander Leyton, Eng. Dr. Victor Pigozzo, Enga. M.a. Thais Ferreira, Enga. M.a. Bruna Busson, Carlos Perin, Jessé Barbiaro e Gabriel Lese pelo acolhimento, trabalho em equipe e amizade.

Aos amigos que fiz ao longo do curso de Engenharia de Materiais, em especial Eng. Tainan Andrioni, Guilherme Pauelin, Victor Martins, Victor Luz, Eng. Thiago dos Santos, Eng. Eduardo Máximo, Eng. Matheus Cordeiro, Matheus Simas e Eng. Rafael Meurer, pela amizade, confiança e bons momentos.

Aos amigos que a vida me proporcionou desde cedo, em especial Victor Hugo, Caio Werneck e Gustavo Dias.

Aos amigos, parceiros de negócios e clientes que, de maneira online, durante e depois do auge pandêmico fizeram parte da minha trajetória. Nesse sentido, agradeço especialmente ao Felipe Cardoso pela amizade, parceria e ensinamentos.

RESUMO

Este trabalho buscou realizar uma análise experimental comparativa da transferência de calor e da superfície de tubos trocadores de calor verticais que atuam no processo de evaporação em película descendente. A partir da coleta e análise de dados realizada no grupo de pesquisa Boiling, do LEPTEN, buscou-se obter resultados de transferência de calor e da topografia de tubos com e sem modificação de superfície. Toda a metodologia utilizada nas etapas experimentais está descrita ao longo do trabalho. Um dos principais desafios abordados nesta seara foi o posicionamento e fixação dos termopares na parede interna dos tubos.

Apresentou-se dois tipos de resultados: térmicos e topográficos. Apesar dos resultados de transferência de calor obtidos para o tubo sem modificação possuírem caráter absurdo, os resultados da análise térmica do tubo ranhurado foram consistentes com pesquisas anteriores. Operando com um fluxo de cerca de 50.000 W/m^2 , observou-se que o coeficiente de transferência de calor foi menor com uma vazão de 200 L/h em comparação com 240 L/h. Operando em fluxos de calor menores, cerca de 12.000 e 29.000 W/m^2 , a troca de calor foi semelhante para ambas as vazões, com um leve aumento (cerca de 6%) para a vazão de 200 L/h no fluxo de 29.000 W/m^2 . Isso pode indicar um efeito isolante de uma película mais espessa. Foi observado que os parâmetros topográficos S_a , S_q e S_z na ranhura do tubo são aproximadamente quatro vezes maiores do que na parede lisa. Além disso, o volume dos motivos na ranhura é cerca de três vezes e meia maior do que na parede lisa.

Palavras-chave: Evaporação em Película Descendente. Transferência de Calor. Superfície. Tubos Verticais.

ABSTRACT

This study aimed to conduct a comparative experimental analysis of heat transfer and surface characteristics of vertical heat exchanger tubes operating in the falling film evaporation process. Through data collection and analysis conducted at the research group Boiling, in the LEPTEN laboratory, the goal was to obtain heat transfer and topography results of the tubes with and without surface modification. The entire methodology employed in the experimental stages is described throughout the study. One of the main challenges addressed in this stage was the positioning and fixation of the thermocouples on the inner wall of the tubes.

Although the heat transfer results obtained for the unmodified tube were absurd, the thermal analysis results of the grooved tube were consistent with previous research. In heat flux of approximately $50,000 \text{ W/m}^2$, it was observed that the heat transfer coefficient was lower with a flow rate of 200 L/h compared to 240 L/h. At lower heat flux, around $12,000$ and $29,000 \text{ W/m}^2$, heat exchange was similar for both flow rates, with a slight increase ($\sim 6\%$) for the 200 L/h flow rate. This may indicate an insulating effect of a thicker film. It was observed that the topographical parameters S_a , S_q , and S_z in the tube groove were approximately four times larger than in the non-modified part of the wall. Furthermore, the volume of features in the groove was about three and a half times larger than in the non-modified area.

Keywords: Falling Film Evaporation. Heat Transfer. Surface. Vertical Tube.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1a – Evaporador falling film, detalhe dos furos tubulares	21
Figura 1b – Vista lateral em transporte	21
Figura 1c – Vista lateral em transporte	21
Figura 2 – PCCS de usinas nucleares AP1000	22
Figura 3 – Modelo 3D do 3T/h MVR falling film evaporator	23
Figura 4 – Vista frontal do processo de FFE em tubos dispostos horizontalmente	24
Figura 5 – Modelo 3D da bancada de testes pioneira	25
Figura 6 – Seção de testes de pesquisa sobre FFE em tubo vertical	26
Figura 7 – Ranhuras incrementadas na superfície do tubo trocador de calor	27
Figura 8 – Representação esquemática da bancada de FFE	29
Figura 9 – Banho térmico da marca Microquímica, modelo MQBMP-01	31
Figura 10 – Reservatório principal e mangueira isolados com espuma elastomérica	31
Figura 11a – Reservatório de coleta	32
Figura 11b – Reservatório de coleta	32
Figura 12 – Visualização externa da seção de testes	33
Figura 13 – Tubo de aço inox AISI 304 sem ranhuras	34
Figura 14 – Tubo de aço inox AISI 304 com ranhuras	34
Figura 15 – Resistência utilizada na seção de testes	34
Figura 16 – Pasta térmica Ice Fusion V2 da marca Cooler Master	35
Figura 17 – Ilustração da resistência internamente posicionada no tubo da seção de testes	36
Figura 18 – Aferição da resistência	37
Figura 19 – Regulador de tensão JNG modelo TDGC2-10	37
Figura 20a – Componentes do sistema de calibração dos termopares	40
Figura 20b – Componentes do sistema de calibração de termopares	40
Figura 21 – Esboço do trajeto e dos pontos de posicionamento dos termopares	43
Figura 23 – Impressora 3D Anycubic Photo Mono X	44
Figura 24 – Resina Poseidon Washable Grey	45
Figura 25 – Seção transversal do tubo com indicações	46
Figura 26 – Analogias por resistências	46
Figura 27 – Interferômetro Zygo NewView 7300	49
Figura 28 – Fluxo de calor em função do ΔT , resultado para o tubo sem ranhuras	52
Figura 29 – Fluxo de calor em função do ΔT , resultado para o tubo ranhurado	53
Figura 30 – CTC em função da vazão, resultado para o tubo ranhurado	53
Figura 31 – Forma bruta da parede lisa do tubo	54
Figura 32 – Forma bruta da ranhura	55
Figura 33 – Rugosidade da parede lisa do tubo	56
Figura 34 – Rugosidade da ranhura	56

Figura 35 – Perfil topográfico paralelo a usinagem	57
Figura 36 – Perfil topográfico perpendicular a usinagem	57
Figura 37 – Análise de motivos da superfície da parede lisa	58
Figura 38 – Perfil topográfico paralelo	59
Figura 39 – Perfil topográfico perpendicular	59
Figura 40 – Análise de motivos da superfície da ranhura	60
Figura 41 – Comparação dos valores dos parâmetros S_a e S_q para parede lisa e ranhura	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações pertinentes da pasta térmica Cooler Master - Ice Fusion V2	35
Tabela A. 1. – Constantes de calibração dos termopares	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
Anvisa	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CTC	Coeficiente de transferência de Calor
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
FFE	<i>Falling Film Evaporation</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LEPTEN	Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia
LTMED	<i>Low-temperature multi-effect distillation</i>
NYLON	Poliamida
ONB	<i>Onset Nucleate Boiling</i>
OTEC	<i>Ocean Thermal Energy Conversion</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PCCS	<i>Passive Containment Cooling System</i>
PVC	Policloreto de Vinila
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação	15
1.2 Objetivos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Evaporação em película descendente	18
2.1.1 Película e zonas secas	19
2.2 Aplicações de FFE	20
2.2.1 Indústria de alimentos	20
2.2.2 Indústria petroquímica	21
2.2.3 Usina nuclear	22
2.2.4 Indústria Farmacêutica (elaboração de fitoterápicos)	23
2.2.5 Dessalinização de água	24
2.3 Histórico da bancada de FFE da UFSC	25
2.4 Influência da topografia de superfície em FFE	27
3 METODOLOGIA	29
3.1 Bancada experimental	29
3.2 Fluido de trabalho	30
3.3 Estrutura	30
3.3.1 Banho Térmico	30
3.3.2 Reservatórios	31
3.3.3 Ligações flexíveis e conectores	32
3.3.4 Seção de testes	33
3.3.4.1 Tubos trocadores de calor de aço inox AISI 304	33
3.3.4.2 Resistência e pasta térmica	34
3.4 Preparação dos termopares	39
3.4.1 Montagem e dimensionamento dos termopares	39
3.4.2 Calibração dos termopares	39
3.4.2.1 Análise de incerteza	42
3.4.3 Posicionamento e fixação dos termopares na parede interna do tubo	43
3.5 Difusão de calor pela parede do tubo	45
3.6 Elaboração dos testes	47
3.7 Tratamento dos dados topográficos	49
3.7.1 Parâmetros topográficos pertinentes	50
4 RESULTADOS	51
4.1 Análises térmicas	51
4.1.1 Análise térmica do tubo sem ranhuras	51
4.1.2 Análise térmica do tubo ranhurado	52
4.2 Análise topográfica dos tubos	54

4.2.1	Visualização das superfícies	54
4.2.1.1	Forma bruta	54
4.2.1.2	Rugosidade	55
4.2.2	Análise dos perfis de rugosidade e parâmetros topográficos	57
4.2.2.1	Parede lisa	57
4.2.2.2	Ranhura	58
4.2.2.3	Comparação dos resultados topográficos e considerações	60
5	CONCLUSÕES	62
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	63
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A – Coeficientes de calibração dos termopares	70
	Tabela A. 1. – Constantes de calibração dos termopares	70
	APÊNDICE B – Desenho técnico da solução para fixação dos termopares	71
	Anexo A – Certificado de calibração do PT100	72

1 INTRODUÇÃO

O grupo de pesquisa Boiling faz parte dos Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia (LEPTEN) localizado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e possui como uma de suas linhas de pesquisa a área de transferência de calor com mudança de fase. O estudo de evaporação em película descendente (FFE, do inglês *Falling Film Evaporation*) é um dos temas de pesquisa desse grupo e foi escolhido como tema para ser estudado no presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). O grupo de pesquisa Boiling e o LEPTEN, como um todo, têm recebido ao longo dos anos, apoios por meio de projetos aprovados em diferentes editais.

Ebulição é o fenômeno físico de mudança de fase líquida para gasosa que acontece quando é fornecido calor a um líquido e este atinge seu ponto de ebulição. Entretanto, mesmo que na evaporação aconteça a mesma mudança de estado físico, esse processo é, na maioria das vezes, mais devagar e acontece gradualmente, havendo uma menor dependência de uma temperatura e pressão específica para ocorrer. Ainda, a evaporação se dá na superfície do fluido sem o aparecimento de bolhas, diferentemente da ebulição.

Nesse sentido, o presente trabalho buscou avaliar, experimentalmente, a transferência de calor no processo de FFE na superfície experimental de dois tubos verticais: um com ranhuras longitudinais e outro com superfície lisa. Este estudo propõe-se a analisar o efeito do tipo de superfície, lisa ou ranhurada, sobre o coeficiente de transferência de calor durante o processo de FFE na superfície externa de um tubo vertical internamente aquecido. Além disso, uma contribuição do trabalho é a tentativa de solucionar problemas de montagem e fixação dos dos termopares, bem como obter resultados topográficos dos trocadores de calor em função do tipo de superfície.

1.1 Motivação

Estudos mais focados em FFE tiveram início, principalmente, devido à necessidade de otimização da eficiência térmica, espaço e custo em instalações industriais. No Brasil, desde a década de 1970 foram defendidas teses sobre FFE voltadas a aplicações na indústria de laticínios. Recentemente em 2017, entidades governamentais relacionadas à pesquisa e desenvolvimento (P&D) de alguns países, como a China, listaram tecnologias que se utilizam

de FFE como “*key energy-saving*”, de maneira a fomentar e direcionar P&D na área (WUXI CHEMICAL EQUIPMENT, 2022).

Zhang, Ma e Zhang (2021) destacam que a maioria dos estudos disponíveis sobre trocadores de calor, que utilizam o fenômeno de FFE, estão focados em tubos horizontais. Dessa forma, há lacunas no entendimento sobre as características de FFE em tubos verticais, mais especificamente para o comportamento das películas externas aos tubos, o que torna imprescindível a realização de investigações mais minuciosas para tal configuração. Miranda (2017) também elenca que, entre as pesquisas teóricas sobre o tema, as que exploram evaporadores *falling film* dispostos verticalmente são minoria em relação aos horizontais, por feixes de tubos, além de existir um foco de estudo sobre a melhora do CTC em equipamentos por meio da utilização de “superfícies especiais”.

Além disso, o trabalho de conclusão de curso de Souza (2018) comparou a eficiência de evaporadores *falling film*, em formato tubular disposto verticalmente, com evaporadores do mesmo tipo em formato de placa plana. Nesse sentido, os resultados sugerem que a eficiência térmica dos trocadores tubulares seja maior. Entretanto, Janssen (2019) menciona que o método de fixação de termopares adotado por Souza (2018) pode ter gerado interferências na coleta de dados, sugerindo que os sensores sejam transferidos da parede externa para a parede interna do tubo trocador de calor, evitando dessa maneira o contato do filme com o sensor.

Köroğlu, Lee e Park (2013) mencionam que modificações de superfície de trocadores de calor podem melhorar a molhabilidade e o CTC de maneira significativa. Essas modificações podem ser feitas, por exemplo, tanto quimicamente em escalas nanométricas ou com alterações mecânicas mais grosseiras via processos de usinagem. Nesse sentido, Janssen (2019) realizou modificações na superfície do tubo através da inserção de ranhuras via eletroerosão, com objetivo de melhorar a estabilidade e condução do filme ao longo do tubo. Entretanto seus resultados não foram conclusivos para avaliar a eficácia desta modificação. Dessa forma, este trabalho tem como motivação a realização uma tentativa de trabalhar nesta lacuna, através de uma análise comparativa da transferência de calor do tubo modificado com um tubo de mesma geometria que não sofreu tais modificações.

Por fim, estar inserido em um ambiente laboratorial e ter tido a oportunidade de realizar estágio em um projeto com histórico de excelentes trabalhos foi uma grande oportunidade para desenvolver e aprimorar conhecimentos específicos de engenharia, focados nas áreas de ciências térmicas, fenômenos de transporte, superfície, projeto e fabricação. O contato com os demais projetos do laboratório também foi enriquecedor, desenvolvendo aspectos de gestão de projeto e liderança, os quais fazem parte do perfil de um engenheiro.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise experimental comparativa da transferência de calor e da superfície de tubos trocadores de calor verticais que atuam no processo de evaporação em película descendente, dando portanto continuidade às atividades realizadas na bancada de FFE a partir, também, de sugestões feitas nos trabalhos anteriores. Assim — através da medição da temperatura da parede interna de ambos os tubos e com uma análise da difusão de calor pela parede do tubo a fim de estimar sua temperatura externa — será realizada uma tentativa de estimar e comparar os CTCs (h). Segundo Jebson e Chen (1997), o CTC é um parâmetro essencial para monitorar os processos de evaporação.

Ainda, este trabalho conta com os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar a eficácia da modificação realizada por Janssen (2019) na superfície do tubo (ranhuras) a partir da comparação com um tubo com superfície não modificada.
- b) Alterar o posicionamento dos sensores para a parede interna do tubo, de maneira a realizar uma tentativa de minimizar possíveis interferências na coleta de dados, que segundo Janssen (2019), podem ter ocorrido em trabalhos anteriores.
- c) Analisar complementarmente a superfície dos tubos, de modo a obter detalhes e explorar possíveis correlações, bem como possibilitar que futuras análises sejam feitas a partir dos dados topográficos. Esse objetivo específico segue a sugestão de Miranda (2017) de que a rugosidade da superfície dos trocadores seja analisada de maneira minuciosa.
- d) Realizar alguns aperfeiçoamentos na bancada de maneira a facilitar a execução do presente trabalho e dos que seguirão futuramente.
- e) Transmitir o conhecimento obtido ao decorrer do trabalho na bancada de FFE, de modo a facilitar e fomentar futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seção 2 corresponde a uma revisão bibliográfica do conteúdo pertinente à realização deste trabalho. Nesse sentido, o intuito foi aglutinar e sintetizar o referencial teórico ligado ao fenômeno de FFE, bem como aplicações em diferentes áreas, além de conceitos importantes relacionados à superfície e um breve histórico dos trabalhos já realizados na bancada de FFE da UFSC.

2.1 Evaporação em película descendente

O processo de evaporação em película descendente é um fenômeno físico de mudança de fase, que acontece na interface líquido-vapor quando uma película de líquido é aquecida. Essa película, por sua vez, escoia sobre uma superfície sob ação da gravidade ao longo de tal região aquecida. Trocadores de calor que utilizam o processo FFE podem ser construídos em diferentes formatos, normalmente tubular ou placa plana.

O fenômeno de FFE tem sido empregado em processos de separação de componentes voláteis presentes em misturas. Dessa forma, o emprego de películas finas líquidas acontece em equipamentos de processos industriais em que ocorrem fenômenos de transferência de calor e massa. Bombas de calor de absorção, reatores do tipo *falling film* e evaporadores do tipo *falling film* são exemplos amplamente aplicados na indústria química, alimentos, refino de petróleo, usinas nucleares, processos de dessalinização, entre outros (WANG et al., 2010; GOURDON et al., 2015; HUANG; YANG; HU, 2015).

Silveira (2015) sintetiza que o processo consiste em uma película de líquido fina escorrendo descendente — após ter passado por um distribuidor e ter sido pré-aquecido próximo à temperatura de evaporação — de maneira a ser parcialmente evaporado. Pinto, Padilha e Scalon (2003) enfatizam que a diferença de temperatura entre o fluxo de vapor e o filme líquido deve ser mantida a menor possível nestes trocadores de calor.

