



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS - PGMAT

Bianca Müller Martins

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DA USINAGEM FOTOQUÍMICA EM  
CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL E SUA INFLUÊNCIA NA UNIÃO POR  
DIFUSÃO**

Florianópolis, SC

2023

Bianca Müller Martins

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DA USINAGEM FOTOQUÍMICA EM  
CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL E SUA INFLUÊNCIA NA UNIÃO POR  
DIFUSÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof. Dra. Marcia Barbosa Henriques Mantelli

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Antonio Xavier

Florianópolis, SC

2023

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

Martins, Bianca Müller

Estudo e Caracterização da Usinagem Fotoquímica em Chapas de Aço Inoxidável e sua Influência na União Por Difusão / Bianca Müller Martins ; orientador, Marcia Barbosa Henriques Mantelli, coorientador, Fábio Antonio Xavier, 2023.

147 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Ataque fotoquímico, AISI 316L . 3. Trocadores de calor compacto . 4. Usinagem química. 5. União por difusão. I. Mantelli, Marcia Barbosa Henriques. II. Xavier, Fábio Antonio. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. IV. Título.

Bianca Müller Martins

Estudo e Caracterização da Usinagem Fotoquímica em Chapas de Aço Inoxidável e sua  
Influência na União Por Difusão

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

\_\_\_\_\_  
Prof. Rubens Maribondo do Nascimento, Dr

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

\_\_\_\_\_  
Prof. Tatiana Bendo, Dr<sup>a</sup>

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi  
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia de  
Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

\_\_\_\_\_  
Prof. João Batista Rodrigues Neto, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação

\_\_\_\_\_  
Prof. Marcia Barbosa Henriques Mantelli, Dra.

Orientadora

\_\_\_\_\_  
Prof. Fábio Antonio Xavier, Dr.

Coorientador

Florianópolis, 25 de agosto de 2023.

Dedico esse trabalho ao meu filho, Caio Arthur.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a professora Márcia Mantelli e a equipe do LEPTEN / LABTUCAL pela disponibilidade de equipamentos e estrutura para realização deste estudo e pelo acolhimento desde a minha chegada lá em 2019.

Ao LABMAT pela disponibilidade de estrutura para realização de ensaios.

Agradeço também pela orientação da professora neste trabalho, pela paciência e confiança no meu trabalho, além de toda dedicação com a nossa equipe.

Ao professor Fabio Xavier pela coorientação deste trabalho. Obrigada por todo tempo disponibilizado, reuniões de alinhamento de atividades, ideias e suporte durante esse período.

A equipe de “materiais” maravilhosa, obrigada de todo meu coração a Maria Cristina, Iara, Lucas e Gian por toda vivência, auxílio em atividades, discussões, dúvidas sanadas, momentos de descontração e amizade.

A minha amiga querida Dijane por todas as conversas e desabafos.

Aos demais alunos do Labtucal por toda ajuda, conversas, risadas, fofocas e cervejas compartilhadas. Ao Bruno pela ajuda em relação aos ensaios de corrosão.

Aos técnicos e engenheiros do laboratório por todo auxílio com as atividades. Em especial ao Leandro, sempre disposto a nos ajudar com questões práticas, mas também por todo carinho comigo e por animar o dia de todos, começando sempre pelo cafezinho.

Ao meu filho Caio Arthur por ser minha principal motivação.

Ao meu namorado Leonardo pelo apoio, carinho e momentos de descontração.

A minha família querida por todo o suporte e por acreditarem em mim. Principalmente a minha mãe e as minhas irmãs por serem minha rede de apoio.

As minhas amigas de longa data por nunca soltarem a minha mão, Thamy, Ana, Bru, Ray, Fran e Karol.

Sem cada um de vocês eu não estaria aqui hoje.

## RESUMO

Trocadores de calor compactos de circuito impresso (*printed circuit heat exchangers-PCHE*) são utilizados em aplicações com restrições de espaço e massa, como em plataformas *off-shore* de extração de petróleo. Podem apresentar uma redução de até 85% em peso e volume em relação aos trocadores mais convencionais, como os do tipo casca-tubo. O domínio nacional da tecnologia envolvendo a fabricação destes equipamentos é estratégico, tendo em vista a importância, complexidade e custo destes dispositivos. Neste trabalho avalia-se a capacidade e viabilidade de fabricação de um protótipo de trocador de calor compacto de circuito impresso (PCHE) produzido inteiramente pela indústria nacional, uma vez que o Labtucal dispõe de forno, único na América Latina, para a união por difusão, processo de fabricação destes trocadores. Para isto, desenvolveu-se, junto a indústria nacional, fornecedores de serviço de usinagem fotoquímica de canais na forma de zigue-zague e em “S” em chapas, as quais eram empilhadas e unidas por difusão para formar o núcleo do trocador. Para estudos, algumas destas placas sofreram processo de eletropolimento. Caracterizações de superfície das chapas e canais foram realizadas, usando técnicas de interferometria óptica antes e após a fabricação dos canais, e do eletropolimento. Foram também realizadas análises microestruturais das superfícies das chapas, tanto na região de canais quanto nas de borda ou fundo do canal. Foi realizado ainda o controle da qualidade geométrica e do acabamento dos canais, para a identificação de possíveis defeitos e características provenientes das usinagens. Finalmente, foi verificada a suscetibilidade à corrosão de chapas com e sem eletropolimento. A placa com eletropolimento apresentou uma resistência à corrosão de 850,92 mV enquanto a sem eletropolimento apresentou 477,54 mV. As chapas com canais em geometria ziguezague foram soldadas por meio da técnica de união por difusão, compondo dois núcleos de trocadores, um pequeno e um de médio porte. Três amostras (blocos) foram retiradas dos trocadores e suas resistências a tração avaliadas, sendo que tensão máxima variou de 506 MPa a 604 MPa. Desta forma, os blocos foram qualificados perante a norma ASME para fabricação de vasos de pressão.

**Palavras-Chave:** Ataque fotoquímico. Usinagem química. PCHE. União por difusão. AISI 316L. Trocadores de calor compactos.

## ABSTRACT

Printed circuit compact heat exchangers (PCHE) are used in application where space and weight are big concerns, such as in petroleum off-shore platforms. Their mass and volume can be 85% lower than the conventional shell and tube heat exchangers. Holding the design and fabrication knowhow of this equipment is strategic for the Brazilian industry, especially considering their importance, complexity and cost. In the present work, the capacity and viability of the Brazilian industry to produce such equipment is evaluated, considering that Lactucal has a furnace for diffusion bonding, used in the PCHE fabrication process, unique in Latin America. In this frame, industries were prepared to produce photochemical etching of channels in plates in the zigzag and “S” geometries, which were piled and diffusion bonded in the production of the heat exchanger core. For study purposes, some of the plates were subjected to electropolishing. The plate and channel surfaces were characterized, using optical interferometry techniques, before and after the channel fabrication and electropolishing. Microstructural analysis was also performed in both the channel and edge regions. The quality control of the geometry and surface finishing of the channels was conducted, to analyze their characteristics and to find possible defects resulting from the etching. Finally, the susceptibility of the plates to corrosion was verified, for plates with and without electropolishing. The electropolished plate presented a resistance to corrosion of 850,92 mV, while without electropolishing of 477,54 mV. The plates with zigzag channels were diffusion bonded, to compose two heat exchanger cores, of small and medium sizes. Three samples (blocks) were removed from these cores and their tensile strength was evaluated. The maximum tensile strength varies from 506 MPa to 604 MPa. Therefore, these results qualified the cores using the ASME standard for pressure vessels.

**Keywords:** Photochemical machining. Chemical machining. PCHE. Diffusion bonding. AISI 316L. Compact heat exchangers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do trocador tipo casco tubo em relação ao trocador de calor compacto (PCHE).....	20
Figura 2 -Bloco unido por difusão com canais retos fabricados por usinagem fotoquímica (a) e por jato d'água (b).....	21
Figura 3 - Exemplo de canais de fluxo para trocadores de calor: projeção 3D de geometria tipo "S" (a), placa com geometria tradicional ziguezague (b), canal reto (c), canal aerofólio (d), canal em "S" (e) e canal em ziguezague (f). ....	23
Figura 4 - Classificação dos trocadores de calor por tipo de sistema em (I); por transferência em (II); por geometria em (III); por tipo de fase em (IV) e por arranjo de fluxo em (V). ....	28
Figura 5 - Esquema em 3D do PCHE em (a); detalhe dos canais de um PCHE em (b) e canal semicircular em seção transversal em (c). ....	31
Figura 6 - Layout empilhamento PCHE.....	32
Figura 7 - Micrografias das linhas de união do bloco com aumento de 200x...33	
Figura 8 - Micrografias das linhas de união do bloco com aumento de 200x...34	
Figura 9 - Exemplos de produtos usinados por Ataque Fotoquímico. ....	36
Figura 10 -Etapas do processo de usinagem fotoquímica. ....	36
Figura 11 - Turbulência gerada pelo ataque fotoquímico. ....	38
Figura 12 - Placas usinadas fotoquimicamente (a) seção transversal do núcleo do PCHE (b); esquema do núcleo configuração ziguezague (c). ....	39
Figura 13 – Aletas descontínuas em forma de S (a); Ilustração da área do fluxo para o novo modelo em S (b) e para o modelo tradicional em ziguezague (c). ....	40
Figura 14 - Configuração de canal de aerofólio para PCHE. ....	40
Figura 15 - Peixe espada em (a) e aerofólio e aleta modificada em (b).....	41
Figura 16 - Imagens do estudo de Ma et al. (2015) sobre a produção de chapas por usinagem química em formato de canais de aerofólio (a), foto do canal semicircular na seção transversal (b) e imagem com medidas dos canais (c).....	42
Figura 17 - Quatro formas de seção transversal do canal.....	43
Figura 18 – Canais ondulados em diferentes configurações: triangular (a) sinusoidal (b) trapezoidal (c). ....	43

Figura 19 - Etapas do processo de união por difusão: (a) contato das asperidades após deformação; (b) diminuição dos vazios; (c) densificação dos vazios isolados; (d) migração da interface.....	45
Figura 20 - Comparativo da seção dos diferentes núcleos unidos por difusão (a), e, micrografia da interface de um PCHE unido por difusão (b). .....	46
Figura 21 - Propriedades dos materiais de base, PS: ponto de deformação, UTS: limite máximo de tração e El: alongamento (a) e microestrutura do aço 316L antes (b) e após união (c). Resistência à tração dos aços unidos (d), em relação a linha de união e temperatura (316L) (e).....	47
Figura 22 - Comparação da resistência atingida em relação a linha de união...48	
Figura 23 - Microestruturas do material de base (BM) (a), da interface de união (DB) (b) e afastada 5 mm da linha de união (DB) (c). .....	49
Figura 24 - Microestruturas do aço após 100h em 650°C do material de base antes (a) e após a união por difusão (b). Frequência dos contornos especiais (c) (Li et al., 2011).....	50
Figura 25 - Esquema de célula eletrolítica (a); exemplo de peça antes e após eletropolimento. (b). .....	50
Figura 26 - Resultados de projeção axonométrica das placas 2B e eletropolidas (a); Micrografias da região do canal em diferentes condições de processamento (b); Resultados de rugosidade (Sa) por densidades de corrente avaliadas (c) e Alongamentos dos blocos com topografia de superfície 2B e eletropolidos (d). .....	52
Figura 27 - Curvas de Tafel com detalhamento das regiões de corrosão proposta no estudo.....	54
Figura 28 - Esquema das curvas do teste CPDP para três diferentes condições, exibindo o potencial de proteção (a), com evolução do oxigênio (b) e sem o potencial de proteção (c). .....	56
Figura 29 - Esquema de curvas típicas de CPDP de alguns metais e ligas. ....	57
Figura 30 - Fluxograma das etapas do presente estudo.....	60
Figura 31 - Desenho chapa A (a), chapa B (b), detalhamento chapa A (c) e detalhamento chapa B (d). .....	64
Figura 32 - Máquina de corte via jato d'agua presente no Labtucal.....	65
Figura 33 - Desenho técnico da chapa com a configuração zigzague. ....	67

Figura 34 - Limpeza final com álcool isopropílico nas chapas (a), chapas empilhadas (b), chapas preparadas com aplicação do HbN na chapa final (c), bloco posicionado na matriz dentro do forno (d). .....	68
Figura 35 – Curva tempo-temperatura-pressão do ciclo de união por difusão do bloco TPP. ....	69
Figura 36 -Desenho técnico da amostra de geometria alternativa em formato de aleta em S. ....	69
Figura 37 - Chapa usinada fotoquimicamente com uma parte plana para análise do fundo do canal. ....	70
Figura 38- Bancada de Eletropolimento.....	71
Figura 39 - Esquema núcleo empilhado em (a) e esquema núcleo após a remoção das bordas em (b).....	72
Figura 40 - Área de limpeza das chapas do TMP: 1 – Placas separadas para limpeza; 2 – Placas para banho ultrassônico; 3 – Banho ultrassônico; 4 – Secagem; 5 – Placas limpas e prontas para a união por difusão. ....	73
Figura 41 - Empilhamento alternado das chapas do bloco (a); bloco com a chapa com camada de HbN (b); bloco preparado na matriz (c); e bloco dentro do forno (d). ..	74
Figura 42 - Esquemas da região de corte para análise em MEV das amostras ziguezague e S. ....	76
Figura 43 - Bloco TPP seccionado ao meio em (a) e região dos canais em (b). ....	76
Figura 44 - Bloco TMP após remoção das bordas (a), visualização do bloco aberto e indicações das regiões em laranja para análise de medidas (b). ....	77
Figura 45 - Amostra de metalografia removida do bloco TPP e após a preparação metalográfica em (a); lixadeira utilizada para lixar a polir as amostras (b); MO (c) e MEV (d). ....	78
Figura 46 - Exemplo de tratamento de imagem em ImageJ. Primeiro a imagem selecionada (a), depois a região de interesse seccionada (b) e a área de interesse binarizada para posterior quantificação dos vazios (c). ....	79
Figura 47 - Esquemas de amostras para interferometria óptica: CR (a), CBZ (b), CBS (c) e Chapa teste (d), pontos em laranja de onde foi analisado em interferometria óptica. ....	81
Figura 48 - Célula eletroquímica em (a) e Porta amostra $D_{\text{máx}}=25\text{mm}$ e $D_{\text{exposto}}=14\text{mm}$ em (b).....	83

Figura 49 - Exemplo das amostras usadas para ensaio de corrosão nas 8 condições avaliadas. ....	84
Figura 50 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração.....	85
Figura 51 - Esquema do bloco com as posições das amostras removidas e analisadas em (a) e foto das amostras de tração (b). ....	86
Figura 52 - Esquema da remoção das amostras de tração do bloco TMP.....	86
Figura 53 – Placa teste com escoamento reto A (a); detalhamento placa A (b); Placa teste com escoamento em Z (c) e detalhamento placa B (d).....	88
Figura 54 - Projeção axonométrica típica da chapa CR e chapa teste.....	90
Figura 55 - Micrografias em MEV da chapa teste do fornecedor nos aumentos de 12x, 60x 500x e 2000x.....	92
Figura 56 - Chapa com geometria em ziguezague (a); chapa ziguezague eletropolida (b); chapa com geometria S (c); chapa em S eletropolida (d). ....	94
Figura 57 – Projeções axonométricas típicas das amostras conforme recebida e conforme recebida eletropolida, regiões sem canais. ....	95
Figura 58 - Projeções típicas das amostras CR, CBZ, CBZP, CBS e CBSP. ...	97
Figura 59 - Projeção típica da condição FCZ em duas diferentes escalas: 20 $\mu\text{m}$ e 8 $\mu\text{m}$ . ....	98
Figura 60 - Projeções típicas da condição FCZ e FCZP. ....	99
Figura 61 - Parâmetro de Rugosidade Sa para as amostras CR, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.....	100
Figura 62 - Parâmetro de Rugosidade Sq para as amostras CR, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.....	101
Figura 63 - Parâmetro de Rugosidade Sp para as amostras CR, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.....	102
Figura 64 - Parâmetro de Rugosidade Sv para as amostras CR, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.....	103
Figura 65 - Parâmetro de Rugosidade Sz para as amostras CR, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.....	104
Figura 66 - Parâmetros de Rugosidade Sa (a), Sq (b), Sp (c), Sv (d), Sz (e) em relação as amostras. ....	107
Figura 67 - Parâmetros de Rugosidade Sds (a) e Sdq (b) em relação as amostras. ....	110

Figura 68 - Imagens típicas em MEV das condições Z, S, ZP e SP nos aumentos 60x, 500x e 1000x na região dos canais. ....	112
Figura 69 - Imagens típicas em MEV das condições Z, S, ZP e SP nos aumentos 1000x e 2000x na região de borda das chapas. ....	113
Figura 70 - Curva de Tafel das amostras conforme recebida (CR 3 em laranja e CR2 em azul) e conforme recebida eletropolidas (CRP1 em vermelho, CRP3 em amarelo, CRP4 em cinza). ....	115
Figura 71 - Curva de Tafel das amostras CBS. (CBS1 em azul e CBS2 em laranja) e CBSP (CBSP4 em cinza, CBSP5 em amarelo, CBSP6 em vermelho). ....	116
Figura 72 - Curva de Tafel das amostras CBZ (CBZ2 em laranja e CBZ 1 em azul) e CBZP (CBZP 1 em cinza e CBZP3 em vermelho). ....	117
Figura 73 - Curva de Tafel das amostras FCZ (FCZ2 em laranja e FCZ3 em verde) e FCZP (FCZP 1 em vermelho, FCZP 2 em cinza e FCZP3 em amarelo). ....	118
Figura 74 - Correlação entre potencial de pite e Sa (rugosidade média) em relação as amostras. ....	120
Figura 75 - Micrografias típicas em MEV das condições CR, CRP, FCZ e FCZP nos aumentos 1000x e 2000x após o ensaio de corrosão. ....	121
Figura 76 - Projeção axonométrica típica da chapa do TMP da região de borda. ....	123
Figura 77 - Curva tempo-temperatura-pressão do ciclo de união por difusão do TMP. ....	124
Figura 78 - Médias das medidas dimensionais dos canais do bloco TMP. ....	125
Figura 79 - Medição da altura do bloco TMP após ciclo de união por difusão (a) e visualização dos canais do bloco (b). ....	126
Figura 80 - Médias das medidas dimensionais dos canais do bloco TPP. ....	126
Figura 81 - Micrografias típicas em 100x de aumento da linha de união dos blocos referência, TPP e TMP. ....	128
Figura 82 - Micrografias típicas em 200x e 500x de aumento da linha de união dos blocos referência, TPP e TMP. ....	130
Figura 83 - Micrografias típicas em 100x e 200x de aumento da linha de união dos blocos TPP e TMP na região dos canais. ....	131
Figura 84 - Micrografias típicas dos blocos TPP e TMP da região de união em MEV, aumentos 500x e 1000x, indicados em setas amarelas os poros mais arredondados e em setas verdes os mais alongados. ....	133

Figura 85 - Gráfico de tensão máxima das amostras perpendiculares dos blocos. .....	135
Figura 86 - Gráfico de tensão máxima das amostras paralelas dos blocos. ....	135
Figura 87 - Gráfico de tensão de escoamento das amostras perpendiculares dos blocos.....	136
Figura 88 - Gráfico de tensão de escoamento das amostras paralelas dos blocos Referência e TMP.....	136
Figura 89 - Gráfico de alongamento das amostras perpendiculares dos blocos. .....	137
Figura 90 - Gráfico de alongamento das amostras paralelas dos blocos.....	138

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de classificação de trocadores de calor quanto a compacidade. ....	30
Tabela 2 - Composição do Aço Inoxidável 316L.....	35
Tabela 3 - Propriedades mecânicas mínimas estipuladas por norma para o 316L. .....	35
Tabela 4 - Respostas sobre o serviço de usinagem fotoquímica. ....	62
Tabela 5 - Dimensões e características do bloco TMP. ....	72
Tabela 6 -Quantidade e dimensões das chapas que compõem o bloco do TMP. .....	73
Tabela 7 - Nomenclatura de amostras para ensaio de interferometria óptica. ..	80
Tabela 8 - Definições de parâmetros de rugosidade.....	82
Tabela 9 - Nomenclatura e dimensão das amostras para ensaio de corrosão....	84
Tabela 10 - Valores mínimos estabelecidos pela norma para o aço 316L. ....	85
Tabela 11 - Parâmetros de rugosidade da chapa CR e teste do fornecedor.....	91
Tabela 12 - Medidas de massa, perda de massa e espessura antes e após eletropolimento da chapa Z e S. ....	94
Tabela 13 - Resultados parâmetro Sa para as condições Cr, CBZ, CBS, CBZP e CBSP. ....	100
Tabela 14 - Resultados parâmetro Sq para as condições Cr, CBZ, CBS, CBZP e CBSP. ....	101
Tabela 15 - Resultados parâmetro Sp para as condições Cr, CBZ, CBS, CBZP e CBSP. ....	102
Tabela 16 - Resultados parâmetro Sv para as condições Cr, CBZ, CBS, CBZP e CBSP. ....	103
Tabela 17 - Resultados parâmetro Sz para as condições Cr, CBZ, CBS, CBZP e CBSP. ....	104
Tabela 18 - Resultado do teste T para os parâmetros Sa e Sq com as correlações entre as condições.....	105
Tabela 19 - Correlação entre as condições FCZ e FCZP para os parâmetros Sp, Sv e Sz. ....	108
Tabela 20 - Parâmetro topográfico Sds e Sdq e suas representações esquemáticas.....	109

Tabela 21 - Informações sobre potencial de corrosão, corrente, potencial de pite e resistência ao pite das amostras. ....	119
Tabela 22 - Valores topográficos das chapas A e B do TMP.....	122
Tabela 23 – Medições da altura do bloco em diferentes patamares de força..	123
Tabela 24 - Dimensões dos canais do bloco TMP. ....	125
Tabela 25 - Dimensões dos canais do bloco TPP.....	127
Tabela 26 - Tamanho de grão (ASTM) das condições Referência, TPP e TMP. .....	131
Tabela 27 - Análise em ImageJ da quantidade, tamanho e percentual de vazios nos blocos Referência, TPP e TMP. ....	134

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI *American Iron and Steel Institute*

ASME *The American Society of Mechanical Engineers*

ASTM *American Society for Testing and Materials*

BSE Elétrons Retroespalhados

CHE *Compact Heat Exchanger*

CR Conforme Recebida do fornecedor

DLEPR *Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation*

EP Eletropolimento

FPHEs *Formed Plate Heat Exchangers*

H<sub>2</sub>Xs *Hybrid Heat Exchangers*

ISO *International Organization for Standardization*

PCHE *Printed Compact Heat Exchanger*

PBMR *Pebble Bed Modular Reactor*

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

MO Microscopia Óptica

UF Usinagem fotoquímica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>26</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	26
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>27</b>
3.1	TROCADORES DE CALOR .....	27
<b>3.1.1</b>	<b>Trocador de Calor Compacto.....</b>	<b>29</b>
3.2	AÇO INOXIDÁVEL 316L .....	34
3.3	USINAGEM FOTOQUÍMICA.....	35
<b>3.3.1</b>	<b>Geometrias de Canais.....</b>	<b>39</b>
3.4	UNIÃO POR DIFUSÃO .....	43
3.5	ELETROPOLIMENTO.....	50
3.6	CORROSÃO .....	52
<b>3.6.1</b>	<b>Ensaio de polarização potenciodinâmica.....</b>	<b>53</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>59</b>
4.1	MATÉRIA-PRIMA.....	60
4.2	PROCESSAMENTO .....	61
<b>4.2.1</b>	<b>Bloco Referência .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Etapa Teste de Fornecedor e Definição da Geometria.....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.4</b>	<b>ETAPA 1: Chapas ziguezague e bloco unido por difusão.....</b>	<b>66</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Ciclo de união por difusão bloco TPP.....</b>	<b>67</b>
<b>4.2.6</b>	<b>ETAPA 2: Chapas em S .....</b>	<b>69</b>
<b>4.2.7</b>	<b>ETAPA 3: Chapa Z com fundo do canal liso .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.8</b>	<b>Eletropolimento .....</b>	<b>70</b>
4.3	ETAPA 4: TROCADOR DE MÉDIO PORTE (TMP).....	71
<b>4.3.1</b>	<b>Limpeza antes do ciclo de união.....</b>	<b>72</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Preparação e Ciclo de União por Difusão do TMP .....</b>	<b>73</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Caracterização Microestrutural.....</b>	<b>75</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Caracterização da Topografia de Superfície das Chapas.....</b>	<b>79</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Ensaio de corrosão.....</b>	<b>83</b>
4.5	ENSAIOS MECÂNICOS.....	84
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>88</b>
5.1	Análise da qualidade da usinagem fotoquímica .....	88
5.2	Análise das chapas .....	92

5.2.1	Análise visual das chapas zigzague e em S, antes e depois do eletropolimento .....	92
5.2.3	Interferometria Óptica das chapas: Projeções Axonométricas.....	94
5.2.4	Interferometria Óptica das chapas: Parâmetros de Rugosidade.....	99
5.2.5	Caracterização via MEV das chapas .....	110
5.2.6	Ensaio de Corrosão .....	114
5.3	Resultados dos blocos.....	122
5.3.1	Análise topográfica das chapas do bloco TMP .....	122
5.3.2	Análise do ciclo de união TMP .....	123
5.3.3	Análise Visual do bloco TMP .....	124
5.3.4	Análise Visual do bloco TPP.....	126
5.3.5	Análise microestrutural dos blocos.....	127
5.3.6	Ensaio de tração - Resultados Mecânicos dos blocos .....	134
6	CONCLUSÕES .....	139
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	141
	REFERÊNCIAS .....	142

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de equipamentos capazes de promover trocas térmicas de forma mais eficiente vem crescendo, em parte devido à redução de custos (de equipamentos e operacionais) e em parte à demanda de uso racional dos recursos energéticos impostos pela sociedade (LI et al., 2009); (TU; ZHOU, 2015). Algumas indústrias, como a do petróleo, ainda necessitam de equipamentos de dimensões sensivelmente reduzidas. Trocadores de calor compactos (CHE) se encaixam neste contexto, se apresentando como uma alternativa aos convencionais trocadores do tipo casca-tubo (HESSELGREAVES; LAW; REAY, 2016). Considerando uma mesma troca térmica, um núcleo de um CHE pode ser de 5 a 10 vezes menor do que o conjunto de tubos de um trocador casco-tubo, conforme ilustra a Figura 1 (SABHARWALL et al., 2013).

Figura 1 - Esquema do trocador tipo casco tubo em relação ao trocador de calor compacto (PCHE).



Fonte: (SABHARWALL et al., 2013)

O Laboratório de Tubos de Calor (Labtucal) da Universidade Federal de Santa Catarina, desenvolve projetos de pesquisa em parceria com a Petrobrás, na área de trocadores de calor compactos unidos por difusão, com o objetivo de aprimorar o projeto térmico e os o processo de manufatura destes dispositivos.

Por definição, trocadores de calor proporcionam a troca de calor entre dois ou mais fluidos que estejam em diferentes temperaturas. São amplamente utilizados em plataformas de extração de petróleo *off-shore* para diversas aplicações, incluindo o resfriamento de gás com água (HESSELGREAVES; LAW; REAY, 2016). Para esses trocadores serem definidos como compactos, devem possuir compacidade superior à  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  para sistemas gás e líquido e acima de  $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$  para sistemas líquido e líquido

ou com escoamentos trocando de fase (SHAH; SEKULIC, 2003a). Um dos modelos de equipamento utilizado nesses casos é o intitulado trocador de calor compacto de circuito impresso, do inglês *Printed Circuit Heat Exchangers* (PCHes), usualmente categorizado como um trocador de calor do tipo placas. O tamanho de canal desses trocadores geralmente varia entre 0,5 e 2 mm, sendo muito menor e mais leve do que o trocador tipo casca-tubo (NGO et al., 2006).

Em plataformas de extração *off-shore*, estes dispositivos são submetidos a condições de trabalho de elevadas temperatura, pressão e corrosão. Desta forma, o aço inoxidável torna-se um material com potencial para trabalhar nas condições necessárias à trocadores de calor compactos, com uma excelente resistência à corrosão, devido à presença de uma camada passivadora na sua superfície e à uma performance mecânica adequada para a aplicação.

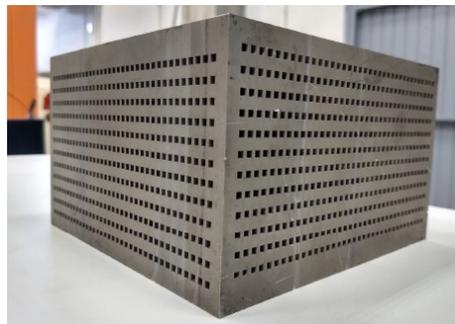
As estruturas internas das placas – os canais – do núcleo de trocadores de calor compactos podem ser fabricadas por várias tecnologias, sendo as duas mais comumente utilizadas a usinagem fotoquímica e a usinagem por corte à água. Esta última foi muito explorada pelo grupo de pesquisa do Labtucal. Núcleos de trocadores de calor com dimensões parecidas foram fabricados destas duas tecnologias, como pode-se observar na Figura 2 (CALDAS, 2022; GATTI, 2020; ROSINSKI, 2018). Em ambos os processos, placas previamente usinadas são empilhadas e posteriormente unidas por soldagem por difusão.

Figura 2 -Bloco unido por difusão com canais retos fabricados por usinagem fotoquímica (a) e por jato d'água (b).

a)



b)



Fonte: a) (HULSE, 2020) e b) (GATTI, 2020).

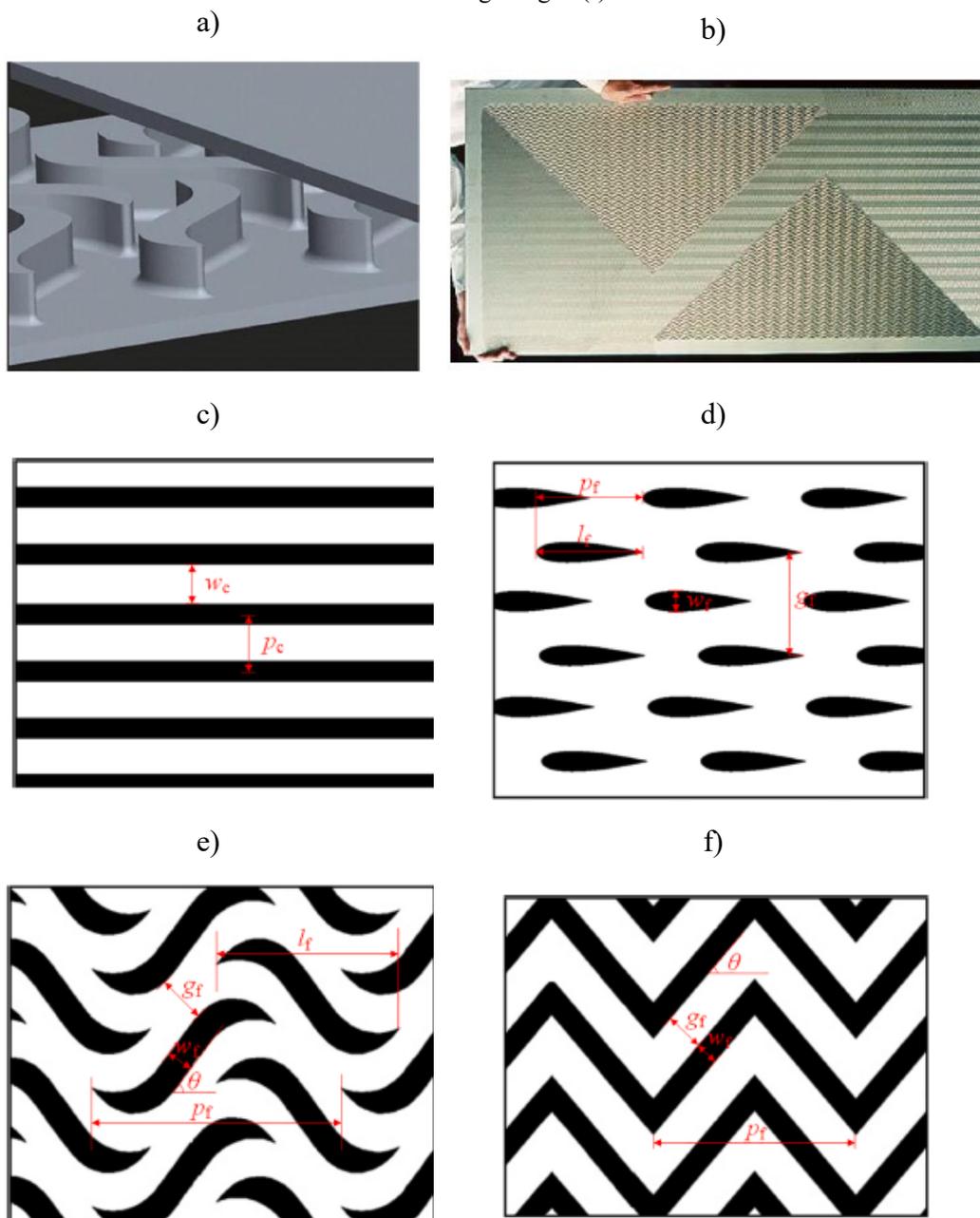
A soldagem por difusão no estado sólido é uma técnica avançada e competitiva para união de materiais similares e dissimilares que são difíceis de soldar utilizando os métodos convencionais de soldagem. Esta técnica requer o controle de variáveis-chave

do processo, tais como temperatura, pressão, tempo e atmosfera (normalmente vácuo), que variam de acordo com os metais a serem unidos. Como resultado, os materiais unidos têm características mecânica e estruturais semelhantes ao material de base (BHANUMURTHY et al.,2013). Portanto, para cada aplicação cabe uma otimização dos parâmetros do processo (GIETZELT, 2016). Trocadores de calor compactos unidos por difusão são encontrados na indústria aeronáutica, petrolífera, médica, eletrônica, dentre outras.

A usinagem fotoquímica pode ser utilizada na confecção dos canais do núcleo do PCHE, consistindo em um processo de usinagem não convencional, que pode produzir geometrias complexas em superfícies metálicas planas. Conforme relatado por XIN et al. (2019), o processo consiste na remoção de material da peça por meio de uma corrosão controlada, resultando em geometrias precisas, livre de tensões mecânicas e rebarbas, que garantem a integridade do material.

A literatura mostra que diferentes canais por onde escoam os fluidos que trocam calor entre si podem apresentar diferentes formatos, tamanhos, inclinações etc, influenciando diretamente a transferência de calor e a queda de pressão no escoamento dos fluidos nestes canais. Diante disto, novas geometrias de canais têm sido consideradas, como por exemplo, aletas em formato S, do tipo peixe-espada e na forma de aerofólio, buscando-se melhores trocas térmicas com menores perdas de carga. A Figura 3 representa alguns exemplos de canais estudados (KIM et al., 2008; NGO et al., 2007; SOUTHALL; DEWSON, 2009; TSUZUKI; UTAMURA; NGO, 2009).

Figura 3 - Exemplo de canais de fluxo para trocadores de calor: projeção 3D de geometria tipo “S” (a), placa com geometria tradicional ziguezague (b), canal reto (c), canal aerofólio (d), canal em “S” (e) e canal em ziguezague (f).



Fonte: a) (TSUZUKI; UTAMURA; NGO, 2009), b) Heatric (SOUTHALL; DEWSON, 2009), c, d) (KIM et al., 2008), e, f) (NGO et al., 2007)

A empresa Heatric, líder em desenvolvimento de PCHes há mais de 35 anos, emprega a usinagem fotoquímica na fabricação de canais com configuração ziguezague (LE PIERRES; SOUTHALL; OSBORNE, 2011), sendo a única fornecedora deste equipamento no mercado mundial por muitos anos. Uma vez que somente recentemente a patente foi quebrada por decurso de prazo, até hoje empresas se veem reféns do “know-

how” da Heatric, que pratica altos preços tanto no fornecimento dos produtos quanto nos serviços de manutenção e limpeza.

Assim, pretende-se no presente trabalho fabricar um PCHE 100% nacional, a partir de tecnologias e fornecedores localizados no Brasil. Para isto é necessário o desenvolvendo de processos e fornecedores de serviço de manufatura de canais em chapas planas, por usinagem fotoquímica. Foram fabricadas placas com canais de geometrias convencionais, tipo ziguezague, as quais foram caracterizadas por técnicas de microscopia e de interferometria óptica, para avaliar a qualidade dos canais e da superfície após o processo de usinagem. Buscou-se verificar defeitos geométricos, como aletas mais finas ou mais grossas (em relação às projetadas), assim como o formato dos canais e se as rugosidades das superfícies usinadas estavam acima do esperado, dentre outras características deletérias para o processo subsequente de união por difusão. O acompanhamento do processo de fabricação junto aos fornecedores do serviço, permitiu que estes problemas fossem mitigados. Após desenvolvido o processo de fabricação, este foi empregado na construção de um trocador de calor convencional de médio porte, com dimensões mais próximas às dos equipamentos utilizados nas plataformas de petróleo, definido junto à Petrobrás.

Note-se que o Labtucal, até então, havia construído apenas um núcleo de um trocador de calor com placas usinadas por ataque fotoquímico, empregando-se os parâmetros de união por difusão já desenvolvidos em outros trabalhos do grupo de pesquisa para trocadores usinados por corte de jato d’água (MORTEAN, 2014, GATTI, 2020; HULSE, 2020; ROSINSKI, 2018). Estes pesquisadores analisaram a influência de eventuais problemas do processo de usinagem fotoquímica na qualidade da união resultante e nas propriedades do material pós-soldado. Os conhecimentos adquiridos nestas etapas intermediárias foram, no presente trabalho, empregados na fabricação de chapas em maior escala, a serem utilizadas na manufatura de um trocador de calor integralmente nacional de tamanho real.

Além disto, visando o futuro avanço no estado da arte em relação ao processo de usinagem fotoquímica em PCHEs, foi avaliada a possibilidade de se desenvolver trocadores com novas geometrias de canais no país. Para isto, foram fabricadas e avaliadas a qualidade de placas usinadas por ataque fotoquímico para geometrias de canais em forma de aerofólio, seguindo sugestões da literatura para PCHEs, as quais se basearam em resultados de estudos numéricos termo hidráulicos (RUSTANDI et al., 2017).

Com o objetivo de mitigar os problemas observados em PCHES nas plataformas, como incrustações, entupimentos e falhas de corrosão, pensou-se em aplicar um acabamento de superfície capaz de reduzir a rugosidade e atenuar as características geradas pela usinagem fotoquímica dos canais. O eletropolimento surgiu como uma alternativa, posto que sua aplicação reduz a rugosidade, homogeneiza a superfície e aumenta a resistência à corrosão do material. Além disso, Amaral (2022) mostra em seu estudo, resultados promissores quanto à qualidade da união por difusão de chapas eletropolidas (AMARAL, 2022). Nesse contexto, o processo de eletropolimento foi aplicado à algumas chapas selecionadas, tendo seus aspectos topográficos, morfológicos e o seu comportamento corrosivo, avaliados (RUSTANDI et al., 2017).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho visa fabricar dois protótipos de trocador de calor compacto de circuito impresso e avaliar a qualidade do processo de usinagem fotoquímica nas chapas utilizadas na manufatura destes núcleos.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Fabricar chapas com canais em configuração ziguezague via ataque fotoquímico em dimensões de trocadores de calor reais (560 x 330 mm<sup>2</sup>);
- Fabricar chapas com canais via usinagem fotoquímica em tamanho reduzido (80 x 80 mm<sup>2</sup>) com geometrias de canal zigue-zague e em S;
- Aplicar eletropolimento às chapas usinadas fotoquimicamente nas duas geometrias (zigue-zague e em S);
- Analisar a microestrutura, morfologia e topografia da superfície e dos canais destas chapas e ainda caracterizar a resistência à corrosão das chapas;
- Fabricar protótipo de PCHE em pequena e em média escala formado por empilhamento das chapas com geometria de canal em zigue-zague via usinagem fotoquímica e união por difusão;
- Avaliar a resistência mecânica e microestrutura dos dois núcleos de trocador de calor (pequena e média escala).

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Num primeiro momento é realizada uma apresentação geral de trocadores de calor e sua classificação, conforme a literatura. Serão também apresentados detalhes da fabricação de um PCHE, objeto de estudo deste trabalho. São ainda feitas considerações sobre os materiais mais utilizados na fabricação destes dispositivos, ressaltando aqueles escolhidos para a presente pesquisa. São brevemente apresentados os processos de fabricação utilizados, ressaltando-se os principais conceitos físicos necessários para o seu entendimento. Descreve-se os processos de: usinagem fotoquímica dos canais realizados nas chapas, união por difusão empregada na soldagem dessas chapas e eletropolimento, empregado nos acabamentos das superfícies, realizados em algumas placas usinadas fotoquimicamente. Finalmente, faz-se uma breve apresentação do processo de corrosão e ensaio de polarização potenciodinâmica, realizado nas placas que passaram pelos processos anteriormente citados.

#### **3.1 TROCADORES DE CALOR**

Shah e Sekulic (2003) definem os trocadores de calor como dispositivos utilizados para transferir energia térmica entre dois ou mais fluidos em diferentes temperaturas e em contato térmico (SHAH; SEKULIC, 2003).

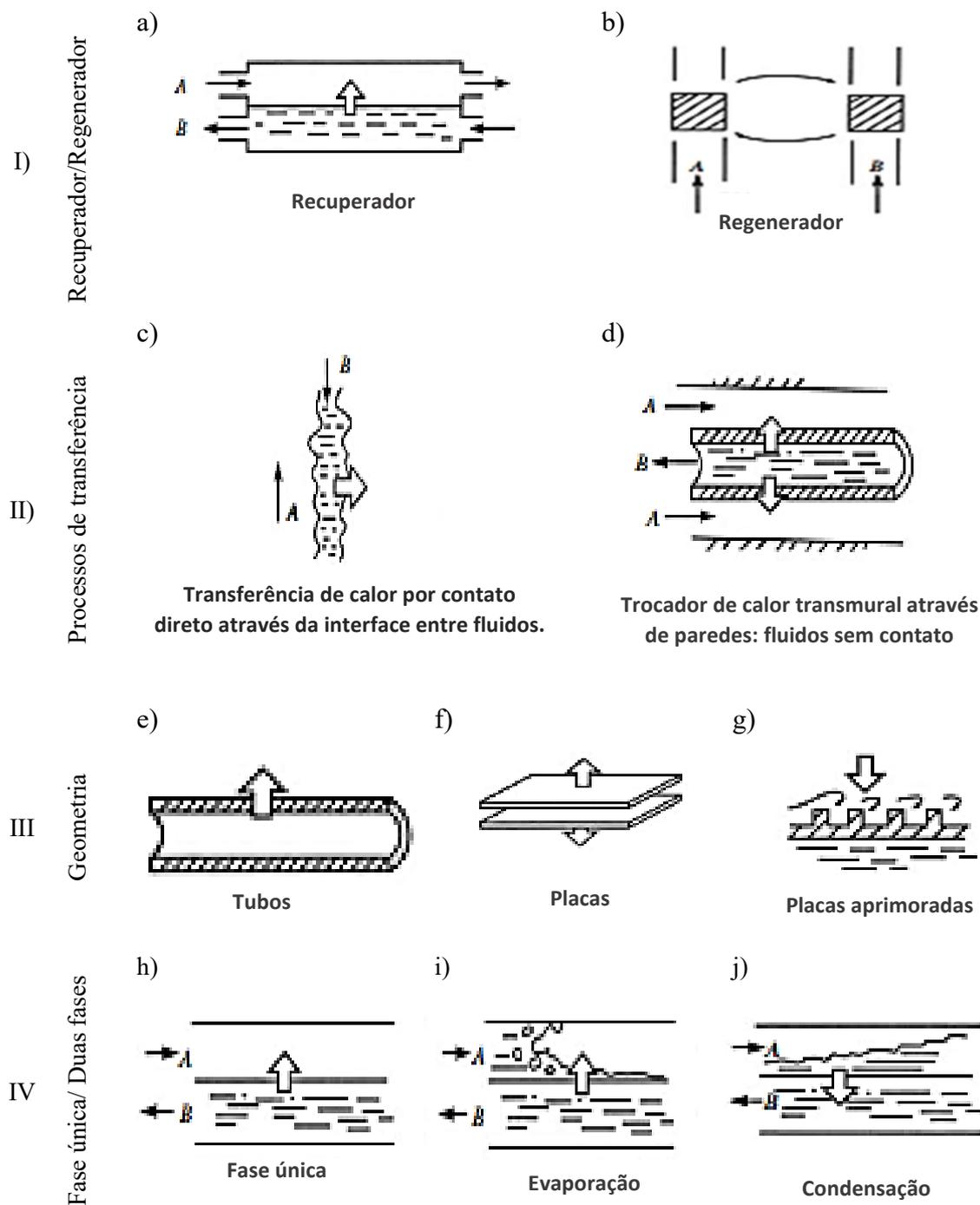
Os trocadores de calor podem ser aplicados nos mais variados segmentos industriais, tais como condensadores, evaporadores e recuperadores de calor em plataformas de petróleo, nas indústrias automotiva e aeronáutica, e como componentes em sistemas de refrigeração e condicionamento de ar (SEKULIC, 2018) (INCROPERA et al., 2007). A literatura apresenta diversas classificações de tais dispositivos, sendo as mais relevantes para o presente trabalho, tratadas na sequência.

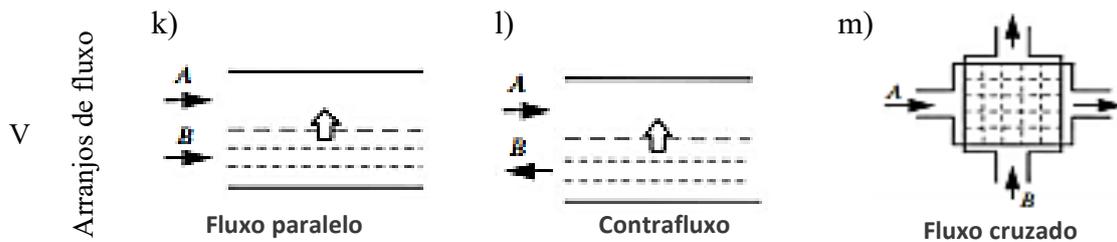
De acordo com Kakaç; Liu; Pramuanjaroenkij, (2012), os trocadores de calor são classificados principalmente em 5 tipos, como mostra a Figura 4 (KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012):

- I. Recuperadores/regeneradores;
- II. Conforme a forma da transferência de calor: contato direto e contato indireto;
- III. De acordo com a geometria de construção: tubos, placas e superfícies estendidas;

- IV. Segundo os mecanismos de transferência de calor: monofásico e bifásico;
- V. De acordo com os arranjos de fluxo: fluxos paralelos, fluxos contracorrente e fluxos cruzados.

Figura 4 - Classificação dos trocadores de calor por tipo de sistema em (I); por transferência em (II); por geometria em (III); por tipo de fase em (IV) e por arranjo de fluxo em (V).





Fonte:(KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012)

De acordo com (SHAH; SEKULIC, 2003), os materiais mais comumente utilizados na fabricação dos trocadores de calor de placas são o aço inoxidável (AISI 304 ou 316) e titânio. Além disso, placas de Incoloy 825, Inconel 625 e Hastelloy C-276 são também boas opções, enquanto níquel, cuproníquel (liga metálica de cobre e níquel com até 30% de níquel) e Monel 400 são raramente utilizados, salvo aplicações específicas. O aço carbono, por sua vez, não é utilizado, devido à baixa resistência à corrosão para chapas finas (SHAH; SEKULIC, 2003).

### 3.1.1 Trocador de Calor Compacto

O trocador de calor tipo casco e tubo é o mais utilizado na indústria atualmente, de acordo com AWAIS E BHUIYAN (2018) o seu uso chega a 90% dos casos (AWAIS; BHUIYAN, 2018). Isto é devido a versatilidade de aplicação em condições de uso diversas, desde o vácuo a pressões superiores a 100 MPa e uma faixa de temperatura de operação que varia de valores criogênicos até aproximadamente 1100 °C (SHAH; SEKULIC, 2003). No entanto, existem aplicações em que o principal limitante é o tamanho, massa e volume dos equipamentos, tais como aplicações aeroespaciais e petrolíferas, sendo recomendado o uso de trocadores de calor compactos.

A classificação de trocadores como compactos pode ser feita a partir de determinados critérios de compacidade, como a densidade superficial de área,  $\beta$ , dado pela razão entre a área total de transferência de calor,  $A_t$  e o volume total de transferência de calor ocupado pelas superfícies de troca térmica,  $V_t$  (SHAH; SEKULIC, 2003) (INCROPERA et al., 2007) (CHEN; SUN; CHRISTENSEN, 2019), ou seja:

$$\beta = \frac{A_t}{V_t}$$

O diâmetro hidráulico também é considerado neste critério, conforme na Tabela 1. Assim, se o dispositivo de calor possuir canais assimétricos, um valor de densidade superficial

será associado a cada seção de escoamento, em que os subscritos  $q$  e  $f$  são relacionados aos fluidos quente e frio. Considerando um trocador de calor do tipo placas operando com dois fluidos de trabalho, tem-se:

$$\beta = \frac{A_{t,q}}{V_{t,q}} \quad \text{e} \quad \beta = \frac{A_{t,f}}{V_{t,f}}$$

Tabela 1 - Parâmetros de classificação de trocadores de calor quanto a compactidade.

