



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Maria Cristina Amaral

**INFLUÊNCIA DO ELETROPOLIMENTO NA UNIÃO POR DIFUSÃO DE CHAPAS  
EM AÇO INOXIDÁVEL 316L**

Florianópolis  
2022

Maria Cristina Amaral

**INFLUÊNCIA DO ELETROPOLIMENTO NA UNIÃO POR DIFUSÃO DE CHAPAS  
EM AÇO INOXIDÁVEL 316L**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação  
em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade  
Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de  
Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais  
Orientador: Prof.<sup>a</sup>. Marcia Barbosa Henriques Mantelli,  
Dra.  
Coorientador: Prof. Rodrigo Perito Cardoso, Dr.

Florianópolis

2022

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

Amaral, Maria Cristina

Influência do eletropolimento na união por difusão de chapas em aço inoxidável 316L / Maria Cristina Amaral ; orientadora, Marcia Barbosa Henriques Mantelli, coorientador, Rodrigo Perito Cardoso, 2022.  
128 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Eletropolimento. 3. União por difusão. 4. Aço inoxidável austenítico. 5. Superfície. I. Mantelli, Marcia Barbosa Henriques . II. Cardoso, Rodrigo Perito . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. IV. Título.

Maria Cristina Amaral

**Influência do Eletropolimento na União por Difusão de Chapas em Aço Inoxidável 316L**

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. Cristiano Binder, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

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

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof.<sup>a</sup> Marcia Barbosa Henriques Mantelli, Dra.  
Orientadora

Florianópolis, 2022.

Aos meus pais, que sempre foram a base de tudo na minha vida e meu porto seguro.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Universidade Federal de Santa Catarina, em específico ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, pela oportunidade concedida e por todo apoio e auxílio dados por meio do Coordenador do programa, Prof. João e ao Chefe de Expediente, Sr. Rogério.

A minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Marcia, ao meu coorientador, Prof Rodrigo e ao Prof Fabio, por todo apoio acadêmico e compartilhamento de conhecimento durante esse período de intenso e extenso aprendizado.

Ao Labmat, pelo apoio a este trabalho com sua infraestrutura em equipamentos que contribuiu em peso para as análises feitas neste trabalho.

A minha amiga e mentora, Priscila, por todo incentivo, ensinamentos e conversas que me fizeram amadurecer pessoal e profissionalmente.

A todos os meus amigos de laboratório, em especial a Bianca, Iara, Lucas, Gabriel, Dijane e Leandro, que me auxiliariam em experimentos e fizeram esse período mais leve e divertido.

Aos meus amigos externos, Sahra, Maria Eduarda, Milena, Letícia, Bárbara, Gabriel, Alexandre e Tayna, que sempre foram essenciais na minha vida, me apoiaram em minhas escolhas e fizeram dos anos em isolamento mais leves, mesmo que a distância.

E por último, mas não menos importante, aos meus pais, Aurinete e Marcelo e a minha irmã, Ana Letícia, por sempre acreditarem no meu potencial e foram meu porto seguro durante toda a minha vida. Sinto-me extremamente privilegiada por ter pessoas tão especiais como vocês presentes no meu dia-a-dia.

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.  
(EINSTEIN, Albert)

## RESUMO

Trocadores de calor compactos, comumente usados na indústria de óleo e gás, são dispositivos térmicos que promovem uma grande área de troca de calor por volume. A manufatura desses dispositivos é feita através do processo de união por difusão, um tipo de soldagem no estado sólido que ocorre com o empilhamento de chapas e promove a união das partes, empregando temperaturas abaixo das de fusão do material, com aplicação de pressão e tempo adequados. Neste contexto a superfície é de extrema importância, uma vez que, para haver uma soldagem efetiva, o contato entre as partes que serão unidas por difusão deve ser o maior possível. Assim, um acabamento de superfície que promova a diminuição na rugosidade é um potencial processo a ser aplicado antes da união por difusão. O eletropolimento se destaca como um processo de acabamento de superfície para reduzir a rugosidade através da dissolução anódica, com uma combinação de densidade de corrente e tempo adequados. Desse modo, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência dos principais parâmetros de eletropolimento na qualidade de superfície de chapas do aço AISI 316L eletropolidas bem como avaliar a influência do eletropolimento no processo de união por difusão de chapas empilhadas de aço AISI 316L. A partir de análises em interferometria óptica e microscopia eletrônica de varredura foi possível observar a evolução do eletropolimento nas diferentes condições de tempo e densidade de corrente. Foram analisadas as regiões de borda de usinagem e a topografia, sendo que a melhor combinação de parâmetros obtida foi o maior tempo (20 minutos) com a maior densidade de corrente ( $0,5 \text{ A/cm}^2$ ), que promoveu a retirada de todo resquício do processo de usinagem, deixando a borda do canal arredondada e sem incrustações e promoveram a redução dos parâmetros de rugosidade, com reduções percentuais de 35% para rugosidade média, 55% para rugosidade média quadrática, 72% na diferença entre o pico mais elevado e o vale mais profundo, 54% em altura máxima de pico e 75% em profundidade máxima de vale. Essa combinação de parâmetros foi usada no eletropolimento de chapas que posteriormente passaram pelo processo de união por difusão. A interface de união, analisada em microscópio óptico apresentou continuidades da microestrutura ao longo da linha de união. As propriedades mecânicas atingiram valores mais altos que as da união por difusão de chapas sem eletropolimento, sendo que a tensão máxima apresentou valores entre 537 a 554 MPa para a condição eletropolida contra 495 a 498 MPa para sem eletropolimento, enquanto o alongamento atingiu valores entre 64 e 86% para o bloco com eletropolimento, mostrando um comportamento mais dúctil que o bloco com chapas sem eletropolimento, que apresentou um alongamento entre 33 e 34%.

**Palavras-chave:** Polimento eletrolítico. Soldagem por difusão. Aço inoxidável austenítico.

## ABSTRACT

Compact heat exchangers, commonly used in the oil and gas industry, are thermal devices that provide a large heat exchange area per volume. The manufacture of these devices is done through the diffusion bonding process, a type of solid-state welding that occurs by the stacking of sheets, which are subjected to high temperatures below the material melting temperature, with the application of adequate pressure and time. In this context, the surface quality is extremely important, since, to have effective welding, the contact between parts to be joined by diffusion must be as large as possible. Thus, a surface finishing that promotes a roughness decrease is a potential process to be applied to improve the quality of the diffusion bonding. Electropolishing stands out as a surface finishing process to reduce roughness through anodic dissolution, with a proper combination of current density and time. Thus, the objective of this work is to evaluate the influence of the main electropolishing parameters on the surface integrity of electropolished AISI 316L stainless steel sheets as well as to evaluate the influence of the electropolishing process on the diffusion bonding process of stacked AISI 316L steel sheets. By optical interferometry and scanning electron microscopy analysis, it was possible to observe the electropolished surface evolution under different conditions of time and current density. Machining edge regions and surface topography were analyzed, and the best combination of parameters was: the longest time (20 minutes) with the highest current density ( $0.5 \text{ A/cm}^2$ ). At these conditions, all remnants of the machining process were removed, leaving the edge of the channel rounded, without incrustations and promoting the reduction of roughness, with reduction of 35% for average roughness, 55% for squared average roughness, 72% for the difference between the highest peak and the deepest valley, 54% for the maximum peak height and 75% for the maximum valley depth. This combination of parameters was used in the electropolishing of plates that underwent the diffusion bonding process. The bonding interface, analyzed under an optical microscope, showed microstructure continuity along the bonding line. The mechanical properties reached values higher than those obtained for the diffusion bonding of sheets without electropolishing, the tensile strength presented values between 537 and 554 MPa for the electropolished condition against 495 a 498 MPa given for the condition without electropolishing, the elongation reached values between 64 and 86% for the sample with electropolishing (a more ductile behavior than the sample with plates without electropolishing) and an elongation between 33 and 34%.

Keywords: Electrolytic polishing. Diffusion welding. Austenitic stainless steel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Contato mecânico entre duas superfícies metálicas. ....	19
Figura 2: Mecanismo de união por difusão, (a) contato inicial; (b) primeiro estágio; (c) segundo estágio; (d) terceiro estágio. ....	20
Figura 3: Stent cardiovascular. À esquerda sem eletropolimento e à direita com eletropolimento. ....	24
Figura 4: Representação do processo de eletropolimento e da célula eletrolítica. ....	25
Figura 5: Gráfico densidade de corrente <i>versus</i> potencial. ....	26
Figura 6: Representação da superfície do ânodo e do filme de eletropolimento. ....	26
Figura 7: Fluxograma detalhado com Estudos A e B. ....	29
Figura 8: Jato d'água presente no Labtucal. ....	31
Figura 9: Geometria para amostras do estudo A, à esquerda e B, à direita. ....	32
Figura 10: Bancada de Eletropolimento. ....	35
Figura 11: Pontos de análise em MEV. ....	36
Figura 12: Metodologia de tratamento de dados de superfície. ....	37
Figura 13: Redução Percentual de Massa para diferentes parâmetros de Eletropolimento. ....	41
Figura 14: Imagens da amostra em superfície 2B sem eletropolimento. ....	42
Figura 15: Gráfico EDS para Aço 316L. ....	43
Figura 16: Gráfico EDS para abrasivo do jato d'água. ....	43
Figura 17: Imagens da face superior da região de curva do canal para as amostras 2B com eletropolimento. ....	44
Figura 18: Imagens da face inferior da região de curva do canal para as amostras 2B com eletropolimento. ....	45
Figura 19: Imagens da face superior da região do canal aumentada das amostras 2B com eletropolimento. ....	46
Figura 20: Imagens da face inferior da região do canal aumentada das amostras 2B com eletropolimento. ....	47
Figura 21: Imagens em BSE da face superior da região do canal aumentada das amostras 2B com eletropolimento. ....	49
Figura 22: Imagens em BSE da face inferior da região do canal aumentada das amostras 2B com eletropolimento. ....	50
Figura 23: Imagens da amostra em superfície #400 sem eletropolimento. ....	51

Figura 24: Imagens da face superior da região de curva do canal para as amostras #400 com eletropolimento.....	52
Figura 25: Imagens da face inferior da região de curva do canal para as amostras #400 com eletropolimento.....	53
Figura 26: Imagens da face superior da região do canal aumentada das amostras #400 com eletropolimento.....	54
Figura 27: Imagens da face inferior da região do canal aumentada das amostras #400 com eletropolimento.....	55
Figura 28: Imagens em BSE da face superior da região do canal aumentada das amostras #400 com eletropolimento. ....	56
Figura 29: Imagens em BSE da face inferior da região do canal aumentada das amostras #400 com eletropolimento. ....	57
Figura 30: Projeções axonométricas para amostras em eletropolimento. ....	58
Figura 31: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função da densidade de corrente para o tempo de 5 minutos.....	59
Figura 32: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função da densidade de corrente para o tempo de 10 minutos.....	60
Figura 33: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função da densidade de corrente para o tempo de 20 minutos.....	62
Figura 34: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função do tempo para a densidade de $0,15 \text{ A/cm}^2$ .....	63
Figura 35: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função do tempo para a densidade de $0,25 \text{ A/cm}^2$ .....	65
Figura 36: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função do tempo para a densidade de $0,5 \text{ A/cm}^2$ .....	66
Figura 37: Representação esquemática de diagrama de caixas. ....	69
Figura 38: Sa em função da densidade de corrente para os diferentes tempos .....	69
Figura 39: Sq em função da densidade de corrente para os diferentes tempos .....	72
Figura 40: Sz em função da densidade de corrente para os diferentes tempos. ....	76
Figura 41: Sp em função da densidade de corrente para os diferentes tempos. ....	79
Figura 42: Sv em função da densidade de corrente para os diferentes tempos. ....	82
Figura 43: Sa em função do tempo para as diferentes densidades de corrente. ....	85
Figura 44: Sq em função do tempo para as diferentes densidades de corrente. ....	87

Figura 45: Sz em função do tempo para as diferentes densidades de corrente .....	90
Figura 46: Sp em função do tempo para as diferentes densidades de corrente. ....	93
Figura 47: Sv em função do tempo para as diferentes densidades de corrente. ....	96
Figura 48: Sa em função do produto de tempo e densidade de corrente. ....	99
Figura 49: Sq em função do produto de tempo e densidade de corrente.....	100
Figura 50: Sz em função do produto de tempo e densidade de corrente .....	102
Figura 51: Sp em função do produto de tempo e densidade de corrente.....	103
Figura 52: Sv em função do produto de tempo e densidade de corrente.....	105
Figura 53: Projeções axonométricas das chapas a serem unidas.....	108
Figura 54: Sa para as chapas a serem unidas.....	109
Figura 55: Sq para as chapas a serem unidas.....	110
Figura 56: Sz para chapas a serem unidas .....	111
Figura 57: Sp para chapas a serem unidas .....	112
Figura 58: Sv para chapas a serem unidas .....	113
Figura 59: Microestruturas típicas de cada condição após união por difusão. ....	115
Figura 60: Tensão Máxima dos blocos nas três diferentes condições.....	116
Figura 61: Tensão de Escoamento dos blocos nas três diferentes condições.....	117
Figura 62: Alongamento dos blocos nas três diferentes condições.....	117
Figura 63: Redução de área dos blocos nas três diferentes condições .....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição do aço inoxidável 316L .....	30
Tabela 2: Revisão bibliográfica dos parâmetros de eletropolimento. ....	33
Tabela 3: Condições e parâmetros utilizados para o Estudo A. ....	35
Tabela 4: Filtros utilizados para cada condição do Estudo A.....	37
Tabela 5: Parâmetros de rugosidade e suas definições.....	38
Tabela 6: Principais valores retirados dos gráficos de $S_a$ em função da densidade de corrente. .....	71
Tabela 7: Principais valores retirados dos gráficos de $S_q$ em função da densidade de corrente .....	74
Tabela 8: Principais valores retirados dos gráficos de $S_z$ em função da densidade de corrente. .....	77
Tabela 9: Principais valores retirados dos gráficos de $S_p$ em função da densidade de corrente. .....	80
Tabela 10: Principais valores retirados dos gráficos de $S_v$ em função da densidade de corrente. .....	83
Tabela 11: Principais valores retirados dos gráficos de $S_a$ em função do tempo.....	86
Tabela 12: Principais valores retirados dos gráficos de $S_q$ em função do tempo. ....	89
Tabela 13: Principais valores retirados dos gráficos de $S_z$ em função do tempo.....	92
Tabela 14: Principais valores retirados dos gráficos de $S_p$ em função do tempo. ....	95
Tabela 15: Principais valores retirados dos gráficos de $S_v$ em função do tempo. ....	97
Tabela 16: Valores de $S_a$ para o produto de tempo e densidade de corrente. ....	99
Tabela 17: Valores de $S_q$ para o produto de tempo e densidade de corrente. ....	101
Tabela 18: Valores de $S_z$ para o produto de tempo e densidade de corrente. ....	103
Tabela 19: Valores de $S_p$ para o produto de tempo e densidade de corrente. ....	104
Tabela 20: Valores de $S_v$ para o produto de tempo e densidade de corrente .....	106
Tabela 21: Valores de $S_a$ para condições a serem unidas por difusão. ....	110
Tabela 22: Valores de $S_q$ para condições a serem unidas por difusão. ....	111
Tabela 23: Valores de $S_z$ para condições a serem unidas por difusão. ....	112
Tabela 24: Valores de $S_p$ para condições a serem unidas por difusão. ....	113
Tabela 25: Valores de $S_v$ para condições a serem unidas por difusão. ....	114

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI *American Iron and Steel Institute*

ASTM *American Society for Testing and Materials*

BSE Elétrons Retroespalhados

CHE Compact Heat Exchanger

EDS Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X

EPC Eletropolimento Comercial

EPL Eletropolimento em Laboratório

ISO International Organization for Standardization

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

MO Microscopia Óptica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>18</b>
2.1	União por Difusão.....	18
2.2	Eletropolimento .....	23
<b>3</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>28</b>
3.1	Matéria Prima – Aço AISI 316L .....	30
3.2	Usinagem via Jato d’Água Abrasivo .....	31
3.3	Limpeza .....	32
3.4	Estudo A: Influência dos Parâmetros de Eletropolimento.....	32
<b>3.4.1</b>	<b>Eletropolimento.....</b>	<b>33</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Análises .....</b>	<b>36</b>
3.4.2.1	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</i>	36
3.4.2.2	<i>Interferometria Óptica.....</i>	36
3.5	Estudo B: União por Difusão de Chapas Eletropolidas.....	38
<b>3.5.1</b>	<b>Eletropolimento.....</b>	<b>39</b>
3.5.1.1	<i>Eletropolimento Comercial .....</i>	39
3.5.1.2	<i>Eletropolimento em Laboratório .....</i>	39
<b>3.5.2</b>	<b>União por Difusão .....</b>	<b>40</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Análise Microestrutural .....</b>	<b>40</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Ensaio de Tração.....</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões .....</b>	<b>41</b>
4.1	Estudo A: Influência dos Parâmetros de Eletropolimento.....	41
<b>4.1.1</b>	<b>Análises via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</b>	<b>41</b>

<b>4.1.2</b>	<b>Análise via Interferometria Óptica .....</b>	<b>58</b>
<i>4.1.2.1</i>	<i>Projeções Axonométricas .....</i>	<i>58</i>
<i>4.1.2.2</i>	<i>Parâmetros de Rugosidade.....</i>	<i>68</i>
<i>4.1.2.2.1</i>	<i>Influência da Densidade de Corrente.....</i>	<i>69</i>
<i>4.1.2.2.2</i>	<i>Influência do Tempo.....</i>	<i>84</i>
<i>4.1.2.2.3</i>	<i>Influência do Produto Densidade de Corrente x Tempo .....</i>	<i>98</i>
<b>4.2</b>	<b>Estudo B: União por Difusão de Chapas Eletropolidas.....</b>	<b>107</b>
<b>5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>120</b>
<b>6</b>	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>122</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são dispositivos que permitem a transferência de calor entre dois ou mais fluidos em diferentes temperaturas. Os trocadores de calor podem ser classificados como compactos (do inglês CHEs) quando apresentam alta relação de área de superfície de transferência de calor por volume, sendo estes ideais para aplicações onde tamanho e peso precisam ser otimizados, como plataformas offshore de petróleo e gás (HESSELGREAVES; LAW; REAY, 2017).

Com o intuito de aumentar a vida útil de CHEs e garantir o desempenho em ambientes corrosivos onde estão inseridas, ou seja, as plataformas offshore, a indústria considera o aço inoxidável austenítico 316L como a escolha de material com custo benefício ideal, devido à combinação de alta resistência à corrosão, mecânica e à fluência mesmo em altas temperaturas, bem como excelente conformabilidade e soldabilidade (LIPPOLD; KOTECKI, 2005). Apesar do aço 316L possuir menor condutividade térmica, quando comparado com aços carbono ou liga, a geometria interna e os diâmetros de canal reduzidos dos CHEs compensam essa diferença.

É importante salientar que a performance global do trocador de calor está intrinsecamente ligada às propriedades do material utilizado na sua fabricação bem como à estrutura do trocador e o processo de manufatura do dispositivo. Normalmente, a manufatura dos trocadores de calor se dá por meio do empilhamento de chapas que possuem seus canais já usinados, para posteriormente serem submetidas ao processo de união por difusão, que consiste em um tipo de soldagem no estado sólido, em temperaturas abaixo do ponto de fusão e com uma combinação adequada de pressão e tempo.

Para uma união por difusão efetiva, é necessário que as superfícies a serem unidas sejam livres de impurezas e possuam uma baixa rugosidade, sem a presença de marcas profundas. (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016). Entretanto, os processos de usinagem e seus parâmetros influenciam diretamente na topográfica final das chapas a serem unidas, fazendo com que um processo de acabamento de superfície seja necessário para a adequação da topografia para o processo de união por difusão. (DAVIM, 2010; GARMONG; PATON; ARGON, 1975).

Assim, o eletropolimento se destaca com um grande potencial para melhorar a qualidade das superfícies para a posterior união por difusão. Esse processo é responsável por remover preferencialmente as irregularidades presentes na superfície que foram geradas por

processos de manufatura prévios e assim reduzir a rugosidade. Além disso, o processo de eletropolimento traz outras vantagens como aumento da resistência à corrosão e redução de tensões residuais, o que pode contribuir para a qualidade final do trocador de calor (HAN; FANG, 2019; YANG et al., 2016; ZIOMEK-MOROZ, 2003).

Desse modo, o presente trabalho tem o intuito de estudar a influência das principais variáveis do eletropolimento na superfície de chapas usinadas via jato d'água abrasivo, bem como avaliar o efeito na união por difusão de placas eletropolidas de aço inoxidável 316L unidas por difusão, buscando melhorar e otimizar o processo de manufatura de núcleos de trocadores de calor compactos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar a influência dos principais parâmetros de eletropolimento – tempo, densidade de corrente e topografia da superfície inicial – na integridade de superfície de chapas do aço AISI 316L eletropolidas, bem como avaliar a influência do processo de eletropolimento na união por difusão de chapas empilhadas de aço AISI 316L

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos deste trabalho estão:

- Avaliar a morfologia dos canais antes e após o eletropolimento (evolução da rebarba gerada pela usinagem via jato d'água abrasivo e a presença de incrustações deixadas pelo abrasivo).
- Estudar a evolução morfológica da superfície antes e depois do eletropolimento, nas diferentes condições estudadas.
- Avaliar a evolução da rugosidade da superfície gerada pelo eletropolimento em suas diferentes condições, por meio dos parâmetros  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$ ,  $S_p$  e  $S_v$ .
- Determinar a condição mais adequada de eletropolimento a partir das estudadas, para a fabricação de um bloco unido por difusão de chapas eletropolidas.

- Comparar a união por difusão de chapas eletropolidas na condição escolhida com a obtida com chapas eletropolida comercial e sem eletropolimento.
- Comparar as propriedades mecânicas (Tensão Máxima, Tensão de Escoamento, Alongamento e Redução de Área) das três condições de união por difusão: eletropolida em laboratório, eletropolida comercialmente e sem eletropolimento.
- Comparar a rugosidade da superfície das três condições de chapas que foram unidas por difusão e relacionar com os resultados mecânicos e de microestrutura obtidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, são apresentadas informações relevantes encontradas na literatura que embasam o presente trabalho:

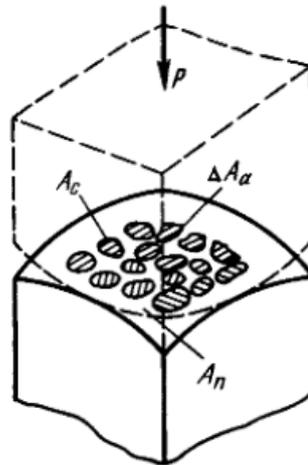
### 2.1 UNIÃO POR DIFUSÃO

O processo de união por difusão, também chamado de soldagem por difusão é uma técnica de solda em estado sólido, sem a presença de uma zona fundida na interface de união como ocorre na soldagem tradicional (GOULD, 2011; MAHONEY; BAMPTON, 2011). Nesse procedimento ocorre formação de um componente monolítico gerado por meio da difusão atômica entre as superfícies a serem unidas, sem sofrerem deformação macroscópica significativa (DERBY; WALLACH, 1980; GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016; LEE, 2012). Esse processo permite a soldagem completa de uma seção transversal, com ou sem geometrias internas, em um único processamento. A região da união não apresenta uma zona termicamente afetada, embora o componente inteiro seja submetido a tratamento térmico, ou seja o calor é aplicado em toda a peça e não apenas na região a ser unida (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016).

A união por difusão pode ser realizada com materiais similares e dissimilares, por meio da difusão de átomos na interface sem a formação de uma fase líquida, numa atmosfera de gás inerte ou vácuo, com temperatura em torno de 0,8 do ponto de fusão do metal puro ou do início do intervalo de fusão de uma liga. Os três principais parâmetros do processo são: tempo de união, temperatura e pressão aplicada. Quando otimizados adequadamente, podem proporcionar ao dispositivo soldado propriedades mecânicas comparáveis ao material de base (DUNKERTON, 2011; GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016; KAZAKOV, 1985; LEE, 2012; MORTEAN et al., 2019).

Há duas condições necessárias para garantir a qualidade da união por difusão: o contato mecânico entre as superfícies a serem unidas e o rompimento dos filmes de contaminantes presentes na superfície, para permitir a ligação atômica na interface de união (O'BRIEN; GUZMAN, 2007). A Figura 1 ilustra o contato entre duas superfícies metálicas.

Figura 1: Contato mecânico entre duas superfícies metálicas.



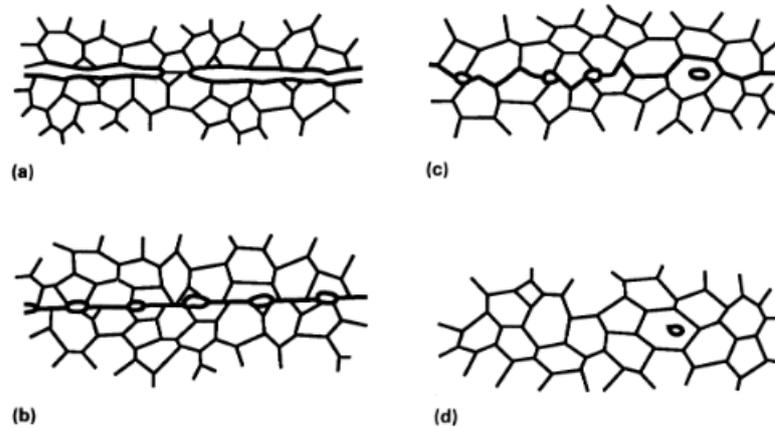
Fonte: (KAZAKOV, 1985)

O entendimento do mecanismo do processo termomecânico de união por difusão ainda não é consolidado na literatura, sendo seus estágios descritos de forma dissimilar, de acordo com os pesquisadores. Alguns estudos definem para uma união por difusão convencional, sem material de adição na interface, um modelo de mecanismo de três fases. Todo o mecanismo é governado por difusão de superfície, difusão de volume, difusão de contorno de grão e fluência, sendo cada um dos estágios regidos principalmente por um destes mecanismos (LEE, 2012; MAHONEY; BAMPTON, 2011; O'BRIEN; GUZMAN, 2007).

Na Figura 2(a) pode ser visto o contato inicial entre as asperidades das superfícies a serem unidas. Já o primeiro estágio, ilustrado na Figura 2(b), é definido pela deformação localizada destas asperidades em contato. Esse estágio é diretamente influenciado pela rugosidade, tensão de escoamento do material, temperatura e pressão aplicada. Neste estágio, uma maior área de contato interfacial de união é promovida. Ao fim desta etapa, a interface se torna essencialmente um contorno de grão com vazios dispersos ao longo da linha de união (MAHONEY; BAMPTON, 2011; O'BRIEN; GUZMAN, 2007).

Já no segundo estágio, evidenciado pela Figura 2(c), a difusão se torna mais influente que a deformação e um mecanismo de fluência causa uma diminuição no tamanho dos vazios ou sua eliminação. Adicionalmente, ocorre a migração dos contornos de grão da interface para uma posição de equilíbrio, de menor energia, onde a interface de união quase não é mais aparente (MAHONEY; BAMPTON, 2011; O'BRIEN; GUZMAN, 2007).

Figura 2: Mecanismo de união por difusão, (a) contato inicial; (b) primeiro estágio; (c) segundo estágio; (d) terceiro estágio.



Fonte:(MAHONEY; BAMPTON, 2011)

No terceiro e último estágio (Figura 2 (d)) muitos vazios remanescentes são englobados pelos grãos, deixando de ter contato com os contornos de grão. Os vazios então já são muito pequenos e não afetam a resistência da interface. Há ainda o encolhimento e eliminação de vazios por processos difusivos volumétricos. Vale ressaltar que os estágios se sobrepõem e que os mecanismos que dominam um estágio podem estar presentes nas demais etapas (MAHONEY; BAMPTON, 2011; O'BRIEN; GUZMAN, 2007).

A temperatura é a variável mais influente do processo de união por difusão e, juntamente com a pressão determina a extensão da área de contato do primeiro estágio. Além disso a temperatura determina a taxa de difusão que é imprescindível para os dois estágios posteriores. Um aumento de 20 K pode dobrar o coeficiente de difusão do material e assim aumentar drasticamente a taxa de fluência para uma dada pressão (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016; MORTEAN et al., 2019; O'BRIEN; GUZMAN, 2007).

Por isso recomenda-se normalmente a faixa de 80% do ponto de fusão de metais puros ou do início do intervalo de fusão para ligas. Mas há exceções como, por exemplo, materiais que possuem camada passiva na superfície; nesse caso recomenda-se temperaturas acima da faixa citada, adequando-se tempo e pressão para o material não sofrer deformação excessiva (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016)

Segundo O'Brien e Guzman (2007) a pressão é necessária apenas durante o primeiro estágio da união por difusão, sendo responsável por aproximar as superfícies em contato, por meio da deformação das ranhuras presentes nessas, permitindo um contato a nível atômico em

condições adequadas. A remoção da pressão após este estágio não afeta significativamente o processo, entretanto, a retirada prematura, antes da conclusão do primeiro estágio, é prejudicial à qualidade final da união. Gietzelt, Toth e Huell (2016) afirmam que é necessário um mínimo de pressão para promover a deformação na área de contato local da peça – a depender da temperatura –, entretanto tal valor não é especificado (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016; O'BRIEN; GUZMAN, 2007).

O tempo necessário para soldagem por difusão depende da pressão e temperatura utilizadas. Quanto maior a temperatura e a pressão, menor o tempo necessário para a união por difusão. Tal redução no tempo também se aplica quando se reduz a rugosidade do material. A principal função do tempo é conduzir o processo de difusão entre as superfícies a serem soldadas. Após o processo inicial de aproximação, faz-se necessário tempo para a diminuição ou eliminação dos poros deixados na região da área de contato local. Entretanto, à medida que a fluência tem seu início durante a união por difusão, um tempo longo dificulta o controle da deformação na peça (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016; ISLAM; RIDLEY, 1998; O'BRIEN; GUZMAN, 2007).

Além dos três parâmetros citados acima Gietzel et al (2016) também complementa outros fatores que influenciam no processo de união por difusão, como a rugosidade da superfície, existência de uma camada passivada, geometria da peça e fatores mais intrínsecos do material, como comportamento polimórfico, defeitos cristalinos, precipitados e entre outros (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016).

Muitos estudos mostram que quanto menor a rugosidade, melhor a qualidade da união. Kazakov (1985) afirma que quanto menor a rugosidade, maior a área de contato entre as superfícies. Zhang *et al.* (2017) e Wang *et al.* (1996) concluíram em seus estudos que uma menor rugosidade causa uma maior resistência ao cisalhamento. Zhang *et al.* (2017) ainda complementam que menores rugosidades provocam uma maior taxa de migração do contorno de grão da interface unida (KAZAKOV, 1985; WANG et al., 1996; ZHANG; LI; LI, 2017).

Guoge e Chandel (2005) trazem resultados do efeito da rugosidade nas propriedades mecânicas, como resistência à tração e estrição do corpo de prova de tração. Uma redução de dez vezes na rugosidade resultou em uma estrição cinco vezes maior, aumentando a ductilidade do material enquanto que a resistência à tração aumentou em pelos menos 100 MPa (GUOGE; CHANDEL, 2005; WANG; OHASHI; UENO, 2006).

Gietzelt, Toth e Huell (2018) afirmam que uma outra questão importante para a soldagem por difusão é a estabilidade térmica das camadas de passivação, caso presentes. No

caso de aços de construção, as camadas na superfície não são um problema e a união por difusão é fácil de ser obtida, o que se deve também a transformação de fase para esses materiais. Outro tipo de material que não possui problema são as ligas de titânio, cuja camada óxida é altamente solúvel na matriz (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2018).

Os óxidos das camadas de passivação dos aços inoxidáveis não são solúveis no material da matriz. Dependendo da natureza das camadas de passivação de aços inoxidáveis, que variam de acordo com a composição das ligas, deve-se variar a temperatura do processo de união por difusão, buscando-se superar a inibição da difusão através dos planos de união. Outra forma de promover a quebra do filme passivo é deixar a peça com uma certa rugosidade. Uma certa rugosidade é útil para romper o filme de óxido da superfície, quando aplicada a carga, e produzir uma interface de união indistinguível. No entanto, uma superfície muito rugosa deixaria grandes vazios que podem ser difíceis de eliminar e, assim, degradar a qualidade da união (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2018; GUOGE; CHANDEL, 2005). Desta forma, pode-se afirmar que a preparação da superfície é fundamental para o sucesso da união por difusão.