Nesse sentido, os principais parâmetros independentes que regem o processo de transferência de calor, no fenômeno de FFE, são: 1. a temperatura de ebulição; 2. a diferença de temperatura (ΔT) entre as temperaturas da superfície aquecida e do líquido; 3. a vazão de líquido sobre a superfície aquecida; 4. a temperatura inicial do líquido, logo antes de iniciar o contato com a superfície aquecida; 5. a concentração do líquido no evaporador, no caso de misturas; 6. a geometria e orientação dos elementos principais do peças trocador de calor

onde ocorre o processo; 7. as características dos elementos do trocador de calor, como tipo de material, tratamentos de superfície e espessura (CHEN; JEBSON, 1997).

Segundo Ji et al. (2019), FFE é um dos processos de transferência de calor mais eficientes. Ainda, Ribatski e Jacobi (2005) enfatizam também a redução dos custos de implantação dos trocadores de calor que se utilizam do fenômeno de FFE quando comparados a outros existentes, como os que operam em cenários de piscina. Visto que, a redução do tamanho do trocador, aliada à baixa carga de fluido necessária neste processo, trazem benefícios evidentes de redução de custo e espaço utilizado.

Trocadores de calor do tipo FFE podem operar com fluidos de diferentes concentrações e viscosidades. Além das quedas de pressão do sistema serem ínfimas, possui excelente CTC e possibilidade de se trabalhar em grandes escalas (WUXI CHEMICAL EQUIPMENT, 2022). Além disso, a baixa diferença de temperatura entre a película e a parede do trocador permite que o dispositivo seja disposto de diversas formas e opere com baixo gasto energético (GOURDON et al., 2015; SILVEIRA, 2015).

2.1.1 Película e zonas secas

O estudo realizado por Wilson (1974) teve como objetivo estimar a espessura mínima em que o filme se mantém íntegro, até o instante em que a aparição das zonas secas se torna iminente. Nesse sentido, a ruptura da película é indesejável, uma vez que pode acarretar na redução da eficiência, superaquecimento ou até mesmo corrosão da superfície seca. Além disso, o autor também concluiu que tanto o ângulo de contato do líquido com a superfície aquecedora, como a tensão superficial são fatores decisivos na manutenção da película

Entretanto, Fujita e Tsutsui (1998) relatam que as zonas secas não necessariamente diminuem o CTC de maneira imediata. Isso se deve ao fato de que elas se movem de maneira praticamente aleatória na superfície onde o calor está sendo transferido. Portanto, os autores deixam claro que há um decaimento significativo do CTC apenas quando essas zonas secas se repetem e padrões se estabelecem.

Assim, o aparecimento das zonas secas pode acarretar apenas em uma perda de energia do sistema, que acontecerá por um curto instante de tempo. Nesse caso, provavelmente não haveria consequências graves, visto que a película rapidamente se formaria no local afetado.

2.2 Aplicações de FFE

Uma das primeiras patentes de evaporadores *falling film* foi registrada em 1888 (LYLE, 1947). Porém, antes de 1970 não haviam muitos pesquisadores envolvidos na área, até que seu uso foi aplicado em sistemas de conversão de energia térmica do oceano (OTEC, do inglês *ocean thermal energy conversion*) na década de 70 e revivido, ainda neste campo, na década de 80 devido à segunda crise mundial do petróleo. Entretanto, foi a partir da década de 1990 que o processo de FFE foi difundido em virtude da eliminação de CFCs motivada pelo Protocolo de Montreal, acordo global assinado em 1987 que objetiva a proteção da camada de ozônio. Embora apresente vantagens nas utilizações de refrigeração e ar-condicionado, tais evaporadores atualmente não são muito utilizados nessas aplicações devido a complicações de não uniformidade da película líquida (ABED *et al.*, 2015).

Os itens a seguir trazem, de maneira sucinta, aplicações dos trocadores de calor FFE em diferentes aplicações de engenharia, bem como as razões pelas quais o processo de FFE é utilizado em cada um dos setores.

2.2.1 Indústria de alimentos

Indústrias alimentícias comumente fazem uso de evaporadores de múltiplos estágios, os quais frequentemente utilizam-se de evaporadores de película descendente em variadas configurações, como por exemplo tubos verticais com escoamento interno ou externo, placas onduladas, tubos horizontais com escoamento externo dentre outros. Na indústria de laticínios para produção de pós, os evaporadores de múltiplos estágios corriqueiramente possuem longos tubos verticais com escoamento externo em suas plantas (GOURDON *et al.*, 2015)

Flavonóides, proteínas e outros compostos orgânicos responsáveis pelo sabor e integridade dos alimentos degradam-se relativamente fácil a partir do fornecimento de certa quantidade de calor (ZHANG *et al.*, 2019; DUMPLER; HUPPERTZ; KULOZIK, 2020). Nesse sentido, como os trocadores de calor FFE operam em baixos fluxos térmicos, a utilização destes equipamentos permite uma melhor qualidade do produto final (normalmente laticínios ou sucos de fruta), uma vez que a desnaturação por calor é mínima.

2.2.2 Indústria petroquímica

Segundo a empresa chinesa Wuxi Chemical Equipment (2022), FFE é amplamente utilizado em plantas de indústrias petroquímicas para a produção de glicol, etanolamina, caprolactama, estireno, alquilfenóis, fibras acrílicas, poliéster, policarbonato, etc. Dessa forma, em comparação aos equipamentos tradicionais, trocadores de calor por FFE proporcionaram um aumento na eficiência de transferência de calor em 40% e redução do consumo energético em 30%. Vale ressaltar que em 2018, a tecnologia de FFE da empresa, apresentada nas Figuras 1a, 1b e 1c, passou pela avaliação da China Petroleum and Chemical Industry Association, quebrando o monopólio internacional e recebendo premiação nacional por avanço tecnológico (WUXI CHEMICAL EQUIPMENT, 2022).

Figura 1a – Evaporador *falling film*, detalhe dos furos tubulares



Fonte: Wuxi Chemical Equipment (2022)

Figura 1b – Vista lateral em transporte



Fonte: Wuxi Chemical Equipment (2022)

Figura 1c – Vista lateral em transporte

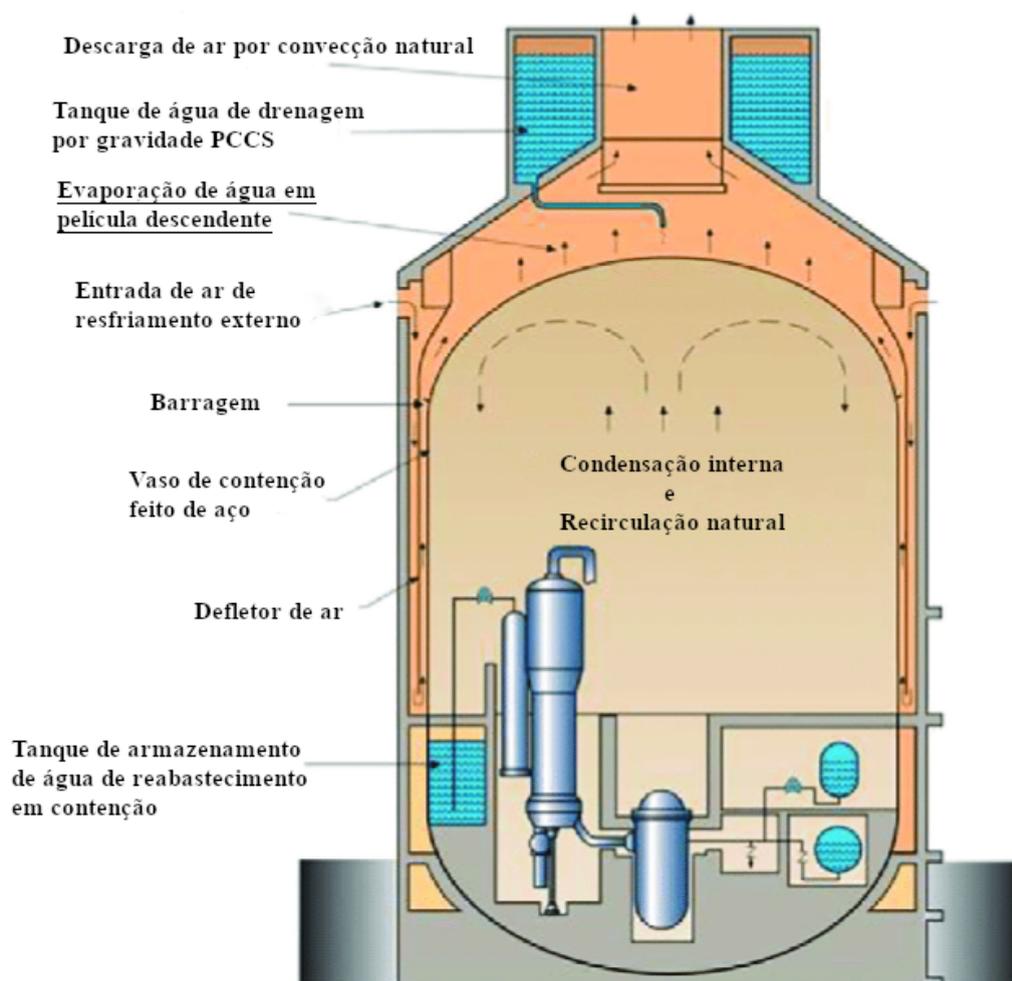


Fonte: Wuxi Chemical Equipment (2022)

2.2.3 Usina nuclear

Após o acidente nuclear em Fukushima ocorrido em 2011, pesquisas voltadas à segurança no setor atraíram atenções na última década. Nas usinas nucleares AP1000 desenvolvidas pela empresa estadunidense Westinghouse Electric Company, FFE em contrafluxo com uma corrente de ar é a principal forma de remoção de calor do sistema de segurança de refrigeração de contenção passiva (PCCS, do inglês *passive containment cooling system*) (HUANG; YANG; HU, 2015; WANG et al., 2016; HU; HU, 2021). A Figura 2, do artigo de Hu e Hu (2021), ilustra esse sistema.

Figura 2 – PCCS de usinas nucleares AP1000



Fonte: Adaptado de Hu e Hu (2021)

2.2.4 Indústria Farmacêutica (elaboração de fitoterápicos)

Segundo o inciso XI do Art. 3º da RDC Nº 26 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), fitoterápicos são definidos como: produto obtido de matéria-prima ativa vegetal, exceto substâncias isoladas, com finalidade profilática, curativa ou paliativa, incluindo medicamento fitoterápico e produto tradicional fitoterápico, podendo ser simples, quando o ativo é proveniente de uma única espécie vegetal medicinal, ou composto, quando o ativo é proveniente de mais de uma espécie vegetal.

Como os princípios ativos de plantas muitas vezes necessitam de solventes para sua extração, a utilização do processo de FFE pode estar presente na etapa seguinte, onde é necessário evaporar o solvente com o intuito de que sobre apenas os compostos medicinais (LEHENG CHEMICAL EQUIPMENT MANUFACTURING, 2022). Devido ao baixo fluxo de calor utilizado, mantém-se a integridade dos compostos orgânicos presentes no medicamento fitoterápico. Além disso, trocadores *falling film* podem operar com fluidos de alta viscosidade, permitindo que óleos mais viscosos sejam processados.

A Figura 3 apresenta um modelo 3D do evaporador *falling film* feito pela empresa chinesa Leheng — utilizado para concentrar extrações que utilizam etanol como solvente — que tem como foco atender o mercado chinês de medicina fitoterápica.

Figura 3 – Modelo 3D do 3T/h MVR *falling film* evaporator



Fonte: Leheng Chemical Equipment Manufacturing (2017)

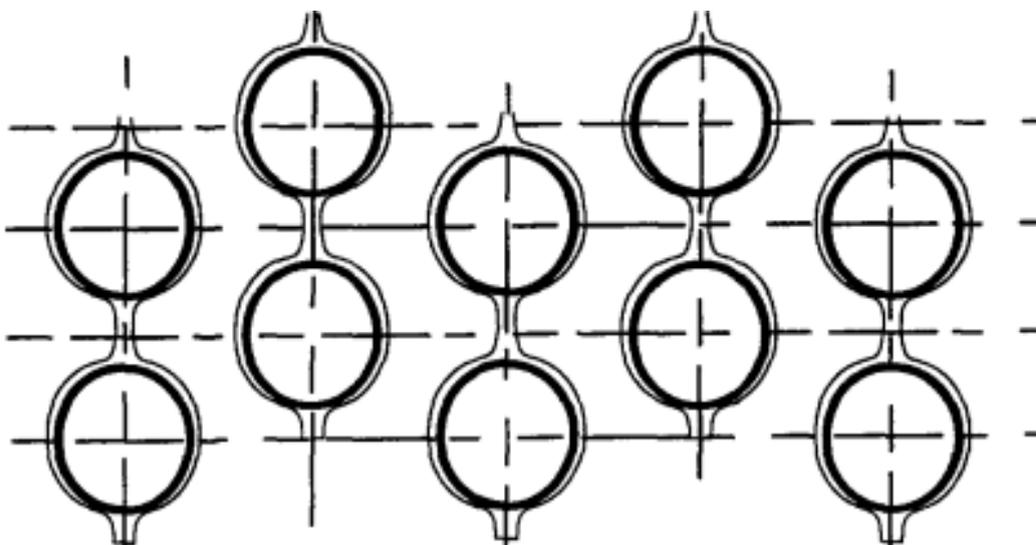
2.2.5 Dessalinização de água

Existem atualmente no mundo cerca de vinte mil plantas de dessalinização. Essas são capazes de oferecer água potável, ou água de reuso, em locais onde não há lençóis freáticos ou rios acessíveis. Ainda, do suprimento total de água de alguns países, a parte que é obtida por este processo corresponde a mais de 90% (AQUATECH, 2019).

Diversas tecnologias utilizadas para dessalinizar a água do mar foram desenvolvidas ao longo do tempo, as principais são: destilação instantânea de múltiplos estágios, osmose reversa e destilação de múltiplos efeitos em baixa temperatura (LTMED, do inglês *low-temperature multi-effect distillation*) (SHEN et al., 2013).

Shen et al. (2013) mencionam que FFE em tubos dispostos horizontalmente é a técnica LTMED preferida por indústrias que dessalinizam a água do mar. Visto que, há redução nos custos de manutenção devido as taxas de corrosão serem menores. Ademais, Hou, Bi e Zhang (2012) elencam que a tecnologia é promissora pois permite operar com grande quantidade de água, além de permitir alta transferência de calor com baixa diferença de temperatura. A Figura 4, do artigo de Bourouni et al. (1998), ilustra uma vista frontal de tal sistema.

Figura 4 – Vista frontal do processo de FFE em tubos dispostos horizontalmente



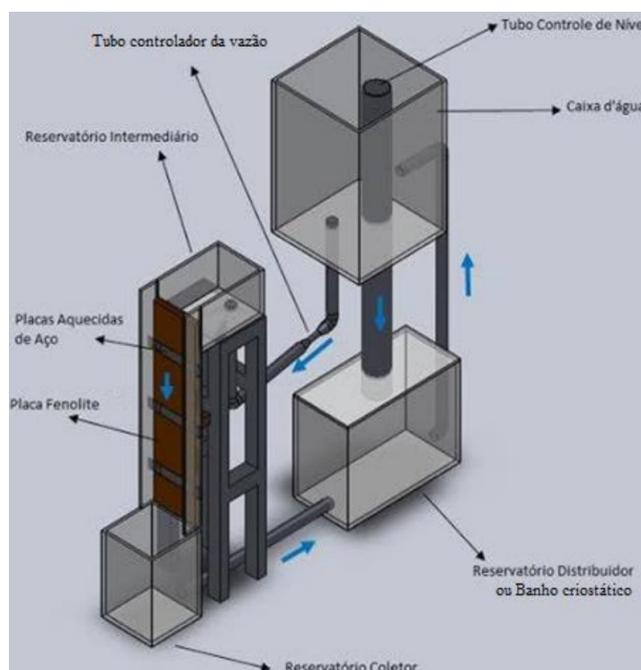
Fonte: Bourouni et al. (1998)

2.3 Histórico da bancada de FFE da UFSC

A bancada de FFE da UFSC já foi objeto de alguns estudos anteriores orientados pelo Prof. Dr. Júlio César Passos, passando por mudanças e melhorias adequadas a cada trabalho realizado com determinados enfoques. Os parágrafos que seguem neste item trazem, de maneira sucinta e cronológica, estudos realizados sobre FFE no laboratório Boiling - LEPTEN, tal como as consequentes modificações da bancada.

O trabalho pioneiro de Miranda (2017), que deu origem a bancada, tinha como objetivo analisar a transferência de calor em processos de FFE em placa na configuração vertical e utilizando de superfícies especiais variadas, assim como também avaliar a hidrodinâmica do processo e detalhar a fabricação e a operação da bancada de testes. O fluido em operação foi água. Os resultados indicaram que a modificação da placa pela inserção de ranhuras aprimorou a performance da transferência de calor do sistema, em comparação com a placa lisa. O autor recomenda que os testes de rugosidade da superfície da seção de testes sejam feitos minuciosamente e, se possível, seja feita a apresentação de imagens sobre o comportamento da superfície. O modelo 3D da bancada é mostrado na Figura 5.