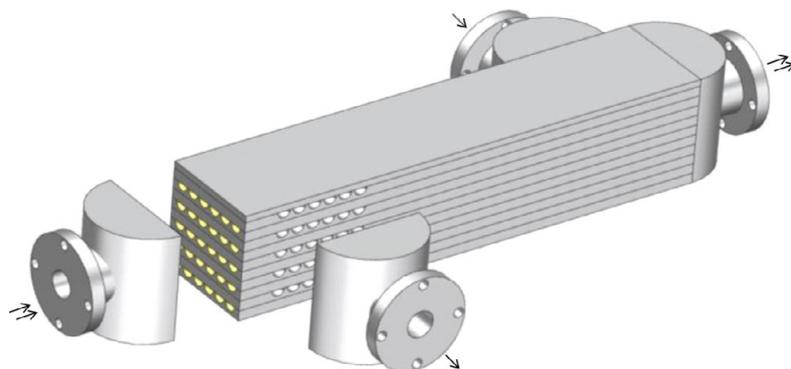
<b>Corrente de fluido</b>	<b>Compacto</b>	<b>Não compacto</b>
Gás	$\beta \geq 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ou $D_h \leq 6 \text{ mm}$	$\beta < 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ou $D_h > 6 \text{ mm}$
Líquido ou mudança de fase	$\beta \geq 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$	$\beta < 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Fonte: (SHAH; SEKULIC, 2003)

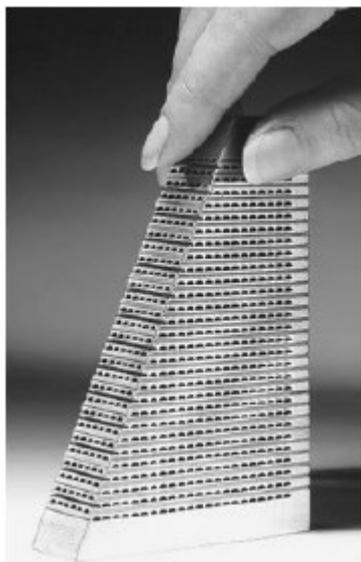
A seção transversal das passagens de fluido são normalmente semicirculares, com tipicamente 1,0–2,0 mm de largura e 0,5–1,0 mm de profundidade, resultando em diâmetros hidráulicos de 1,5–3,0 mm, conforme mostrado na Figura 5 (c). O formato da passagem do fluido pode ser ondulado ou reto, dependendo de alguns fatores, como o fluido usado (líquido ou gás) e a relação entre carga térmica e queda de pressão (CHEN; SUN; CHRISTENSEN, 2019) (LIU et al., 2020).

Figura 5 - Esquema em 3D do PCHE em (a); detalhe dos canais de um PCHE em (b) e canal semicircular em seção transversal em (c).

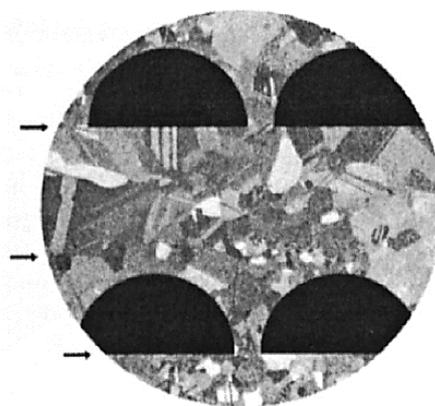
a)



b)



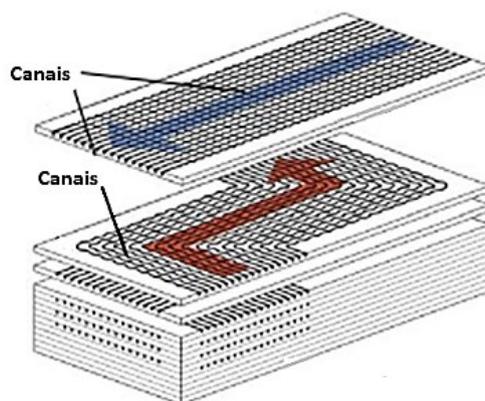
c)



Fonte:(LIU et al., 2020)

A primeira etapa de fabricação de um núcleo de um PCHE consiste na produção de ranhuras finas usinadas fotoquimicamente em um lado de uma placa de metal plana para a passagem do fluido (LI et al., 2011). Numa segunda etapa, chapas usinadas por ataque fotoquímico, são empilhadas, conforme exemplo de layout da Figura 6 e unidas por difusão em um forno com parâmetros pré-definidos de temperatura, pressão e tempo. Os canais precisam ter grande precisão do nível micrométrico ao milimétrico. Para ser viável economicamente, este processo deve ainda apresentar baixo custo e poder ser produzido em massa.

Figura 6 - Layout empilhamento PCHE.



Fonte: Adaptado de (LE PIERRES; SOUTHALL; OSBORNE, 2011).

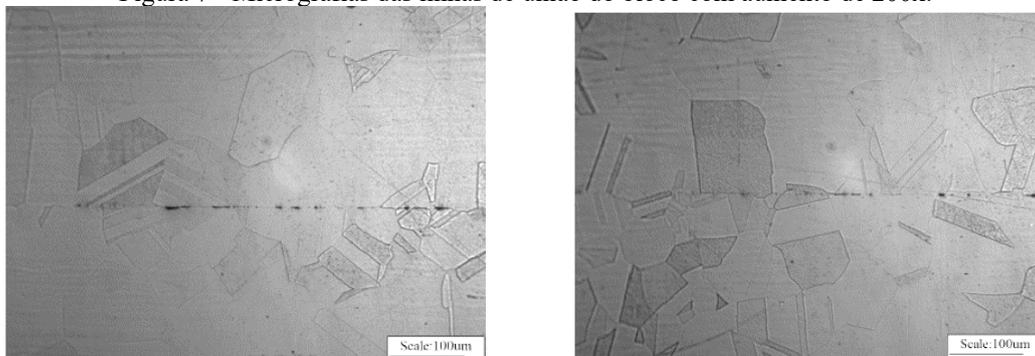
Em 2018, Rosinski fabricou um trocador de calor compacto com placas usinadas pela técnica de corte por jato d'água, a partir de chapas de aço AISI 316L unidas por difusão, sujeitas ao trinômio, temperatura 1040°, pressão 9,51 Mpa e tempo de patamar de 60 minutos. O trocador possuía geometria de canal pouco convencional quando comparada às do PCHE, ou seja, seção quadrada (3 x 3 mm<sup>2</sup>). O autor avaliou a qualidade da união por difusão das placas por meio de comparação entre amostras fabricadas com variados parâmetros de união: temperatura, pressão e tempo. Também realizou ensaios hidrostáticos e desenvolveu um modelo analítico para prever as deformações nas laterais do dispositivo (ROSINSKI, 2018).

Um tempo depois, Gatti (2020) desenvolveu um trocador de calor compacto de placa usinada de AISI 316L pelo método de corte por jato d'água abrasivo para a fabricação dos canais retos. As placas foram soldadas pelo método de união por difusão com temperatura de 1040° C, pressão de 9,5 MPa e tempo de 90 minutos de patamar de união. As dimensões do trocador foram de 173 x 173 x 173 mm com canais retos de seção quadrada de 3 x 3 mm, num arranjo de escoamento cruzado. Ensaio de tração e a análise da microestrutura validaram o processo da união por difusão das placas. Ainda, ensaios termo hidráulicos foram realizados e os dados comparados com resultados do modelo teórico (GATTI, 2020).

Em relação aos ensaios mecânicos, o trocador de GATTI (2020) suportou uma tensão máxima, em média, de 478,5 MPa, tensão de escoamento de 198 MPa e alongamento de 28,1%. Estes valores ficaram abaixo do estipulado em norma para o 316L, com exceção a tensão de escoamento que ultrapassou o valor de 170 MPa. A Figura 7 mostra as interfaces de união do trocador de calor, com algumas características visíveis

nas imagens: defeitos espalhados na linha de união, um crescimento de grão entre as duas chapas e a presença de maclas (GATTI, 2020)

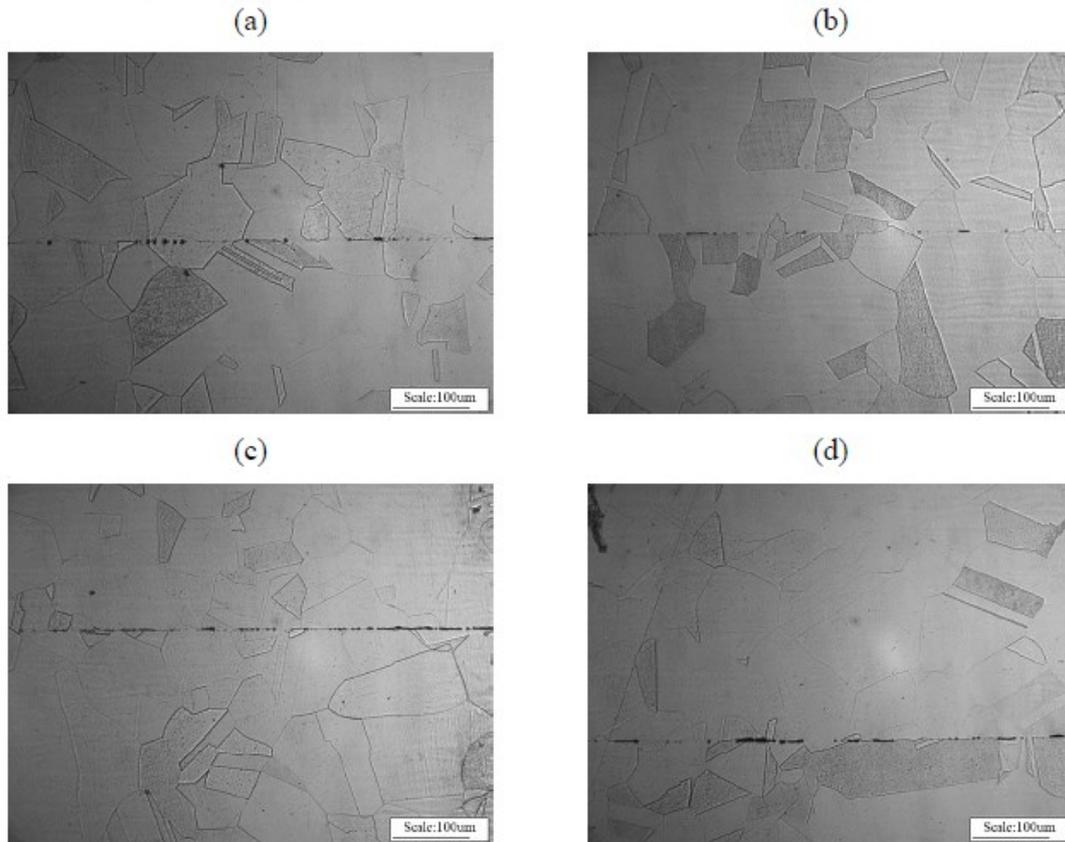
Figura 7 - Micrografias das linhas de união do bloco com aumento de 200x.



Fonte: Gatti (2020).

Concomitantemente, HULSE (2020) desenvolveu um trocador de calor compacto de placa usinada também de 316L pelo método de fabricação dos canais retos por usinagem fotoquímica e união das placas por difusão. Os parâmetros de processamento da união por foram: temperatura de 1040° C, pressão de 9,5 MPa e tempo 90 minutos de patamar, os mesmos adotados por (GATTI, 2020). Os resultados de ensaios de tração obtiveram as médias de 420 Mpa para tensão máxima, 230 MPa para tensão de escoamento e 22% para o alongamento. Com isso, concluiu-se que somente a tensão de escoamento atingiu o mínimo estipulado por norma para o material de base: 316L. Em relação a consolidação da união por difusão, foram observados vazios bastante alongados na linha de união e em grande quantidade, mas, por outro lado, observou-se a formação de contornos de grãos englobando as duas superfícies, o que caracteriza uma união por difusão efetiva. Nestes estudos, os defeitos não foram caracterizados quanto a tamanho e morfologia (HULSE, 2020).

Figura 8 - Micrografias das linhas de união do bloco com aumento de 200x.



Fonte: (HULSE, 2020).

### 3.2 AÇO INOXIDÁVEL 316L

O aço inoxidável ASTM 316L é um dos materiais mais utilizados na construção de trocadores de calor compactos. Este material é resistente à corrosão, em virtude da presença do cromo e do molibdênio com percentuais de 2 a 3 % em sua composição, o que aumenta a resistência à corrosão, tanto localizada quanto geral, principalmente contra o ácido sulfúrico da água do mar, além de apresentar resistência à fluência em altas temperaturas. Adicionalmente, o baixo teor de carbono (máximo 0,03%), reduz consideravelmente a ocorrência de sensitização (CHIAVERINI, 1988). Estas propriedades termomecânicas, quanto a sua resistência ao ambiente altamente corrosivo são características que fazem com que este material seja amplamente utilizado na fabricação de PCHes para uso em plataformas de petróleo e gás e em indústrias químicas,

A composição química do aço 316L (com base na norma ASTM de código A240M) é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição do Aço Inoxidável 316L.

<b>Elemento</b>	<b>Composição (%)</b>
<b>C</b>	0,03 máx.
<b>Mn</b>	2,00
<b>Si</b>	0,75
<b>P</b>	0,045
<b>Sn</b>	0,03
<b>Cr</b>	16-18,00
<b>Ni</b>	10,00-14,00
<b>Mo</b>	2,00-3,00
<b>N</b>	0,10

Fonte: ASTM, 2018.

A norma ASME *Boiler and Pressure Vessel Code* VIII Div. 1 e ASME IX – Part. QW-185, aplicada ao projeto de vasos de pressão e caldeiras, solicita que as propriedades mecânicas do dispositivo final atendam à alguns requisitos mínimos como atingir as propriedades do material de base utilizado para fabricação do trocador de calor. Aplica-se esta condição para a qualificação da união por difusão do núcleo do trocador.

As propriedades mecânicas do 316L são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas mínimas estipuladas por norma para o 316L.

<b>Limite de resistência máxima</b>	<b>Tensão de escoamento</b>	<b>Alongamento</b>
485 MPa	170 MPa	40 %

Fonte: ASTM - A240/A240M.

### 3.3 USINAGEM FOTOQUÍMICA

A usinagem fotoquímica, também conhecida por ataque fotoquímico, é descrita como uma usinagem não convencional que consiste na remoção do material por meio de uma corrosão controlada na região de interesse, com capacidade de produzir geometrias complexas em estruturas metálicas planas (placas de diversos tamanhos e espessuras) (SARAF; SADAIAH, 2017). Como vantagens deste processo podem ser citadas a obtenção de peças livres de rebarbas e tensões por esforços mecânicos (ROY; ALLEN; ZAMORA, 2004); (SARAF; MUDIGONDA BABASAHEB AMBEDKAR, 2011). De acordo com ALLEN (2004) os aços inoxidáveis e as ligas de cobre são os materiais mais utilizados na usinagem fotoquímica. Alguns exemplos de peças e chapas usinadas

fotoquimicamente são exibidos na Figura 9.

Figura 9 - Exemplos de produtos usinados por Ataque Fotoquímico.

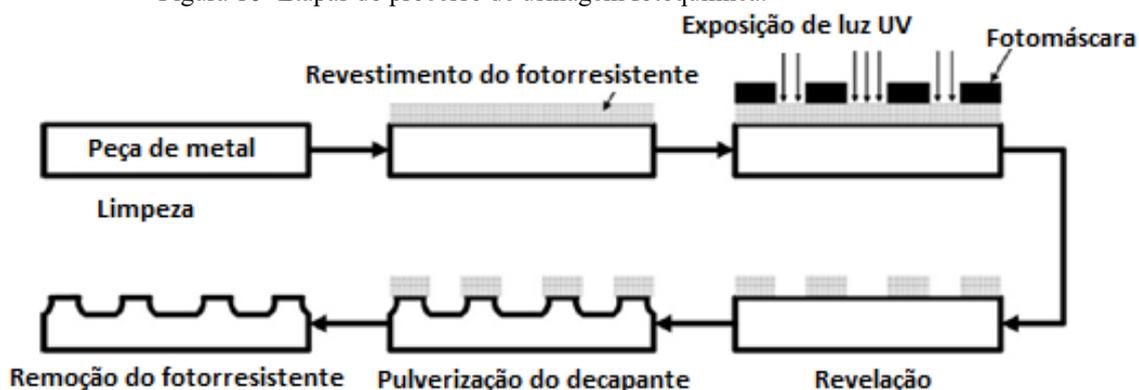


Fonte: SMartins & Pires; Tech-etch.

A solução química majoritariamente utilizada para a usinagem de aços inoxidáveis é composta de perclorato de ferro ( $\text{FeCl}_3$ ) e ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ). O  $\text{FeCl}_3$  tem grande aplicabilidade dado o baixo custo, baixa toxicidade e alta versatilidade (ALLEN; HEGARTY; HORNE, 1981). A usinagem ocorre a partir de um material fotorresistente aderido à superfície da peça de trabalho, o qual serve como um molde para demarcar a região a ser atacada.

De acordo com ZHANG; MENG (2012) o processo de usinagem fotoquímica é dividido em 5 etapas principais, conforme apresentado na Figura 10 e descritas a seguir.

Figura 10 -Etapas do processo de usinagem fotoquímica.



Fonte: Adaptado de Zhang e Meng, 2012.

Etapa 1: Limpeza química: obtenção de uma superfície metálica sem contaminantes, como gorduras, graxas e óleos para assim garantir uma melhor adesão entre a superfície do metal e o revestimento fotorresistente.

Etapa 2: Revestimento com o filme fotossensível ou fotorresistente (polímeros sensíveis a luz ultravioleta, resistentes à solução química e à ação de corrosão): pode ser aplicado por imersão em um líquido ou laminado a quente. A máscara fotorresistente promove a proteção da região que não deve ser afetada pela luz UV, que é aderente e durável em ambos os lados do metal, insolúvel à solução reveladora.

Etapa 3: Exposição da peça de trabalho à luz ultravioleta, quando a geometria desejada é desenhada na peça.

Etapa 4: Revelação das áreas não atingidas pela luz UV através de uma solução química, em que resta apenas o metal exposto.

Etapa 5: Ataque da peça por meio da pulverização da solução corrosiva, ocorrendo corrosão localizada nas áreas do metal exposto.

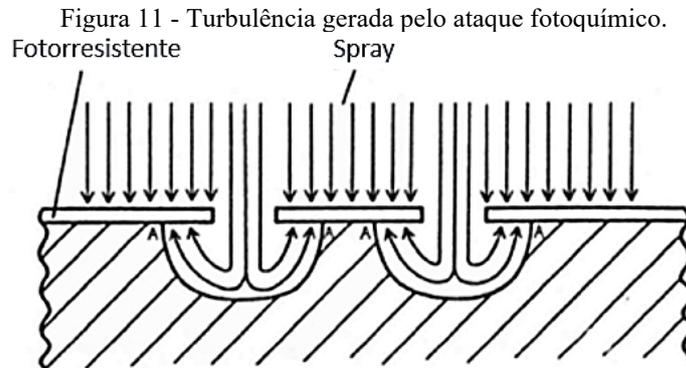
Etapa 6: Limpeza e inspeção final por meio da retirada da máscara, garantindo que o metal esteja limpo e que as especificações dimensionais solicitadas tenham sido atendidas.

ALLEN (2004) afirma que a maior limitação do processo é relacionada ao fato da corrosão ser isotrópica, logo, a remoção de material vai ocorrer em todas as direções da superfície. Com isso, um maior tempo de ataque pode causar também corrosão nas paredes laterais do canal, que pode ser prejudicial para geometria final esperada do produto a ser usinado fotoquimicamente. Ademais, existem limitações em relação à espessura máxima da placa que pode ser usinada fotoquimicamente, que é de 2 mm para metais, vidros e cerâmicas.

De acordo com Xin et al (2019), o controle do ataque fotoquímico nos canais de um PCHE é crucial para fabricação de um canal de boa qualidade. A qualidade final do acabamento superficial (rugosidade) dos canais depende do fator de corrosão, da concentração do atacante ( $FeCl_3$  e  $H_3PO_4$ ), temperatura e tempo de ataque (XIN et al., 2019). São inúmeros os fatores que afetam a usinagem fotoquímica em aços inoxidáveis, de forma que o controle do processo é bastante difícil, justificando estudos aprofundados (XIN et al., 2019).

Em 1977, ALLEN e colaboradores ressaltaram a importância da garantia de uma boa limpeza na peça a ser atacada por usinagem química, uma vez que, partículas que permanecem na superfície do material, podem prejudicar o desempenho do ataque químico, quando o spray corrosivo é pulverizado. Este spray gera uma turbulência no interior do canal usinado fotoquimicamente provocada pela energia cinética das gotículas de ácido pulverizadas nas ranhuras da peça, conforme mostrado na Figura 11. Portanto,

para garantir uma melhor performance da usinagem das ranhuras e adesão do filme fotorresistente, é necessário uma boa limpeza e preparação das superfícies antes da aplicação do spray (ALLEN; HORNE; STEVENS, 1977).



Fonte: Adaptado de (ALLEN; HORNE; STEVENS, 1977).

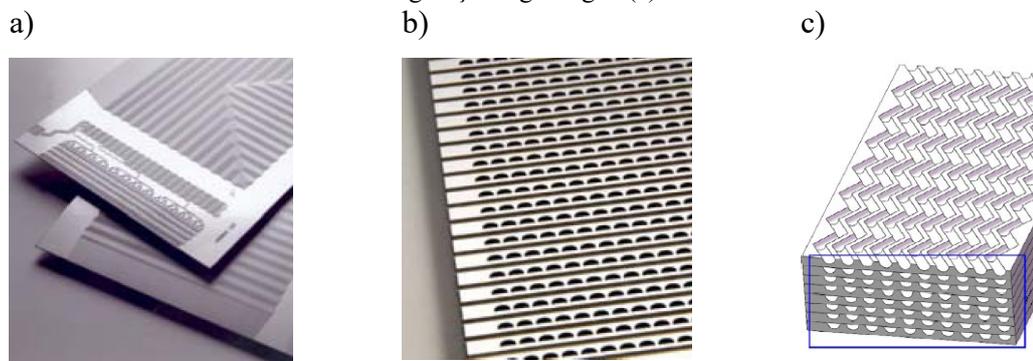
Allen et al (2005) observa que, em decorrência do ataque fotoquímico, pode se formar, sobre a superfície da peça usinada, um produto insolúvel de coloração marrom e/ou preta, chamado de “*smut*”. Isso ocorre quando as condições de corrosão durante o ataque não são suficientemente controladas, seja pelas más qualidades da superfície, pela falta de limpeza, devido à um ataque lento ou ao acúmulo de óxidos na máquina de corrosão, gerando uma oxidação nessas áreas que pode afetar as peças. (ALLEN et al., 2005). Como já comentado, a solução comumente utilizada para o aço é o  $\text{FeCl}_3$  com a adição de  $\text{HCl}$ . Deve haver um equilíbrio entre estas substâncias: baixas concentrações de  $\text{FeCl}_3$  podem provocar, por exemplo, uma superfície alveolar ou o efeito *smut* (ALLEN et al., 2005) no material, enquanto elevadas concentrações aumentam o tempo do processo, que, além de deixar o processo mais caro, estas concentrações podem danificar a máscara protetora e conseqüentemente atacar regiões indesejáveis da peça.

Por fim, um estudo envolvendo usinagem fotoquímica de placas (HULSE, 2020b) mostrou o aparecimento de alvéolos na superfície das chapas usinadas, o que foi justificado pelo fabricante como respingos do ácido utilizado durante o ataque fotoquímico contra a máscara protetiva. O longo período de exposição das placas à solução química prejudica a continuidade do filme protetivo e pode gerar pequenas cavidades. Uma alternativa proposta para mitigação do problema é alterar a geometria dos canais, que modificaria o tempo de exposição à solução química, o que vem ao encontro da atual proposta de estudo de novas geometrias.

### 3.3.1 Geometrias de Canais

Diferentes geometrias de canais podem ser empregadas nos PCHEs, que podem apresentar diferentes seções transversais de canal, como trapezoidais, retangulares, semicírculos, triangulares, sinusoidais, dentre outras. Uma das características desejáveis destes canais é que proporcionem um melhor desempenho hidráulico de escoamento e uma maior troca térmica para o PCHE. A Figura 12 apresenta um canal com geometria zigzague, com seção transversal semicircular, uma das mais utilizadas nestes dispositivos, dada a facilidade (e menor custo) de fabricação.

Figura 12 - Placas usinadas fotoquimicamente (a) seção transversal do núcleo do PCHE (b); esquema do núcleo configuração zigzague (c).

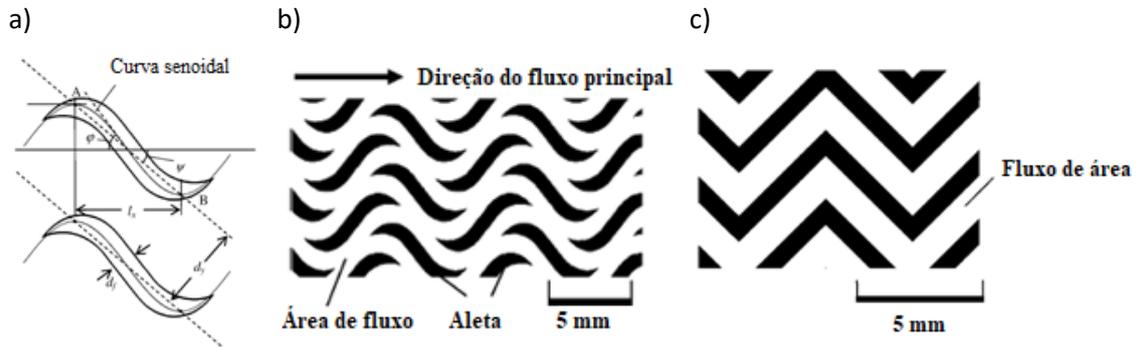


Fonte: LE PIERRES; SOUTHALL; OSBORNE, 2011 (a, b); PASQUIER, 2014 (c).

Nas últimas décadas, diversas novas geometrias de canais de trocadores de calor compactos foram desenvolvidas, demonstrando que modificações nas geometrias dos canais típicos, como formato o zigzague, podem alterar a eficiência termo hidráulica de dispositivos de troca de calor, aumentando a transferência de calor e diminuindo a queda de pressão. Alguns destes estudos serão apresentados a seguir.

TSUZUKI; KATO; ISHIDUKA (2007) simularam numericamente o comportamento termo hidráulico de novas configurações de canais de PCHEs, visando melhor a eficiência térmica com a concomitante redução nas perdas de pressão. Novas configurações de aletas descontínuas em formato de S foram propostas (Figura 13 a e b) que alcançaram resultados promissores, onde a queda de pressão foi reduzida para um quinto, em comparação com a configuração convencional em zigzague, mantendo-se, porém o mesmo o desempenho de transferência de calor.

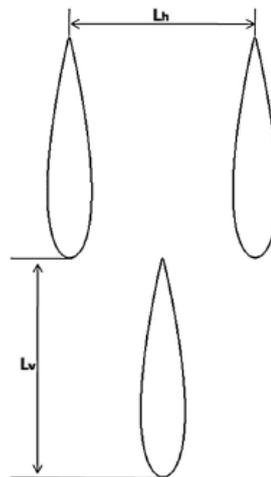
Figura 13 – Aletas descontinuas em forma de S (a); Ilustração da área do fluxo para o novo modelo em S (b) e para o modelo tradicional em ziguezague (c).



Fonte: Adaptado de Tsuzuki et al. 2007

Já Kim et al. (2008) desenvolveram um novo modelo de PCHE com várias aletas em forma de aerofólio, como mostra a Figura 14, usando simulações numéricas em CFD (fluidodinâmica computacional) visando reduzir a queda de pressão nos canais. Os estudos iniciaram com a simulação em canais ziguezague e validação do modelo. A partir disso, foram propostas aletas em forma de aerofólio para reduzir as perdas de carga do escoamento. Os autores relatam que as aletas em forma de aerofólio não melhoraram o desempenho da transferência de calor em comparação com PCHE convencional com geometria ziguezague.

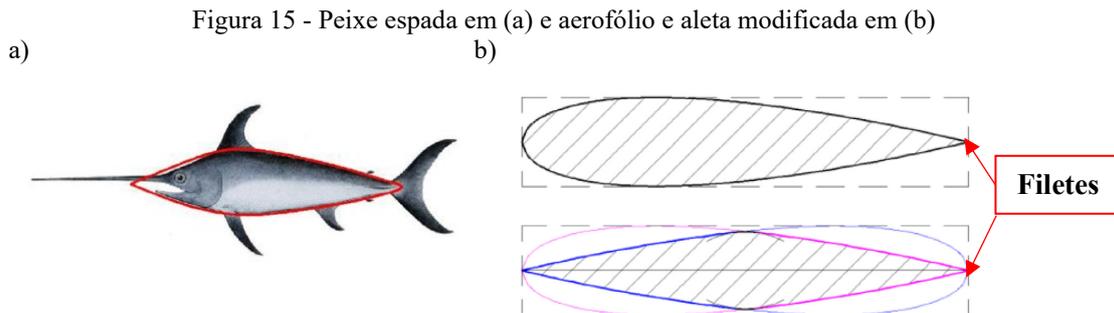
Figura 14 - Configuração de canal de aerofólio para PCHE.



Fonte: Kim et al. 2008.

XU et al. (2014) basearam-se em estudos anteriores e desenvolveram um aperfeiçoamento da estrutura de aleta em formato aerofólio para uma geometria chamada de peixe-espada ou aerofólio modificado, como ilustrado na Figura 15. Seus estudos

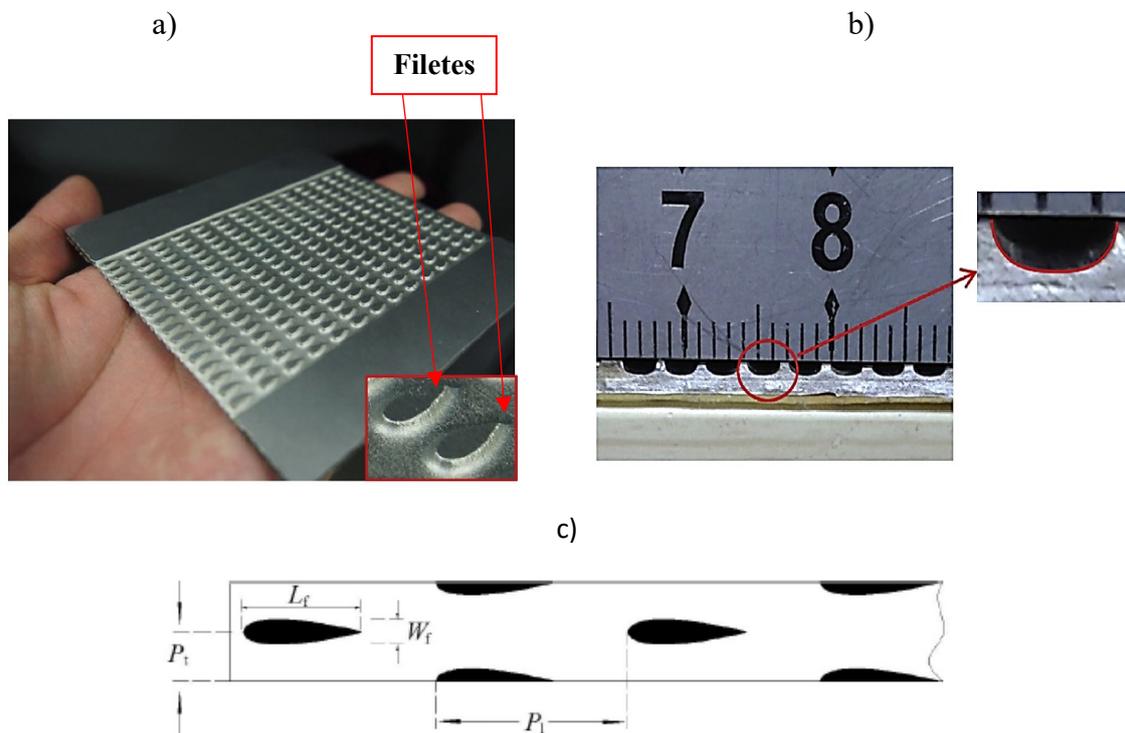
mostraram que o achatamento da ponta do aerofólio reduz a resistência ao fluxo e possibilita maior taxa de transferência do calor por unidade de área para a aleta tipo peixe-espada, em comparação com a aleta no formato de aerofólio não modificado, de forma que as aletas estivessem localizadas em maiores distâncias entre si. Assim, afirmam que os canais formados por aletas modificadas tipo peixe-espada apresentam melhor performance termo hidráulica.



Fonte: XU et al. (2014).

Ma et al. (2015) realizaram um estudo com foco no efeito do filete (indicado pelas setas na Figura 16 (a)) no desempenho hidráulico de um PCHE produzido pela usinagem fotoquímica, em uma chapa de AISI304 com 2 mm de espessura. Como pode ser visto na figura, o ataque, que é isotrópico, forma filetes na região mais fina do aerofólio. A Figura 16 (c) mostra o desenho da geometria e dimensões, onde  $P_t$  é o passo transversal de 2 mm,  $P_l$  é o passo longitudinal de 6,5 mm,  $W_f$  representa a espessura máxima do aerofólio de 0,84 mm e  $L_f$  o comprimento máximo do aerofólio de 4 mm. As simulações das performances termo hidráulicas mostraram que a presença do filete da parede final da aleta pode aumentar a transferência de calor e a queda de pressão, dependendo do passo longitudinal ( $P_l$ ), devido ao fato de que a inclinação das superfícies produzirem pequenos vórtices nas bordas de ataque do fluido em escoamento. Adicionalmente, estes autores observaram que o processo de oxidação corrosiva da usinagem fotoquímica dos canais em aerofólio não altera a estrutura interna do metal e nem as propriedades como dureza, estrutura de grão e ductilidade, de forma que os equipamentos podem ser usados para aplicações em altas temperaturas (MA et al., 2015).

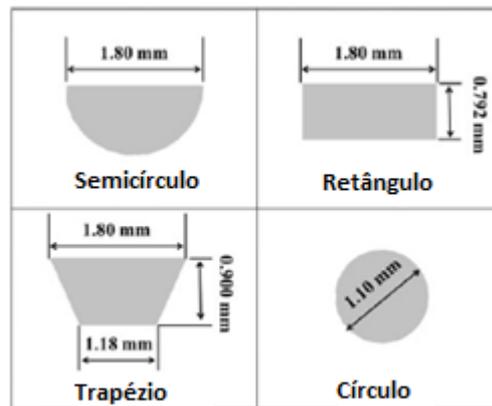
Figura 16 - Imagens do estudo de Ma et al. (2015) sobre a produção de chapas por usinagem química em formato de canais de aerofólio (a), foto do canal semicircular na seção transversal (b) e imagem com medidas dos canais (c).



Fonte: (MA et al., 2015).

Lee e Kim (2013) analisaram o desempenho termo hidráulico de PCHEs em configuração ziguezague com várias geometrias e configurações da seção transversal do canal (semicircular, retangular, trapezoidal e circular), utilizando a técnica de análise RANS 3-D, com o intuito de utilização do dispositivo para troca de calor em turbinas a gás (LEE e KIM, 2013). O PCHE com seção transversal de canal retangular apresentou a maior eficácia térmica, mas o pior desempenho hidráulico, enquanto o PCHE com formato circular apresentou a menor eficácia térmica entre as quatro formas diferentes estudadas por estes autores (LEE e KIM, 2013).

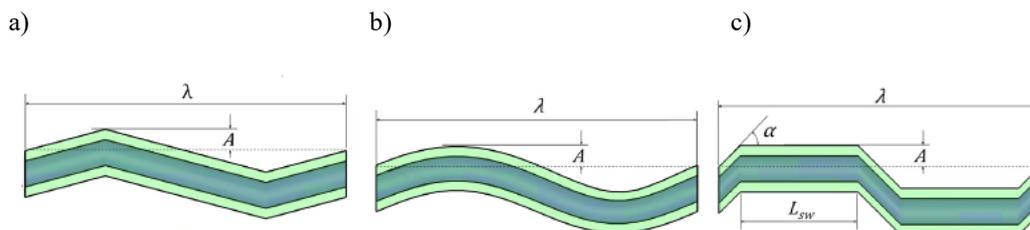
Figura 17 - Quatro formas de seção transversal do canal.



Fonte: Adaptado de Lee e Kim, 2013.

ANEESH et al. (2018) analisaram um modelo numérico para performance termo-hidráulica para um núcleo de PCHE fabricado em liga de Inconel 617 empregando três configurações diferentes de geometrias de canais, baseados em canais zigzague convencionais (ou canal de onda como também é conhecido), tais configurações são: triangular, sinusoidal e trapezoidal, conforme Figura 18. Por fim, concluíram que o modelo PCHE com canal trapezoidal ofereceu a maior transferência de calor com a maior queda de pressão dentre os modelos de PCHE, com canais de geometria senoidal, triangular e de canal reto (ANEESH et al., 2018).

Figura 18 – Canais ondulados em diferentes configurações: triangular (a) sinusoidal (b) trapezoidal (c).



Fonte: Aneesh et al., 2018.

### 3.4 UNIÃO POR DIFUSÃO

A soldagem por difusão no estado sólido é um processo de união sem a presença de fase líquida, ou seja, com a inexistência de zona fundida ou termicamente afetada e seus efeitos deletérios associados. O processo tem como principais parâmetros de controle do processo: temperatura, pressão e tempo (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016).

O processo tem como vantagens a capacidade de unir materiais dissimilares, trabalhar com geometrias grandes e complexas, não apresentar tensões térmicas residuais, obter interfaces de união quase isentas de defeitos e não deformar macroscopicamente a superfície do material. As propriedades mecânicas da junta unida podem ser comparadas às do material de base, o que juntamente com as vantagens já citadas fazem do processo uma boa alternativa aos processos de soldagem convencionais (LEHRHEUER, 1993) (CAI et al., 2019).

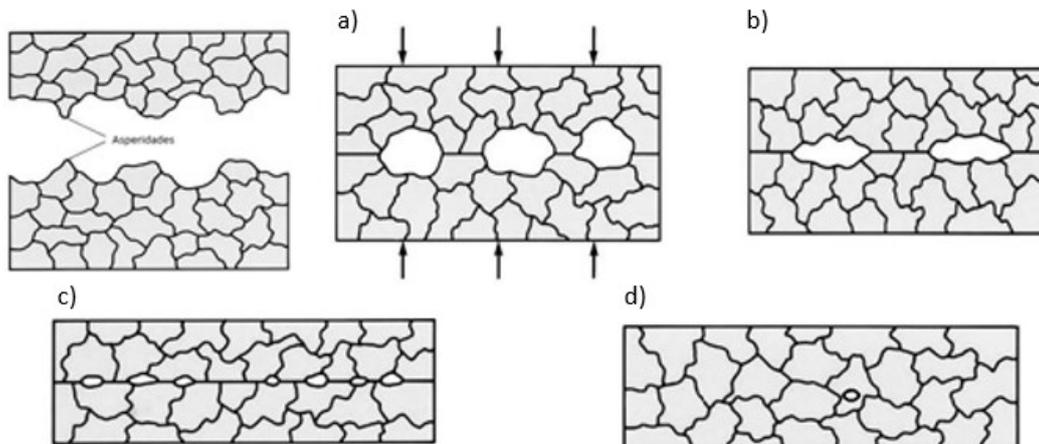
Como desvantagens desta tecnologia, podem ser citadas, alto custo dada a complexidade do equipamento necessário para a realização da união (um forno tipo prensa capaz de proporcionar as condições de pressão, temperatura e alto vácuo), longo tempo de união e o cuidado especial com a superfície da matéria prima utilizada (LEHRHEUER, 1993). (CAI et al., 2019).

Conforme Gietzelt et al. (2016), o principal mecanismo de união envolvido nesse processo é a difusão dos átomos, a qual é ativada termicamente, sendo provocada pela pressão externa aplicada, que promove o contato íntimo entre as peças que serão unidas e pelas altas temperaturas, entre 50 e 80% da temperatura de fusão do material (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016).

Similarmente, Kazakov descreve a técnica de união por difusão como a que ocorre por meio do coalescimento das superfícies em contato por mecanismos difusivos, ativados principalmente pela alta temperatura aplicada aos materiais, além de uma pressão externa que garante a microdeformação das asperidades e o íntimo contato dessas superfícies (KAZAKOV, 1985).

A Figura 19 ilustra as etapas dos mecanismos de difusão interatômica do processo. O contato inicial ocorre apenas nos picos das asperidades. Com a aplicação de temperatura e pressão na primeira etapa ocorre um aumento da área de contato e há a quebra da camada óxida, conforme Figura 19 (a- b). Em seguida, ocorrem os preenchimentos dos vazios isolados entre as superfícies a serem unidas principalmente por mecanismos como a fluência e a difusão em contornos de grãos (Figura 19 (b-c)). Por fim, ocorre a eliminação de vazios isolados ou presentes no interior de alguns grãos por meio da difusão volumétrica, resultando em uma interface quase isenta de defeitos, como mostra a Figura 19 (c-d) (DERBY; WALLACH, 1980) (JAHN et al., 2014) (THE OPEN UNIVERSITY, 2018).

Figura 19 - Etapas do processo de união por difusão: (a) contato das asperidades após deformação; (b) diminuição dos vazios; (c) densificação dos vazios isolados; (d) migração da interface.



Fonte: Adaptado de (The Open University, 2018)

A temperatura de união típica é de aproximadamente 80% da temperatura de fusão do material a ser unido, no entanto, para materiais com camadas passivadoras, a temperatura e o tempo devem ser maiores, a fim de superar a inibição da difusão causada pela presença de óxidos insolúveis (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016). A temperatura também possui influência sobre o fluxo plástico gerado pela pressão. Kazakov explica que o aumento da temperatura de união melhora a resistência mecânica da junta unida, porém o aumento deve ser realizado até certo ponto, a partir do qual o aumento da temperatura pode prejudicar a resistência da liga metálica devido ao crescimento exagerado dos grãos (KAZAKOV, 1985).

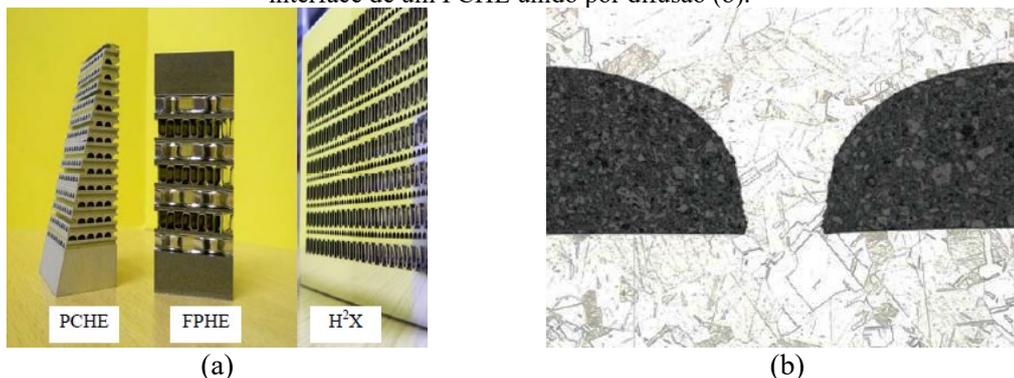
A pressão também tem papel importante no ciclo de união por difusão, principalmente durante o início do processo, pois além de aumentar o contato inicial, associada à temperatura, leva o material a atingir a tensão de escoamento (MAITLAND; HALL; ZHOU, 2007). Desta forma, assim como para a temperatura, o aumento da pressão melhora a resistência mecânica da união até certo limite, a partir do qual a ductilidade do material se reduz. De forma geral, estudos apontam que pressões entre 1 e 20 MPa, aplicadas sob alta temperatura, são aceitáveis para fornecer uma união adequada (LEHRHEUER, 1993).

A união por difusão deve ser qualificada empregando-se as normas ASME VIII Div.1 e ASME IX, as quais padronizam o processo, indicando as geometrias mínimas dos corpos de prova a serem usados nos testes mecânicos e microestruturais a serem realizados nesses blocos, garantindo assim o desenvolvimento de soldas adequadas e reprodutíveis.

No presente trabalho, o processo de união por difusão é estudado visando a sua aplicação na fabricação de núcleos de trocadores de calor compactos. Neste contexto, SOUTHALL e DEWSON (2009) classificam tais núcleos de acordo com o processo de fabricação dos canais das chapas como: PCHEs para circuito impresso (usinagem fotoquímica), FPHEs (*Formed Plate Heat Exchangers*) para placas conformadas, ou H<sub>2</sub>Xs (*Hybrid Heat Exchangers*) para processos híbridos. Exemplos destes trocadores são mostrados na Figura 20. Os autores ainda indicam que o aço inoxidável 316L é adequado para a fabricação dos núcleos nessas configurações, usando o processo de união por difusão para aplicações que operam em temperaturas de até 550 °C, como:

1. Recuperadores de dióxido de carbono supercrítico (SCO<sub>2</sub>) e gases refrigerantes em circuitos de teste do ciclo Brayton, com SCO<sub>2</sub>;
2. Recuperadores para o reator modular resfriado a hélio, *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR);
3. Resfriador de mercúrio para o acelerador de próton de alta potência;
4. Gerador de vapor para propulsão marinha nuclear;
5. Resfriadores gás-água;
6. Trocadores de calor gás/gás e sódio/gás para reatores refrigerados a gás (N, He, He-N ou SCO<sub>2</sub>) ou sódio.

Figura 20 - Comparativo da seção dos diferentes núcleos unidos por difusão (a), e, micrografia da interface de um PCHE unido por difusão (b).



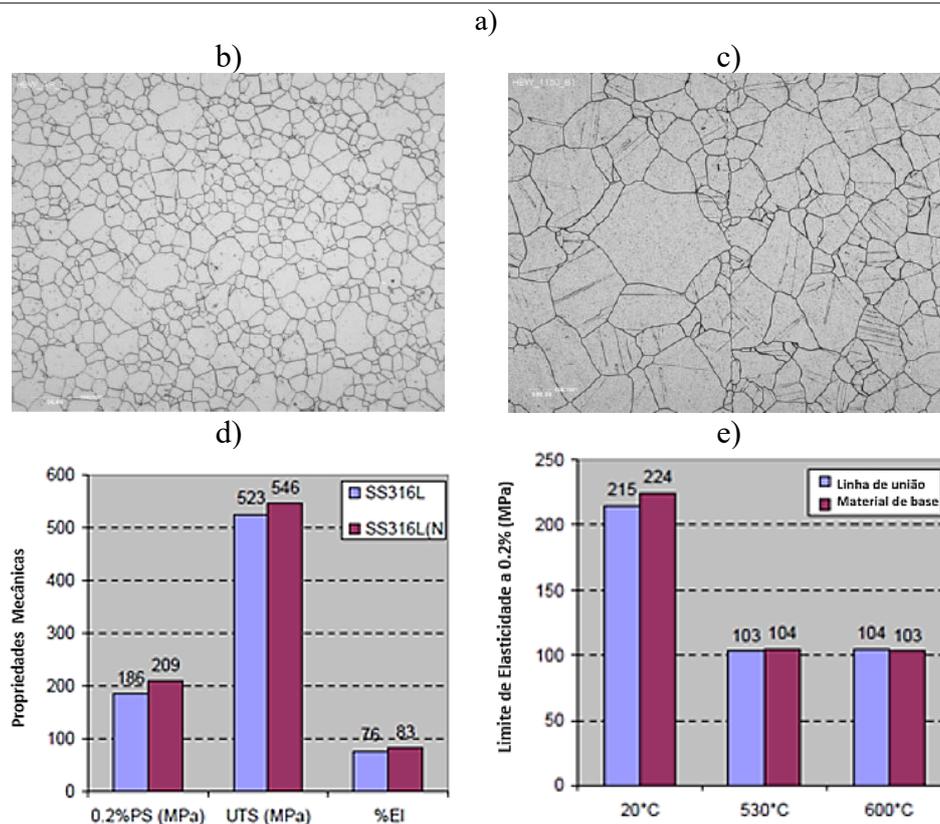
Fonte: (SOUTHALL; DEWSON, 2009) e (LI et al., 2009).