Dentre as principais vantagens do processo de união por difusão, pode-se citar a possibilidade de se unir áreas grandes, de formas complexas, cujas interfaces apresentam grandes descontinuidades intencionais (por exemplo, seções em favo de mel). A depender do material a ser unido, as temperaturas necessárias são moderadas e a taxa de aquecimento não é crítica, como na soldagem convencional (DERBY; WALLACH, 1980).

Por outro lado, a soldagem por difusão apresenta algumas limitações, como a necessidade de limpeza minuciosa das superfícies a serem unidas, assim como o controle de rugosidade da superfície e necessidade de uma atmosfera controlada para a união, normalmente alto vácuo. Além disso, o tempo de processo é elevado e o custo do processo é muito caro, uma vez que demanda o uso de um equipamento de grande porte (DUNKERTON, 2011; KAZAKOV, 1985; MAHONEY; BAMPTON, 2011).

Considerando todos esses aspectos, o processo de união por difusão é recomendado para união de superfícies com geometrias complexas, sendo, por exemplo, atrativo para aplicações aeroespaciais, onde as propriedades mecânicas e uma ligação metalúrgica estável são importantes (DERBY; WALLACH, 1980; LEE, 2012).

## 2.2 ELETROPOLIMENTO

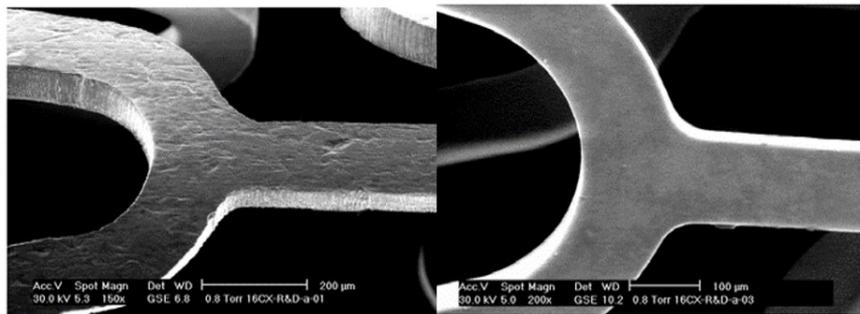
O eletropolimento, ou polimento eletrolítico, é um processo de dissolução anódica, que promove uma superfície mais suave e brilhante por meio da remoção preferencial das irregularidades presentes na superfície da amostra (HAN; FANG, 2019; HENSEL, 1999; POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002; YANG et al., 2016; ZIOMEK-MOROZ, 2003).

Diversas características destacam o eletropolimento como 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. Desta forma, este processo é amplamente utilizado na indústria (HABIBZADEH et al., 2014; HAN; FANG, 2019; HENSEL, 1999; PETERSON; HOPKINS, 1964; POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002; ZIOMEK-MOROZ, 2003).

O eletropolimento é muito utilizado na preparação metalográfica de materiais que são difíceis de polir pelo método tradicional, como o aço inoxidável, alumínio, cobre, magnésio e entre outros. Além disso, o polimento eletrolítico possui um potencial para aplicações em diversas áreas, principalmente na área médica por tornar a superfície biocompatível, hemocompatível e resistente à proliferação bacteriana. A Figura 3 mostra o exemplo de um *stent* antes e após o processo de eletropolimento. Outra utilização importante é na indústria de óleo e gás, em aplicações de dispositivos como vasos reatores, trocadores de calor, misturadores e agitadores, pois diminuem o tempo e pressão necessários para a limpeza desses dispositivos (AWAD et al., 2012; HABIBZADEH et al., 2014; MOHAN et al., 2001; POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002; VANDER VOORT, 2004).

Do ponto de vista químico, o processo de polimento eletrolítico é uma forma de eletrólise e envolve a passagem de corrente elétrica através de um eletrólito. O sistema pode ser composto por três ou dois eletrodos (YANG et al., 2016; ZIOMEK-MOROZ, 2003), conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 3: Stent cardiovascular. À esquerda sem eletropolimento e à direita com eletropolimento.



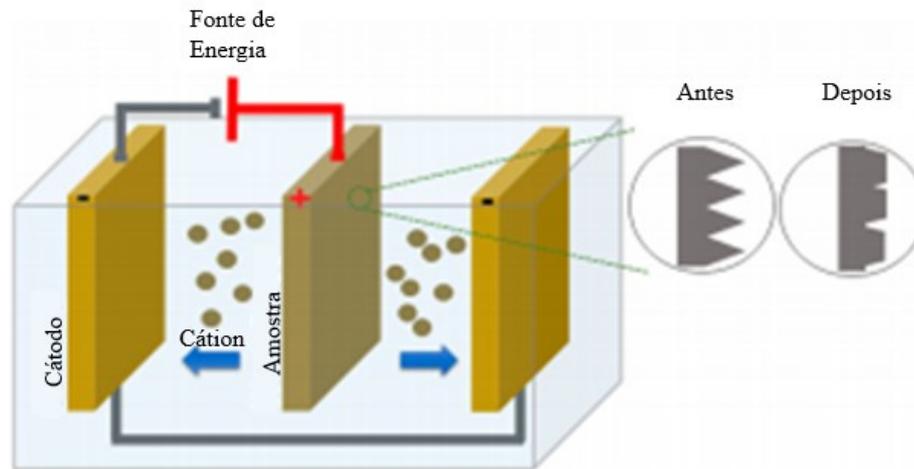
Fonte: (SOJITRA et al., 2010)

A peça a ser eletropolida, que faz o papel de ânodo da célula eletrolítica, é conectado à polaridade positiva de uma fonte de alimentação de corrente contínua. O cátodo deve ser inerte à solução selecionada como eletrólito e pode estar suspenso dentro da solução, conectado a polaridade negativa da fonte. O aço inoxidável é um material adequado para ser usado como cátodo, para a maioria das aplicações, sendo que o próprio recipiente onde está inserido o eletrólito pode fazer o papel do cátodo. Geralmente o eletrólito é um meio ácido concentrado com alta viscosidade, cuja composição varia conforme o material a ser eletropolido. Quando devidamente conectado ao sistema da célula eletrolítica, a corrente passa do ânodo para o cátodo, dissolvendo o metal na superfície da peça a uma taxa controlada, onde ocorre uma reação de redução que normalmente produz hidrogênio (HAN; FANG, 2019; LANDOLT, 1987; VANDER VOORT, 2004; ZIOMEK-MOROZ, 2003).

A quantidade de material removido é dependente da solução usada como eletrólito, da densidade de corrente, do tempo de eletropolimento, bem como o próprio material que está sendo eletropolido. Outras variáveis que podem influenciar na qualidade o processo são: temperatura da solução, rugosidade inicial da peça, método de fabricação da peça, o material utilizado no cátodo, saturação da solução e entre outros. Hensel (1999) mostra que a densidade de corrente ( $j$ ) e o tempo ( $t$ ) são duas variáveis que podem ser controladas para atingir superfícies com acabamentos similares, ou seja, usar uma  $j = 1 \text{ A/cm}^2$  por  $t = 10 \text{ min}$  seria o mesmo que usar uma  $j = 2 \text{ A/cm}^2$  por  $t = 5 \text{ min}$  (HENSEL, 1999; POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002; ROTTY et al., 2017; VANDER VOORT, 2004).

Vários estudos mostram uma redução significativa da rugosidade da superfície após o eletropolimento, geralmente na ordem de 40% ou 50% em relação à condição inicial, podendo chegar em uma ordem de até 70% de redução (COELHO et al., 2020; HAÏDOPOULOS et al., 2006; LEE; LAI, 2003).

Figura 4: Representação do processo de eletropolimento e da célula eletrolítica.



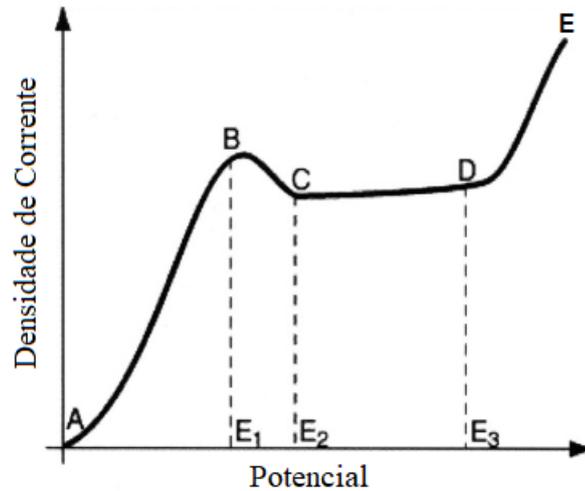
Fonte: Adaptado de (YANG et al., 2016)

Na Figura 5, que relaciona a densidade de corrente com o potencial elétrico aplicado (tensão), é apresentada uma curva ideal do processo de dissolução anódica. Quatro regiões podem ser distinguidas: AB, BC, CD e DE. Na primeira zona, A-B, ou região ativa, ocorre a dissolução direta sobre a peça, sem criação do filme passivo, logo é possível observar certa corrosão (HAN; FANG, 2019; POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002; ZIOMEK-MOROZ, 2003).

Na zona B-C, também chamada de região ativo-passiva, ocorre instabilidade na superfície do metal, devido à queda da densidade de corrente com o aumento da tensão pela formação de uma camada passiva de óxido na superfície do ânodo. Na região passiva, ou seja, no intervalo C-D onde é gerado o filme anódico, observa-se uma constância da corrente com o aumento a tensão. É nessa região passiva que o eletropolimento normalmente ocorre, sendo a superfície sendo suavizada e a sua rugosidade diminuída (HAN; FANG, 2019; POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002; ZIOMEK-MOROZ, 2003).

Na última zona, D-E, ou região transpassiva, a camada de óxido passiva se dissolve e ocorre a evolução do oxigênio com o aumento da tensão e da corrente. Esse intervalo também é conhecido como zona de corrosão, já que a presença de bolhas de oxigênio presas à superfície da peça facilita a corrosão e a rugosidade da peça aumenta (HAN; FANG, 2019; POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002; ZIOMEK-MOROZ, 2003).

Figura 5: Gráfico densidade de corrente *versus* potencial.

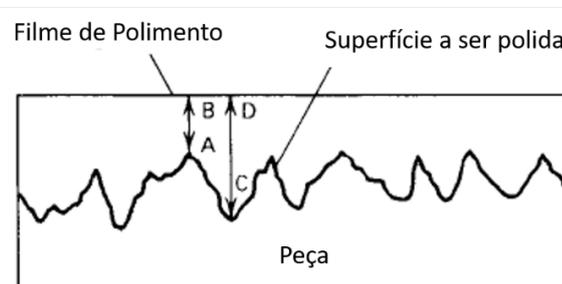


Fonte:(POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002)

O mecanismo do eletropolimento ainda não é completamente compreendido, porém o processo pode ser dividido em duas ações principais, a de nivelamento e a de lustragem, as quais são atingidas com a combinação ótima dos parâmetros temperatura, tensão, densidade de corrente e tempo (POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002; VANDER VOORT, 2004).

A ação de nivelamento é realizada mediante uma dissolução preferencial dos picos de rugosidade da superfície da peça a ser eletropolida, por meio de uma camada viscosa do eletrólito adjacente à superfície, chamada de filme de polimento. A Figura 6 ilustra essa região do eletrólito, que apresenta uma resistência elétrica maior que o restante da solução (VANDER VOORT, 2004).

Figura 6: Representação da superfície do ânodo e do filme de eletropolimento.



Fonte: Adaptado de (VANDER VOORT, 2004)

É possível notar que há resistências elétricas diferentes ao longo do próprio filme de eletropolimento. No pico A de rugosidade, a resistência elétrica é representada pelo intervalo A-B, menor que a distância C-D, relativa à resistência do vale C da rugosidade. Em outras

palavras, a densidade de corrente em A é maior que em C, fazendo com que o pico seja dissolvido preferencialmente, produzindo uma superfície quase nivelada e suavemente ondulada. (POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002; VOORT, 2004).

A ação de lustragem é caracterizada pela eliminação de irregularidades na superfície, na ordem de  $0,01 \mu\text{m}$  e pela supressão do ataque químico na superfície da peça, atribuído à formação de um filme passivo na superfície do metal (VOORT, 2004). Essa formação de um filme passivo tem um papel importante durante o eletropolimento. Se a taxa de formação do filme passivo for menor que a taxa de dissolução anódica, a superfície da peça é atacada preferencialmente, causando um aumento na rugosidade devido a heterogeneidade da formação do filme passivo. Entretanto, se a taxa de formação do filme passivo for maior que a taxa de dissolução, a espessura do filme passivo aumenta e dessa forma, o eletropolimento não ocorre. Assim a situação adequada para o processo de eletropolimento é quando a taxa de formação do filme passivo e a taxa de dissolução anódica são comparáveis (POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002).

Há vários estudos acerca do processo de eletropolimento e o efeito de suas variáveis no acabamento final da superfície polida. O tempo de eletropolimento tem influência na quantidade de material que é removido e assim, quanto maior o tempo, menor a rugosidade e mais suave é a superfície final, atingindo um limite cujo tempo depende do material. Há estudos que mostram que, após o eletropolimento a superfície torna-se mais homogênea, livre de defeitos e os contornos de grão são similares ao do material de base (HAÏDOPOULOS et al., 2006; LEE, 2000; LEE; LAI, 2003).

Estudos divergem em relação a temperatura: Haïdopoulos *et al* (2006) mostram, em seu trabalho, que o aumento da temperatura ajuda no nivelamento da superfície. Lee, por sua vez, mostra que para o aço inoxidável, a rugosidade resultante do eletropolimento diminui com o aumento da temperatura até esta atingir o nível de  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . A partir disso a rugosidade da superfície começa a aumentar (HAÏDOPOULOS et al., 2006; LEE, 2000).

Quando se trata de materiais que possuem uma camada passiva natural, como o aço inoxidável, a aplicação do eletropolimento diminui a sua espessura e aumenta o seu teor de cromo. Assim, é possível afirmar que o eletropolimento melhora a resistência geral à corrosão, comparado à resistência do filme passivo gerado naturalmente pela peça (HABIBZADEH et al., 2014; HAÏDOPOULOS et al., 2006; LEE; LAI, 2003). No trabalho de Hocheng et al. (2001) pode ser observado que a passivação do aço inoxidável austenítico 316L é afetada pela densidade de corrente e a temperatura. Quando a temperatura é menor que  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , uma maior

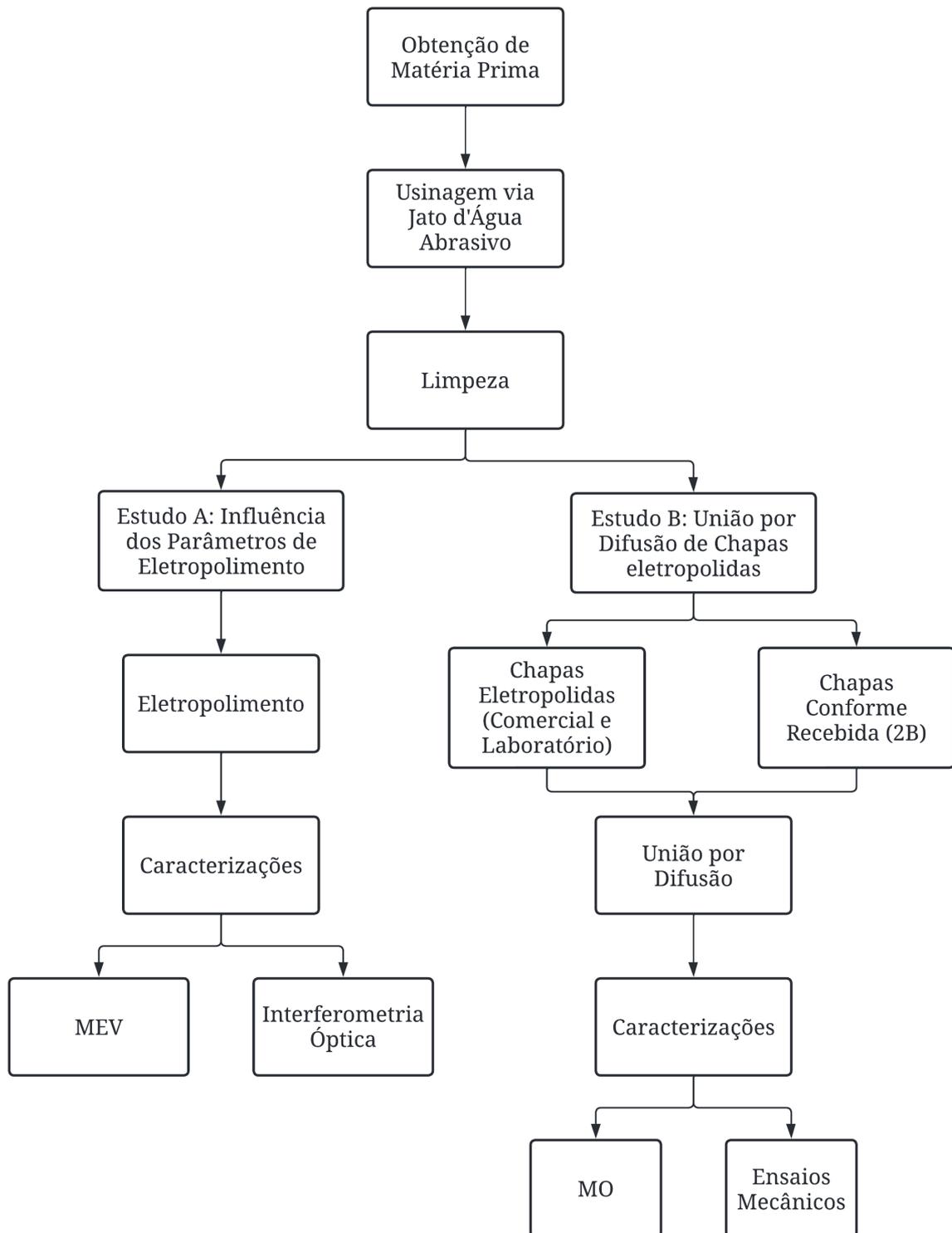
densidade de corrente é necessária para a formação de uma camada passiva mais resistente à corrosão. Entretanto foi observado que acima de 75 °C, uma maior densidade de corrente não gera esse mesmo efeito na passivação (HOCHENG; KAO; CHEN, 2001).

Alguns estudos mostram que as melhores condições do eletropolimento para o aço inoxidável são atingidas com o potencial próximo ao fim do platô de corrente limitante, independentemente do método de fabricação. Já para o cobre, a melhor região é no meio do platô. Tal abordagem se faz necessária para aplicações que precisem de uma microrugosidade mais baixa ainda, como peças que necessitem de uma maior precisão de rugosidade. (LATIFI et al., 2013; ROTTY et al., 2016, 2019).

### **3 METODOLOGIA**

O presente trabalho é dividido em dois estudos principais, intitulados de A) Influência dos Parâmetros de Eletropolimento e B) União por Difusão de Chapas Eletropolidas. O fluxograma ilustrando todas as etapas do estudo, desde a obtenção da matéria prima até as análises realizadas, encontra-se na Figura 7:

Figura 7: Fluxograma detalhado com Estudos A e B.



### 3.1 MATÉRIA PRIMA – AÇO AISI 316L

O material escolhido para o presente trabalho e comumente usado na manufatura de trocadores de calor foi o aço AISI 316L, que é um aço inoxidável austenítico, composto principalmente de Fe-Cr-Ni, com a adição de alguns outros elementos de liga (MODENESI, 2011; WASHKO; AGGEN, 1990), conforme especificado na Tabela 1.

Desses elementos, vale ressaltar o baixo teor de carbono, de 0,03%, que confere ao aço AISI 316 o acréscimo da letra “L” na denominação do material (do inglês “low carbon”). Aços com baixo teor de carbono têm a sensitização minimizada. A sensitização é causada pela precipitação de carbeto de cromo nos contornos de grão e deixa esta região propensa a corrosão intergranular. Outro elemento importante é o molibdênio que estabiliza o filme passivo, conferindo uma maior resistência à corrosão por pites em relação a outros aços inoxidáveis da série 300 (DAVISON et al., 1986; MODENESI, 2011; WASHKO; AGGEN, 1990).

Tabela 1: Composição do aço inoxidável 316L

Elementos	Quantidade (m/m%)
C	0,03
Mn	2,00
Si	1,00
P	0,045
S	0,03
Cr	16,00-18,00
Ni	10,00-14,00
Mo	2,00-3,00

Fonte: Adaptado de (WASHKO; AGGEN, 1990).

No presente trabalho, visando a aplicações em plataformas de exploração de petróleo, a escolha deste material se deve principalmente à atmosfera marinha que o permutador de calor em desenvolvimento deverá atuar, devendo, portanto apresentar uma resistência à corrosão adequada, como já foi evidenciado. Outros requisitos de aplicação para o trocador de calor, que fazem o aço 316L ser o mais apropriado para a função, são: resistência mecânica a uma ampla variação de temperatura, boa conformabilidade, soldabilidade e um coeficiente de transferência de calor (15 W/mK) adequado (WASHKO; AGGEN, 1990).

Foram utilizados os procedimentos para aquisição, controle e análise de chapas 316L já desenvolvidos em trabalhos acadêmicos anteriores do grupo de pesquisa, a fim de garantir o controle de qualidade da matéria prima e a reprodutibilidade de resultados. Tal procedimento considera as seguintes normas e práticas associadas como obrigatórias: 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, limite de escoamento e alongamento);
- Tamanho de grão (7,0-9,0);
- Resistência à corrosão intergranular (oxálico aprovado);

Além dessas características normatizadas, é solicitado que as chapas possuam o acabamento de superfície padrão ASM N° 2B, que consiste em um acabamento típico do material laminado a frio, recozido (solubilizado) e decapado, que recebe um pequeno passe de laminação a frio com cilindros polidos ao final da sua fabricação. A espessura da chapa escolhida foi de 2 mm, tamanho usado geralmente na fabricação de trocadores de calor do tipo circuito impresso (PCHE).

### 3.2 USINAGEM VIA JATO D'ÁGUA ABRASIVO

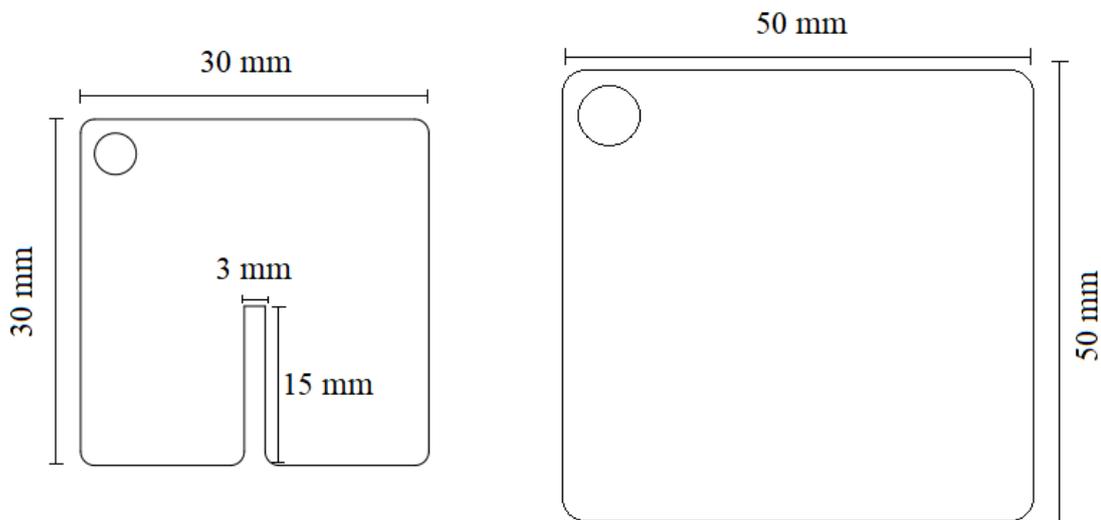
Após recebimento da matéria prima do fabricante e conferência das características requisitadas, as chapas de aço 316L foram levadas à usinagem por jato d'água abrasivo, empregando-se a máquina da marca Flow, modelo M2c 2030, conforme fotografia da Figura 8.

Figura 8: Jato d'água presente no Labtucal.



O abrasivo utilizado para o corte foi o garnet #80 mesh, fornecido pela empresa Zirtec. A geometria das peças empregada no presente estudo foram escolhidas para se adequar aos objetivos do trabalho, conforme ilustrado na Figura 9, onde em a) temos a geometria da amostra para o Estudo A, ou seja, amostras de dimensões de 30x30 mm<sup>2</sup> com um único canal, feito para a avaliação da evolução rebarba proveniente da usinagem em específico nos canais; e em b) a geometria da amostra para o Estudo B, com dimensões de 50x50 mm<sup>2</sup>, sem canais para obter uma maior área de união.

Figura 9: Geometria para amostras do estudo A, à esquerda e B, à direita.



### 3.3 LIMPEZA

Após a usinagem dos corpos de prova as amostras foram limpadas com o procedimento padrão do laboratório, que consiste em, primeiramente lavagem em água corrente, seguido de ultrassom em uma solução aquosa com desengraxante industrial por 15 minutos e por fim, ultrassom em álcool etílico por 10 minutos.

### 3.4 ESTUDO A: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE ELETROPOLIMENTO

No Estudo A analisou-se a influência de três dos principais parâmetros do polimento eletrolítico: tempo, densidade de corrente e superfície inicial. Parte das amostras utilizadas nesse estudo foram lixadas em uma politriz com lixa de carboneto de silício (SiC) em mesh #400, com o intuito de avaliar a diferença entre a superfície 2B e a superfície modificada por meio do lixamento. As peças que passaram pelo processo de lixamento foram submetidas a mais um processo de limpeza, para garantir que nenhum resquício de SiC tenha sido deixado nas amostras.

### 3.4.1 Eletropolimento

Após a limpeza, as amostras foram submetidas ao processo de polimento eletrolítico. Os parâmetros utilizados foram escolhidos com base em uma série de outros trabalhos, cujos dados principais estão compilados na Tabela 2 juntamente com os recursos disponíveis no laboratório para a sua execução.

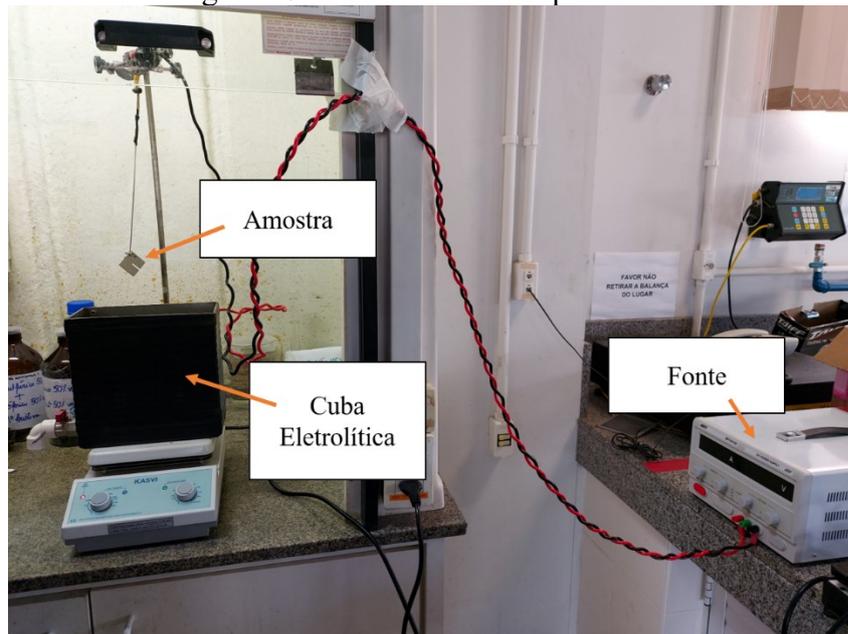
Tabela 2: Revisão bibliográfica dos parâmetros de eletropolimento.

<b>Autores</b>	<b>Eletrólito</b>	<b>T (°C)</b>	<b>t (min)</b>	<b>j (A/cm<sup>2</sup>)</b>
(HENSEL, 1999)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico	26-80	x	> 0,054
(YANG et al., 2016)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + glicerol	50-95	x	0,5-0,25
(HOCHENG; KAO; CHEN, 2001)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + água	50-90	3,0-9,0	0,5-3,0
(NAZNEEN et al., [s.d.])	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + glicerol	50-80	x	x
(HABIBZADEH et al., 2014)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + glicerol + água	65-70	3	x
(HAN; FANG, 2019)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico	60-80	x	0-0,6
(CHEN; TU; HUANG, 2005)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico	60-80	10	
(HAÏDOPOULOS et al., 2006)	Ácido fosfórico + glicerol + água	20-90	0-6	0,75
(DATTA; VERCRUYSSSE, 1990)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + água	25-60	x	x
(LEE; LAI, 2003)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + glicerina + água	60	3,0-7,0	0,1-0,9
(ROKOSZ et al., 2015)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico	x	x	10
(ROKOSZ et al., 2015)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico	65	x	0,5
(TYAGI et al., 2019)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico	75	30	0,6
(ROTTY et al., 2017)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + água	70	20	x

(LIN; HU, 2008)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + glicerol	80	5	0,5
	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + glicerol	30	5	0,5
(VANDER VOORT, 2004)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + água	x	1,0-10	0,1-0,5
(LATIFI et al., 2013)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico	50	20	0,25
(HABIBZADEH et al., 2014)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + glicerol + água	65-70	3	x
(LOCHYŃSKI et al., 2018)	x	55	45, 90 e 180	5
(ROTTY et al., 2019)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico	70	20	x
(AWAD et al., 2012)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico	25	5-25	0,175 - 0,255
(BEAMUD et al., 2017)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + ácido crômico + água	35-65	3-36	0,1-0,67
(COELHO et al., 2020)	x	65	x	0,2-0,4
(GOMEZ-GALLEGOS; MILL; MOUNT, 2016)	Nitrato de Sódio	7, 15,3	x	x
(POPOV; DJOKIC; GRGUR, 2002)	Ácido sulfúrico + ácido fosfórico + água	70	out/15	0,5-0,6

Utilizou-se a fonte Maisheng, modelo MP15010,D com amperagem máxima de 10 A e tensão máxima de 150 V. A cuba, fabricada exclusivamente para o presente trabalho, foi feita em aço inoxidável AISI 316L, servindo como o cátodo da célula. A temperatura foi mantida em volta dos 45 °C ( $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ), por meio de um agitador magnético com controle de temperatura. A solução utilizada foi uma mistura de 1:1 em volume de ácido sulfúrico com ácido fosfórico. A Figura 10 mostra a montagem da célula eletrolítica dentro das dependências do laboratório.

Figura 10: Bancada de Eletropolimento.



Com base nas referências, escolheu-se os parâmetros variáveis tempo, densidade de corrente e superfície inicial como o ilustrado na Tabela 3. Foi feito uma amostra de cada condição, sem réplicas e assim será analisado outros parâmetros além dos avaliados nos estudos citados na Tabela 2, como será visto a seguir.

Tabela 3: Condições e parâmetros utilizados para o Estudo A.

Nomenclatura	Superfície	Corrente (A)	Tempo (min)	Densidade de corrente (A/cm <sup>2</sup> )
2B35	2B	3	5	0,15
2B310	2B	3	10	0,15
2B320	2B	3	20	0,15
2B55	2B	5	5	0,25
2B510	2B	5	10	0,25
2B520	2B	5	20	0,25
2B105	2B	10	5	0,5
2B1010	2B	10	10	0,5
2B1020	2B	10	20	0,5
40035	#400	3	5	0,15
400310	#400	3	10	0,15
400320	#400	3	20	0,15
40055	#400	5	5	0,25
400510	#400	5	10	0,25
400520	#400	5	20	0,25
400105	#400	10	5	0,5
4001010	#400	10	10	0,5
4001020	#400	10	20	0,5

Após o eletropolimento, as amostras foram neutralizadas com uma solução aquosa de bicarbonato de sódio, seguida de uma nova limpeza em água corrente e secagem para o armazenamento adequado.

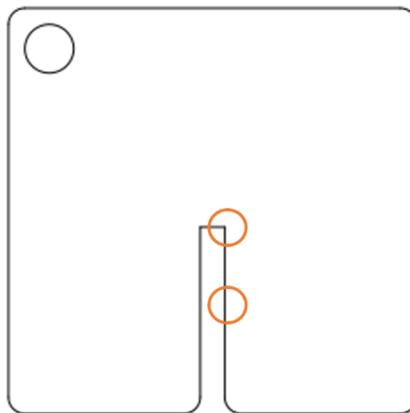
### 3.4.2 Análises

Para dar seguimento ao Estudo A, foram feitas as análises nas amostras em todas as condições descritas na Tabela 3. As análises consistiram em Microscopia Eletrônica de Varredura e Interferometria Óptica, que serão detalhas nos próximos subitens.