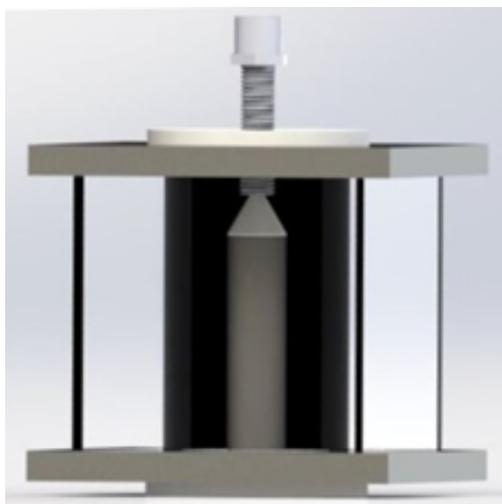
Figura 5 – Modelo 3D da bancada de testes pioneira



Fonte: Miranda (2017)

No ano seguinte, Souza (2018) deu continuidade às investigações sobre FFE, analisando experimentalmente o processo sobre um tubo vertical e comparando-o com os resultados do escoamento em placa plana obtidos por Miranda (2017). A principal mudança na bancada foi a troca da seção de testes, mostrada na Figura 6. Primeiramente a bancada foi validada experimentalmente mediante a equiparação do CTC experimental ($h_{\text{experimental}}$), obtido em testes, com o $h_{\text{teórico}}$ sugerido por Chun e Seban (1971) e amplamente utilizado como referencial teórico em projetos de evaporadores de película descendente em tubos verticais. Ambos CTCs apresentaram diferença máxima de 11% entre si, validando a experimentação corrente. Afim de assegurar equivalência comparativa, os experimentos foram conduzidos com vazão mássica e fluxo de calor muito próximos aos do trabalho do Miranda (2017), e conclui-se que, em comparação ao tubular, o evaporador em placa plana apresenta maior diferença de temperatura em fluxos de calor da mesma ordem e de mesma vazão experimentados, incumbindo à configuração de tubo vertical um maior CTC e consequente superioridade de eficiência.

Figura 6 – Seção de testes de pesquisa sobre FFE em tubo vertical



Fonte: Souza (2018)

Janssen (2019) modificou a seção de testes utilizada por Souza (2018) inserindo ranhuras por técnicas de usinagem a laser, buscando aumentar a área de troca de calor e melhorar a distribuição do fluido ao longo do tubo. A visualização dessas ranhuras está disponível na Figura 7. Foi avaliado que a distribuição da água afeta diretamente a estabilidade da película, sendo recomendada a utilização de um filtro de malha precedente à seção de testes. Os resultados obtidos não foram suficientes para concluir que a modificação

da superfície afetou os CTCs. Uma vez que, as diferenças de temperatura encontradas no trabalho divergem muito dos trabalhos anteriores. O autor coloca que estas diferenças se dão devido ao método adotado para a fixação de termopares.

Figura 7 – Ranhuras incrementadas na superfície do tubo trocador de calor



Fonte: Janssen (2019)

2.4. Influência da topografia de superfície em FFE

Superfície pode ser um desvio de um plano ideal, ou a camada mais externa de um material. Conforme o contexto, poderá estar a se referir aos átomos mais externos, como também incluir uma certa profundidade próxima de tais pontos externos. A topografia da superfície exerce um controle crucial em uma variedade de áreas de engenharia, desde a aderência de tintas e revestimentos até a eficiência energética, durabilidade de ferramentas, biocompatibilidade de dispositivos médicos e segurança em pisos. Ao compreender e otimizar a topografia da superfície, podemos melhorar esses aspectos e promover avanços em diferentes setores (JACOBS; PASTEWKA, 2022).

As topografias de superfícies são compostas por três elementos: forma, ondulação e rugosidade. Nesse sentido, a forma é o componente na qual o olho humano é capaz de observar. Entretanto, é somente com o auxílio de ferramentas e a utilização de filtros que é possível observar as ondulações, que mais detalhadamente representam a rugosidade da peça. Assim, a rugosidade consiste no conjunto de desvios microgeométricos definidos com os pequenos vales e picos presentes nas superfícies (BOMTEMPO, 2018).

Hutchings (1992) define rugosidade como as irregularidades de pequena escala de uma superfície, deixando clara a diferença para os erros que seriam de forma: desvios da superfície de uma forma ideal (plana, cilíndrica, etc).

A escolha do material do tubo — e por consequência, sua superfície — afeta a molhabilidade e as forças de adesão entre o fluido e sua área de superfície (STÄRK et al., 2016). A correlação entre topografia de superfície e FFE é explicada pelos efeitos da geometria da superfície na transferência de massa e no transporte de vapor. Superfícies com características rugosas ou texturizadas podem criar microambientes que promovem a concentração de solutos, aumentando a taxa de evaporação local. Além disso, a topografia da superfície pode afetar o fluxo de vapor e a dissipação de calor durante o processo de evaporação. É importante ressaltar que a relação entre a topografia de superfície e FFE é um foco de pesquisa em constante desenvolvimento.

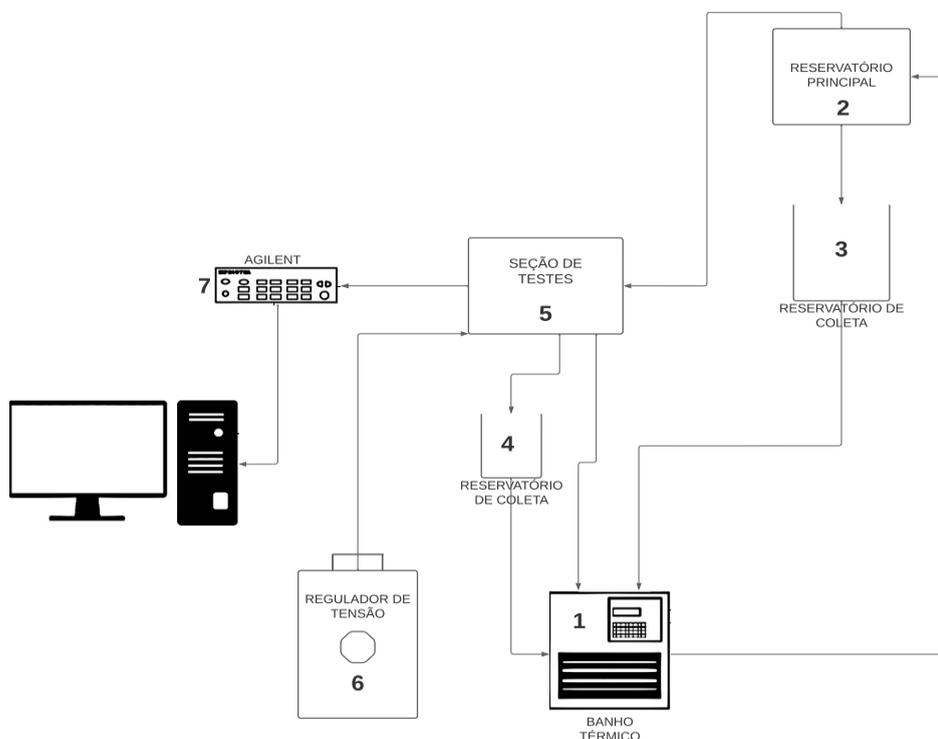
3 METODOLOGIA

Esta seção tem como intuito elencar, de modo detalhado, todos os aspectos, técnicas, materiais e métodos utilizados durante a elaboração deste trabalho. Dessa forma, é dada uma explicação detalhada sobre a bancada, trazendo as principais concepções, instrumentação aplicada e procedimentos experimentais. Ainda, é apresentada a análise de incerteza efetuada para a calibração dos termopares, a análise de difusão de calor pela parede do tubo e a metodologia de tratamento dos dados topográficos.

3.1 Bancada experimental

Localizada no LEPTEN, a bancada experimental pode ser representada de forma simplificada por três cubas de vidro temperado, o banho térmico, a seção de testes e o sistema de aquisição de dados. A Figura 8 traz sua representação esquemática.

Figura 8 – Representação esquemática da bancada de FFE



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

1. Banho térmico da marca Microquímica, modelo MQBMP-01
2. Reservatório principal de distribuição, onde é possível controlar a vazão por um tubo
3. Reservatório coletor para captar o líquido extravasado pelo tubo de controle de vazão
4. Reservatório coletor para captar o líquido excedente da seção de testes
5. Seção de testes
6. Regulador de tensão da marca JNG, modelo TDGC2-10
7. Sistema de aquisição de dados da marca Agilent modelo 34972A

3.2 Fluido de trabalho

Utilizou-se água destilada como fluido de trabalho na realização dos experimentos que constituem este trabalho. Visto que, há a intenção de comparar os resultados obtidos com os de trabalhos anteriores, que também utilizaram o mesmo fluido de trabalho. Ademais, o risco para o operador e o custo da utilização de outros fluidos são fatores levados em conta desde o início dos trabalhos na bancada de FFE. Também deve-se considerar que os estudos presentes na literatura sobre FFE utilizam-se majoritariamente de água destilada.

3.3 Estrutura

3.3.1 Banho Térmico

A Figura 9 mostra o banho térmico da marca Microquímica, modelo MQBMP-01 que é utilizado para aquecer o fluido de testes. Com a sua utilização, busca-se garantir o controle de temperatura de entrada na sessão de testes com ajuste preciso. Além disso, também possui a função de realizar a circulação ativa do fluido pela bancada, através do bombeamento do fluido para o reservatório principal, que por sua vez distribuirá para os outros componentes.

Vale mencionar que o controle de temperatura do banho foi essencial para que os termopares pudessem ser calibrados ao longo da faixa de temperatura desejada. O item 3.4.2 aborda o processo de calibração ao qual o banho foi utilizado.

Figura 9 – Banho térmico da marca Microquímica, modelo MQBMP-01



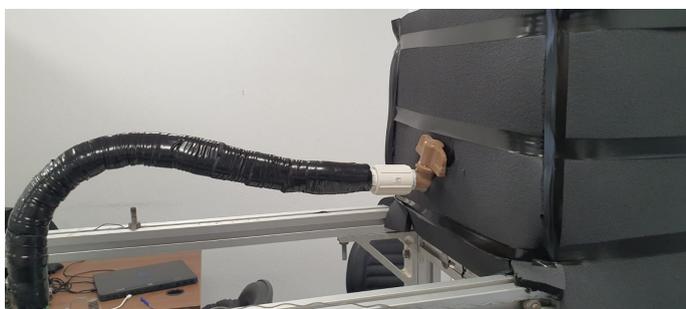
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

3.3.2 Reservatórios

Desde os primeiros projetos realizados na bancada de FFE da UFSC, foram utilizados reservatórios de vidro temperado. A escolha desse material se deve principalmente ao baixo coeficiente de expansão térmica, de modo a evitar falhas por conta da temperatura do fluido. Além disso, há segurança para o operador pois em caso de acidente ou fratura, o vidro se espatifaria sem formar grandes pedaços cortantes que podem ferir gravemente o operador.

Ainda, foram colocados isolamentos térmicos em volta do reservatório principal. Primeiramente isopor, em seguida espuma elastomérica. A Figura 10 apresenta o reservatório principal e a mangueira com o isolamento realizado.

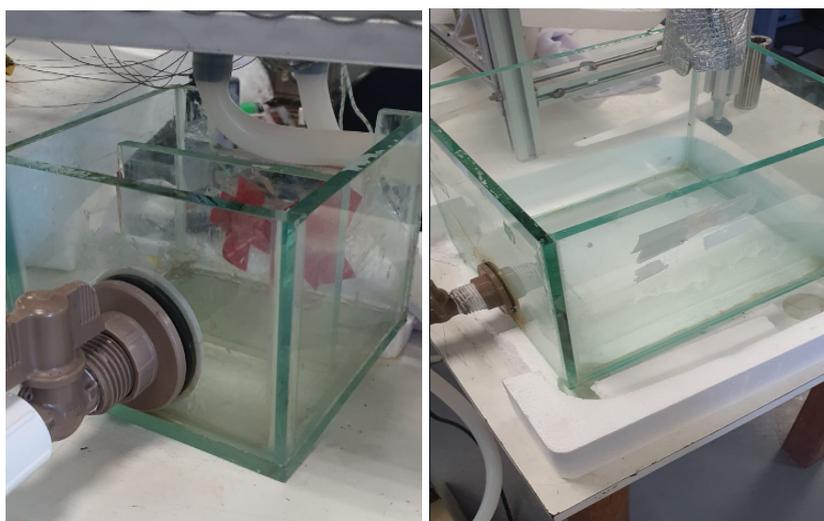
Figura 10 – Reservatório principal e mangueira isolados com espuma elastomérica



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Ademais, há outros dois reservatórios de coleta que auxiliam na circulação do fluido de testes pela bancada. Um que recebe o fluido excedente do reservatório principal e outro, que recebe o fluido que sai por alguns furos na parte inferior da seção de testes, como os que são utilizados para inserir os termopares. As Figura 11a e 11b apresentam ambos. A partir destes, o fluido retorna ao banho térmico e volta a ser recirculado pelo sistema.

Figura 11a – Reservatório de coleta Figura 11b – Reservatório de coleta



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

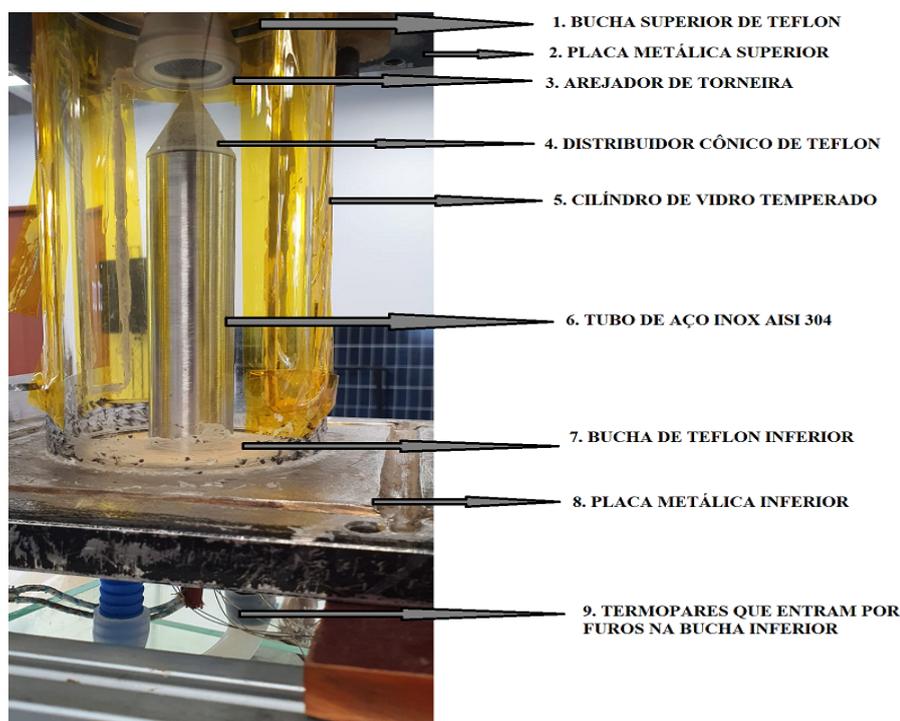
3.3.3 Ligações flexíveis e conectores

Ligações flexíveis de polisiloxano (silicone) são utilizadas para a circulação do fluido de trabalho entre os reservatórios. Este material das mangueiras é adequado para as aplicações e possui resistência térmica que cumpre o exigido na realização dos experimentos. Ademais, conexões de Policloreto de Vinila (PVC) foram fixadas nos reservatórios. Nos primeiros trabalhos produzidos na bancada de FFE, foram utilizadas mangueiras simples, que possuem baixa resistência a variações térmicas. Entretanto, posteriormente altera-se tais ligações flexíveis para adequar-se aos novos experimentos e exigências da bancada. Dessa forma, permite-se um aumento do escopo dos trabalhos.

3.3.4 Seção de testes

Neste item é abordado os principais componentes da seção de testes da bancada. A Figura 12 a seguir apresenta os componentes — com as respectivas indicações — visíveis externamente. Posteriormente neste trabalho, tanto a resistência quanto os termopares (que estão posicionados internamente no tubo) serão abordados com mais detalhes.

Figura 12 – Visualização externa da seção de testes



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

3.3.4.1 Tubos trocadores de calor de aço inox AISI 304

Os tubos de inox AISI 304 foram fabricados de modo a terem os termopares inseridos nos vãos presentes na sua parte interior. As dimensões dos tubos são: $L_{tubo} = 100 \text{ mm}$ e $D_{tubo} = 31,5 \text{ mm}$. A resistência responsável pelo aquecimento é posta em seu transpase cilíndrico, de $\text{Ø}19 \text{ mm}$. Ademais, estes tubos possibilitam o encaixe do distribuidor, feito de Politetrafluoretileno (Teflon), em sua extremidade superior. As Figuras 13 e 14 apresentam respectivamente o tubo sem modificações de superfície e o tubo modificado. Vale mencionar

que o material utilizado na fabricação desta peça se deve à intenção de possibilitar comparação com trabalhos desenvolvidos anteriormente, seguindo a direção das pesquisas.

Figura 13 – Tubo de aço inox AISI 304 sem ranhuras



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Figura 14 – Tubo de aço inox AISI 304 com ranhuras



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

3.3.4.2 Resistência e pasta térmica

O fornecimento de fluxo de calor na seção de testes é realizado por meio de uma resistência cartucho de $\text{Ø}19 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, com tensão nominal de 230 V e carga máxima de 850 W. A Figura 15 apresenta a resistência.

Figura 15 – Resistência utilizada na seção de testes



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A geometria e dimensão da resistência é adequada ao seu posicionamento no furo interno dos tubos. Além disso, sua potência nominal é adequada à capacidade de fornecer o fluxo de calor necessário para o balanço termodinâmico do sistema, conforme testado e validado nos trabalhos de Miranda (2017) e Souza (2018) com o fenômeno de FFE sendo executado em placas planas e tubo vertical.

A pasta térmica Cooler Master – Ice Fusion V2 foi utilizada com o objetivo de reduzir perdas térmicas e uniformizar a condução de calor ao longo do perfil da resistência. Ademais, a pasta auxilia no preenchimento de eventuais folgas entre as peças da seção de testes. A Figura 16 apresenta a pasta aplicada, a Tabela 1 traz as especificações técnicas pertinentes seguida de breves considerações acerca destas.