De acordo com Li et al (2009), a utilização de ligas duplamente certificadas, como a 316/316L, que têm resistência mecânica da liga 316 associada ao baixo teor de carbono da liga 316L, permite o uso de chapas com menores espessuras, devido à sua maior resistência mecânica (tensão máxima de 515 MPa e tensão de escoamento de 205 MPa), reduzindo assim tanto peso e massa quanto o custo do dispositivo. A evolução das

propriedades mecânicas e microestruturais antes e depois da união por difusão das ligas 316L e 316L(N) são também discutidas neste estudo. No entanto, os autores não indicam os parâmetros de processamento, nem as dimensões das amostras ou a quantidade de planos unidos. Os resultados são apresentados na Figura 21. Em seus experimentos, os autores identificaram que a adição de nitrogênio e um menor tamanho de grão inicial (6  $\mu\text{m}$ ) têm efeito positivo na tensão de escoamento e tensão máxima em relação a liga 316L, como indicado na Figura 21 (a). Após o ciclo de união, análises microestruturais indicaram o crescimento de grão através das interfaces, conforme apresentado na Figura 21 (c), com tamanho médio de 200  $\mu\text{m}$  para ambas as ligas (LI et al., 2009).

Figura 21 - Propriedades dos materiais de base, PS: ponto de deformação, UTS: limite máximo de tração e El: alongamento (a) e microestrutura do aço 316L antes (b) e após união (c). Resistência à tração dos aços unidos (d), em relação a linha de união e temperatura (316L) (e).

Material	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)
316L	309	626	63
316L (N)	374	680	53
ASME 316L	170	485	40
ASME 316	205	515	40



Fonte: (Li et al., 2009).

A Figura 21 (d) indica os valores do ensaio de tração das uniões, que superam o valor solicitado pela norma ASME, sendo a liga 316L(N), a que apresentou os melhores resultados. Os maiores valores, em 5%, 9% e 11%, do limite de resistência máxima, alongamento e escoamento, respectivamente, da outra liga (316L sem a adição de N) foi atribuída a presença de nitrogênio, o qual tem a função de aumentar a resistência mecânica e resistência à corrosão por pite e sob fadiga do aço inoxidável (STEIN; MENZEL, 1995).

Ainda sobre o estudo de Southall e Dewson (2009), na Figura 22 é possível verificar os resultados de tração das juntas avaliadas, avaliadas no sentido perpendicular à união. Sendo assim, os valores médios de limite de resistência máxima são de 544,5 N/mm<sup>2</sup> e tensão de escoamento de 212,3 N/mm<sup>2</sup>. Os valores são superiores aos apresentados por Li et al (2011). Os autores também afirmam que todas as amostras unidas excederam os requisitos exigidos de tensão sob elevada temperatura e de fluência (600 °C, 241 MPa e 100 h ou 185 MPa e 1000 h), permanecendo mais dúctil do que as juntas soldadas convencionalmente (SOUTHALL; DEWSON, 2009).

Figura 22 - Comparação da resistência atingida em relação a linha de união.

	Tensão escoamento N/mm <sup>2</sup>		Tensão máxima N/mm <sup>2</sup>	
	Par.	Perp.	Par.	Perp.
<b>Ação 1</b>	229,7	216,6	580,3	545,8
<b>Ação 2</b>	217	209	558	535,2
<b>Ação 3</b>	226,3	212,6	583	552,6
<b>Média grupo</b>	224,3	212,3	573,8	544,5
<b>ASME A240</b>	205		515	
<b>Média grupo</b>	1,09	1,04	1,11	1,06
<b>Paralela/ Perpendicular</b>	1,06		1,05	

Fonte: (Southall, 2009).

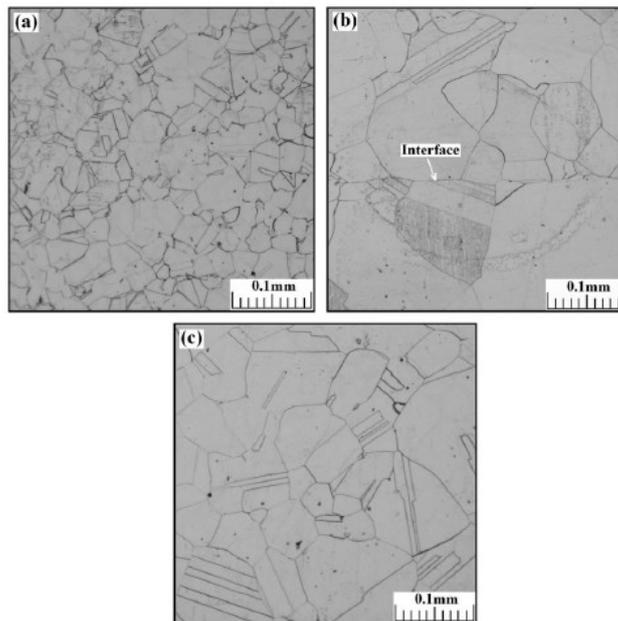
Por fim, Li et al (2011) reportaram a utilização da técnica de reativação eletroquímica potenciocinética em duplo loop, do inglês *Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation* (DLEPR), a fim de avaliar o grau de sensitização em juntas 316L unidas por difusão. As amostras foram unidas por difusão em vácuo ( $1,33 \times 10^{-3}$  Pa), com aplicação de 10 MPa de pressão, na temperatura de 1100 °C no patamar de união de 3 horas e resfriadas dentro do forno. A Figura 23 indica a microestrutura do material antes e depois da união (LI et al., 2011).

Segundo os autores, o longo tempo de processo promoveu o crescimento significativo de grão de maneira heterogênea, variando entre 20 e 160 µm, com alguns grãos ainda maiores. Adicionalmente, maclas de recozimento foram identificadas na Figura 23 (b e c). Durante o resfriamento que durou 45 minutos, as temperaturas das

amostras variaram de 850 a 450°C, tempo insuficiente para promover a precipitação carbeto de cromo nos contornos. Por isso, amostras unidas (DB) e do material de base (BM) foram tratadas termicamente em 650 °C durante 2, 8, 30 e 100 horas. A sensitização foi observada a partir de 8 horas para o material de base, mas não ocorreu para as amostras unidas nem após 100 h de tratamento, conforme indicado na Figura 24.

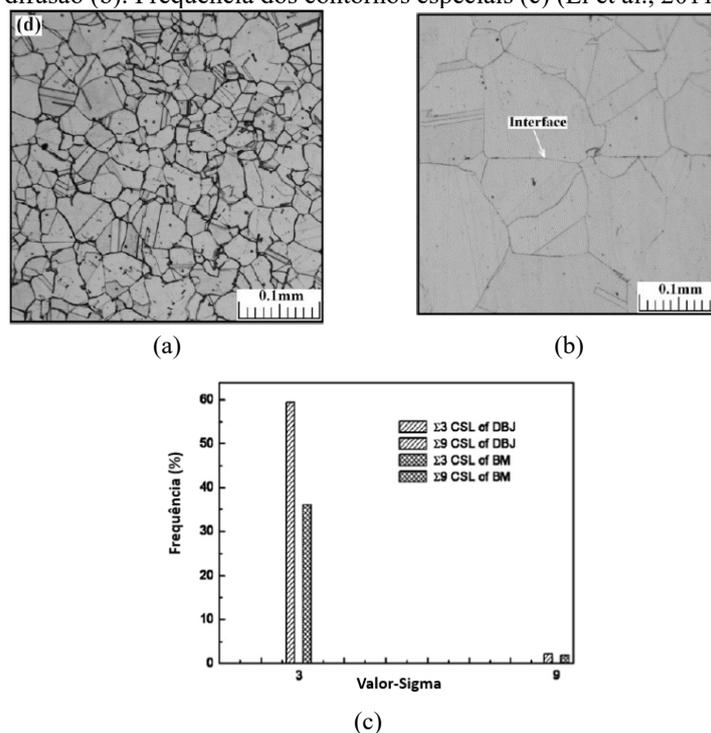
A menor susceptibilidade à corrosão intergranular foi associada a dois fatores principais: tamanho de grão e quantidade de contornos de maclas (coincidence site lattice-CSL). Na verdade, o processo termomecânico promove o crescimento de grão que atrasa a sensitização e o surgimento de maclas de recozimento, que aumentam a frequência dos contornos especiais de baixo ângulo (low-CSL), como indicado na Figura 24 (c). A não ocorrência de sensitização nas amostras unidas também foi comprovada por testes DLEPR, indicando que o processamento de união por difusão não prejudica a resistência à corrosão intergranular.

Figura 23 - Microestruturas do material de base (BM) (a), da interface de união (DB) (b) e afastada 5 mm da linha de união (DB) (c).



Fonte: (Li et al., 2011).

Figura 24 - Microestruturas do aço após 100h em 650°C do material de base antes (a) e após a união por difusão (b). Frequência dos contornos especiais (c) (Li et al., 2011).

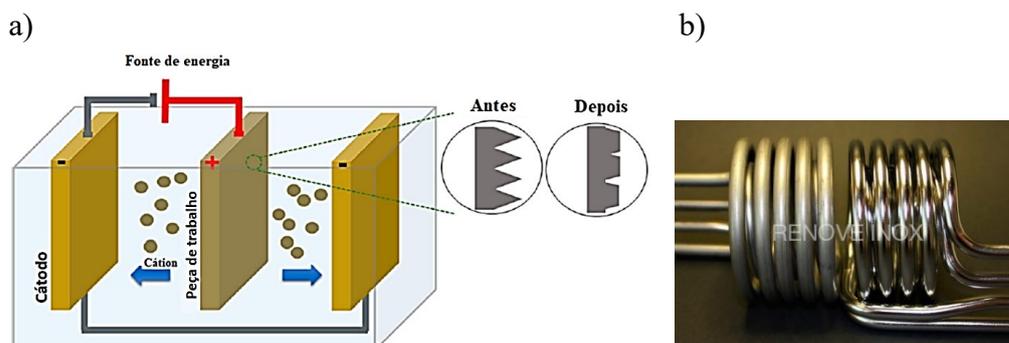


Fonte: (Li et al., 2011).

### 3.5 ELETROPOLIMENTO

O eletropolimento é um processo eletroquímico que remove material metálico da peça de trabalho por meio de uma dissolução anódica. Este método tem o intuito de deixar a região metálica menos rugosa, mais lisa, brilhante e planificada, conforme exemplificado na Figura 25(b). Aplicado em áreas de engenharia como indústrias alimentícia, farmacêutica, médica e eletrônica, o processo consiste em um tipo específico de eletrólise, envolvendo uma corrente elétrica direta que passa por um eletrólito em uma célula eletrolítica, conforme ilustra a Figura 25 (a) YANG et al., 2017).

Figura 25 - Esquema de célula eletrolítica (a); exemplo de peça antes e após eletropolimento. (b).



Fonte: Adaptado de Yang et al., 2016; Renove inox, 2015.

Adicionalmente, estudos mostram que após o eletropolimento, a superfície torna-se mais homogênea e livre de defeitos, com os contornos de grãos similares ao material de base (LEE, 2000) (HAÏDOPOULOS et al., 2006) (LEE; LAI, 2003). A técnica possui outros propósitos além de deixar a superfície lisa e brilhante, sendo importante na remoção de inclusões não metálicas em reatores, tubos, instalações e trocadores de calor, levando-os à maior resistência à corrosão. Além disso, auxilia na remoção de rebarbas em diferentes equipamentos de usinagem, afiamento de ferramentas, controle de dimensão das peças, etc. (GABE, D.; RL.L. SHREIR, R.A.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, 1994; TEGART, 1959).

Diversas características destacam o eletropolimento como um processo de acabamento, tanto na questão estética, promovendo uma alta refletividade das peças, como funcionais, tornando o material mais resistente à corrosão, removendo asperidades e diminuindo tensões residuais causadas por processos mecânicos prévios, fazendo com ele se seja amplamente utilizado na indústria (HABIBZADEH et al., 2014) (HAN; FANG, 2019) (ZIOMEK, 2003).

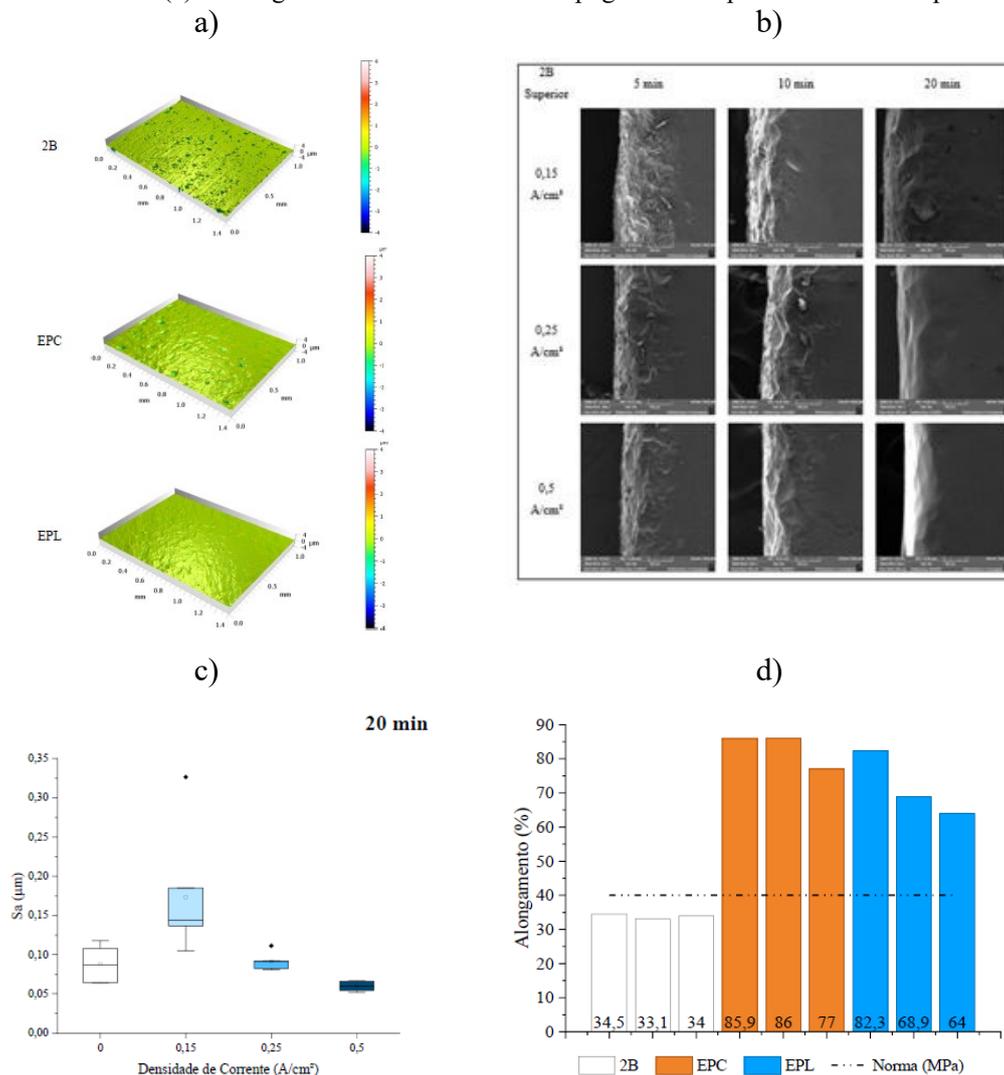
Por possuir uma camada passiva natural característica dos aços inoxidáveis, a aplicação do eletropolimento no aço inoxidável AISI 316L diminui a espessura dessa camada e ainda aumenta o teor de cromo na superfície, o que por sua vez melhora a resistência à corrosão da liga (HAÏDOPOULOS et al., 2006) (LEE; LAI, 2003).

Posto tudo isso, o eletropolimento mostra ser uma estratégia importante para fabricação de trocadores de calor compactos, pois aprimorando a superfície do material, promove o contato íntimo entre as chapas durante a união por difusão (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016).

Amaral (2022) avaliou a influência dos principais parâmetros de eletropolimento na integridade de superfície de chapas de aço AISI 316L com canais. Além disso avaliou o processo de união por difusão de chapas empilhadas do aço AISI 316L após os seus eletropolimentos. A autora analisou diversas combinações de parâmetros de eletropolimento e topografias de superfície e concluiu que a uma melhor combinação de parâmetros é: tempo de processo de 20 min (o maior testado) e densidade de corrente de  $0,5 \text{ A/cm}^2$  (também a maior testada). Estes parâmetros resultaram em uma borda de canal arredondada e sem incrustações e a redução da rugosidade (AMARAL, 2022). As placas com melhor combinação de parâmetros foram então unidas por difusão e geraram um bloco que apresentou crescimento de grão através da interface de união e excelentes resultados mecânicos, como alongamentos que variaram entre 64 a 82 % e tensão máxima

de 537 a 547 MPa. (AMARAL, 2022). A Figura 26, extraída este trabalho, mostra resultados de projeção axonométrica das placas como recebidas (acabamento 2B) e eletropolidas a partir de micrografias da região do canal em diferentes condições de processamento, de resultados de rugosidade ( $S_a$ ) para as duas densidades de corrente avaliadas (c) e os alongamentos dos blocos com topografia de superfície 2B e eletropolida (d).

Figura 26 - Resultados de projeção axonométrica das placas 2B e eletropolidas (a); Micrografias da região do canal em diferentes condições de processamento (b); Resultados de rugosidade ( $S_a$ ) por densidades de corrente avaliadas (c) e Alongamentos dos blocos com topografia de superfície 2B e eletropolida (d).



Fonte: Amaral, 2022.

### 3.6 CORROSÃO

De acordo com REVIE e UHLIG (2008), a corrosão pode ser definida como um fenômeno natural causado por uma reação destrutiva no material com o meio ao seu redor.

A corrosão pode provocar danos irreparáveis para equipamentos, colocando em risco a segurança tanto do ser humano quanto do ambiente, fazendo-se assim necessário o controle constante deste fenômeno.

Para reduzir o impacto da corrosão, engenheiros e cientistas estudam o fenômeno, que pode provocar avarias importantes em tubulações, tanques, componentes metálicos de máquinas, navios, pontes, estruturas marinhas, e assim por diante. A corrosão pode causar falhas catastróficas em vasos de pressão, caldeiras, recipientes metálicos para produtos químicos tóxicos, pás e rotores de turbinas, pontes, componentes de aviões e mecanismos de direção automotiva, dentre outros. (REVIE e UHLIG, 2008).

Como um processo natural que ocorre em quase todos os metais e que não pode ser interrompido uma vez iniciado, a corrosão precisa ser prevenida e/ou mitigada. A seleção de materiais adequados conforme a sua aplicação ou ambiente de trabalho é o primeiro procedimento a ser pode ser adotado para evitar a corrosão (BEAVERS; THOMPSON, 2006).

A corrosão pode ocorrer por atrito, fadiga ou devido a microrganismos. Porém, em trocadores de calor, quando ocorre nas superfícies de troca de calor, a sua causa mais comum é a ação química do fluido de trabalho, que pode ser potencializada considerando-se a condição de operação do equipamento (SEKULIC, 2018).

Em aços inoxidáveis, a corrosão mais comum é a localizada por pites, que produz pequenos orifícios e se propaga profundamente na direção do interior do material. A corrosão por pites tem um impacto mais severo do que a corrosão uniforme devido à sua ocorrência repentina e taxa de propagação muito mais rápida do que a corrosão geral. Assim, uma vez iniciadas as cavidades, elas podem continuar a crescer por um processo autossustentável ou autocatalítico (BILHARTZ, 1952).

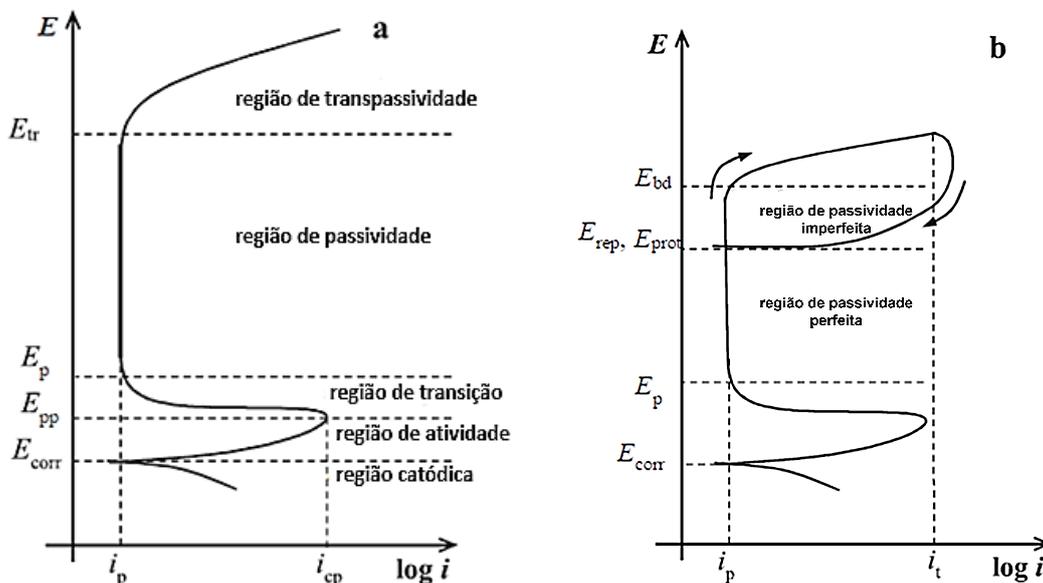
### **3.6.1 Ensaio de polarização potenciodinâmica**

BELLEZZE; GIULIANI e ROVENTI (2018) definem que o melhor método para obter uma curva de polarização potenciodinâmica é através da utilização de uma célula com configuração de três eletrodos, em que a potência é aplicada linearmente com o tempo, medindo-se as correntes que passam pelo eletrodo de trabalho e contra eletrodo. Por meio deste teste pode-se determinar a resistência à corrosão localizada do material ou a taxa de degradação em um curto período. Além disso é possível investigar o começo da passividade, ou seja, da quebra do filme óxido, a suscetibilidade, a repassivação e o

cálculo da taxa de corrosão por pite.

A Figura 27 é uma representação esquemática de uma curva genérica de polarização anódica em (a) com a indicação dos parâmetros característicos e das regiões específicas. Já quando há presença de corrosão localizada, geralmente são registradas curvas de polarização potenciodinâmica cíclica como em (b), onde são identificadas duas regiões de passividade características (perfeita e imperfeita) (BELLEZZE; GIULIANI; ROVENTI, 2018).

Figura 27 - Curvas de Tafel com detalhamento das regiões de corrosão proposta no estudo.



Fonte: BELLEZZE; GIULIANI; ROVENTI, 2018)

A resistência de um material à corrosão por pite é determinada por meio de potenciais adquiridos das curvas de  $T_{afel}$ , exemplificado na Figura 27. O  $E_{pit}$ , definido como potencial de pite, é o ponto neste em que a curva de polarização anódica experimenta um aumento abrupto no valor da corrente. Ele determina o início da propagação do pite. Já o  $E_{bd}$  (bd de “breakdown”), Figura 27 (b), pode ser interpretado como o ponto em que o material sofre corrosão localizada, sendo o filme passivo danificado de acordo com o potencial de ruptura indicado. No entanto, quando há presença de corrosão por pites, esse potencial se torna o  $E_{pit}$ . E ainda, se há corrosão por frestas, o mesmo potencial torna-se o  $E_{crev}$ , que normalmente assume um valor inferior ao  $E_{pit}$  (PARK; LEE, 2004).

O  $E_{rep}$ , mostrado na curva da direita, é definido como potencial de repassivação e determinado de acordo com o valor de potencial em que a curva de polarização reversa descendente atinge a curva de polarização anódica ascendente ou quando o potencial de

corrosão é alcançado.

Santos et al (2018), investigaram, em seu estudo, o efeito do tratamento de passivação química com ácido nítrico na resistência a corrosão por pite no acabamento superficial dos aços inoxidáveis ferrítico AISI 430 e austenítico AISI 316L em meio contendo cloreto. Ao analisar as curvas de  $T_{afel}$ , afirmam que acima do valor de  $E_{pit}$  há a formação e propagação de pites que crescem continuamente: os pites estáveis. Enquanto entre  $E_{pit}$  e  $E_{rep}$ , pode-se supor que não há a formação desses pites, entretanto se a iniciação tiver ocorrido em potenciais mais altos, existe a possibilidade desses pites se propagarem. E por fim, na região da curva abaixo de  $E_{rep}$ , o material é considerado imune à corrosão por pite (DOS SANTOS; BIEHL; ANTONINI, 2018).

Já Rustandi e colaboradores (2017), avaliaram experimentalmente a resistência à corrosão em chapas de aços inoxidáveis 304 L e 316L por ensaio de polarização potenciodinâmica, empregando várias composições de solução concluindo que o teor de 3,5% de NaCl é a condição mais crítica (RUSTANDI et al., 2017). Amostras de aço de ABNT 316L foram cortadas em placas de 4 cm x 4 cm x 0,5 cm, lixadas com diferentes abrasivos, polidas, limpas e secas, para então passarem pelo ensaio eletroquímico em soluções com teores de 1%, 2%, 3.5%, 4%, e 5% de NaCl. A amostra de 316L ensaiada na condição com teor de 3,5% NaCl apresentou o  $E_{pit}$  mais baixo, de 310 mV. (RUSTANDI et al., 2017), apresentando assim a menor resistência à corrosão. Isto possivelmente é devido à solubilidade do oxigênio dissolvido atingir seu ponto máximo a 3,5% de NaCl, condição esta semelhante à da água do mar.

Esmailzadeh et al (2018), realizaram uma revisão da literatura sobre a técnica de Polarização Potenciodinâmica Cíclica (CPDP), concluindo que o método se apresentou aplicável e útil para avaliar a suscetibilidade de diferentes metais e ligas à corrosão. O teste pode prever corretamente o comportamento corrosivo dos metais. Estes pesquisadores propõem que:

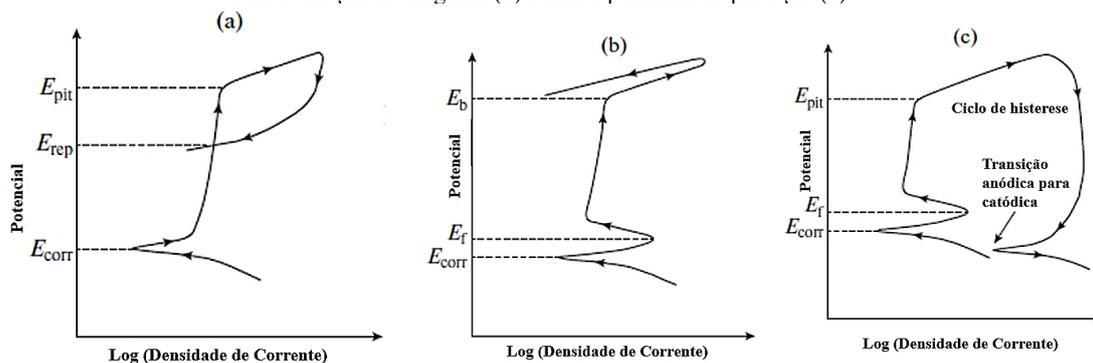
1. As normas ASTM G61 (“ASTM G61 – 86”, 2018) devem ser seguidas para a realização do teste CPDP em ligas à base de ferro, níquel ou cobalto.
2. Os parâmetros: potencial de pite ( $E_{pit}$ ), potencial de repassivação ( $E_{rep}$ ) (ou proteção), potencial de transição anódica para catódica, histerese e potencial de transição ativo-passivo devem ser usados para interpretar a curva CPDP.
3. A diferença entre o potencial de pite e o potencial de proteção de corrosão é o parâmetro mais importante para avaliar a resistência à corrosão por pite

do material.

4. A taxa de varredura, a reversão do ponto de varredura, os íons agressivos e a temperatura são alguns dos diferentes parâmetros importantes ao estudo do comportamento da corrosão, afetando a forma das curvas (ESMAILZADEH; ALIOFKHAZRAEI; SARLAK, 2018).

A Figura 28 mostra três curvas obtidas a partir da técnica CPDP. A Figura 28 (a) mostra o potencial de varredura em que o ciclo de histerese é concluído, indicando repassivação ( $E_{rep}$ ). Já a Figura 28 (b) mostra a evolução do oxigênio e o potencial em que a transição anódica para catódica é alcançada. Por fim, observa-se que o ciclo de histerese não é concluído em Figura 28 (c) e o potencial de corrosão é alcançado.

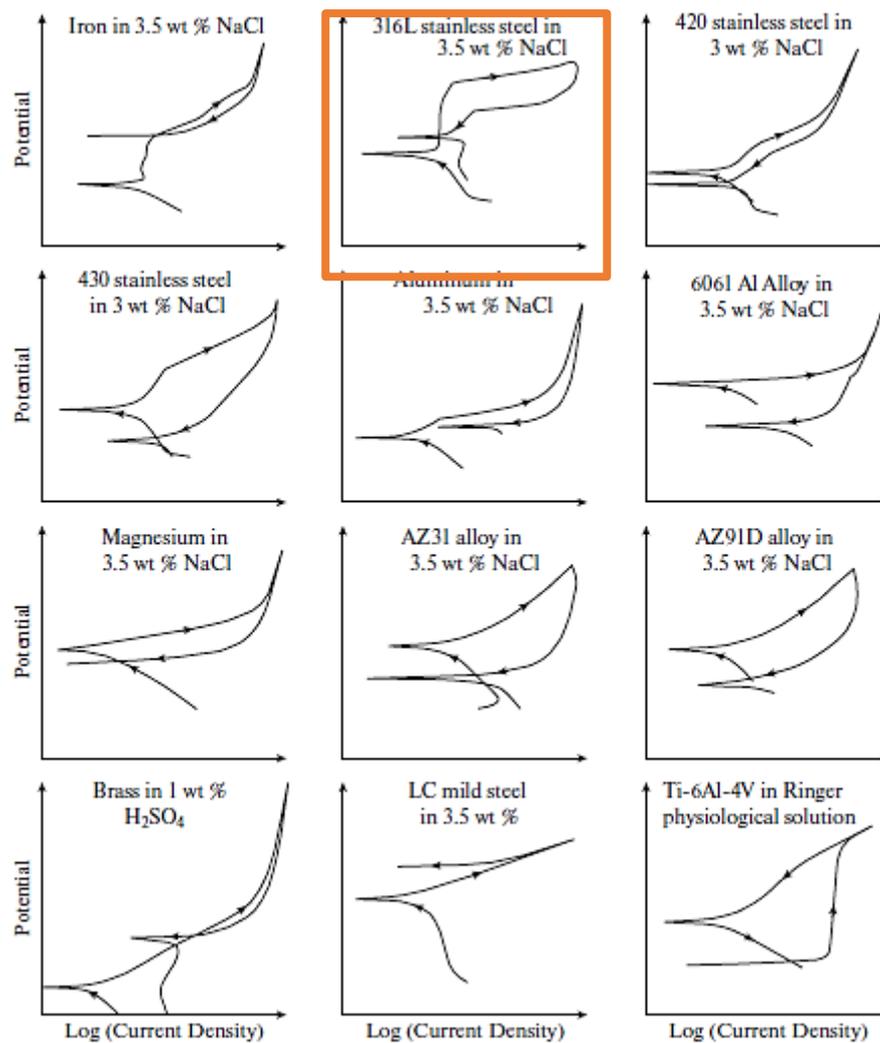
Figura 28 - Esquema das curvas do teste CPDP para três diferentes condições, exibindo o potencial de proteção (a), com evolução do oxigênio (b) e sem o potencial de proteção (c).



Fonte: ESMAILZADEH; ALIOFKHAZRAEI; SARLAK, 2018.

ESMAILZADEH; ALIOFKHAZRAEI; SARLAK, (2018) apresenta algumas curvas típicas de diferentes materiais sujeitos a diferentes percentuais de solução empregados no teste de CPDT, as quais podem ser observadas na Figura 29. No presente estudo será empregado um ensaio de polarização potenciodinâmica para avaliar o potencial de corrosão por pite para o aço 316L, empregando-se uma solução com teor de 3,5% de NaCl, conforme indicado em laranja na Figura 29.

Figura 29 - Esquema de curvas típicas de CPDP de alguns metais e ligas.



Fonte: (ESMAILZADEH; ALIOFKHAZRAEI; SARLAK, 2018).

Por fim, a literatura correlaciona resultados do ensaio eletroquímico com resultados topográficos em um estudo que o efeito da rugosidade no filme passivo do aço AISI 316L foi investigado em duas diferentes condições: superfície lixada e superfície passivada quimicamente. A eficiência do filme passivo formado naturalmente depende da rugosidade da superfície, ou seja, o potencial de corrosão aumenta com a diminuição da rugosidade da superfície (ESMAILZADEH; ALIOFKHAZRAEI; SARLAK, 2018). Isso significa que a rugosidade da superfície pode nuclear e propagar pites metaestáveis e estáveis.

ESMAILZADEH; ALIOFKHAZRAEI; SARLAK, 2018, afirma também que o potencial de pite de um aço AISI 301 foi maior para uma superfície lisa e com baixa rugosidade do que para as amostras com superfícies mais rugosas, logo a resistência a

corrosão desse material foi maior para menor rugosidade.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Tubos de Calor (Labtucal) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC e faz parte do escopo de um projeto em parceria com a Petrobrás. Os ensaios de MEV, de interferometria óptica, MO e ensaios de polarização potenciodinâmica foram realizados em parceria com o Laboratório de Materiais (Labmat) da UFSC.

No presente capítulo serão descritos os procedimentos de preparação da matéria-prima para realização da usinagem fotoquímica, seguida do processo de eletropolimento e das devidas análises usadas para a caracterização da superfície, dos canais e da microestrutura do material.

A Figura 30 apresenta o fluxograma das etapas que realizadas neste estudo. Inicia-se o trabalho com a escolha da matéria-prima e desenvolvimento do fornecedor de usinagem fotoquímica (Etapa 0, realizada externamente ao laboratório). Em seguida, iniciam-se as etapas mais práticas do presente estudo.

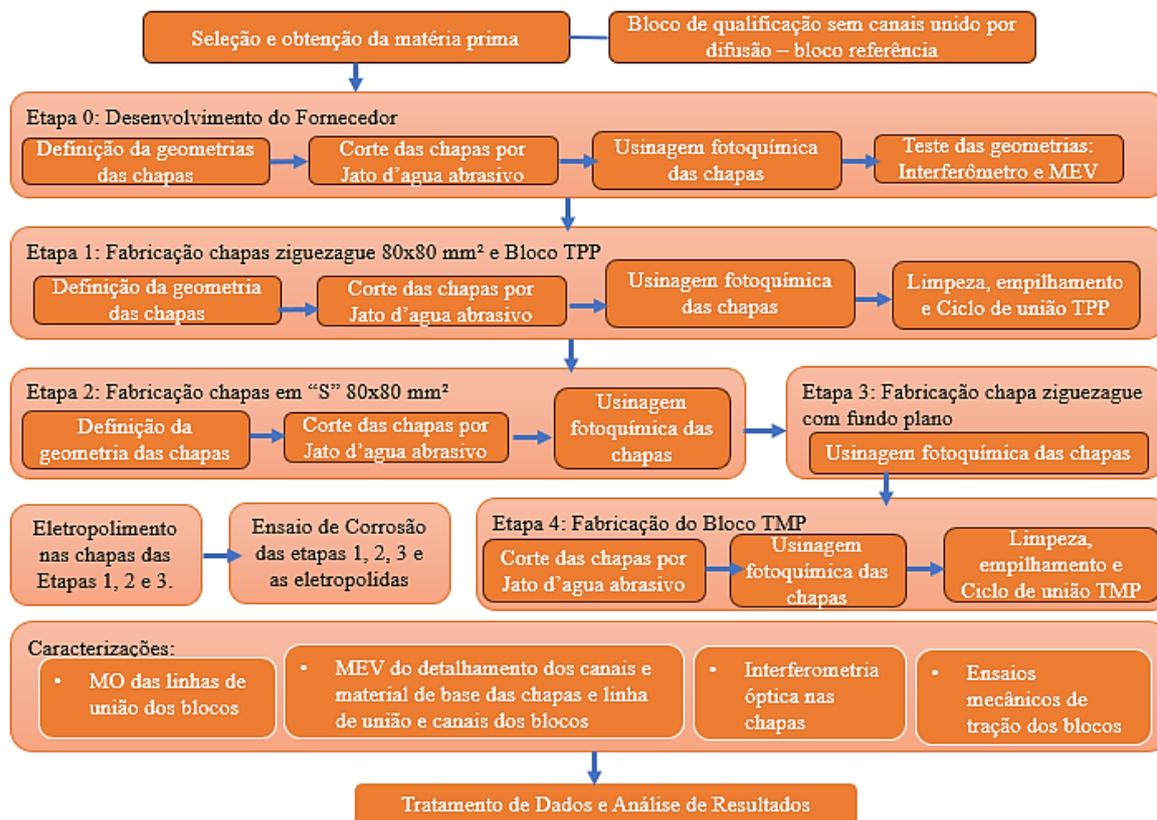
A primeira etapa consiste em fabricação de chapas em tamanho reduzido para posterior união e montagem do bloco pequeno porte, denominado TPP. Iniciou-se no corte das chapas por jato d'água abrasivo em dimensões menores ( $80 \times 80 \text{ mm}^2$ ) e seguida da fabricação dos canais por usinagem fotoquímica em empresa externa em duas geometrias (tradicional ziguezague e em S). Em seguida fez-se a limpeza das chapas ziguezague para fabricação do trocador de calor pequeno porte.

A etapa posterior consiste no corte das chapas em dimensões maiores ( $560 \times 330 \text{ mm}^2$ ), seguida da usinagem dos canais de fluxo em configuração ziguezague por usinagem fotoquímica para fabricação do núcleo do trocador de calor médio porte, TMP. Fez-se então o eletropolimento das chapas e ensaio de corrosão das mesmas.

Por fim, a realização das caracterizações microestruturais, topografia e tração nas devidas amostras de chapas e/ou de blocos unidos e posterior análise de resultados obtidos.

Ademais, um bloco denominado Referência foi fabricado com chapas maciças em dimensões de  $200 \times 200 \text{ mm}^2$  e altura de 110 mm. Este foi utilizado como objeto de comparações com os demais blocos e para qualificação dos parâmetros de união definidos previamente: temperatura de  $1040^\circ \text{ C}$ , pressão de 9,51 MPa e tempo de patamar de 1 hora.

Figura 30 - Fluxograma das etapas do presente estudo.



Fonte: Autora.

#### 4.1 MATÉRIA-PRIMA

O material utilizado em todas as etapas deste estudo é o aço inoxidável austenítico do tipo ABNT 316L, comumente empregado em trocadores de calor compactos, tendo em vista o ambiente corrosivo, assim como às altas pressões e temperaturas, a que o trocador é exposto.

A aquisição das chapas foi realizada com base em procedimentos de compra e controle de qualidade da matéria prima, desenvolvido previamente no laboratório conforme o exposto em (AMARAL, 2022) e (CALDAS, 2022). Nestes procedimentos são consideradas as seguintes normas: *ASTM A240/A240M – Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*, *ASTM A480/A480M – Standard Specification for General Requirements for Flat-Rolled Stainless and Heat-Resisting Steel Plate, Sheet, and Strip* e *ASTM A262 – Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels*, para as seguintes características:

- Análise de composição química;

- Propriedades mecânicas (dureza, limite de resistência máxima, tensão de escoamento e alongamento);
- Tamanho de grão (7,0-9,0)
- Resistência à corrosão intergranular (oxálico aprovado).

Adicionalmente, a matéria-prima foi encomendada em acabamento de superfície padrão ASM N° 2B, ou seja, material laminado a frio, solubilizado e decapado em que, no fim de seu processo de fabricação, passa por rolo polido. Outros aspectos padronizados para a encomenda foi a espessura de 2 mm e planicidade de até 0,8 mm.

## 4.2 PROCESSAMENTO

Neste tópico serão apresentados todos os processos realizados para obtenção das chapas e dos blocos unidos por difusão (blocos do trocador de pequeno porte - TPP e do de médio porte - TMP).

### 4.2.1 Bloco Referência

A etapa de fabricação deste bloco ocorreu antes do início do presente estudo, no entanto os resultados foram analisados no presente contexto e serão apresentados para correlação com resultados dos demais blocos.

O bloco foi fabricado a partir do empilhamento de 55 chapas planas com acabamento 2B, sem processos de acabamento da superfície e sem canais, de 2 mm de espessura. Devido a espessura das chapas das etapas seguintes deste estudo ser a mesma do atual bloco, resultados do presente bloco foram usados como referência em comparações.

Os parâmetros de união usados na fabricação deste bloco foram os padrões obtidos a partir de outras pesquisas no laboratório (ver MORTEAN, 2014), ou seja: temperatura de 1040 °C, pressão de 9,51 MPa e tempo de patamar com aplicação da pressão em 1 hora, em atmosfera de vácuo. Após a fabricação do bloco, amostras foram retiradas e enviada para ensaios de tração e análises microestruturais das interfaces de união, com o intuito de obter as propriedades mecânicas deste bloco pra verificar se cumprem os requisitos em comparação com o material base, conforme estabelecido por norma.

#### 4.2.2 Etapa Teste de Fornecedor e Definição da Geometria

Antes de prosseguir com o trabalho, foi necessário qualificar fornecedores de serviço de usinagem fotoquímica de canais, visando a fabricação de placas de grandes dimensões, próximas às reais, encontradas em um trocador de calor compacto. Uma pesquisa de mercado no setor nacional mostrou que, das sete empresas contatadas, duas (A e B) responderam ser capazes de atender as condições de geometria e tamanho de canal, conforme é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Respostas sobre o serviço de usinagem fotoquímica.

EMPRESA	RESPOSTA	COMENTÁRIOS
A	Atende	-
B	Atende	-
C	Talvez	Não responderam mais depois de explicarmos o pedido.
D	Não atende	Não fazem gravação química com o raio e profundidade solicitadas.
E	Não atende	Trabalham com profundidade de ataque de no máximo 0,5mm.
F	Não atende	Não fazem o serviço nas condições solicitadas.
G	Não atende	Não fazem o serviço nas condições solicitadas.

Fonte: Autora.

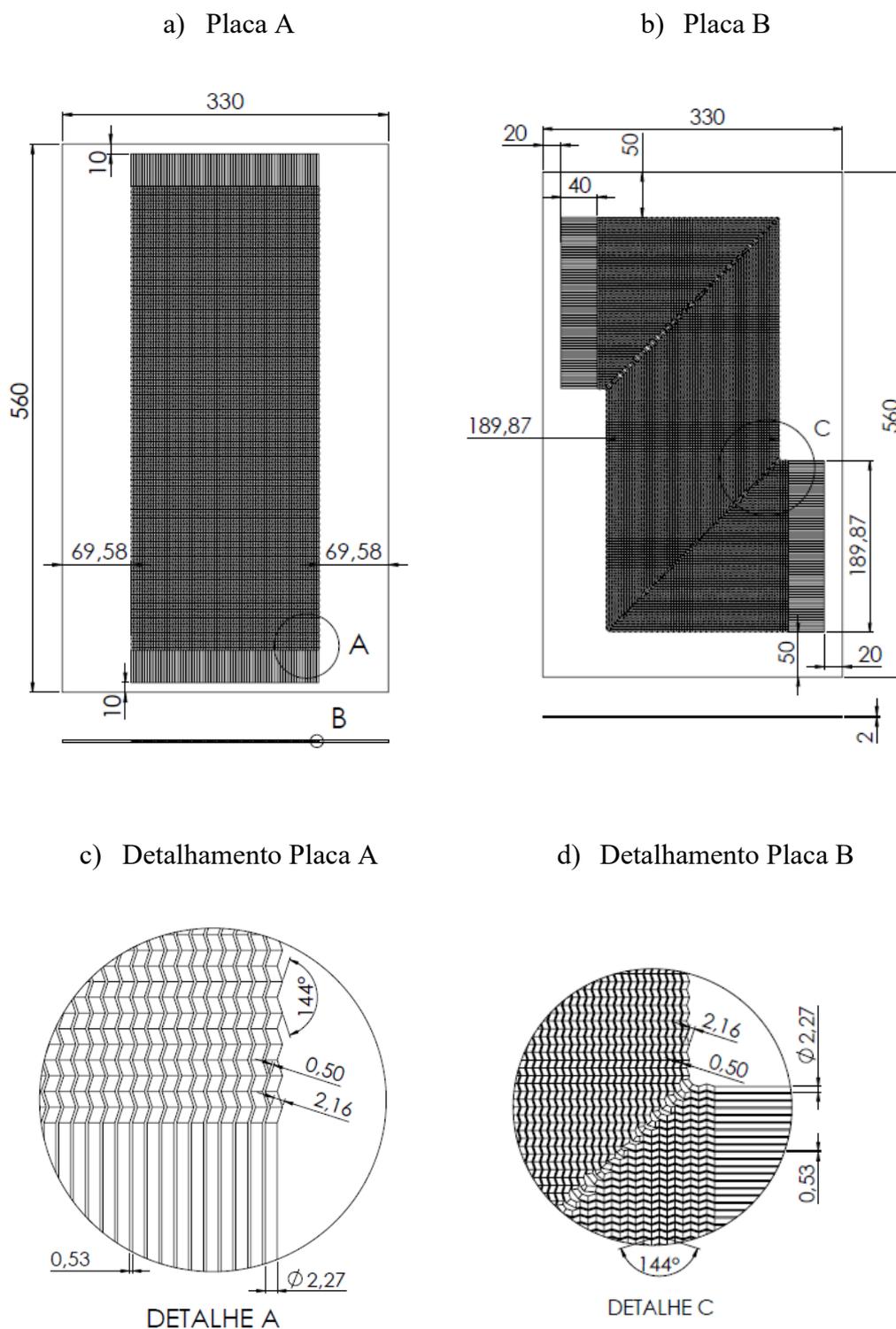
Analisadas todas as propostas, optou-se pelo fornecedor B devido ao menor custo. Para este desenvolvimento do fornecedor do serviço, foram enviadas duas placas testes para a empresa, nas dimensões 560x330x2 mm<sup>3</sup> com geometria ziguezague, visando a fabricação de um trocador de tamanho intermediário (trocador de médio porte – TMP), conforme mencionado na introdução deste capítulo. A Figura 31 abaixo indica as características das chapas, como as angulações, diâmetros e distância entre os canais, onde se observa que os canais (em ziguezague) de uma chapa (A) são retos e os da outra (B) em Z, de modo que o núcleo final fique com o arranjo contracorrente e fluxos que

trocam calor entre si.

A definição da geometria dos canais, das dimensões dos canais e das chapas para o TMP foi definida tendo em vista a capacidade de fabricação do processo de usinagem fotoquímica, juntamente à empresa parceira. Assim, a seção transversal dos canais usinados por ataque fotoquímico apresentam geometria semicircular. Entre dois canais adjacentes se encontram filetes de separação dos canais aqui chamados de aletas, que também garantem a união entre chapas. O ângulo de zigzague foi fixado em  $144^\circ$ , considerado o ideal em termos de trocas térmicas e as perdas de carga.

Nas laterais das chapas, foram deixadas “aletas bem grossas”, para garantir de “fechamento” do núcleo. Após unidas, laterais das chapas são removidas na etapa de abertura dos canais.

Figura 31 - Desenho chapa A (a), chapa B (b), detalhamento chapa A (c) e detalhamento chapa B (d).



Fonte: Autora.

As do envio ao serviço de usinagem fotoquímica, as chapas adquiridas do fornecedor, de tamanho padrão 2000 x 1250 mm<sup>2</sup>, foram cortadas via equipamento de

jato d'água, modelo Mach 2C 2030 da marca Flow Waterjet, pertencente ao Labtucal (Figura 32).

Figura 32 - Máquina de corte via jato d'agua presente no Labtucal.



Fonte: Autora.

As chapas foram enviadas para fabricação dos canais por usinagem fotoquímica na empresa B, que descreveu algumas das etapas do processo, mostradas a seguir:

- Sobre a máscara fotorresistente: atualmente existem diversos produtos disponíveis no mercado internacional e todos eles são basicamente uma mistura de monômeros e copolímeros sensíveis a uma determinada radiação, em geral luminosa. Os fotorresistentes podem ser do tipo seco e laminados ou então líquidos. A empresa dispõe dos dois modelos, mas a composição e método de aplicação são segredos industriais das empresas fabricantes.
- Sobre a limpeza na pré-usinagem: o desengraxe das superfícies é uma operação fundamental ao processo, consistindo basicamente de duas etapas, limpeza mecânica e limpeza química. Na limpeza química são utilizados diversos ácidos, entre eles o HCL, assim como outros sais, sempre com características ácidas.
- A limpeza mecânica é feita com uma escova que provoca uma certa rugosidade na superfície, melhorando a posterior aderência da máscara.
- Sobre a temperatura do processo: a temperatura máxima no processo é de 90°C embora a média seja de 50°C.
- Sobre o tempo do processo: o tempo está diretamente relacionado com a temperatura da solução. Quanto mais alta a temperatura mais rápida é a corrosão química. No presente caso, o tempo médio do processo é de 5 horas.