#### 3.4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com o intuito de analisar a morfologia e aspecto visual das diferentes configurações de eletropolimento, foram tiradas fotos em MEV, da marca e modelo Tescan, Vega 3 - Oxford X. As regiões que foram analisadas foram principalmente nas áreas do canal e da borda, conforme esquema na Figura 11, para avaliar a evolução da rebarba gerada pela usinagem do jato d'água. Os diferentes aumentos utilizados foram 80x e 500x. O principal aspecto avaliado foi a aparência e evolução da rebarba em função das variáveis do eletropolimento.

Figura 11: Pontos de análise em MEV

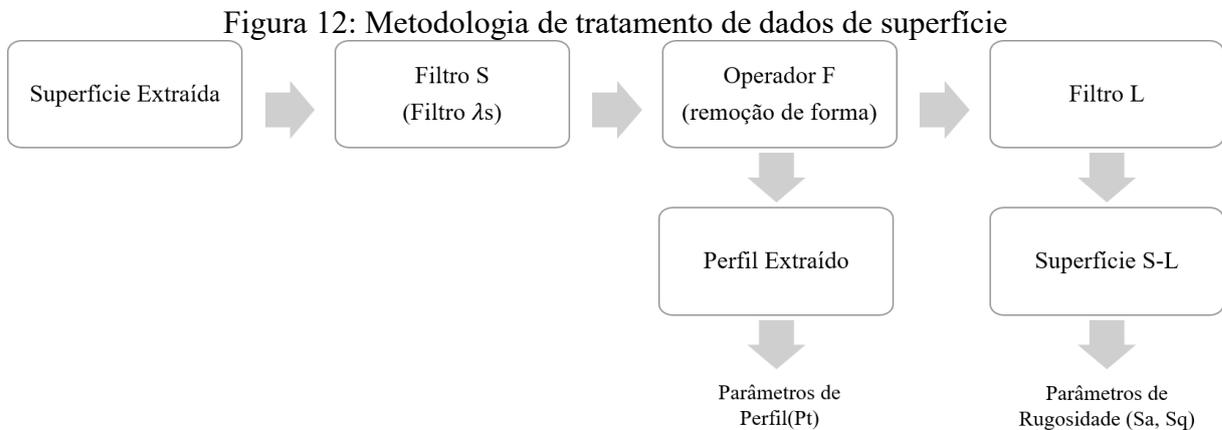


#### 3.4.2.2 Interferometria Óptica

As medidas de interferometria óptica foram realizadas em um interferômetro da marca e modelo Zygo Newview 7300. O objetivo dessa análise foi acompanhar a evolução da rugosidade nas diferentes condições de eletropolimento e assim determinar se há algum limite para a diminuição da rugosidade.

Para estas medidas, foram obtidos dados em diferentes pontos de cada amostra, em uma região longe dos canais para garantir a reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados. Para o tratamento de dados obtidos no interferômetro foi utilizada a versão de teste do software

Mountains Map® Premium, seguindo os passos sugeridos por Blateyron (2014) e Seewig (2013) como está ilustrado na Figura 12:



Fonte: (BLATEYRON, 2014; SEEWIG, 2013)

A escolha dos filtros gaussianos (cut-off) se deu segundo as normas ISO 25178-3 para parâmetros de área e ISO 4288, para o parâmetro de perfil e respectivos valores de filtros, nas condições apresentadas na Tabela 4. Foi definida uma relação entre o S-filter e L-filter de 100:1, com o objetivo de manter a mesma proporção em todas as condições. Para o perfil, como o parâmetro escolhido diz respeito ao chamado perfil primário, não é utilizado nenhum L-filtro, apenas  $\lambda_s$  Filter (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002; BLATEYRON, 2014; BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1998; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2012).

Tabela 4: Filtros utilizados para cada condição do Estudo A

Nomenclatura	Superfície	
	Filtro S	Filtro L
2BCR	0,008	0,8
2B35	0,008	0,8
2B55	0,008	0,8
2B105	0,008	0,8
2B310	0,008	0,8
2B320	0,008	0,8
2B510	0,008	0,8
2B520	0,0025	0,25
2B1010	0,0025	0,25
2B1020	0,0025	0,25

400CR	0,0025	0,25
40035	0,0008	0,08
40055	0,0008	0,08
400105	0,0025	0,25
400310	0,0025	0,25
400320	0,0025	0,25
400510	0,0025	0,25
400520	0,0008	0,08
4001010	0,0025	0,25
4001020	0,0025	0,25

Os parâmetros escolhidos para a avaliação da rugosidade da superfície e do perfil gerados estão expostos na Tabela 5, juntamente com seu significado segundo a norma adotada.

Tabela 5: Parâmetros de rugosidade e suas definições

<b>Parâmetro</b>	<b>Definição</b>
Sa	Média aritmética dos valores absolutos de altura, ou seja, a diferença média de altura em relação ao plano médio da superfície(OLYMPUS, 2017; THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2009).
Sq	Equivalente ao desvio padrão da distribuição da altura, ou seja, raiz quadrada dos desvios medidos da altura da superfície(OLYMPUS, 2017; THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2009).
Sz	Representa a amplitude entre a altura máxima e a profundidade máxima (THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2009)
Sp	Representa a altura máxima dos picos em relação à superfície média na área avaliada(THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2009)
Sv	Definido como a profundidade máxima em relação à média na área de avaliação (THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2009)

### 3.5 ESTUDO B: UNIÃO POR DIFUSÃO DE CHAPAS ELETROPOLIDAS

O principal objetivo do Estudo B foi avaliar a diferença da união por difusão entre três diferentes blocos, sendo o primeiro composto de chapas 2B, conforme recebidas do fornecedor (Bloco 2B), o segundo elaborado de chapas eletropolidas comercialmente (Bloco EPC) e o

terceiro constituído de chapas eletropolidas dentro das dependências do laboratório (Bloco EPL).

### **3.5.1 Eletropolimento**

Para os blocos EPC e EPL, foram seguidas as seguintes metodologias, detalhadas nos subitens a seguir:

#### *3.5.1.1 Eletropolimento Comercial*

A fim de se ter uma comparação do que é encontrado atualmente na indústria com o que seria possível realizar dentro das dependências do laboratório neste trabalho, entrou-se em contato com algumas empresas de tratamento de superfícies que poderiam fornecer o serviço de polimento eletrolítico.

Uma dessas empresas, (optou-se aqui por manter-se o sigilo), gentilmente cedeu o serviço gratuitamente para a fabricação do Bloco EPC. Dentre outras informações, esta empresa relatou que o processo de eletropolimento foi realizado por método próprio e que não houve lixamento prévio das chapas antes do polimento.

#### *3.5.1.2 Eletropolimento em Laboratório*

Para o eletropolimento destinado ao Bloco EPL foi feita uma análise a partir dos resultados do Estudo A, que serão mais detalhados na seção de Resultados, onde foi escolhida como condição o eletropolimento com o maior produto  $j \cdot t$ , definido pelo tempo de 20 minutos e densidade de corrente  $0,5 \text{ A/cm}^2$  (condição 2B1020). Entretanto, tal condição já estava no valor máximo de corrente que a fonte usada permitia. Seria, assim, impossível manter a mesma densidade de corrente para a chapa utilizada para o bloco, já que a área da chapa aumentaria de  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  para  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ .

Assim, foi feita uma relação através do produto entre tempo e densidade de corrente de forma que, aumentando o tempo, fosse possível atingir a mesma condição obtida caso a densidade de corrente fosse aumentada, a mesma abordagem citada anteriormente na revisão bibliográfica por Hensel (1999). A densidade de corrente que se conseguiu atingir com a nova área foi de  $0,18 \text{ A/cm}^2$ . Considerando que, para o Estudo A, a relação empregada foi de  $10 \text{ Amin/cm}^2$ , para atingir essa mesma relação com a nova densidade de corrente na fabricação das chapas do Bloco EPL, definiu-se um tempo de 55 minutos de eletropolimento. Todas as outras variáveis e parâmetros de eletropolimento foram mantidas conforme Estudo A.

### **3.5.2 União por Difusão**

Para o processo termomecânico de união por difusão, seguiu-se o mesmo procedimento nos três blocos. Primeiramente foi feito um novo processo de limpeza, seguindo a metodologia descrita no item 1.3.

Para cada bloco, empilhou-se 40 chapas na condição de superfície específica de modo que a altura do bloco fosse de 80 mm e uma área de contato de 50x50 mm<sup>2</sup>. A união por difusão foi realizada no forno PVA Tepla, na temperatura de 1040 °C, pressão de 9,5 MPa e tempo de patamar de 1 h, tais parâmetros provindos de trabalhos anteriores do grupo de pesquisa. Todos os ciclos foram configurados sob pressão oscilante, que se caracteriza pela aplicação de pulsos de pressão nos primeiros 10 minutos do patamar de 60 minutos de união. Cada pulso dura 10 segundos na qual a pressão varia de 9,5 MPa (aplicada durante 7 segundos) a 4,75 MPa (mantida por 3 segundos). Depois de passado os 10 minutos iniciais, a pressão é mantida em 9,5 MPa até o fim do patamar. Após a união por difusão, foram retirados os corpos de prova, circulares para os ensaios de tração e retangulares para a preparação metalográfica e posterior análise microestrutural.

### **3.5.3 Análise Microestrutural**

Para a realização da análise microestrutural, as amostras foram preparadas segundo a seguinte metodologia: primeiramente, as amostras passaram por lixamento mecânico manual, até o mesh #1500, seguido de polimento mecânico com pasta de diamante de 3 e 1 µm, seguido do ataque eletrolítico em solução aquosa de ácido oxálico (10% em massa) por 30 segundos. Após isso, as amostras foram levadas ao Microscópio Óptico, onde foram adquiridas fotos de forma aleatória para cada amostra na área de interface de união.

### **3.5.4 Ensaio de Tração**

Os ensaios mecânicos de tração foram realizados em empresa externa certificada, segundo norma ASTM A370, sendo obtidos valores de tensão máxima, tensão de escoamento, alongamento e redução de área. Foram retirados três corpos de prova de cada condição, de forma que a tensão exercida fosse transversal às linhas de união, sendo assim a condição mais crítica a ser solicitada. Logo, se os resultados obtidos sejam maiores que os mínimos exigidos por norma para material de base, o restante das direções também atenderão.

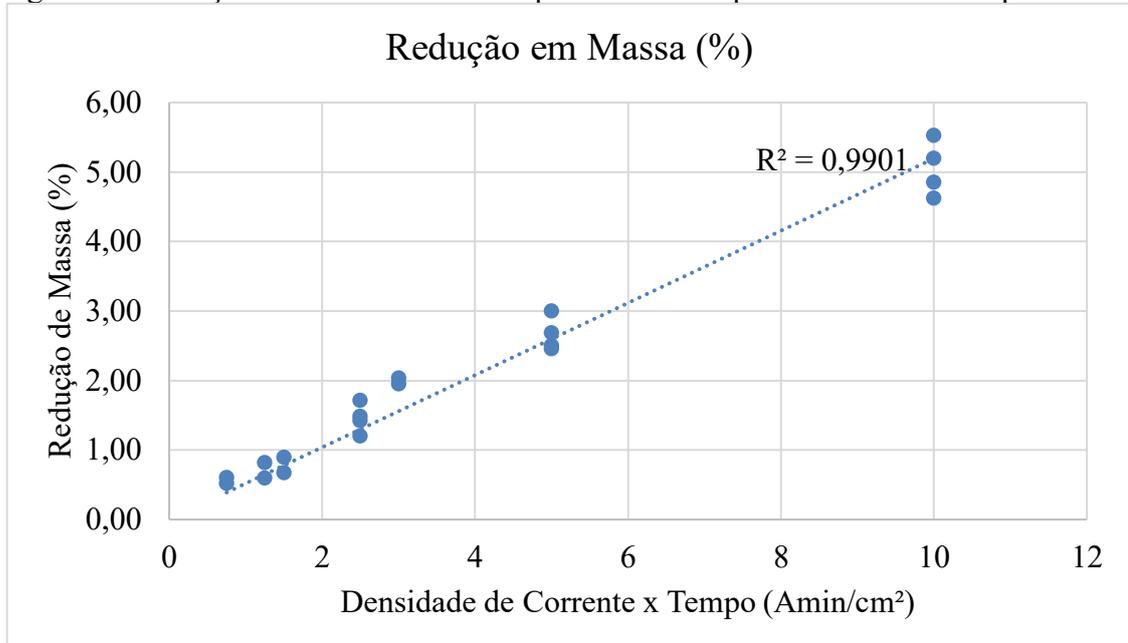
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos dois estudos do presente trabalho.

### 4.1 ESTUDO A: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE ELETROPOLIMENTO

Como já apresentado, o Estudo A tem o intuito de avaliar a influência de cada um dos parâmetros estudados nesse trabalho. Primeiramente, foram medidas as massas antes e após o eletropolimento, a fim de avaliar a redução de massa com o aumento do produto densidade de corrente x tempo, conforme exposto na Figura 13.

Figura 13: Redução Percentual de Massa para diferentes parâmetros de Eletropolimento.

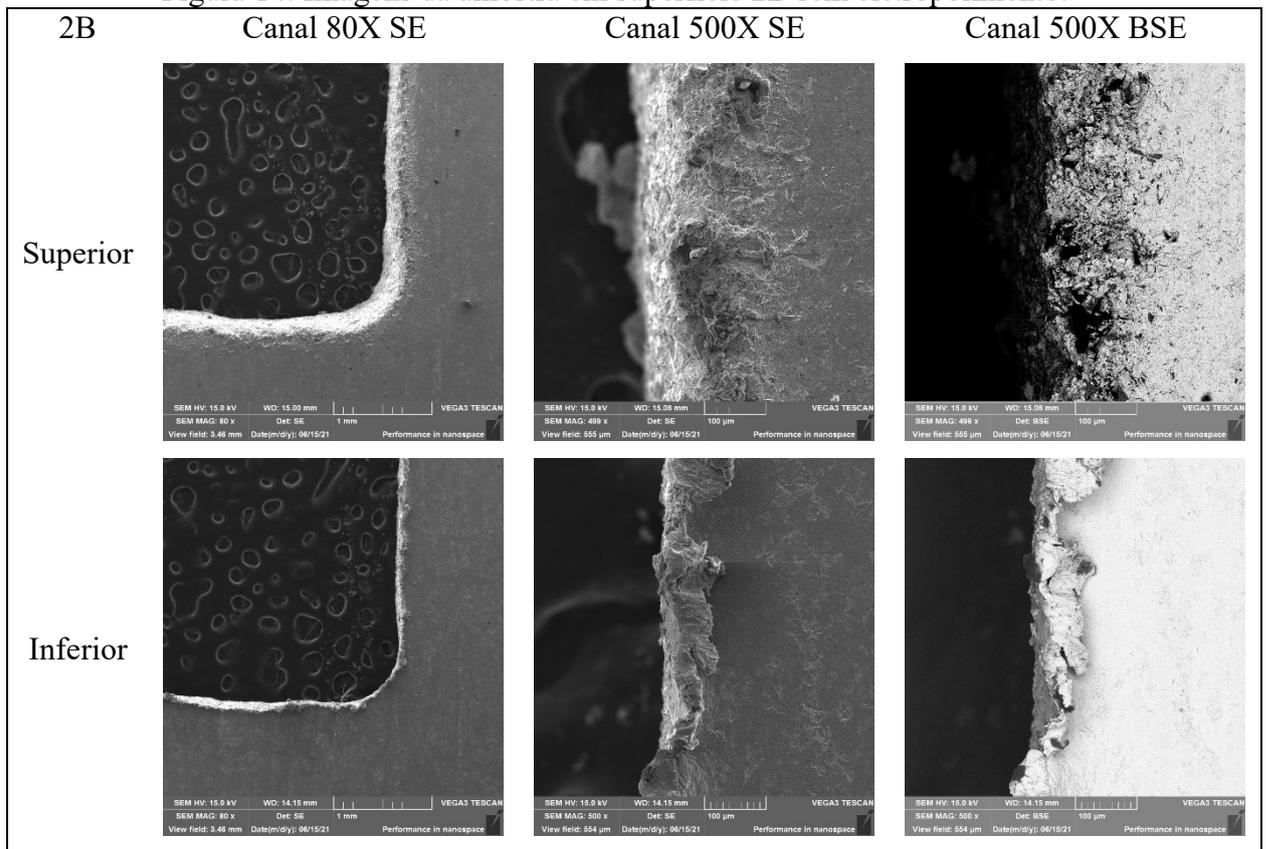


Pode-se inferir da Figura 13 que o aumento do produto densidade de corrente pelo tempo leva a um aumento no percentual de perda de massa das amostras eletropolidas. Esse aumento, pode ser considerado linear, com um parâmetro de correlação de  $R^2$  igual a 0,9901. Tal comportamento indica que o produto Densidade de Corrente x Tempo está fortemente relacionado com a quantidade de material dissolvido durante o eletropolimento.

#### 4.1.1 Análises via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A evolução morfológica das amostras, na região de canal, foi analisada via MEV com o objetivo de avaliar a presença ou não da rebarba remanescente do processo de usinagem em jato d'água. A condição inicial, ou seja, sem eletropolimento é apresentada na Figura 14.

Figura 14: Imagens da amostra em superfície 2B sem eletropolimento.

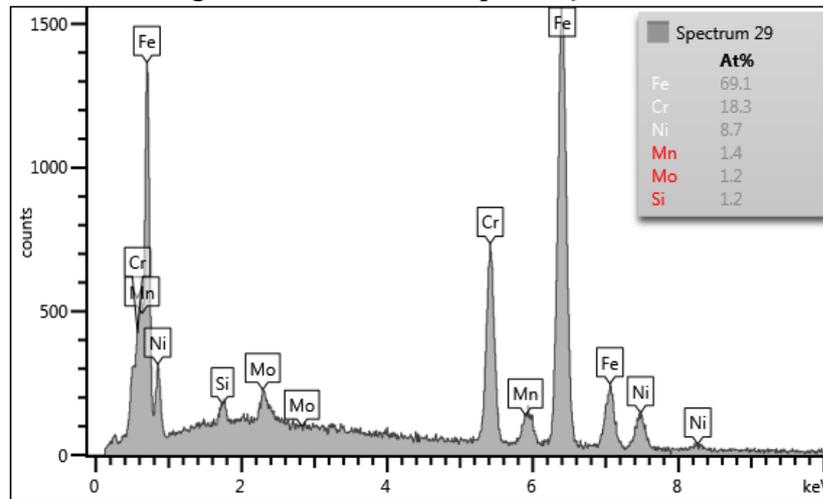


Na primeira coluna da Figura 14 observa-se a região de curva do canal, na face superior e inferior da amostra. A face superior, ou seja, região de entrada do jato d'água com abrasivos, caracteriza-se pela presença de rebarba, de degradação da superfície e incrustação de abrasivo. Sempre que houver referência a essa região da amostra, será adotado o termo zona afetada. A face inferior por sua vez, apresenta uma saliência que durante a descrição deste trabalho será chamada de rebarba.

Aumentando a magnificação das imagens, na segunda coluna, é possível observar mais detalhes da zona afetada e da rebarba. Na primeira nota-se a degradação causada pelo impacto do jato na superfície, deixando a região da borda com um aspecto grosseiro. Na face inferior observa-se a formação de rebarba.

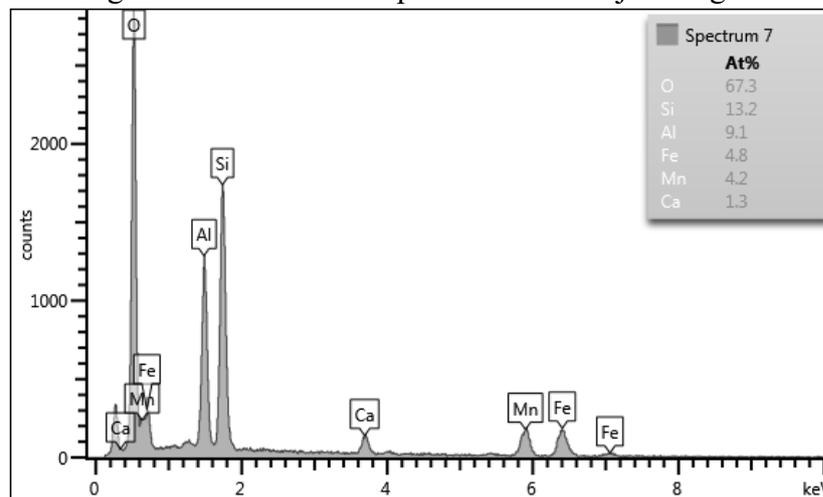
Para discernir entre o material da amostra, aço 316L, e o abrasivo incrustado deixado pelo jato d'água, foram adquiridas as imagens em BSE, mostradas na terceira coluna da Figura 14. Nelas, é possível notar uma grande região de cor clara, que representa o aço 316L, conforme o apresentado no gráfico de EDS na Figura 15.

Figura 15: Gráfico EDS para Aço 316L.



Já a região relativa aos pontos mais escuros tem a composição apresentada na Figura 16, de onde pode-se concluir a presença de grãos de abrasivos incrustados, tanto na zona afetada quanto na rebarba. Outra conclusão obtida a partir destas imagens é que há uma maior quantidade de abrasivo incrustado na superfície da zona afetada que na da rebarba, o que é justificado pelo fato de que a face superior recebe diretamente as partículas de abrasivo contido no jato d'água.

Figura 16: Gráfico EDS para abrasivo do jato d'água.

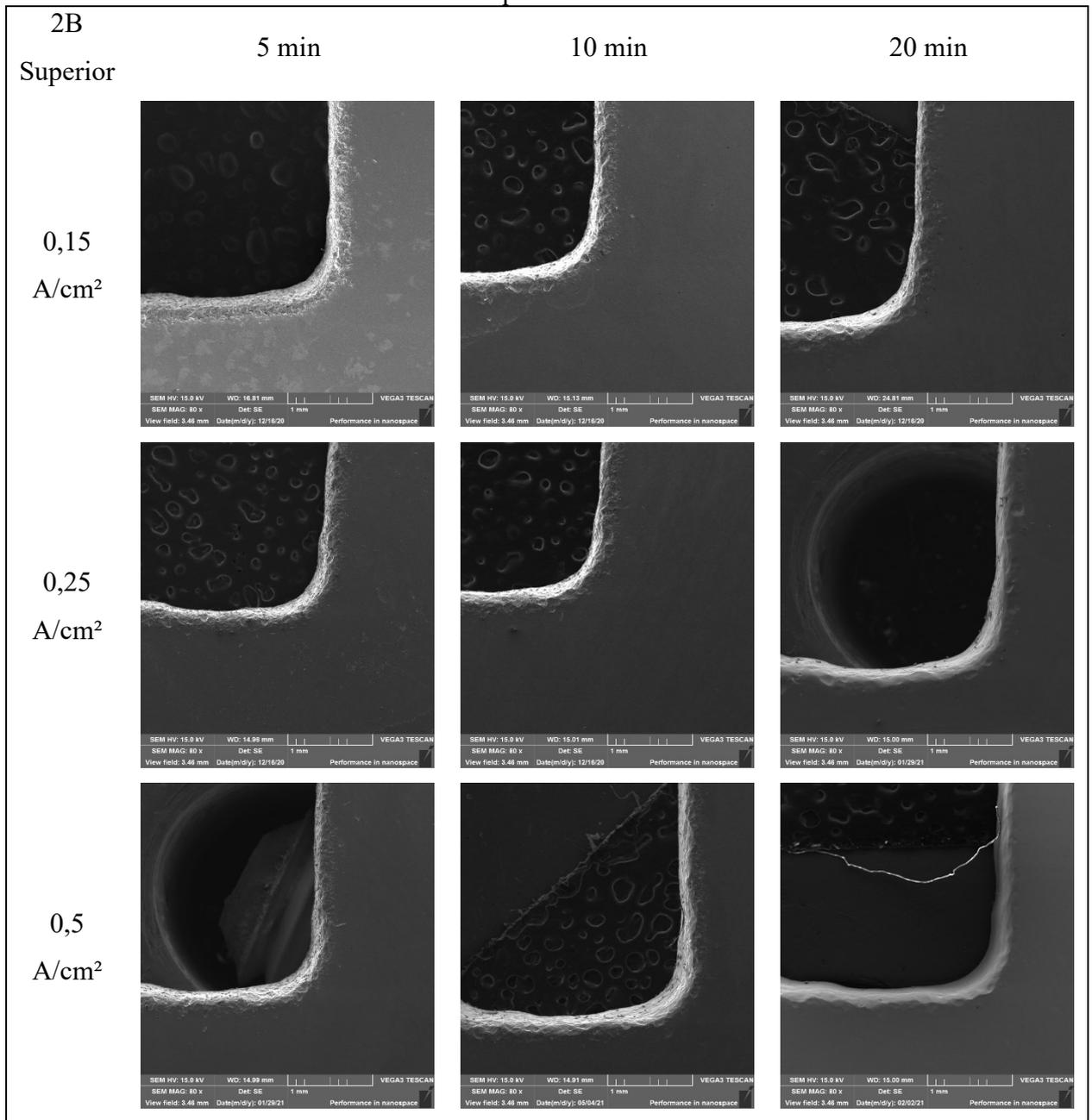


A Figura 17 mostra a evolução do eletropolimento nas amostras com a superfície inicial 2B, na face superior, mostrando a curva do canal e a zona afetada das amostras.

Analisando o efeito da densidade de corrente e do tempo separadamente, pode-se observar que a densidade de corrente tem influência apenas na redução do dano na zona afetada, suavizando a superfície. O tempo, por sua vez, além de amenizar o efeito do jato d'água na zona

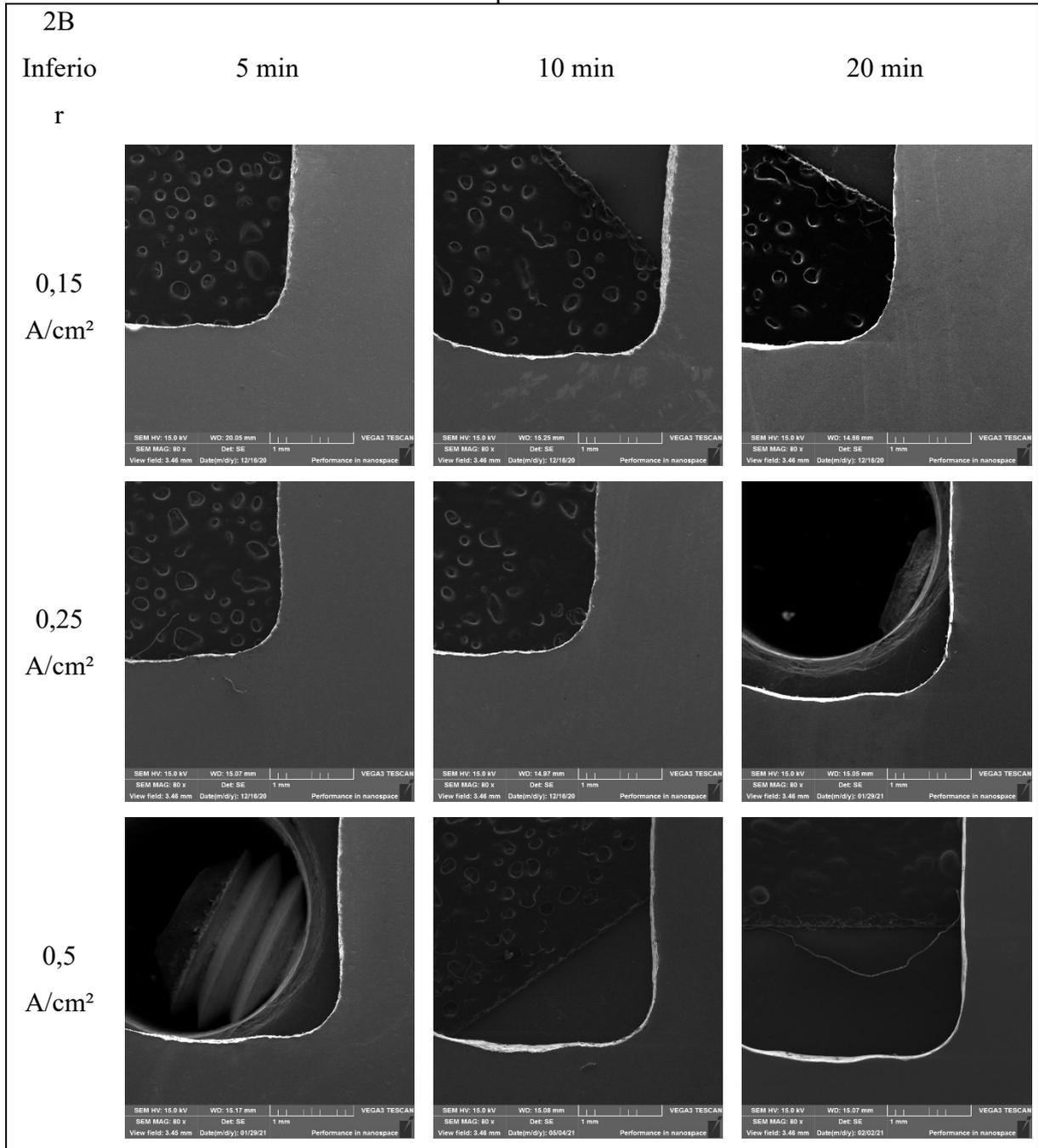
afetada, também promove um arredondamento das bordas. A combinação da maior densidade de corrente com o maior tempo promove uma superfície mais suave e arredondada em comparação com a condição inicial. Já o resultado da combinação da menor densidade de corrente com o menor tempo é similar à condição inicial, com uma diferença morfológica praticamente imperceptível.

Figura 17: Imagens da face superior da região de curva do canal para as amostras 2B com eletropolimento.



Na Figura 18 é apresentada a face inferior das amostras com superfície 2B sujeitas a diferentes condições de densidade de corrente e tempo. Ao contrário do que acontece na face superior, com o menor tempo e a menor densidade de corrente já consegue-se notar uma redução da rebarba, quando comparada à condição inicial.

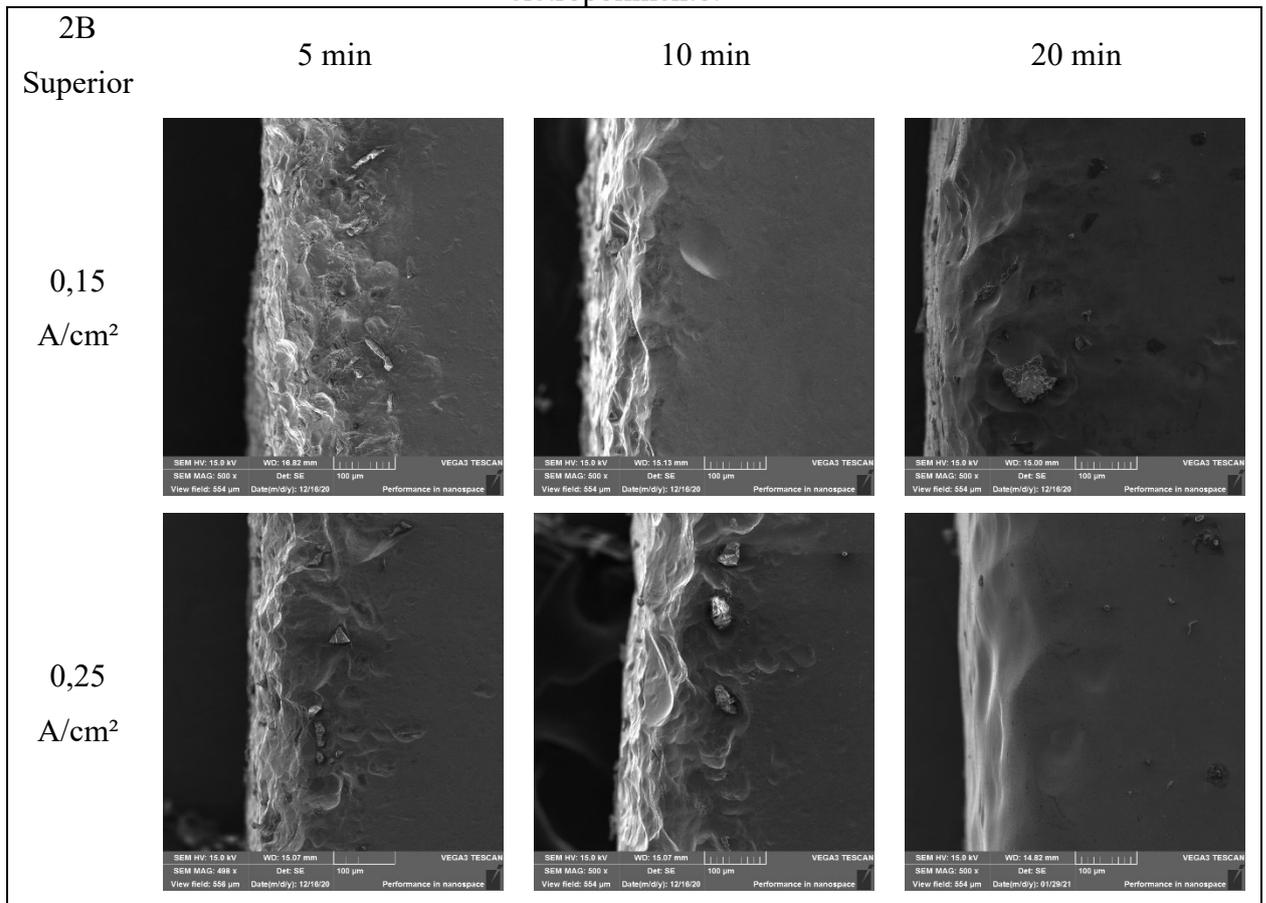
Figura 18: Imagens da face inferior da região de curva do canal para as amostras 2B com eletropolimento.