Figura 16 – Pasta térmica Ice Fusion V2 da marca Cooler Master



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Tabela 1 – Especificações pertinentes da pasta térmica Cooler Master - Ice Fusion V2

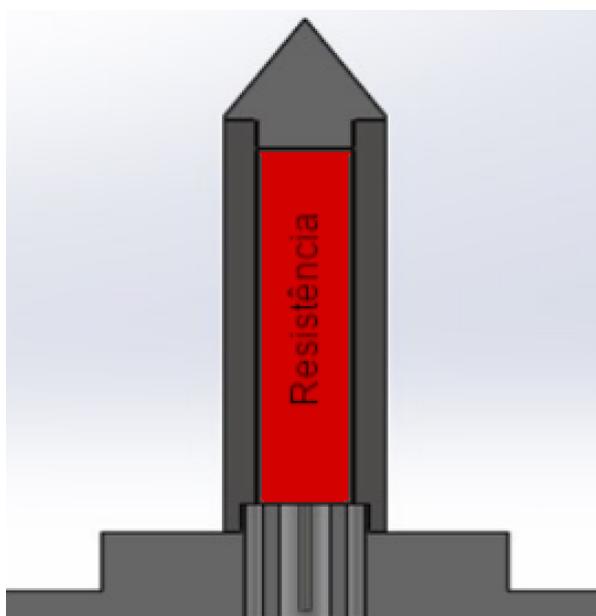
Densidade relativa (g/cm³) (25°C)	2.6
Condutividade térmica (W/m·K)	5.0
Estabilidade térmica (°C)	-30 ~ 150

Fonte: Cooler Master (2022)

A pasta térmica utilizada apresenta uma condutividade térmica de $5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Entretanto, ao considerar — de maneira conservadora — a folga diametral entre os dois componentes de $0,1 \text{ mm}$, esta propriedade não interfere de maneira significativa na condução de calor do sistema.

Após inserida a resistência no interior do tubo, conforme ilustrado na Figura 17, fecha-se as extremidades com o tampão cônico e a bucha inferior de Teflon. Dessa forma, o fluxo de calor advindo da resistência é preferencialmente direcionado radialmente, de modo a impedir que haja perdas térmicas nestas regiões.

Figura 17 – Ilustração da resistência internamente posicionada no tubo da seção de testes



Fonte: adaptado de Souza (2018)

A resistência foi aferida através do auxílio de um multímetro. Como registrado na Figura 18, o valor obtido foi de $56,0 \Omega$.

Figura 18 – Aferição da resistência



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Figura 19 – Regulador de tensão JNG modelo TDGC2-10



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A resistência cilíndrica e o regulador de tensão — apresentado na Figura 19 — constituem o circuito elétrico responsável pelo fornecimento de calor. Dessa forma, é possível determinar a potência elétrica dissipada em forma de calor, por meio das seguintes relações:

$$V = R \cdot I \quad (1)$$

A equação (1) apresenta a relação entre tensão (V), resistência (R) e corrente (I). Já a equação (2) a seguir representa a potência dissipada pela resistência.

$$P = V \cdot I [W] \quad (2)$$

As dimensões do tubo são conhecidas: $L_{tubo} = 100 \text{ mm}$ e $D_{tubo} = 31,5 \text{ mm}$. Assim, é possível calcular a área de superfície A_s através da equação (3).

$$A_s = (\pi \cdot L_{tubo} \cdot D_{tubo}) \cdot 10^{-6} [m^2] \quad (3)$$

Já o fluxo de calor (q'') dissipado na superfície externa do tubo trocador de calor é dado pela equação (4).

$$q'' = \frac{P}{A_s} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4)$$

3.4 Preparação dos termopares

3.4.1 Montagem e dimensionamento dos termopares

Para que a aquisição de dados do experimento fosse realizada, foram montados um total de 10 termopares de haste blindada tipo K da marca OMEGA™, sendo nove conectados ao tubo e um no gelo, atuando como referência.

Primeiramente, foram divididos 10 pares de fios de cobre que foram colocados no módulo do aquisitor de dados (AGILENT 34972A) . Um par de fios de cobre (“positivo” e “negativo”) foi colocado em cada canal do módulo. O termoresistor PT100 também foi conectado ao módulo através de quatro fios, com um distanciamento de dez canais conforme especificação. Em seguida, para se adequar à configuração da bancada, foram utilizadas extensões de termopares tipo K utilizando-se conectores. Nesse caso, é importante ressaltar que a partir destes conectores até a seção de testes, seguem-se os fios termopares (ligas alumel e cromel). Portanto, foi feito um isolamento dessa parte de conectores com espuma elastomérica, formando-se a junta de referência, de modo a assegurar que essa junta esteja em uma temperatura uniforme.

3.4.2 Calibração dos termopares

Antes que os termopares sejam posicionados na seção de testes, é necessário obter um polinômio que venha a representar a temperatura de cada termopar para os valores de tensão medidos. Apesar de existir tabelas para termopares tipo K, que correlacionam os valores de tensão obtidos com a temperatura, o erro dessas tabelas é de aproximadamente ± 1 °C. Portanto, para que esse erro seja minimizado, é necessário realizar a calibração.

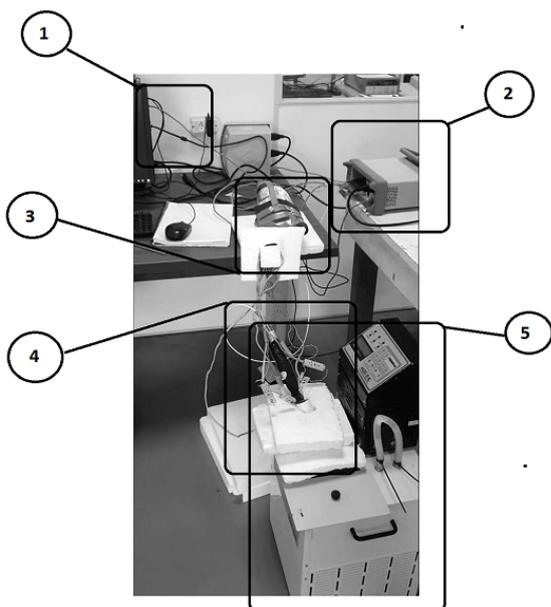
O procedimento de calibração foi iniciado com a amarração dos termopares de medição na extremidade do termoresistor PT100. Este instrumento possui certificado de calibração, o qual está disposto no Anexo A deste trabalho. Em seguida, um copo cerâmico foi colocado dentro do banho térmico MQBMP-01 (marca Microquímica) e a extremidade do PT100, com os termopares de medição, é submergida dentro. O copo tem como finalidade minimizar os efeitos de turbulência e evitar perturbações nos dados coletados pelos sensores.

Assim, a tensão medida pelos termopares se dá através da diferença de temperatura entre a junta de medição (pontas submersas dos termopares de medição) e a junta de

referência (conectores). Portanto, é necessária também a utilização de termopares de referência, em uma temperatura relativamente fixa e conhecida, de maneira a perceber e compensar as variações que podem acontecer por conta da variação da temperatura de referência. Nesse sentido, um termopar de referência foi colocado dentro de uma garrafa térmica com gelo e água, de modo a manter essa mistura à temperatura de 0°C.

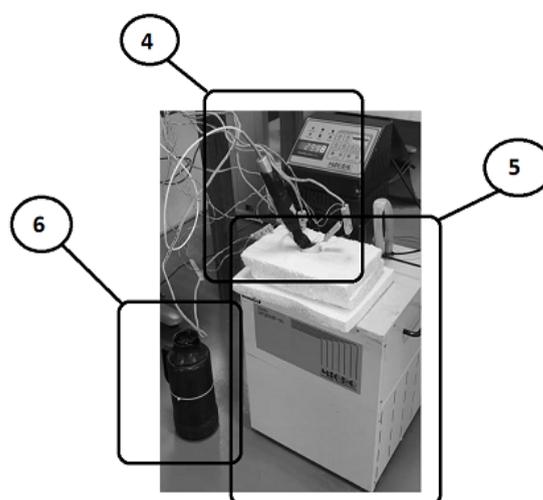
Os componentes do sistema de calibração são apresentados nas Figuras 20a e 20b. O sistema se resume com o computador (1) sendo conectado ao aquisitor dados (2) via cabo USB-B. Então segue-se fios de cobre de extensão até os conectores termicamente isolados na junta de referência (3). Após os conectores, seguem-se os fios termopares até o conjunto do PT100 com a ponta dos termopares de medição (4) submersos no banho térmico (5) e termopar de referência para a garrafa térmica (6) com gelo e água em estado de mudança de fase a 0°C.

Figura 20a – Componentes do sistema de calibração dos termopares



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Figura 20b – Componentes do sistema de calibração de termopares



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Assim como o trabalho de Souza (2018), os termopares foram calibrados numa faixa de 20 a 100 °C, mantendo-se um intervalo de 5 °C. No presente trabalho foram efetuadas medições em uma frequência de 0,2 Hz (uma aquisição a cada cinco segundos) por cerca de cinco a dez minutos após a estabilização da temperatura, de maneira a coletar dados que representem melhor tais temperaturas em regime permanente. O procedimento inicia-se com o

banho sendo ligado e configurado de modo a manter a água na temperatura proposta. Inicia-se então a aquisição de dados e é aguardado até a temperatura se estabilizar. Em seguida, aguarda-se novamente, até haver uma quantidade de dados coletados que satisfatoriamente representem tal temperatura. Posteriormente, altera-se a temperatura e repete-se o procedimento feito até que a faixa de temperatura que o experimento requer seja contemplada.

A faixa de temperatura adotada se deve à possibilidade de utilização de um fluido com menor ponto de ebulição do que a água, de modo a melhorar o processo de visualizar e detalhar o fenômeno de FFE em tubo vertical (SOUZA, 2018).

Após a coleta de dados, estes foram exportados em um arquivo de extensão CSV (Comma-Separated Values) e então utiliza-se uma rotina, escrita com a linguagem de programação Python, para que os dados sejam tratados e as curvas de calibração sejam geradas. Nesse caso, um polinômio de terceiro grau melhor representa os dados coletados para calibração. A equação (5) descreve o comportamento destas curvas de calibração:

$$T_n = a_n (V_n - V_{ref})^3 + b_n (V_n - V_{ref})^2 + c_n (V_n - V_{ref}) + d_n \quad (5)$$

Sendo T_n a temperatura em °C no banho térmico, adquirida pela medição do PT100 baseando-se em sua equação de calibração, V_n a tensão média em *mV* do termopar n , V_{ref} sendo o sinal do termopar de referência na mesma unidade de medição de tensão e por fim, a_n , b_n , c_n e d_n como os coeficientes da equação de calibração. A partir dos dados coletados nesse processo, foi realizada uma análise de regressão polinomial de terceira ordem para a obtenção dos coeficientes da equação (1) para cada termopar. Desse modo, é possível, a partir dos sinais coletados no experimento, converter tensão para temperatura. A Tabela A. 1. posta no apêndice deste trabalho apresenta as constantes de calibração dos termopares obtidas.

Ainda, necessita-se a aferição da resistência do PT100 a 0°C para que haja conhecimento sobre sua acuracidade. Para isso, o termoresistor foi colocado dentro de uma garrafa térmica com gelo e água em estado de mudança de fase. Uma vez que, como mostrado na equação (6), a temperatura T utilizada na calibração dos termopares é função de R_0 , mostra-se necessária a realização deste procedimento.

$$R(T) = R_0 \left(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 \right) \quad (6)$$

Sendo $A = 3,9116 \times 10^{-3}$ e $B = -5,8279 \times 10^{-7}$ as constantes de calibração do PT100, informadas em seu certificado de calibração. Após 60 medições a uma frequência de 0,2 Hz encontra-se um valor de R_0 de 100,0026 Ω .

3.4.2.1 Análise de incerteza

Todo processo de medição traz intrinsecamente um fator de incerteza. Diversas fontes de erro, como o erro aleatório e sistemático, ao serem combinadas representam a incerteza do sistema. As equações (7), (8) e (9) são utilizadas no processo de análise da incerteza das medições dos termopares.

$$\epsilon_{max} = Max \left\{ |\epsilon_{s,n} - T_{N-1} \cdot \epsilon_{a,n}|, |\epsilon_{s,n} - T_{N-1} \cdot \epsilon_{a,n}| \right\} \quad (7)$$

$$\epsilon_{s,n} = \bar{T}_{pol,n} - T_{PT100} \quad (8)$$

$$\epsilon_{a,n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{n,i} - \bar{T}_{pol,n})^2}{N - 1}} \quad (9)$$

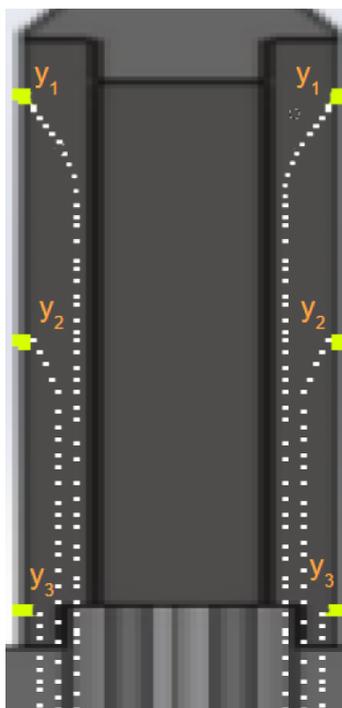
Sendo $\epsilon_{m\acute{a}x}$ o erro de medição máximo do termopar n , $\epsilon_{s,n}$ representando o erro sistemático, $\epsilon_{a,n}$ a parcela do erro aleatório (desvio padrão de uma amostra com N medições), t_{N-1} correspondendo ao coeficiente t de Student referente ao intervalo de confiança adotado para N - 1 graus de liberdade, T_{PT100} a temperatura média dada pelo termoresistor previamente calibrado, $\bar{T}_{pol,n}$ sendo a temperatura média do termopar n , já dada a conversão polinomial da tensão medida e por fim, $T_{n,i}$ mostra a i -ésima medição do termopar n .

Portanto, para um intervalo de confiança de 95% e 59 graus de liberdade, o t de Student é 2,001. Dessa forma, encontra-se um erro máximo de 0,25 °C para o termopar com a maior incerteza. Assim, de maneira conservadora, esse é o valor da incerteza da calibração.

3.4.3 Posicionamento e fixação dos termopares na parede interna do tubo

Um dos principais desafios deste trabalho foi o posicionamento e a fixação dos termopares nos vãos da parte interna do tubo. Uma vez que a quantidade de termopares em cada vão, a precisão de suas posições relativas e a necessidade de garantir o contato com a parede interna tornam difícil a tarefa de fixá-los de maneira correta. Entre esses vãos, há espaçamento de 120° . O esboço de como os termopares foram direcionados é apresentado na Figura 21, onde as marcações amarelas são os pontos da parede interna do tubo aos quais os termopares fazem contato e o pontilhado branco apresenta a trajetória realizada pelos fios condutores.

Figura 21 – Esboço do trajeto e dos pontos de posicionamento dos termopares



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Para resolver o problema, foi fabricado, via Impressão 3D de resina, uma haste com canaletas de passagem curvada. Por sua vez, estas passagens servem para conduzir os termopares e garantir o contato nas suas posições corretas na parede interna dos tubos. A Figura 22 apresenta esta haste.

Figura 22 – Haste com canaletas de passagem curvada

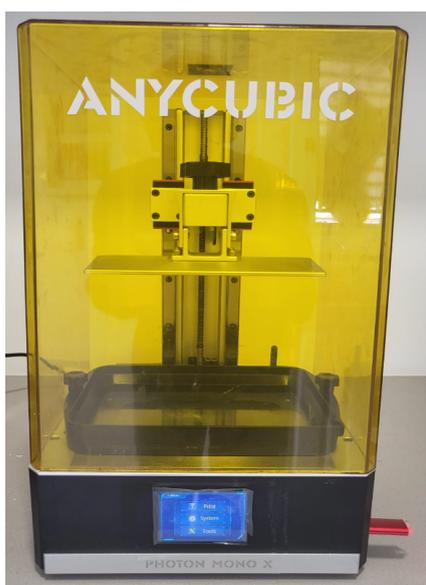


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Ao total foram utilizadas três hastes por tubo. Para facilitar reproduções em trabalhos futuros, o desenho técnico contendo as dimensões da haste está posto no Apêndice B.

Para a fabricação desta haste foi utilizada a impressora 3D de resina Anycubic Photo Mono X, apresentada na Figura 23. A utilização deste equipamento se dá devido às circunstâncias de acesso do autor, bem como a redução de custo para prototipação e validação da funcionalidade da haste. Para trabalhos futuros sugere-se a confecção de uma haste metálica caso possível, visto que, apesar de sua complexidade geométrica dificultar a fabricação, a utilização de material metálico garantiria maior durabilidade e integridade para futuros experimentos, permitindo também a utilização de temperaturas mais elevadas e outros fluidos. Entretanto, cuidados com curtos ou medições mascaradas deverão ser tomados.

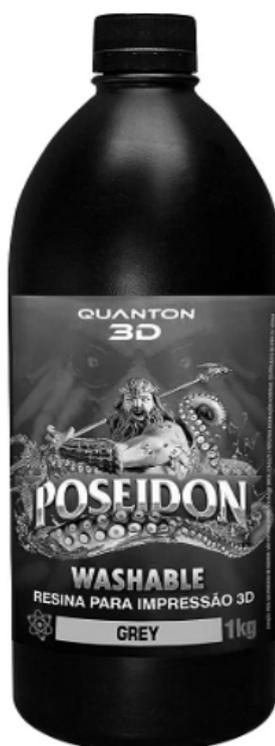
Figura 23 – Impressora 3D Anycubic Photo Mono X



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A resina utilizada, como apresentado na Figura 24, foi a Resina Poseidon *Washable Grey* da marca Quanton 3D. Por ser lavável, não haveria problema do escoamento de água danificá-la ou ser solubilizado no sistema. Apesar do fabricante não especificar o material da resina, foi possível supor, por ser uma resina que necessita de cura, que sua temperatura de transição vítrea (T_g) esteja acima da temperatura máxima dos experimentos que serão conduzidos ($\sim 70^\circ\text{C}$).