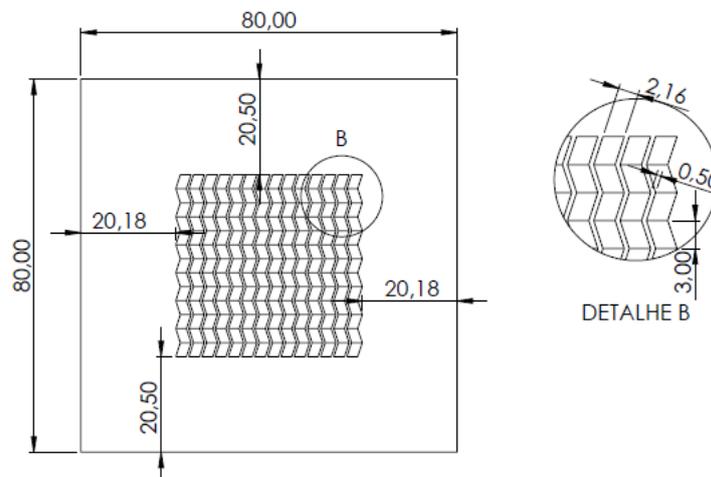
- Sobre a temperatura e tempo da solução de ataque: a temperatura de corrosão está ligada ao tipo de equipamento utilizado e a temperatura de trabalho é em média 50°C. Como as reações são em geral exotérmicas este controle é importante. O tempo de ataque depende da saturação da solução, da temperatura da mesma e do material a ser usinado.
- Sobre o percentual da solução de ataque: FeCl<sub>3</sub> com concentração 40%, densidade a 20°C de 1,38 a 1,45, acidez livre (% em HCl) máximo 1,0%. A solução vai agregando íons metálicos durante o processo de usinagem química, perdendo o seu poder corrosivo e aumentando o tempo de exposição do metal base na câmara de corrosão até atingir a cota alvo. Após saturação a solução é trocada.

#### **4.2.4 ETAPA 1: Chapas ziguezague e bloco unido por difusão**

Uma vez definida a geometria de canal ziguezague que o fornecedor da usinagem fotoquímica pudesse produzir (ver Figura 33), e após o corte em Jato d'água abrasivo nas dimensões de 80x80 mm<sup>2</sup>, canais em configuração ziguezague foram fabricados por usinagem fotoquímica em 12 chapas, conforme mostra a Figura 33. Nesta etapa, a capacidade do fabricante foi testada, ou seja, verificou-se se a geometria resultante do processo correspondia à pré-estabelecida em termos do tamanho das aletas, da profundidade e do raio do canal.

O bloco do TPP (trocador pequeno porte) foi formado pelo empilhamento de 10 chapas usinadas com canais em ziguezague, 20 chapas lisas de fechamento acima e 20 chapas lisas de fechamento abaixo, atingindo uma altura nominal de 100 mm. Estas dimensões são adequadas para a retirada de amostras a serem empregadas em análises mecânicas e microestruturais posteriores.

Figura 33 - Desenho técnico da chapa com a configuração zig-zague.



Fonte: Autora.

As chapas foram limpas em banho ultrassônico com água e detergente na proporção de aproximadamente 1/60 L, e lavadas em água corrente. Por fim, foram realizadas a secagem com ar quente.

Ainda uma segunda etapa de limpeza foi realizada, a fim de remover partículas, gorduras e impurezas residuais das etapas anteriores, a qual foi feita em banho ultrassônico com álcool etílico (96°gl) durante 15 minutos, seguida de secagem com ar quente. Por fim, imediatamente antes do empilhamento das chapas, uma última limpeza foi realizada com álcool isopropílico para remoção de partículas porventura depositadas.

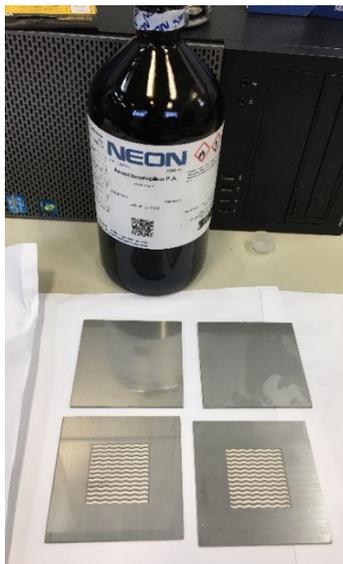
#### 4.2.5 Ciclo de união por difusão bloco TPP

O ciclo termomecânico de união por difusão foi realizado no forno tipo prensa de alto vácuo, marca PVA-Tepla e modelo MOV 653HP, instalado nas dependências do Labtucal. O forno pode atingir uma atmosfera de vácuo de  $10^{-6}$  mbar e tem capacidade interna de produzir protótipos de trocador de calor compactos até tamanhos real, com volume útil de  $800 \times 600 \times 600 \text{ mm}^3$ .

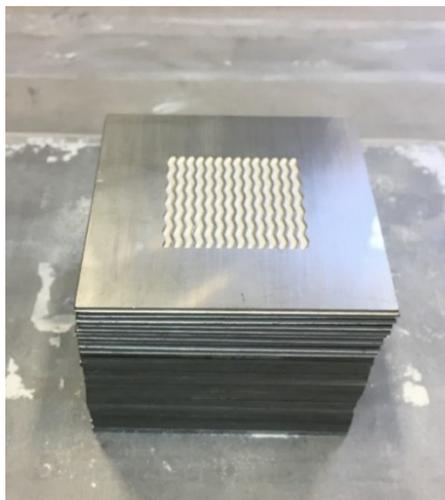
A Figura 34 mostra a preparação das chapas para o ciclo de união. Na Figura 34 (a) tem-se a limpeza final com álcool isopropílico, em (b) o empilhamento das chapas em (c) o bloco já empilhado e com a última chapa coberta de HbN (usado para não ocorrer contato direto com a matriz que poderia ser unida ao bloco no processo) e por fim em (d) o TPP dentro do forno de união.

Figura 34 - Limpeza final com álcool isopropílico nas chapas (a), chapas empilhadas (b), chapas preparadas com aplicação do HbN na chapa final (c), bloco posicionado na matriz dentro do forno (d).

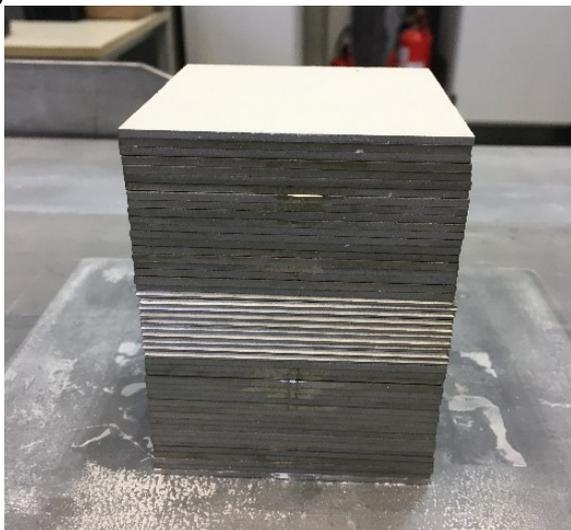
a)



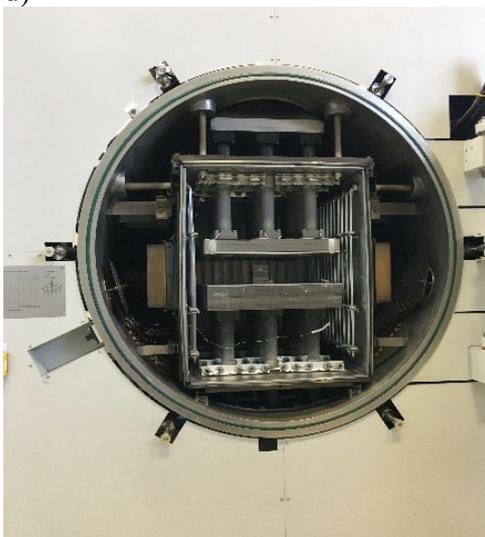
b)



c)



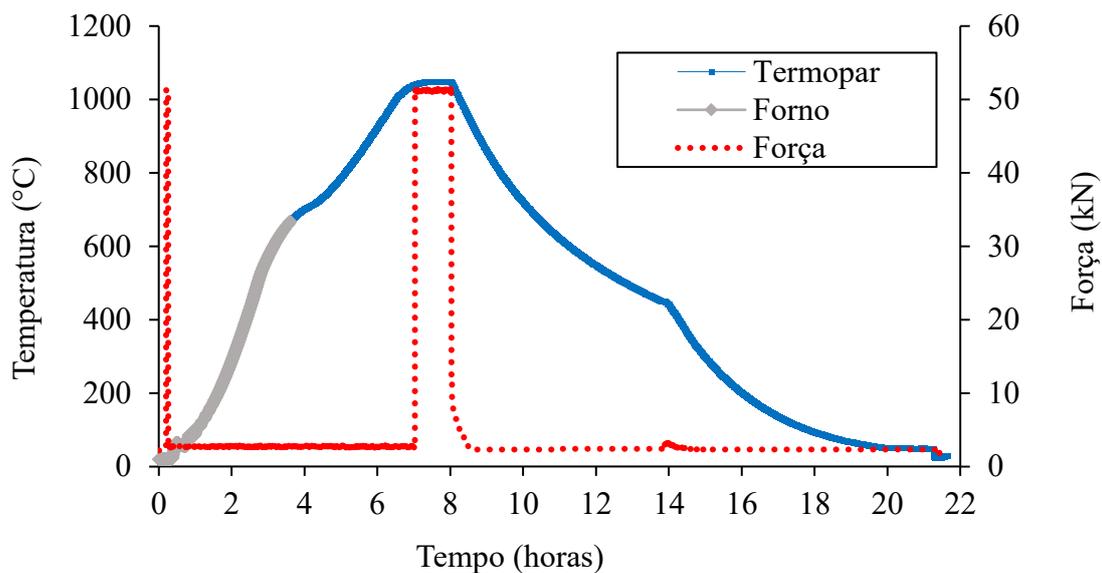
d)



Fonte: Autora.

Os parâmetros de processo, como temperatura, tempo e pressão foram baseados na fabricação do bloco de referência realizado em estudos prévios ao presente trabalho, ou seja, a temperatura de 1040° C no patamar de união de 1 hora e uma pressão 9,5 Mpa, conforme descrito na seção Bloco Referência). O gráfico exibido na Figura 35 mostra os parâmetros que foram efetivamente empregados: temperatura de 1048°C e uma carga de 51 kN, no patamar de união de aproximadamente 1 hora.

Figura 35 – Curva tempo-temperatura-pressão do ciclo de união por difusão do bloco TPP.

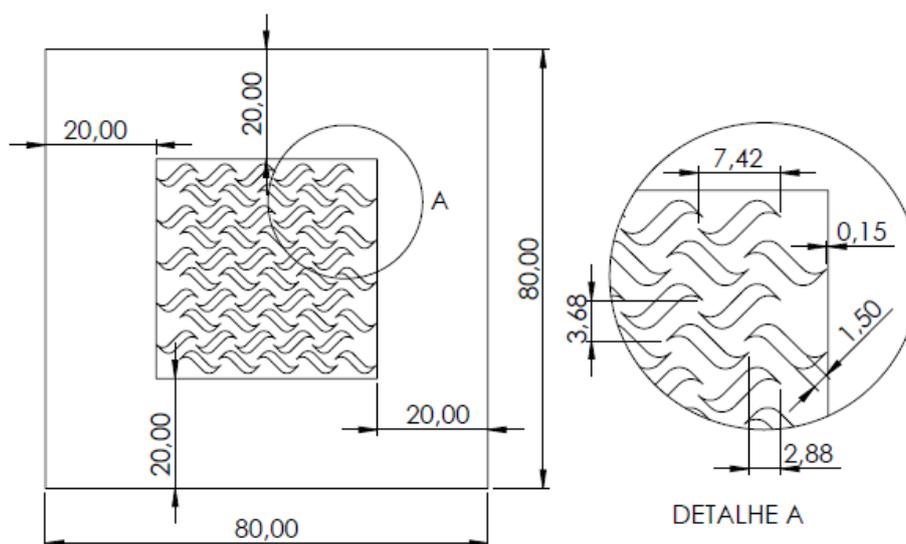


Fonte: Autora.

#### 4.2.6 ETAPA 2: Chapas em S

Amostras de chapas, também nas dimensões de 80 x 80 mm<sup>2</sup> foram usinadas com uma geometria de canal semelhante a um “S”, diferente da configuração convencional zigzague, conforme, Figura 36, visando verificar se o fabricante seria capaz de produzir estas peças e qual a qualidade desta fabricação.

Figura 36 -Desenho técnico da amostra de geometria alternativa em formato de aleta em S.



Fonte: Autora.

#### 4.2.7 ETAPA 3: Chapa Z com fundo do canal liso

Uma chapa usinada fotoquimicamente, parcialmente em geometria ziguezague, mantendo-se parte corroída plana (sem os canais), foi produzida conforme Figura 37. Dados obtidos por ensaios de corrosão e das características de topografia (interferômetro e MEV, ver na sequência) são comparadas com dados obtidos a partir desta amostra. Como a placa simula as características esperadas para o canal, esta condição é denominada de Fundo do Canal (FCZ). Posteriormente, foi aplicado eletropolimento nessa placa e os resultados comparados com os das demais amostras.

Figura 37 - Chapa usinada fotoquimicamente com uma parte plana para análise do fundo do canal.

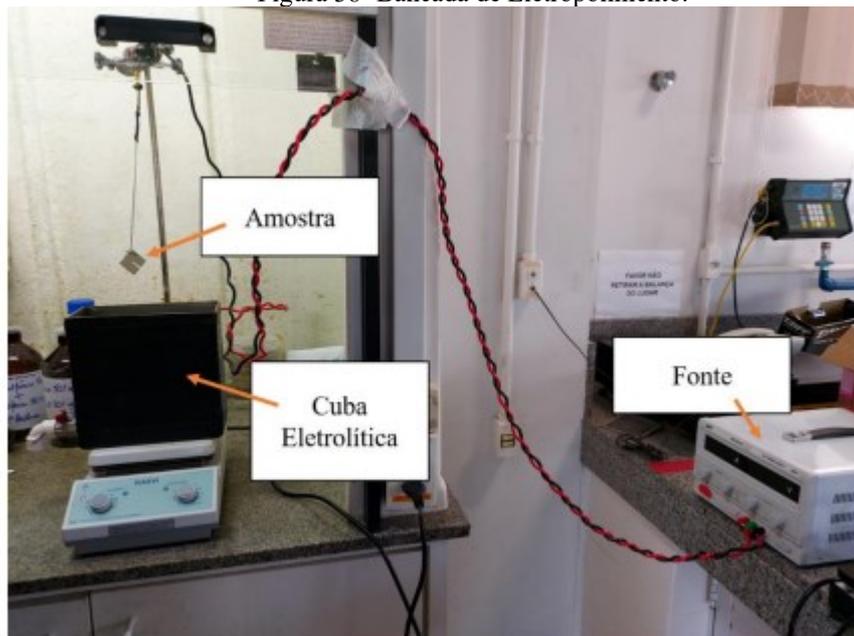


#### 4.2.8 Eletropolimento

O processo de eletropolimento foi aplicado apenas em três amostras: uma chapa usinada na configuração ziguezague, uma em “S” e na chapa com fundo do canal plano, (ver Figura 37). Note-se que o custo das chapas em “S” é alto não havendo fonte de recursos para esta fabricação, uma vez que o desenvolvimento desta geometria não fazia parte do projeto-chapéu provedor de recursos.

Furos com 5 mm de diâmetro na extremidade de cada amostra foi feito para prendê-las ao aparato utilizado na bancada de eletropolimento, conforme mostra a Figura 38.

Figura 38- Bancada de Eletropolimento.



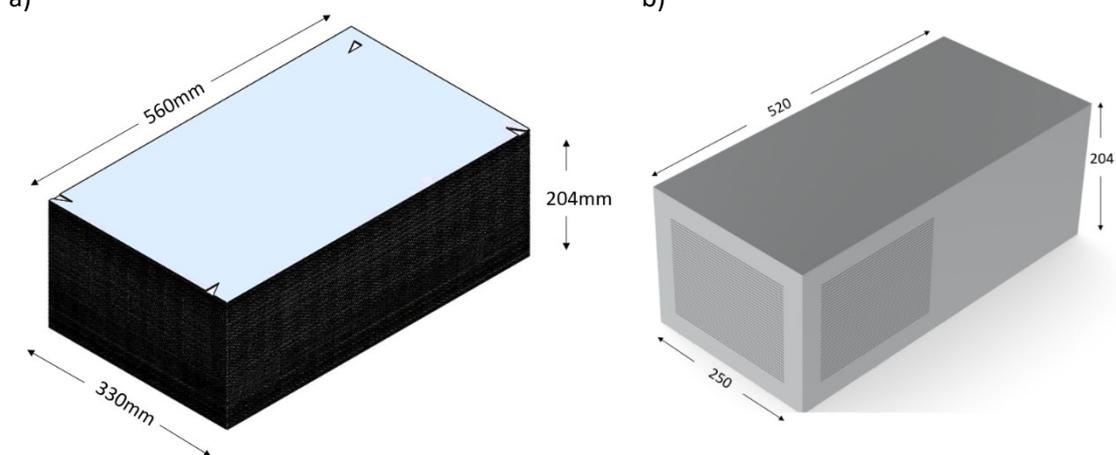
Fonte: Amaral, 2022.

As chapas foram polidas eletroliticamente nas condições de trabalho pré-definidas em estudo anterior (AMARAL, 2022), ou seja, controlando-se o tempo, densidade de corrente e solução de processo. O tamanho das amostras foi de 80x80 mm<sup>2</sup>, a densidade de corrente ficou em aproximadamente 0,07 A/cm<sup>2</sup> e, portanto, o tempo necessário de ensaio foi de 143,42 minutos (2 horas e 24 min). A solução utilizada neste estudo é a mistura de ácido fosfórico e ácido sulfúrico, 50% em volume de cada.

#### 4.3 ETAPA 4: TROCADOR DE MÉDIO PORTE (TMP)

Nesta etapa foi realizada a fabricação do protótipo médio porte com geometria de canais ziguezague. Nesta fase, o serviço do outro fornecedor de usinagem fotoquímica (A) foi empregado. A dimensão de cada chapa foi de 560 x 330 mm<sup>2</sup> com espessura de 2 mm, conforme esquema indicado na Figura 31. A Tabela 5 mostra as características geométricas do bloco TMP. A Figura 39 mostra os desenhos do núcleo do trocador de médio porte com respectivas dimensões: em (a) com as chapas nas dimensões citadas na Tabela 5, e em (b) após a remoção das bordas do núcleo, de forma que se possa observar os canais abertos com as respectivas dimensões em cada etapa.

Figura 39 - Esquema núcleo empilhado em (a) e esquema núcleo após a remoção das bordas em (b).



Fonte: Autora.

Tabela 5 - Dimensões e características do bloco TMP.

<b>Comprimento</b>	<b>520,00 mm</b>
<b>Largura total</b>	250,00 mm
<b>Altura total</b>	204,00 mm
<b>Largura útil</b>	189,89 mm
<b>Altura útil</b>	144,00 mm
<b>Número total de canais</b>	2448
<b>Largura do canal</b>	2,16 mm
<b>Profundidade do canal</b>	1,08 mm
<b>Largura da aleta</b>	0,50 mm

Fonte: Autora.

#### 4.3.1 Limpeza antes do ciclo de união

Nesta etapa a limpeza das placas ocorreu de maneira semelhante à descrita para a fabricação do bloco TPP. Porém, foram necessárias adaptações devido ao tamanho das chapas a serem limpas. O processo se iniciou com um banho ultrassônico com desengraxante industrial diluído em água, seguido de um banho ultrassônico com álcool etílico e por fim, limpeza com álcool isopropílico antes do empilhamento das placas.

A área de trabalho montada para esta limpeza das placas é apresentada na Figura 40. Um dispositivo foi desenvolvido que permitisse que várias chapas fossem limpas simultaneamente e que as placas fossem giradas, uma vez que o aparelho de banho ultrassônico possui um pequeno volume (1m de largura x 0,2m de profundidade x 0,2m

de altura), o suficiente para limpar cerca da metade de cada placa no sentido de sua altura. Portanto, cada metade da placa era limpa por aproximadamente 10 minutos, tanto para a mistura de água e desengraxante, quanto para o banho com álcool etílico. Este giro das placas atrasou bastante o processo de limpeza.

Figura 40 - Área de limpeza das chapas do TMP: 1 – Placas separadas para limpeza; 2 – Placas para banho ultrassônico; 3 – Banho ultrassônico; 4 – Secagem; 5 – Placas limpas e prontas para a união por difusão.



Fonte: Autora.

### 4.3.2 Preparação e Ciclo de União por Difusão do TMP

O bloco TMP (que representa um pequeno núcleo do PCHE) foi unido por difusão a partir do empilhamento de 72 chapas usinadas fotoquimicamente, intercaladas nas duas configurações (36 retas (chapa A) e 36 em Z (chapa B)) e 30 chapas lisas de fechamento, 15 acima e 15 abaixo das placas usinadas. As quantidades e geometrias das placas empregadas nessa configuração estão indicadas na Tabela 6.

Tabela 6 -Quantidade e dimensões das chapas que compõem o bloco do TMP.

Tipo da Placa	Espessura [mm]	Quantidade	Espessura Total [mm]
Canais retos	2	36	72
Canais em Z	2	36	72
Fechamento	2	30	60
<b>Total</b>	-	102	204

Uma vez empilhadas as chapas e o conjunto colocado no forno, antes de se iniciar o ciclo, foi realizado o teste de aplicação de força e a medição da altura do bloco, onde diferentes níveis de força foram aplicados. Os patamares de força foram correspondentes à 25%, 50%, 75% e 100% da força calculada para a união (função da área de contato das placas e da pressão de união, um valor pré-estabelecido). A altura de projeto, dada pela altura ideal das placas, foi de 204 mm. Também foi realizada uma medida da altura do bloco antes e depois de cada aplicação de força. Terminada esta fase, foram realizados os testes de pressão e vácuo na câmara do forno e então o ciclo de união por difusão foi iniciado.

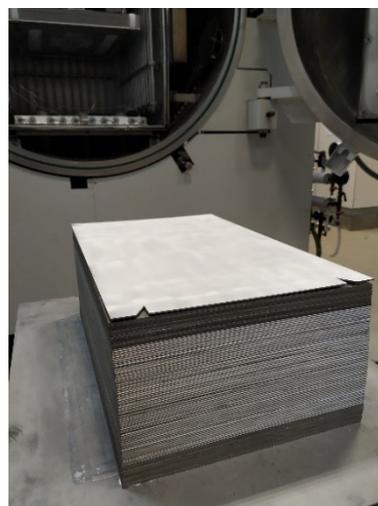
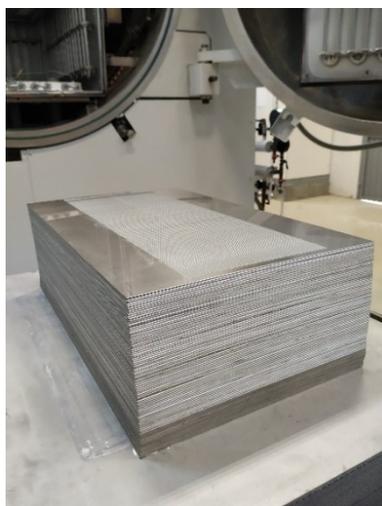
Como já comentado, os parâmetros de união utilizados, a priori, foram os baseados no trinômio temperatura, tempo e pressão qualificado anteriormente de: 1040°C, 1 hora de patamar e 9,51 MPa em atmosfera de vácuo de  $10^{-6}$ mbar.

Antes do empilhamento das placas, foi necessário aplicar uma camada de lubrificante sólido, nitreto de boro hexagonal (h-BN), na face externa das chapas das duas extremidades, com objetivo de diminuir o atrito e a aderência da matriz do forno as chapas. A configuração do bloco, conforme Figura 39, tinha altura nominal de 204 mm, largura e comprimento de 330 mm e 560 mm e apresentava 102 chapas, atendendo o número mínimo de interfaces solicitadas em norma para qualificação dos parâmetros de união no desenvolvimento de protótipos de trocadores de calor compactos (50 planos) (ASME SECTION VIII DIVISION 1, 2019).

Figura 41 - Empilhamento alternado das chapas do bloco (a); bloco com a chapa com camada de HbN (b); bloco preparado na matriz (c); e bloco dentro do forno (d).

a)

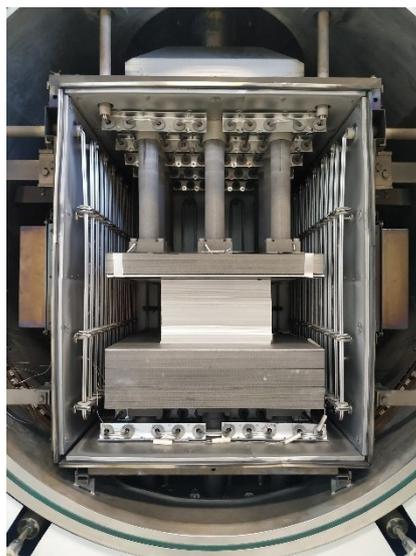
b)



c)



d)



Fonte: Autora.

#### 4.4.1 Caracterização Microestrutural

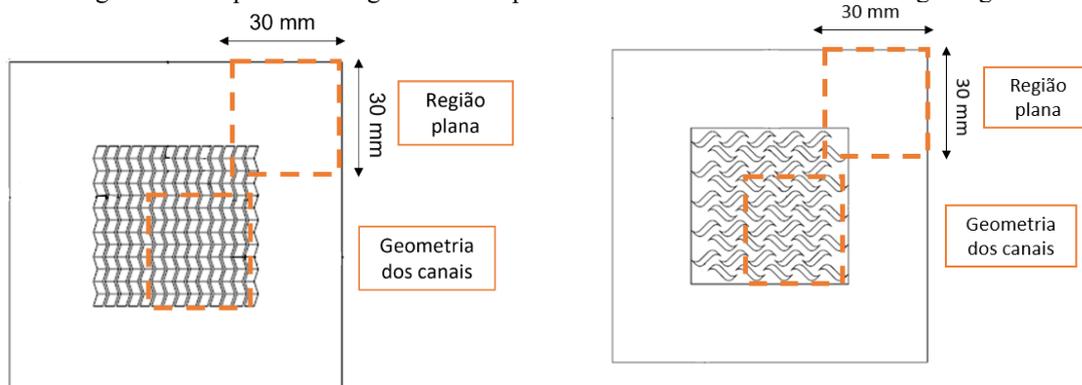
Neste tópico serão descritos os procedimentos usados nas caracterizações microestruturais realizadas tanto nas chapas quanto em blocos, para inspecionar os canais e a microestrutura do material, através de imagens de microscopia óptica (MO), em equipamento de marca e modelo MO Leica DMAP, e microscopia eletrônica de varredura (MEV), em equipamento de marca e modelo Tescan, Veja 3 – Oxford X. Para que isto fosse possível, foi necessário o corte das amostras e posterior preparação metalográfica.

##### 4.4.1.1 Caracterização microestrutural das chapas

Após a usinagem fotoquímica, as chapas das Etapas 0, 1 e 2, apresentadas no fluxograma do trabalho, foram analisadas em MEV na região dos canais. A dimensão das chapas foi de inicialmente 560 x 330 mm<sup>2</sup> e 80 x 80 mm<sup>2</sup> e devido a limitação do equipamento foram seccionadas em 30 x 30 mm<sup>2</sup>. Na Figura 42 tem-se o esquema de remoção das amostras da região com canal e da região plana em uma chapa da Etapa 1 (canal ziguezague) e Etapa 2 (canal em S). Neste caso, as amostras não passaram por nenhuma preparação metalográfica. O mesmo procedimento foi adotado para as amostras que foram eletropolidas, de canais em ziguezague e em “S”.

Antes da fabricação do bloco TMP, as chapas A e B também foram analisadas quanto à qualidade da superfície, tanto em relação ao canal quanto em relação a região lisa da chapa. Adicionalmente, foi também avaliada a região usinada de fundo de canal, desenvolvida na Etapa 3, em MEV para observação da região após a UF.

Figura 42 - Esquemas da região de corte para análise em MEV das amostras zigzague e S.

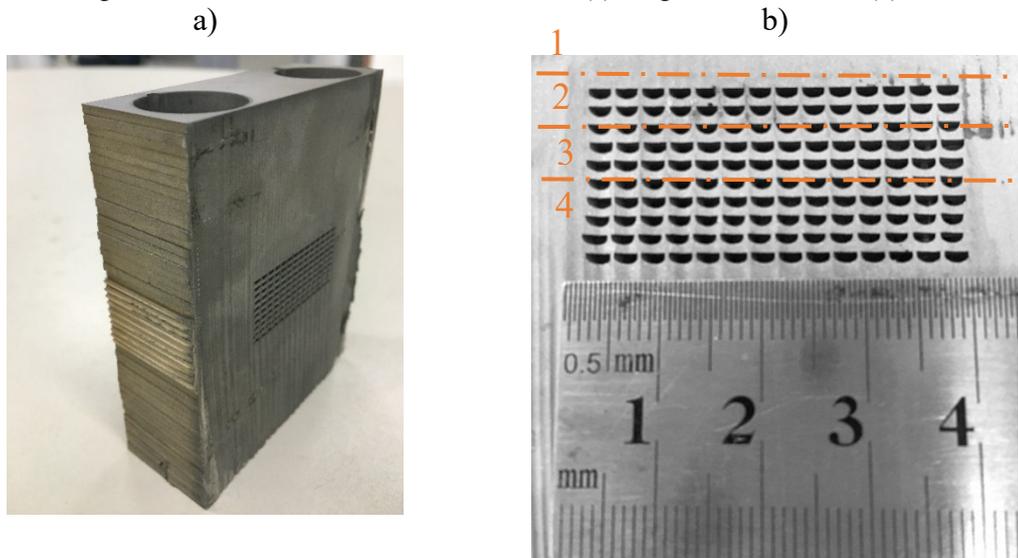


Fonte: Autora.

#### 4.4.1.2 Caracterização visual e da microestrutura dos blocos

Após a união por difusão dos blocos, referente a Etapa 1 e Etapa 4 (blocos TPP e TMP), o TPP foi seccionado ao meio para visualização dos canais internos, conforme Figura 43. Três amostras dessa região foram removidas e embutidas a frio com resina epóxi para análise em MEV, passando apenas pelo lixamento e polimento mecânico para avaliação principalmente das geometrias dos canais em MEV. Para análise das medidas de profundidade, distância dos canais e largura do canal, a imagem de uma lateral do bloco foi dividida em 4 regiões (da mais inferior para a mais superior da amostra) indicado em laranja, para obter 10 medidas aleatórias e depois compor uma média de cada uma das 4 regiões por meio do software de imagem ImageJ.

Figura 43 - Bloco TPP seccionado ao meio em (a) e região dos canais em (b).

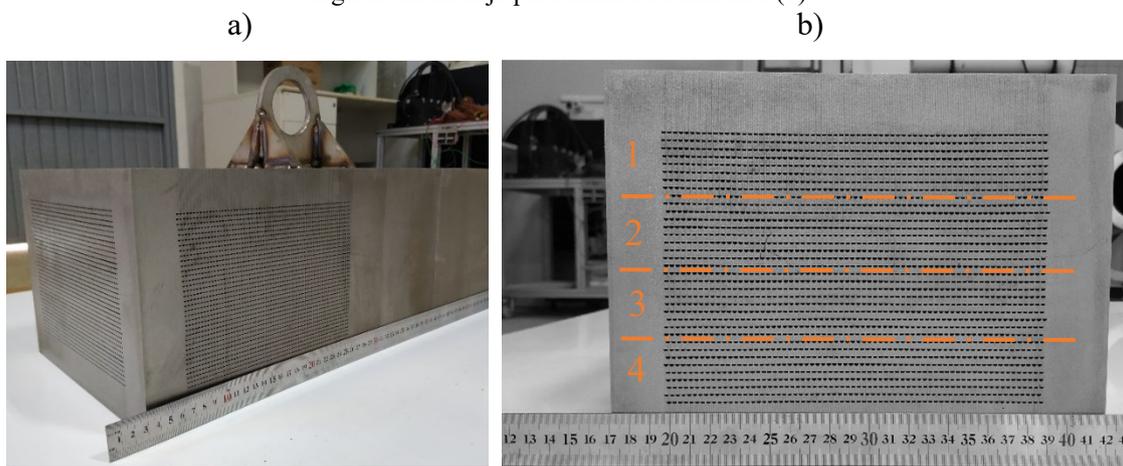


Fonte: Autora.

O bloco TMP, por sua vez, foi seccionado por eletroerosão a fio para remoção das bordas e abertura dos canais, conforme indicado na Figura 44 (a). Os canais também foram analisados e medidas foram realizadas para conferir o atendimento das especificações definidas em projeto, conforme item 4.2.2., por meio do software de imagem ImageJ.

Para obtenção da profundidade, largura e distância entres os canais fez-se o mesmo procedimento realizado no TPP, ou seja, dividir a imagem da lateral do bloco, que pode ser visto na Figura 44 (b) em 4 regiões, de forma a obter 10 medidas aleatórias e depois compor uma média de cada uma das 4 regiões.

Figura 44 - Bloco TMP após remoção das bordas (a), visualização do bloco aberto e indicações das regiões em laranja para análise de medidas (b).



Fonte: Autora.

#### 4.4.1.3 Caracterização microestrutural dos blocos

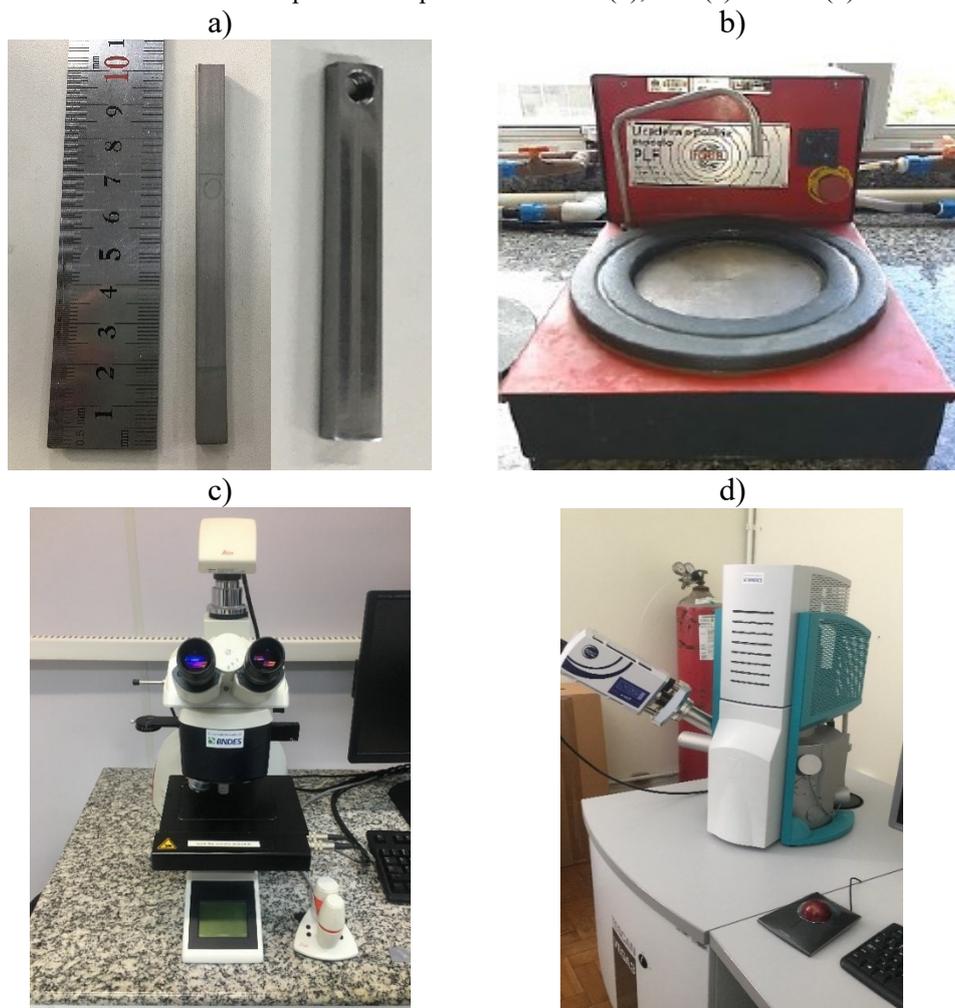
A caracterização da linha de união foi realizada em MO e MEV. Duas amostras de metalografia foram removidas de cada um dos três núcleos (Referência, TPP e TMP) para análise das interfaces de união. As etapas de preparação das amostras serão apresentadas a seguir.

A primeira etapa da preparação metalográfica consistiu no lixamento das amostras, realizado começando com a lixa de granulometria 220 mesh até ade 2000 mesh. Em seguida, foi realizado o polimento, utilizando abrasivo de pasta de diamante com granulometrias de 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$  por tempo de 3 e 1,5 minutos para cada abrasivo, respectivamente, conforme definido em estudos anteriores (HOLTZ, 2020).

Em sequência, a amostra foi atacada eletroliticamente para relevar a microestrutura do material, conforme mostrado na Figura 45 (b). Neste tratamento, o

ânodo foi a amostra e o cátodo a cuba de aço inoxidável, também de 316L, ambos ligados à fonte. O tempo de ataque foi de 30 segundos, sendo o eletrólito uma solução de 10% em massa de ácido oxálico, na qual a amostra fica imersa em uma cuba especialmente desenvolvida para o procedimento.

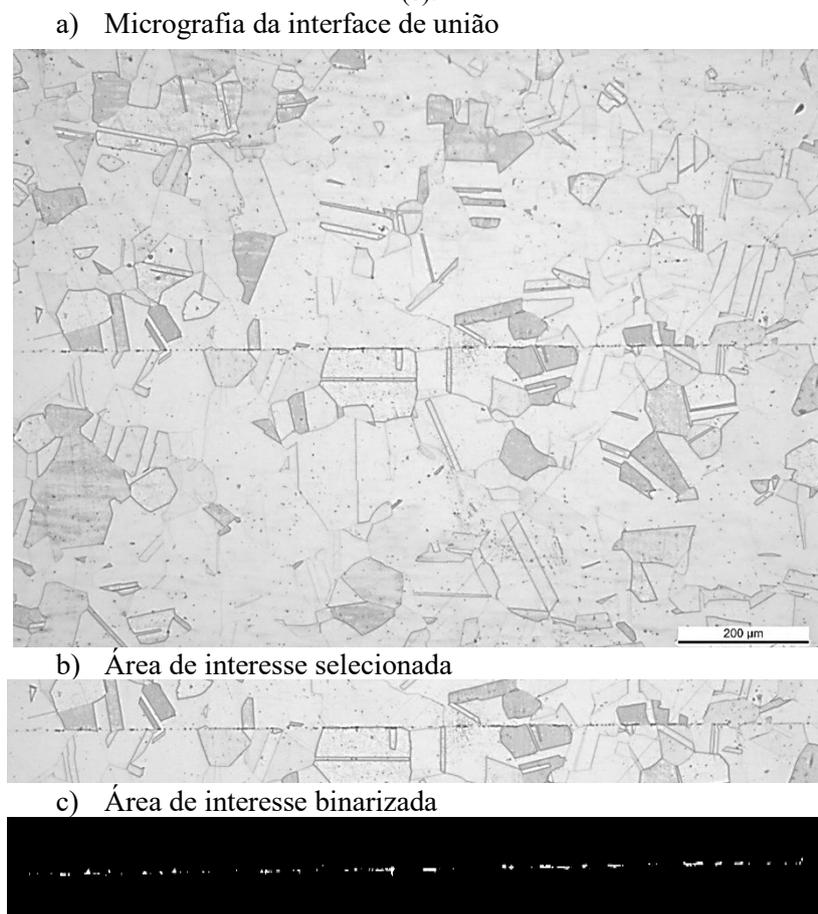
Figura 45 - Amostra de metalografia removida do bloco TPP e após a preparação metalográfica em (a); lixadeira utilizada para lixar a polir as amostras (b); MO (c) e MEV (d).



Fonte: Autora.

Adquiriu-se então imagens em MO da região de união para caracterização da interface de união tanto qualitativamente quanto quantitativamente, onde foi verificado a quantidade de defeitos, comprimento e percentual de vazios presentes na área de interesse da amostra. Para essa análise foram adquiridas e avaliadas 10 fotos de cada condição (Referência, TPP e TMP) em 100x de magnitude e então realizado a binarização da imagem por *Threshold* (conforme exemplo da Figura 46). As micrografias foram tratadas no software de processamento de imagens ImageJ / FIJI.

Figura 46 - Exemplo de tratamento de imagem em ImageJ. Primeiro a imagem selecionada (a), depois a região de interesse seccionada (b) e a área de interesse binarizada para posterior quantificação dos vazios (c).



Fonte: Autora.

Adicionalmente, foi analisada a amostra do bloco TPP e TMP também em MEV com o objetivo de observar mais em detalhe os defeitos, verificar as dimensões dos canais, assim como o formato dos microconstituintes presentes e demais características das micrografias.

#### 4.4.2 Caracterização da Topografia de Superfície das Chapas

A topografia da superfície dos canais foi avaliada com a finalidade de caracterizar a rugosidade e a morfologia da superfície das chapas após o processo de usinagem fotoquímica e de eletropolimento. Para isso, as placas foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura para observar as características presentes antes e após os processos de usinagem fotoquímica e eletropolimento. Em seguida, foi empregada interferometria óptica, com o objetivo de quantificar o que foi caracterizado em imagens

de MEV. A nomenclatura das amostras de ensaio de interferometria é exibida na Tabela 7.

Tabela 7 - Nomenclatura de amostras para ensaio de interferometria óptica.

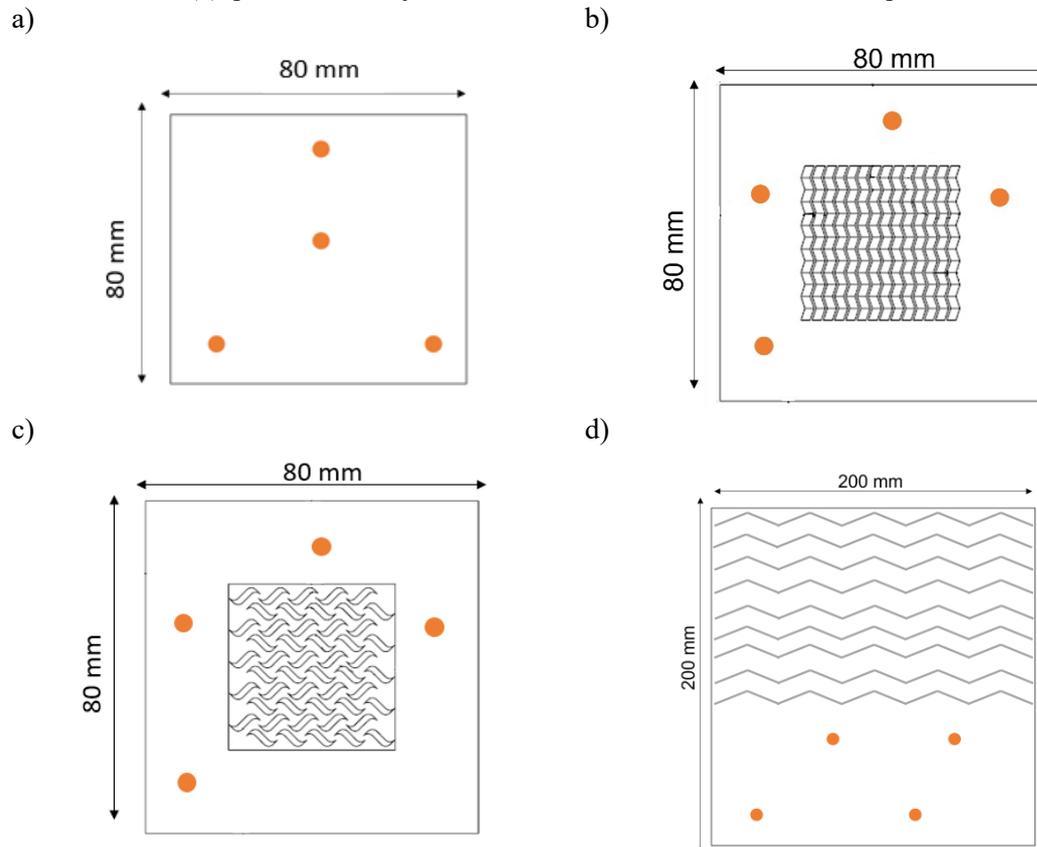
<b>Chapa original</b>	<b>Exemplo de superfície</b>	<b>Acabamento final</b>	<b>Geometria final</b>	<b>Região de ensaio</b>	<b>Nomenclatura amostra para ensaio</b>
Conforme recebida		2B	Sem canal	Plana	CR
Conforme recebida polida		2B + EP	Sem canal	Plana	CRP
Com canal ziguezague		UF	Ziguezague	Borda	CBZ
Com canal ziguezague polida		UF + EP	Ziguezague	Borda	CBZP
Com canal S		UF	Canal S	Borda	CBS
Com canal S polida		UF + EP	Canal S	Borda	CBSP
Chapa com fundo do canal usinado		UF	Ziguezague	Fundo do canal	FCZ
Chapa com fundo do canal usinado polido		UF + EP	Ziguezague	Fundo do canal	FCZP

Fonte: Autora.

As amostras foram seccionadas das regiões sem canais em cada condição, CR, CBZ, CBS, placa utilizada para fabricação do bloco médio porte e testada apenas para Teste do Fornecedor e FCZ, conforme exibido em Figura 47. Posteriormente, as placas foram caracterizadas por meio de 4 pontos em cada lado da placa, apenas nas regiões com

superfície plana, via interferômetro óptico. O mesmo processo foi repetido para as chapas CBZP, CBSP, CRP e FCZP que foram eletropolidas.

Figura 47 - Esquemas de amostras para interferometria óptica: CR (a), CBZ (b), CBS (c) e Chapa teste (d), pontos em laranja de onde foi analisado em interferometria óptica.

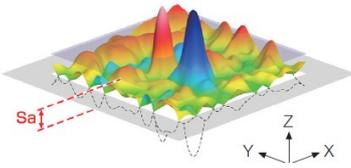
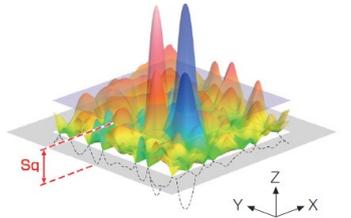
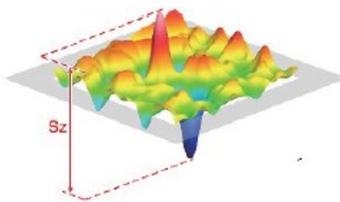
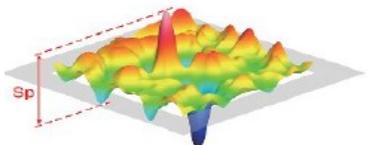
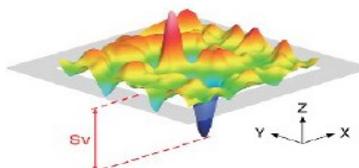
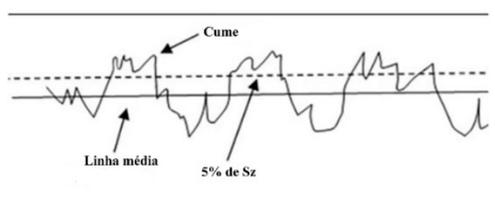


Fonte: Autora.

O interferômetro óptico, de marca Zygo Newview série 7300 é empregado para caracterização e estudo comparativo das superfícies das chapas. O software utilizado para transformação dos dados é o software de versão de teste Mountains Map® Premium 9. Como resultado, obtêm-se os parâmetros de rugosidade e as superfícies axonométricas.

Os parâmetros avaliados neste estudo são:  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_dq$  e  $S_d$ s. A Tabela 8 abaixo mostra a explicação de cada termo e um esquema da medição do parâmetro.

Tabela 8 - Definições de parâmetros de rugosidade.

Parâmetro	Definição	Esquema parâmetro
Sa	Média aritmética dos valores absolutos de altura em relação ao plano médio da superfície.	
Sq	É uma média quadrática, equivalente ao desvio padrão da distribuição da altura, é a raiz quadrada dos desvios medidos da altura da superfície.	
Sz	Representa a amplitude entre a altura máxima e a profundidade máxima.	
Sp	É a altura máxima dos picos em relação à superfície média na área avaliada	
Sv	Indica a profundidade do vale mais profundo da superfície.	
Sds	“Densidade dos Cumes”, número de picos por unidade de área da superfície. Os cumes são derivados de “picos”, que são definidos como qualquer ponto que seja mais alto que todos os 8 de seus vizinhos mais próximos.	
Sdq	Indica o valor médio de gradientes locais presentes na superfície. A inclinação da superfície pode ser representada numericamente neste parâmetro.	

Fonte: (BROWN, 2017).