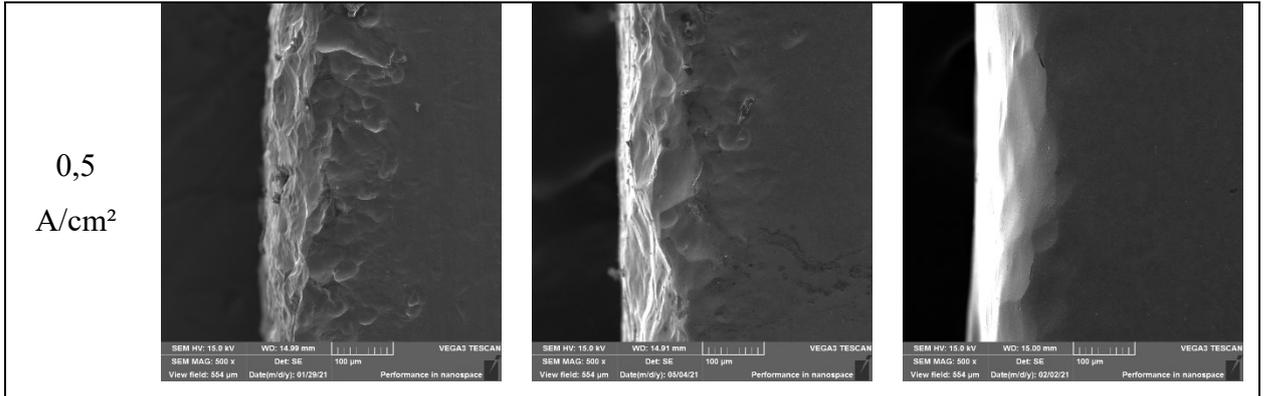


Outra diferença da face inferior é que à medida que o tempo aumenta, a borda não fica com o mesmo aspecto arredondado encontrado na face superior, embora o aspecto aparente seja mais suave. Uma hipótese para tal ocorrência é que como na face superior há o impacto direto do jato d'água abrasivo, sendo possível que essa região seja mais encruada que a da face inferior, e por isso mais reativa, fazendo com que a força motriz seja diferente para ambos os lados.

As imagens da face superior apresentadas na Figura 19 tem maior magnificação, o que permite observar as particularidades da morfologia da superfície na região de borda, especialmente as deformações e partículas incrustadas provenientes do impacto do jato d'água. Nota-se que ao aumentar a densidade de corrente, a superfície fica menos grosseira e menos resquícios do abrasivo do jato d'água são encontrados. Com o aumento do tempo, mais material é dissolvido e há um maior arredondamento da borda, conforme observado anteriormente.

Figura 19: Imagens da face superior da região do canal aumentada das amostras 2B com eletropolimento.

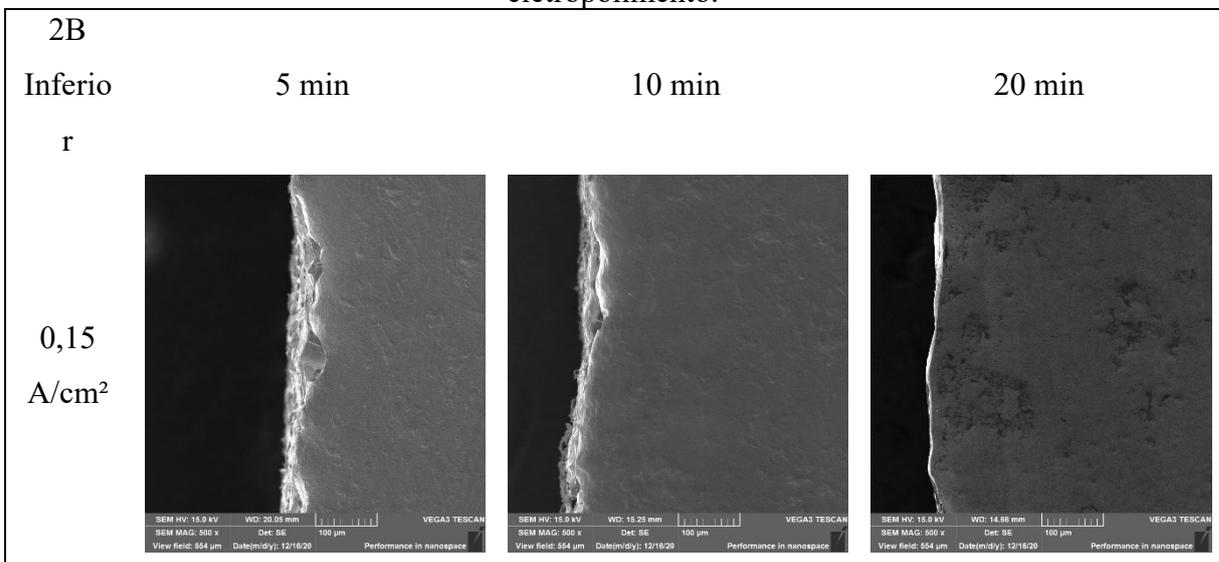


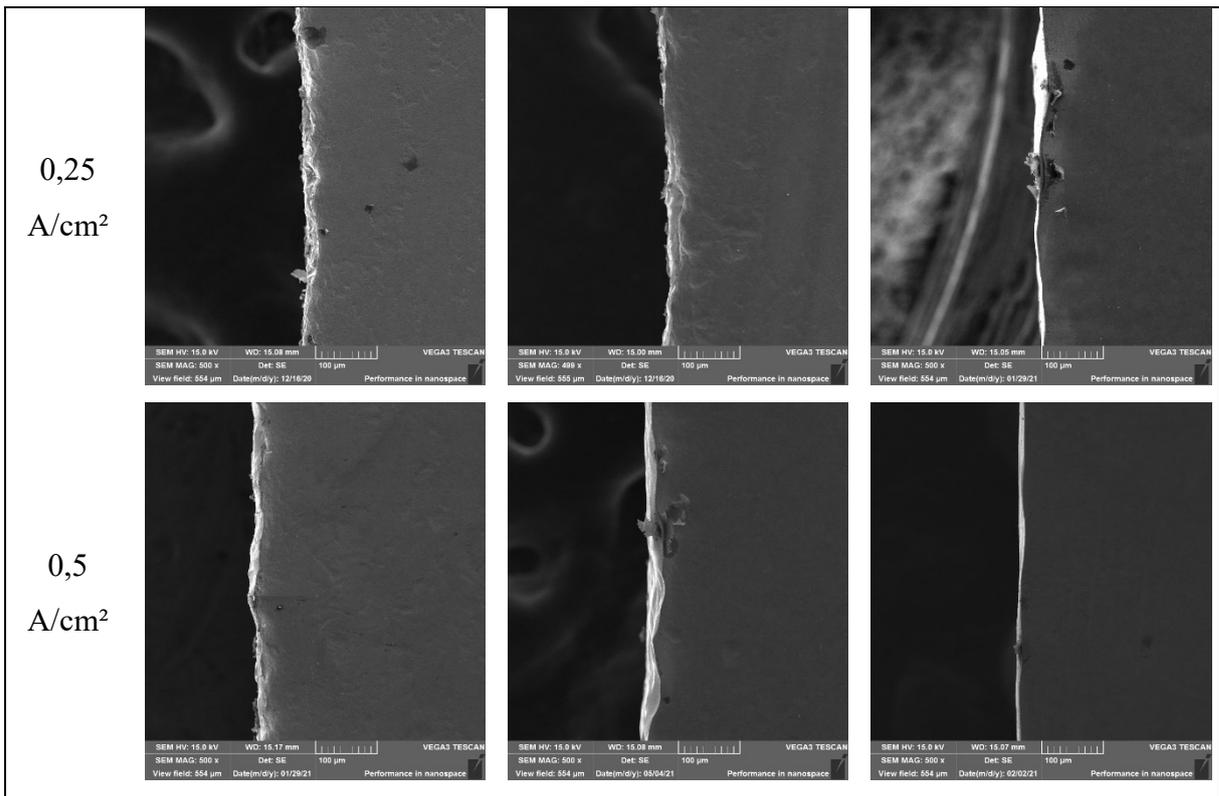


A superfície da amostra com maior densidade de corrente e menor tempo apresenta uma deformação inerente do jato d'água, com poucas partículas incrustadas. Já para a condição com menor densidade de corrente e maior tempo, a borda se apresenta com uma textura mais suave e arredondada, com poucas partículas incrustadas. Tal observação vai ao encontro da teoria, uma vez que uma maior densidade de corrente irá dissolver mais efetivamente os picos de rugosidade e assim retirar as partículas incrustadas. O tempo, em combinação com a densidade de corrente, permite uma maior retirada de material, trazendo o efeito arredondado nas bordas.

Na Figura 20, cujas imagens tem a mesma magnificação que a Figura 19, pode-se observar melhor o efeito do eletropolimento na face inferior. Nota-se resquícios da rebarba nas amostras com menores tempos e densidade de corrente, bem como uma erosão na região de borda.

Figura 20: Imagens da face inferior da região do canal aumentada das amostras 2B com eletropolimento.



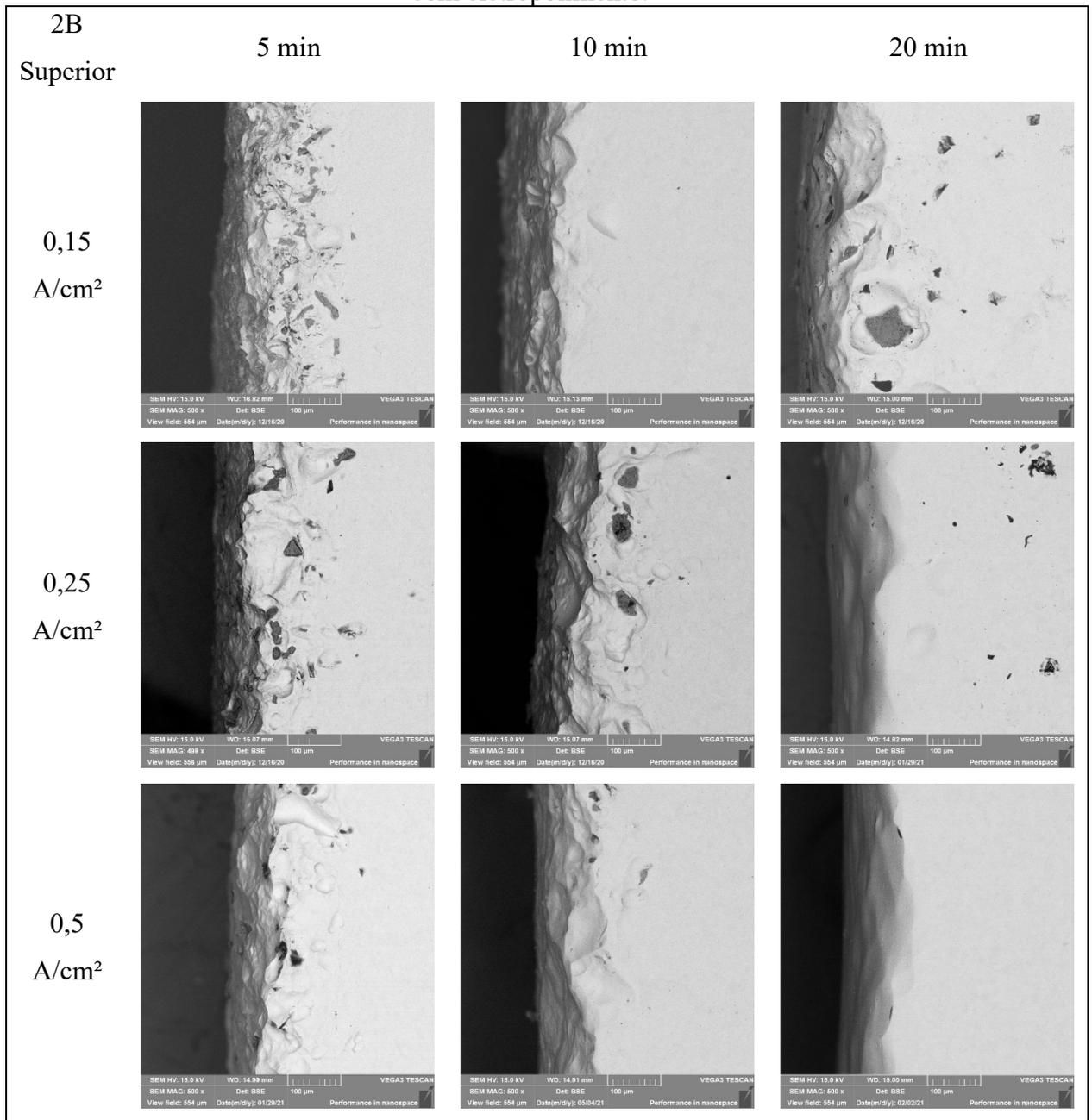


O maior tempo na menor densidade de corrente parece ter sido capaz de retirar a rebarba enquanto o menor tempo na maior densidade de corrente apenas reduziu a rebarba inicial. O eletropolimento resultante da combinação de um maior tempo com uma maior densidade de corrente, resulta em uma superfície mais lisa e suave, sendo retirada a maior parte dos abrasivos nas regiões alteradas pelo jato d'água.

Para diferenciar a erosão e deformação da incrustação do abrasivo na zona afetada, ambos causados pelo jato d'água, a Figura 21 apresenta as imagens em BSE da região de borda. As regiões claras representam o aço inoxidável 316L e as regiões escuras o abrasivo contido no jato d'água. No geral, o tempo de 10 minutos é suficiente para retirar a maioria do abrasivo incrustado, embora a melhor condição é em 20 minutos. Entretanto, para as regiões onde a deformação do impacto do jato causou crateras profundas, nem o tempo de 20 minutos para a densidade de corrente de  $0,15 \text{ A/cm}^2$  foi capaz de retirar o abrasivo incrustado dentro da região mais profunda daquela superfície.

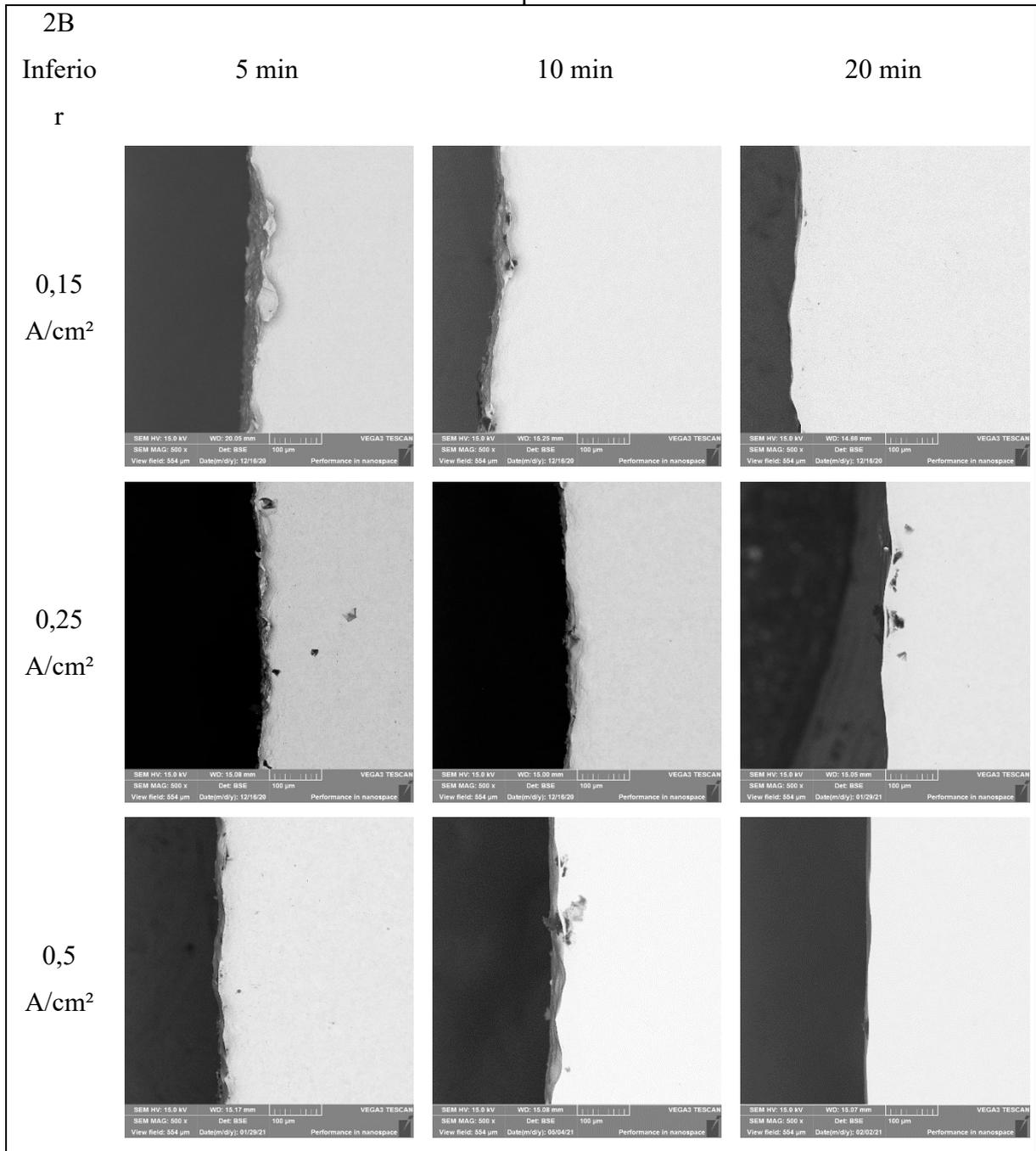
Quando a densidade de corrente é aumentada, a eliminação do abrasivo incrustado na superfície aumenta também e a combinação da maior densidade de corrente com maior tempo promove uma superfície suave e praticamente livre de abrasivos.

Figura 21: Imagens em BSE da face superior da região do canal aumentada das amostras 2B com eletropolimento.



A Figura 22 apresenta as faces inferiores em BSE das amostras eletropolidas em superfície 2B. Ao analisar as imagens é possível perceber que não há uma presença constante de abrasivos incrustados na região de borda como o encontrado na face superior. A rebarba encontrada na condição inicial é significativamente reduzida ou eliminada para todas as condições.

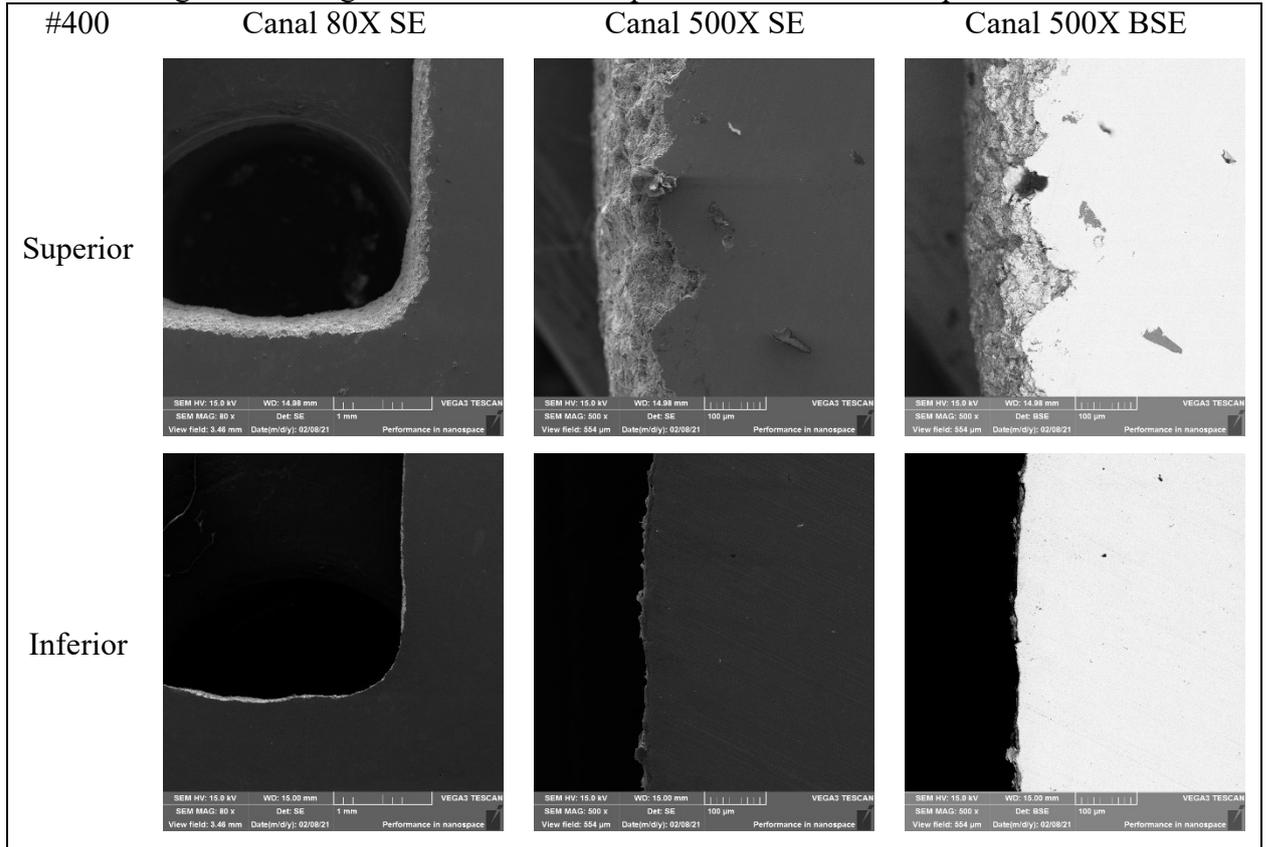
Figura 22: Imagens em BSE da face inferior da região do canal aumentada das amostras 2B com eletropolimento.



Nos menores tempos a borda apresenta um aspecto irregular com algumas erosões ao longo da sua extensão, deixados após a redução da rebarba. Com o aumento do tempo, a borda se torna mais suave e lisa, como anteriormente visto. O aumento de densidade de corrente nesse caso influencia na redução das irregularidades da borda, como falado anteriormente, por intensificar a dissolução ocorrida na superfície.

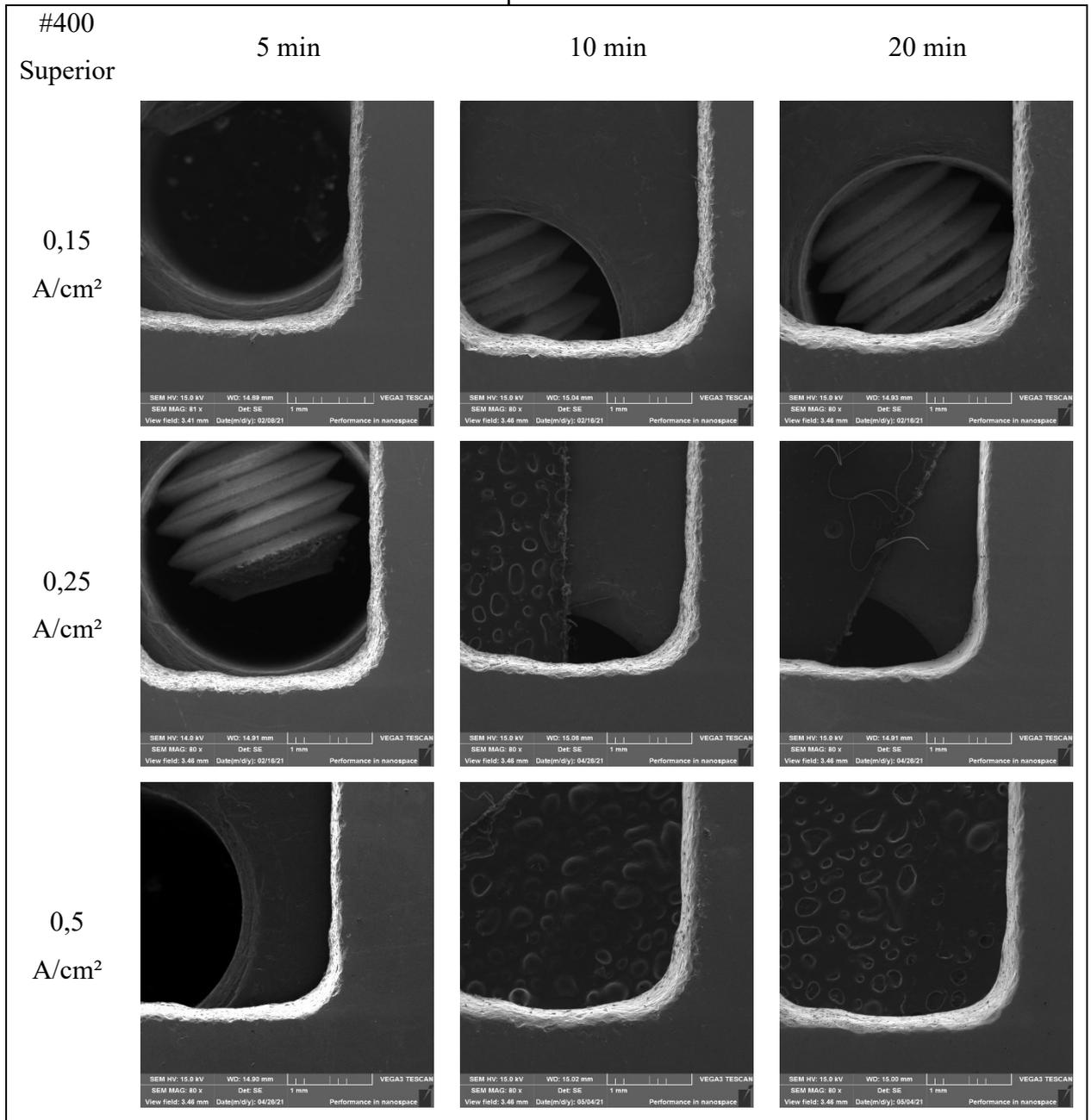
A Figura 23 apresenta imagens em MEV da amostra com superfície lixada em *mesh* #400, sem eletropolimento. A partir dela consegue-se perceber que o lixamento retira a maioria das características provenientes do jato d'água como a rebarba na face inferior (imagens da linha inferior) e a zona afetada, que aparenta ter menos abrasivo incrustado na superfície. Porém, algumas crateras ainda são observadas na região de borda.

Figura 23: Imagens da amostra em superfície #400 sem eletropolimento.



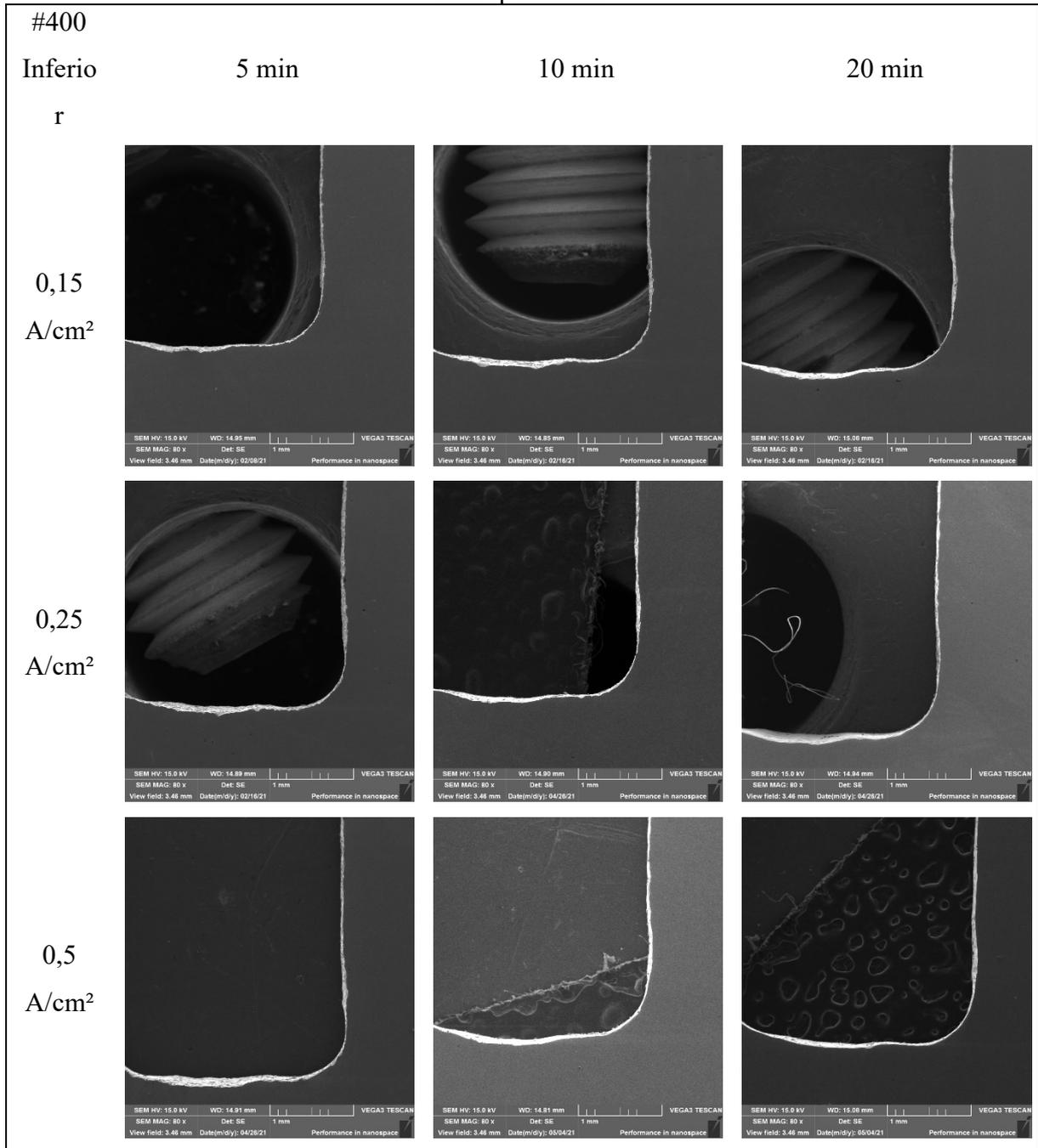
Na Figura 24 é apresentada a curva do canal da face superior das amostras lixadas e eletropolidas nas diferentes condições de tempo e densidade de corrente. O aumento da densidade de corrente nas amostras não provoca efeitos significativos entre as superfícies, para um mesmo tempo. Isto se justifica pelo fato de que a amostra lixada já apresenta uma zona afetada mais suave, com uma menor presença de abrasivos incrustados, que o visto nas amostras com superfície 2B. O mesmo acontece com efeito do tempo, embora ainda se possa observar que as bordas se tornam mais suaves e arredondadas conforme o tempo de eletropolimento aumenta.