Figura 24 – Resina Poseidon *Washable Grey*

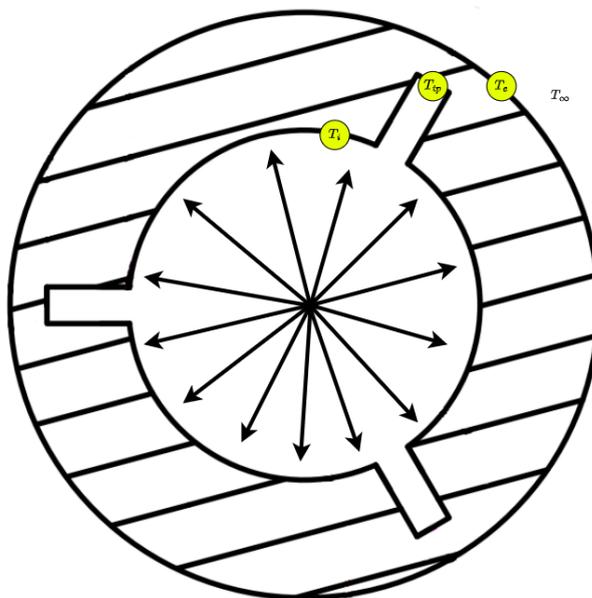


Fonte: Adaptado pelo autor (2022), de Quanton 3D

3.5 Difusão de calor pela parede do tubo

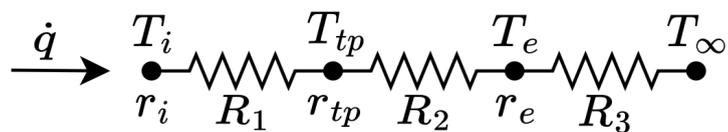
Deve-se calcular, a partir difusão de calor pela parede do tubo, a temperatura externa (T_e), e posteriormente, o CTC. Considera-se portanto a temperatura interna (T_i) sendo igual à temperatura medida pelo termopar (T_p). A Figura 25 ilustra a seção transversal do tubo com as indicações de temperatura.

Figura 25 – Seção transversal do tubo com indicações



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Figura 26 – Analogias por resistências



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A partir da analogia por resistências, apresentada na Figura 26, são feitas as relações apresentadas nas equações (10), (11), (12), (13), (14) e (15) a seguir.

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_{tp}}{r_i}\right)}{2\pi kL} \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_{tp}}\right)}{2\pi kL} \quad (11)$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_2} = \frac{\Delta T}{R_3} \quad (12)$$

$$\dot{q} = \frac{(T_{tp} - T_e)}{R_2} = \frac{(T_e - T_\infty)}{R_3} \quad (13)$$

$$T_e = T_{tp} - \dot{q} \cdot R_2 \quad (14)$$

$$h = \frac{\dot{q}}{A(T_e - T_\infty)} \quad (15)$$

Onde \dot{q} é a potência despendida pela resistência cilíndrica, r_i o raio do centro da resistência até a parede interna, T_{tp} a temperatura medida pelo termopar após convertida do sinal, r_{tp} sendo o raio do centro até o ponto de medição do termopar, T_e a temperatura externa, r_e o raio do centro a parede externa e T_∞ a temperatura do fluido. R_1 , R_2 e R_3 representam analogamente a resistência à passagem de calor imposta levando em conta o material do tubo e sua espessura.

3.6 Elaboração dos testes

Os testes foram realizados na bancada seguindo um padrão, de modo a buscar que os resultados obtidos nos tubos com e sem ranhura sejam passíveis de comparação. Uma vez que, mantêm-se os parâmetros de fluxo de calor e vazão do sistema para ambos.

1. Define-se a primeira vazão de aproximadamente 240 L/h através da altura do cano regulador de água, mediante a medição com paquímetro e amparado pela aferição visual junto à régua.
2. Aguarda-se alguns minutos para que o escoamento sobre a seção de testes se torne uniforme.
3. Inicia-se o fluxo de calor (q''). (Três valores de tensão foram estabelecidos: 80 V, 125 V e 165 V).
4. Após atingir o regime permanente, 60 pontos de medição são coletados por cada termopar com uma taxa de 0,2 Hz (1 medição a cada 5 s).
5. Altera-se a vazão do sistema para o valor de aproximadamente 200 L/h.

6. O procedimento 4 é executado novamente
7. A tensão de alimentação da resistência é aumentada e retoma-se a partir do primeiro procedimento.
8. Ao abranger os três fluxos de calor estipulados, o tubo liso é trocado pelo tubo com ranhuras e o processo se repete novamente.

A temperatura inicial do fluido de trabalho, configurada em 60 °C no banho térmico, é um dos parâmetros necessários para a obtenção de resultados. Entretanto, sabe-se que há incertezas associadas ao banho. Portanto, aferiu-se os sinais dos termopares com a resistência desligada, com o objetivo de obter o valor de T_{∞} , cujo valor utilizado — já sendo realizada a média das temperaturas após a coleta e conversão dos sinais — foi de 56,4 °C. As vazões adotadas foram baseadas em valores utilizados em trabalhos anteriores, permitindo comparação e identificação de possíveis resultados absurdos. Entretanto, é importante mencionar que, por observação visual, a película se manteve estável mesmo utilizando os mínimos valores de vazão possíveis de serem executados na bancada. Isto foi observado em um valor de $\dot{q} = 0$.

Pelo posicionamento dos termopares no tubo, é realizado uma média das temperaturas obtidas para cada posição ao longo do eixo Y do perfil do tubo, nas posições y_1 , y_2 e y_3 : TS_{y_1} , TS_{y_2} e TS_{y_3} . As médias são representadas nas equações (16), (17) e (18) a seguir.

$$TS_{y_1} = \frac{(T_{201} + T_{202} + T_{203})}{3} \quad (16)$$

$$TS_{y_2} = \frac{(T_{204} + T_{205} + T_{206})}{3} \quad (17)$$

$$TS_{y_3} = \frac{(T_{207} + T_{208} + T_{209})}{3} \quad (18)$$

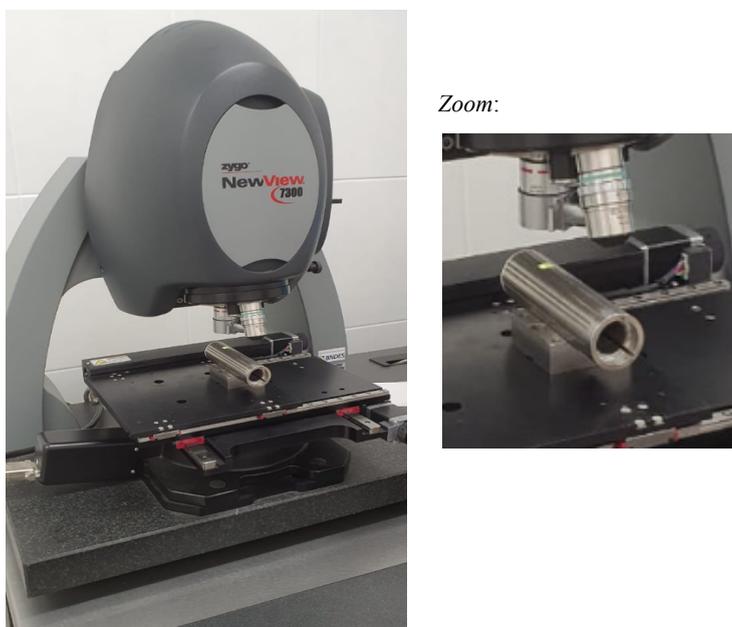
Sendo T_{201} , T_{202} , T_{203} , T_{204} , T_{205} , T_{206} , T_{207} , T_{208} e T_{209} a média das temperaturas de 60 medições dos respectivos termopares.

3.7 Tratamento dos dados topográficos

Miranda (2017) sugere que a rugosidade da superfície dos trocadores de calor, estudados na bancada de FFE, seja analisada de maneira minuciosa. Nesse sentido, o presente trabalho realizou imagens da topografia das superfícies da parede lisa e da ranhura presente no tubo trocador de calor. Dessa forma, há possibilidade de uma análise complementar que permita — no presente e em futuros trabalhos, a partir do conhecimento dos parâmetros obtidos — outras correlações e análises.

O equipamento utilizado na aquisição dos dados topográficos, apresentado na Figura 27, foi o interferômetro Zygo NewView 7300 — localizado no Laboratório de Materiais (LabMat) da UFSC — e o tratamento de dados foi realizado com o auxílio do software MountainsMap. Tal tratamento é necessário para separar a superfície em seus três componentes: forma, ondulação e rugosidade. Desse modo, é possível o cálculo de amplitude e intensidade dos picos e vales, que por sua vez compõem a rugosidade. A relevância desta informação está diretamente ligada à molhabilidade, visto que tais fatores estão correlacionados com tal propriedade da superfície do material.

Figura 27 – Interferômetro Zygo NewView 7300



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Primeiramente, os pontos não medidos devem ser preenchidos. Estes pontos aparecem regularmente em operações no interferômetro devido a diversos fatores, dentre eles: poros, picos com forte inclinação nos quais as ondas refletem e não retornam ao detector e quando há diferença acentuada na reflexibilidade entre as fases do material analisado.

Depois que os pontos foram preenchidos, utiliza-se uma ferramenta de remoção de polinômios de grau 2 para remoção da forma. Em seguida, filtra-se a ondulação, de modo a separar a rugosidade para a análise. O *cut-off* utilizado foi de 0,25 mm, segundo norma ISO 4288:1996. Dessa forma, o software considera motivos de repetições com comprimentos de onda maiores de 0,25 mm como ondulação, filtrando os que estiverem abaixo deste valor como parte da rugosidade. Por fim, o software permite a projeção de imagens tridimensionais da rugosidade, ondulação e forma, possibilitando a análise visual das superfícies estudadas. Ademais, os parâmetros topográficos explicados no item a seguir também são apresentados.

3.7.1 Parâmetros topográficos pertinentes

Os parâmetros topográficos são uma forma de abordar e compreender matematicamente uma superfície, permitindo a compreensão da distribuição das irregularidades ao longo de uma topografia tridimensional.

Dois parâmetros muito utilizados na caracterização de superfícies são S_a (média aritmética) e S_q (desvio padrão médio de S_a). Os valores de S_a e S_q apresentam tendências de aumento quando uma superfície apresenta uma grande amplitude, trazendo a diferença entre os picos mais altos e vales mais profundos. S_z também é um parâmetro relevante que representa a altura máxima, relativa ao pico mais alto.

O software MountainsMap, além de calcular todos os parâmetros mencionados acima, também calcula os motivos, que trazem a área volumétrica das cavidades abaixo de um determinado *cut-off*.

4 RESULTADOS

Esta seção tem como objetivo apresentar de maneira direta e objetiva o desempenho térmico dos tubos trocadores de calor estudados neste trabalho. Uma vez que é realizada relações a partir do fluxo de calor, da diferença da temperatura do fluido e o coeficiente de transferência de calor convectivo do sistema.

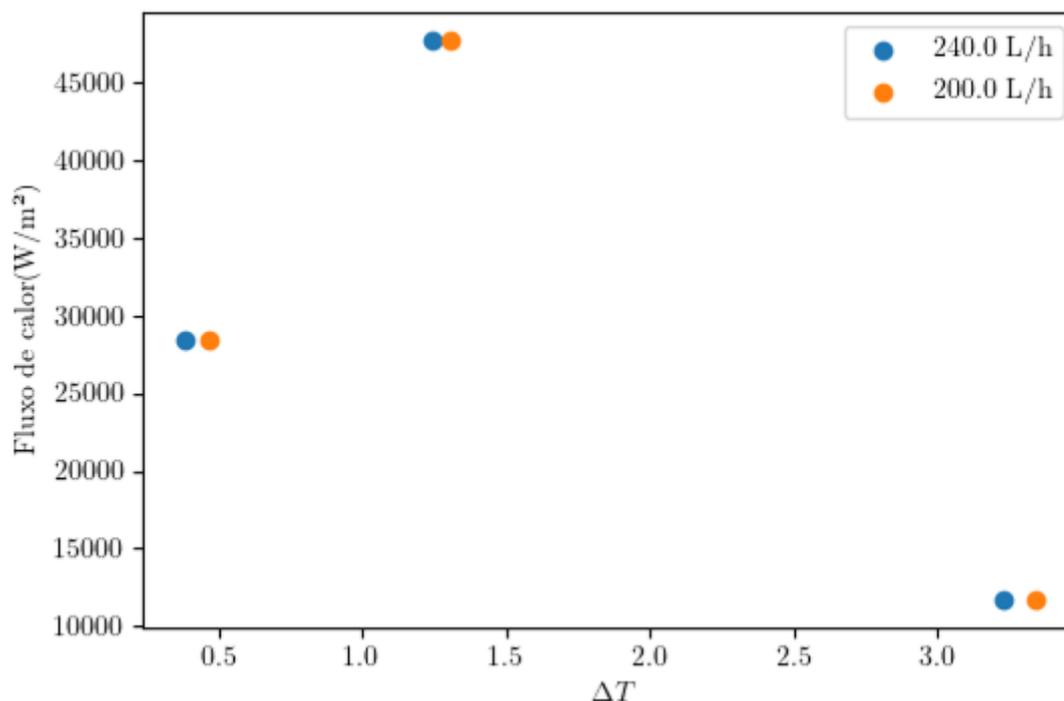
Ademais, foi realizada uma análise complementar da topografia da superfície dos tubos, trazendo a visualização 3D da parede lisa e da ranhura, permitindo uma análise dos parâmetros topográficos pertinentes para este e outros futuros trabalhos na bancada de FFE.

4.1 Análises térmicas

Neste item serão apresentados os resultados das análises térmicas realizadas nos tubos. Primeiramente, os resultados para o tubo sem ranhuras (parede lisa) e em seguida, para o tubo com ranhuras presentes em sua parede externa.

4.1.1 Análise térmica do tubo sem ranhuras

No gráfico apresentado na Figura 28 , são trazidos os resultados obtidos utilizando o tubo sem ranhuras para o experimento, relacionando o fluxo de calor (q) ao $\Delta T (T_e - T_\infty)$, para ambas vazões de 200 e 240 L/h. Ao analisar os resultados percebeu-se que foram obtidos resultados de caráter absurdo. Vale mencionar que tais resultados não foram condizentes com trabalhos anteriores, não sendo possível assim a reprodução dos mesmos. Uma vez que, o ΔT obtido para um menor fluxo foi maior do que os mesmos obtidos para fluxos maiores. Nesse sentido, foram detectadas falhas após terminada a bateria de testes. Foi considerado, portanto, que não havia tempo para refazer os testes em superfície lisa. Uma das possíveis razões dessa divergência poderia estar relacionado a problemas na fixação dos termopares onde houve perda do contato com a parede interna do tubo, havendo necessidade portanto de exclusão estatística de alguns valores coletados.

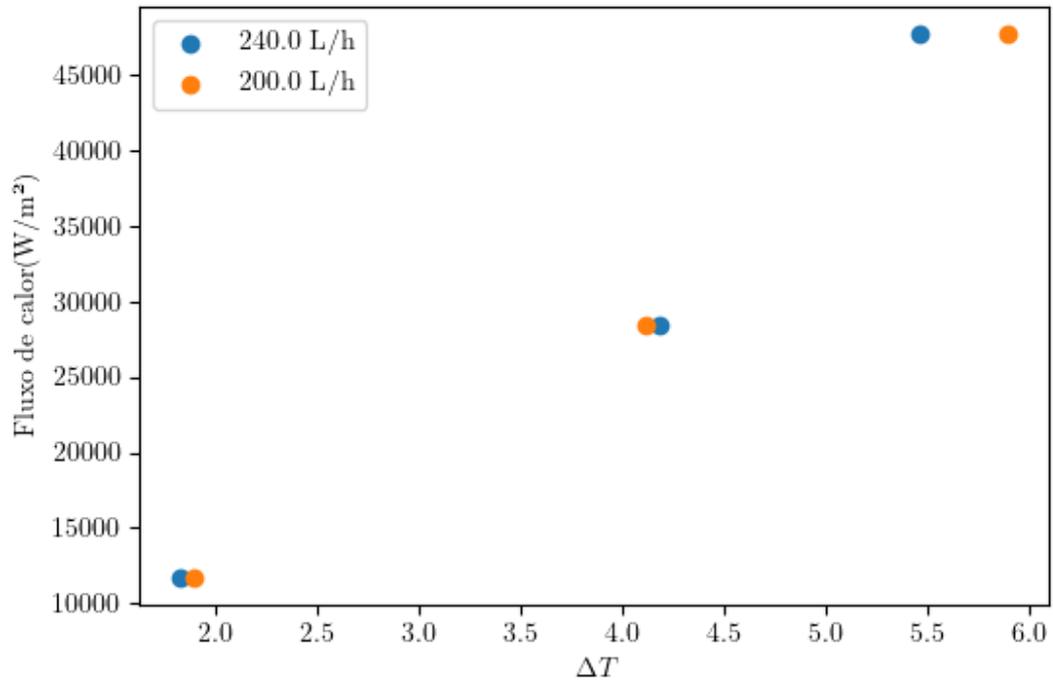
Figura 28 – Fluxo de calor em função do ΔT , resultado para o tubo sem ranhuras