#### 4.4.2 Ensaio de corrosão

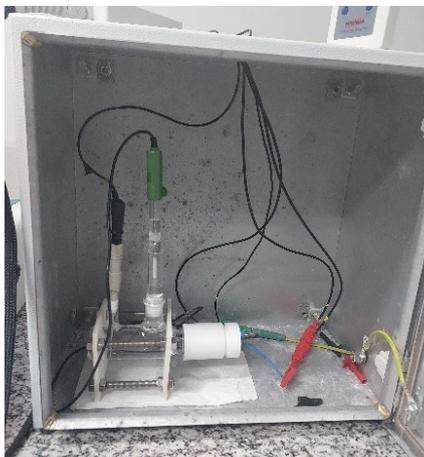
A evolução da corrosão das chapas foi avaliada por meio do ensaio de polarização potenciodinâmica. Este teste foi realizado com a finalidade de analisar a influência da usinagem fotoquímica e da aplicação do eletropolimento na resistência a corrosão do material. Tal comportamento é relevante devido ao ambiente corrosivo em que os trocadores de calor são utilizados.

Os testes de polarização potenciodinâmica foram desenvolvidos no Labmat com uma célula eletroquímica composta pelo potenciostato, contraeletrodo (haste de platina), eletrodo de referência (calomelano saturado) e uma solução de 3,5% em massa de NaCl com água deionizada, simulando a água salina do mar.

As amostras foram cortadas em jato d'água abrasivo com diâmetro de 14 mm para encaixe na porta amostras, exibido na Figura 48, assim a área exposta à solução foi fixada em 0,785 cm<sup>2</sup>. Foram separadas 6 amostras circulares para cada condição a ser analisada, conforme exposto em Figura 49.

Figura 48 - Célula eletroquímica em (a) e Porta amostra  $D_{máx}=25\text{mm}$  e  $D_{exposto}=14\text{mm}$  em (b).

a)



b)



As amostras utilizadas para este ensaio foram seccionadas das condições estudadas anteriormente, sendo essas as condições CBZ, CBZP, CBS, CBSP, CR, CRP, FCZ e FCZP.

Uma melhor explicação das nomenclaturas e dimensões das amostras para este ensaio estão dispostas na Tabela 9. Os dados do ensaio eletroquímico foram obtidos e tratados por meio do software Nova 2.1 e os resultados foram extraídos das curvas de

Tafel para todas as amostras.

Figura 49 - Exemplo das amostras usadas para ensaio de corrosão nas 8 condições avaliadas.



Fonte: Autora.

Tabela 9

Tabela 9 - Nomenclatura e dimensão das amostras para ensaio de corrosão.

Chapa original	Acabamento final	Geometria final	Região de ensaio	Nomenclatura amostra para ensaio
Conforme recebida	2B	Sem canal	Plana	CR
Conforme recebida polida	2B +EP	Sem canal	Plana	CRP
Com canal ziguezague	UF	Ziguezague	Borda	CBZ
Com canal ziguezague polida	UF + EP	Ziguezague	Borda	CBZP
Com canal S	UF	Canal S	Borda	CBS
Com canal S polida	UF + EP	Canal S	Borda	CBSP
Chapa com fundo do canal usinado	UF	Ziguezague	Fundo do canal	FCZ
Chapa com fundo do canal usinado polido	UF + EP	Ziguezague	Fundo do canal	FCZP

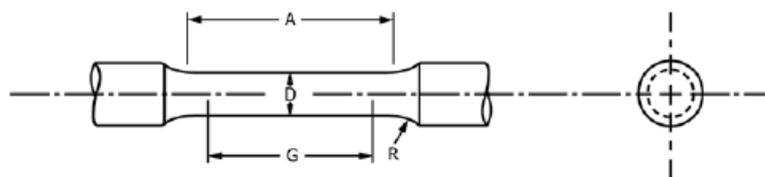
Fonte: Autora.

#### 4.5 ENSAIOS MECÂNICOS

A resistência mecânica das amostras unidas do bloco de referência, bloco TPP e bloco TMP, foi avaliada por meio de ensaios de tração normatizados e realizados em temperatura ambiente. Os corpos de prova removidos dos blocos foram enviados a

empresa certificada para realização dos ensaios de tração. Estes seguiram a norma ASTM A370. Os cilindros, conforme indicado na Figura 50, foram usinados para cumprir as seguintes dimensões:  $D= 8,75$  mm,  $G= 35$  mm,  $R= 6$  mm e  $A= 45$  mm.

Figura 50 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: (ASTM A370, 2019).

Os resultados dos ensaios de tração foram avaliados de acordo com a norma ASTM A240/A240M, que define os valores mínimos para as propriedades mecânicas do material de base 316L, conforme indicado na Tabela 10. As amostras foram tracionadas até a fratura, com uma carga gradual de forma a ser aplicada uniaxialmente na seção útil do corpo de prova. As propriedades obtidas a partir do ensaio são: limite de resistência máxima, tensão de escoamento, percentual de alongamento e redução de área da amostra.

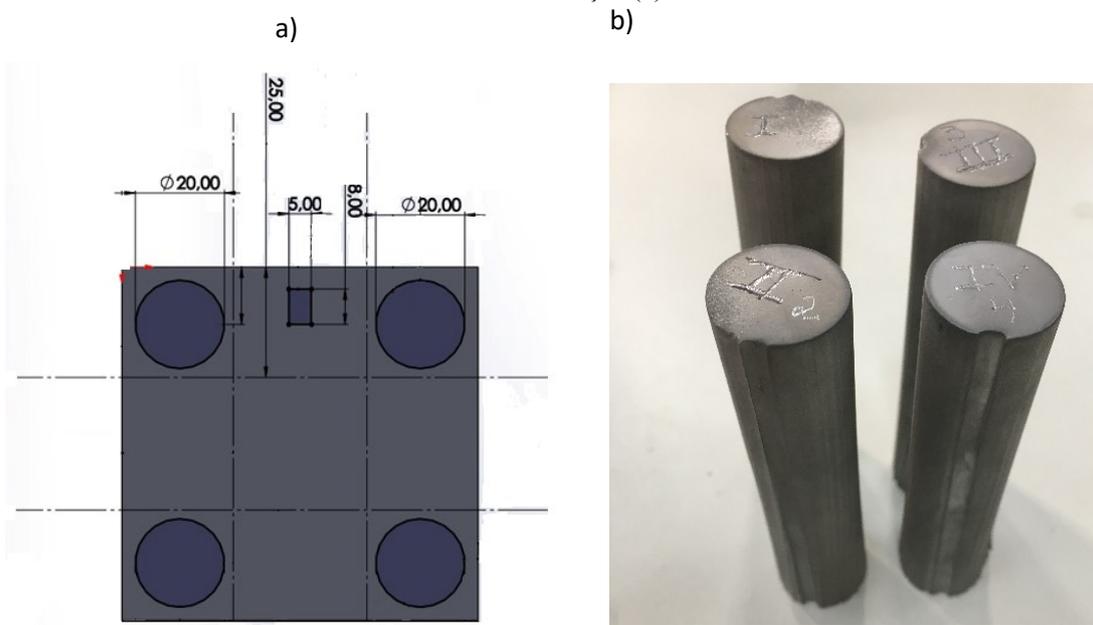
Tabela 10 - Valores mínimos estabelecidos pela norma para o aço 316L.

Limite de Resistência Máxima (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
485	170	40

Fonte: (ASTM A240, 2018).

Para facilitar o entendimento da localização das amostras avaliadas neste estudo fez-se um esquema do bloco TPP, apresentado na Figura 51. A Figura 51 (a) mostra a identificação das posições de usinagem das amostras cilíndricas analisadas e em (b) uma foto das amostras seccionadas. Tais amostras foram removidas da região das bordas devido aos canais no centro do núcleo e foram intituladas I, II, III e IV.

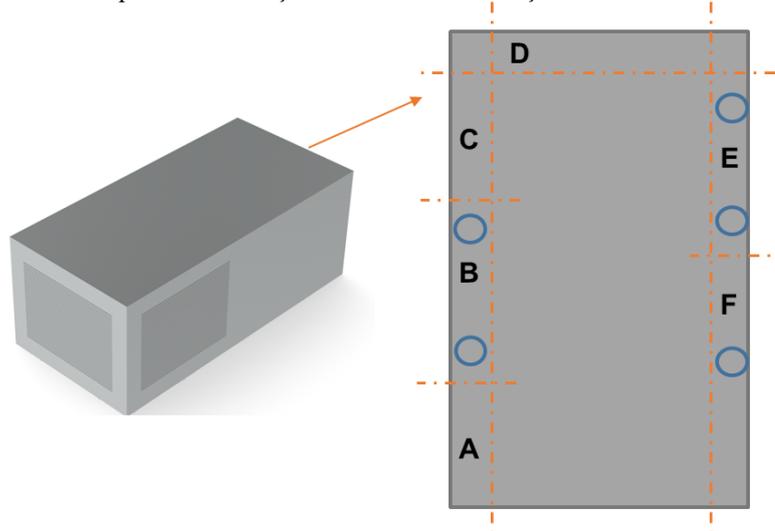
Figura 51 - Esquema do bloco com as posições das amostras removidas e analisadas em (a) e foto das amostras de tração (b).



Fonte: Autora.

Na tentativa de obter resultados homogêneos em toda a área do bloco, as amostras (indicadas pelos círculos azuis no desenho) foram adquiridas de várias bordas distintas do núcleo. Desta forma foram seccionadas (indicado pelas linhas pontilhadas laranjas) as bordas A, B, C, D, E e F, conforme representado no esquema da Figura 52 abaixo.

Figura 52 - Esquema da remoção das amostras de tração do bloco TMP.



Fonte: Autora.

As amostras paralelas, não indicadas no esquema, foram removidas de uma das

bordas do trocador nas regiões de topo, meio e fundo, para de tal forma também representar significativamente toda a área do bloco. A nomenclatura das amostras, por sua vez, é vinculada a cada borda na qual a mesma foi removida inicialmente e são mostradas na listagem abaixo:

- 1A – Paralela Topo
- 2A – Paralela Fundo
- 3A – Paralela Meio
- 1B - Perpendicular
- 2B - Perpendicular
- 3E - Perpendicular
- 4E - Perpendicular
- 5F – Perpendicular

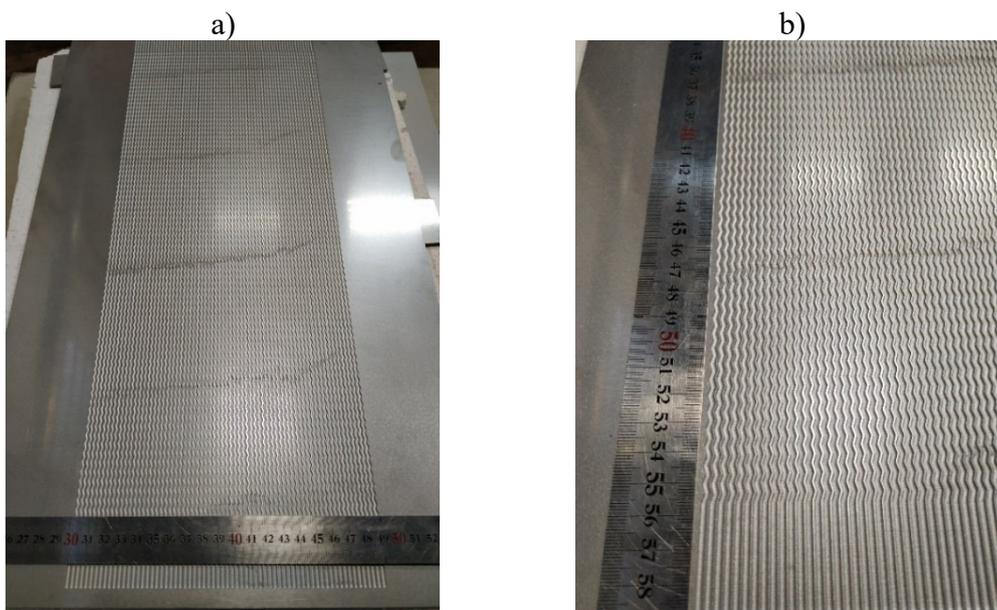
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

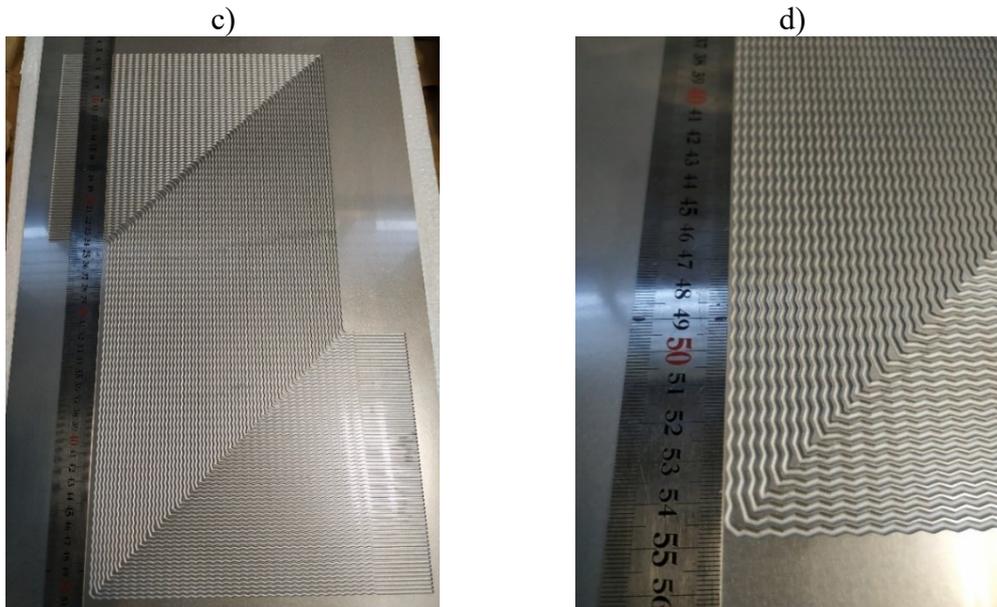
Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas etapas apontadas no capítulo Materiais e Métodos. Inicialmente será apresentado as análises qualitativas e quantitativas realizadas nas chapas e posteriormente nos blocos.

### 5.1 Análise da qualidade da usinagem fotoquímica

As medidas realizadas nas chapas para testes do provedor de serviços de usinagem fotoquímica apresentaram boa qualidade a respeito das dimensões solicitadas, distância entre os canais, centralização da chapa e profundidade dos canais. Fotos destas chapas (geometrias de canais em ziguezague) são apresentadas na Figura 53.

Figura 53 – Placa teste com escoamento reto A (a); detalhamento placa A (b); Placa teste com escoamento em Z (c) e detalhamento placa B (d).





Fonte: Autora.

As chapas testes passaram pela análise de interferometria na região da borda para verificar se apresentavam alguma divergência quanto a rugosidade média das chapas na região que foi protegida pela película protetiva durante o processo de usinagem química dos canais. A rugosidade da borda também é importante para o processo final de união dessas placas, visto que uma maior diferença na topografia e integridade das superfícies das chapas pode prejudicar a consolidação da união por difusão.

A Figura 54 representa a projeção axonométrica típica para as condições CR e Chapa teste. Percebe-se uma diferença tanto na textura nas duas imagens quanto na densidade de picos da chapa teste para a CR. Acredita-se que a usinagem fotoquímica, realizada nessa chapa, aumentou a sua rugosidade e modificou a superfície em geral. A Tabela 11 exibe os valores de rugosidade extraídos das duas condições mencionadas (CR e chapa teste).

Estudos da literatura correlacionando a usinagem fotoquímica à rugosidade mostraram que o valor da rugosidade média muda de acordo com o material observado, sendo um valor de  $0,54 \mu\text{m}$  para o AISI 316L,  $0,35 \mu\text{m}$  para o AISI 304 e  $0,25 \mu\text{m}$  para o Inconel. Já para o atual estudo, o valor médio de  $S_a$  da chapa teste ficou em  $0,186 \mu\text{m}$  com desvio padrão de  $0,035 \mu\text{m}$ , o que está de acordo com a literatura, ou seja, ambos os valores de rugosidade têm a mesma ordem de grandeza e, portanto, são coerentes com o que se espera da usinagem fotoquímica. (PANDITRAO KAMBLE, 2020) (ALLEN; HEGARTY; HORNE, 1981) (MISAL; SARAF; SADAIAH, 2017).

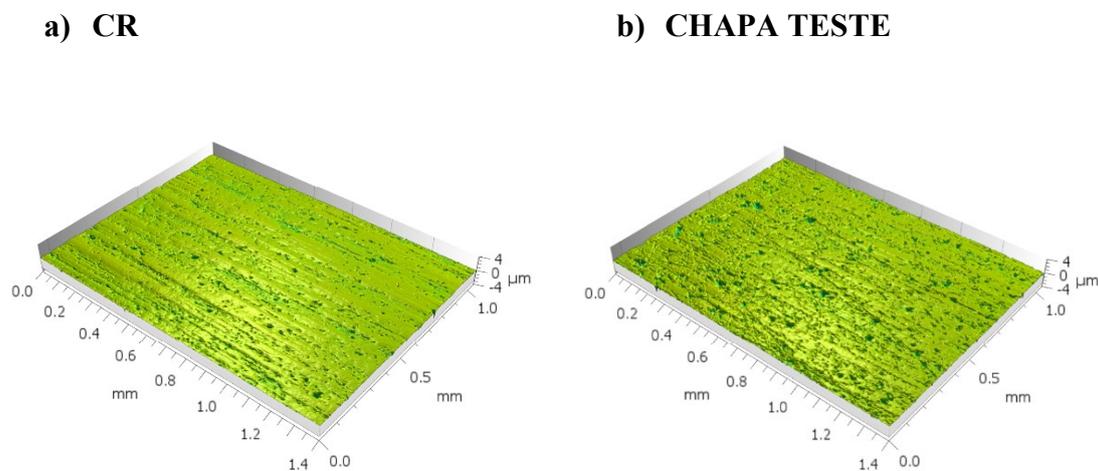
O valor de Sq exibido na Tabela 11, para a chapa teste, apresentou média de  $0,318 \mu\text{m}$  e desvio de  $0,017 \mu\text{m}$ . Este resultado foi coerente porque o Sq é um parâmetro de média quadrática, o que o torna mais sensível às diferenças de alturas apresentadas nas superfícies em relação ao Sa. Enquanto isso, a CR (que exibe menor diferença de altura) mostrou um valor de Sq menor, média de  $0,128 \mu\text{m}$ .

Ademais, o Sp referente à altura máxima dos picos em relação a superfície média da amostra, apresentou média de  $0,969 \mu\text{m}$  e desvio padrão de  $0,140 \mu\text{m}$ , variação, maior do que para os dois parâmetros anteriores (Sa e Sq), o que mostra que a superfície usinada não está homogênea, apresentando diferenças significativas entre as alturas dos picos.

O parâmetro Sv, por sua vez, demonstra a profundidade máxima em relação a linha média da superfície. A chapa teste mostrou um valor médio de  $4,608 \mu\text{m}$  e variação de  $0,815 \mu\text{m}$  enquanto para a amostra sem usinagem observou-se um valor médio de  $3,322 \mu\text{m}$ . Tais resultados complementam a observação sobre a heterogeneidade da amostra teste.

Por fim, o Sz, que demonstra a amplitude entre o pico mais alto e o vale mais profundo, exibe um valor de  $5,77 \mu\text{m}$  para a chapa teste e  $3,882 \mu\text{m}$  para a conforme recebida. De modo geral, percebeu-se que a região de borda (chapa teste), mesmo protegida pela máscara protetiva durante o processo de usinagem fotoquímica, apresentou rugosidades maiores que a chapa conforme recebida (CR) que não passou por nenhum processamento.

Figura 54 - Projeção axonométrica típica da chapa CR e chapa teste.



Fonte: Autora.

Tabela 11 - Parâmetros de rugosidade da chapa CR e teste do fornecedor.

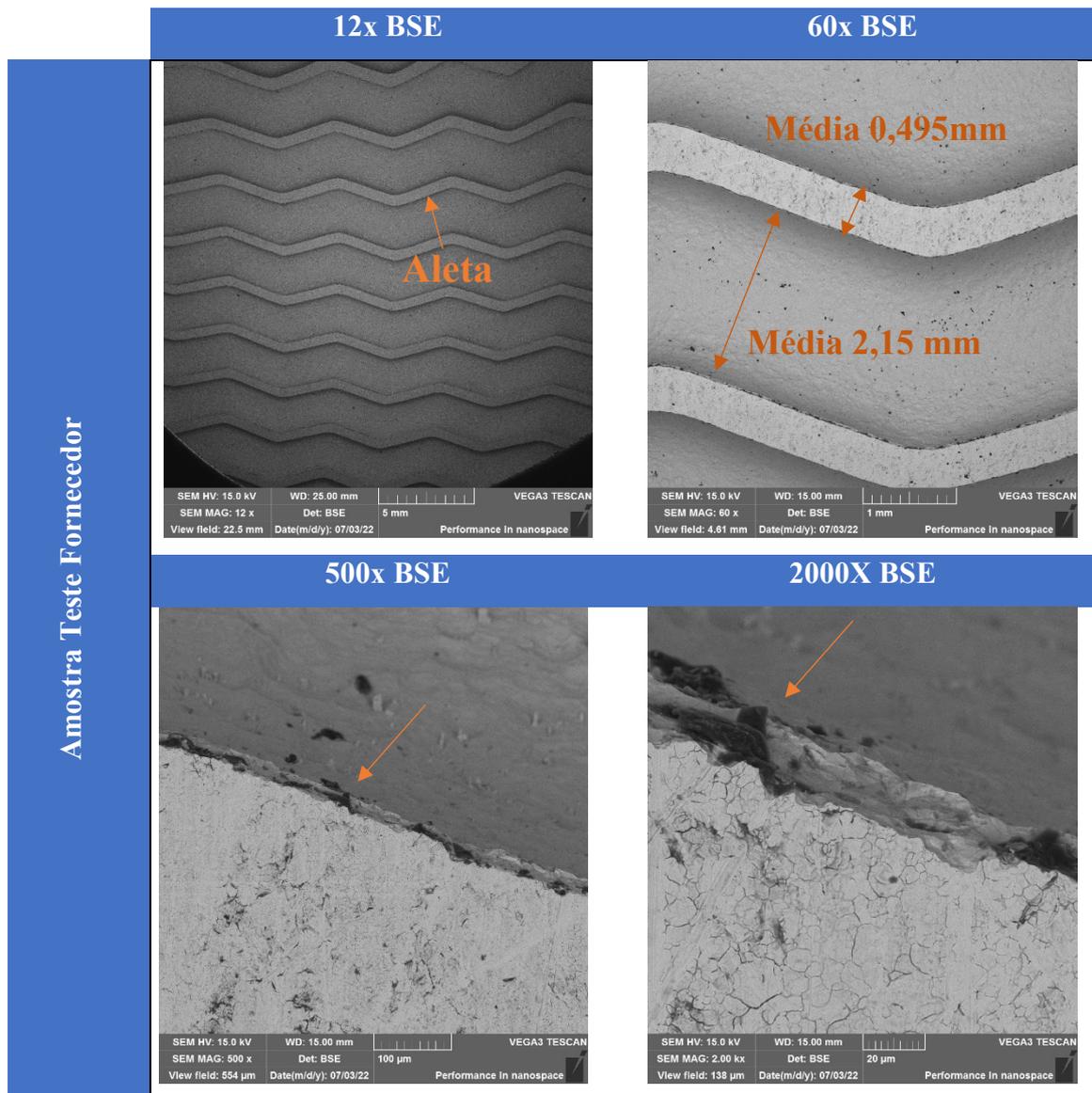
<b>Condição</b>	<b>CR</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Chapa teste</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>Sa (µm)</b>	0,070	0,023	0,186	0,035
<b>Sq (µm)</b>	0,128	0,017	0,318	0,066
<b>Sp (µm)</b>	0,559	0,086	0,969	0,140
<b>Sv (µm)</b>	3,322	0,513	4,608	0,815
<b>Sz (µm)</b>	3,882	0,462	5,577	0,818

Fonte: Autora.

A chapa teste foi avaliada em MEV para visualização da região dos canais e análise morfológica da aleta. A Figura 55 exibe as micrografias.

As aletas, que podem ser observadas em detalhe na Figura 55 com aumento de 60x, se mostraram bem planas e com dimensões semelhantes no decorrer de toda a amostra, com uma média de 0,495 mm de comprimento, com menos de 1% de diferença da medida solicitada para a empresa (0,50 mm). A largura do canal ficou, em média, em 2,15 mm, também de acordo com o que foi solicitado para esta placa (2,16 mm). Estes são pontos importantes para a posterior etapa de união das placas, após o seu empilhamento. A união depende das superfícies de contato, que devem ser bem planas e dentro do especificado, evitando quebras da aleta e falhas nas geometrias dos canais resultantes. Olhando mais detalhadamente as imagens com aumento de 500x e 2000x, é visível que a borda do corte do canal apresenta algumas irregulares e incrustações (indicadas pelas setas laranjas).

Figura 55 - Micrografias em MEV da chapa teste do fornecedor nos aumentos de 12x, 60x 500x e 2000x.



Fonte: Autora.

## 5.2 Análise das chapas

Neste tópico serão apresentados resultados concernentes às análises realizadas nas chapas.

### 5.2.1 Análise visual das chapas ziguezague e em S, antes e depois do eletropolimento

As chapas com geometria ziguezague foram avaliadas quanto as suas dimensões externas, características importantes para posterior união das placas por difusão. As

medidas laterais apresentaram-se bem fiéis ao que foi solicitado (80 mm), ou seja, a lateral apresentou média de 80,84 mm e desvio padrão de 0,23 mm, portanto, foi observado pouca variação dimensional. Uma vez alcançado sucesso na fabricação dessas chapas em geometria zig-zague, Figura 56 (a), as mesmas foram preparadas para o ciclo de união por difusão do bloco TPP.

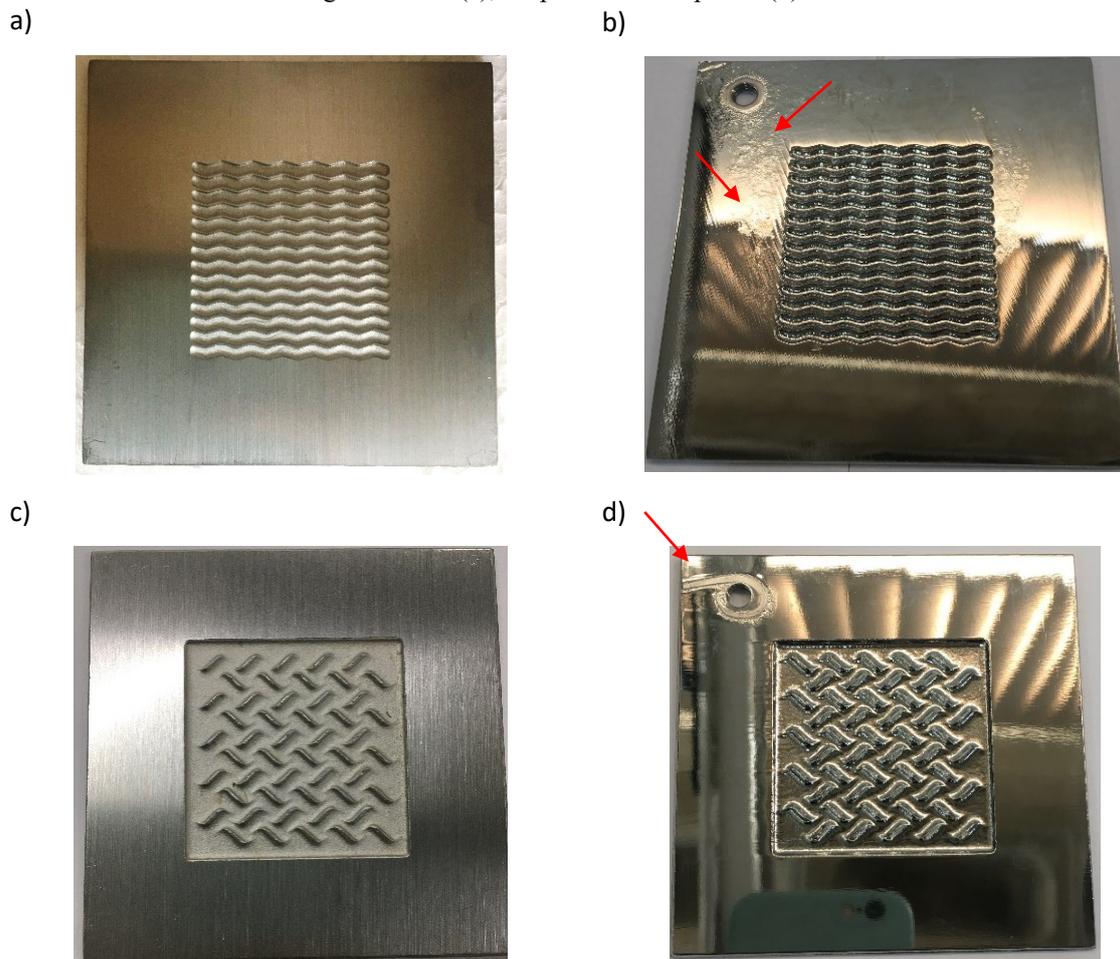
A geometria em “S”, por sua vez, exibida na Figura 56 (c) apresentou uma diferença visual maior entre as aletas usinadas, bem como entre os filetes do “S”. Este resultado pode ser justificado pela dificuldade de fabricação desta geometria não convencional, com uma angulação e ponta do filete muito acentuadas pelo formato do “S”. As medidas das laterais têm em média 80,90 mm com desvio padrão de 0,16 mm.

Já as medidas de profundidades das chapas em “S” obtiveram valor médio de 1,98 mm. Vale salientar que as chapas foram enviadas para a usinagem fotoquímica com 2 mm de espessura e essa redução se deve, provavelmente, ao maior tempo de corrosão das aletas em “S”.

A Figura 56 (b) e (d) mostra as chapas após o processo de eletropolimento na condição de canal zig-zague e em “S”. As superfícies de ambas as condições se mostraram espelhadas e brilhosas, resultado de um eletropolimento eficaz. Algumas marcas de textura podem ser observadas nas chapas, indicadas pelas setas vermelhas. Essas texturas podem ser justificadas pelo mal contato da fixar a amostra durante o eletropolimento. No geral, o eletropolimento não apresentou problemas durante o processo, mas devido ao tempo de mais de 2h de processo, pode ter acontecido pequenos “curtos-circuitos” que afetaram essas regiões próximas ao parafuso.

Além disso, devido ao eletropolimento remover material da superfície da peça, é comum que exista uma diminuição da massa e espessura do material. A perda de massa da chapa zig-zague foi de 9,63% e da chapa “S” foi de 9,85%. Demais medidas são apresentadas na Tabela 12.

Figura 56 - Chapa com geometria em ziguezague (a); chapa ziguezague eletropolida (b); chapa com geometria S (c); chapa em S eletropolida (d).



Fonte: Autora.

Tabela 12 - Medidas de massa, perda de massa e espessura antes e após eletropolimento da chapa Z e S.

Condição	Massa antes (g)	Massa depois (g)	Perda de massa (%)	Espessura antes (mm)	Espessura depois (mm)
Chapa Z-ZP	89,51	80,89	9,63	2,00	1,85
Chapa S-SP	87,38	79,41	9,85	1,98	1,8

Fonte: Autora.

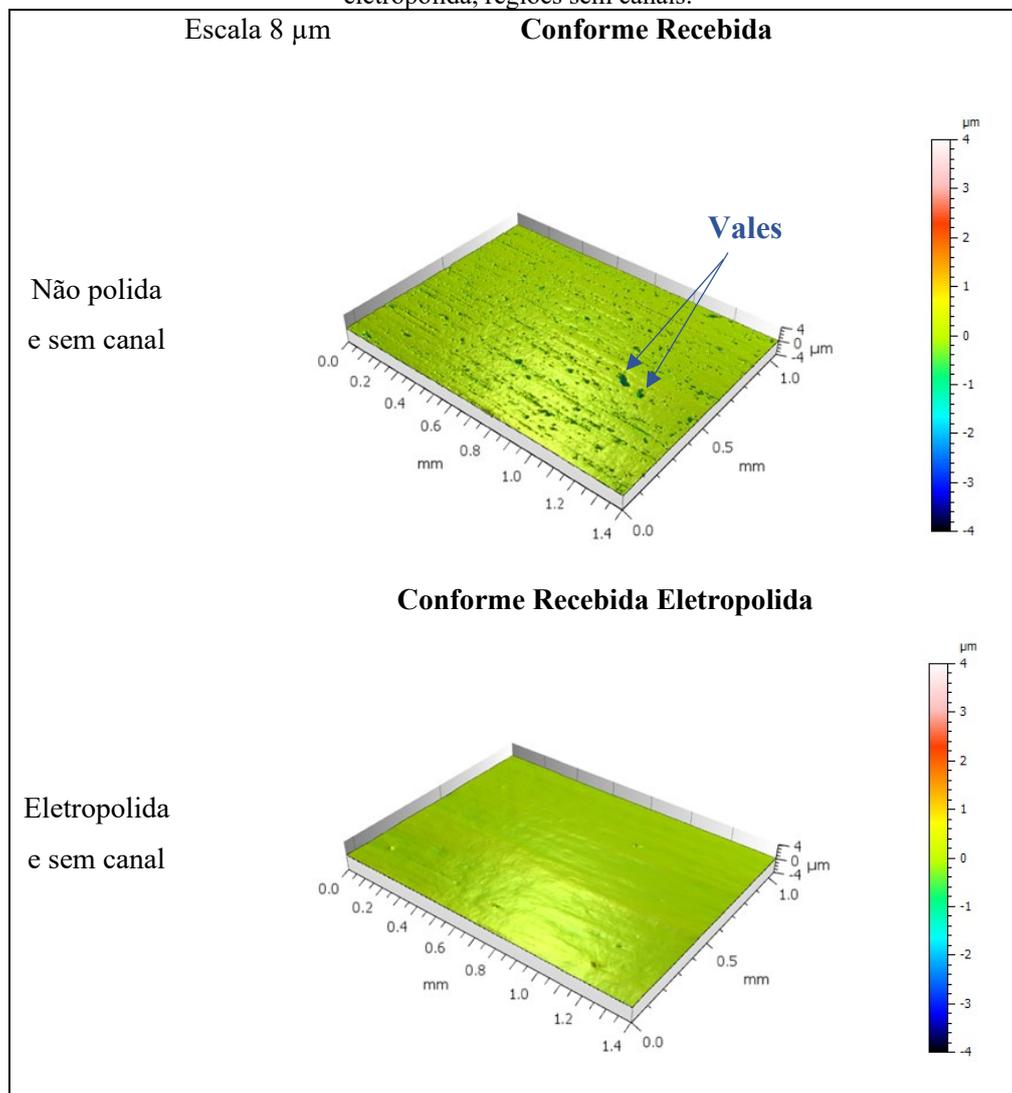
### 5.2.2 Interferometria Óptica das chapas: Projeções Axonométricas

As projeções axonométricas obtidas por ensaio de interferometria óptica são apresentadas a seguir. A nomenclatura dessas amostras está mostrada na Tabela 7. amostras CR, CRP (referente a amostra conforme recebida e depois conforme recebida eletropolida), CBZ e CBZP (referente a amostra com canal em ziguezague em região de

borda e depois eletropolida da mesma região), CBS e CBSP (referente a amostra com canal em S em região de borda e depois eletropolida), FCZ e FCZP (referente a amostra com canal em Z porém da região de fundo do canal e eletropolida).

A Figura 57 apresenta as projeções axonométricas típicas das amostras CR e CRP, sem canais. Pode-se observar alguns vales na chapa antes do eletropolimento e a suavização da superfície após o processo de eletropolimento, nestes casos as amostras não passaram por usinagem fotoquímica. Outrossim, na projeção da amostra CR é possível visualizar a direção de laminação de frio que o material foi submetido e ainda alguns vales mais profundos do que outros, com diferenciação de acordo com os tons escuros.

Figura 57 – Projeções axonométricas típicas das amostras conforme recebida e conforme recebida eletropolida, regiões sem canais.



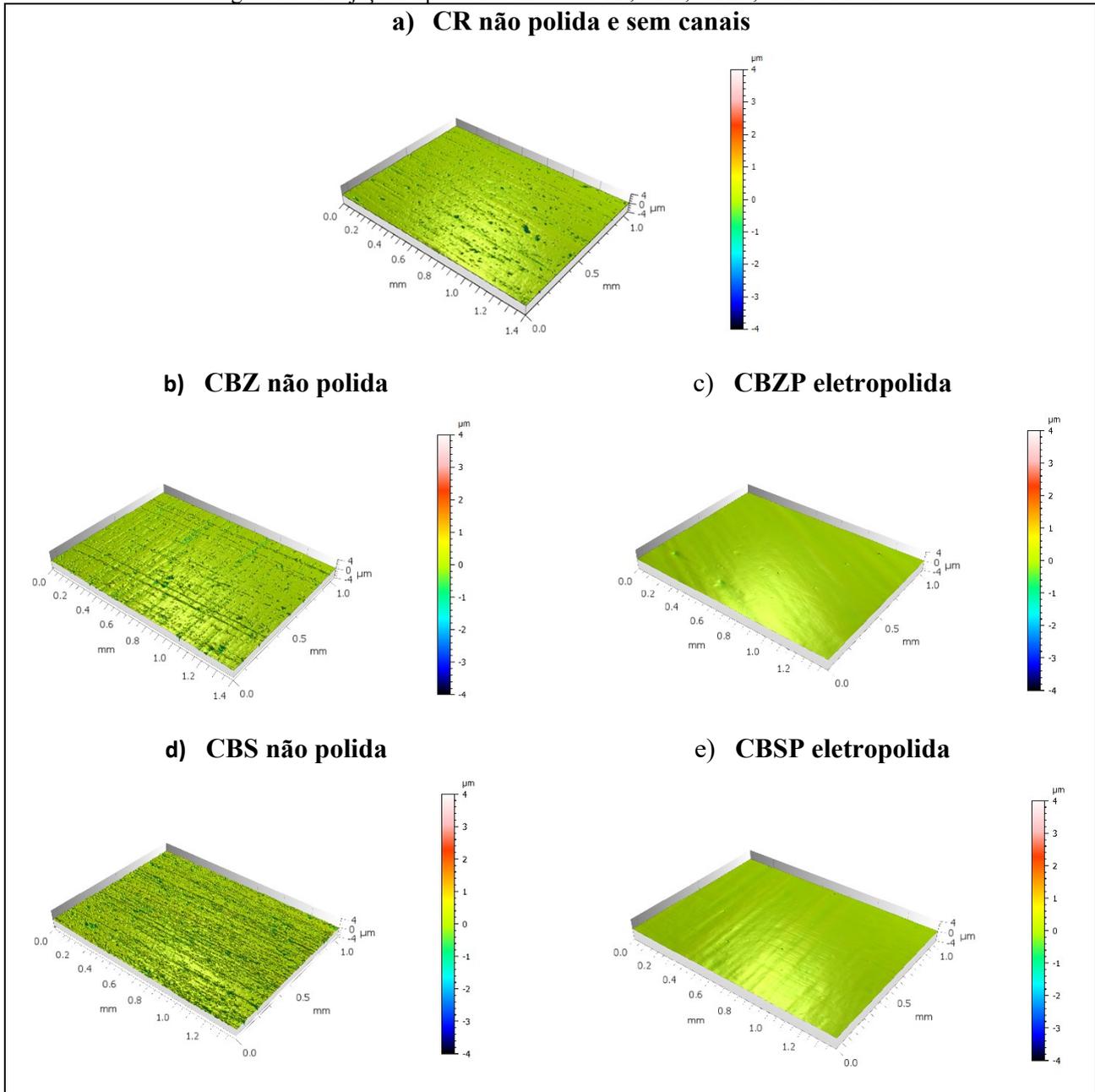
Fonte: Autora.

Na Figura 58 estão dispostas as projeções axonométricas típicas da condição CBZ

(amostra com canal ziguezague, mas na região de borda) e CBS (amostra com canal S, mas na região de borda) e ambas depois de eletropolidas. Para comparação tem-se a projeção axonométrica da chapa conforme recebida. As imagens da Figura 58 são visualmente semelhantes, para as condições tanto antes (b, d) quanto após (c, e) a etapa de eletropolimento, demonstrando que o processo de usinagem química agiu de maneira análoga na superfície das chapas nas duas geometrias exploradas (ziguezague e em S). Correlacionando com a CR (conforme recebida), que não passou por nenhum tipo de usinagem fotoquímica ou eletropolimento, nota-se uma superfície com poucas cavidades e marcas de direção da laminação a frio, além de aparentar menos rugosa que as condições com canais.

Adicionalmente, no geral, as condições que passaram apenas por UF (CBZ e CBS), apresentam uma superfície pouco homogênea, com marcas de lixamento (para adesão da máscara protetiva), vales distribuídos aleatoriamente nas duas superfícies. Enquanto nas condições após eletropolimento (CBZP e CBSP) ganharam muito mais homogeneidade de superfície, suavidade dos picos e quase totalidade da ausência das marcas de lixamento, anteriormente comentadas. Por fim, percebe-se também que a superfície usinada em canal “S” tem marcas de lixamento mais visíveis que a chapa usinada em canal ziguezague.

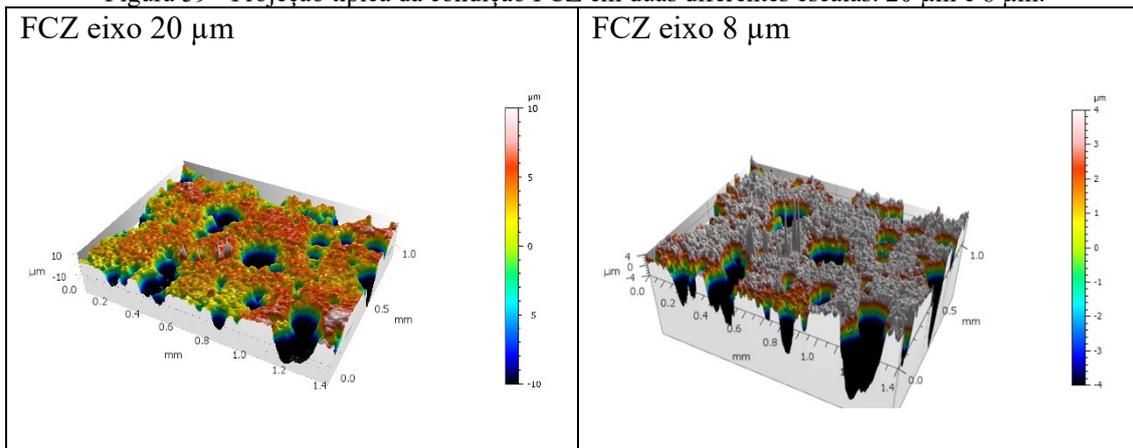
Figura 58 - Projeções típicas das amostras CR, CBZ, CBZP, CBS e CBSP.



Fonte: Autora.

Para uma melhor visualização da superfície no fundo do canal (FCZ e FCZP), precisou-se modificar a escala da projeção axonométrica, usando-se um intervalo de 20  $\mu\text{m}$  no eixo, diferente das projeções anteriores que foram apresentadas com uma escala de 8  $\mu\text{m}$ . Essa correção foi necessária devido à altura e profundidade dos picos e vales desta condição de amostra. A Figura 59 exibe a mesma projeção da amostra FCZ nas duas escalas, o mesmo foi observado para as amostras FCZP.

Figura 59 - Projeção típica da condição FCZ em duas diferentes escalas: 20  $\mu\text{m}$  e 8  $\mu\text{m}$ .



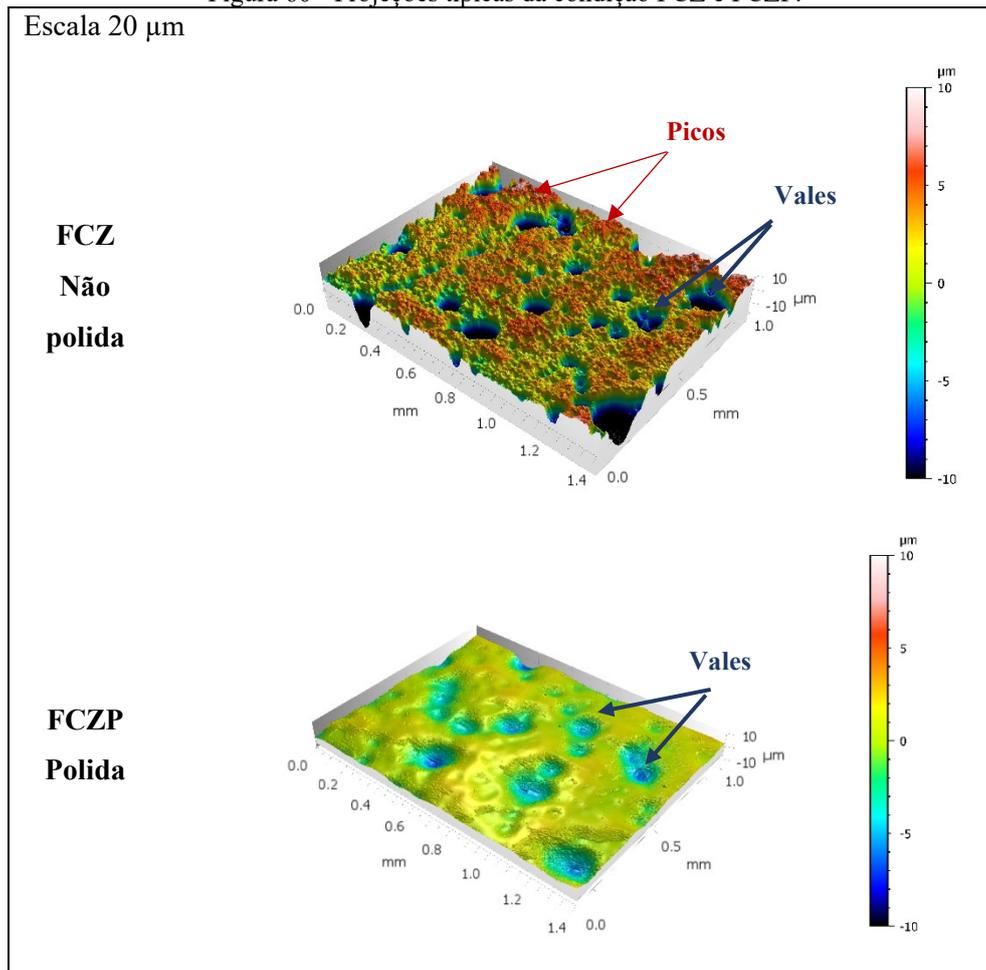
Fonte: Autora.

Na Figura 60 são exibidas as projeções típicas das amostras de condição FCZ (fundo do canal) e FCZP (fundo do canal polido). A condição FCZ exibe uma superfície com muitos vales profundos e alguns picos também, deixando a superfície com aparência bastante rugosa e irregular. Essas cavidades apresentaram dimensões de 1 a 2  $\mu\text{m}$ , um valor bem significativo em relação a imagem avaliada.

Este comportamento com mais vales e picos pode impactar negativamente na união por difusão, uma vez que a heterogeneidade da amostra faz com que os vazios formados no contato inicial entre as superfícies a serem unidas apresentem maior tamanho, de modo que é aumentada a quantidade de material a ser transportado por meio dos fenômenos difusivos e assim o tempo necessário para o preenchimento completo dos vazios entre as superfícies unidas.

Já na condição polida, ocorre a suavização da superfície, picos e vales mais arredondados, além da indicação de tons mais claros de amarelo, verde e alguns pontos em azul, indicando que a rugosidade nessa região está menor. O eletropolimento tem capacidade de nivelar mais a superfície, no entanto a condição FCZP não ficou tão nivelada em comparação com a CRP por conta da superfície inicial ser mais rugosa (FCZ e CR como condições iniciais).

Figura 60 - Projeções típicas da condição FCZ e FCZP.



Fonte: Autora.