Figura 24: Imagens da face superior da região de curva do canal para as amostras #400 com eletropolimento



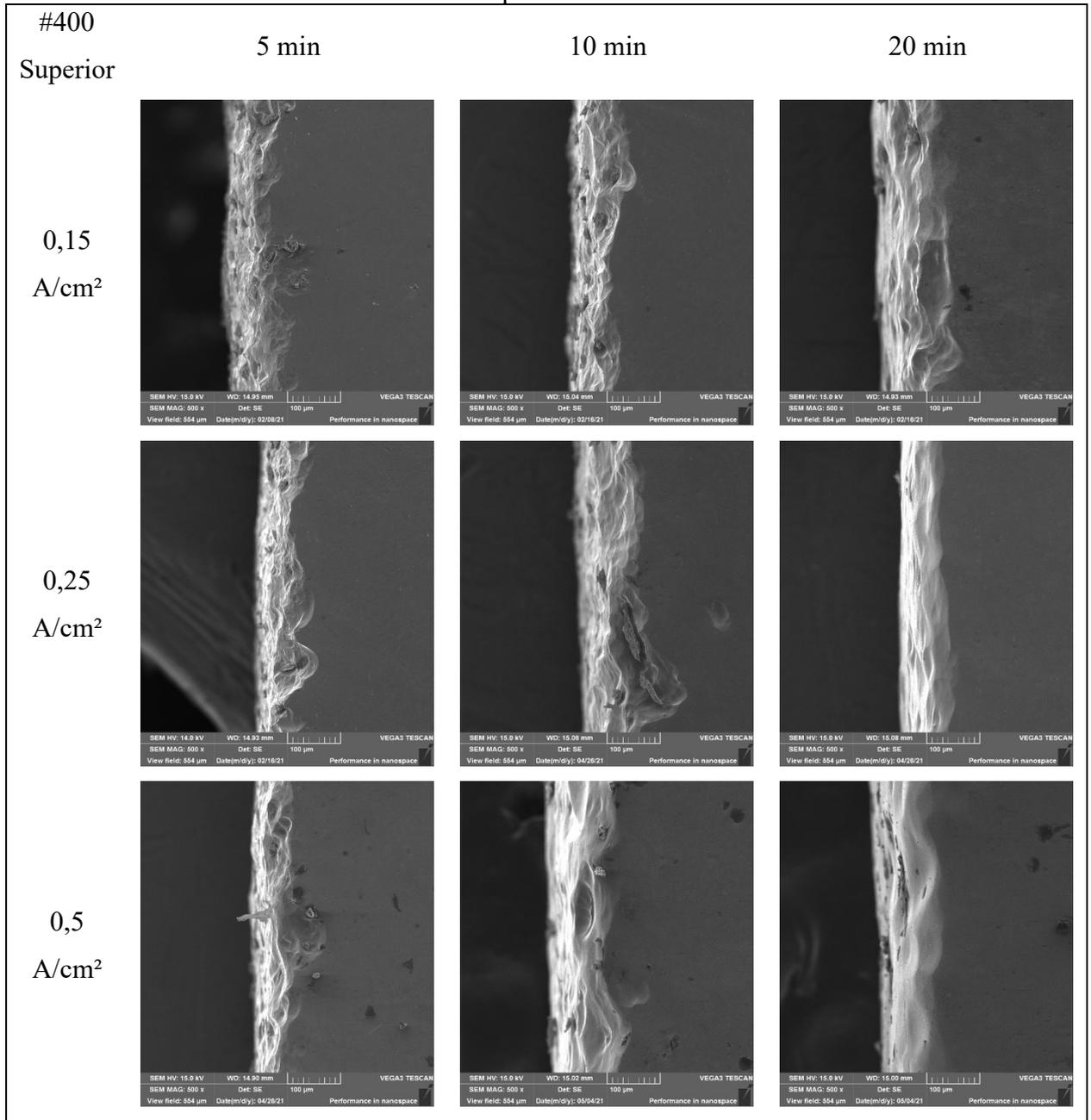
Para a face inferior, Figura 25, as imagens das peças obtidas por todas as condições de eletropolimento parecem similares. As amostras de menor tempo aparentam estar um pouco danificadas na região de borda e menos lisas, mas não é uma diferença significativa.

Figura 25: Imagens da face inferior da região de curva do canal para as amostras #400 com eletropolimento



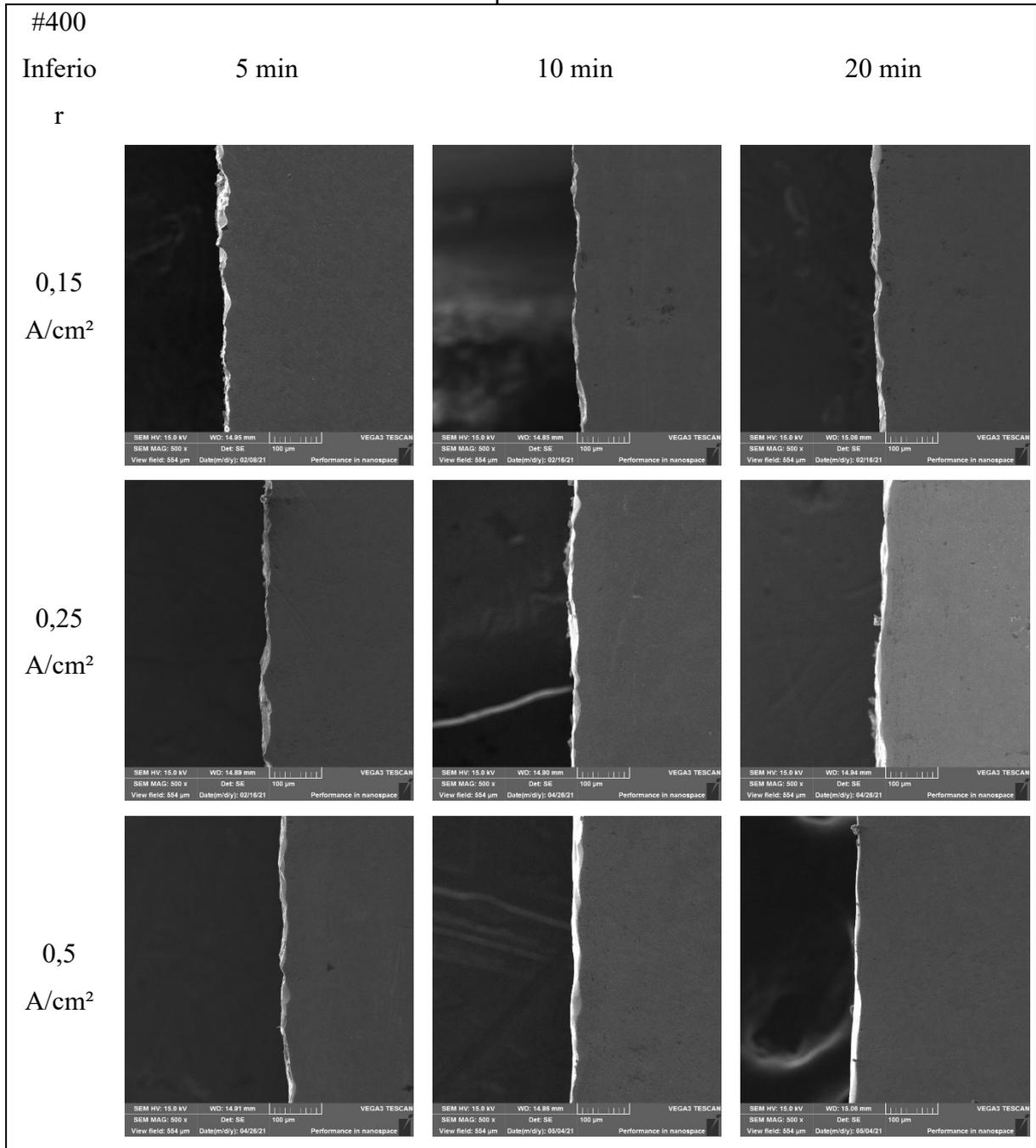
As imagens apresentadas na Figura 26 apresentam a região de borda da face superior das amostras lixadas e eletropolidas com maior magnificação. Assim, é possível observar como a zona afetada está com um aspecto menos grosseiro em comparação com o que foi visto para as amostras em superfície 2B. Entretanto a mesma tendência é observada: quanto maior o tempo mais suave e arredondada se torna a borda e quanto maior a densidade de corrente mais suave é a borda e menos abrasivos são encontrados na superfície.

Figura 26: Imagens da face superior da região do canal aumentada das amostras #400 com eletropolimento.



A face inferior das amostras que foram lixadas e eletropolidas é apresentada na Figura 27. Nessa magnificação, é possível notar que, para menores densidades de corrente e em menores tempos, há a presença de uma pequena rebarba. À medida que o tempo aumenta, a superfície da borda fica mais nivelada.

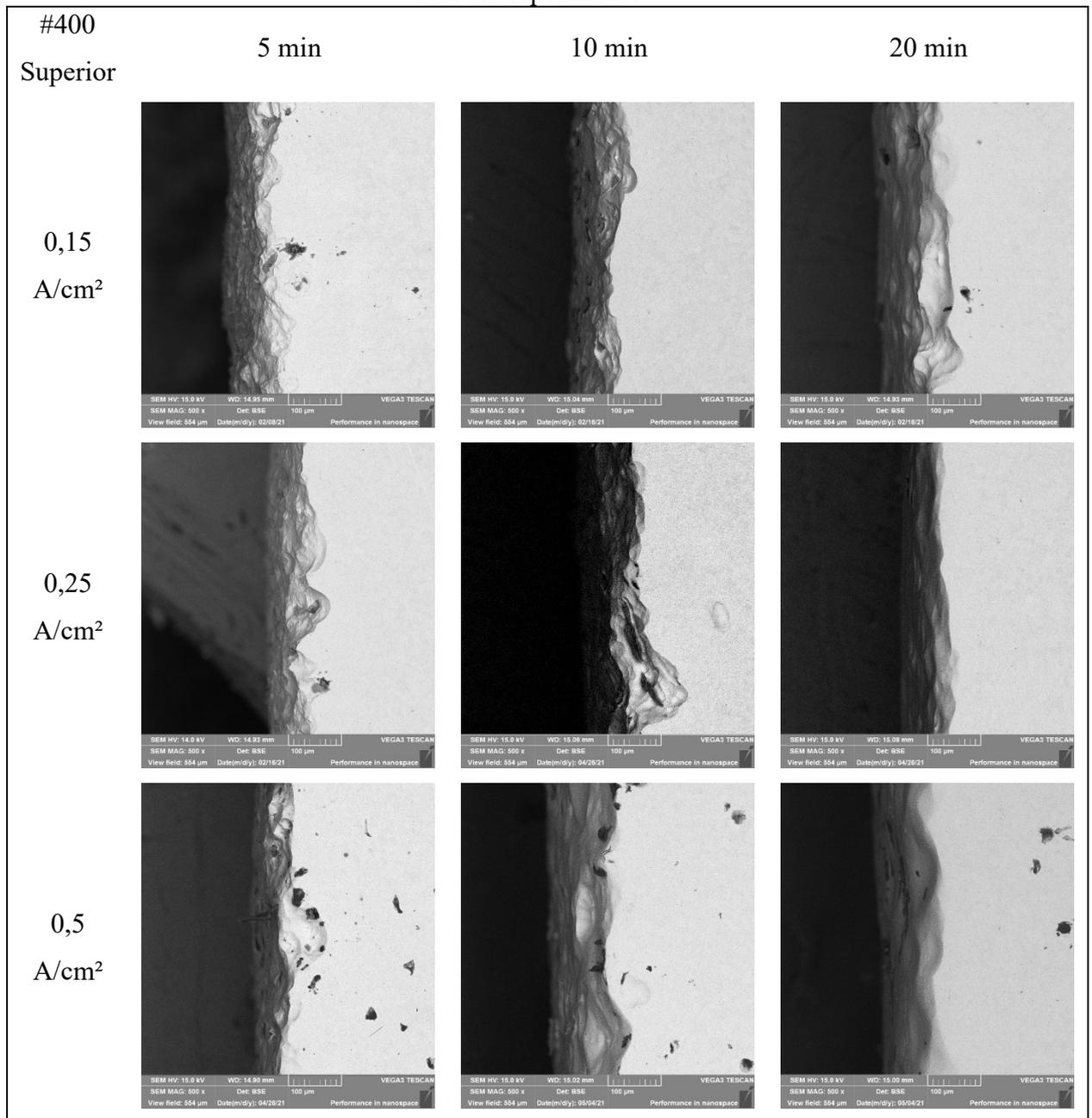
Figura 27: Imagens da face inferior da região do canal aumentada das amostras #400 com eletropolimento.



A Figura 28 apresenta as imagens em BSE da face superior das amostras lixadas e eletropolidas. Com o contraste proporcionado pelo BSE nota-se a redução na quantidade de abrasivo presente nas amostras previamente lixadas em comparação as amostras 2B eletropolidas. O aumento de densidade de corrente acarretou em uma região de borda mais plana, entretanto não é possível relacionar o seu aumento com a quantidade de abrasivo incrustado na superfície. Por outro lado, com o aumento do tempo, é possível notar o

arredondamento da superfície bem como uma redução da quantidade de abrasivo presente na região de borda.

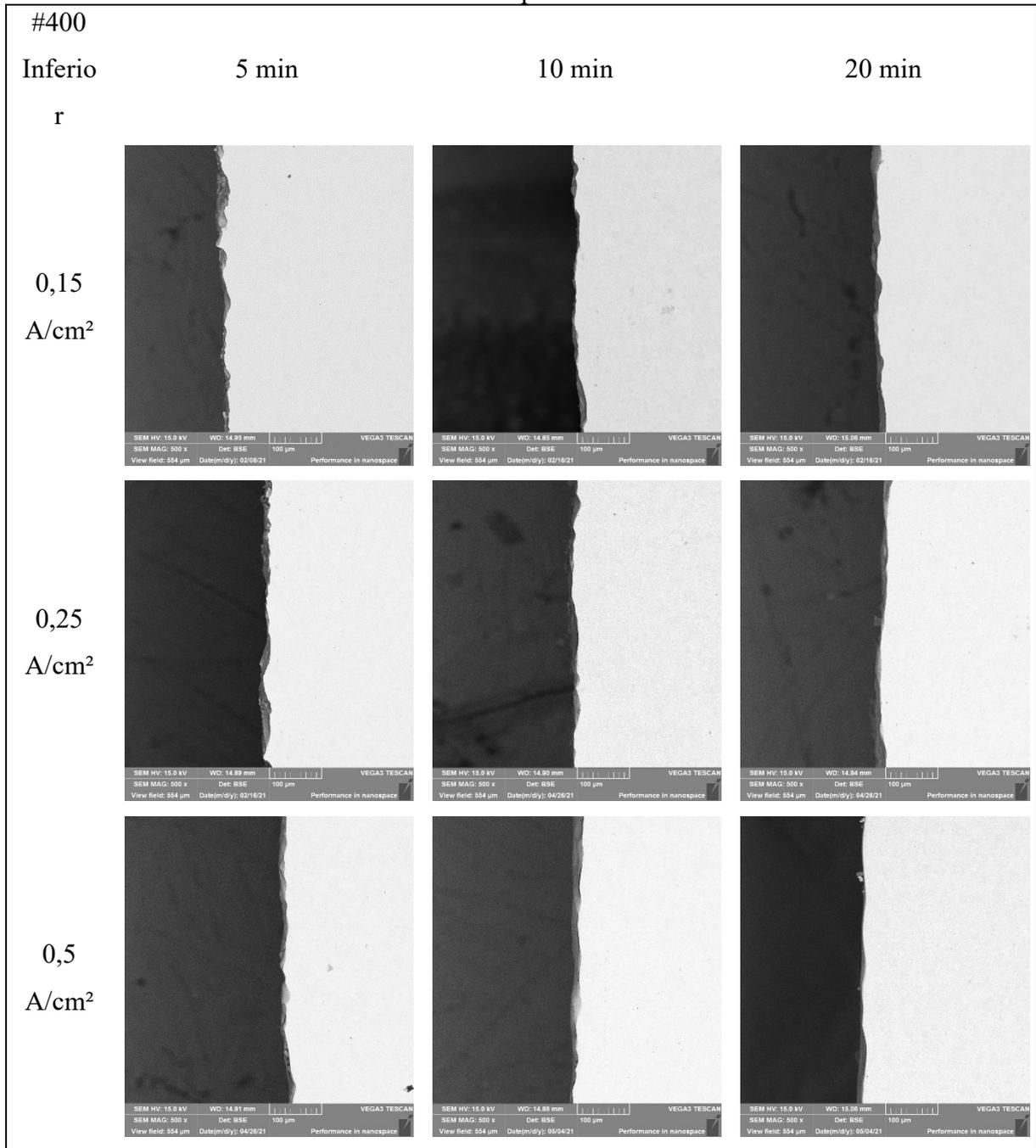
Figura 28: Imagens em BSE da face superior da região do canal aumentada das amostras #400 com eletropolimento.



A Figura 29 mostra imagens BSE da face inferior. Não se observam diferenças significativas em relação ao observado nas imagens em SE. As amostras sujeitas a menores tempos de eletropolimento apresentam uma região mais grosseira da borda enquanto as de

amostras com maiores tempos tornam a superfície da borda mais lisa e nivelada. Não há a presença de abrasivos incrustados na superfície da face inferior em nenhuma das condições, o que mostra que o lixamento retira qualquer resquício de abrasivo dessa região.

Figura 29: Imagens em BSE da face inferior da região do canal aumentada das amostras #400 com eletropolimento.



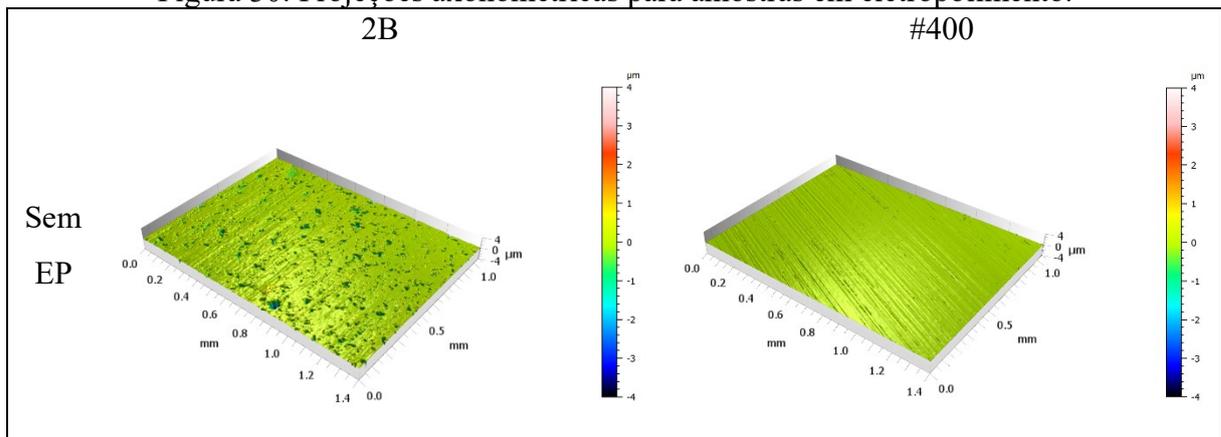
### 4.1.2 Análise via Interferometria Óptica

Interferometria Óptica foi empregada para analisar qualitativa e quantitativamente a região afastada a borda do canal. A partir dos dados obtidos, foram plotadas as projeções axonométricas típicas de cada condição, juntamente com os parâmetros de rugosidade previamente escolhidos (ver seção 3.4.2.2). A seguir serão apresentadas as diferentes análises e comparações, primeiro avaliando somente a influência da densidade de corrente na superfície, seguido da análise da influência do tempo para então avaliar a combinação dos dois parâmetros, em ambas as condições de superfície utilizadas nesse trabalho.

#### 4.1.2.1 Projeções Axonométricas

As projeções axonométricas da condição inicial, ou seja, sem eletropolimento, para ambas as superfícies estudadas é apresentada na Figura 30:

Figura 30: Projeções axonométricas para amostras em eletropolimento.



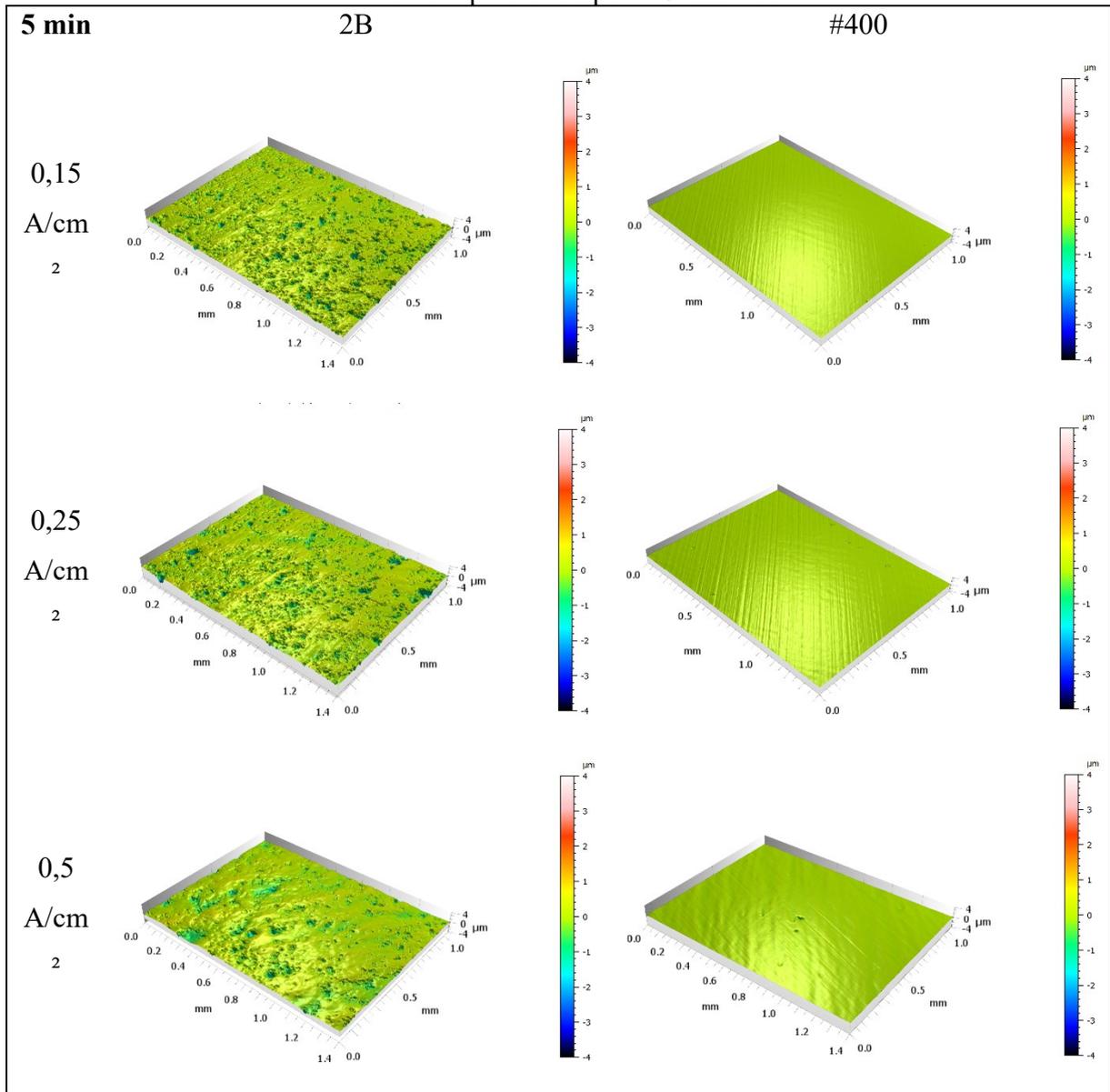
A projeção da superfície 2B, sem eletropolimento, apresenta características provenientes do seu processo de laminação a frio e posterior recozimento, sendo evidenciados platôs em clara orientação transversal ao maior comprimento da projeção, com vales entre eles, gerados pela deformação plástica oriunda do processo de laminação. Além disso é possível notar alguns vales mais profundos dispersos aleatoriamente pela superfície. Vale ressaltar que o jato d'água abrasivo afeta não somente a região de borda como também uma área próxima, onde não há necessariamente remoção de material, mas onde ocorre uma deformação pelo impacto de partículas abrasivas que estão mais afastadas do diâmetro de corte é observada.

Já para a amostra lixada em mesh #400, sem eletropolimento, é possível notar que o processo manual de lixamento retira todo o resquício da superfície produzida pela laminação.

O aspecto que permanece é característico do processo, com ranhuras orientadas na direção em que ocorreu o lixamento.

A Figura 31 mostra as projeções típicas para o tempo fixo de 5 minutos, nas três densidades de corrente estudadas, visando o acompanhamento da evolução do processo de polimento eletrolítico com a corrente.

Figura 31: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função da densidade de corrente para o tempo de 5 minutos.



No geral, para ambas as condições de superfície, as densidades de corrente de 0,15 e 0,25 A/cm<sup>2</sup> apresentam resultados similares. Para a superfície 2B ainda é possível notar uma

orientação oriunda do processo de laminação e um aspecto um pouco mais rugoso da superfície em relação à condição inicial. Para a condição lixada, as duas densidades de corrente aplicadas para o tempo de cinco minutos não são suficientes para retirar o aspecto de lixamento das amostras, embora seja possível notar uma suavização das marcas lixadas.

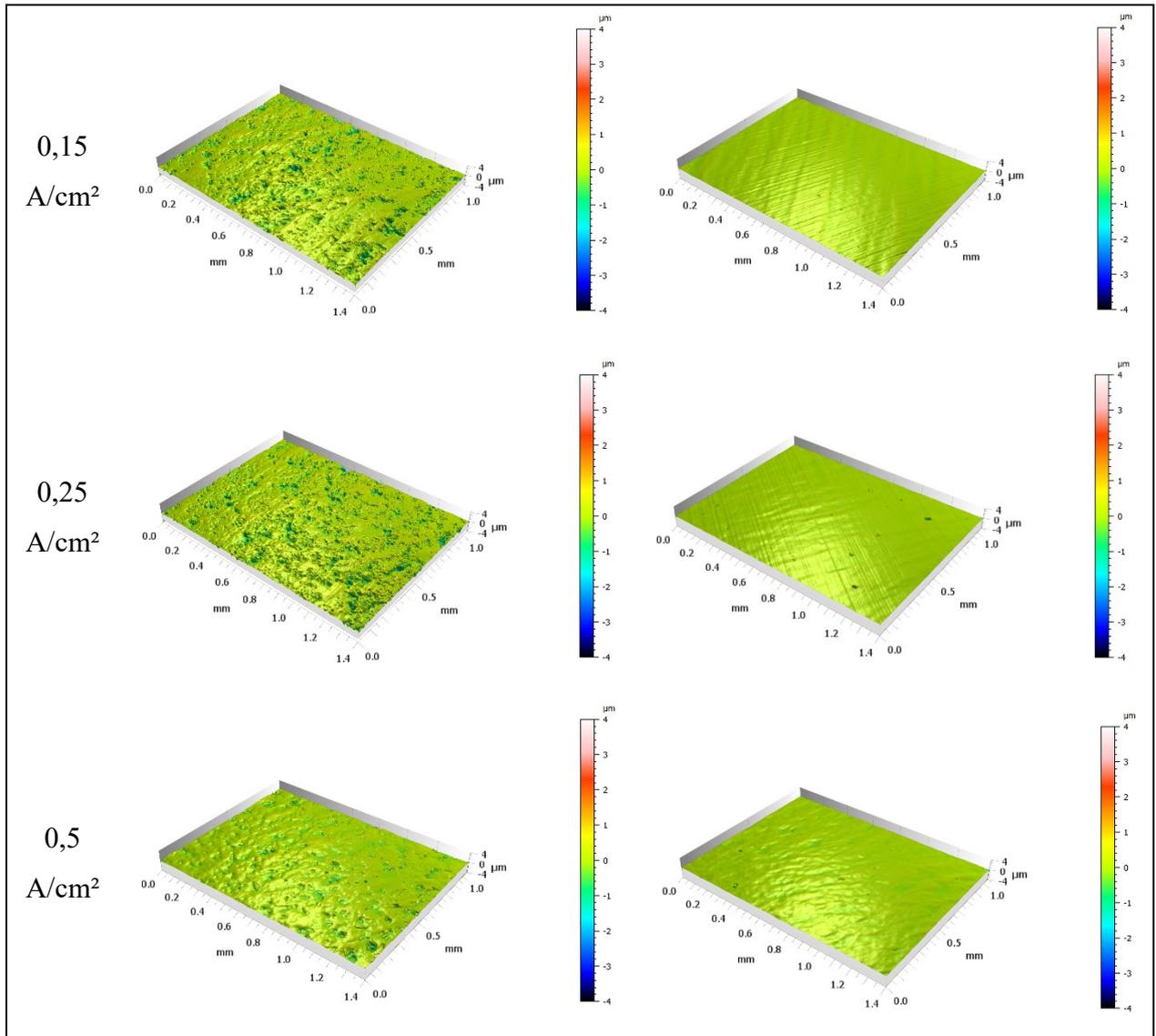
Já o eletropolimento para a densidade de corrente de  $0,5 \text{ A/cm}^2$  é mais efetivo, quando comparado às outras condições. Nota-se que a orientação de laminação, observada na condição 2B, é eliminada da amostra e há uma certa suavização nas regiões de platô da superfície. Entretanto os vales ainda estão presentes e mais arredondados. O eletropolimento praticamente eliminou as ranhuras das superfícies lixadas, com exceção de uma região mais ao centro da projeção, onde ainda é possível notar algumas ranhuras provindas do processo.

Na Figura 32 são apresentadas as projeções axonométricas das amostras para um tempo fixo em 10 minutos. Nota-se uma tendência com o aumento da densidade de corrente. A superfície 2B, sujeitas à  $0,15$  e  $0,25 \text{ A/cm}^2$ , apresentam aspectos similares entre si e são mais rugosas que a amostra sem eletropolimento, com vales espalhados ao longo de sua extensão. Além disso, ainda é possível observar resquícios do processo de laminação mesmo com a suavização promovida pelo eletropolimento. Tal característica também é observada nas amostras com densidade  $0,15$  e  $0,25 \text{ A/cm}^2$ , para uma superfície inicial #400, as quais ainda apresentam as marcas de lixamento mesmo após o polimento eletrolítico. Entretanto, não há a presença de vales profundos quando comparado às amostras obtidas a partir de superfície 2B, seguindo a tendência observada no tempo de 5 minutos.

Aumentando a densidade de corrente para  $0,5 \text{ A/cm}^2$ , em ambas as condições de superfície, é possível notar uma evolução do eletropolimento. Para a condição 2B, os platôs da superfície se tornaram mais lisos e os vales maiores tiveram sua borda arredondada, fazendo com que pareçam maiores. Na amostra cujo eletropolimento é feito sobre uma superfície lixada (#400), a projeção axonométrica se mostra nivelada e lisa, sem resquício dos processos anteriores ao polimento, sendo que todas as marcas do lixamento são eliminadas, deixando a amostra com uma aparência ondulada, característica do eletropolimento.

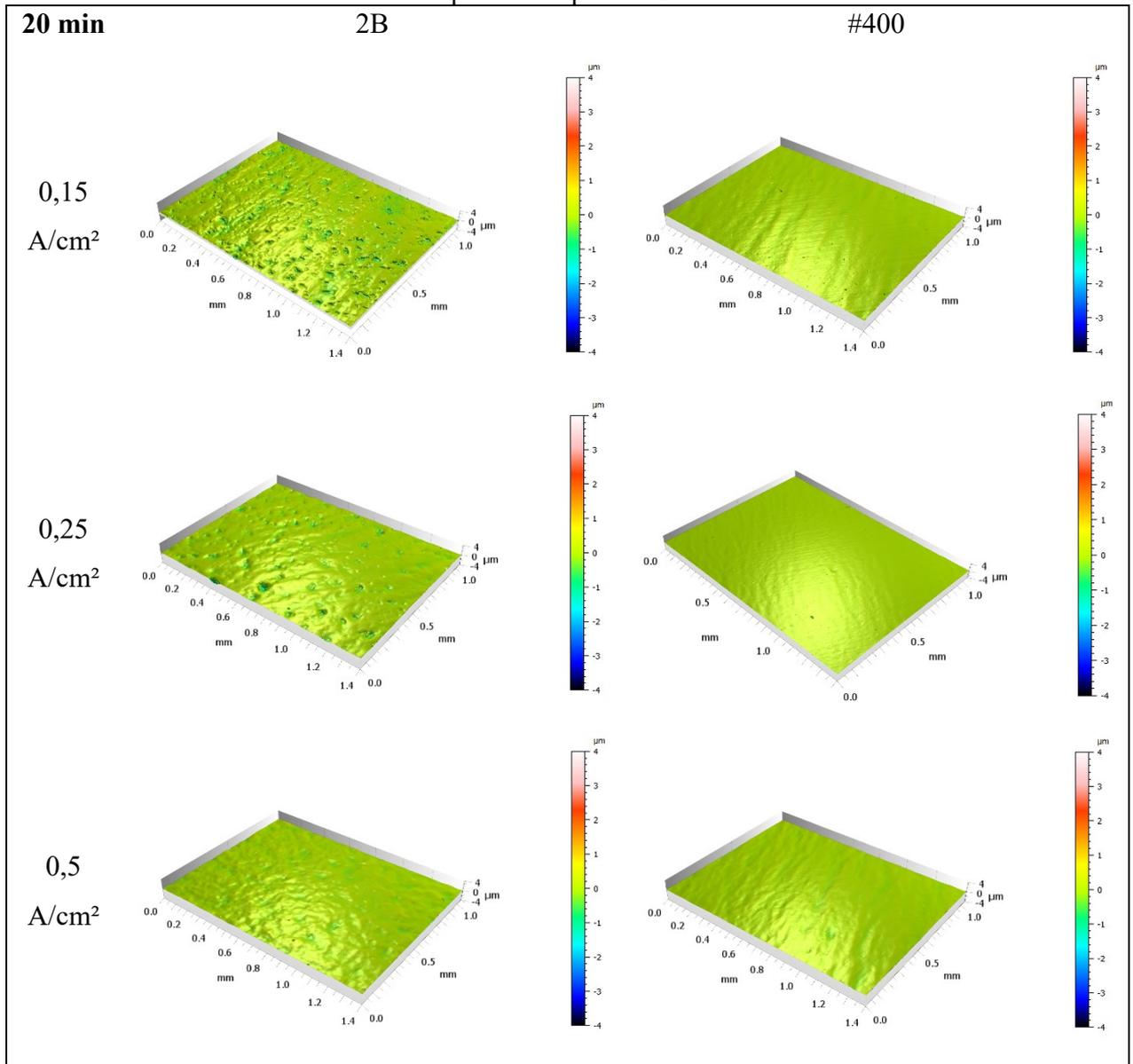
Figura 32: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função da densidade de corrente para o tempo de 10 minutos.