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

4.1.2 Análise térmica do tubo ranhurado

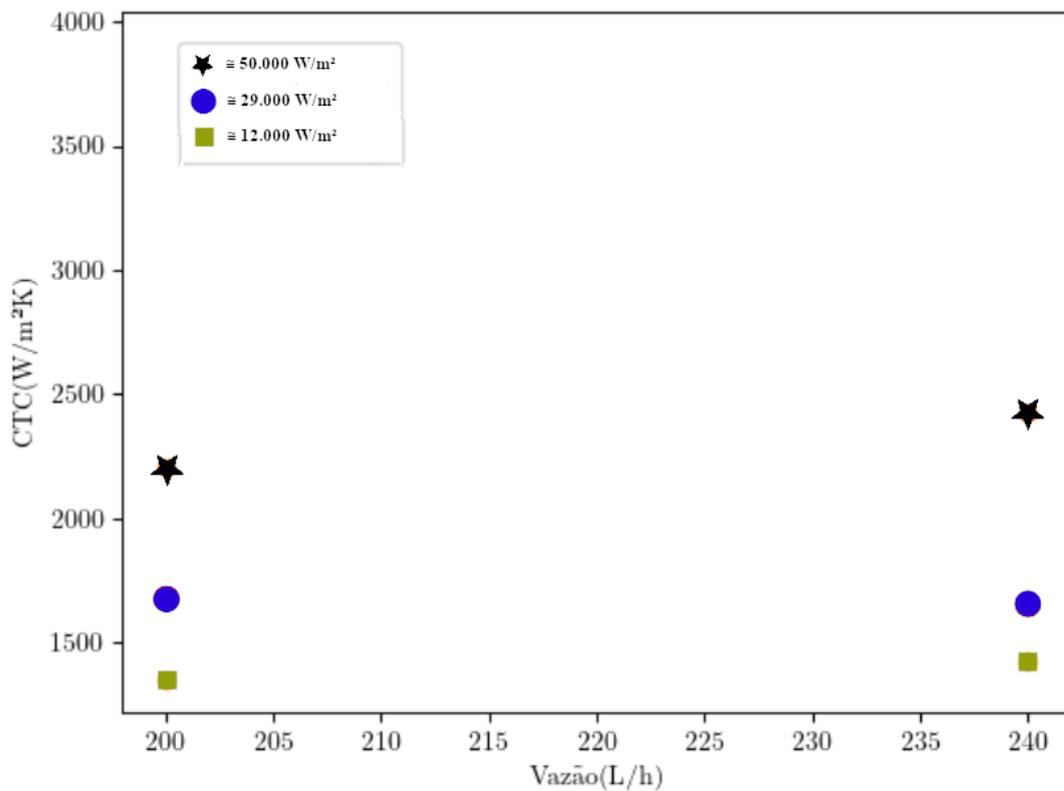
Já os resultados obtidos nos testes realizados no trocador de calor ranhurado — apresentados na Figura 29 e 30 — foram mais condizentes com trabalhos anteriores. Visto que, o ΔT elevou-se conforme aumentava-se o fluxo. Além disso, os resultados mostraram que para um fluxo de aproximadamente 50.000 W/m² o CTC foi menor ao utilizar uma vazão de 200L/h do que quando utilizado 240L/h. Entretanto, em fluxos menores (aproximadamente 12.000 e 29.000 W/m²), a troca de calor se mostrou muito parecida para ambas às vazões, apresentando até mesmo um pequeno aumento (cerca de 6%) no CTC para a vazão de 200 L/h com fluxo de 29.000 W/m². Isso pode estar a sinalizar que, com uma maior vazão, aumenta-se a espessura da película, de modo a afetar o processo de transferência térmica. Tal variação de espessura poderia estar provocando um efeito isolante na interface trocador de calor.

Figura 29 – Fluxo de calor em função do ΔT , resultado para o tubo ranhurado



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Figura 30 – CTC em função da vazão, resultado para o tubo ranhurado



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

4.2 Análise topográfica dos tubos

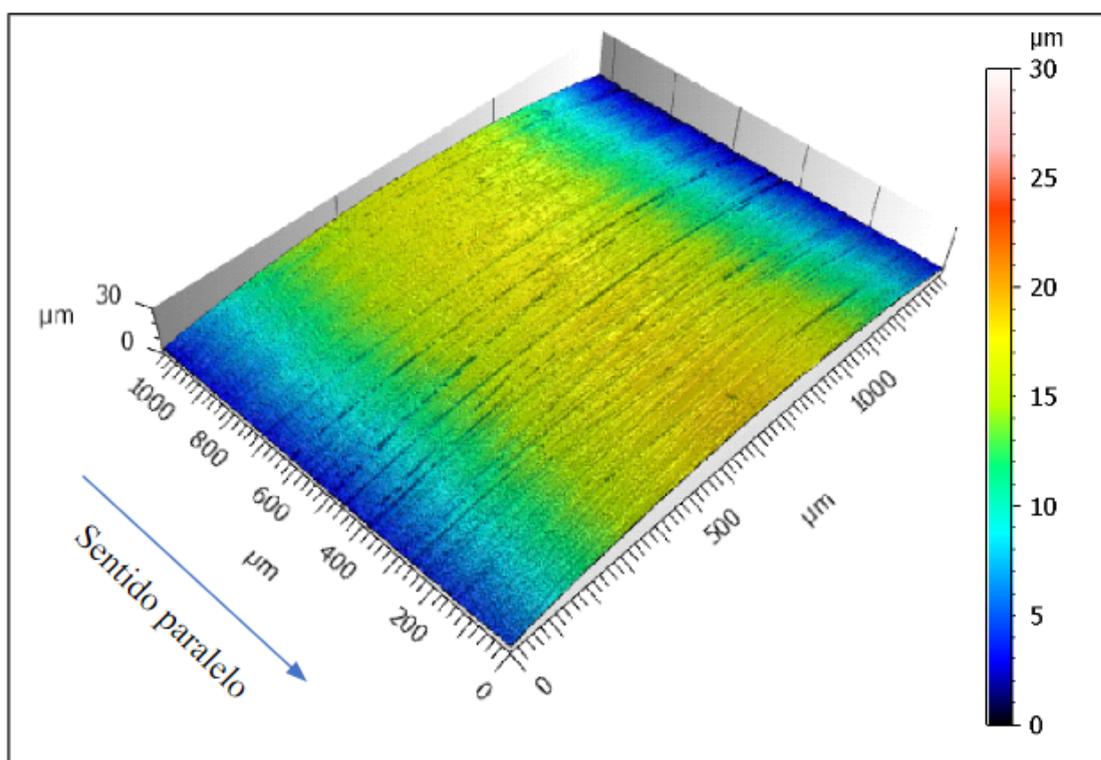
Os resultados apresentados neste item serão divididos em duas partes: a primeira abordando visualização 3D das superfícies, já a segunda correspondendo à apresentação dos perfis de rugosidade e análise dos parâmetros topográficos.

4.2.1 Visualização das superfícies

4.2.1.1 Forma bruta

A superfície apresentada na Figura 31 traz a forma bruta da parede lisa do tubo. Primeiramente, percebe-se a visualização dos passes característicos do processo de lixamento. Nessa imagem é possível visualizar o formato cilíndrico da parede, de modo a esclarecer sua variação dimensional nos eixos cartesianos.

Figura 31 – Forma bruta da parede lisa do tubo

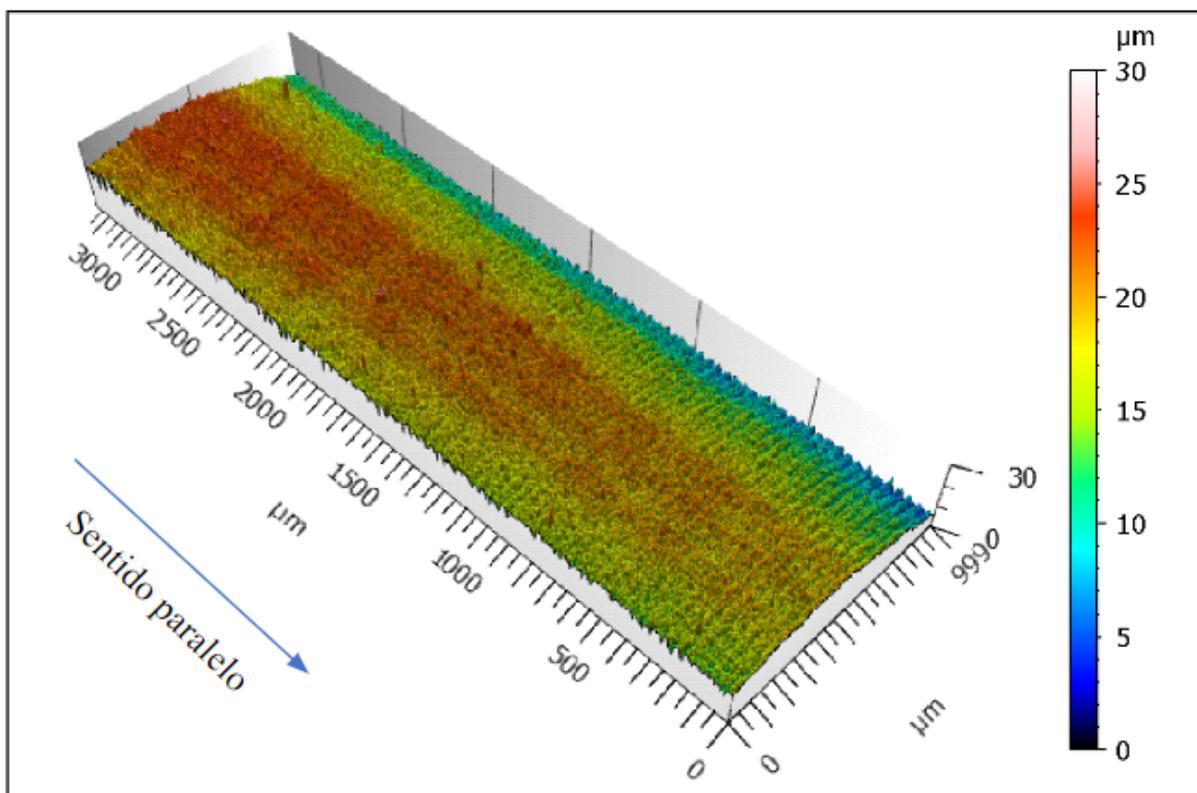


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A projeção axonométrica apresentada na Figura 32 corresponde à forma bruta da ranhura. É possível observar, na região da borda, que o relevo é menor. Isso se deve ao

processo de eletroerosão, onde as cargas elétricas tendem a se concentrar nos cantos e maior quantidade de material é removido.

Figura 32 – Forma bruta da ranhura

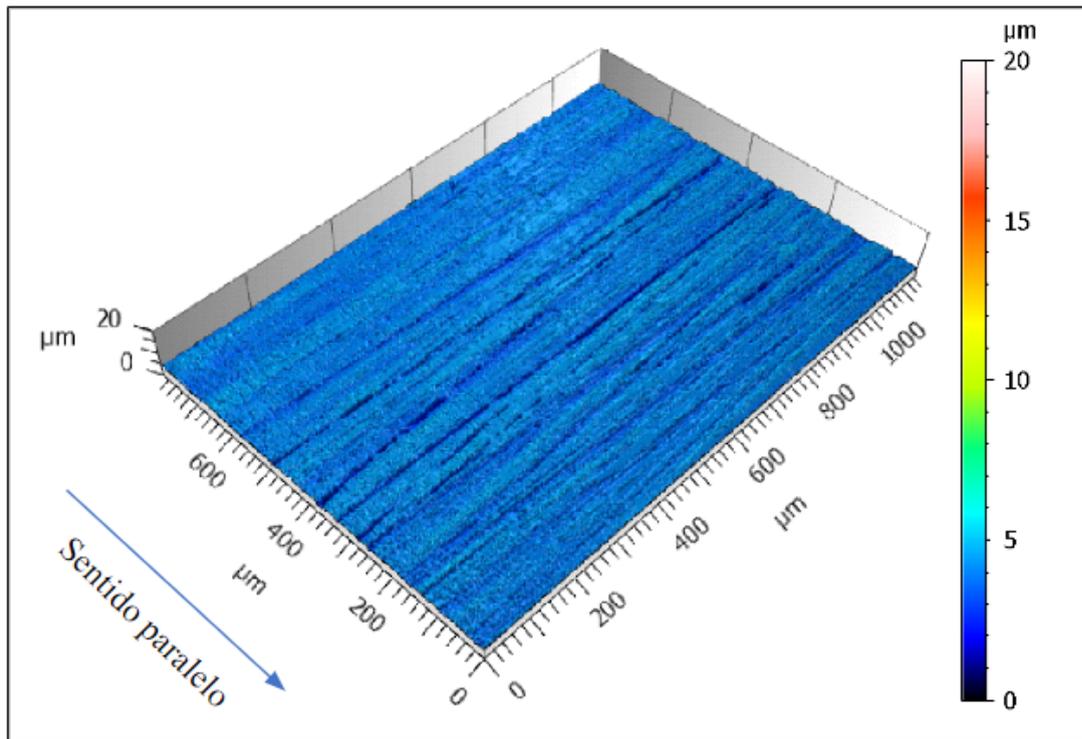


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.2.1.2 Rugosidade

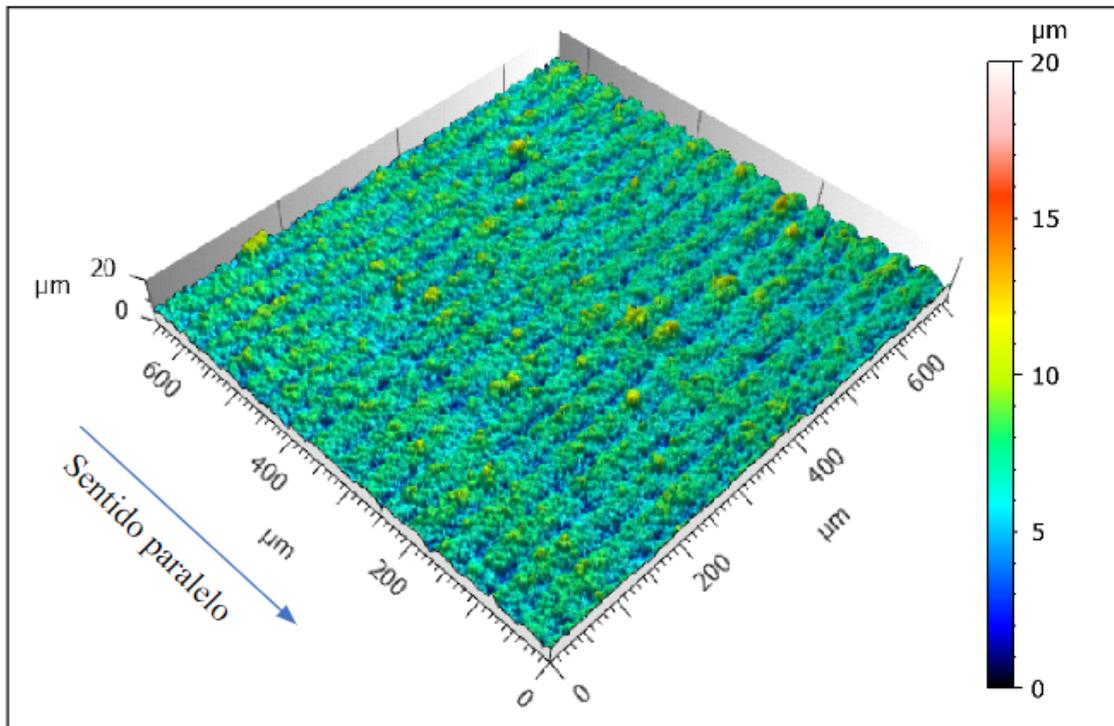
As Figuras 33 e 34 apresentam, respectivamente, a visualização da rugosidade da parede lisa e da ranhura. Pelas imagens é possível verificar, através da leitura das legendas com valores, que os picos da rugosidade da ranhura são mais proeminentes em comparação ao da parede lisa. O processo de usinagem ao qual cada superfície foi submetida corrobora com as imagens obtidas.

Figura 33 – Rugosidade da parede lisa do tubo



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Figura 34 – Rugosidade da ranhura



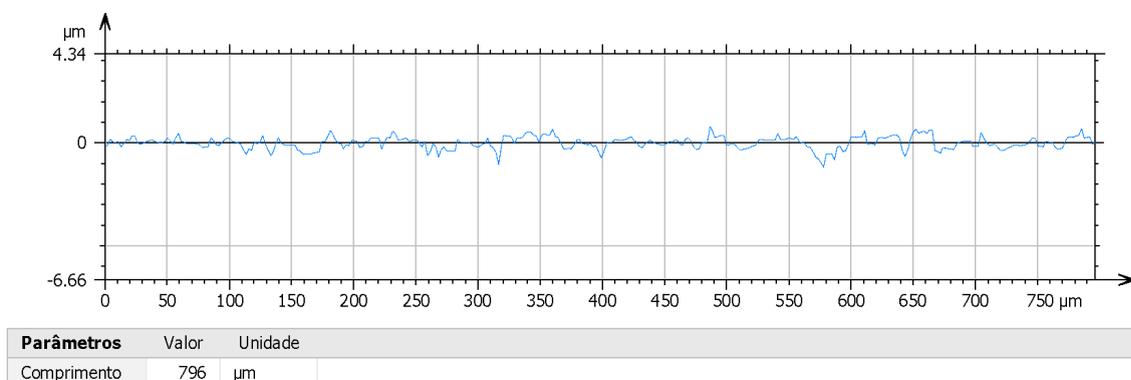
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.2.2 Análise dos perfis de rugosidade e parâmetros topográficos

4.2.2.1 Parede lisa

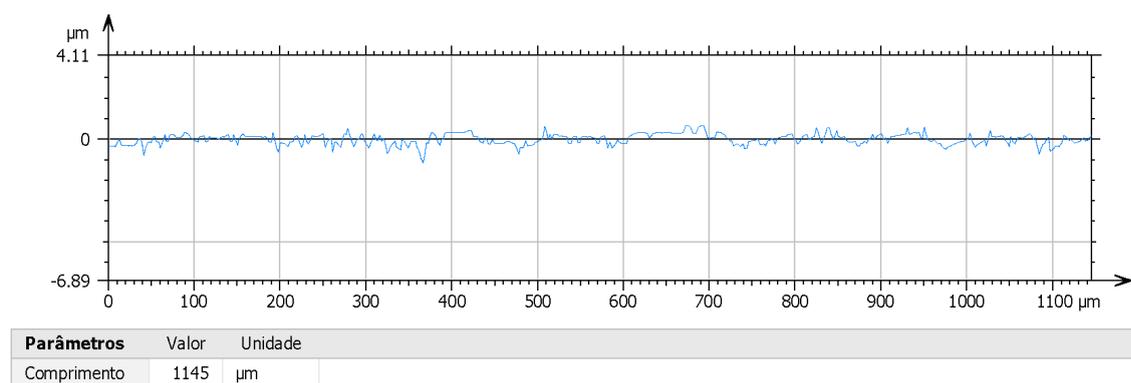
Os perfis de rugosidade foram traçados paralelamente e perpendicularmente ao passe da usinagem. As Figuras 35 e 36 a seguir apresentam os perfis da parede lisa. Percebe-se que não há significativa diferença entre ambos, sugerindo que o processo de lixamento foi bem executado de modo a uniformizar a superfície da parede lisa.