### 5.2.3 Interferometria Óptica das chapas: Parâmetros de Rugosidade

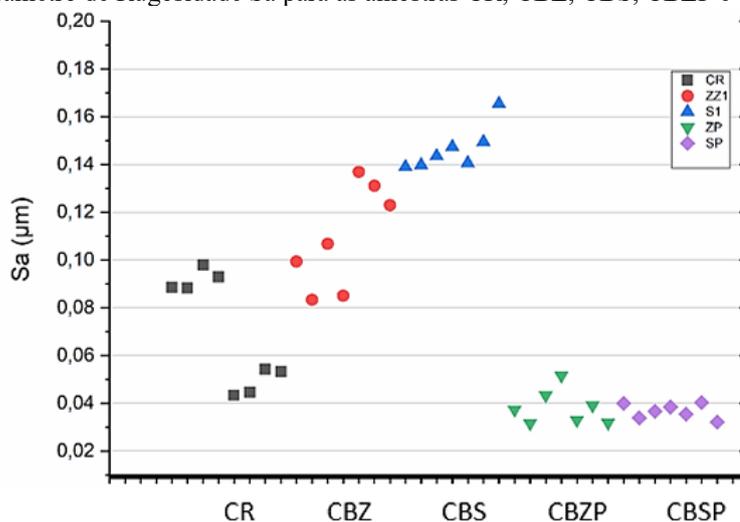
Os parâmetros topográficos  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_p$ ,  $S_v$  e  $S_z$  serão discutidos detalhadamente para as amostras CR, CBZ, CBS, CBZP e CBSP conforme descrito na etapa 4.1.5, cujos valores da rugosidade média ( $S_a$ ), são mostrados no gráfico da Figura 61 e na Tabela 13, observando-se um valor médio para a chapa CR de  $0,07 \mu\text{m}$  com desvio padrão de  $\pm 0,02 \mu\text{m}$ . Já para a condição CBZ, tem-se um  $S_a$  médio de  $0,11 \mu\text{m}$  e desvio de  $\pm 0,02 \mu\text{m}$ , que confirma as observações da projeção axonométrica desta amostra, que aparentava ser mais rugosa que a CR. A dispersão é maior para os resultados da CBZ em relação as outras exibidas no gráfico, isso pode ser entendido como uma superfície mais heterogênea devido principalmente à corrosão aplicada na usinagem química ser isotrópica.

Enquanto isso, a condição CBS tem valores de  $S_a$  um pouco maiores que a CBZ, uma diferença média de  $0,3 \mu\text{m}$ , mas ainda na mesma ordem de grandeza, com média de  $0,146 \mu\text{m}$  e desvio padrão de  $\pm 0,008 \mu\text{m}$ . Essa condição apresentou uma variação muito

menor que a anterior, representando uma superfície mais homogênea apesar de rugosidade média mais alta. Essa diferença de rugosidade pode ser explicada devido a geometria em “S” ser mais difícil de ser fabricada, levando mais tempo de processo corrosivo, aumentando a rugosidade média da superfície.

A análise do valor de Sa para as chapas que passaram pelo eletropolimento, trouxeram uma diminuição de cerca de 65% da rugosidade média (Sa) de CBZ para CBZP. Enquanto para a condição CBS para CBSP a diminuição foi ainda maior de 75%, o Sa médio ficou em 0,036  $\mu\text{m}$ . Essa redução tão acentuada nos valores é justificada pela eficiência do eletropolimento em suavizar e nivelar a superfície, diminuindo a rugosidade num geral.

Figura 61 - Parâmetro de Rugosidade Sa para as amostras CR, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.



Fonte: Autora.

Tabela 13 - Resultados parâmetro Sa para as condições Cr, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.

Parâmetro Sa ( $\mu\text{m}$ )					
Condição	CR	CBZ	CBS	CBZP	CBSP
Média	0,070	0,109	0,146	0,038	0,036
Desvio padrão	0,022	0,021	0,086	0,007	0,003

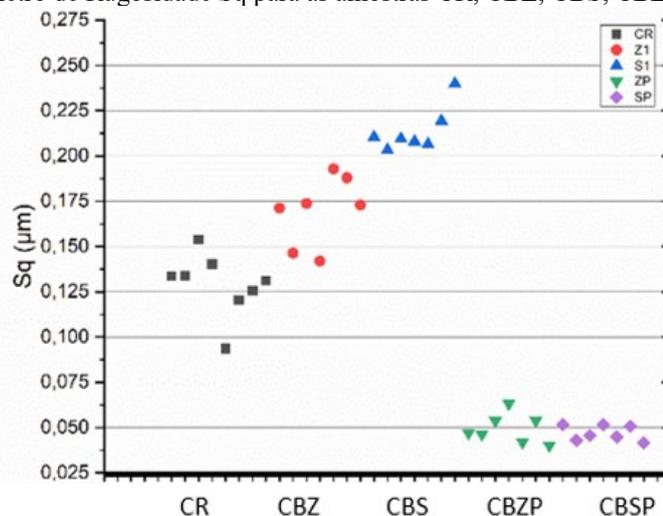
Fonte: Autora.

A análise do parâmetro Sq, como pode ser vista na Figura 62 e na Tabela 14. Seu comportamento se mostrou bem semelhante ao observado para Sa em todas as condições

discutidas. Esse comportamento já era esperado devido ao  $S_q$  representar a raiz quadrada dos valores médios de altura do perfil. No entanto, os valores de  $S_q$  se mostraram superiores a  $S_a$  para todas as condições estudadas, o que pode ser explicado pelo fato de  $S_q$  ser uma média quadrática da superfície mais sensível à altura dos picos do que o  $S_a$ . O  $S_q$  médio de CR ficou em  $0,129 \mu\text{m}$ , enquanto a amostra CBZ foi de  $0,169 \mu\text{m}$  e para CBS foi de  $0,213 \mu\text{m}$ , exibindo novamente um aumento da rugosidade para a condição de canal “S”.

Adicionalmente, nota-se que as amostras CBZP e CBSP apresentam valores de  $S_q$  muito semelhantes entre si, com média de  $0,049 \mu\text{m}$  e  $0,047 \mu\text{m}$  com desvios padrões de  $0,008 \mu\text{m}$  e  $0,004 \mu\text{m}$ , respectivamente.

Figura 62 - Parâmetro de Rugosidade  $S_q$  para as amostras CR, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.



Fonte: Autora.

Tabela 14 - Resultados parâmetro  $S_q$  para as condições Cr, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.

<b>Parâmetro <math>S_q</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>					
<b>Condição</b>	<b>CR</b>	<b>CBZ</b>	<b>CBS</b>	<b>CBZP</b>	<b>CBSP</b>
<b>Média</b>	0,129	0,169	0,213	0,049	0,047
<b>Desvio padrão</b>	0,022	0,021	0,086	0,007	0,003

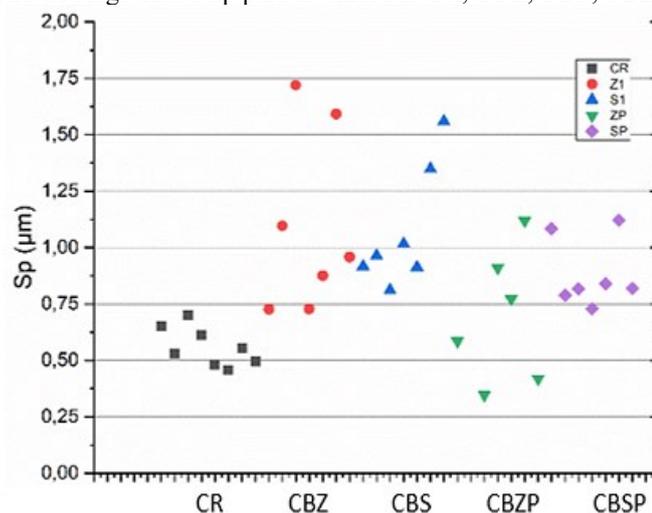
Fonte: Autora.

A Figura 63 demonstra graficamente os resultados de  $S_p$  para cada uma das amostras, cujos valores são também exibidos na Tabela 15. O  $S_p$  representa a altura

máxima dos picos em relação a linha média, apresentando maior dispersão de resultados para as amostras que passaram por usinagem fotoquímica, do que os dois parâmetros anteriores ( $S_a$  e  $S_q$ ). Isto pode ser explicado devido ao lixamento realizado antes da usinagem para a adesão da máscara protetiva, o que provavelmente alterou a superfície, ou seja, os picos e rugosidade também da região de borda das chapas.

Os valores de  $S_p$  para CR foram os resultados mais homogêneos com média de  $0,56 \mu\text{m}$  e desvio de  $\pm 0,08 \mu\text{m}$ , enquanto para CBZ e CBS tem-se um média de  $1,1 \mu\text{m}$  e  $1,07 \mu\text{m}$  com desvios de  $\pm 0,37 \mu\text{m}$  e  $\pm 0,25 \mu\text{m}$ , respectivamente. Para as condições polidas foi observado novamente uma redução significativa, ou seja, a CBZP ficou com média de  $0,69 \mu\text{m}$  (desvio de  $0,27 \mu\text{m}$ ) enquanto a CBSP obteve uma média de  $0,88 \mu\text{m}$  (desvio de  $0,14 \mu\text{m}$ ).

Figura 63 - Parâmetro de Rugosidade  $S_p$  para as amostras CR, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.



Fonte: Autora.

Tabela 15 - Resultados parâmetro  $S_p$  para as condições Cr, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.

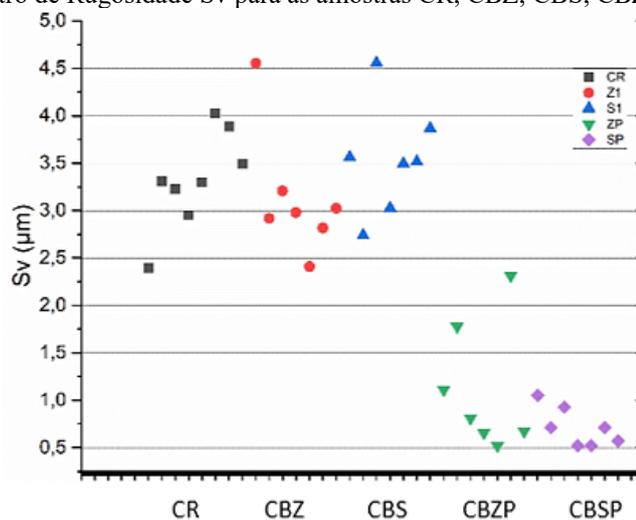
Parâmetro $S_p$ ( $\mu\text{m}$ )					
Condição	CR	CBZ	CBS	CBZP	CBSP
Média	0,559	1,099	1,075	0,691	0,885
Desvio padrão	0,022	0,021	0,086	0,007	0,003

Fonte: Autora.

A Figura 64 apresenta graficamente os resultados adquiridos para o parâmetro  $S_v$ ,

cujos valores estão também expostos na Tabela 16. Esse parâmetro diz respeito aos vales das superfícies. Para a CR há uma média de 3,323  $\mu\text{m}$ , para CBZ um valor de 3,13  $\mu\text{m}$  e para CBS um valor de 3,53  $\mu\text{m}$ . Nas amostras polidas SP e ZP houve uma diminuição significativa dos valores de Sv, com média de 0,71 e 1,12  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Entretanto, observou-se maior a dispersão para a amostra CBZP, com um desvio padrão de cerca de  $\pm 0,62$   $\mu\text{m}$ , enquanto a amostra CBSP apresentou um desvio padrão de aproximadamente  $\pm 0,19$   $\mu\text{m}$ . Esses resultados estão de acordo com as imagens das projeções axonométricas, Figura 58, em que se nota nas condições CBZ e CBZP alguns vales mais profundos e uma superfície mais irregular do que as condições CBS e CBSP.

Figura 64 - Parâmetro de Rugosidade Sv para as amostras CR, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.



Fonte: Autora

Tabela 16 - Resultados parâmetro Sv para as condições Cr, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.

Parâmetro Sv ( $\mu\text{m}$ )					
Condição	CR	CBZ	CBS	CBZP	CBSP
Média	3,322	3,129	3,536	1,014	0,717
Desvio padrão	0,022	0,021	0,086	0,007	0,003

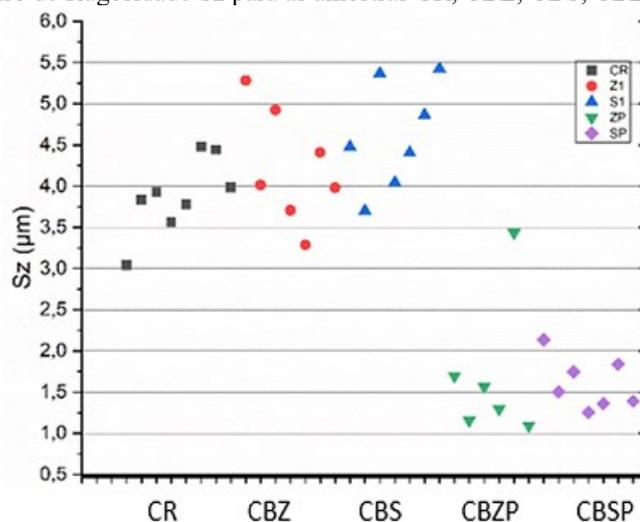
Fonte: Autora

Observando os eixos verticais das Figura 63 e Figura 64 referentes ao parâmetro Sp e Sv, é possível observar os valores máximos 2  $\mu\text{m}$  para Sp e 5  $\mu\text{m}$  para Sv, o que implica que todas as condições têm picos de grandezas pelo menos 2x menores do que a

profundidade dos vales, ou seja, as amostras têm vales mais profundos do que picos mais altos.

Por fim, a Figura 65 traz o resultado gráfico do parâmetro Sz, referente a amplitude entre o vale mais profundo e o pico mais alto. Estes valores são também apresentados na Tabela 17. O resultado mostra uma tendência semelhante ao gráfico de Sv, e, confirma que o eletropolimento remove principalmente os picos, pois as amostras polidas apresentaram valores de Sz aproximadamente 50% menores que as não polidas.

Figura 65 - Parâmetro de Rugosidade Sz para as amostras CR, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.



Fonte: Autora

Tabela 17 - Resultados parâmetro Sz para as condições Cr, CBZ, CBS, CBZP e CBSP.

Parâmetro Sz (µm)					
Condição	CR	CBZ	CBS	CBZP	CBSP
Média	3,882	4,228	4,612	1,705	1,602
Desvio padrão	0,022	0,021	0,086	0,007	0,003

Fonte: Autora.

Para analisar a influência dos principais parâmetros de topografia estudados (Sa e Sq), bem como a variância entre os resultados, uma análise de hipóteses do tipo Teste T para amostras independentes foi realizado, considerando um valor alfa de 0,05. A Tabela 18 apresenta as medidas obtidas a partir do teste T, correlacionando respectivamente de FCZP com CRP, CR com CRP, FCZ com CBZ e CBZ com CBS, seguido da média,

variância e valor P dessas medidas, definido como a probabilidade de se encontrar resultados em que a hipótese nula seja verdadeira, ou seja, a chance de os valores serem iguais. A Tabela 18 mostra valores de P muito pequenos, inferiores a 0,05 em todas as comparações, o que significa que há uma pequena probabilidade de que a diferença observada entre os grupos seja ao acaso, logo pode-se considerar que existe diferença significativa entre as condições correlacionadas.

Tabela 18 - Resultado do teste T para os parâmetros Sa e Sq com as correlações entre as condições.

Correlações	Sa			Sq		
	Média	Variância	Valor P	Média	Variância	Valor P
<b>FCZP - CRP</b>	0,9300	0,1225	0,0143	1,2360	0,1890	0,0118
	0,0329	0,000082		0,0414	0,0001	
<b>CR - CRP</b>	0,0596	0,000002	0,0100	0,1412	0,0001	0,00002
	0,0329	0,000082		0,0414	0,0001	
<b>FCZ - CBZ</b>	4,4918	0,3566	0,0006	6,0166	0,5729	0,0005
	0,0936	0,0001		0,1582	0,0002	
<b>CBZ - CBS</b>	0,0936	0,0001	0,0012	0,1582	0,0002	0,0100
	0,1423	0,00001		0,2077	0,00001	

Fonte: Autora.

As condições FCZ e CBZ apresentaram valores muito distintos, com médias de Sa e Sq por volta de 98% menores que FCZ para CBZ e variâncias entre as medidas também muito diferentes. Essas informações são coerentes tendo em vista que a amostra FCZ se refere ao fundo do canal, região que mais sofreu com a corrosão isotrópica da usinagem e CBZ, se refere à região de borda da chapa que foi usinada, a qual se manteve protegida pela máscara protetiva.

Adicionalmente, as condições CBZ e CBS apresentaram pouca variação em média (25%) em comparação com as demais e uma variância muito pequena nos parâmetros Sa e Sq. Isto também se justifica por ambas as condições terem sido protegidas pela máscara protetiva durante a usinagem e teoricamente não terem sido atingidas diretamente pela solução corrosiva do processo. Além disso, pelo mesmo motivo, os valores de CR deveriam ser compatíveis com essas duas condições, mas há uma diferença de 45% de CBS e 59% de CBZ em relação as médias de Sa de CR. Isto mostra que há falha na proteção do material durante o processo de usinagem fotoquímica dos canais, resultando no aumento de rugosidade média e quadrática, em relação ao material conforme recebido,

também na região de borda, região esta que seria posteriormente unida durante a soldagem por difusão. Estudos anteriores mostram que essa diferença de rugosidade também na região de borda pode interferir na qualidade final da união.

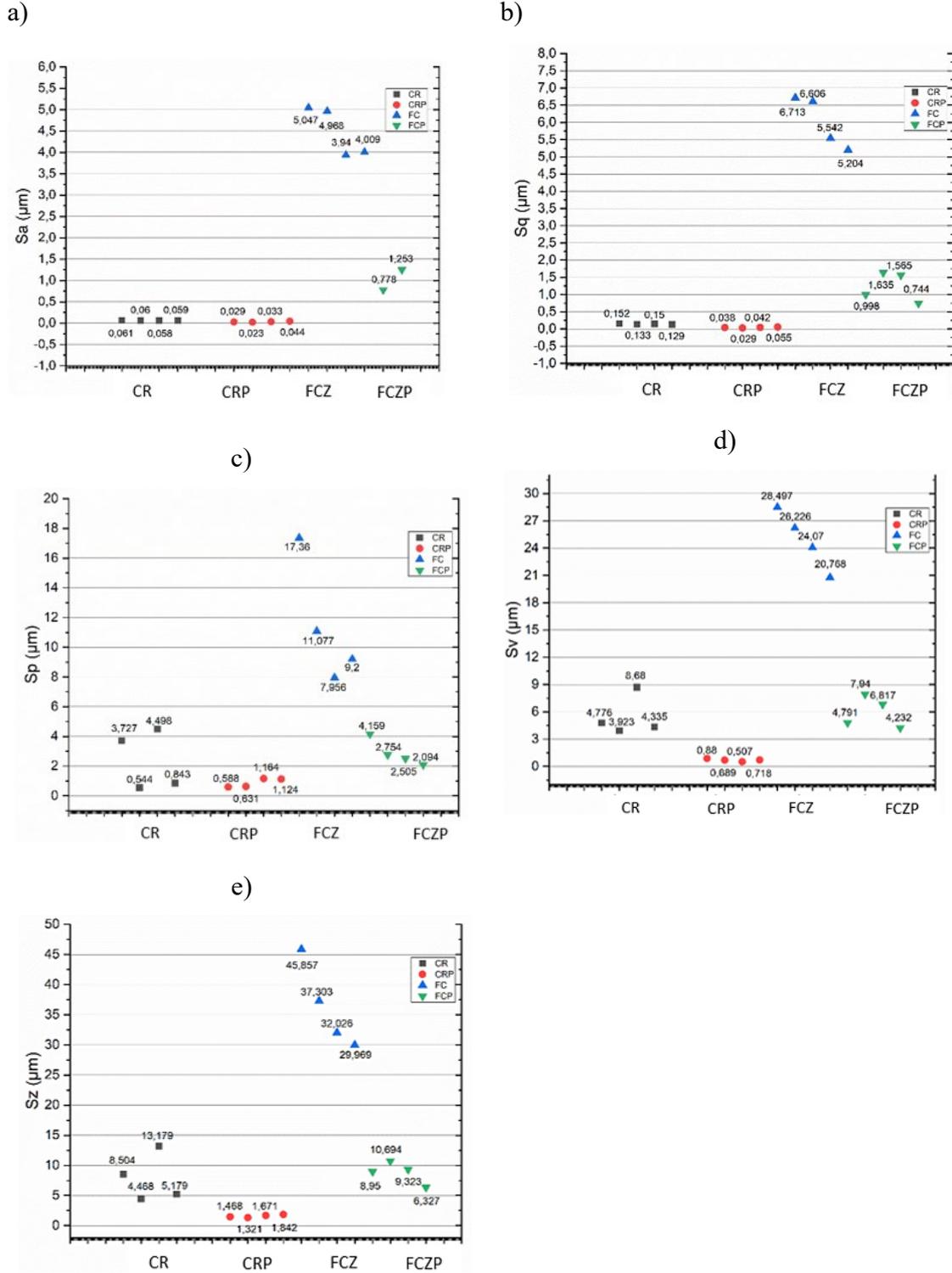
De maneira geral, pode-se perceber que as medidas de rugosidade da condição FCZ foram muito superiores às outras condições analisadas neste tópico e no item 5.2.2. Estes valores são bastante coerentes com o que foi visto na Figura 60, que representa uma projeção típica da condição FCZ exibida.

Os gráficos das Figura 66 (a) e (b) mostram os valores dos parâmetros Sa e Sq, onde se observa uma nítida tendência, principalmente para as amostras CR e CRP: as médias dos parâmetros diminuiu em 41% e 68% após aplicação do eletropolimento. Os demais parâmetros também tiveram suas médias significativamente diminuídas: Sp em 62%, Sv em 84% e Sz em 77%. Essas considerações sugerem uma redução sistemática da rugosidade depois do de processo de eletropolimento da chapa conforme recebida do fornecedor, reduzindo mesmo em relação a picos e vales mantem-se uma superfície bastante regular em toda amostra.

Já quanto as amostras seccionadas do fundo do canal das chapas, ou seja, na região de ataque fotoquímico, obtêm-se valores de Sa para a amostra FCZ na faixa de 4 a 5,5  $\mu\text{m}$  de rugosidade média, sendo que Sa para a amostra FCZP é na faixa de 0,5 à 1,1  $\mu\text{m}$ , ou seja, o valor médio do parâmetro Sa reduziu de 79% após o eletropolimento na região usinada. A mesma tendência é observada para os demais parâmetros avaliados, sendo que todos reduziram em mais de 75%, demonstrando que o processo de eletropolimento é muito efetivo, mesmo na região em que o processo de usinagem causou um grande aumento da rugosidade em geral, ou seja, na região mais crítica para a passagem dos fluidos nos canais do trocador de calor.

Considerando um estudo da literatura (XIN et al. 2019), quanto maior o tempo e temperatura de ataque fotoquímico maior a rugosidade média (Ra) do material. O estudo avalia amostras usinadas em temperaturas de até 35°C, cujos valores de Ra variaram de 2 à 3,5  $\mu\text{m}$ . Estes pesquisadores observaram que a rugosidade aumenta como o aumento da temperatura do processo. A mesma tendência foi observada para maior tempo de ataque das amostras. Assim, no presente estudo, os valores de Sa para a amostra FCZ após a usinagem fotoquímica à uma temperatura média de 50°C foram de 4,5  $\mu\text{m}$  em média, coerentes com resultados da literatura (XIN et al. 2019).

Figura 66 - Parâmetros de Rugosidade Sa (a), Sq (b), Sp (c), Sv (d), Sz (e) em relação as amostras.



Fonte: Autora.

Com o propósito de analisar a correlação entre os efeitos de mais três parâmetros de topografia estudados (Sp e Sz) e (Sv e Sz), foi feito a análise de hipóteses Teste T, considerando alfa de 0,05. Como o fundo de canal é a região de maior importância, apenas

as amostras FCZ e FCZP foram avaliadas nesta análise estatística.

A Tabela 19 apresenta as medidas das correlações de, respectivamente, Sp com Sz e de Sv com Sz para a amostra FCZ. Também são relacionados a média, a variância e o valor P dessas medidas. Estas nas correlações foram obtidas para Sp com Sz e para Sv com Sz referentes as medidas da amostra FCZP. Ademais, é apresentado o coeficiente de correlação de Pearson, que indica uma associação positiva entre as variáveis: o aumento de uma variável provoca o aumento da outra. O valor do coeficiente significa que entre 0 a 0,3 a correlação é fraca, de 0,3 a 0,6 a correlação é moderada, de 0,6 a 0,9 a correlação é forte e maior que 0,9 a correlação é muito forte.

Tabela 19 - Correlação entre as condições FCZ e FCZP para os parâmetros Sp, Sv e Sz.

	FCZ			Correlação de Pearson	FCZP			Correlação de Pearson
	Média	Variância	P		Média	Variância	P	
Sp	11,39	17,44	0,00	0,96	2,87	0,80	0,00	0,34
Sz	36,28	50,23	17	Muito forte	8,82	3,33	42	Moderada
Sv	24,89	10,82	0,04	0,93	5,94	3,00	0,06	0,87 Forte
Sz	36,28	50,23	33	Muito forte	8,82	3,33	21	

Fonte: Autora.

Assim, o valor de P para as duas comparações (Sp com Sz e Sv com Sz) mostra valores menores que 0,05, portanto, a hipótese  $h_0$  é rejeitada (nula), ou seja, há diferença significativa entre os grupos de dados analisados. Assim, a correlação foi considerada muito forte entre as duas comparações.

Por outro lado, o valor de P da amostra FCZP para a comparação de Sp com Sz, foi menor que 0,05, ou seja, é significativa, porém correlação moderada. Já a comparação de Sv com Sz mostrou uma diferença não significativa estatisticamente, mas a correlação foi forte de acordo com o coeficiente  $r=0,87$ .

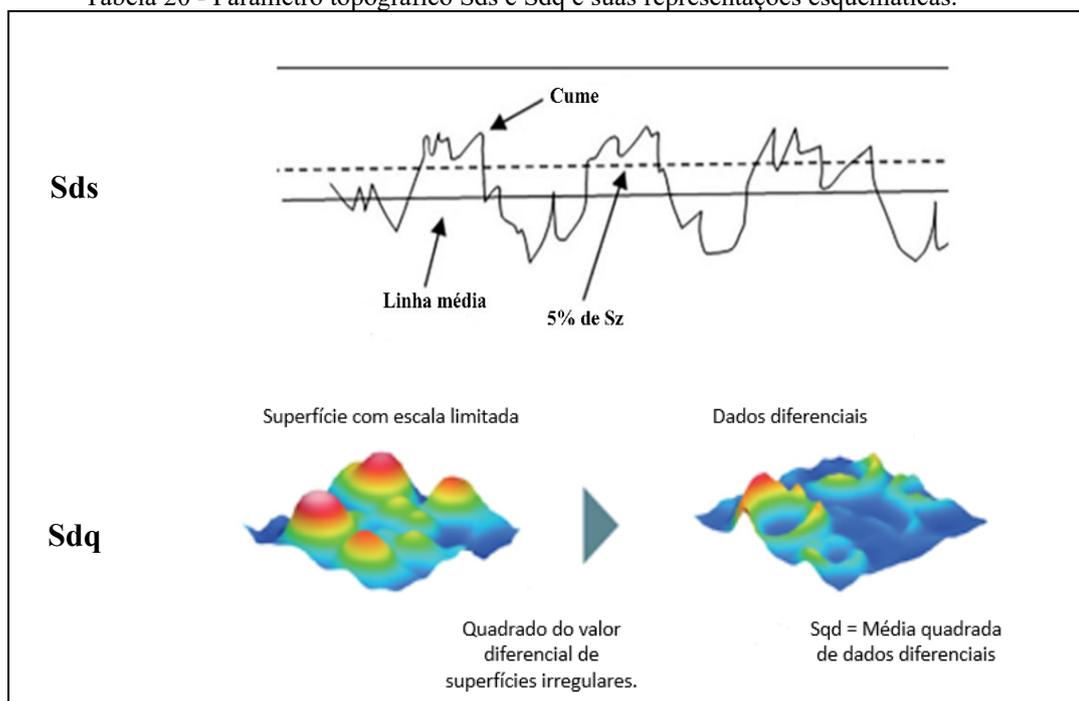
Posto isso, é possível concluir que para as amostras com fundo de canal eletropolido, o parâmetro Sz tem maior correlação com o parâmetro Sv, logo tem-se maior influência dos vales do que dos picos da amostra para essa condição. Enquanto para o fundo de canal não eletropolido, a influência é tão significativa tanto para os picos quanto para os vales da amostra.

Com o intuito de correlacionar estes resultados com os obtidos por polarização potenciodinâmica, dois parâmetros topográficos foram incluídos nas análises: o Sds e o Sdq, apenas para as amostras CR, CRP, FCZ e FCZP. Compara-se apenas as condições

da região realmente corroída com as conforme recebidas, considerando-se que a corrosão realmente ocorre no do fundo do canal. Os resultados gráficos e numéricos desta etapa do estudo são apresentados na Figura 66 e Figura 67.

A Tabela 20 ilustra como os parâmetro Sds e Sdq são obtidos. O Sds é, na verdade, um parâmetro híbrido que considera o número de picos por unidade de área da superfície, ou densidade dos cumes e Sdq, definido como o valor médio de gradientes locais, e está relacionado à inclinação da superfície.

Tabela 20 - Parâmetro topográfico Sds e Sdq e suas representações esquemáticas.



Fonte: (BROWN, 2017).

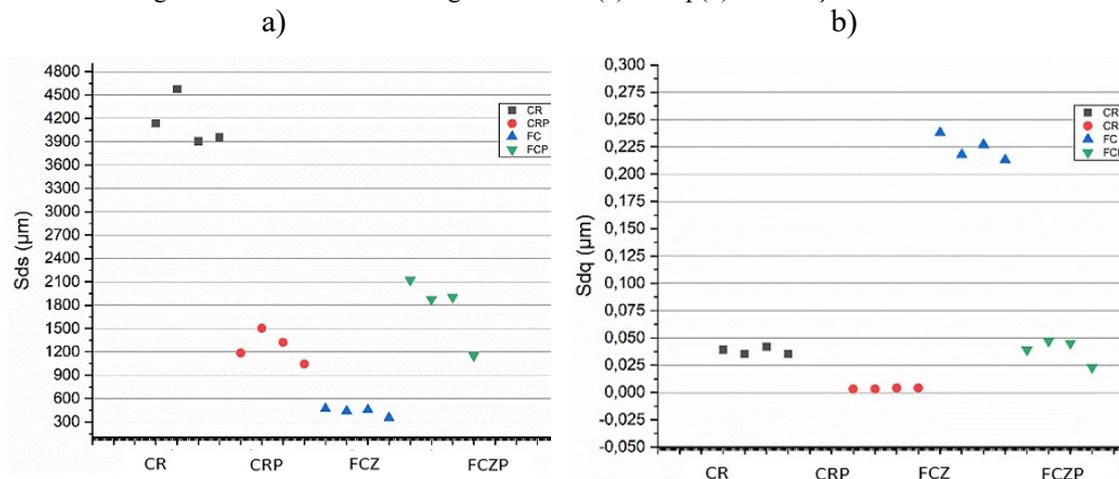
A Figura 67 (a) apresenta graficamente os valores dos parâmetros Sds para as condições CR, CRP, FCZ e FCZP. O parâmetro Sds é maior em média para a condição CR (4143,1 1/mm<sup>2</sup>), seguida da FCPZ (1763,5 1/mm<sup>2</sup>), da CRP (1205,7 1/mm<sup>2</sup>) e da FCZ (424,0 1/mm<sup>2</sup>). Esse resultado se apresentou contrário a tudo que foi apresentado até o momento para as amostras de FCZ. Em contrapartida, a CR apresentou mais picos por unidade de área, enquanto a CRP apresentou uma quantidade muito inferior com redução de mais de 70% para a amostra polida. Tal resultado infere que o eletropolimento foi capaz de reduzir os picos mais grosseiros da amostra.

Porém, os resultados obtidos para as amostras “conforme recebidas”, são contraintuitivos em que a FCZ (não polida) apresentou um valor inferior até mesmo que a CR polida. Acredita-se que este efeito é consequência de as amostras terem passado

pela ação corrosiva da solução na usinagem fotoquímica. No entanto essa hipótese não explica o maior número de picos por unidade de área para a FCZP do que para a FCZ.

O parâmetro Sdq indica a magnitude média do gradiente local (inclinação) da superfície, de forma que os picos da superfície são mais inclinados com o aumento do valor do parâmetro Sdq. Na Figura 67 (b), é possível visualizar um intervalo de valores de Sdq bem semelhante para a condição CR (0,03), FCZP (0,03) e CRP (0,004), a última com médias menores das três. A condição FCZ, por sua vez, apresentou o maior valor (0,22), indicando a presença de maiores inclinações na superfície do que as outras amostras. Adicionalmente, a projeção axonométrica da condição FCZ mostrou muitos vales e poucos picos, uma condição irregular, o que explica o valor de Sds reduzido e Sa e Sv aumentados.

Figura 67 - Parâmetros de Rugosidade Sds (a) e Sdq (b) em relação as amostras.



Fonte: Autora.

### 5.2.5 Caracterização via MEV das chapas

Neste tópico serão apresentados os resultados da avaliação da morfologia das micrografias em MEV das chapas desenvolvidas nas Etapas 1 e 2 indicadas nos itens 4.2.1.2 e 4.2.1.3, ou seja, amostras com canais em ziguezague (definido como condição Z) e em configuração em S. Os canais de tais amostras foram caracterizadas primeiro e depois na região de material de base (região lisa). Além disso, também serão apresentadas as fotos das condições eletropolidas para estas mesmas configurações, como indicado no item 4.2.2. Serão observadas a qualidade dos canais, precisão da usinagem, a presença de irregularidades nas bordas e algumas características específicas de cada chapa.

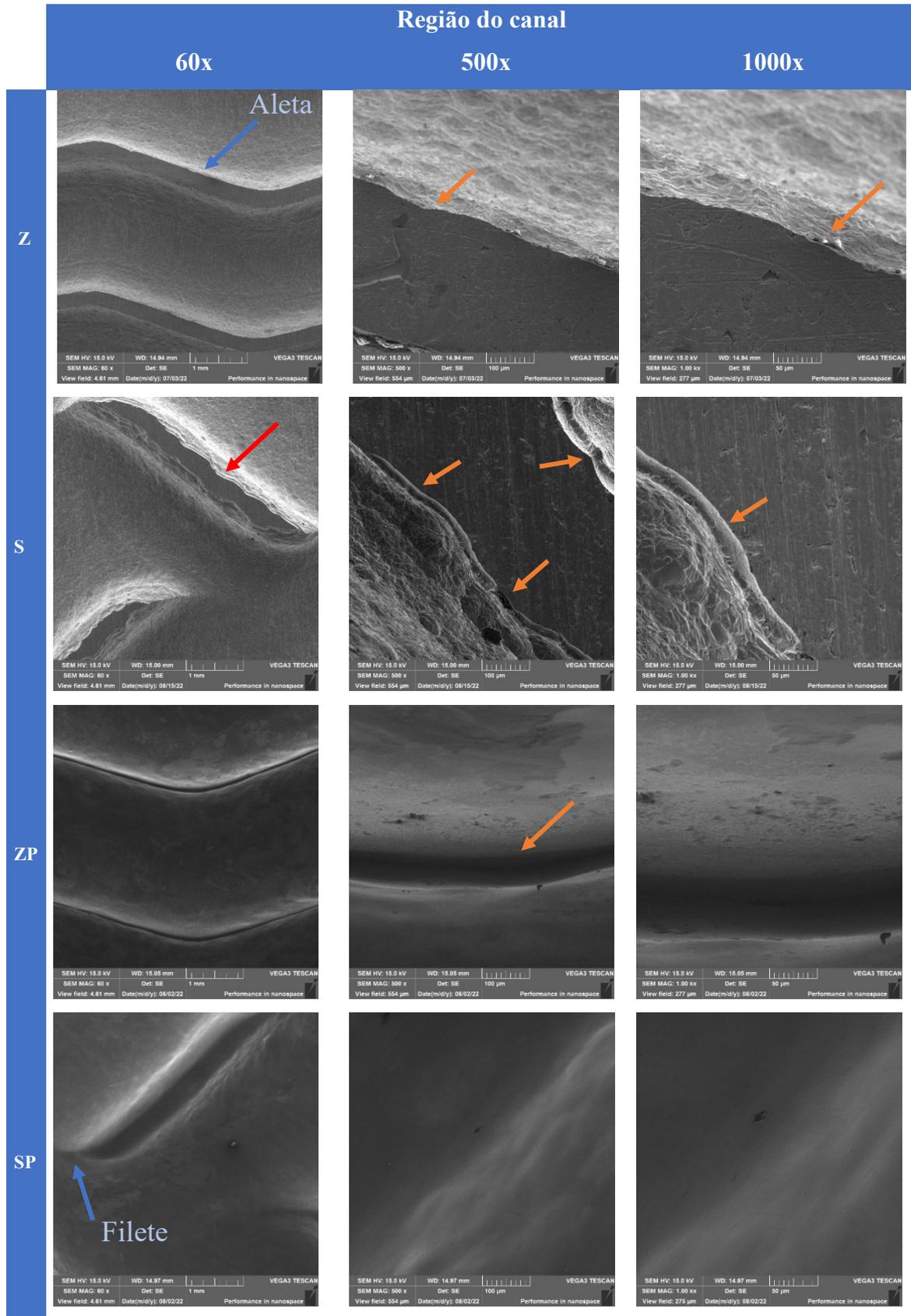
As imagens em MEV para as quatro condições mencionadas são apresentadas na

Figura 68 nas regiões dos canais e na Figura 69 tem-se as regiões do material de base de cada amostra.

Nas Figura 68 (Z e S em 60x) observa-se a precisão do processo de usinagem fotoquímica, tendo em vista a continuidade dos canais e a ausência de rebarbas ou defeitos exorbitantes. É evidente também a diminuição das aletas tanto na condição Z para ZP quanto S para SP, após o eletropolimento. Essa redução sugere que o processo remove bastante material da superfície das amostras, o que pode ser um problema para a posterior união por difusão dessas placas, prejudicando o empilhamento das mesmas devido a diminuição de área. Por outro lado, o eletropolimento demonstra a eficácia na suavização e remoção das texturas e rugosidades das duas condições anteriores.

Já na Figura 68 (Z em 500x de aumento e S em 500x de aumento), nota-se algumas ondulações (indicadas em laranja) que demonstra que usinagem fotoquímica apesar de não deixar rebarbas excessivas, é um processo que deixa a superfície com alguns irregulares na região de corte (seta vermelha).

Figura 68 - Imagens típicas em MEV das condições Z, S, ZP e SP nos aumentos 60x, 500x e 1000x na região dos canais.

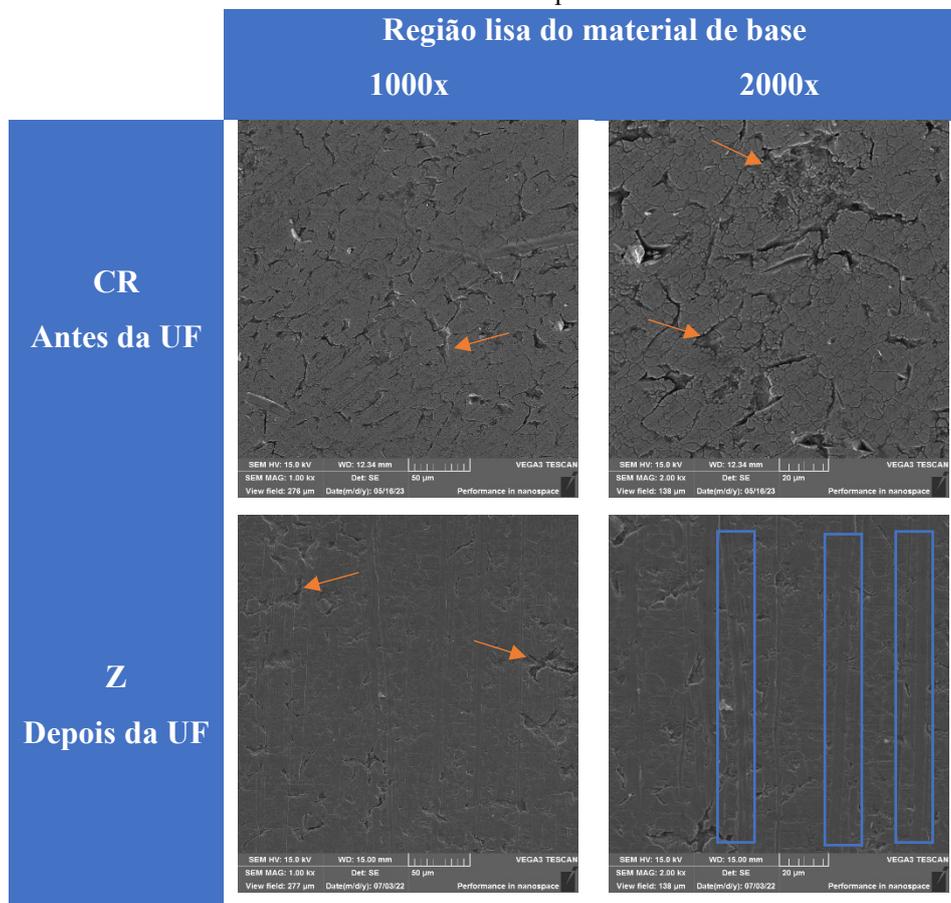


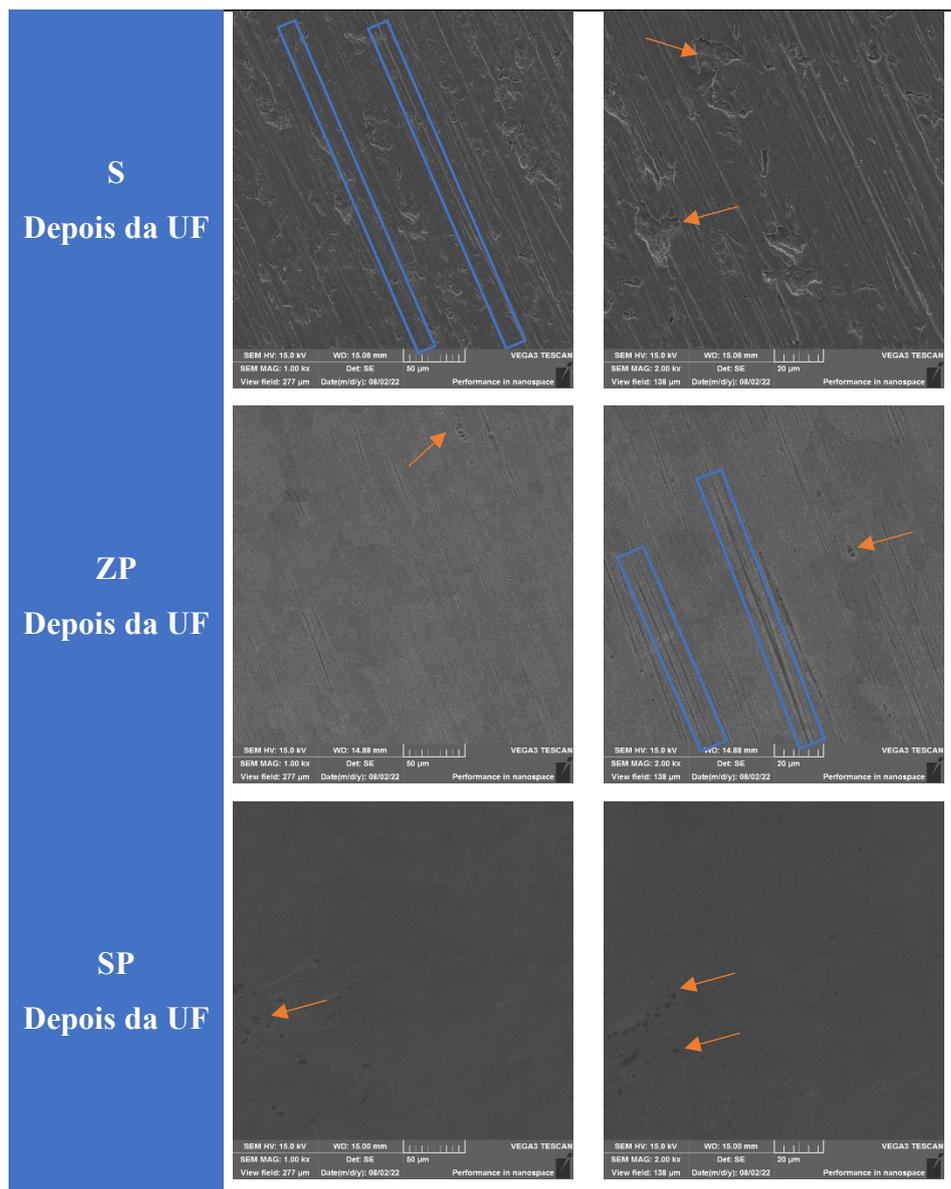
Fonte: Autora.

Na Figura 69 estão expostas as imagens obtidas das bordas das chapas, mais distante dos canais. Tais imagens sugerem o mesmo comportamento visto anteriormente de redução das texturas, de rugosidade e até de algumas cavidades presentes nas condições não polidas e que não aparecem com a mesma frequência nas eletropolidas.

Notam-se algumas cavidades (indicadas em setas laranjas) em todas as etapas, provenientes do material de base conforme recebido. Ressalta-se também algumas características nas chapas provenientes da corrosão gerada no momento da usinagem química. Além disso, é possível observar sulcos com orientação bem definida (indicados pelos retângulos azuis), provavelmente oriundos do processo de laminação do aço ABNT 316L ou então do pré-lixamento que o material passa antes da aplicação da máscara protetiva no processo de usinagem fotoquímica. Observando as micrografias das amostras conforme recebida (CR), pode-se inferir que a hipótese mais certa é que esses sulcos são resultado do lixamento, visto que as imagens sem qualquer usinagem não apresentam tal característica.

Figura 69 - Imagens típicas em MEV das condições Z, S, ZP e SP nos aumentos 1000x e 2000x na região de borda das chapas.





Fonte: Autora.

### 5.2.6 Ensaios de Corrosão

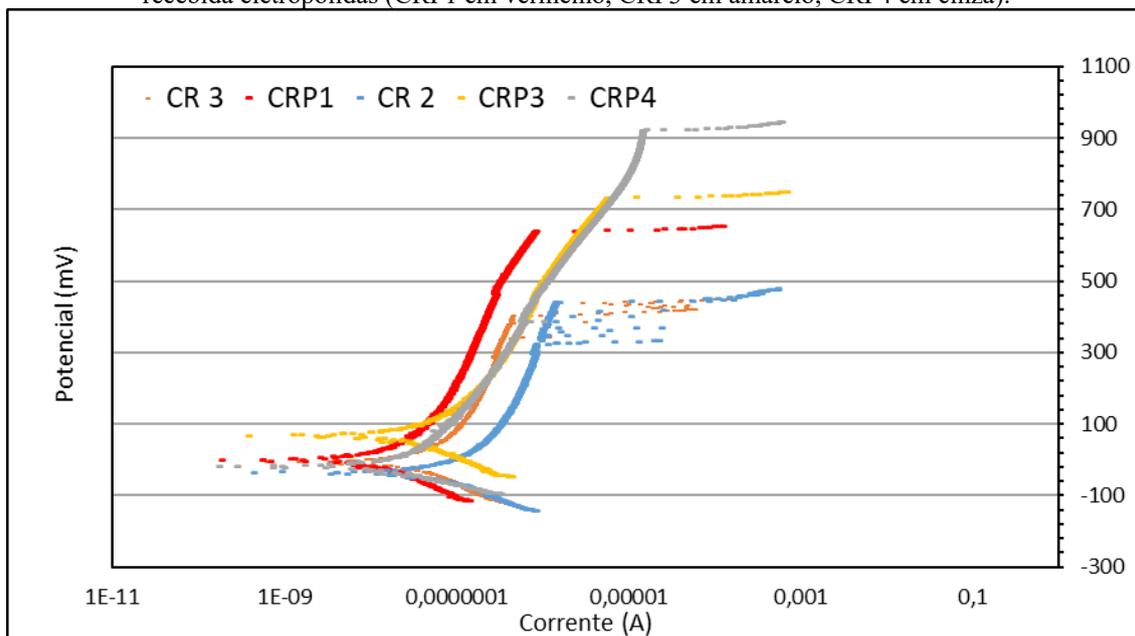
Neste tópico será apresentado os resultados observados a partir dos ensaios de polarização potenciodinâmica aplicado aos seguintes grupos de amostras: conforme recebida (CR); conforme recebida polida (CRP), fundo do canal da chapa ziguezague (FCZ), fundo do canal polida (FCZP), borda do canal da chapa ziguezague (CBZ) e borda do canal polida da chapa ziguezague (CBZP). As amostras com canais em S também foram analisadas na região da borda, denominadas CBS e CBSP, mas não na região de fundo do canal. Quanto as amostras, alguns testes não foram conclusivos e foram removidos dos gráficos finais, por esse motivo as amostras não seguem a numeração correta.

Iniciando pela análise das chapas conforme recebidas (CR) e conforme recebidas

eletropolidas (CRP), Figura 70, observa-se nesse primeiro bloco de ensaios: um maior potencial de corrosão para as chapas que foram eletropolidas em relação as não eletropolidas. Isto é justificado pela superfície mais rugosa apresentar mais defeitos no plano e na camada passiva, que já é mais fina ou com cavidades já desenvolvidas, o que leva ou à uma corrosão por pite ou à uma menor resistência a esse tipo de corrosão.