<b>10 min</b>	2B	#400
---------------	----	------



A Figura 33 traz as projeções axonométricas das diferentes condições de densidade de corrente para o tempo de 20 minutos. Ao contrário do que foi observado nas condições anteriores, consegue-se distinguir algumas diferenças na qualidade das amostras que sofreram eletropolimento com densidades de corrente de 0,15 e 0,25 A/cm<sup>2</sup>. A amostra 0,15 A/cm<sup>2</sup>, na superfície 2B, apresenta um aspecto mais suave em relação a amostra sem eletropolimento, entretanto ainda possui marcas oriundas da laminação e alguns vales maiores e arredondados espalhados aleatoriamente em sua extensão. Tal característica não é encontrada para a amostra lixada e eletropolida em 0,15 A/cm<sup>2</sup>, cuja projeção axonométrica é menos rugosa e nivelada, com apenas leves marcas de lixamento e alguns defeitos menores espalhados por sua extensão.

Figura 33: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função da densidade de corrente para o tempo de 20 minutos.



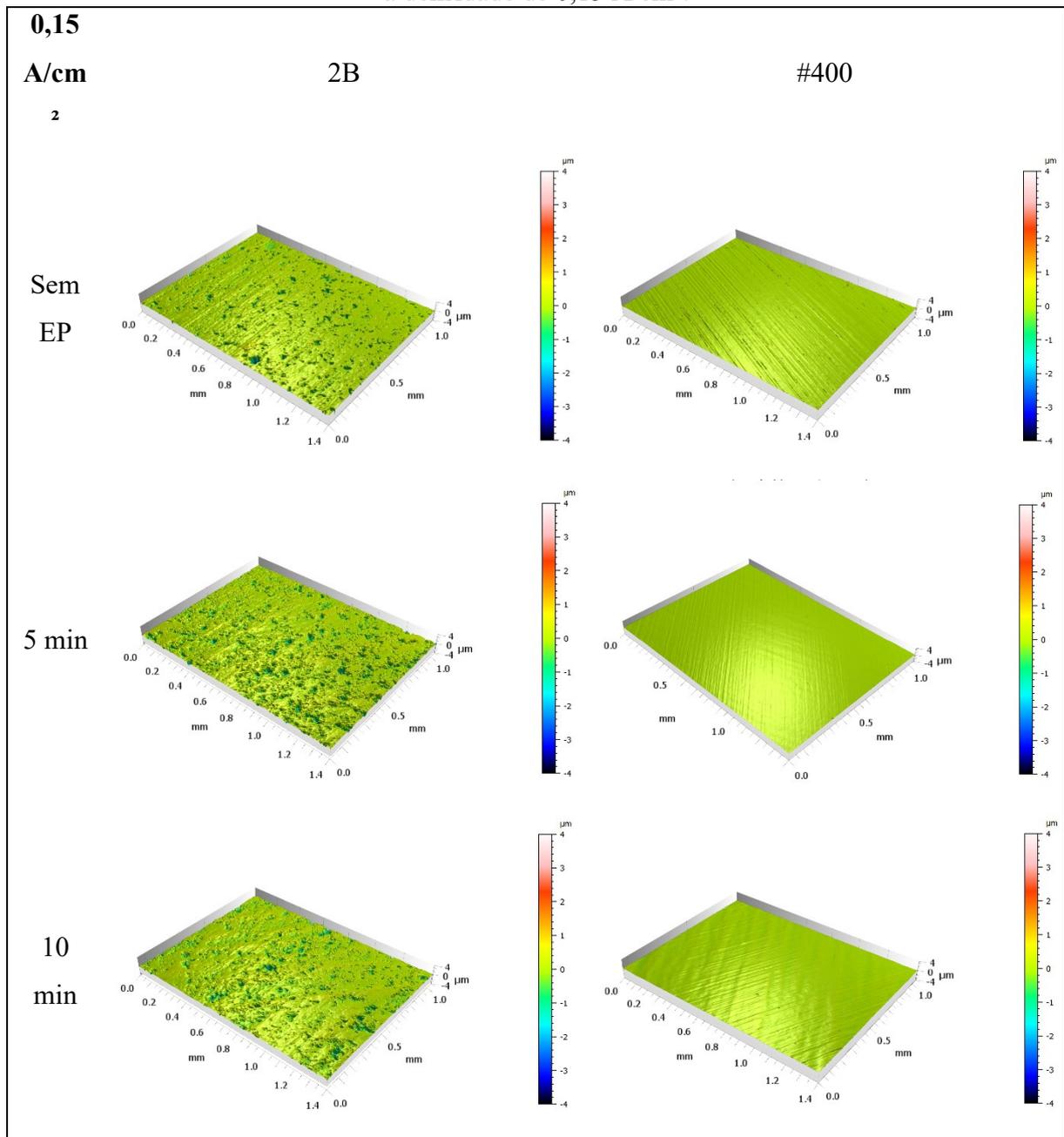
Ao aumentar a densidade de corrente para 0,25 A/cm<sup>2</sup> sobre a superfície 2B, logo nota-se uma diminuição no número de vales presentes pela projeção e os platôs entre vales se tornaram mais suaves e ondulados. Além disso, as marcas provenientes da laminação foram eliminadas. Por sua vez, a amostra de 0,25 A/cm<sup>2</sup> lixada apresentou um aspecto bem polido, com poucas ondulações, ou seja, o eletropolimento é bastante efetivo.

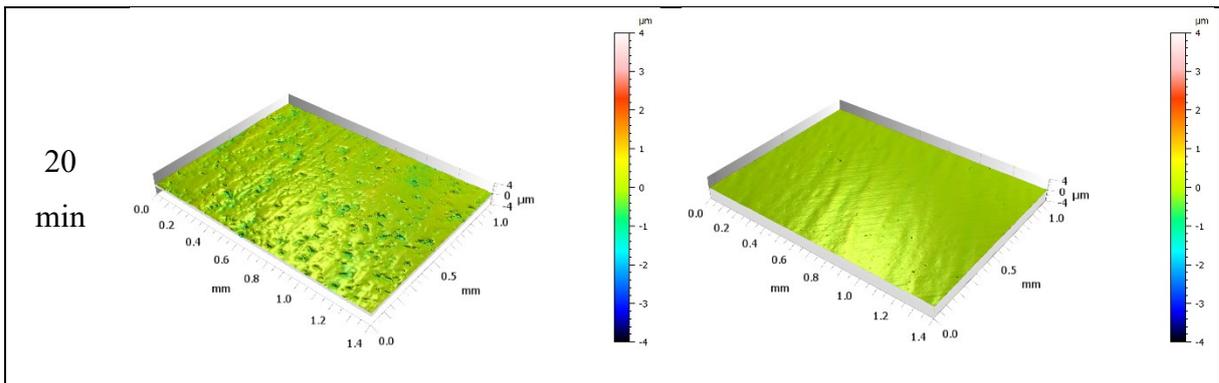
Já na densidade de corrente de 0,5 A/cm<sup>2</sup>, observa-se resultados similares entre os dois tipos de superfícies iniciais. A amostra 2B apresentou resquícios leves do que eram os vales mais profundos nas condições anteriores, mostrando que o eletropolimento nivelou adequadamente a superfície, enquanto que a amostra previamente lixada se mostrou

ligeiramente mais suave, com um aspecto mais ondulado que o apresentado na amostra sujeita a uma densidade de corrente de  $0,25 \text{ A/cm}^2$ , na mesma condição de superfície.

Para observar melhor o efeito do tempo no eletropolimento e sua influência na evolução da textura da superfície, serão apresentadas a seguir as projeções axonométricas, fixando-se a densidade de corrente e variando o tempo. A Figura 34 mostra a condição de  $0,15 \text{ A/cm}^2$  nos diferentes tempos estudados.

Figura 34: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função do tempo para a densidade de  $0,15 \text{ A/cm}^2$ .





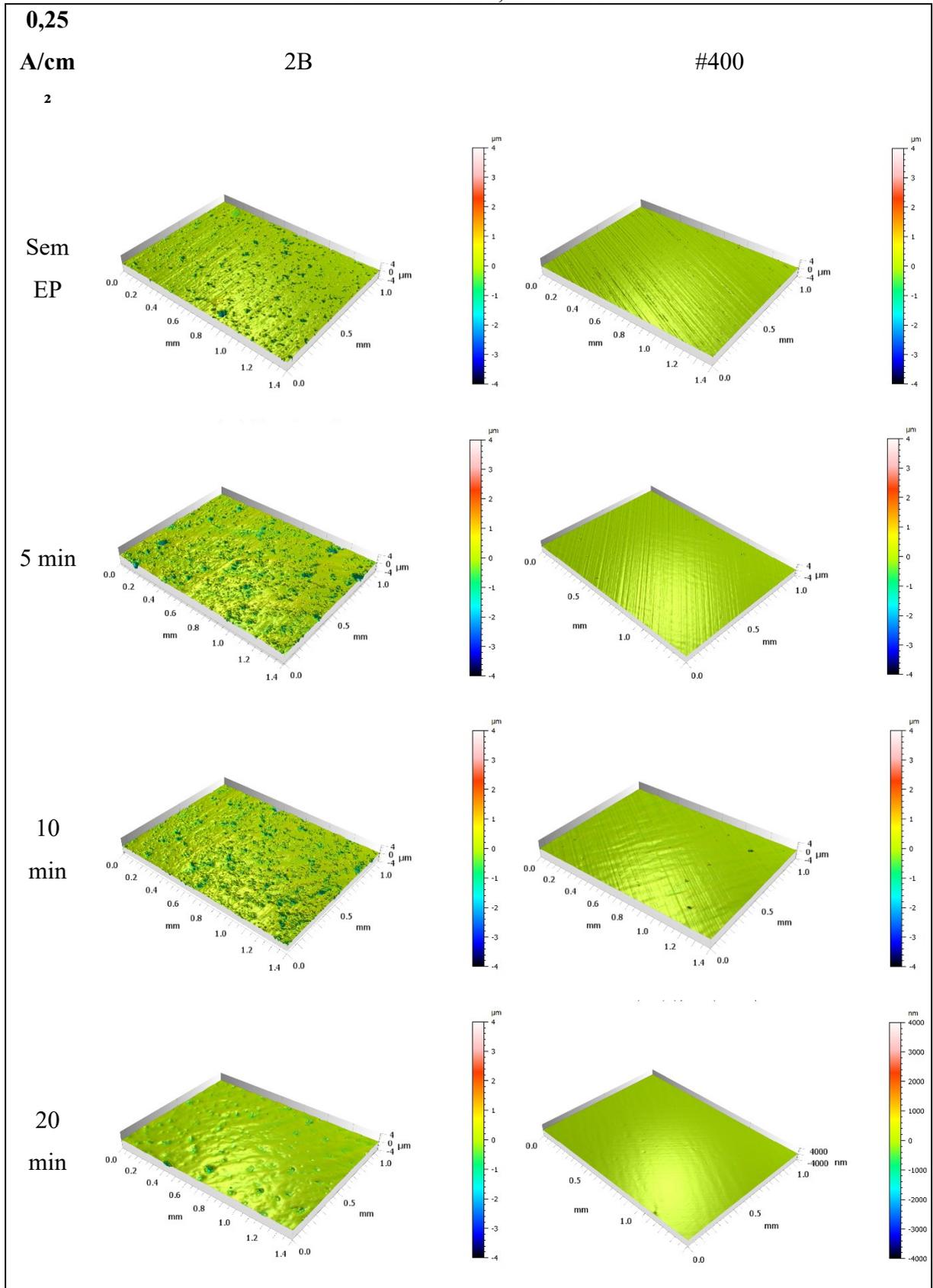
As amostras em superfície 2B com 5 minutos, apresentam aspecto mais rugoso que da amostra sem eletropolimento, com vales profundos espalhados aleatoriamente. À medida que se aumenta o tempo, a superfície vai se tornando mais suave: em 10 minutos os vales parecem diminuir de tamanho e número. Essa tendência segue para o tempo de 20 minutos que possui poucos vales em relação às duas amostras anteriores, em menor tamanho e com as bordas mais arredondadas. Em todas as três condições de tempo para a amostra 2B é possível notar a presença de marcas oriundas do processo de laminação.

As amostras lixadas previamente ao eletropolimento, ainda apresentaram ranhuras provenientes do lixamento, sendo os defeitos ou vales menos profundos que os da amostra 2B. A partir do tempo de 10 minutos a superfície começou a apresentar um aspecto ondulado que se intensificou com o tempo de 20 minutos.

A Figura 35 mostra a evolução do acabamento da superfície eletropolida com o passar do tempo, para a densidade de corrente de  $0,25 \text{ A/cm}^2$ . Para a superfície 2B, nota-se que o tempo de 5 minutos deixa a superfície com um aspecto rugoso, com vales mais profundos espalhados pela superfície, como em condições vistas anteriormente. Aumentando o tempo para 10 minutos é possível observar uma superfície parecida, mas sem os vales mais profundos apresentados para 5 minutos. A amostra de 20 minutos, pelo contrário, se mostra mais suave, com uma certa ondulação com seus vales arredondados.

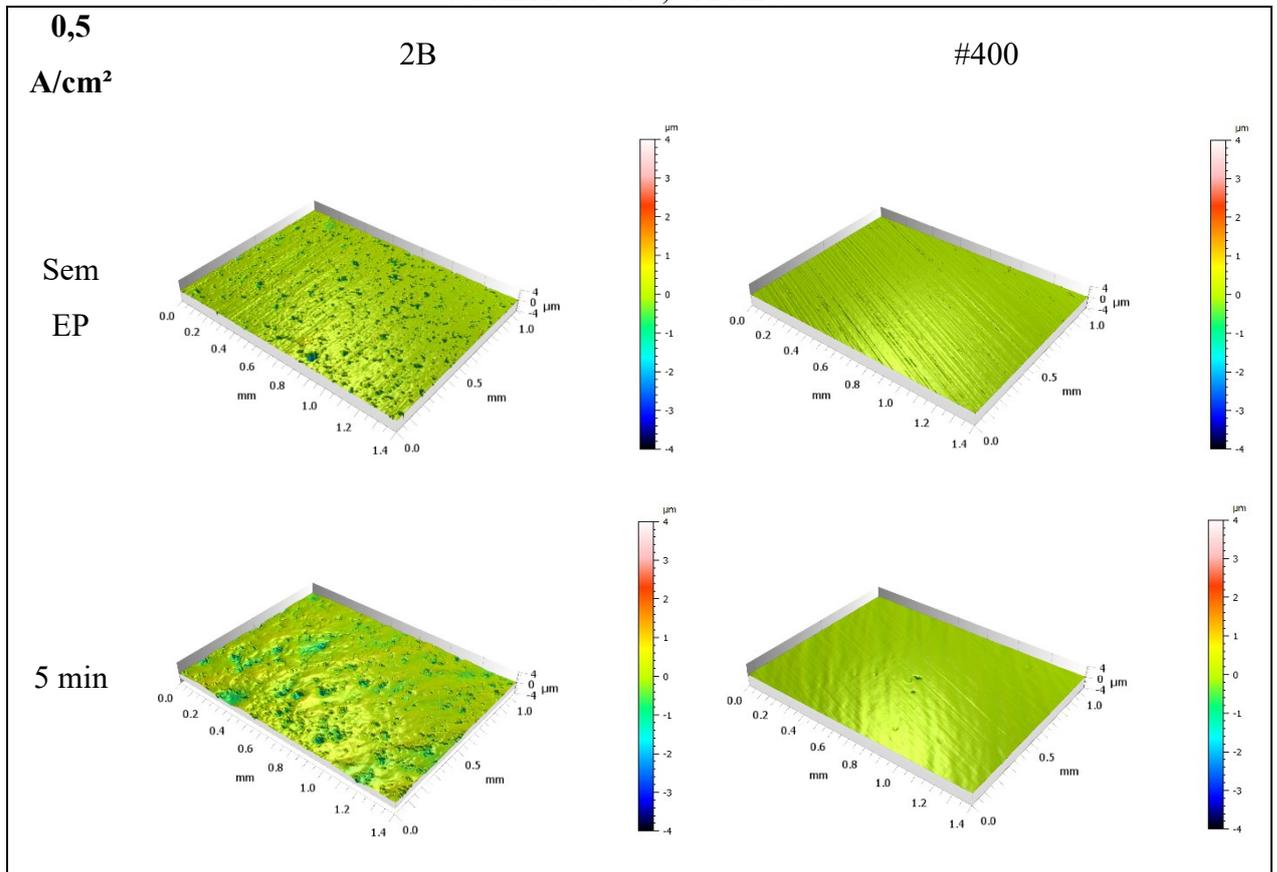
De modo geral, o efeito do tempo sobre as amostras das superfícies #400 e eletropolidas segue a mesma tendência. Na amostra de 5 minutos é possível observar a presença das ranhuras características do processo de lixamento. Em 10 minutos há uma diminuição dessas marcas e a amostra começa a apresentar um aspecto ondulado, com alguns defeitos pontuais espalhados aleatoriamente pela superfície. Aumentando o tempo para 20 minutos, a amostra apresenta uma projeção nivelada e um aspecto levemente ondulado, sendo quase impossível ver ranhuras provenientes do lixamento.

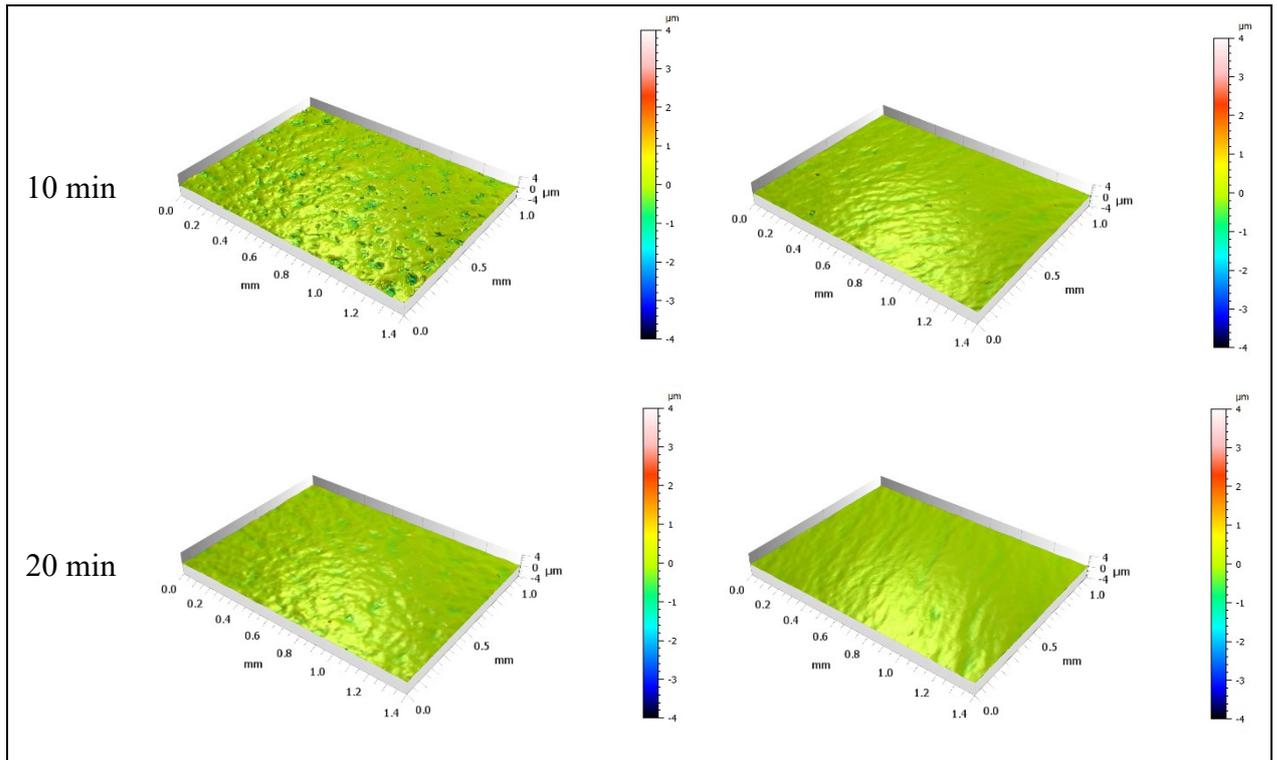
Figura 35: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função do tempo para a densidade de  $0,25 \text{ A/cm}^2$ .



A Figura 36 mostra a evolução das projeções axonométricas com o passar do tempo, para uma densidade de corrente fixa em  $0,5 \text{ A/cm}^2$ . Para as amostras da superfície 2B, percebe-se que o tempo de 5 minutos deixa a amostra com um aspecto rugoso, com alguns platôs lisos e suaves, com vales mais profundos espalhados pela superfície, porém sem uma direção definida e com topografia arredondada. Para o tempo de 10 minutos, tem-se a mesma tendência mostrada pela amostra de 5 minutos, com a diferença que os vales estão em menor profundidade, influenciados pelo maior tempo de eletropolimento. Aumentando este tempo para 20 minutos a amostra fica mais suave e ondulada, apenas com resquícios do que eram os vales mais profundos, mostrando que o eletropolimento conseguiu nivelar essa superfície.

Figura 36: Projeções axonométricas da evolução do eletropolimento em função do tempo para a densidade de  $0,5 \text{ A/cm}^2$ .





Já para a superfície lixada #400, o tempo de 5 minutos torna a amostra lisa e suave, com marcas provenientes do lixamento e alguns defeitos pontuais aparentes. A amostra de 10 minutos apresenta um aspecto parecido com a última, de 5 minutos, com exceção de que não apresenta marcas oriundas do lixamento e também apresenta certa ondulação. A amostra de 20 minutos é polida e sem marcas de lixamento ou outros defeitos pela superfície.

A partir de todos os resultados apresentados nessa subseção, pode-se observar que o tempo e a densidade de corrente parecem agir em diferentes aspectos da textura da superfície. Como visto na teoria do eletropolimento, a densidade de corrente influencia no quanto a dissolução dos picos de rugosidade acontece, afetando os vales, picos e platôs presentes nas superfícies das amostras avaliadas, ou seja, quanto maior for a densidade de corrente, menores os vales e picos observados. Na verdade, o tempo age na duração da dissolução anódica, de forma que, quanto maior o tempo, mais essa dissolução ocorre e mais nivelada a superfície se torna.

Além disso, observa-se que os resultados foram influenciados pelo tipo de superfície inicial da amostra. As diferenças vistas para as superfícies 2B e lixada (#400) eram bem claras e isso se refletiu na forma como suas projeções se apresentaram. As amostras em superfície 2B possuíam uma rugosidade inicial maior e para que o eletropolimento fosse efetivo, foi necessário que um tempo e densidade mais altos deste estudo, 20 min e 0,5 A/cm<sup>2</sup>. Já as

amostras que foram previamente lixadas, apresentaram uma superfície visivelmente menos rugosa e mais suave a partir dos parâmetros intermediários, 10 min e 0,25 A/cm<sup>2</sup>.

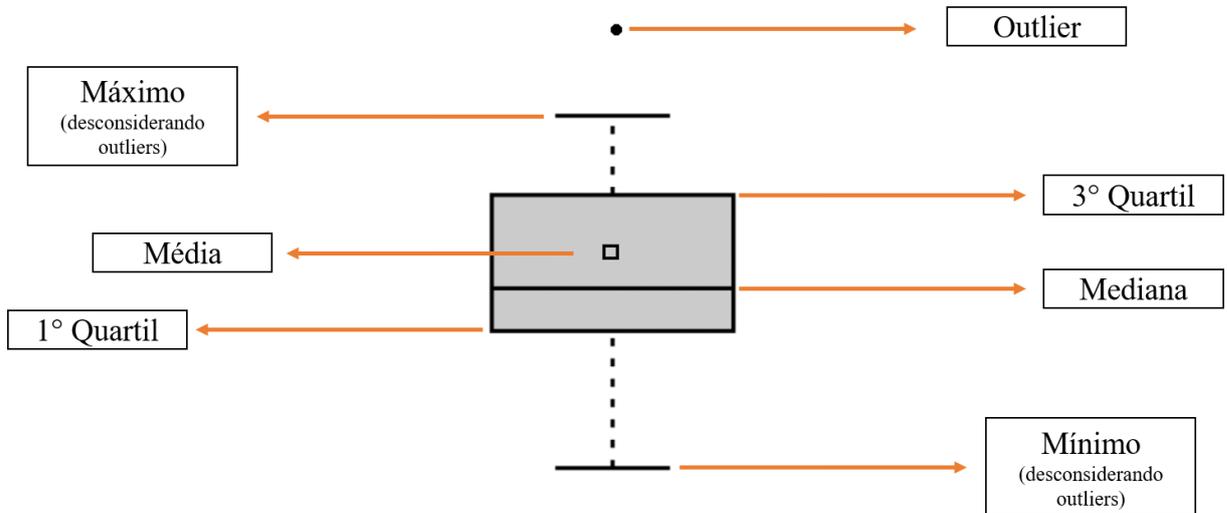
Entretanto é importante salientar que o processo de lixamento manual é pouco reprodutível e isso pode acarretar em diferentes resultados, como foi o caso das amostras de 0,15 e 0,25 A/cm<sup>2</sup> para o tempo de 5 minutos, onde a amostra com maior densidade de corrente apresentou um aspecto mais rugoso. Logo este tipo de questão deve ser levado em consideração na decisão do melhor parâmetro a ser utilizado.

#### *4.1.2.2 Parâmetros de Rugosidade*

Para analisar as superfícies de forma quantitativa, foram obtidos os parâmetros de rugosidade a partir das projeções axonométricas de cada condição. As variáveis que influenciam o eletropolimento serão primeiramente apresentadas em gráficos mantendo-se o tempo fixo e variando-se a densidade de corrente e, em seguida, mantendo-se a densidade de corrente fixa e variando o tempo e por último, serão apresentados os gráficos que avaliam a influência do produto dessas duas variáveis. Para o melhor entendimento dos dados obtidos, os resultados serão apresentados na forma de diagrama de caixas, os quais apresentam de forma organizada algumas informações estatísticas, como ilustrado na Figura 37.

Os valores de 1º quartil representam o 25º percentil da amostragem, ou seja, abaixo dele estão 25% dos dados, enquanto que o 3º quartil mostra que 75% dos dados estão abaixo desse valor. A diferença entre o 3º e o 1º quartil ainda representa o intervalo interquartil, que dá uma ideia de dispersão de resultados, sendo mais estatisticamente confiável que a diferença entre máximo e mínimo por não sofrer influências de outliers, ou valores discrepantes (ICMC JÚNIOR, 2021).

Figura 37: Representação esquemática de diagrama de caixas.

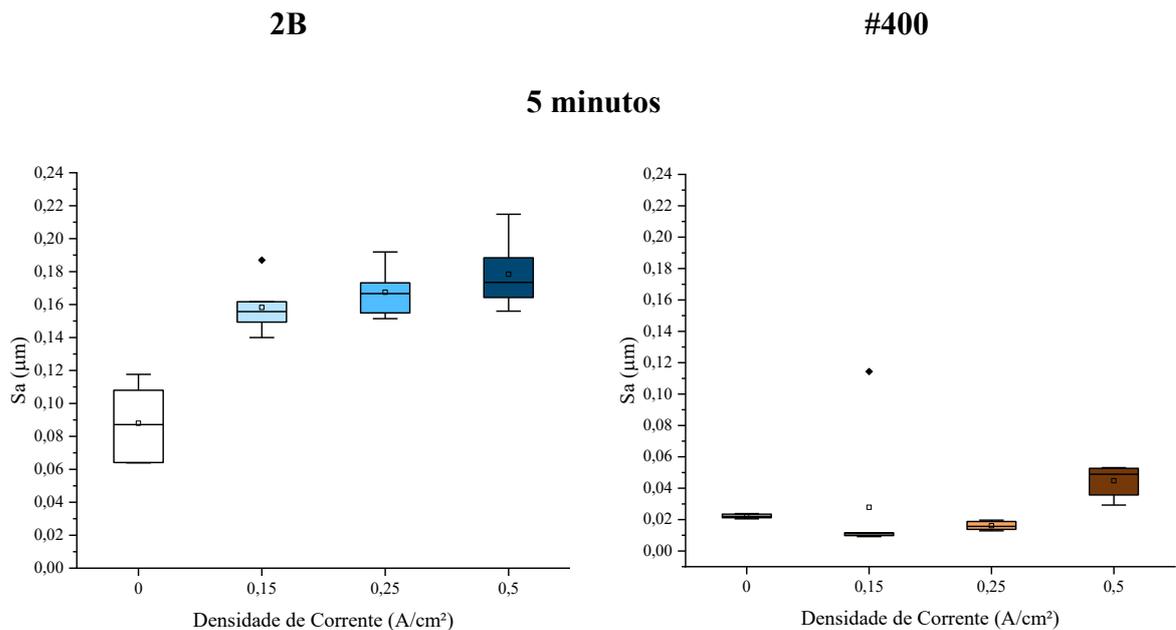


Fonte: Adaptado de ICMC Júnior (2021).

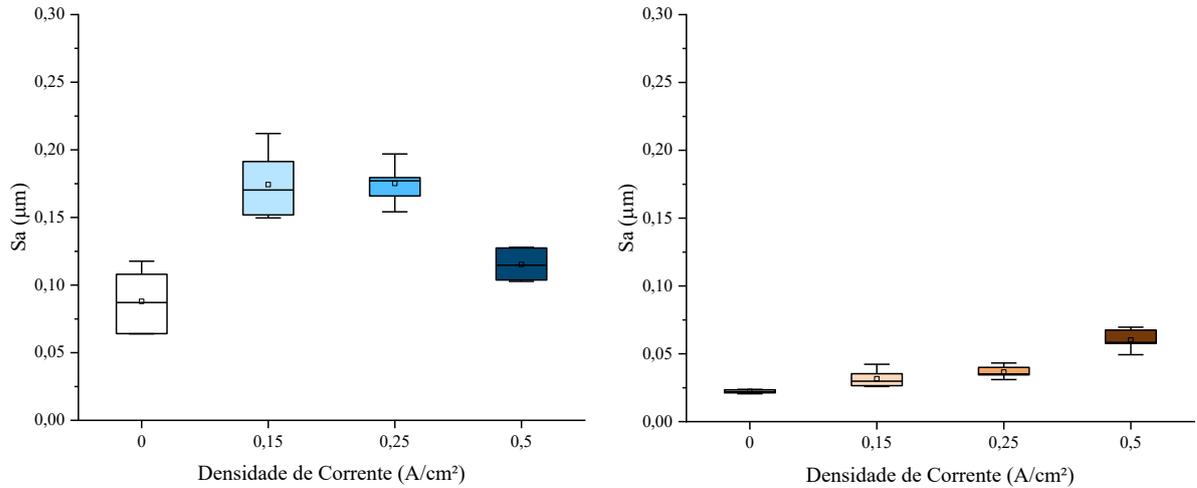
#### 4.1.2.2.1 Influência da Densidade de Corrente

Na presente análise, será fixado um tempo, e apresentado gráficos da distribuição de resultados em função da densidade de corrente para ambas as superfícies estudadas neste trabalho. A Figura 38 mostra o parâmetro  $S_a$  para os diferentes tempos, o qual representa a textura da superfície, ou seja, uma média geral entre os picos e vales. A Tabela 6 mostra os principais valores retirados dos gráficos.