Figura 35 – Perfil topográfico paralelo a usinagem



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Figura 36 – Perfil topográfico perpendicular a usinagem

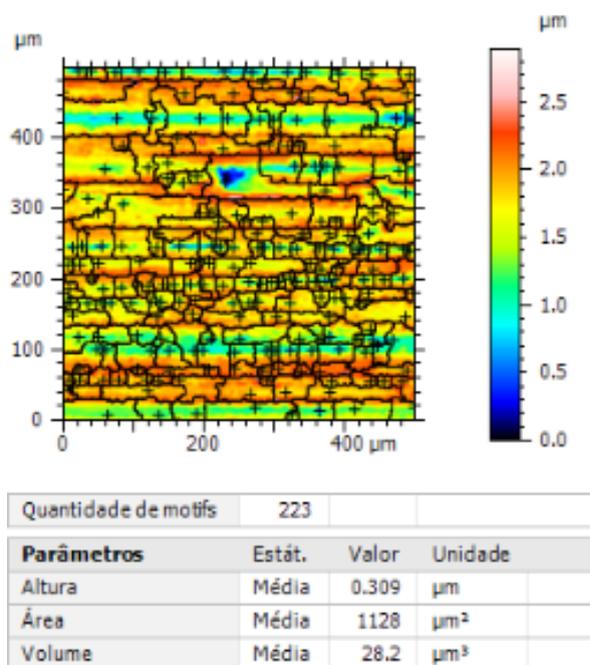


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Assim, os parâmetros topográficos obtidos na coleta de dados da parede lisa foram: $S_z = 5,60 \mu\text{m}$, $S_a = 0,26 \mu\text{m}$ e $S_q = 0,35 \mu\text{m}$.

É também pertinente salientar que, a partir da análise de motivos trazida na Figura 37, um volume médio de $28,2 \mu\text{m}^3$ foi obtido.

Figura 37 – Análise de motivos da superfície da parede lisa

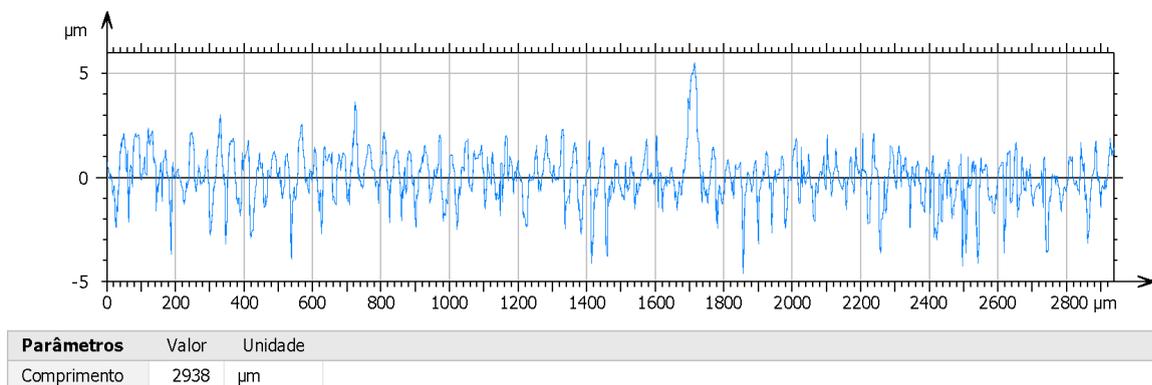


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.2.2.2 Ranhura

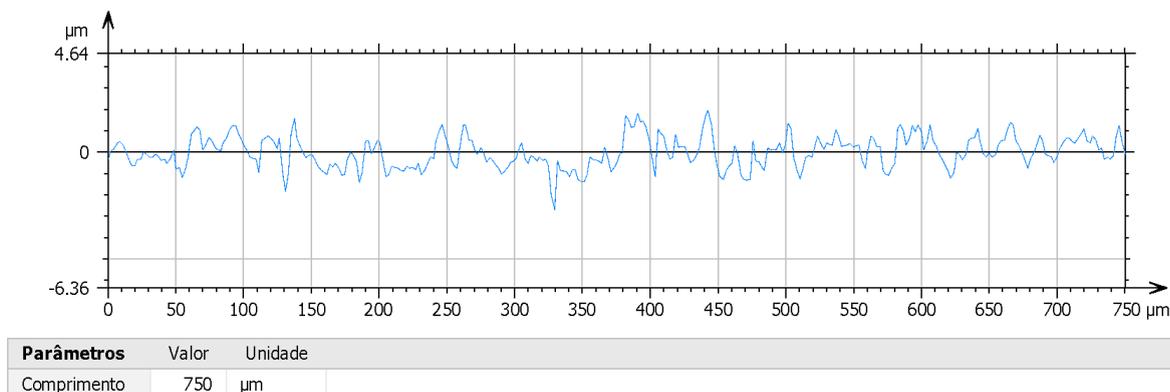
As Figuras 38 e 39 a seguir apresentam os perfis da ranhura, também traçados de maneira paralela e perpendicular. Nesse caso, percebe-se que há significativa diferença entre ambos, onde a rugosidade ao longo do perfil paralelo é mais intensa. Vale mencionar que é neste sentido que o fluido percorre a ranhura ao longo do tubo trocador de calor, portanto, tal perfil pode ser mais significativo para eventuais perturbações.

Figura 38 – Perfil topográfico paralelo



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Figura 39 – Perfil topográfico perpendicular

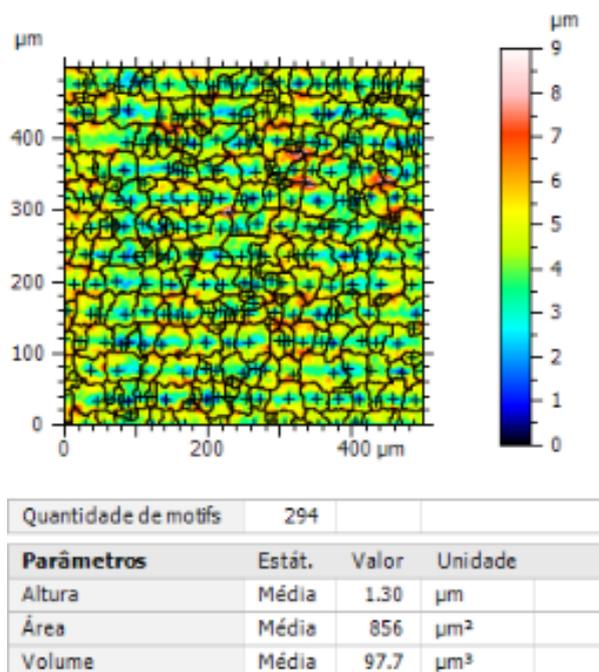


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Para este caso, os parâmetros topográficos obtidos na coleta de dados da ranhura foram: $S_z = 19,70 \mu\text{m}$, $S_a = 1,01 \mu\text{m}$ e $S_q = 1,30 \mu\text{m}$.

Para a superfície da ranhura, a partir da análise de motivos apresentada na Figura 40, um volume médio no valor de $97,7 \mu\text{m}^3$ foi obtido.

Figura 40 – Análise de motivos da superfície da ranhura



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

4.2.2.3 Comparação dos resultados topográficos e considerações

Os valores dos parâmetros topográficos S_a , S_q e S_z obtidos após coleta e tratamento de dados da superfície da ranhura são cerca de quatro vezes maiores em comparação à superfície da parede lisa do tubo. Além disso, o valor do volume dos motivos obtidos na ranhura é cerca de três vezes e meio maior do que o da parede lisa.

A comparação através de gráfico dos valores dos parâmetros relevantes S_a e S_q para parede lisa e ranhura pode ser visualizada na Figura 41 a seguir.

Figura 41 – Comparação dos valores dos parâmetros Sa e Sq para parede lisa e ranhura



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Em suma, é possível afirmar que a ranhura é consideravelmente mais rugosa. Nesse sentido, o fluido escoante em sua superfície poderá ser afetado por tal característica. A molhabilidade, bem como a transferência de calor nessas regiões poderão ser menores, o que pode acarretar em uma menor eficiência de tal modificação. Entretanto, o processo de evaporação nessa região pode ser facilitado.

Como os resultados de análise térmica do tubo sem modificações não foram condizentes, infelizmente não foi possível realizar um paralelo dos resultados obtidos na análise térmica com a análise topográfica. Entretanto, os dados de superfície obtidos neste trabalho podem ser utilizados em trabalhos futuros para eventuais correlações.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo geral analisar experimentalmente e comparar os resultados de transferência de calor e da superfície de tubos trocadores de calor verticais que atuam no processo de evaporação em película descendente. Na segunda parte deste trabalho, foram trazidos — além dos conceitos que circundam o fenômeno de FFE — diversos exemplos de aplicações destes evaporadores, principalmente utilizadas na separação de misturas que possuem baixa tolerância a altas temperaturas.

Nesse sentido, foi descrito neste trabalho toda metodologia aplicada, como equipamentos, estrutura da bancada, calibração dos termopares, análise de incerteza, difusão de calor e métodos de coleta de dados topográficos. Portanto, uma tentativa de analisar comparativamente dois trocadores de calor *falling film* tubulares, sem e com inserção de ranhuras foi realizada, de modo a coletar dados e buscar padrões.

Entretanto, a parte dos resultados que aborda a análise térmica do tubo sem modificações não foi satisfatória, visto que o resultado obtido possui caráter absurdo. Uma das possíveis causas para tal resultado absurdo seria uma folga na parte da haste onde há a saída do termopar para o contato com a parede interna, levando em uma medição incorreta por parte de alguns termopares que tiveram que ser excluídos na análise estatística.

Já os resultados da análise térmica do tubo ranhurado foram mais condizentes com trabalhos anteriores. Os resultados mostram que, para um fluxo de aproximadamente 50.000 W/m², o CTC foi menor com uma vazão de 200L/h do que quando utilizado 240L/h. Em fluxos menores, aproximadamente 12.000 e 29.000 W/m², a troca de calor se mostrou muito parecida para ambas às vazões, apresentando um pequeno aumento no CTC para a vazão de 200 L/h. Isso pode significar um efeito isolante de uma película mais espessa, ou apenas variação dentro do campo de incerteza experimental.

Foi apresentado que os parâmetros topográficos Sa, Sq e Sz na ranhura são cerca de quatro vezes maiores do que na parede lisa do tubo. Além disso, o volume dos motivos na ranhura é cerca de três vezes e meio maior do que na parede lisa. Em resumo, a ranhura é consideravelmente mais rugosa, o que pode afetar o escoamento do fluido em sua superfície. A molhabilidade e a transferência de calor nessas regiões podem ser menores, resultando em menor eficiência. No entanto, pode ser que a evaporação seja facilitada nesta região. Infelizmente, não foi possível comparar os resultados da análise térmica com a análise topográfica devido a problemas nos dados coletados do tubo não modificado. Apesar disso, os dados de superfície obtidos podem ser usados em futuros estudos para possíveis correlações.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Uma vez observado que a posição do arejador em relação ao distribuidor possui influência na estabilidade da película, sugere-se a fabricação de um distribuidor cônico de material metálico de modo evitar pequenos desgastes e deformações presentes no atual distribuidor de Teflon. Nesse sentido, sugere-se também buscar uma maneira de alinhar concentricamente a saída de água pelo centro do arejador com a ponta do distribuidor cônico, bem como garantir o nivelamento de um modo mais prático. A fabricação de um distribuidor no formato de uma semi-esfera também pode ser aconselhável.

Outra sugestão importante para próximos trabalhos seria fabricar as hastes condutoras dos termopares de material metálico, de modo também a minimizar desgaste e interferência de qualquer deformação. Ademais, sugere-se tentar soldar os termopares na parede interna do tubo utilizando tais hastes como guia, entretanto esse procedimento deverá ser realizado com termopares de fio ao invés dos de haste blindada.

Também pode ser realizadas alterações na seção de testes, como por exemplo utilizar tubos de maior comprimento. Isso permitiria obter resultados com variação de temperatura mais expressiva entre os pontos de medição do eixo vertical, possibilitando outras análises.

Por fim, sugere-se fortemente que os testes sejam repetidos e reproduzidos novamente, de modo a garantir repetitividade. Principalmente os testes realizados no tubo sem modificações, que neste trabalho apresentou resultado absurdo. Nesse sentido, por serem experimentais, os dados coletados estão suscetíveis a efeitos proporcionados por diversas variáveis, muitas vezes difíceis de serem consideradas ao longo dos experimentos.

REFERÊNCIAS

ABED, Azher M. *et al.* The role of enhancement techniques on heat and mass transfer characteristics of shell and tube spray evaporator: a detailed review. **Applied Thermal Engineering**, [S.L.], v. 75, p. 923-940, jan. 2015. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.020>

AQUATECH. DESALINATION: OUR ESSENTIAL GUIDE TO DESALINATION AND THE GLOBAL WATER CRISIS. 2019. Disponível em:

<https://www.aquatechtrade.com/news/desalination/desalination-essential-guide/#:~:text=By%20converting%20saline%20water%2C%20the,cent%20of%20total%20water%20supply>

Acesso em: 25 ago. 2022.

BOMTEMPO, Gabriel Vaz de Oliveira. **ANÁLISE DA RUGOSIDADE EM AMOSTRAS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA METÁLICA E TIPOS DE ROSCAS PARA APLICAÇÕES EM IMPLANTODONTIA**. 2018. 54 f. TCC - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em:

<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/23944/3/AnaliseRugosidadeAmostras.pdf>.

Acesso em: 03 jul. 2022.

BOUROUNI, K. *et al.* **Modelling of heat and mass transfer in a horizontal-tube falling-film evaporator for water desalination**. *Desalination*, [S.L.], v. 116, n. 2-3, p. 165-183, set. 1998. Elsevier BV.

[http://dx.doi.org/10.1016/s0011-9164\(98\)00193-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0011-9164(98)00193-3)

CHEN, H.; JEBSON, R. Factors affecting heat transfer in falling film evaporators. **Food and Bioproducts Processing**, Elsevier, v. 75, n. 2, p. 111–116, 1997.

CHUN, K. R.; SEBAN, R. A.. Heat Transfer to Evaporating Liquid Films. **Journal Of Heat Transfer**, [S.L.], v. 93, n. 4, p. 391-396, 1 nov. 1971. ASME International.

<http://dx.doi.org/10.1115/1.3449836>

DUMPLER, Joseph; HUPPERTZ, Thom; KULOZIK, Ulrich. Invited review: heat stability of milk and concentrated milk. **Journal Of Dairy Science**, [S.L.], v. 103, n. 12, p. 10986-11007, dez. 2020. American Dairy Science Association.

<http://dx.doi.org/10.3168/jds.2020-18605>

FUJITA, Toshihiko; UEDA, Tatsuhiro. Heat transfer to falling liquid films and film breakdown—I. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 97-108, fev. 1978. Elsevier BV.

[http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(78\)90212-0](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(78)90212-0)

FUJITA, Y.; TSUTSUI, M. Experimental investigation of falling film evaporation on horizontal tubes. **Heat Transfer - Japanese Research**, v. 27, n. 8, p. 609–618, 1998.

GOURDON, Mathias; INNINGS, Fredrik; JONGSMA, Alfred; VAMLING, Lennart. Qualitative investigation of the flow behaviour during falling film evaporation of a dairy product. **Experimental Thermal And Fluid Science**, [S.L.], v. 60, p. 9-19, jan. 2015. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.07.017>

HOU, Hao; BI, Qincheng; ZHANG, Xiaolan. Numerical simulation and performance analysis of horizontal-tube falling-film evaporators in seawater desalination. **International Communications In Heat And Mass Transfer**, [S.L.], v. 39, n. 1, p. 46-51, jan. 2012. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.08.023>

HU, Po; HU, Zhen. Numerical Study of the Impingement of Water Film on a Small Attached Bulging Plate on a Vertical Plane. **Frontiers In Energy Research**, [S.L.], v. 9, n. 678495, p. 11-12, 24 maio 2021. Frontiers Media SA.

<http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2021.678495>

HUANG, X.G.; YANG, Y.H.; HU, P. Experimental study of falling film evaporation in large scale rectangular channel. **Annals Of Nuclear Energy**, [S.L.], v. 76, p. 237-242, fev. 2015. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2014.09.053>

HUTCHINGS, I.M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. University of Cambridge, 1992.

ISHIGAI, Seikan et al. Hydrodynamics and Heat Transfer of Vertical Falling Liquid Films: Part 1, Classification of Flow Regimes. **Bulletin of Jsme**, v. 15, n. 83, p.594- 602, 1972. Japan Society of Mechanical Engineers.

<http://dx.doi.org/10.1299/jsme1958.15.594>

JANSSEN, T. D.. **Water Falling Film Evaporation on a Vertical Tube**. Florianópolis, 2019. 39 p.

JEBSON, R. Selwyn; CHEN, Hong. Performances of falling film evaporators on whole milk and a comparison with performance on skim milk. **Journal Of Dairy Research**, [S.L.], v. 64, n. 1, p. 57-67, fev. 1997. Cambridge University Press (CUP).