A Figura 70 mostra resultados das amostras CR 2 e 3 e das CBS1 e 2, onde é possível notar um “serrilhamento” no comportamento das curvas, o que representa um potencial de pite, ou seja, uma região em que camada perdeu a passivação e voltou a ficar passivada, com a consequente instabilidade da passivação nestas amostras não polidas. As demais amostras polidas, por sua vez, apresentam um potencial em que perde passivação mais alto, logo suportam um maior potencial e não apresentam a região de instabilidade anteriormente observada. Por fim, as amostras que passaram por polimento eletrolítico se apresentaram mais resistentes ao pite.

Figura 70 - Curva de Tafel das amostras conforme recebida (CR 3 em laranja e CR2 em azul) e conforme recebida eletropolidas (CRP1 em vermelho, CRP3 em amarelo, CRP4 em cinza).



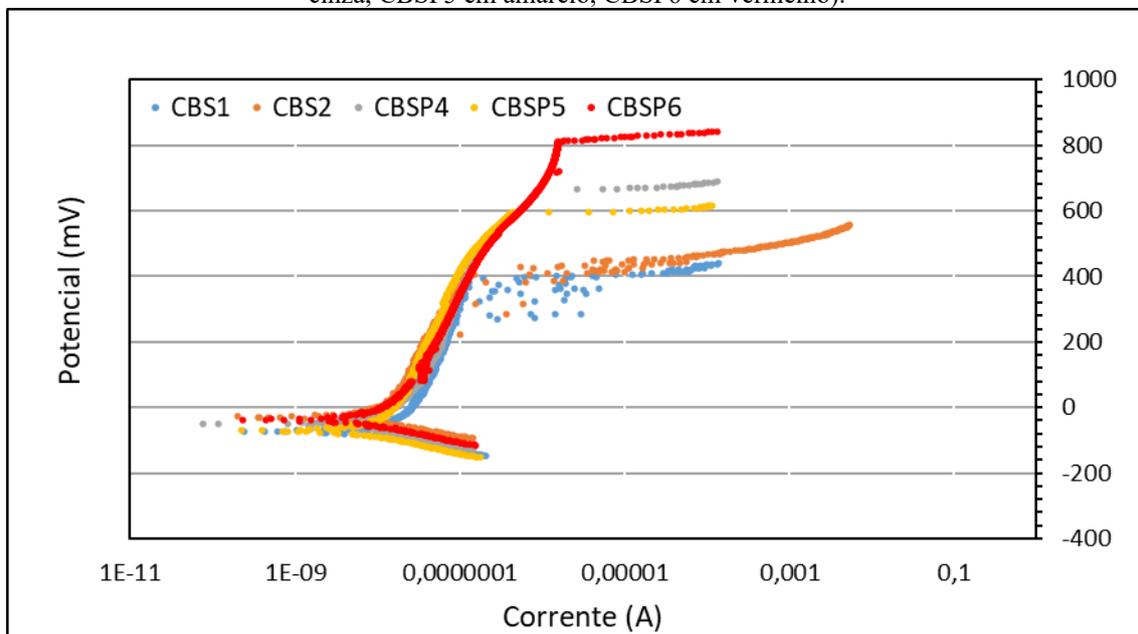
Fonte: Autora.

A análise das amostras removidas das chapas com diferentes geometrias de canais usinados, CBS e CBZ, mostram que pôde-se descartar qualquer influência da fabricação dos canais por usinagem fotoquímica, observando-se apenas a diferença de rugosidade entre as regiões de borda e as regiões de borda polida, que apresentaram valores de potencial de pite semelhantes, de média em 397 mV para a CBS e 453 mV para a CBZ.

A diferença, de aproximadamente 56 mV, é muito pequena e pode ser desconsiderada. A resistência ao pite dessas amostras também foi próxima, sendo 456 mV e 460 mV, respectivamente.

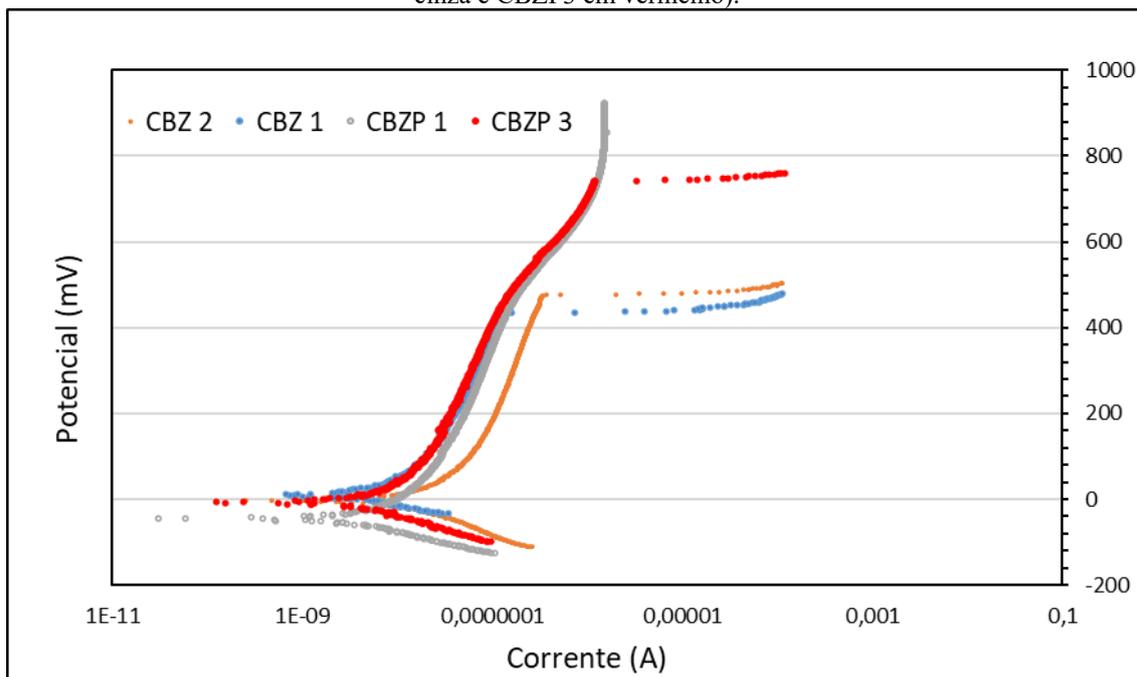
Com base nos resultados, é possível confirmar que a camada protetiva utilizada na borda das chapas durante o processo de usinagem fotoquímica foi eficaz tanto na proteção da região quanto na corrosão, cumprindo o objetivo de proteger a região de borda. As amostras apresentaram resultados bastante semelhantes e na mesma ordem de grandeza da condição CR (que não passou pela usinagem), com um potencial de pite de 422 mV e resistência ao pite de 442 mV.

Figura 71 - Curva de Tafel das amostras CBS. (CBS1 em azul e CBS2 em laranja) e CBSP (CBSP4 em cinza, CBSP5 em amarelo, CBSP6 em vermelho).



Fonte: Autora.

Figura 72 - Curva de Tafel das amostras CBZ (CBZ2 em laranja e CBZ 1 em azul) e CBZP (CBZP 1 em cinza e CBZP3 em vermelho).



Fonte: Autora.

Os valores médios de resistência ao pite para as condições eletropolidas (CRP, CBSP, CBZP e FCZP) ficaram entre 700 mV e 850 mV, aproximadamente 50% superior aos das amostras não polidas. Como a resistência à oxidação dos aços inoxidáveis é devido a formação da camada passiva de óxido na superfície, quando essa superfície passa por um eletropolimento, a camada de óxido é removida, retirando os defeitos superficiais e pontos pontiagudos da superfície. Dessa forma vai crescer uma camada passiva muito mais homogênea e estável na superfície do material.

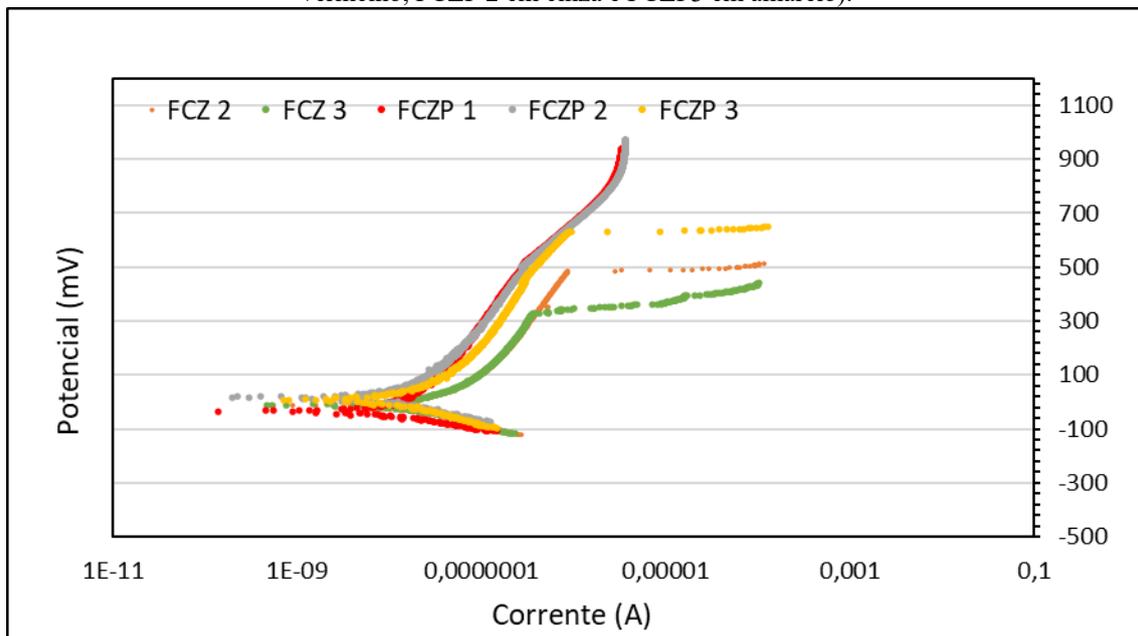
Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que os canais eletropolidos alcançam maior vida útil sem apresentar pite, ou seja, aguentaram potenciais e condições ambientais mais severas sem que haja corrosão.

Adicionalmente, normalmente atrela-se incrustações à qualidade das superfícies dos canais, incluindo rugosidade, presença de defeitos e sujidades. Superfícies rugosas são reconhecidas por sítar a nucleação de defeitos e o acúmulo de detritos, principalmente quando o fluxo de fluido não for suficiente para remover os detritos (partículas) dos canais com rugosidade elevada. A presença de uma superfície com rugosidade baixa,  $S_z$ ,  $S_p$  e  $S_v$  com menos picos e vales, tende a diminuir a retenção destas partículas, o que reduz a chance de entupimento do canal, aumentando o tempo necessário para uma intervenção de limpeza e aumentando a vida útil e performance do trocador.

A Figura 73 exibe as curvas de  $T_{afel}$  da condição FCZ e FCZP. Os resultados

mostram que a condição FCZ é a mais crítica, pois é referente ao fundo do canal, região esta mais rugosa e onde escoia o fluxo de fluido no trocador de calor. Neste caso é possível observar uma melhora significativa na resistência à corrosão, ou seja, do potencial de pite, também chamado de potencial de “breakdown” (ruptura, que indica o início do pite), para as amostras que foram eletropolidas. A análise das curvas FCZP1 e FCPZP2 indica que não há uma região de repassivação (a curva não tem uma “ponta” reta para a direita do gráfico, seguindo suavemente para o maior valor de potencial). Este resultado mostra que esta superfície apresenta melhores propriedades que as da amostra FCZP3.

Figura 73 - Curva de Tafel das amostras FCZ (FCZ2 em laranja e FCZ3 em verde) e FCZP (FCZP 1 em vermelho, FCZP 2 em cinza e FCZP3 em amarelo).



Fonte: Autora.

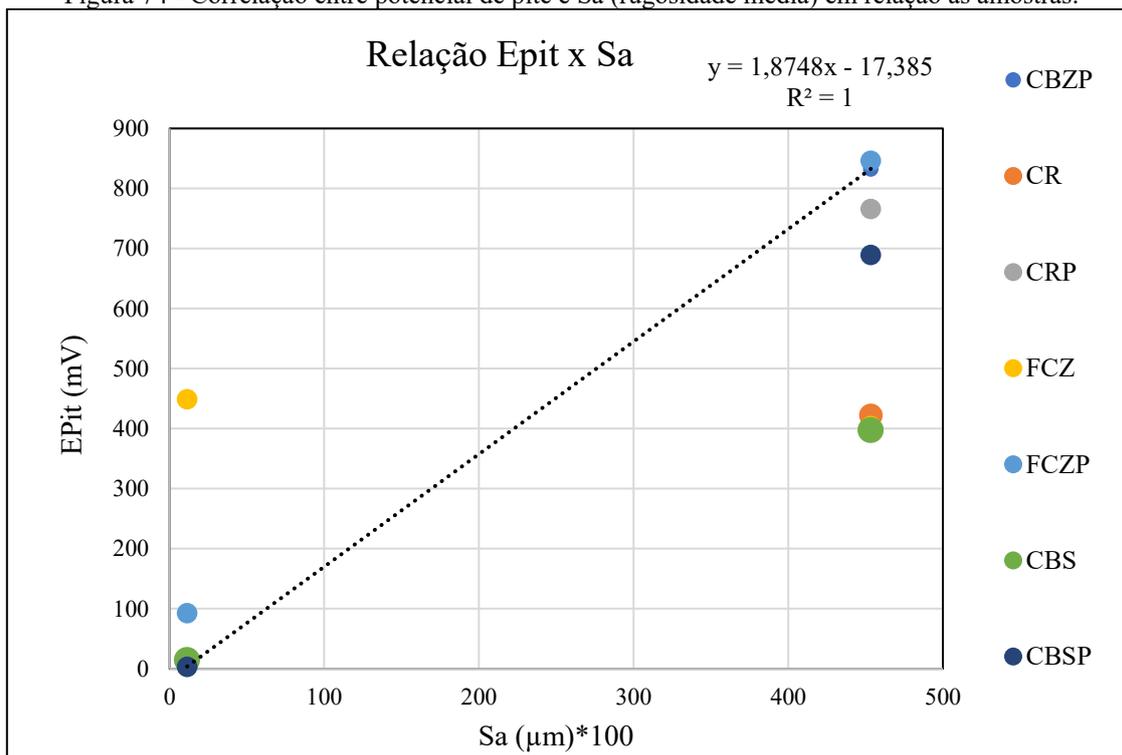
Tabela 21 - Informações sobre potencial de corrosão, corrente, potencial de pite e resistência ao pite das amostras.

<b>Amostra</b>	<b>E<sub>corr</sub> (mV)</b>	<b>I<sub>corr</sub> (A/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>J<sub>corr</sub></b>	<b>E<sub>pit</sub> (mV)</b>	<b>Resistência a Pite</b>
<b>CR2</b>	-35,88	5,15x10 <sup>-8</sup>	6,56x10 <sup>-8</sup>	441,44	442,37
<b>CR3</b>	-4,65	7,06x10 <sup>-8</sup>	9,00x10 <sup>-8</sup>	402,83	
<b>CRP1</b>	-2,61	1,80x10 <sup>-8</sup>	2,30x10 <sup>-8</sup>	640,72	753,25
<b>CRP3</b>	66,98	2,28x10 <sup>-8</sup>	2,91x10 <sup>-8</sup>	734,41	
<b>CRP4</b>	-26,78	7,84x10 <sup>-9</sup>	1,00x10 <sup>-8</sup>	922,24	
<b>CBS1</b>	-80,23	1,15x10 <sup>-8</sup>	1,46x10 <sup>-8</sup>	402,83	456,54
<b>CBS2</b>	-38,32	7,42x10 <sup>-9</sup>	9,46x10 <sup>-8</sup>	391,69	
<b>CBSP4</b>	-59,30	7,67x10 <sup>-9</sup>	9,78x10 <sup>-9</sup>	664,06	751,22
<b>CBSP5</b>	-79,35	7,49x10 <sup>-9</sup>	7,49x10 <sup>-9</sup>	593,72	
<b>CBSP6</b>	-46,84	5,46x10 <sup>-9</sup>	6,96x10 <sup>-9</sup>	810,39	
<b>CBZ1</b>	-5,59	8,51x10 <sup>-9</sup>	1,09x10 <sup>-8</sup>	433,65	460,61
<b>CBZ2</b>	-8,81	1,99x10 <sup>-8</sup>	2,54x10 <sup>-8</sup>	473,18	
<b>CBZP1</b>	-57,00	2,98x10 <sup>-9</sup>	3,80x10 <sup>-9</sup>	924,38	870,34
<b>CBZP3</b>	-18,34	4,46x10 <sup>-9</sup>	5,68x10 <sup>-9</sup>	740,97	
<b>FCZ2</b>	-13,66	3,38x10 <sup>-8</sup>	4,31x10 <sup>-8</sup>	482,79	477,54
<b>FCZ3</b>	-15,27	2,61x10 <sup>-8</sup>	3,33x10 <sup>-8</sup>	326,54	
<b>FCZP1</b>	-31,01	9,32x10 <sup>-9</sup>	1,19x10 <sup>-8</sup>	939,4	850,92
<b>FCZP2</b>	11,26	1,07x10 <sup>-8</sup>	1,37x10 <sup>-8</sup>	970,31	
<b>FCZP3</b>	6,73	1,45x10 <sup>-8</sup>	1,86x10 <sup>-8</sup>	630,04	

Fonte: Autora.

Corroborando com o que já foi apresentado, a Figura 74 traz a correlação entre o potencial de pite encontrado por meio do ensaio de polarização, em função do parâmetro Sa. Pode-se observar um crescimento do E<sub>pit</sub> para as amostras com Sa maior.

Figura 74 - Correlação entre potencial de pite e Sa (rugosidade média) em relação as amostras.



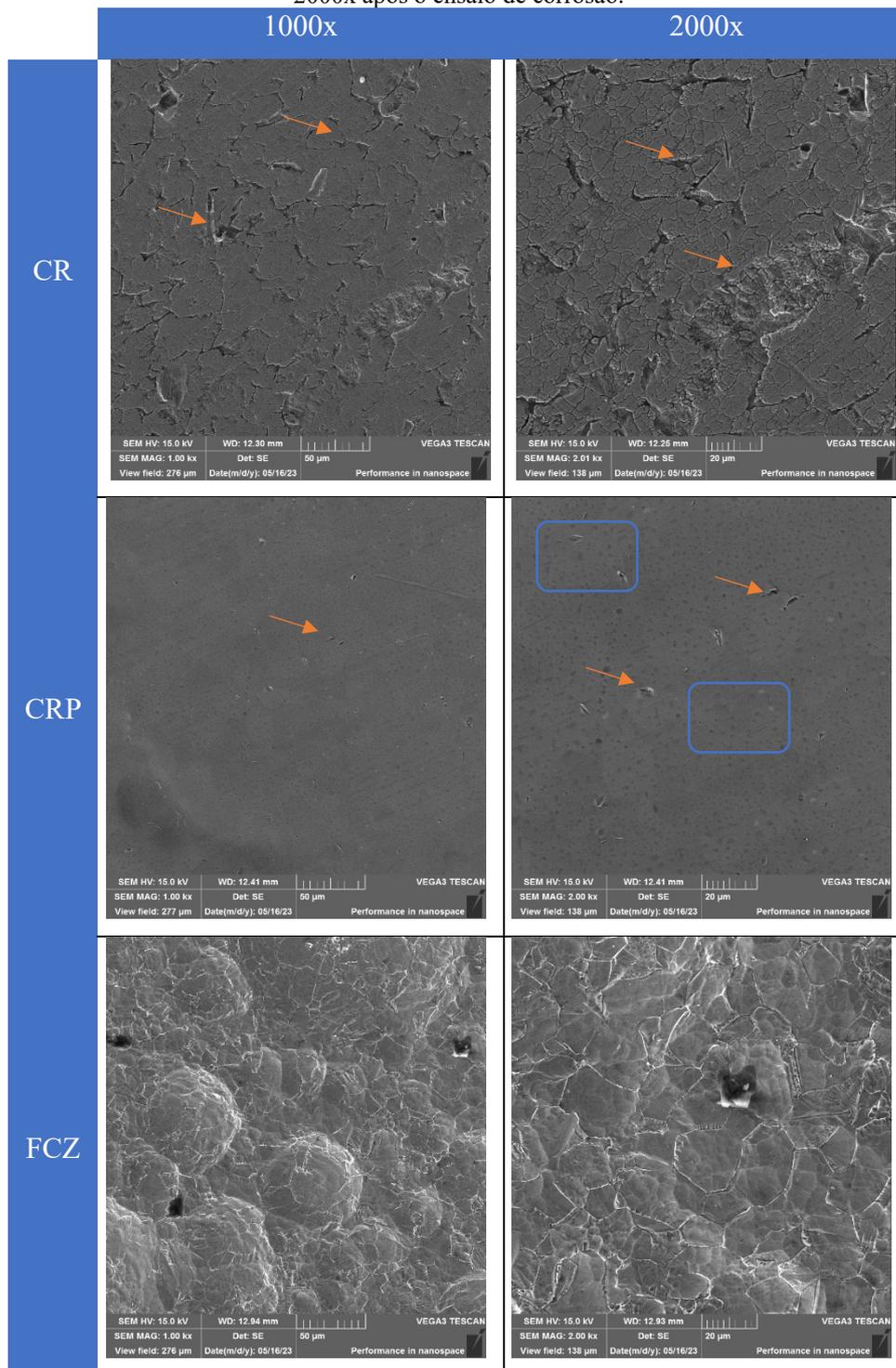
Fonte: Autora.

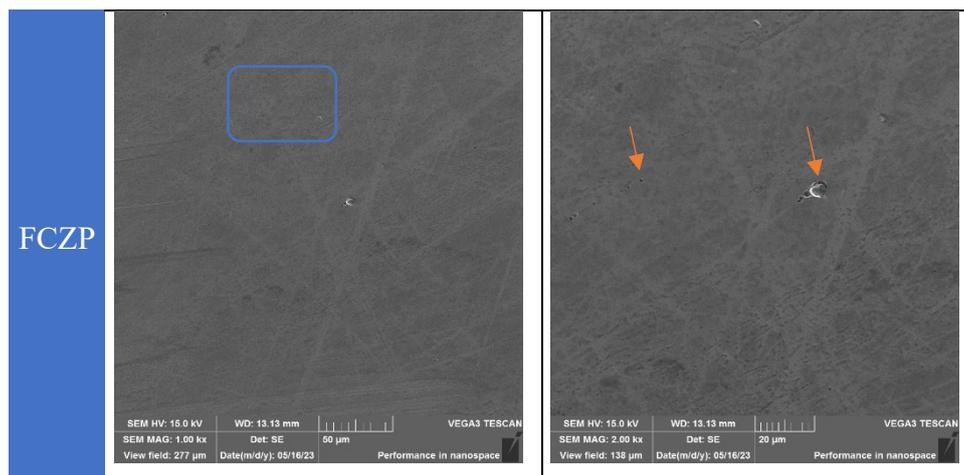
As imagens adquiridas em MEV após os ensaios de corrosão são exibidas na Figura 75. As micrografias das duas condições não polidas (CR e FCZ) mostram os contornos de grão bem nítidos. Isto é um indicativo que o ensaio de polarização potenciodinâmica corroeu a região de contorno de grão, ou seja, ocorreu uma possível corrosão intergranular.

A condição FCZ, por sua vez, exibe bem os alvéolos já observados anteriormente nas projeções axonométricas dessa mesma condição, resultante do processo de usinagem fotoquímica.

Os resultados obtidos das amostras eletropolidas, a CRP (amostra sem canal) e a FCZP (amostra usinada fotoquimicamente com a presença de canais ziguezague) não são muito conclusivos, pois o eletropolimento deixa a superfície bastante espelhada e de difícil captura em microscopia eletrônica. No entanto, é visível algumas marcas sutis e arredondadas (nas regiões indicadas em azul), como pequenos alvéolos nas placas que passaram por eletropolimento, as amostras CRP e FCZP. Uma possível explicação para o aparecimento destas marcas é a saturação da solução ácida utilizada no processo de eletropolimento, ou apenas mancha de secagem da amostra.

Figura 75 - Micrografias típicas em MEV das condições CR, CRP, FCZ e FCZP nos aumentos 1000x e 2000x após o ensaio de corrosão.





Fonte: Autora.

Com base nos resultados obtidos nesta etapa, pode-se afirmar que o uso do eletropolimento diminuiu a rugosidade e aumentou a resistência à corrosão das placas, o que traria maior vida útil aos trocadores de calor e diminuindo ainda o risco de obstrução do trocador por detritos no canal.

### 5.3 Resultados dos blocos

Neste tópico serão apresentadas todas as análises realizadas nos blocos.

#### 5.3.1 Análise topográfica das chapas do bloco TMP

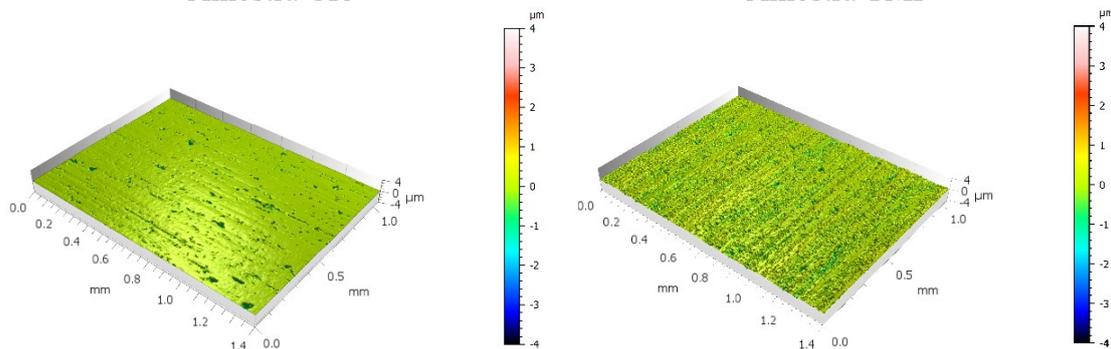
Nesse tópico será apresentado de maneira simplificada e individual os resultados obtidos para as chapas utilizadas na fabricação do núcleo do trocador médio porte, bloco TMP. A Tabela 22 exibe valores semelhantes em todos os parâmetros analisados entre as duas placas que serão intercaladas e empilhadas na união por difusão (A e B). A Figura 76 mostra uma projeção bem semelhante as condições CBS e CBZ, com uma direção de laminação bem definida, com alguns vales mais aparentes e significativos e poucos picos, logo sem qualquer irregularidade preocupante para o processo subsequente de união das placas.

Tabela 22 - Valores topográficos das chapas A e B do TMP.

<b>Placa A</b>				
Sa ( $\mu\text{m}$ )	Sq ( $\mu\text{m}$ )	Sp ( $\mu\text{m}$ )	Sv ( $\mu\text{m}$ )	Sz ( $\mu\text{m}$ )
0,113	0,176	1,477	3,122	4,599
<b>Placa B</b>				
0,146	0,213	1,075	3,536	4,612

Fonte: Autora.

Figura 76 - Projeção axonométrica típica da chapa do TMP da região de borda.  
 Amostra CR



Fonte: Autora.

### 5.3.2 Análise do ciclo de união TMP

O ciclo de união do bloco TMP foi realizado e as medidas de altura das chapas após empilhadas realizadas, para os diferentes níveis de força, como explicado no item 4.3.2. Essas medições são apresentadas na Tabela 23.

Tabela 23 – Medições da altura do bloco em diferentes patamares de força.

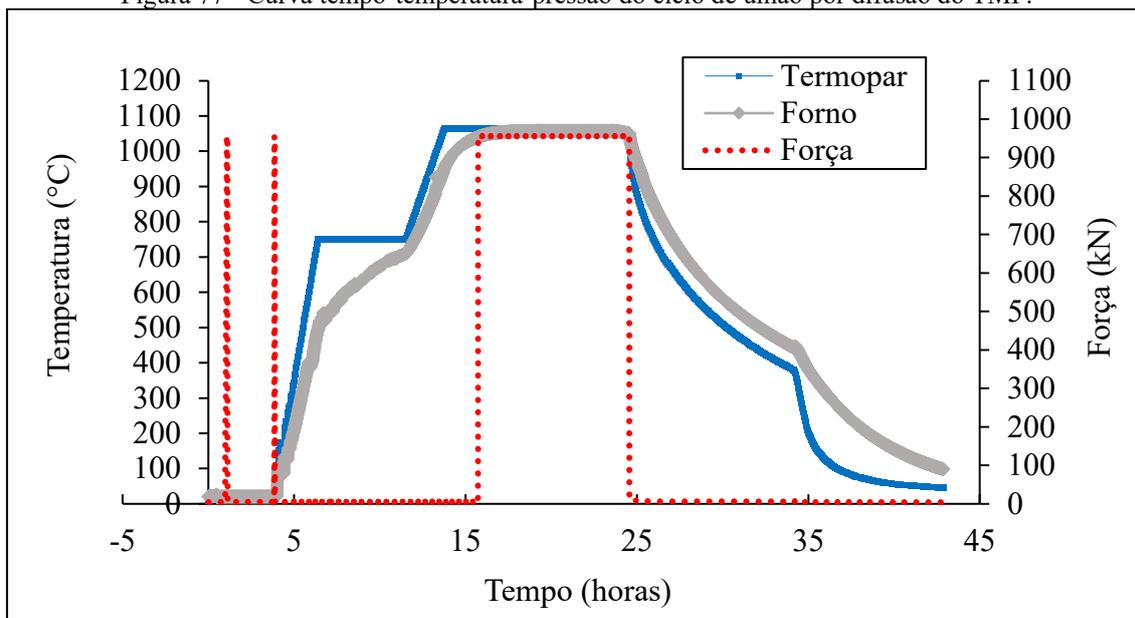
Nível de força aplicada [kN]	0	237,8	475,6	713,3	951,2
Altura do bloco [mm]	204,1	200,8	200,1	199,9	199,5

Fonte: Autora.

Avaliando a redução da altura com a aplicação de força, percebe-se que ocorre uma deformação, que promove a maior área de contato entre as superfícies, uma vez que há diversas asperezas na superfície (rugosidade).

No entanto, neste ciclo, ocorreu um imprevisto que resultou num tempo de patamar de pressão de mais de 8h, ao invés de 1h como havia sido planejado. Este erro se deu no início da aplicação da força e gerou um travamento do pistão de pressão até a chegada do operador para dar seguimento normal ao restante do ciclo. O resfriamento ocorreu dentro do esperado e o tempo total do ciclo foi de aproximadamente 45 horas. O ciclo de união do TMP é mostrado graficamente na Figura 77.

Figura 77 - Curva tempo-temperatura-pressão do ciclo de união por difusão do TMP.



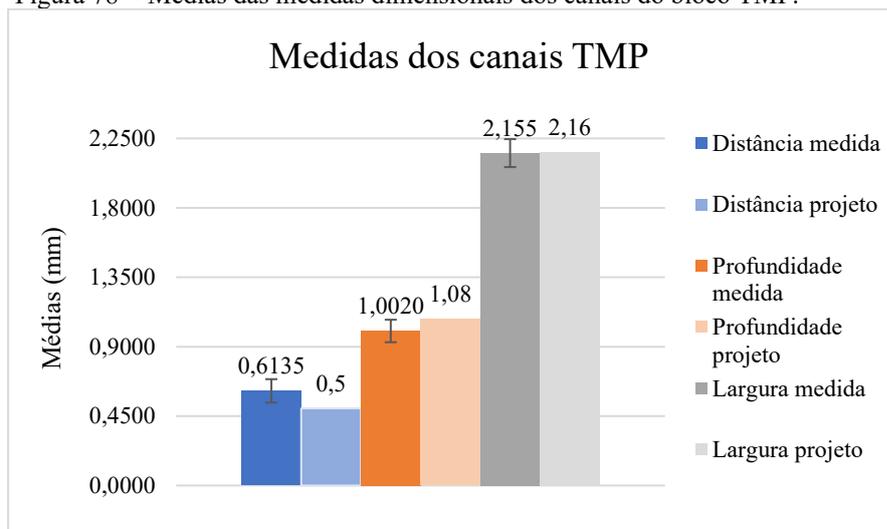
Fonte: Autora.

### 5.3.3 Análise Visual do bloco TMP

As medidas dimensões dos canais em zigzague adquiridas para o bloco TMP são apresentadas na Figura 78 e na Tabela 24. É possível notar uma pequena diminuição dos valores de média da região mais inferior da amostra, tanto da profundidade e quanto da largura dos canais, com um aumento na distância entre os canais. Isto pode ter relação com a deformação dos canais, que deve ter sido maior na região inferior devido a maior pressão causada pelas várias camadas de chapas acima, tendo em vista que o pistão de força age sobre a placa superior.

Apesar dessas observações, os valores de média de profundidade, distância e largura dos canais estão dentro dos limites de tolerância solicitados ao fornecedor do serviço: profundidade de 1,08 mm; largura de 2,16 mm, e distância entre os canais de 0,53 mm. A profundidade média obtida foi de 1,00 mm  $\pm$ 0,07 mm, ou seja, uma variação de 7 % em relação ao solicitado. Enquanto a distância entre canais medida foi de 0,61 mm  $\pm$ 0,07 mm, um aumento de 15 % em relação ao solicitado. E ainda, a largura mostrou uma média dentro do estipulado de 2,15 mm  $\pm$ 0,09 mm.

Figura 78 - Médias das medidas dimensionais dos canais do bloco TMP.



Fonte: Autora

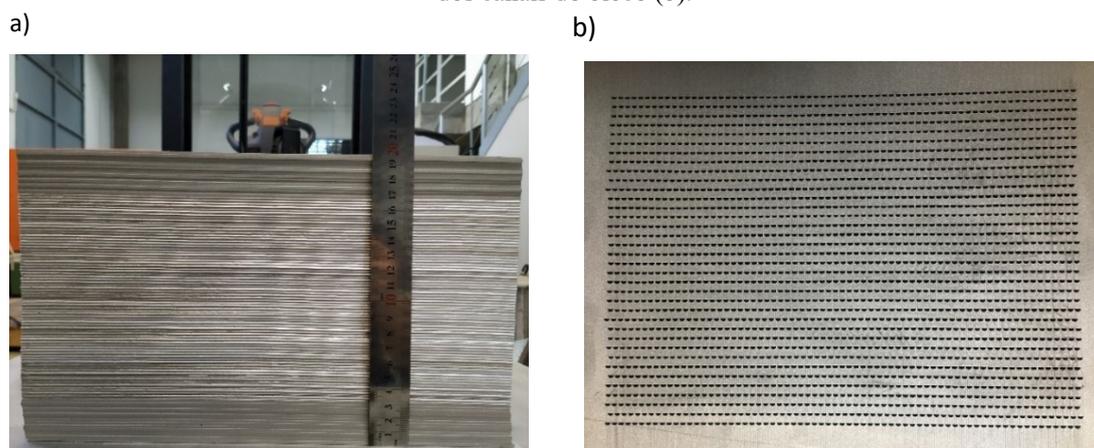
Tabela 24 - Dimensões dos canais do bloco TMP.

Parâmetro	Região amostra	Médias (mm)	Média Total (mm)	Desvio padrão (mm)
Profundidade	1	0,99	1,00	0,07
	2	1,02		
	3	1,02		
	4	0,96		
Distância	1	0,61	0,61	0,07
	2	0,55		
	3	0,60		
	4	0,66		
Largura	1	2,14	2,15	0,09
	2	2,16		
	3	2,20		
	4	2,10		

Fonte: Autora.

Ademais, a Figura 79 (a) exibe a altura final do bloco pós união de 197 mm, o que representa, considerando a altura de projeto inicial (204,00 mm), uma deformação de 3,43%, valor esse considerado aceitável dentro do processo de união por difusão, que admite uma deformação de aproximadamente 5%.

Figura 79 - Medição da altura do bloco TMP após ciclo de união por difusão (a) e visualização dos canais do bloco (b).



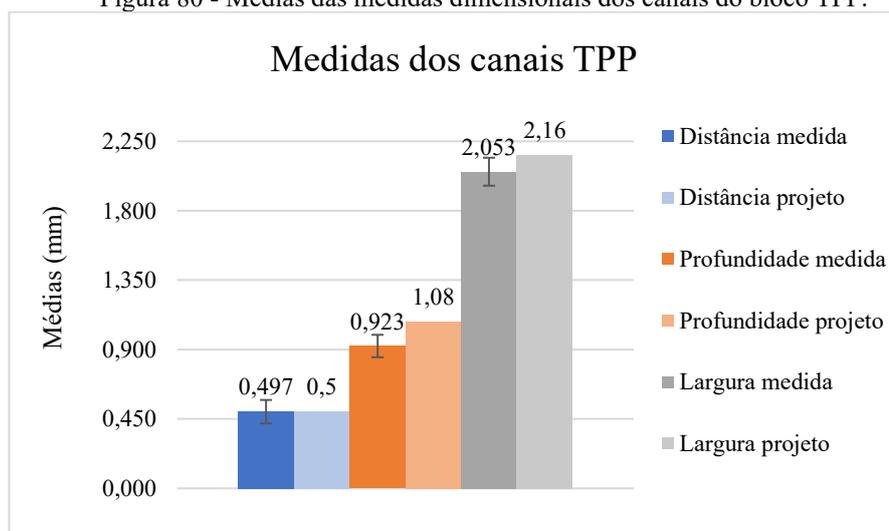
Fonte: Autora.

#### 5.3.4 Análise Visual do bloco TPP

Os canais do bloco TPP também foram caracterizados quanto a sua profundidade, distância e largura, conforme apresentado na Figura 80 e na Tabela 25. A profundidade média obtida foi de 1,0832 mm, atingindo a medida ideal de projeto. Para a largura dos canais tem-se uma média cerca de 11% superior ao esperado, de 2,406 mm. Já a medida de distância apresentou uma média inferior ao solicitado, aproximadamente 28%.

Com base nos valores medidos e desvios obtidos no processo de fabricação, pode-se afirmar que o bloco atende as especificações dimensionais do projeto.

Figura 80 - Médias das medidas dimensionais dos canais do bloco TPP.



Fonte: Autora.

Tabela 25 - Dimensões dos canais do bloco TPP.

<b>Parâmetro</b>	<b>Média Total (mm)</b>	<b>Desvio padrão (mm)</b>
<b>Profundidade</b>	1,08	0,08
<b>Distância</b>	0,35	0,04
<b>Largura</b>	2,40	0,06

Fonte: Autora.

### 5.3.5 Análise microestrutural dos blocos

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos por meio de análises em microscópio ótico e de varredura dos dois blocos (TPP e TMP) anteriormente apresentados e correlacionados com o bloco de referência.

Na Figura 81 são apresentadas as micrografias das interfaces de união dos blocos, com uma magnitude de 100x. Observa-se neste aumento uma diferença na densidade de defeitos entre as condições. O bloco referência e TPP mostram-se mais semelhantes quanto a quantidade e distribuição dos defeitos na linha de união, enquanto o TMP aparenta menos microconstituintes nessa região.

Quanto a migração dos contornos de grão, a condição de referência não apresentou essa característica, mostrando que não houve um preenchimento total dos vazios durante a etapa de difusão volumétrica. Este detalhe pode ser mais bem observado na Figura 82 com magnitude de 200x. Ademais, há a presença de maclas de recozimento (indicada por paralelogramos) e grãos bem definidos. Morfologicamente, os defeitos são, em sua maioria, microscópicos, arredondados e presentes em todas as regiões do bloco, porém observa-se alguns defeitos mais alongados e contínuos, que poderiam prejudicar a performance mecânica do equipamento, sendo assim um ponto crítico para nucleação de trincas e possíveis falhas no dispositivo.

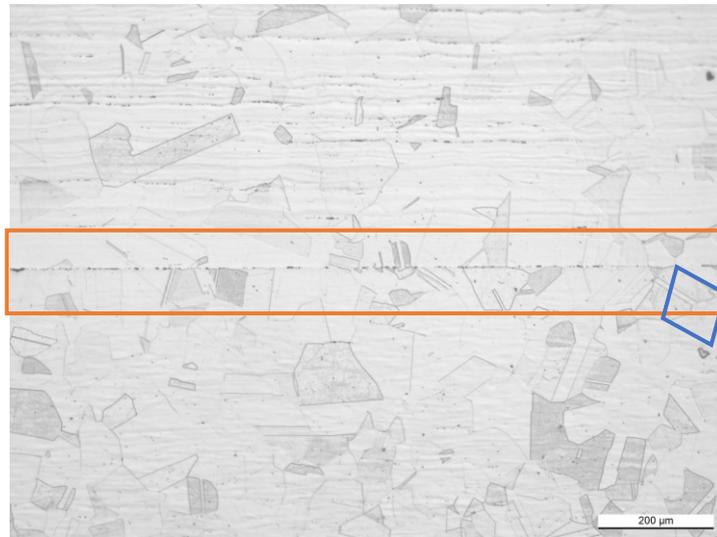
As imagens obtidas a partir dos blocos TPP mostram uma densidade de defeitos maior em comparação com o bloco referência anteriormente comentado. Nota-se também que os defeitos aparentam ser maiores e mais contínuos e alongados, o que, como comentado, pode ser prejudicial para as propriedades mecânicas do trocador, devendo assim, serem minimizados. Quanto maior é a presença de defeitos, menor é a continuidade de material na linha de união, resultante da presença de vazios ou descontinuidades distribuídas na mesma. Por outro lado, no bloco TPP, percebe-se um crescimento de grão entre as interfaces de união (indicado por flechas), fator este que caracteriza que houve um preenchimento maior dos poros.

Figura 81 - Micrografias típicas em 100x de aumento da linha de união dos blocos referência, TPP e TMP.

**Amostra bloco referência**

**Parâmetros de união**

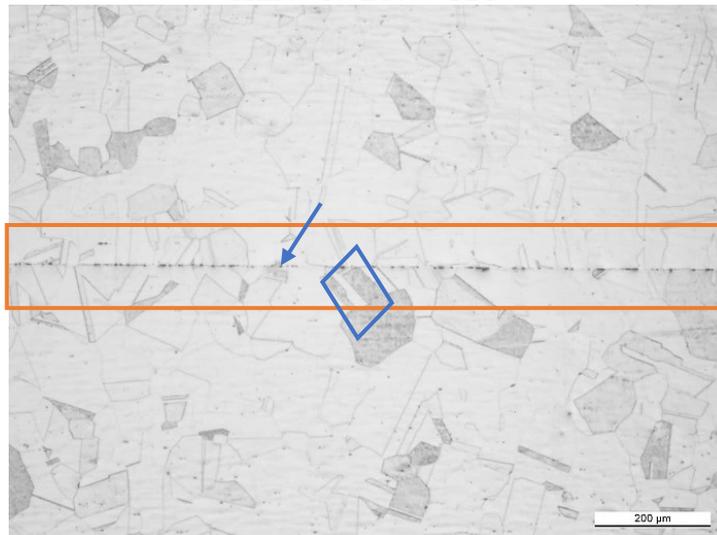
T = 1040 °C  
P = 9,8 Mpa  
t = 1 h  
Atm. =  $10^{-6}$  mbar



**Amostra Bloco TPP**

**Parâmetros de união**

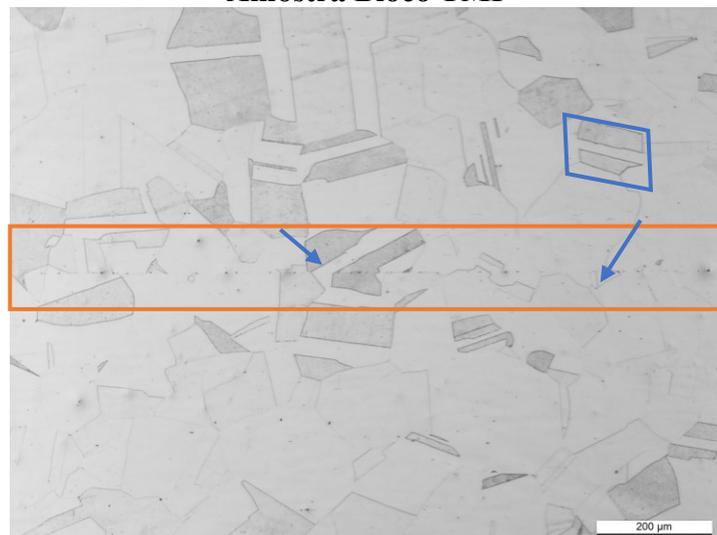
T = 1040 °C  
P = 9,8 Mpa  
t = 1 h  
Atm. =  $10^{-6}$  mbar



**Amostra Bloco TMP**

**Parâmetros**

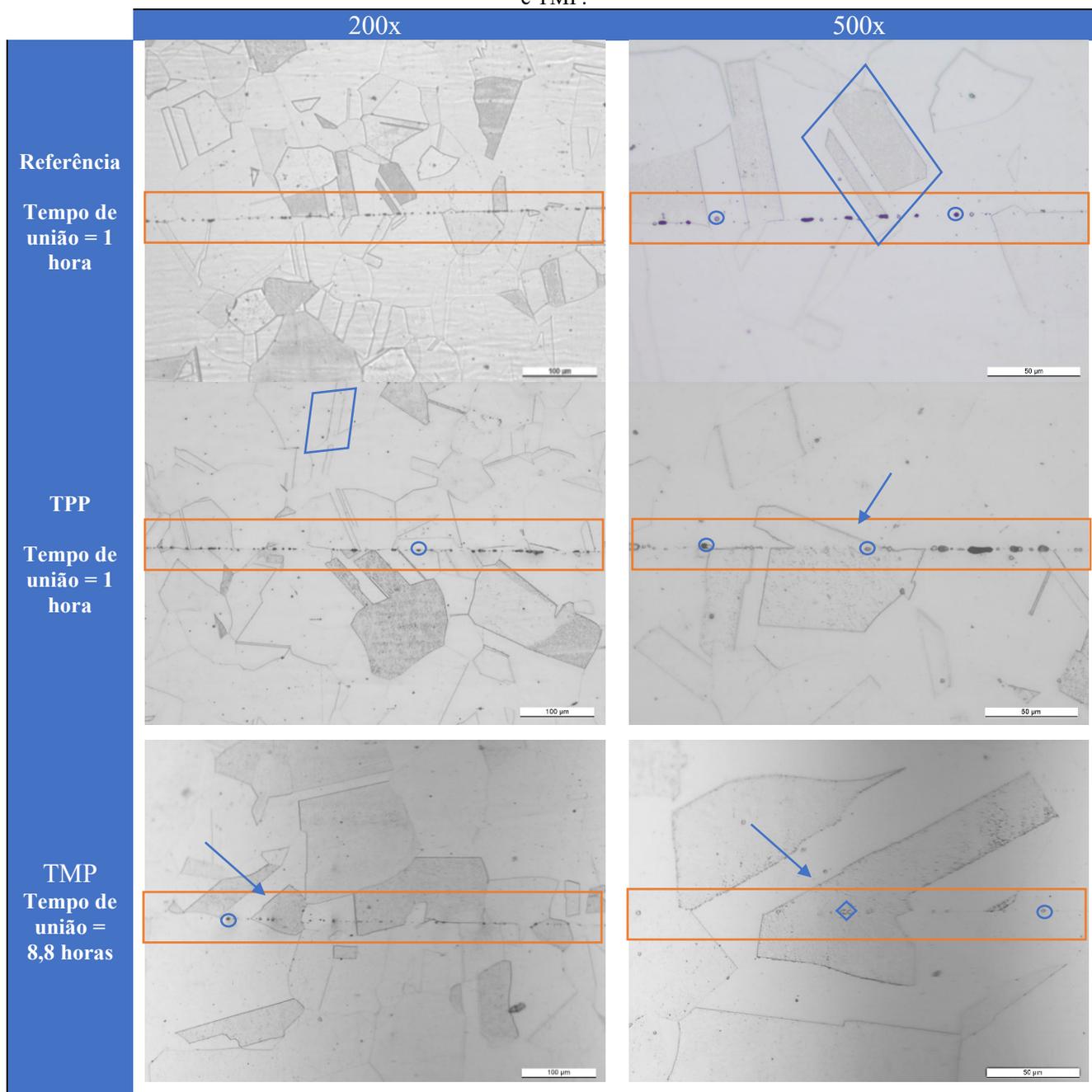
T = 1040 °C  
P = 9,8 Mpa  
t = **8,8 h**  
Atm. =  $10^{-6}$  mbar



Fonte: Autora.

Com base nos mecanismos metalúrgicos que descrevem os estágios da união por difusão proposto por autores já citados (DERBY; WALLACH, 1980), é possível observar em todas as micrografias uma interface de união característica do segundo e terceiro estágios, em que as taxas de transporte de massa são regidas principalmente pela difusão por contornos de grão e volumétrica, respectivamente. As interfaces apresentam certa migração da posição original, não sendo mais totalmente planas como no início do processo, com certo crescimento de grão através das mesmas (indicado por flechas) e vazios ou poros isolados dentro dos grãos (indicado por losangos). Notam-se ainda defeitos mais arredondados em algumas regiões da linha de união e mais alongados em outras, mas claramente bem isolados entre si (indicado por círculos). Além disso, como já comentado, observam-se a presença de maclas de recozimento (indicada por paralelogramos) em praticamente todas as micrografias adquiridas. Por fim, visualmente, a densidade de vazios da amostra TMP aparenta ser menor do que da amostra TPP, o qual implica em uma qualidade de união melhor.