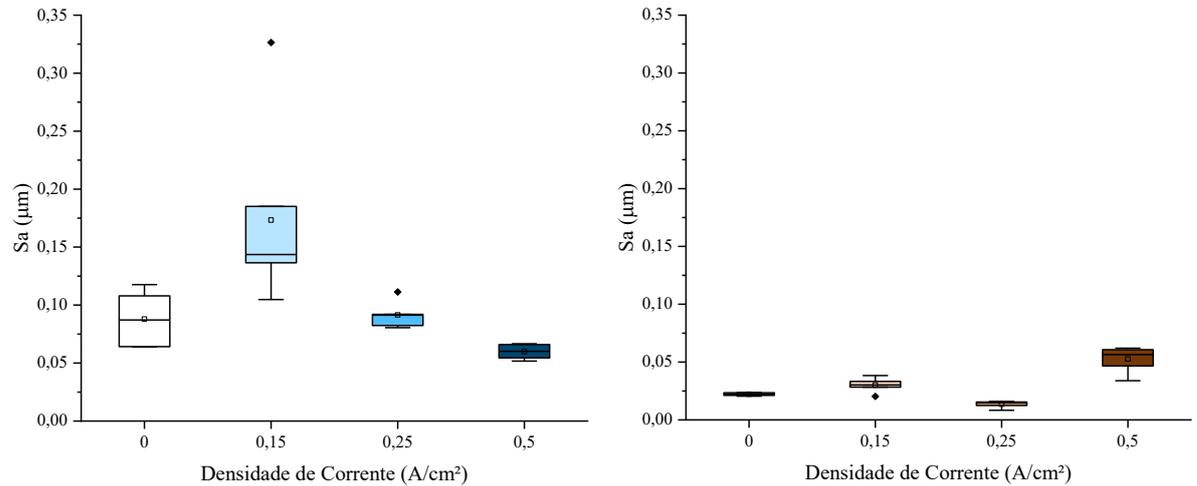
Figura 38:  $S_a$  em função da densidade de corrente para os diferentes tempos



### 10 minutos



### 20 minutos



Dos gráficos das amostras para a superfície 2B para 5 minutos, observa-se que há um aumento da rugosidade média, com o aumento da densidade de corrente, conforme o constatado pelas projeções axonométricas. Para os tempos de 10 e 20 minutos há um crescimento nos valores de Sa, seguido de uma diminuição à medida que a densidade de corrente aumenta.

A partir dos gráficos das amostras cuja superfície inicial foi lixada (#400), nota-se uma maior homogeneidade dos resultados e valores de Sa menores que o observado para as amostras em 2B. A rugosidade média (Sa) dessas amostras varia com o tempo, sendo observado primeiramente, uma leve diminuição para o tempo de 5 minutos com um aumento até chegar em valores mais altos que a condição sem eletropolimento, para a densidade de corrente em 0,5 A/cm<sup>2</sup>. Porém no tempo de 10 minutos não se observa a mesma tendência observada para a amostra 2B. Com o aumento da densidade de corrente, a rugosidade média cresce, sem em nenhum momento diminuir. A tendência mostrada para o tempo de 20 minutos é diferente de

tendências até então observadas em outras amostras, embora o aspecto homogêneo e pouco disperso tenha se mantido.

Tabela 6: Principais valores retirados dos gráficos de Sa em função da densidade de corrente.

Superfície Inicial	j (A/cm <sup>2</sup> )	t (min)	Mediana (μm)	Intervalo Interquartílico (μm)	Diferença em relação condição inicial (%)
2B	0	0	0,087	0,044	0%
2B	0,15	5	0,156	0,012	79%
2B	0,25	5	0,167	0,018	91%
2B	0,5	5	0,173	0,024	99%
2B	0,15	10	0,170	0,040	95%
2B	0,25	10	0,177	0,014	103%
2B	0,5	10	0,115	0,024	32%
2B	0,15	20	0,144	0,049	65%
2B	0,25	20	0,091	0,010	5%
2B	0,5	20	0,060	0,012	-31%
#400	0	0	0,022	0,002	0%
#400	0,15	5	0,011	0,002	-51%
#400	0,25	5	0,016	0,005	-29%
#400	0,5	5	0,049	0,017	121%
#400	0,15	10	0,030	0,009	35%
#400	0,25	10	0,035	0,005	59%
#400	0,5	10	0,058	0,010	164%
#400	0,15	20	0,030	0,005	37%
#400	0,25	20	0,015	0,003	-34%
#400	0,5	20	0,056	0,014	155%

No geral, apenas quatro condições apresentaram reduções em seu Sa em relação a condição sem eletropolimento, que possui uma mediana de 0,087 μm para superfície 2B e 0,022 μm para a superfície lixada: superfície #400, t = 5 min e j = 0,15 A/cm<sup>2</sup>, com uma mediana de 0,011 μm; superfície #400, t = 5 min e j = 0,25 A/cm<sup>2</sup>, com uma mediana de 0,016 μm; superfície #400, t = 20 min e j = 0,25 A/cm<sup>2</sup>, com mediana de 0,015 μm; e superfície 2B, t = 20 min e j = 0,5 A/cm<sup>2</sup>, com mediana de 0,060 μm. Tais reduções alcançadas concordam com os estudos apresentados anteriormente, usados como referências neste trabalho.

Conforme o que foi observado pelas projeções axonométricas, o acabamento da superfície inicial tem influência direta nos resultados do eletropolimento e assim nos valores de Sa. As amostras que foram lixadas previamente ao eletropolimento apresentaram valores de rugosidade média menor que as amostras em superfície inicial 2B. Entretanto, algumas

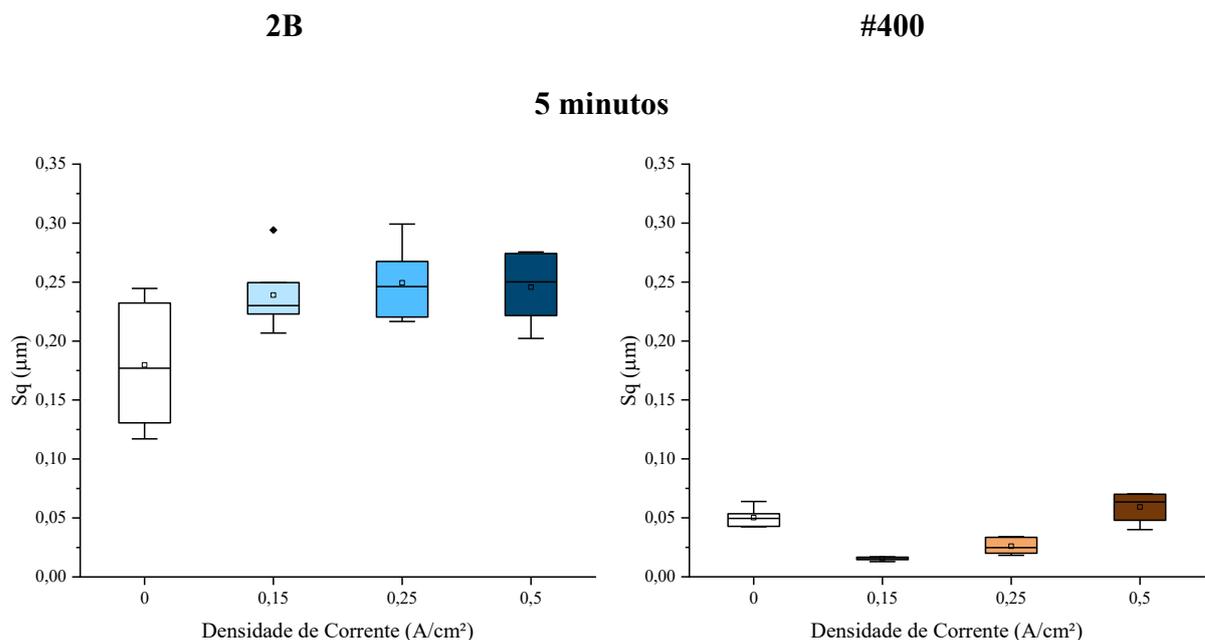
tendências observadas para as amostras em superfície 2B, não puderam ser também vistas para as amostras lixadas. Pode-se considerar também que os valores referentes as amostras lixadas (#400) estão próximos entre si e que o fato de não mostrarem tendências é atribuído a hipótese do eletropolimento ter atingido seu limite de efeito.

Outro ponto a ser citado é que, pelas projeções axonométricas, inferiu-se que o tempo de 10 minutos e uma densidade de corrente de  $0,25 \text{ A/cm}^2$  fosse o mínimo para eletropolir uma peça lixada. A partir dos resultados de  $S_a$ , no entanto foi observado que com um tempo de 5 minutos e uma densidade de corrente de  $0,15 \text{ A/cm}^2$  a rugosidade já diminuía pela metade. Por outro lado, para o tempo de 10 minutos, nenhuma amostra apresentou rugosidade média menor que a condição inicial. Uma razão para tais diferenças é que o parâmetro  $S_a$  é apenas uma média de todos os picos e vales apresentados pelas projeções e, sozinho, pode não ser a maneira ideal de se representar uma superfície eletropolida.

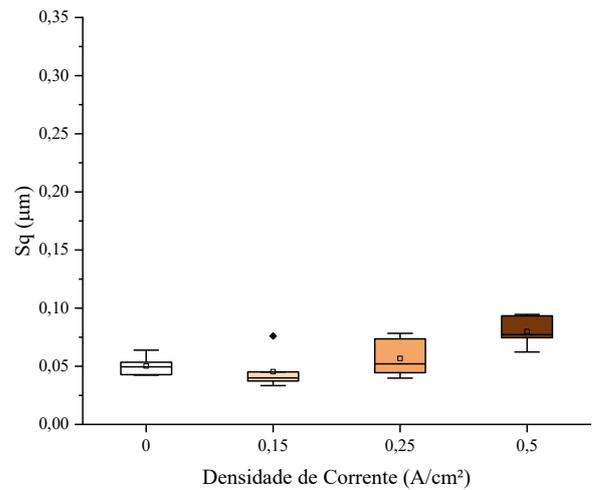
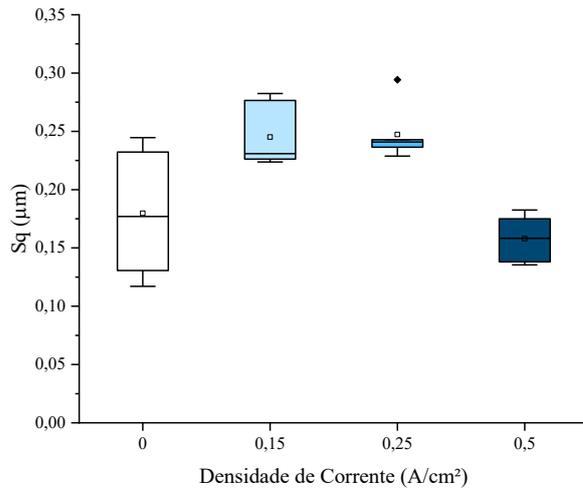
A Figura 39 apresenta o parâmetro  $S_q$  em função da densidade de corrente para os diferentes tempos estudados, enquanto que a Tabela 12 apresenta os principais valores retirados dos gráficos. O parâmetro  $S_q$  é uma média quadrática da superfície e por isso se mostra mais sensível às diferenças de alturas apresentadas por cada superfície.

Analisando primeiramente o gráfico das amostras em superfície 2B em 5 minutos é possível observar que as condições eletropolidas apresentam valores maiores que a condição inicial, sem eletropolimento, e que não possuem diferenças de valores significativas entre si.

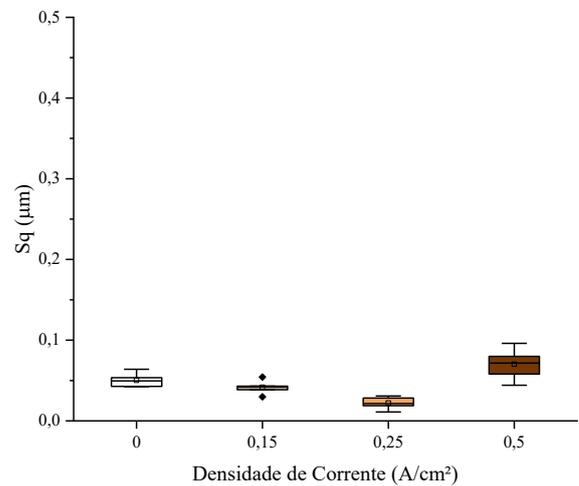
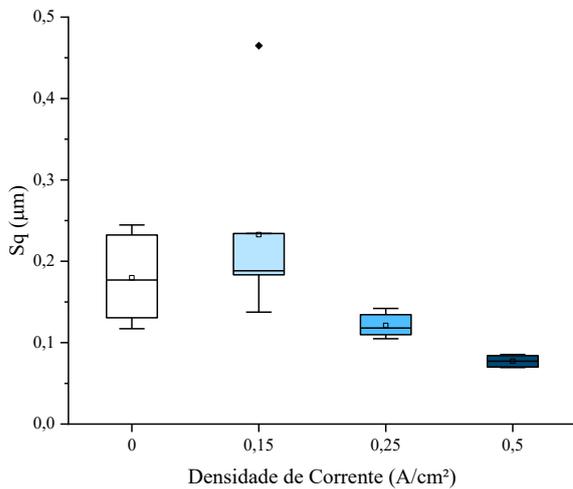
Figura 39:  $S_q$  em função da densidade de corrente para os diferentes tempos



### 10 minutos



### 20 minutos



Para os tempos de 10 e 20 minutos é observada a mesma tendência observada em Sa na mesma condição, ou seja, primeiramente um crescimento no valor de Sq seguido de uma diminuição conforme a densidade de corrente aumenta.

Para as amostras das superfícies inicialmente lixadas (#400), no tempo de 5 minutos, nota-se que primeiramente há uma diminuição do valor de Sq seguido de um crescimento conforme o aumento da densidade de corrente. Apesar dos resultados aparentarem mais dispersos que o visto em Sa, ainda há uma homogeneidade de valores que não foi vista para a condição de superfície 2B. Em 10 minutos, a tendência é justamente ao contrário da apresentada pela condição da superfície 2B. Primeiro, o valor de Sq diminui ligeiramente e conforme cresce a densidade de corrente, os valores da rugosidade média quadrática sobem. Para  $t = 20$  min, primeiramente há uma diminuição dos valores de rugosidade média quadrática para as duas

primeiras densidades de corrente seguido de um crescimento para a maior densidade de corrente, condição esta que apresenta os maiores valores de  $S_q$  e de dispersão.

Tabela 7: Principais valores retirados dos gráficos de  $S_q$  em função da densidade de corrente

Superfície Inicial	$j$ (A/cm <sup>2</sup> )	$t$ (min)	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	Intervalo Interquartilico ( $\mu\text{m}$ )	Diferença em relação condição inicial (%)
2B	0	0	0,177	0,102	0%
2B	0,15	5	0,230	0,027	30%
2B	0,25	5	0,246	0,047	39%
2B	0,5	5	0,250	0,053	41%
2B	0,15	10	0,231	0,050	30%
2B	0,25	10	0,241	0,006	36%
2B	0,5	10	0,158	0,037	-11%
2B	0,15	20	0,188	0,051	6%
2B	0,25	20	0,118	0,025	-33%
2B	0,5	20	0,077	0,014	-56%
#400	0	0	0,049	0,011	0%
#400	0,15	5	0,015	0,002	-69%
#400	0,25	5	0,025	0,013	-50%
#400	0,5	5	0,063	0,022	28%
#400	0,15	10	0,040	0,008	-19%
#400	0,25	10	0,052	0,029	5%
#400	0,5	10	0,077	0,019	56%
#400	0,15	20	0,042	0,004	-16%
#400	0,25	20	0,022	0,009	-56%
#400	0,5	20	0,072	0,022	45%

Considerando todos os resultados apresentados na Tabela 7, pode-se observar que, neste caso, mais combinações de parâmetros apresentaram redução de  $S_q$ , quando comparado aos resultados de  $S_a$ . Em 8 combinações observou-se uma redução nos valores de  $S_q$  em relação as condições sem eletropolimento com medianas de 0,177  $\mu\text{m}$  para 2B e 0,049  $\mu\text{m}$  para #400, ou seja: superfície #400,  $t = 5$  min e  $j = 0,15$  A/cm<sup>2</sup>, com uma mediana de 0,015  $\mu\text{m}$ ; superfície #400,  $t = 5$  min e  $j = 0,25$  A/cm<sup>2</sup>, com uma mediana de 0,025  $\mu\text{m}$ ; superfície #400,  $t = 10$  min e  $j = 0,15$  A/cm<sup>2</sup>, com uma mediana de 0,040  $\mu\text{m}$ ; superfície 2B,  $t = 10$  min e  $j = 0,5$  A/cm<sup>2</sup>, com uma mediana de 0,158  $\mu\text{m}$ ; superfície #400,  $t = 20$  min e  $j = 0,15$  A/cm<sup>2</sup>, com uma mediana de 0,042  $\mu\text{m}$ ; superfície #400,  $t = 20$  min e  $j = 0,25$  A/cm<sup>2</sup>, com mediana de 0,022  $\mu\text{m}$ ; superfície 2B,  $t = 20$  min e  $j = 0,25$  A/cm<sup>2</sup>, com mediana de 0,118  $\mu\text{m}$ ; e por último, superfície 2B,  $t = 20$  min e  $j = 0,5$  A/cm<sup>2</sup>, com mediana de 0,077  $\mu\text{m}$ .

No geral, as tendências observadas para os valores de  $S_q$  foram similares às encontradas para os resultados de  $S_a$ , com exceção da condição #400 para o tempo fixo de 20 min. Em todos os casos, os resultados de rugosidade média quadrática para as amostras lixadas foram menores que os da superfície 2B. Comparando-se com as tendências observadas para a superfície 2B, houve uma manutenção da diferença, reforçando o fato de que a superfície inicial interfere nos resultados do eletropolimento e que a aplicação do lixamento deixa a superfície em uma condição tal que, ao aplicar o eletropolimento, se atinge um limite da máxima redução da rugosidade, uma vez que os valores da rugosidade não variam muito para a condição #400.

Deve-se notar que os parâmetros  $S_a$  e  $S_q$  levam em conta todos os picos, vales e platôs observados a partir da interferometria óptica. Entretanto, considerando que a aplicação posterior do eletropolimento deste trabalho é a união por difusão, outros aspectos da superfície precisam ser considerados, mais precisamente os tamanhos máximos de picos e vales, os quais devem ser avaliados separadamente, bem como a máxima diferença de altura em uma mesma superfície. Tais pontos são considerados de grande importância para o processo termomecânico de união por difusão, uma vez que são os picos e vales presentes na superfície que irão reger o contato entre as partes a serem unidas.

A diferença entre o maior pico e o vale mais profundo é dada pelo parâmetro  $S_z$ , que dá uma ideia de nivelamento da superfície. A Figura 40 ilustra os gráficos de  $S_z$  em função da densidade de corrente para os diferentes tempos fixos. A Tabela 8 traz os principais valores retirados dos gráficos.

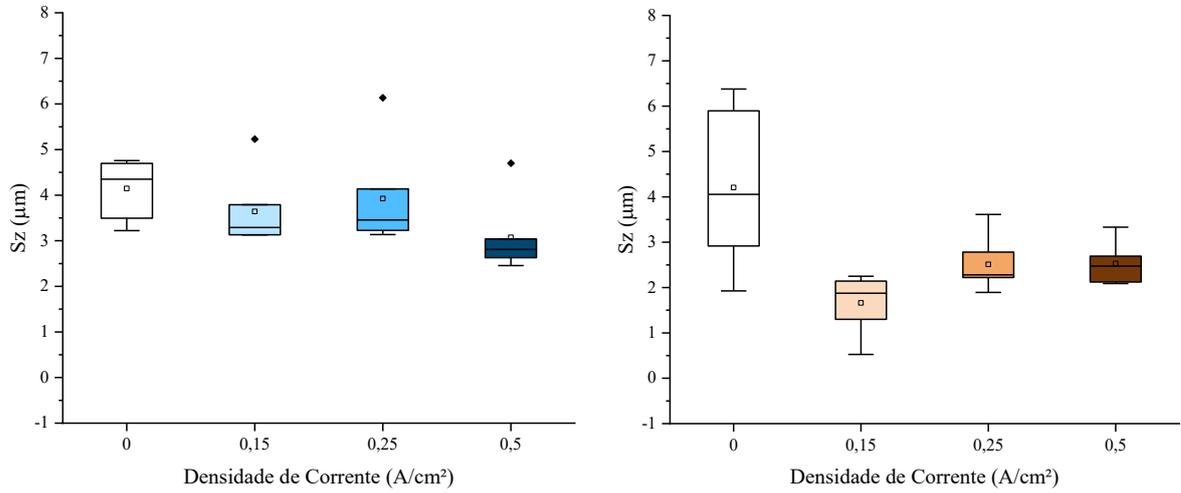
Analisando os gráficos relativos às amostras com superfície inicial 2B, percebe-se que, para o tempo de 5 minutos, há uma leve diminuição dos valores de  $S_z$  à medida que a densidade de corrente aumenta, com pouca dispersão de resultados. Para esses resultados, os valores de média e mediana não se mostram tão equivalentes aos observados até o momento. O motivo principal é a presença de outliers para as três condições de eletropolimento. Outro fato interessante a ser observado é que as medianas de todas as condições de polimento eletrolítico estão abaixo da mediana atingida para a condição sem eletropolimento. Para o tempo de 10 minutos percebe-se uma constância nos resultados de  $S_z$  como um todo e uma diminuição em suas medianas. Já em  $t = 20$  min, há uma diminuição no valor das medianas a medida em que cresce a densidade de corrente, embora a condição de  $j = 0,15$  A/cm<sup>2</sup> tenha apresentado valores maiores e mais dispersos do que para a amostra sem eletropolimento.

Figura 40: Sz em função da densidade de corrente para os diferentes tempos.

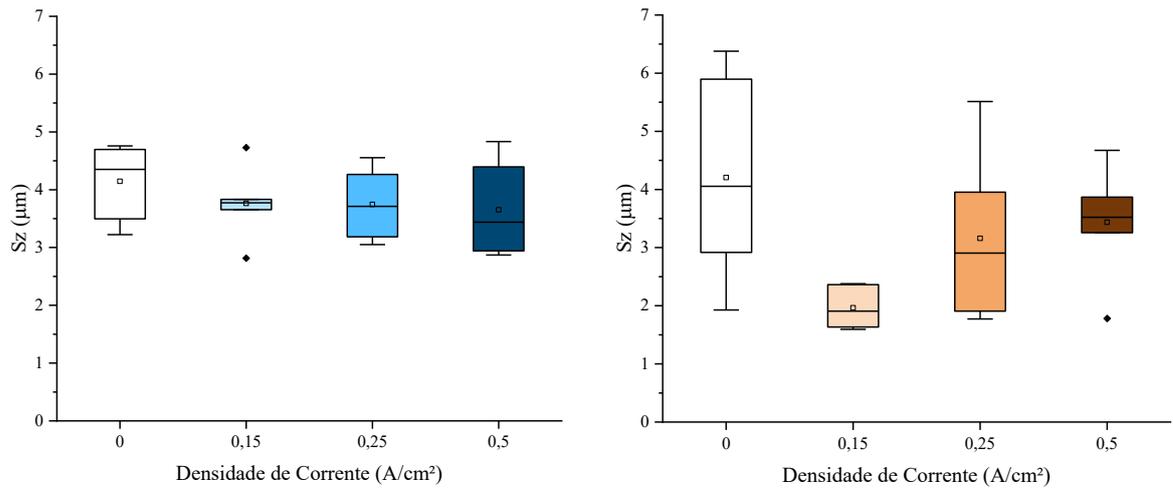
**2B**

**#400**

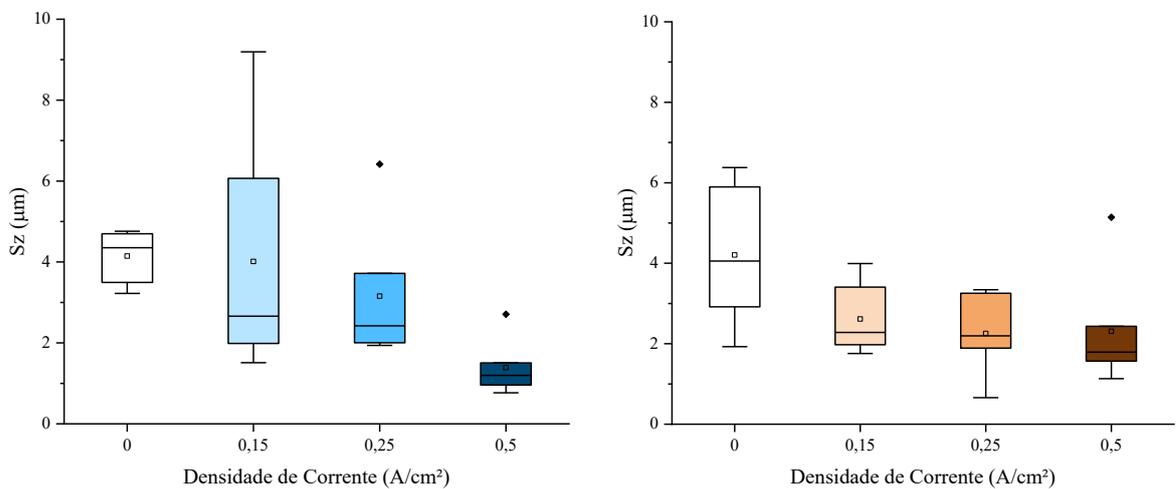
**5 minutos**



**10 minutos**



**20 minutos**



As amostras em condição inicial lixada (#400), para o tempo de 5 minutos, apresentaram uma tendência diferente, houve primeiro uma diminuição, seguido de um crescimento nos valores de Sz com o aumento da densidade de corrente, embora tais variações sejam pequenas. Todos os valores de mediana ficaram menores que o observado para a amostra inicial, com uma dispersão menor dos resultados. No tempo de 10 minutos não é possível determinar uma tendência clara como para o gráfico da superfície 2B, mas nota-se que há uma dispersão maior que o visto para algumas condições, com um aumento da mediana em função de j para as condições eletropolidas. Em t = 20 min, consegue-se observar a mesma tendência que foi vista para as condições 2B: um decréscimo dos valores de Sz, conforme aumenta-se a densidade de corrente, mas com variações pequenas dentre as amostras eletropolidas.

Tabela 8: Principais valores retirados dos gráficos de Sz em função da densidade de corrente.

<b>Superfície Inicial</b>	<b>j (A/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>t (min)</b>	<b>Mediana (μm)</b>	<b>Intervalo Interquartilico (μm)</b>	<b>Diferença em relação condição inicial (%)</b>
2B	0	0	4,351	1,201	0%
2B	0,15	5	3,291	0,659	-24%
2B	0,25	5	3,456	0,908	-21%
2B	0,5	5	2,809	0,410	-35%
2B	0,15	10	3,773	0,179	-13%
2B	0,25	10	3,712	1,079	-15%
2B	0,5	10	3,438	1,455	-21%
2B	0,15	20	2,659	4,079	-39%
2B	0,25	20	2,423	1,713	-44%
2B	0,5	20	1,196	0,546	-73%
#400	0	0	4,054	2,979	0%
#400	0,15	5	1,876	0,843	-54%
#400	0,25	5	2,281	0,559	-44%
#400	0,5	5	2,473	0,570	-39%
#400	0,15	10	1,906	0,730	-53%
#400	0,25	10	2,906	2,045	-28%
#400	0,5	10	3,522	0,612	-13%
#400	0,15	20	2,282	1,432	-44%
#400	0,25	20	2,195	1,366	-46%
#400	0,5	20	1,792	0,865	-56%

Analisando todos os resultados apresentados, pode-se notar que todas as condições de eletropolimento apresentaram reduções nos valores de Sz em relação as condições iniciais, 4,351 μm para 2B e 4,054 μm para #400. Para o tempo de 5 minutos, as amostras com superfície

inicial em 2B apresentaram um máximo de mediana de  $3,456 \mu\text{m}$  ( $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$ ) e um mínimo de mediana de  $2,809 \mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ). Já as condições em superfície inicial lixada (#400), a maior mediana dos valores de Sz foi de  $2,473 \mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ) e a menor de  $1,876 \mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ). No tempo fixo de 10 minutos, a maior mediana para a condição 2B foi de  $3,773 \mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ) enquanto que a menor mediana foi de  $3,438 \mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ). Para a superfície lixada nesse mesmo tempo, a maior mediana foi de  $3,522 \mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ) e a menor foi de  $1,906 \mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ). No último tempo fixo, de 20 minutos, as medianas máxima e mínima apresentadas pela superfície 2B foram de  $2,659 \mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ) e  $1,196 \mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ), respectivamente. Enquanto que para as amostras com superfície inicial lixada as medianas variaram entre  $2,282 \mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ) e  $1,792 \mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ).

Para a superfície em 2B, observou-se um aumento do valor percentual da redução de Sz conforme o aumento da densidade de corrente. Porém, para as amostras com a superfície inicial lixada, as reduções observadas foram próximas, com exceção das condições de 10 minutos em que foi observado uma dispersão maior de resultados.

Outro ponto importante a ser abordado é que houve novamente uma diferença entre os valores de Sz para as superfícies lixada e 2B, entretanto tal divergência de valores não foi tão significativa como foi para os parâmetros Sa e Sq. Além disso, para o tempo de 20 minutos, houve uma porcentagem de redução similar para as duas condições, sendo até maior para a 2B na condição de  $0,5 \text{ A/cm}^2$ . Isto mostra que, apesar da superfície inicial ter influência para a evolução do eletropolimento, é possível compensar esta diferença entre superfícies e até nivelá-las, variando-se o tempo do polimento eletrolítico.

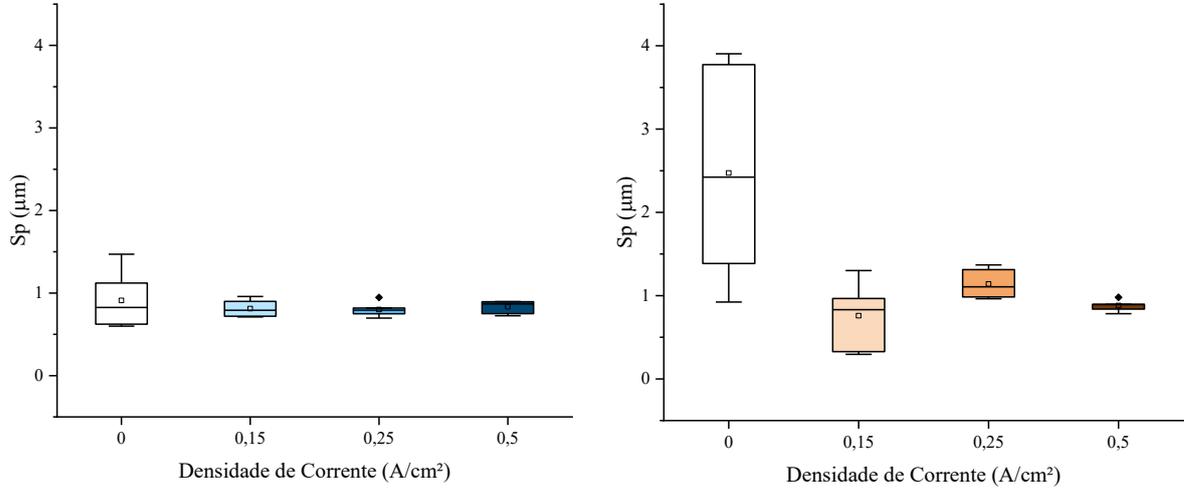
Para avaliar separadamente a altura dos maiores picos e a profundidade dos vales mais profundos, são empregados os parâmetros Sp e Sv. Primeiramente, a Figura 41 mostra Sp em função da densidade de corrente para todos os tempos estudados e a Tabela 9 traz os valores principais retirados dos gráficos. Esse parâmetro avalia a altura máxima dos picos em relação a linha média da superfície e dá uma noção da altura máxima de deformação a ser obtida no processo posterior de união por difusão.

Figura 41: Sp em função da densidade de corrente para os diferentes tempos.