<http://dx.doi.org/10.1017/s0022029996001963>

JACOBS, Tevis D. B.; PASTEWKA, Lars. Surface topography as a material parameter. **Mrs Bulletin**, [S.L.], v. 47, n. 12, p. 1205-1210, dez. 2022. Springer Science and Business Media LLC.

<http://dx.doi.org/10.1557/s43577-022-00465-5>.

JI, Wen-Tao *et al.* Falling film evaporation and nucleate pool boiling heat transfer of R134a on the same enhanced tube. **Applied Thermal Engineering**, [S.L.], v. 147, p. 113-121, jan. 2019. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.062>

KÖROĞLU, Batikan; LEE, Kee Sung; PARK, Chanwoo. Nano/micro-scale surface modifications using copper oxidation for enhancement of surface wetting and falling-film heat transfer. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, [S.L.], v. 62, p. 794-804, jul. 2013. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.040>

KUBIAK, K.J.; WILSON, M.C.T.; MATHIA, T.G.; CARVAL, Ph.. Wettability versus roughness of engineering surfaces. **Wear**, [S.L.], v. 271, n. 3-4, p. 523-528, jun. 2011. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.03.029>

LEHENG CHEMICAL EQUIPMENT MANUFACTURING (China). **Animation of MVR Falling Film Evaporator**. 2017. Disponível em:+

<https://www.youtube.com/watch?v=gFK2w4lx4i0>. Acesso em: 22 ago. 2022.

LEHENG CHEMICAL EQUIPMENT MANUFACTURING (China). **3T/h MVR Falling Film Evaporator for Ethanol Extract Concentrating**. Disponível em:

<https://www.lhevaporator.com/case-studies/productdetails/21/6#productsinvolved>. Acesso em: 22 ago. 2022.

LYLE, Oliver. **The Efficient Use of Steam**. London: Her Majesty'S Stationery Office, 1947.

MIRANDA, José Lucas Furlanetto. **Análise experimental do processo de evaporação de película descendente em placa vertical utilizando superfícies modificadas**. 2017. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PALEN, J. W.; WANG, Qi; CHEN, J. C. Falling film evaporation of binary mixtures. *Aiche Journal*, v. 40, n. 2, p.207-214, fev. 1994. Wiley.

<http://dx.doi.org/10.1002/aic.690400203>

PINTO, J. C. P.; PADILHA, A.; SCALON, V. L. **Simulação teórica da transferência de calor e massa de uma película líquida descendente ao longo da parede vertical interna de um tubo cilíndrico**. *Mecânica Computacional*, XXII, 2003, 1736 – 1746.

[10.5151/chemeng-cobeq2014-1712-17936-159659](http://dx.doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-1712-17936-159659)

RIBATSKI, G.; JACOBI, A. M. Falling-film evaporation on horizontal tubes—a critical review. **International Journal of Refrigeration**, v. 28, n. 5, p. 635–653, ago. 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.12.002>

RIVEIRO, Antonio et al. Laser Surface Texturing of Polymers for Biomedical Applications. **Frontiers In Physics**, [S.L.], v. 16, n. 6, 27 fev. 2018. Frontiers Media SA.

<http://dx.doi.org/10.3389/fphy.2018.00016>

SALVAGNINI, W. M.; TAQUEDA, M. E. S. **A Falling-Film Evaporator with Film Promoters**. 2004. Department of Chemical Engineering, Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

SILVEIRA, Arlan Caldas Pereira. **THERMODYNAMIC AND HYDRODYNAMIC CHARACTERIZATION OF THE VACUUM EVAPORATION PROCESS DURING CONCENTRATION OF DAIRY PRODUCTS IN A FALLING FILM EVAPORATOR**. 2015. 179 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

SHEN, Shengqiang et al. **Heat transfer performance and bundle-depth effect in horizontal-tube falling film evaporators**. **Desalination And Water Treatment**, [S.L.], v. 51, n. 4-6, p. 830-836, jan. 2013. Informa UK Limited.

<http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2012.699349>.

SOUZA, Jeferson Nilton. **Análise experimental do processo de evaporação em película descendente sobre tubo vertical**. Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2018.

STALDER, Aurélien F. *et al.* Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [S.L.], v. 364, n. 1-3, p. 72-81, jul. 2010. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.04.040>

STÄRK, Alexander et al. Impact of Tube Surface Properties on Crystallization Fouling in Falling Film Evaporators for Seawater Desalination. **Heat Transfer Engineering**, [S.L.], v. 38, n. 7-8, p. 762-774, 6 jul. 2016. Informa UK Limited.

<http://dx.doi.org/10.1080/01457632.2016.1206418>.

VAF AEI, Saeid; WEN, Dongsheng; BORCA-TASCIUC, Theodorian. Nanofluid Surface Wettability Through Asymptotic Contact Angle. **Langmuir**, (ACS), v. 27, n. 6, p. 2211-2218, 15 mar. 2011.

<http://dx.doi.org/10.1021/la104254a>

WANG, Qunchang et al. Heat Transfer Characteristics of Falling Film Process on Coated Division Tubes: Effect of the Surface Configurations. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 14, p.6622-6629, 21 jul. 2010. American Chemical Society (ACS).

<http://dx.doi.org/10.1021/ie9018676>

WANG, Xianmao *et al.* Prediction of falling film evaporation on the AP1000 passive containment cooling system using ANSYS FLUENT code. **Annals Of Nuclear Energy**, [S.L.], v. 95, p. 168-175, set. 2016. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2016.05.014>

WILSON, S.d.r.. The stability of a dry patch on a wetted wall. **International Journal of Heat And Mass Transfer**, v. 17, n. 12, p.1607-1615, dez. 1974. Elsevier BV.

[http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(74\)90068-4](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(74)90068-4)

WUXI CHEMICAL EQUIPMENT (China). **High-Efficiency Falling Film Evaporator/Reboiler**. Disponível em:

<http://www.wce.cn/en/gxjmszfq.html#:~:text=It%20is%20widely%20used%20in,the%20light%20and%20food%20industry.&text=A%20falling%20film%20evaporator%20is%20a%20vertical%20tubular%20heat%20exchanger>. Acesso em: 18 ago. 2022.

ZHANG, Tianjiao; MA, Liangdong; ZHANG, Jili. Experimental study on falling film evaporation characteristics of R-134a outside of a vertical enhanced tube. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, [S.L.], v. 180, p. 121805, dez. 2021. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121805>

ZHANG, Xinxin et al. Effects of different pretreatments on flavonoids and antioxidant activity of *Dryopteris erythrosora* leave. **Plos One**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 1-17, 2 jan. 2019. Public Library of Science (PLoS).

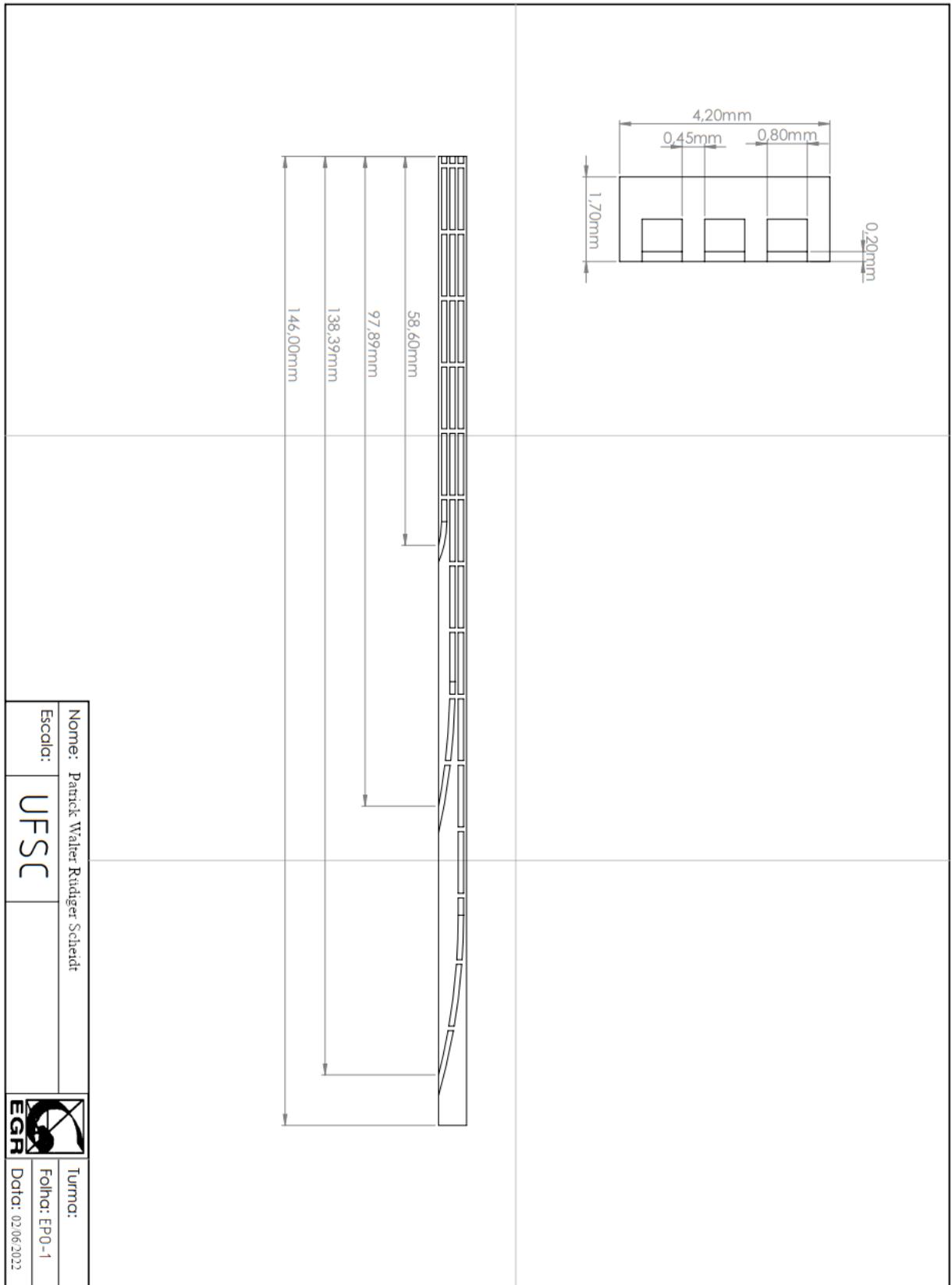
APÊNDICE A – Coeficientes de calibração dos termopares

A tabela A. 1. traz as constantes de calibração dos termopares.

Tabela A. 1. – Constantes de calibração dos termopares

Termopar	a_n	b_n	c_n	d_n
201	4.67e+07	-4.44e+05	2.54e+04	-3.93e-02
202	4.59e+07	-4.58e+05	2.55e+04	-1.41e-01
203	3.80e+07	-3.86e+05	2.53e+04	-2.36e-02
204	4.02e+07	-3.76e+05	2.52e+04	1.63e-01
205	3.29e+07	-3.18e+05	2.51e+04	2.69e-01
206	3.12e+07	-3.31e+05	2.52e+04	1.32e-01
207	3.27e+07	3.53e+05	2.53e+04	5.23e-02
208	5.87e+07	-5.01e+05	2.55e+04	-8.75e-02
209	3.92e+07	-4.02e+05	2.54e+04	-8.75e-02

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

APÊNDICE B – Desenho técnico da solução para fixação dos termopares

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO
Laboratório de Metrologia ECIL
Rede Brasileira de Calibração

N° 1795/16

Fls: 2/4

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO:

Os resultados a seguir apresentados referem-se à situação do instrumento conforme recebido pelo Laboratório, sendo V_r o valor de referência, V_s o valor do sensor em calibração e Erro a diferença entre a indicação do sensor em calibração e a tabela de referência.

Profundidade de imersão (mm)	Padrão Utilizado	V_r (°C)	V_s (Ω)	Erro (°C)	U (°C)	Fator K	V_{eff}
250	Ponto de Gelo	0,00	99,992	-0,02	0,01	2,00	∞
250	909/689	30,02	111,693	0,03	0,02	2,00	∞
250	909-1384	156,19	159,660	0,07	0,03	2,00	∞
250	909-1384	232,15	187,649	0,08	0,03	2,00	∞
300	909-1384	419,60	253,850	0,08	0,10	2,00	∞

Ro inicial = 99,99 Ω

Ro final = 99,9917 Ω

U = 0,0039 Ω

Os resultados acima apresentados referem-se à média de 4 leituras, tomadas em intervalos de 1 minuto. A corrente de medição utilizada foi de 1 mA. A incerteza expandida de medição relatada (U) é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivo corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

A temperatura (t°C) foi relacionada com a resistência do termômetro $R_{(t°C)}$ e a resistência no ponto de gelo pela equação:

$$R_{(t°C)}/R_{(0°C)} = 1 + At + Bt^2, \text{ onde:}$$

$$a = 3,9116E-03$$

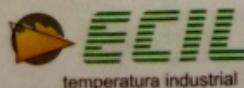
$$b = -5,8279E-07$$

Atenção: É essencial que o valor de $R_{(0°C)}$ seja medido em intervalos periódicos e que sempre o valor mais recente seja usado na fórmula.

Esses coeficientes foram usados para gerar a tabela de Resistência x Temperatura x Erro, deste Certificado. A incerteza dos valores determinados através da equação de interpolação é:

Temperatura (°C)	Incerteza (°C)	Fator K	V_{eff}
0	0,05	2,87	4
30	0,05	2,52	6
156	0,05	2,43	7
232	0,06	2,37	8
420	0,11	2,00	∞

IMPO00006 REV. 4



Ecil Produtos e Sistemas de Medição e Controle Ltda

Rua Benjamin da Silveira Baldy, 2001 - 18170-000 - Piedade - SP

Tel.: (15) 3244-8019 Fax: (15) 3244-1672

www.ecil.com.br/www selab@ecil.com.br



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO
 Laboratório de Metrologia ECIL
 Rede Brasileira de Calibração

Nº 1795/16
 Fls: 3/4

RASTREABILIDADE DOS PADRÕES UTILIZADOS

1. Termômetros Padrão:

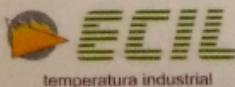
Identificação	Tipo	Certificado	Validade	Rastreabilidade
909/689	25 Ohms	0067/16	20/01/2017	RBC/ECIL
909-1384	25 Ohms	0066/16	28/01/2017	RBC/ECIL

2. Instrumentos Padrão:

Descrição	Modelo	Certificado	Validade	Rastreabilidade
Ponte Resistiva	ASL F700	DIMCI 2238/2015*	04/12/2017	INMETRO

*O certificado acima mencionado refere-se ao resistor padrão usado para ajuste periódico da Ponte (Ajuste válido até 01/04/17).

Travis
 IMP000006 REV. 4



Ecil Produtos e Sistemas de Medição e Controle Ltda

Rua Benjamin da Silveira Baldy, 2001 - 18170-000 - Piedade - SP

Tel.: (15) 3244-8019 Fax.: (15) 3244-1672

www.ecil.com.br selab@ecil.com.br



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO
Laboratório de Metrologia ECIL
Rede Brasileira de Calibração

Nº 1795/16

Fls: 4/4

Tabela: Temperatura x Erro

Temperatura (°C)	Resistência (Ohm)	Erro (°C)
0	99,9917	-0,02
5	101,9459	-0,02
10	103,8972	-0,01
15	105,8455	-0,01
20	107,7910	-0,01
25	109,7335	0,00
30	111,6732	0,00
35	113,6099	0,00
40	115,5437	0,01
45	117,4746	0,01
50	119,4025	0,01
55	121,3276	0,02
60	123,2497	0,02
65	125,1690	0,02
70	127,0853	0,03
75	128,9987	0,03
80	130,9092	0,03
85	132,8167	0,04
90	134,7214	0,04
95	136,6231	0,04
100	138,5220	0,04
105	140,4179	0,05
110	142,3109	0,05
115	144,2010	0,05
120	146,0882	0,05
125	147,9724	0,06
130	149,8538	0,06
135	151,7322	0,06
140	153,6078	0,06
145	155,4804	0,06
150	157,3501	0,07
155	159,2169	0,07
160	161,0807	0,07
165	162,9417	0,07
170	164,7997	0,07
175	166,6548	0,08
180	168,5071	0,08
185	170,3564	0,08
190	172,2027	0,08
195	174,0462	0,08
200	175,8868	0,08
205	177,7244	0,09
210	179,5592	0,09
215	181,3910	0,09

Temperatura (°C)	Resistência (Ohm)	Erro (°C)
220	183,2199	0,09
225	185,0459	0,09
230	186,8690	0,09
235	188,6891	0,09
240	190,5064	0,09
245	192,3207	0,09
250	194,1321	0,09
255	195,9406	0,09
260	197,7462	0,10
265	199,5489	0,10
270	201,3487	0,10
275	203,1455	0,10
280	204,9395	0,10
285	206,7305	0,10
290	208,5186	0,10
295	210,3038	0,10
300	212,0861	0,10
305	213,8655	0,10
310	215,6419	0,10
315	217,4155	0,10
320	219,1861	0,10
325	220,9538	0,10
330	222,7186	0,10
335	224,4805	0,10
340	226,2395	0,09
345	227,9956	0,09
350	229,7487	0,09
355	231,4989	0,09
360	233,2463	0,09
365	234,9907	0,09
370	236,7322	0,09
375	238,4708	0,09
380	240,2064	0,09
385	241,9392	0,09
390	243,6690	0,08
395	245,3959	0,08
400	247,1200	0,08
405	248,8410	0,08
410	250,5592	0,08
415	252,2745	0,08
420	253,9869	0,07

IMP000006 REV. 4



Ecil Produtos e Sistemas de Medição e Controle Ltda

Rua Benjamin da Silveira Baldy, 2001 - 18170-000 - Piedade - SP

Tel.: (15) 3244-8019 Fax: (15) 3244-1672

www.ecil.com.br

selab@ecil.com.br