Figura 82 - Micrografias típicas em 200x e 500x de aumento da linha de união dos blocos referência, TPP e TMP.



Fonte: Autora.

Para garantir a qualidade do trocador, é essencial que os canais não se rompam. Portanto, é necessário avaliar a qualidade da união também da região com canais. Assim, foram também removidas amostras das regiões com canais dos blocos TPP e TMP, para análise da microestrutura das interfaces de união em microscópio óptico. Os resultados são apresentados na Figura 83.

No que concerne à qualidade da união, os canais do bloco TPP apresentaram maior densidade de defeitos na linha de união, porém ainda com passagem de grão entre as

interfaces (grãos comuns às duas chapas) e presença de grãos arredondados e bem distribuídos na decorrer da linha.

Por outro lado, os microconstituintes da região da linha das amostras do TMP são muito pequenos e em poucas quantidades, quase imperceptível em menores aumentos (100x). Há também o deslocamento maior da interface, o qual garante uma melhor passagem dos átomos de uma chapa a outra. Ademais, é notável que os grãos presentes no material de base e na interface aparentam dimensões maiores nesta condição. Uma justificativa para essa característica é o tempo de união ter sido maior nessa condição. Obviamente o patamar de união de 8,8 horas na temperatura de união de 1040° C e pressão aumentaram a difusão dos átomos entre as interfaces e conseqüentemente aumentaram o tamanho dos grãos do material, diminuindo a quantidade de defeitos, pois o fechamento dos poros ocorreu de maneira mais efetiva que para o outro ciclo.

Em contrapartida, os resultados de ensaio de tamanho de grão, realizado em empresa externa, não apresentaram diferenças significativas e essa afirmação pode ser observada na Tabela 26.

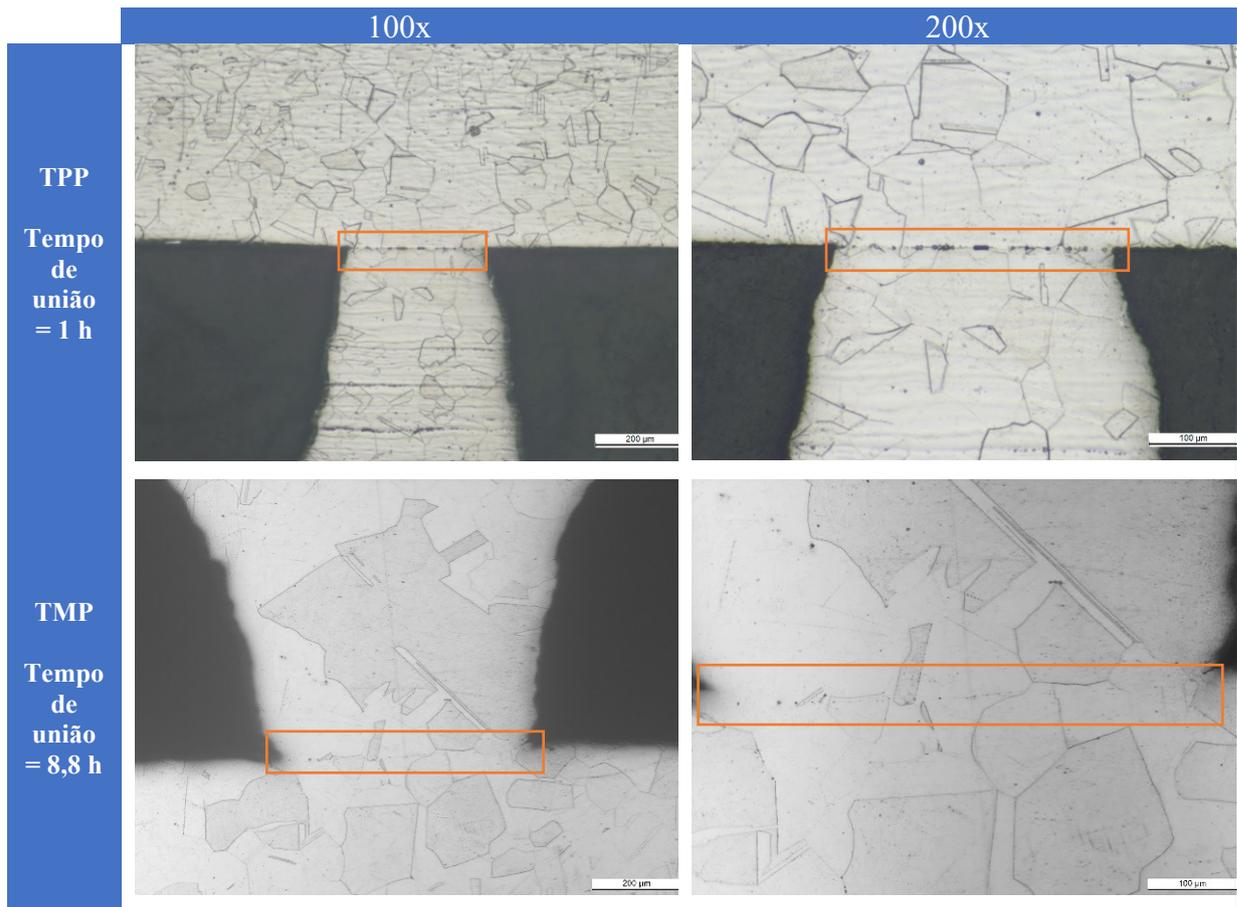
Os valores do bloco de referência e de TPP que passaram pelo mesmo ciclo de união tiveram tamanho de grão de 4 a 6 ASTM. Por sua vez, o bloco TMP que passou mais de 8 horas no patamar de união, mostrou tamanho de grão de 6 ASTM em todas as amostras analisadas. Sendo assim, não se pode concluir qualquer diferença no tamanho de grãos obtidos pelos dois blocos. Ademais os resultados do ensaio apresentado pela empresa não se mostrou totalmente confiável, pois foi recebido sem que a ordem correta das amostras fosse apresentada. Foi feita uma correção por parte da empresa após esta ter sido notificada do fato.

Tabela 26 - Tamanho de grão (ASTM) das condições Referência, TPP e TMP.

<b>Condição</b>	<b>Tamanho de grão (ASTM)</b>
<b>Referência</b>	4 - 5
<b>TPP</b>	5 - 6
<b>TMP</b>	6

Fonte: Autora.

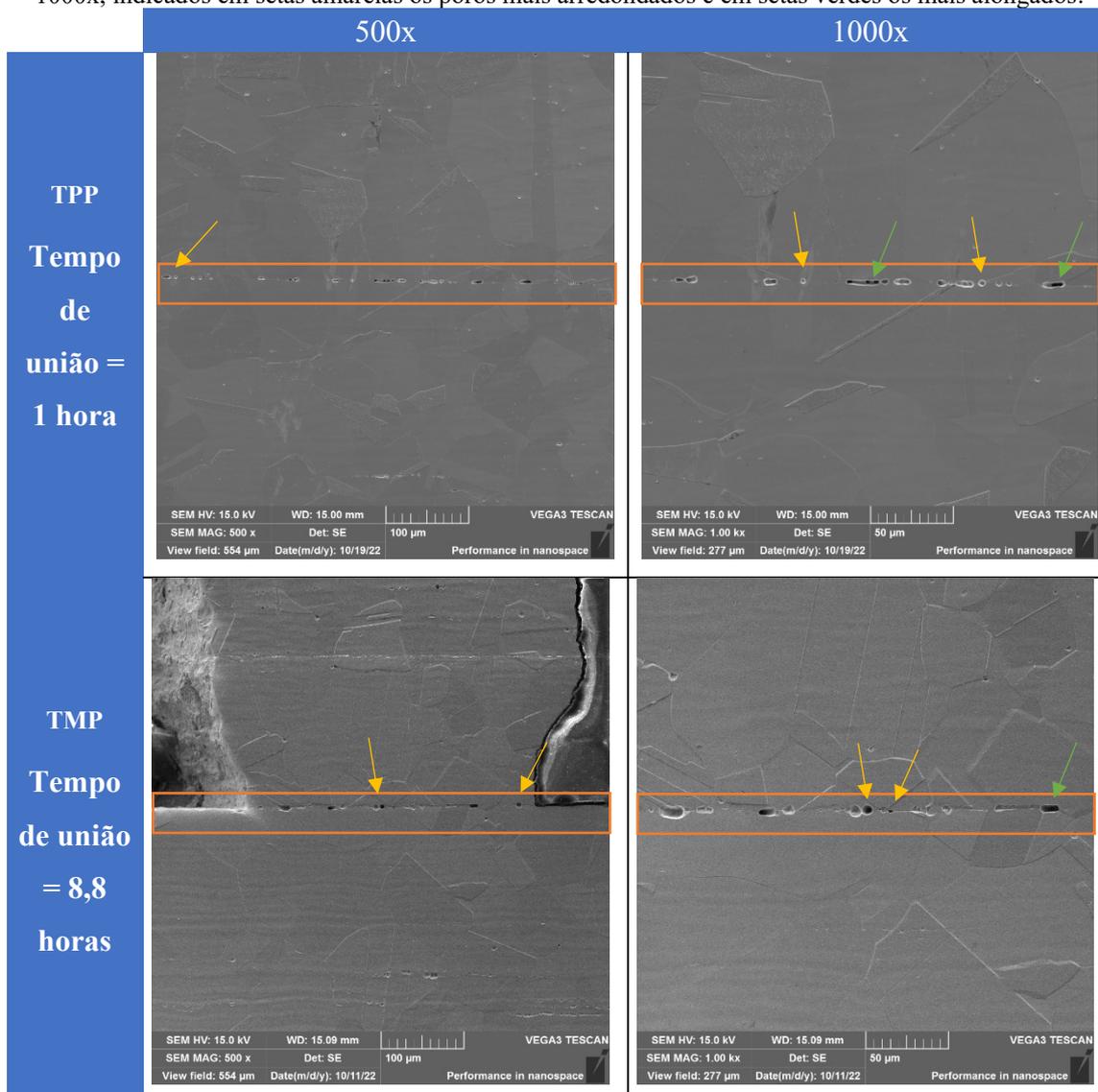
Figura 83 - Micrografias típicas em 100x e 200x de aumento da linha de união dos blocos TPP e TMP na região dos canais.



Fonte: Autora.

Por fim, as análises em MEV dos blocos TPP e TMP, Figura 84, apresentaram as mesmas características já comentadas sobre o observado em MO. Analisando-se figuras com aumentos maiores, de 500x e 1000x, pode-se observar, nas duas condições, defeitos presentes na linha de união (indicado pelo retângulo laranja) de formatos bem arredondados, assim como outros mais alongados. Como já observado, um poro menor e mais arredondado (menos alongado) mostra uma melhor união por difusão.

Figura 84 - Micrografias típicas dos blocos TPP e TMP da região de união em MEV, aumentos 500x e 1000x, indicados em setas amarelas os poros mais arredondados e em setas verdes os mais alongados.



Fonte: Autora

Na sequência, será apresentada a análise de percentual de vazios presentes nas interfaces de união dos blocos Referência, TPP e TMP. A Tabela 27 exibe os valores de quantidade de microconstituintes, tamanho médio dos vazios e percentual de vazios encontrados nas linhas de união analisadas.

O bloco de referência, sem canais, apresentou o percentual de 0,585 %, valor intermediário em relação aos outros dois. Em comparação com estudos anteriores de Holtz (2020), o percentual de vazios do bloco sem canal com 3 mm de espessura era de 0,125%, Isto demonstra que o bloco apresentou valores na mesma ordem de grandeza do que foi visto na literatura (HOLTZ, 2020).

O percentual de vazios do bloco TPP foi de 1,072 % da área analisada, por volta

de 3 vezes mais defeitos do que o bloco TMP, de 0,346 %. Tal análise corrobora com o que foi observado anteriormente nas micrografias das regiões de interface de união dos dois blocos.

Tabela 27 - Análise em ImageJ da quantidade, tamanho e percentual de vazios nos blocos Referência, TPP e TMP.

<b>Bloco</b>	<b>Média de quantidade de vazios</b>	<b>Média de tamanho de vazios (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>% de vazios</b>
<b>Referência.</b>	65	9,99	0,585
<b>TPP</b>	56	21,18	1,072
<b>TMP</b>	49	7,69	0,346

Fonte: Autora.

### 5.3.6 Ensaio de tração - Resultados Mecânicos dos blocos

Neste tópico são apresentados os resultados dos ensaios de tração dos blocos de referência, TPP e TMP.

Os ensaios de tração do bloco TMP, em geral, apresentaram, resultados coerentes e positivos em comparação a estudos anteriores do laboratório, mesmo com o tempo de patamar de pressão aplicado excedido em relação ao procedimento padrão (GATTI, 2020; HULSE, 2020; ROSINSKI, 2018).

Na Figura 85 são apresentados os valores de resistência máxima do bloco de referência, TMP e TPP adquiridos de amostras removidas de regiões perpendiculares à linha de união, com nomenclatura I, II e III (em azul), 1B, 2B, 3E, 4E e 5F (em laranja) e I, II, III e IV (em verde), referentes aos blocos citados respectivamente. Enquanto a Figura 86 exhibe apenas os resultados mecânicos das amostras paralelas a linha de união do bloco Referência e TMP.

O bloco de referência apresentou resistência média de 506 MPa para as amostras perpendiculares e 599 MPa para as paralelas a interface de união. Já para o bloco TMP, obteve-se uma média de 517 MPa para as amostras perpendiculares e 604 MPa para as amostras paralelas. Enquanto o bloco TPP apresenta valores mais baixos com uma média de 491,8 MPa para amostras perpendiculares. Não foram removidas amostras paralelas deste bloco pequeno devido ao tamanho do mesmo não comportar o comprimento e diâmetro mínimo necessário para o corpo de prova do ensaio de tração. Sendo assim, o bloco não poderá ser qualificado perante a norma ASME, apenas avaliado, quanto a sua performance mecânica, de forma comparativa ao bloco TMP.

As diferenças observadas entre as amostras paralelas e perpendiculares ao bloco são recorrentes do que já foi observado no decorrer em estudos anteriores (HOLTZ, 2020 e MARTINS, 2020), e se justifica uma vez que o número de linhas de união avaliadas nas amostras perpendiculares é muito maior do que a área avaliada nas amostras paralelas, o que está associado ao maior número de defeitos presentes na linha de união, reduzindo desta forma a sua resistência.

Figura 85 - Gráfico de tensão máxima das amostras perpendiculares dos blocos.

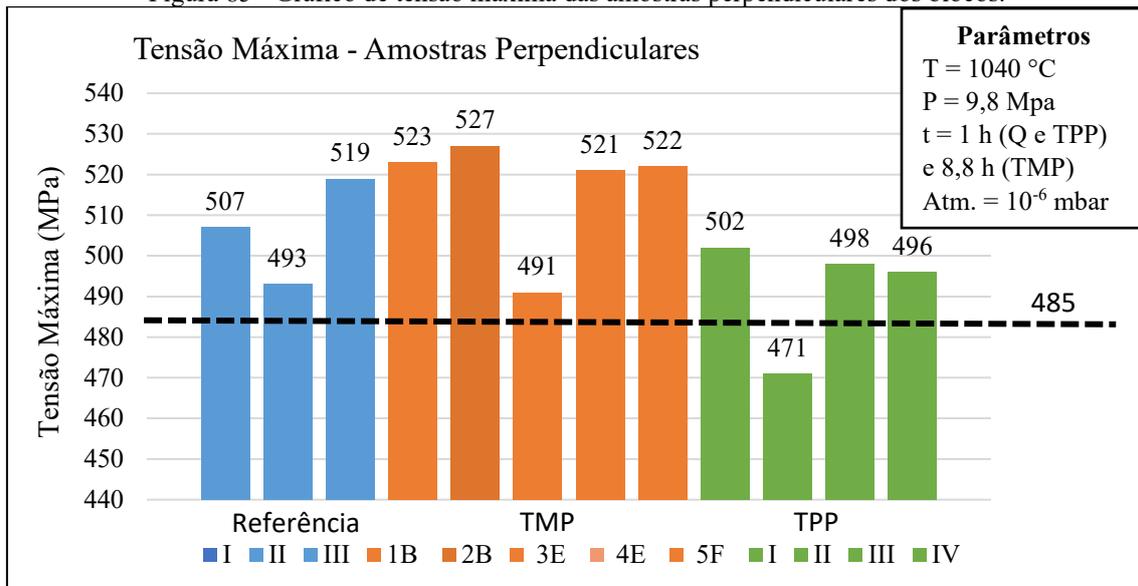
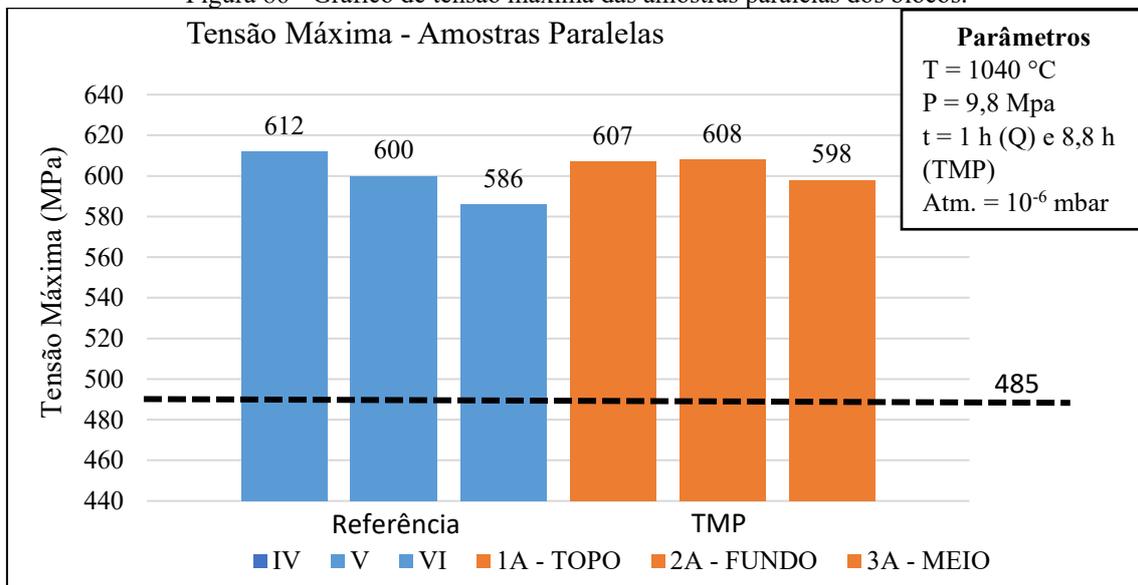


Figura 86 - Gráfico de tensão máxima das amostras paralelas dos blocos.



Fonte: Autora.

Em relação aos resultados de tensão de escoamento, observa-se que todos os corpos de prova, tanto na condição perpendicular, Figura 87, quanto na paralela, Figura 88, atingiram valores superiores a 170 MPa, valor requisitado por norma.

As amostras do bloco TMP apresentaram uma média geral de 233 MPa com um desvio padrão de aproximadamente  $\pm 13$  MPa. Já o bloco referência apresentou uma média de 234 MPa e desvio de  $\pm 6$  MPa, enquanto o bloco TPP apresentou média de 227 MPa com desvio de  $\pm 1$  MPa. Os resultados para as amostras de cada bloco podem ser observados na Figura 87 e Figura 88.

Figura 87 - Gráfico de tensão de escoamento das amostras perpendiculares dos blocos.

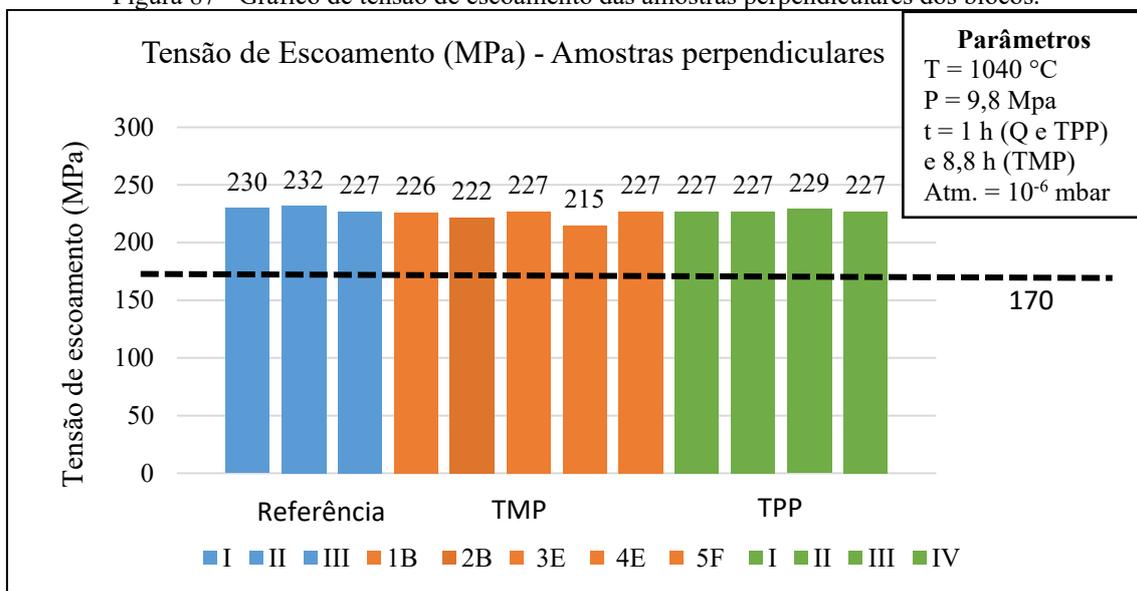
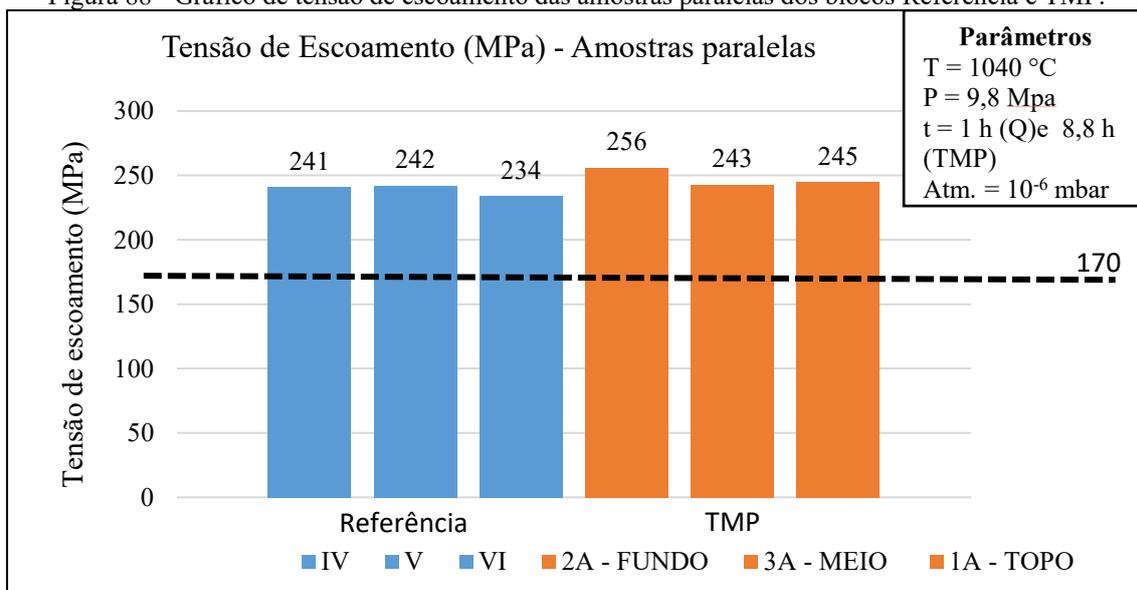


Figura 88 - Gráfico de tensão de escoamento das amostras paralelas dos blocos Referência e TMP.



Fonte: Autora.

De maneira análoga, analisou-se também os valores de alongamento, os quais são mostrados na Figura 89 e Figura 90. A média dos resultados de alongamento obtidos para as amostras perpendiculares foi de 53,6%, para o bloco TMP, 29% para o bloco de referência e 26% para o bloco TPP. Portanto, apenas o bloco TMP atingiu um valor acima aos 40% indicado por norma. Contudo, é visível a dispersão de valores neste bloco, sendo atingido um máximo de 68,3% e um mínimo de 40,2%, resultando em um desvio padrão de aproximadamente  $\pm 10,5\%$ . Este resultado, apesar da variação, representa um avanço para o desenvolvimento do trocador de calor, uma vez que o alongamento já ter sido um ponto crítico para a qualificação da união perante a norma em trabalhos anteriores (HULSE, 2020) e (GATTI, 2020).

Adicionalmente, as amostras paralelas à linha de união apresentaram valores superiores à norma para as duas condições avaliadas, 239 MPa para o bloco referência e 248 MPa para o bloco TMP, como já esperado.

Complementando a análise mecânica, os valores de redução de área das amostras do bloco TMP apresentou uma média de 47 MPa para as amostras perpendiculares e 74 MPa para as paralelas. Enquanto, para o bloco TPP, ficou em 23 MPa para as amostras perpendiculares. De acordo com a literatura, sabe-se que os resultados de alongamento e redução de área percentual são duas medidas convencionais de ductilidade, ou seja, uma propriedade qualitativa, que indica a capacidade do material se deformar plasticamente sem que ocorra a ruptura ou a estrição localizada (DAVIS, 2004).

Com base nos dados medidos, é possível afirmar que o bloco TMP apresentou um comportamento mais dúctil em relação ao TPP.

Figura 89 - Gráfico de alongamento das amostras perpendiculares dos blocos.

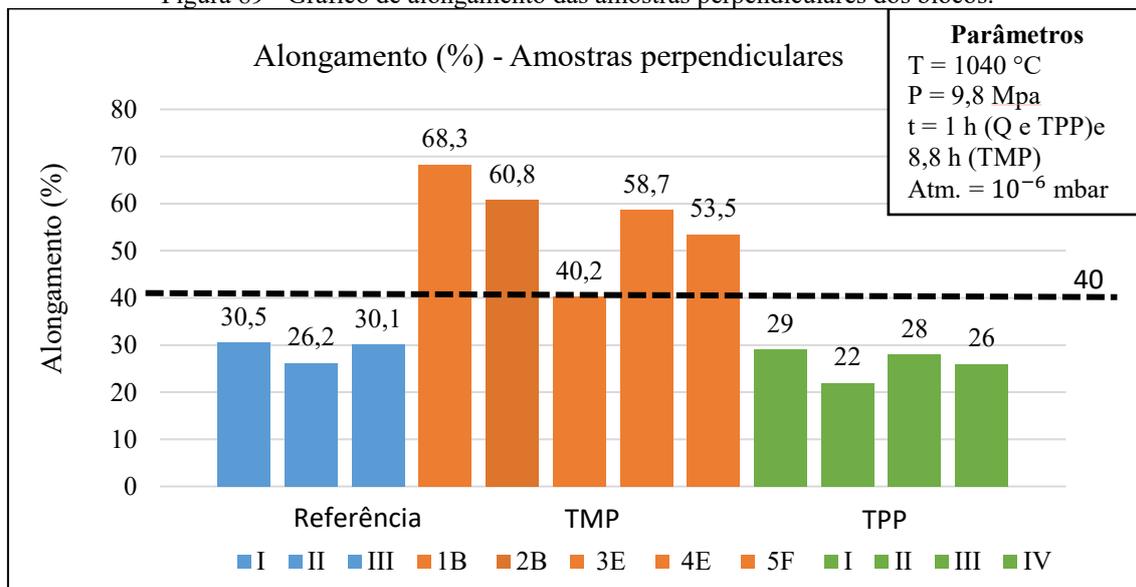
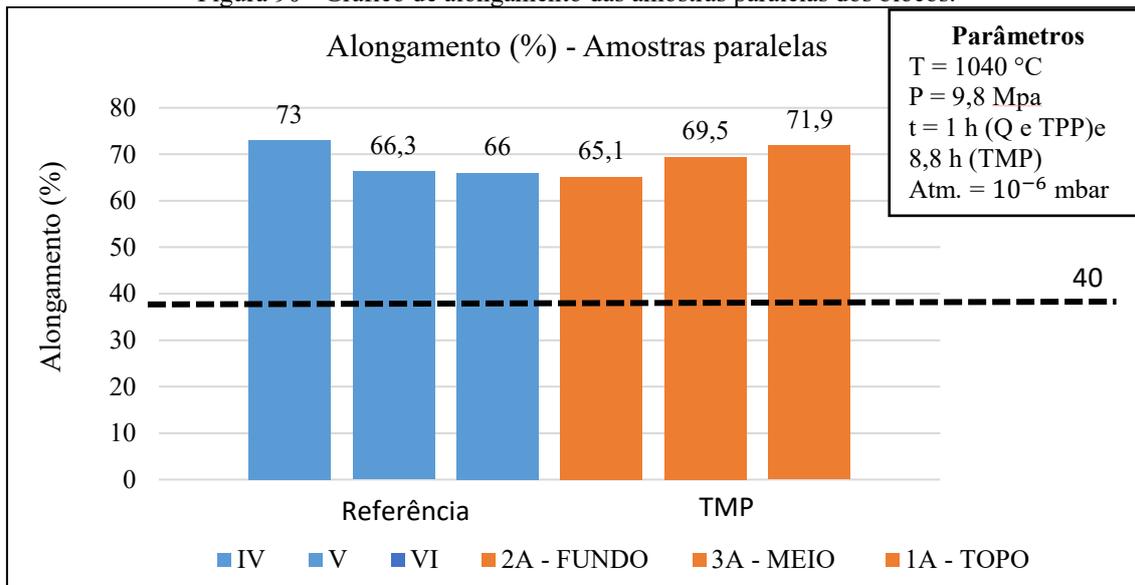


Figura 90 - Gráfico de alongamento das amostras paralelas dos blocos.



Fonte: Autora.

Os resultados de ensaio de tração do bloco TMP foram satisfatórios mesmo com o patamar de tempo de união superior a 8 horas e todas as amostras atingiram valores estabelecidos por norma em relação ao material de base, o aço inoxidável ABNT 316L. Vale ressaltar que o tempo de união a mais auxiliou nos fechamentos dos vazios provenientes da união por difusão das placas. O tempo de união influenciou na efetividade dos mecanismos difusivos e, portanto, com uma interface de união quase imperceptível que, somada ao crescimento de grão e os defeitos isolados, contribuíram para que o material unido atingisse as propriedades mecânicas do material de base, característica esta esperada do processo de união por difusão para a dada aplicação.

Por fim, o bloco TMP qualificou quanto aos parâmetros de união por difusão perante a norma (ASME SECTION VIII DIVISION 1, 2019 e ASME IX QW-185), que exige que os corpos de prova atinjam um valor mínimo de tensão máxima em relação ao material de base imposto pela norma A240M (2018). Além disso, o bloco não apresentou uma deformação excessiva dos canais e do núcleo em geral, o que descarta um possível problema de fluência devido ao maior tempo de exposição das chapas a pressão e temperaturas dentro do forno de união.

## 6 CONCLUSÕES

Como principal conclusão deste estudo, tem-se a confirmação da capacidade de fabricação de núcleos de trocadores de calor compacto de circuito impresso pela técnica de união por difusão das chapas e usinagem fotoquímica dos canais totalmente em território nacional pelo grupo de pesquisa.

Conclui-se que a fabricação de chapas menores (80 x 80 mm<sup>2</sup>) com canais em configuração ziguezague e em S foi viável via ataque fotoquímico, com dimensões de aleta, profundidade e espessura do canal e distância entre os mesmos dentro do solicitado para a empresa e considerado satisfatório para o estudo. Em seguida a fabricação de placas na configuração ziguezague em tamanho médio porte (560 x 330 mm<sup>2</sup>) para fabricação do trocador de calor compacto em dimensões bem próximas as solicitadas, resultando em uma união por difusão efetiva.

O mininúcleo com chapas com canais ziguezague, bloco TPP, demonstrou uma interface de união com alguns defeitos arredondados e alongados e com migração de grão por entra a linha de união. Quanto às propriedades mecânicas, uma amostra não atingiu o mínimo para o material de base, 485 MPa, para a propriedade de tensão máxima. Por sua vez, tensão de escoamento (média de 227 MPa) se mostrou superior para todas as amostras e as propriedades de alongamento (média de 23%) e redução de área, no entanto, demonstraram um comportamento mais frágil e nenhuma amostra atingiu o valor mínimo solicitado por norma.

O bloco TMP foi fabricado com chapas empilhadas em canais com geometria ziguezague dentro do que foi estipulado em projeto e obteve uma qualidade de união acima do esperado. Os parâmetros de união de 1040° C, pressão de 9,51 MPa e tempo de patamar de união de 7,7 horas foram qualificados por meio de valores de tração acima do requisitado em norma para o material de base, o aço inoxidável ABNT 316L (valores médios de tensão máxima em 517 MPa). Adicionalmente, as linhas de união se apresentaram bem definidas, com defeitos pequenos e arredondados, com migração do contorno de grão (grãos comuns as duas chapas) e presença de maclas, características estas que confirmam uma consolidação da união por difusão. Com percentual de defeitos da região analisada de 0,3%, logo 3 vezes menor do que o percentual de defeitos do bloco TPP (1%). Além disso, os tamanhos dos vazios foi de 21 µm para o TPP e 7,7 µm para o TMP.

A resistência à corrosão mostrou que a rugosidade influencia nas características

corrosivas do material. Valores de rugosidade maiores, aumentam a suscetibilidade a corrosão. Sobre os resultados, conclui-se que a chapa do fundo do canal eletropolida apresentou valores superiores de resistência ao pite das demais condições (870 mV para eletropolidas e 460 mV para não eletropolidas) e valores médios de  $S_a$  inferiores para as eletropolidas (0,038  $\mu\text{m}$ ) e superiores para as chapas não eletropolidas (0,113  $\mu\text{m}$ ). Sendo assim, num cenário mais próximo da realidade essa condição traria melhorias reais para o fluxo do fluido em canais num trocador de calor, devido a menor acúmulo de sujeiras, gorduras e outros tipos de incrustações. De forma que a rugosidade reduzida também diminuiria a aderência dessas partículas de incrustações no fundo do canal.

Por fim, o eletropolimento é um processo efetivo para a diminuição da rugosidade geral da superfície, das bordas e fundos dos canais, de modo que possivelmente diminuiriam as incrustações provenientes da troca de fluidos do trocador de calor em serviço e melhoraria a união por difusão das placas.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para estudos futuros, sugere-se alguns temas:

1. Fabricação de trocador de calor a partir do empilhamento de chapas eletropolidas antes mesmo da usinagem fotoquímica dos canais, ou ainda com o uso de uma outra técnica de usinagem desenvolvida no laboratório, o jato d'água abrasivo. Com o objetivo de avaliar a usinagem dos canais e união por difusão dessas placas inicialmente polidas e constatar se também há benefícios na união e propriedades mecânicas.
2. A medição da tensão residual nas placas provenientes da usinagem fotoquímica. Além de estudos de fadiga mecânica e térmica nos dispositivos avaliados.
3. Em relação ao eletropolimento, sugere-se um processo de polimento mecânico para comparação das duas técnicas e análise da influência deles em função da união por difusão.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, D. M. Photochemical Machining: From “manufacturing’s best kept secret” to a \$6 billion per annum, rapid manufacturing process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n. 2, p. 559–572, 2004.

ALLEN, D. M. et al. The causes and prevention of smut on etched AISI 300 stainless steels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 54, n. 1, p. 187–190, 2005.

ALLEN, D. M.; HEGARTY, A. J.; HORNE, D. F. Surface Textures of Annealed Aisi 304 Stainless Steel Etched by Aqueous Ferric Chloride-Hydrochloric Acid Solutions. **Transactions of the Institute of Metal Finishing**, v. 59, n. pt 1, p. 25–29, 1981.

ALLEN, D. M.; HORNE, D. F.; STEVENS, G. W. W. Quantitative Examination of Photofabricated Profiles Part 1: Design of Experiments. **The Journal of Photographic Science**, v. 25, n. 6, p. 254–258, nov. 1977.

AMARAL, M. C. **Suscetibilidade ao Ataque Intergranular de Aço 316l Unido Por Difusão**, TCC, UFSC, 2019.

AMARAL, M. C. **Influência do eletropolimento na união por difusão de chapas em aço inoxidável 316L**. Mestrado, 2022.

ANEESH, A. M. et al. Effects of wavy channel configurations on thermal-hydraulic characteristics of Printed Circuit Heat Exchanger (PCHE). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 118, p. 304–315, 2018.

ASME SECTION VIII DIVISION 1. ASME Boilers and Pressure Vessel Code. **ASME Section VIII Division 1**, p. 717, 2019.

**ASTM G61 – 86**, 2018. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org),>

AWAIS, M.; BHUIYAN, A. A. **Heat and mass transfer for compact heat exchanger (CHXs) design: A state-of-the-art review**. **International Journal of Heat and Mass Transfer** Elsevier Ltd, 1 dez. 2018.

BEAVERS, J. A.; THOMPSON, N. G. **External Corrosion of Oil and Natural Gas Pipelines**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[www.asminternational.org](http://www.asminternational.org)>.

BELLEZZE, T.; GIULIANI, G.; ROVENTI, G. Study of stainless steels corrosion in a strong acid mixture. Part 1: cyclic potentiodynamic polarization curves examined by means of an analytical method. **Corrosion Science**, v. 130, p. 113–125, 1 jan. 2018.

BHANUMURTHY, K. et al. Diffusion Bonding of Nuclear Materials. **BARC NEWSLETTER**, 2013.

BROWN, C. A. **Introduction to Surface Roughness Measurement - Olympus**. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/>. Acesso em Agosto, 2023.

CAI, W. et al. A state-of-the-art review on solid-state metal joining. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 141, n. 3, 1 mar. 2019.

CALDAS, L. D. A. **INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE CORTE VIA JATO D'ÁGUA ABRASIVO NA**. [s.l.] UFSC, 2022.

CHEN, M.; SUN, X.; CHRISTENSEN, R. N. Thermal-hydraulic performance of printed circuit heat exchangers with zigzag flow channels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 130, p. 356–367, 1 mar. 2019.

CHIAVERINI, V. **Aços Ferros Fundidos**. 7. ed.

DAVIS, J. R. **Tensile Testing**. 2. ed. Ohio: ASM International, 2004.

DERBY, B.; WALLACH, E. R. Joining methods in space: A theoretical model for diffusion bonding. **Acta Astronautica**, v. 7, n. 4–5, p. 685–698, 1980.

DOS SANTOS, A. G.; BIEHL, L. V.; ANTONINI, L. M. Efeito do tratamento de passivação química na resistência à corrosão por pite dos aços inoxidáveis ferrítico aisi 430 e austenítico AISI 316L. **Revista Materia**, v. 23, n. 1, 2018.

ESMAILZADEH, S.; ALIOFKHAZRAEI, M.; SARLAK, H. Interpretation of Cyclic Potentiodynamic Polarization Test Results for Study of Corrosion Behavior of Metals: A Review. **Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces**, v. 54, n. 5, p. 976–989, 1 set. 2018.

GABE, D.; RL.L. SHREIR, R.A.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, G. T. **CORROSION: Metal/ Environment . Reactions**, 1994. 3. ed. v. 1

GATTI, G. M. **Trocadores de Calor Compactos Unidos por Difusão: Estudo da Escalabilidade Termo-Hidráulica e Mecânica**, Florianópolis, 2020. Mestrado—Florianópolis: UFSC, 2020.

GIETZELT, T. Diffusion Bonding: Influence of Process Parameters and Material Microstructure. Em: TOTH, V. (Ed.). Rijeka: IntechOpen, 2016. p. Ch. 9.

GIETZELT, T.; TOTH, V.; HUELL, A. Diffusion Bonding: Influence of Process Parameters and Material Microstructure. Em: TOTH, V. (Ed.). **Joining Technologies**. Rijeka: IntechOpen, 2016. p. Ch.9.

HABIBZADEH, S. et al. Electrochemical polishing as a 316L stainless steel surface treatment method: Towards the improvement of biocompatibility. **Corrosion Science**, v. 87, p. 89–100, 2014.

HAÏDOPOULOS, M. et al. Development of an optimized electrochemical process for subsequent coating of 316 stainless steel for stent applications. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 17, n. 7, p. 647–657, jul. 2006.

HAN, W.; FANG, F. Electropolishing of 316L stainless steel using sulfuric acid-free electrolyte. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 141, n. 10, 1 out. 2019.

HESSELGREAVES, J. E.; LAW, R.; REAY, D. A. **Compact Heat Exchangers: Selection, Design and Operation**. 2nd. Butterworth-Heinemann, 2016.

HOLTZ, I. T. **União por difusão de chapas de 316L: Uma descrição morfológica da interface por análise de imagens e sua correlação com a resistência mecânica**. Trabalho de Conclusão de Curso do Departamento de Engenharia de Materiais, UFSC, 2020.

HULSE, P. M. **Fabricação e Análise Estrutural, Morfológica e Termo Hidráulica De Um Trocador De Calor Tipo Circuito Impresso, Mestrado**, Florianópolis, 2020.

INCROPERA, F. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

JAHN, S. et al. Diffusion bonding systems. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, v. 45, n. 9, p. 807–814, 1 set. 2014.

KAKAÇ, S. LIU, H.; PRAMUANJAROENKIJ, A. **HEAT EXCHANGERS Selection, Rating, and Thermal Design Third Edition**. 3rd Edition ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

KAZAKOV, N. F. **Diffusion Bonding of Materials**. Moscou: v. 1 1985.

KIM, D. E. et al. Numerical investigation on thermal-hydraulic performance of new printed circuit heat exchanger model. **Nuclear Engineering and Design**, v. 238, n. 12, p. 3269–3276, 2008.

LE PIERRES, R.; SOUTHALL, D.; OSBORNE, S. Impact of Mechanical Design Issues on Printed Circuit Heat Exchangers. **Proceedings of SCO2 Power Cycle Symposium 2011**, 2011.

LEE, E.-S. **Machining Characteristics of the Electropolishing of Stainless Steel (STS316L)** *Int J Adv Manuf Technol*. 2000.

LEE, S. J.; LAI, J. J. **The effects of electropolishing (EP) process parameters on corrosion resistance of 316L stainless steel**. *Journal of Materials Processing Technology*. *Anais...*22 set. 2003.

LEE, S. M.; KIM, K. Y. Comparative study on performance of a zigzag printed circuit heat exchanger with various channel shapes and configurations. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 49, n. 7, p. 1021–1028, jul. 2013.

LEHRHEUER, W. High-Temperature Solid-State Welding. Em: **Welding, Brazing and Soldering**. [s.l.] ASM International, 1993. p. 297–299.

LI, Q. et al. Compact heat exchangers: A review and future applications for a new generation of high temperature solar receivers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4855–4875, 2011.

LI, X. et al. Materials for Nuclear Diffusion-Bonded Compact Heat Exchangers. **Proceedings of ICAPP 09**, p. 1–9, 2009.

LIU, S. HUI et al. Experimental study of thermal-hydraulic performance of a printed circuit heat exchanger with straight channels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 160, 1 out. 2020.

MA, T. et al. Study on local thermal–hydraulic performance and optimization of zigzag-type printed circuit heat exchanger at high temperature. **Energy Conversion and Management**, v. 104, p. 55–66, 2015.

MAITLAND, S. C.; HALL, P.; ZHOU, Y. N. Diffusion Welding and Diffusion Brazing. Em: O'BRIEN, A. (Ed.). **Welding Handbook Volume 3: Welding Processes Part 2**. 9th. ed. [s.l.] American Welding Society, 2007. p. 624.

MARTINS, B. M. **Avaliação da Resistência Mecânica e da Microestrutura na Interface de União de Multicamadas de Aço Inoxidável 316l Unidas por Difusão**. Florianópolis: UFSC, 2020.

MISAL, N. D.; SARAF, A. R.; SADAIAH, M. Experimental investigation of surface topography in photochemical machining of Inconel 718. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 32, n. 15, p. 1756–1763, 18 nov. 2017.

MORTEAN, M. **Desenvolvimento de Tecnologia de Recheios para Trocadores de Calor Compactos Soldados por Difusão**. 2014.

NGO, T. L. et al. New printed circuit heat exchanger with S-shaped fins for hot water supplier. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 30, n. 8, p. 811–819, 2006.

NGO, T. L. et al. Heat transfer and pressure drop correlations of microchannel heat exchangers with S-shaped and zigzag fins for carbon dioxide cycles. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, n. 2, p. 560–570, nov. 2007.

PANDITRAO KAMBLE, S. RESPONSE SURFACE OPTIMIZATION FOR SS316L MATERIAL IN PHOTOCHEMICAL MACHINING. **International Research Journal of Engineering and Technology**, 2020.

PARK, C.-J.; LEE, Y.-H. **Initiation and Repassivation of Crevice Corrosion of Type 444 Stainless Steel in Chloride Solution METALS AND MATERIALS International**. 2004.

PASQUIER, U. **Optimisation and thermal hydraulic performance of a printed circuit heat exchanger by CFD simulations**.

REVIE, R. W.; UHLIG, H. H. **CORROSION AND CORROSION CONTROL An Introduction to Corrosion Science and Engineering**, 2008. 4. ed. v. 1

ROSINSKI, G. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DO NÚCLEO DE UM TROCADOR DE CALOR UNIDO POR DIFUSÃO**. Mestrado, UFSC, 2018.

ROY, R.; ALLEN, D.; ZAMORA, O. **Cost of photochemical machining**. Journal of Materials Processing Technology. **Anais**. 10 jun. 2004.

RUSTANDI, A. et al. The use of cyclic polarization method for corrosion resistance evaluation of austenitic stainless steel 304L and 316L in aqueous sodium chloride solution. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**, v. 6, n. 6, p. 512–518, 1 nov. 2017.

SABHARWALL, P. et al. Diffusion-welded microchannel heat exchanger for industrial processes. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, v. 5, n. 1, p. 1–7, 2013.

SARAF, A. R.; MUDIGONDA BABASAHEB AMBEDKAR, S. **OPTIMIZATION OF PHOTOCHEMICAL MACHINING** Photochemical Machining analysis of process parameters, 2011.

**OPTIMIZATION OF PHOTOCHEMICAL MACHINING**. **Article in International Journal of Engineering Science and Technology**, 2011.

SARAF, A. R.; SADAIAH, M. Magnetic field-assisted photochemical machining (MFAPCM) of SS316L. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 32, n. 3, p. 327–332, 17 fev. 2017.

SEKULIC, D. P. Compact heat exchangers. **Handbook of Thermal Science and Engineering**, p. 1501–1520, 2018.

SHAH, R. K.; SEKULIC, D. P. 3 Fouling and Corrosion Fundamentals of Heat Exchanger Design. 2003.

SHAH, R. K.; SEKULIC, D. P. **FUNDAMENTALS OF HEAT EXCHANGER DESIGN**. 2003.

SOUTHALL, D.; DEWSON, S. J. Innovative Compact Heat Exchangers. **Proceedings of ICAPP 10**, v. Paper 10300, p. 1–9, 2009.

STEIN, G.; MENZEL, J. Nitrogen alloyed steels-a new generation of materials with extraordinary properties. **Journal of Materials and Product Technology**, v. 10, p. 290–302, 1995.

TEGART, M. W. J. The electrolytic and chemical polishing of metals. **Pergamon Press; 2nd edition**, p. 139, 1959.

TSUZUKI, N.; KATO, Y.; ISHIDUKA, T. High performance printed circuit heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, n. 10, p. 1702–1707, 2007.

TSUZUKI, N.; UTAMURA, M.; NGO, T. L. Nusselt number correlations for a microchannel heat exchanger hot water supplier with S-shaped fins. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 16, p. 3299–3308, 2009.

TU, S.-T.; ZHOU, G.-Y. Compact Heat Exchangers in Clean Energy Systems. Em: **Handbook of Clean Energy Systems**. John Wiley & Sons, Ltd, 2015. p. 1–20.

XIN, F. et al. Study on chemical spray etching of stainless steel for printed circuit heat exchanger channels. **Nuclear Engineering and Design**, v. 341, p. 91–99, 1 jan. 2019.

XU, X. et al. Optimization of fin arrangement and channel configuration in an airfoil fin PCHE for supercritical CO<sub>2</sub> cycle. **Applied Thermal Engineering**, v. 70, n. 1, p. 867–875, 2014.

YANG, G. et al. Electropolishing of surfaces: theory and applications. **Surface Engineering**, v. 33, n. 2, p. 149–166, 1 fev. 2017.

ZHANG, J.; MENG, Y. A study of surface texturing of carbon steel by photochemical machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 10, p. 2133–2140, 2012.

ZIOMEK, M. ASM HANDBOOK. Em: **Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection ASM HANDBOOK**. Ohio: ASM International, 2003. v. Volume 13Ap. 1–2597.