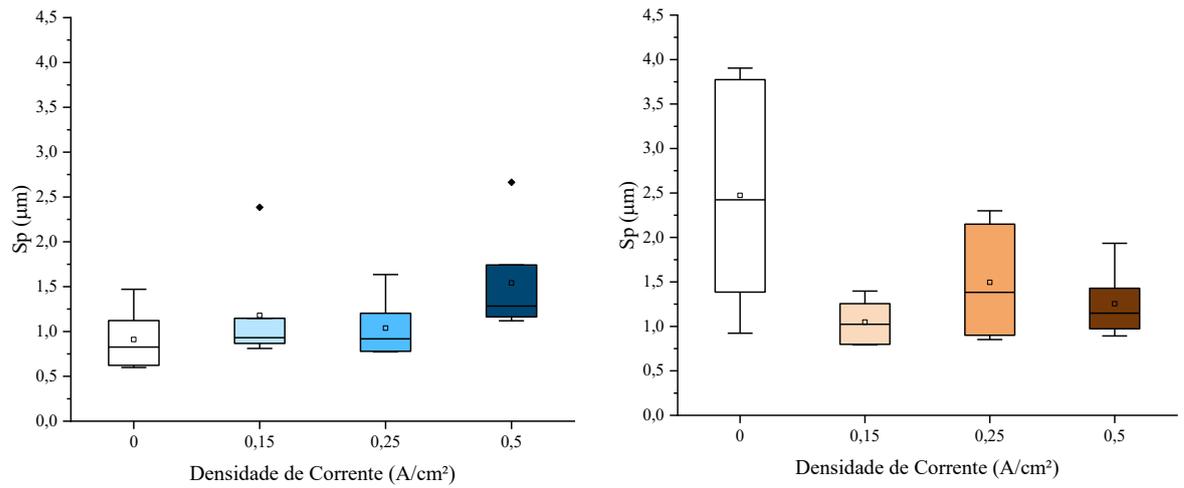
**2B**

**#400**

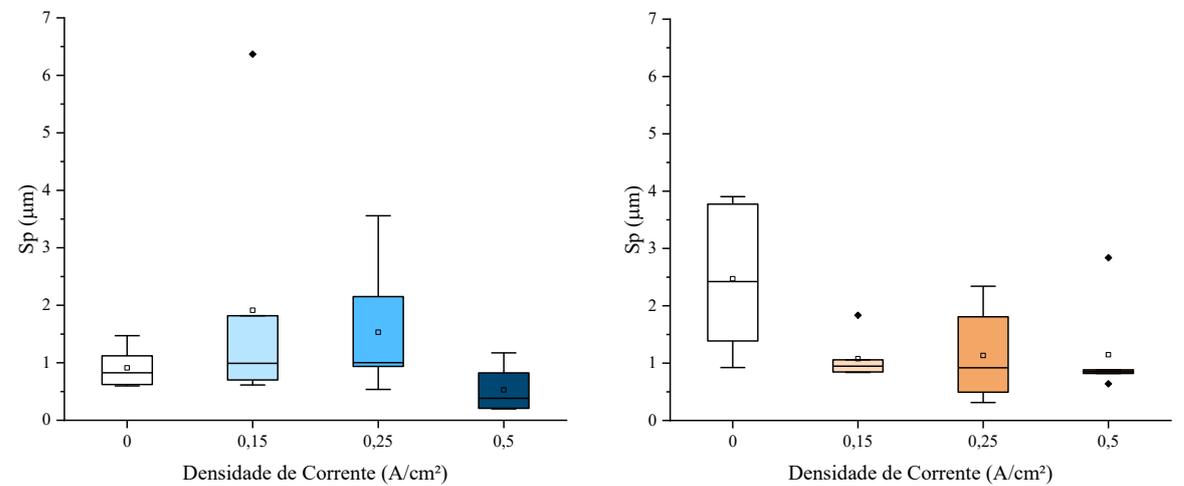
**5 minutos**



**10 minutos**



**20 minutos**



As amostras com superfície inicial 2B, para o tempo de 5 minutos apresentam valores de  $S_p$  constantes e homogêneos, mesmo com o aumento da densidade de corrente, com dados semelhantes em relação à condição sem eletropolimento. Ao contrário do que foi visto no tempo de 5 minutos, para  $t = 10$  min, as amostras apresentam um leve acréscimo nos tamanhos máximos de picos em relação à condição inicial. No tempo de 20 minutos, primeiramente estes valores aumentam com a densidade de corrente, seguido então de uma diminuição para a condição de  $0,5 \text{ A/cm}^2$ .

Em todos os tempos, para as amostras de superfície inicial lixada (#400), todas as condições que passaram pelo processo de polimento eletrolítico apresentaram reduções em seus valores de  $S_p$  em relação a condição inicial, com resultados bem próximos entre si. Além disso, algumas amostras apresentam uma maior dispersão de resultados do que o visto para a superfície 2B.

Tabela 9: Principais valores retirados dos gráficos de  $S_p$  em função da densidade de corrente.

<b>Superfície Inicial</b>	<b>j (A/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>t (min)</b>	<b>Mediana (μm)</b>	<b>Intervalo Interquartilico (μm)</b>	<b>Diferença em relação condição inicial (%)</b>
2B	0	0	0,826	0,499	0%
2B	0,15	5	0,792	0,179	-4%
2B	0,25	5	0,793	0,069	-4%
2B	0,5	5	0,868	0,144	5%
2B	0,15	10	0,931	0,280	13%
2B	0,25	10	0,918	0,425	11%
2B	0,5	10	1,283	0,580	55%
2B	0,15	20	0,990	1,117	20%
2B	0,25	20	1,003	1,214	21%
2B	0,5	20	0,382	0,616	-54%
#400	0	0	2,423	2,388	0%
#400	0,15	5	0,831	0,638	-66%
#400	0,25	5	1,106	0,327	-54%
#400	0,5	5	0,893	0,057	-63%
#400	0,15	10	1,023	0,458	-58%
#400	0,25	10	1,382	1,250	-43%
#400	0,5	10	1,149	0,455	-53%
#400	0,15	20	0,946	0,211	-61%
#400	0,25	20	0,919	1,314	-62%
#400	0,5	20	0,850	0,062	-65%

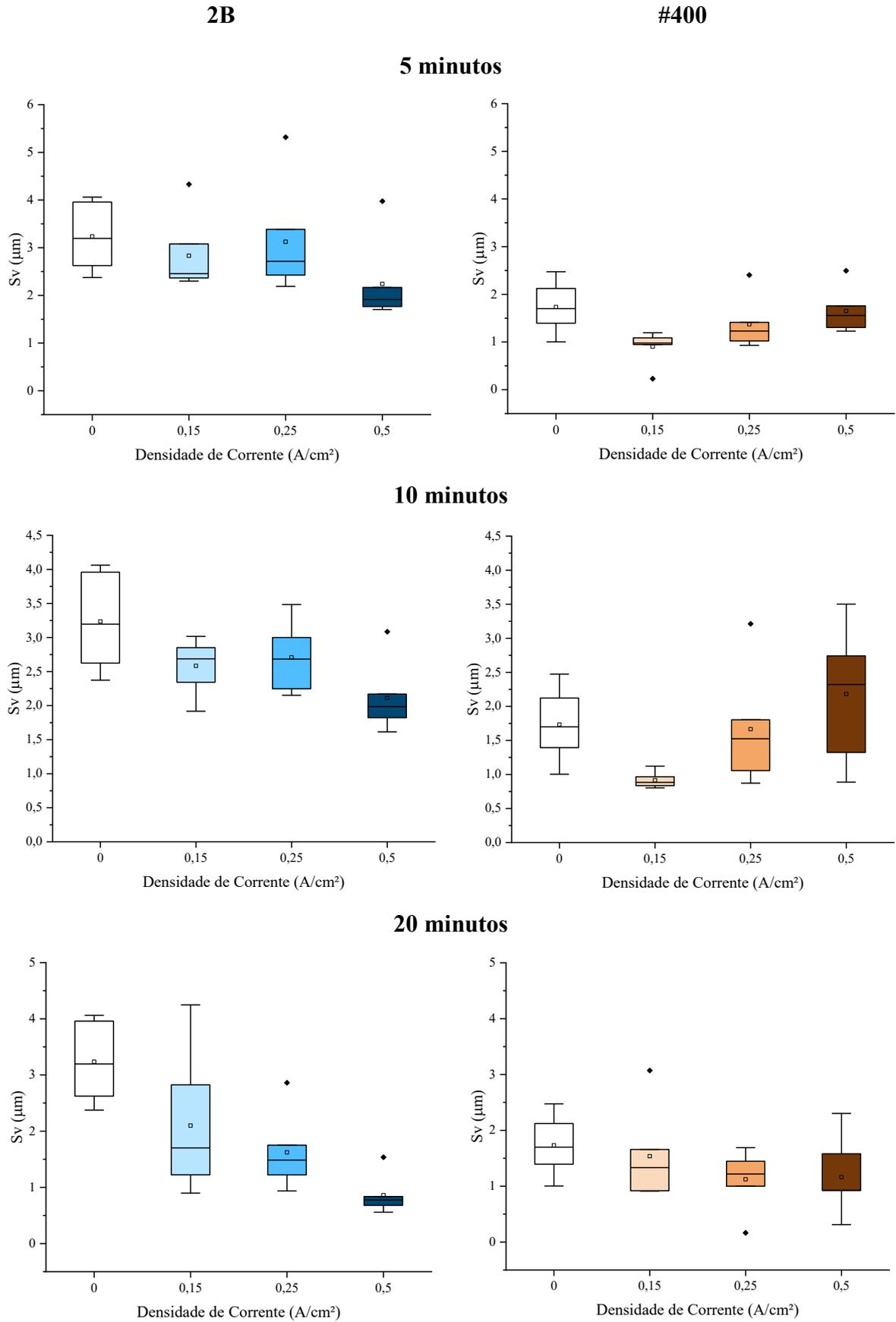
Com base em todos os resultados apresentados para os valores de  $S_p$ , pode-se notar que todas as condições com a superfície inicial lixada obtiveram uma redução em seus valores de altura máxima de pico em relação a condição sem eletropolimento que obteve uma mediana de 2,423  $\mu\text{m}$ . No tempo de 5 minutos tem-se o maior valor de mediana, 1,106  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$ ) e a menor mediana, de 0,831  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ). Para o tempo de 10 minutos, as amostras lixadas inicialmente tiveram mediana entre 1,382  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$ ) e 1,023  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ). No tempo de 20 minutos a maior mediana foi de 0,946  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ) e a menor de 0,850  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ).

Das condições com superfície inicial 2B, apenas 3 condições apresentaram reduções nos valores de  $S_p$  em relação a condição sem eletropolimento, com 0,826  $\mu\text{m}$  de mediana, ou seja: tempo de 5 minutos, duas densidades de corrente (0,15 e 0,25  $\text{A/cm}^2$ ) com uma medianas próximas de 0,792 e 0,793  $\mu\text{m}$ , respectivamente; tempo de 20 minutos e  $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$  com uma mediana de 0,382  $\mu\text{m}$ .

Tal resultado para as amostras em 2B é contraintuitivo, considerando-se a teoria do eletropolimento, que sugere que os picos de rugosidade sejam preferencialmente dissolvidos. Logo, espera-se que os valores de  $S_p$  sejam reduzidos em relação à condição sem eletropolimento, como aconteceu com as amostras lixadas inicialmente. O aspecto visual da topografia da condição inicial 2B, vista na anteriormente (ver seção 4.1.2.1), pode ser usada como explicação, onde observa-se principalmente platôs e vales em sua topografia, com poucos e pequenos picos, (o próprio valor de  $S_p$  possui uma mediana de 0,83  $\mu\text{m}$ ). Logo, a dissolução anódica preferencial dos picos é prejudicada por tal característica, fazendo com que as superfícies aumentem a rugosidade, como o observado para os parâmetros de rugosidade média, e, assim, a altura dos picos também aumenta. Com a aplicação de um tempo e densidade de corrente maiores, como o caso da amostra de 20 minutos e 0,5  $\text{A/cm}^2$ , o eletropolimento age nos picos gerados inicialmente pelo próprio processo e consegue nivelar a superfície, diminuindo os valores de rugosidade e conseqüentemente, o  $S_p$ .

Outro parâmetro que complementa a análise de alturas da topografia de superfície é o  $S_v$  que traz a profundidade máxima dos vales presentes na região da superfície analisada. A Figura 42 mostra o  $S_v$  em função da densidade de corrente para os diferentes tempos. A Tabela 10 traz os principais valores retirados dos gráficos.

Figura 42: Sv em função da densidade de corrente para os diferentes tempos.



Consegue-se notar para as amostras com superfície 2B, para os tempos de 5, 10 e 20 minutos, uma redução nos valores de Sv à medida que a densidade de corrente aumenta, bem como a presença de outliers para todas as condições eletropoladas.

A análise dos resultados para a superfície inicial lixada (#400), para os tempos de 5 e 20 minutos, mostra que os valores de Sv são próximos entre si, podendo ser considerados constantes, com leves variações. O tempo de 10 minutos, entretanto, apresenta um aumento na mediana, que reflete no resultado de Sz visto anteriormente.

Tabela 10: Principais valores retirados dos gráficos de Sv em função da densidade de corrente.

<b>Superfície Inicial</b>	<b>j (A/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>t (min)</b>	<b>Mediana (μm)</b>	<b>Intervalo Interquartilico (μm)</b>	<b>Diferença em relação condição inicial (%)</b>
2B	0	0	3,196	1,335	0%
2B	0,15	5	2,456	0,714	-23%
2B	0,25	5	2,716	0,961	-15%
2B	0,5	5	1,913	0,401	-40%
2B	0,15	10	2,687	0,508	-16%
2B	0,25	10	2,683	0,752	-16%
2B	0,5	10	1,986	0,348	-38%
2B	0,15	20	1,702	1,603	-47%
2B	0,25	20	1,485	0,528	-54%
2B	0,5	20	0,776	0,156	-76%
#400	0	0	1,700	0,728	0%
#400	0,15	5	0,978	0,138	-42%
#400	0,25	5	1,231	0,391	-28%
#400	0,5	5	1,557	0,453	-8%
#400	0,15	10	0,883	0,132	-48%
#400	0,25	10	1,524	0,747	-10%
#400	0,5	10	2,321	1,419	37%
#400	0,15	20	1,334	0,741	-22%
#400	0,25	20	1,218	0,447	-28%
#400	0,5	20	0,929	0,659	-45%

Considerando todos os resultados apresentados, pode-se notar que quase todas as condições apresentaram reduções em seus valores de Sv, quando comparada as condições sem eletropolimento, cujas medianas foram de 3,196 μm para a superfície 2B e 1,700 μm para a condição lixada. Ao contrário do que foi observado para os valores de Sp, todas as amostras em superfície inicial 2B obtiveram reduções de Sv. Para o tempo de 5 minutos teve-se a maior

mediana de 2,716  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$ ) e a menor de 1,913  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ). Para o tempo de 10 minutos, teve-se a mediana máxima de 2,687  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ) e a mínima de 1,986  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ) enquanto que, para o tempo de 20 minutos, observou-se uma mediana máxima de 1,702  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ) e a mínima de 0,776  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ).

Para as amostras com superfície inicial lixada, apenas uma condição não apresentou redução nos valores de  $S_v$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 10 \text{ min}$ ). No tempo de 5 minutos obteve-se a maior mediana, de 1,557  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ) e a menor de 0,978  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ). Em 10 minutos a maior mediana foi de 1,524  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$ ) e a menor de 0,883  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ). Para o tempo de 20 minutos a maior mediana foi de 1,334  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ ) e a menor de 0,929  $\mu\text{m}$  ( $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ ).

Pode-se observar a partir desses resultados que a redução nos valores de  $S_z$  se deu como consequência principalmente pelos valores de  $S_v$ , uma vez que nem todas as condições apresentaram reduções para  $S_p$ . Como o eletropolimento tem como mecanismo a remoção de material da superfície, a linha média da superfície diminui à medida em que o material é removido, reduzindo assim a diferença de altura entre o fundo do vale e o platô médio da topografia de superfície, ou seja, o  $S_v$ .

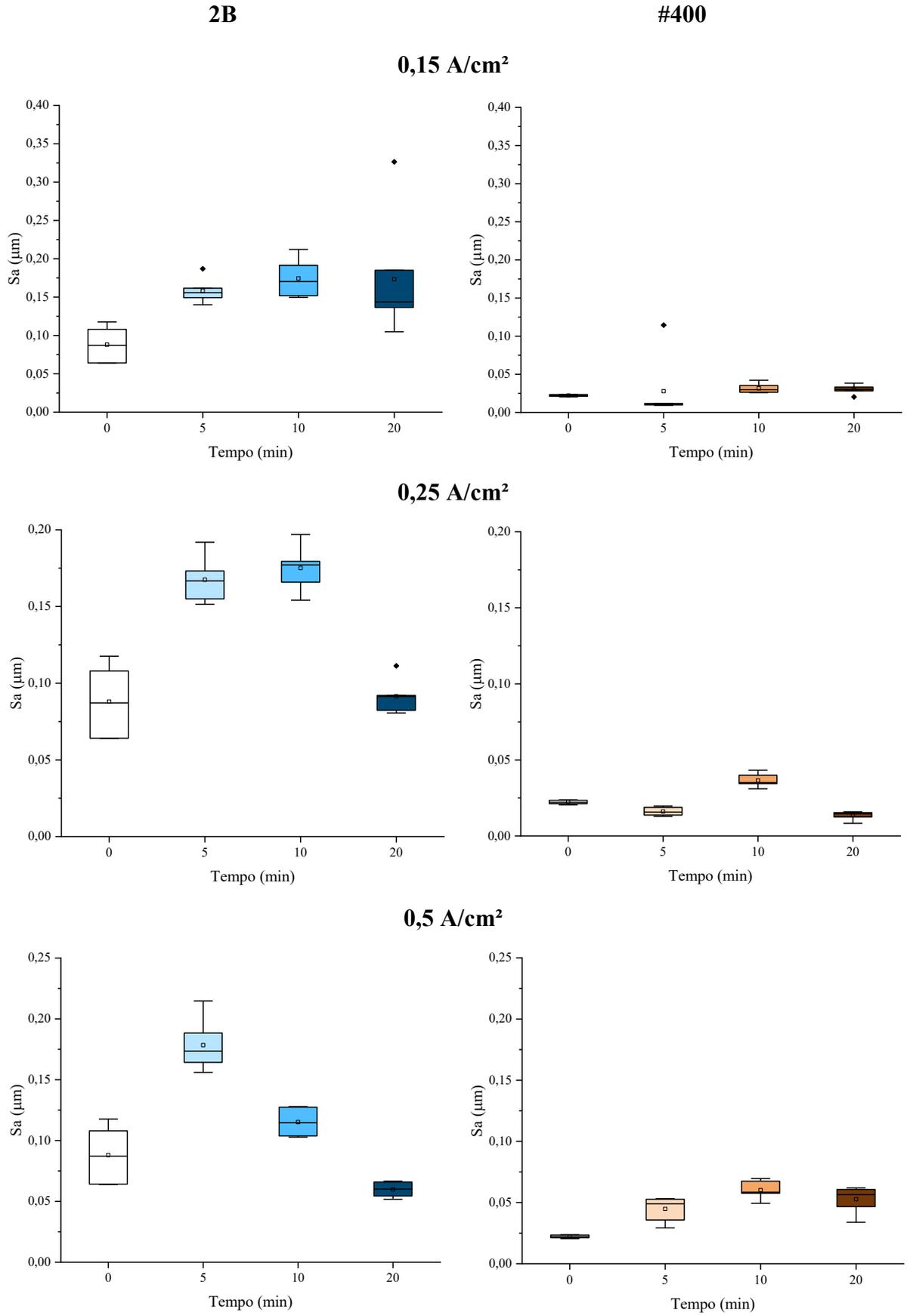
Tal resultado para  $S_v$  é importante para o posterior processo de união por difusão, pois quanto menor o tamanho do vale máximo da superfície, mais fácil será o preenchimento dessa região durante a etapa de difusão volumétrica do processo termomecânico e menor a probabilidade da formação de vazios e defeitos ao longo da interface de união.

#### 4.1.2.2.2 Influência do Tempo

Para avaliar separadamente a influência do tempo na topografia após o eletropolimento, nesse tópico será fixada a densidade de corrente e apresentados gráficos para ambos os tipos de superfície estudadas neste trabalho, de parâmetros estatísticos em função do tempo. A Figura 43 mostra o parâmetro  $S_a$  para as diferentes densidades de corrente empregadas, enquanto que a Tabela 6 apresenta os principais valores retirados dos gráficos.

Para a densidade de corrente de 0,15  $\text{A/cm}^2$ , as amostras da superfície 2B apresentam primeiramente um crescimento nos valores de  $S_a$  seguido de um decréscimo, conforme aumenta-se o tempo, embora os valores de rugosidade média sejam maiores para as superfícies eletropolidas do que para a condição inicial.

Figura 43: Sa em função do tempo para as diferentes densidades de corrente.



Em  $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$ , primeiramente há um aumento brusco nos valores de  $S_a$ , seguido de uma diminuição, sendo que, para o tempo de 20 minutos, estes valores atingem níveis observados na condição inicial. Para a densidade de corrente de  $0,5 \text{ A/cm}^2$ , essa tendência se mantém, com a diferença de que os valores atingidos pelo tempo de 20 minutos, são menores do que da condição inicial.

Para as amostras com superfície inicial lixada (#400), os resultados de  $S_a$  para as três condições de densidade de corrente são menores e a superfície se mostra homogênea, comparando com os valores obtidos para a superfície 2B. Além disso, os valores são próximos entre si, com pequenas variações em suas medianas, sem uma tendência determinada.

Tabela 11: Principais valores retirados dos gráficos de  $S_a$  em função do tempo.

<b>Superfície Inicial</b>	<b>j (A/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>t (min)</b>	<b>Mediana (μm)</b>	<b>Intervalo Interquartilico (μm)</b>	<b>Diferença em relação condição inicial (%)</b>
2B	0	0	0,087	0,044	0%
2B	0,15	5	0,156	0,012	79%
2B	0,15	10	0,170	0,040	95%
2B	0,15	20	0,144	0,049	65%
2B	0,25	5	0,167	0,018	91%
2B	0,25	10	0,177	0,014	103%
2B	0,25	20	0,091	0,010	5%
2B	0,5	5	0,173	0,024	99%
2B	0,5	10	0,115	0,024	32%
2B	0,5	20	0,060	0,012	-31%
#400	0	0	0,022	0,002	0%
#400	0,15	5	0,011	0,002	-51%
#400	0,15	10	0,030	0,009	35%
#400	0,15	20	0,030	0,005	37%
#400	0,25	5	0,016	0,005	-29%
#400	0,25	10	0,035	0,005	59%
#400	0,25	20	0,015	0,003	-34%
#400	0,5	5	0,049	0,017	121%
#400	0,5	10	0,058	0,010	164%
#400	0,5	20	0,056	0,014	155%

Apenas quatro condições mostraram reduções em seu valor de  $S_a$ , quando comparado à condição sem eletropolimento, que apresentaram medianas de  $0,087 \mu\text{m}$  para a superfície 2B e  $0,022 \mu\text{m}$  para a superfície lixada. São elas: superfície #400,  $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 5 \text{ min}$ , com uma mediana de  $0,011 \mu\text{m}$ ; superfície #400,  $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 5 \text{ min}$ , com uma mediana de

0,016  $\mu\text{m}$ ; superfície #400,  $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 20 \text{ min}$ , com mediana de 0,015  $\mu\text{m}$ ; e superfície 2B,  $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 20 \text{ min}$ , com mediana de 0,060  $\mu\text{m}$ .

Todos os resultados apresentados mostram que, para as superfícies iniciais 2B as mesmas tendências com o tempo, mostradas com o aumento da densidade de corrente, são percebidas. Logo pode-se chegar à conclusão de que as variáveis tempo e densidade de corrente têm a mesma influência na rugosidade média obtida após o eletropolimento.

Houve dificuldades em determinar tendências para as amostras das superfícies inicialmente lixadas, uma vez que os valores obtidos para essa condição foram bastante semelhantes. Com isso, reforça-se a percepção que o lixamento manual é um processo que interfere na superfície final após o eletropolimento, de maneira que o polimento alcançado tende a atingir um limite.

A Figura 44 apresenta o parâmetro  $S_q$ , ou seja, rugosidade média quadrática, em função do tempo para cada uma das densidades de corrente fixadas. A Tabela 12 apresenta os principais valores obtidos por meio da análise dos gráficos.

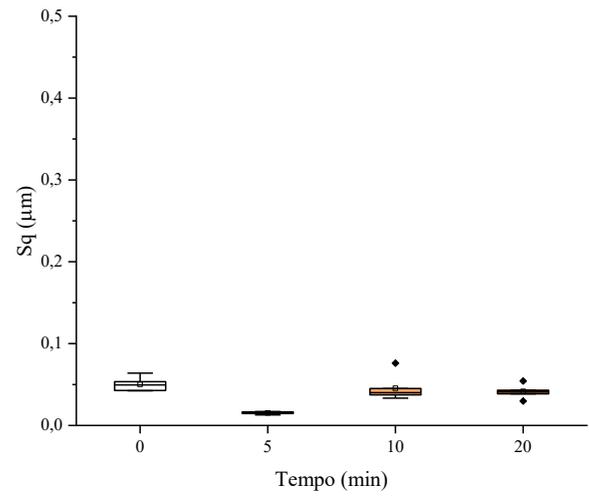
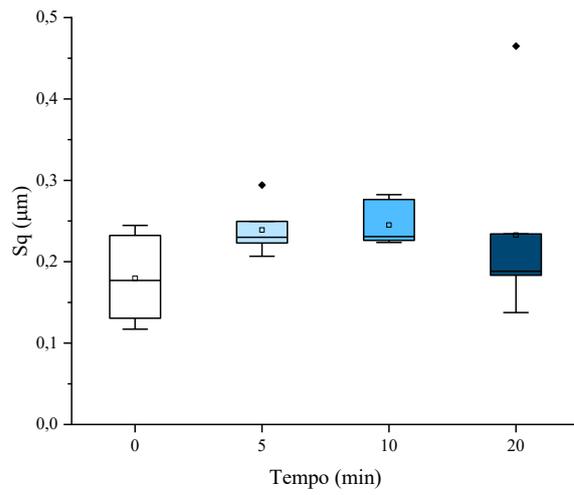
Para a superfície inicial 2B, usando uma corrente de 0,15  $\text{A/cm}^2$ , a mesma tendência mostrada pelo parâmetro  $S_a$  também é observada para  $S_q$ , ou um crescimento inicial dos valores seguido de uma diminuição, à medida que o tempo aumenta. Para  $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$  é possível observar a mesma tendência observada na densidade de corrente de 0,15  $\text{A/cm}^2$ : um acréscimo nos valores de  $S_q$ , seguido de uma redução. A diferença entre as duas densidades de corrente é que, pelo menos para uma condição de tempo, o valor de  $S_q$  ficou abaixo da mediana da condição inicial, ou seja, de 0,18  $\mu\text{m}$ .

Figura 44:  $S_q$  em função do tempo para as diferentes densidades de corrente.

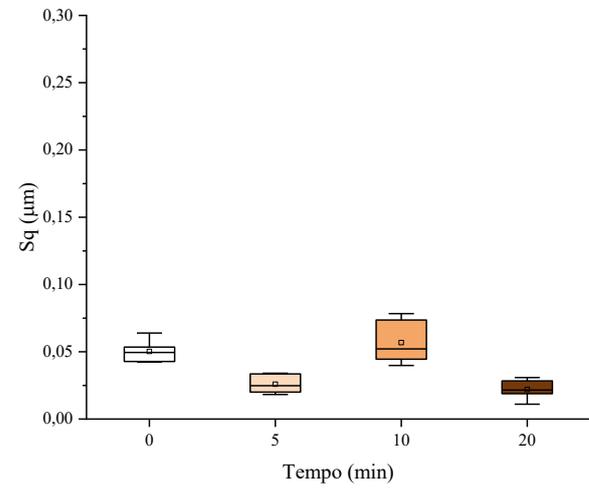
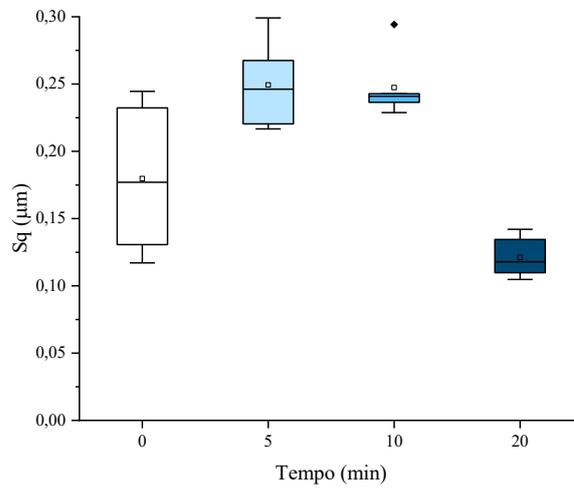
**2B**

**#400**

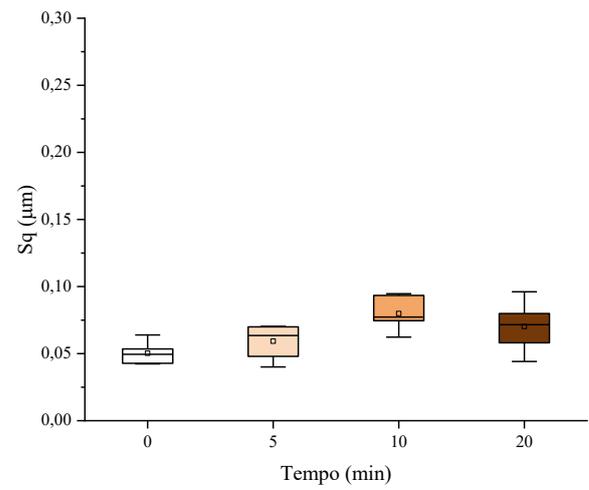
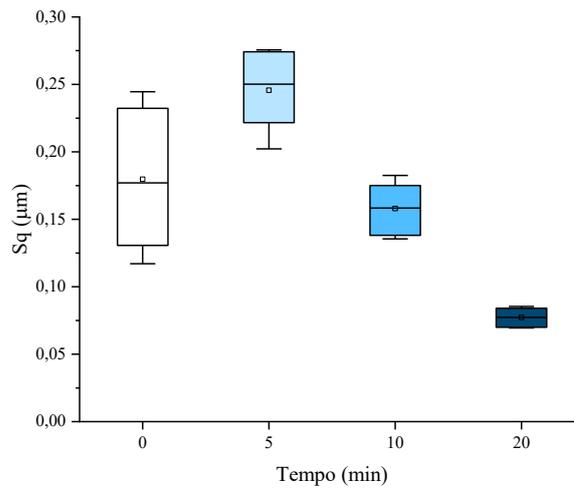
**0,15  $\text{A/cm}^2$**



**0,25 A/cm<sup>2</sup>**



**0,5 A/cm<sup>2</sup>**



Para  $0,5 \text{ A/cm}^2$  percebe-se a mesma tendência de aumento seguido de redução nos valores da rugosidade média quadrática, embora apenas uma condição permaneça com resultados acima da condição sem eletropolimento.

Para as amostras que foram lixadas inicialmente (#400), na densidade de corrente de  $0,15 \text{ A/cm}^2$ , observa-se primeiramente uma redução nos valores de  $S_q$ , seguido de um crescimento, mesmo que pequeno. Um comportamento parecido é observado para uma densidade de corrente de  $0,25 \text{ A/cm}^2$ . Em  $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$  é possível perceber que nenhum dos tempos apresentou redução nos valores de  $S_q$  em relação à condição inicial

A partir dos resultados exibidos para todas as condições acima, pode-se observar que o efeito do tempo em  $S_q$  é similar ao efeito em  $S_a$ , com a exceção de que em mais condições observou-se redução nos valores destes parâmetros, em relação a amostra inicial, cujas medianas foram de  $0,177 \mu\text{m}$  para a superfície 2B e  $0,022 \mu\text{m}$  para a superfície lixada. São elas: superfície #400,  $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 5$  minutos, mediana de  $0,015 \mu\text{m}$ ; superfície #400,  $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 10$  min, mediana de  $0,040 \mu\text{m}$ ; superfície #400,  $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 20$  min, mediana de  $0,042 \mu\text{m}$ ; superfície 2B,  $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 20$  min, mediana de  $0,118 \mu\text{m}$ ; superfície #400,  $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 5$  min, mediana de  $0,025 \mu\text{m}$ ; superfície #400,  $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 20$  min, mediana de  $0,022 \mu\text{m}$ ; superfície 2B,  $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 10$  min, mediana de  $0,158 \mu\text{m}$ ; e superfície 2B,  $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$  e  $t = 20$  min, mediana de  $0,077 \mu\text{m}$ .

Tabela 12: Principais valores retirados dos gráficos de  $S_q$  em função do tempo.

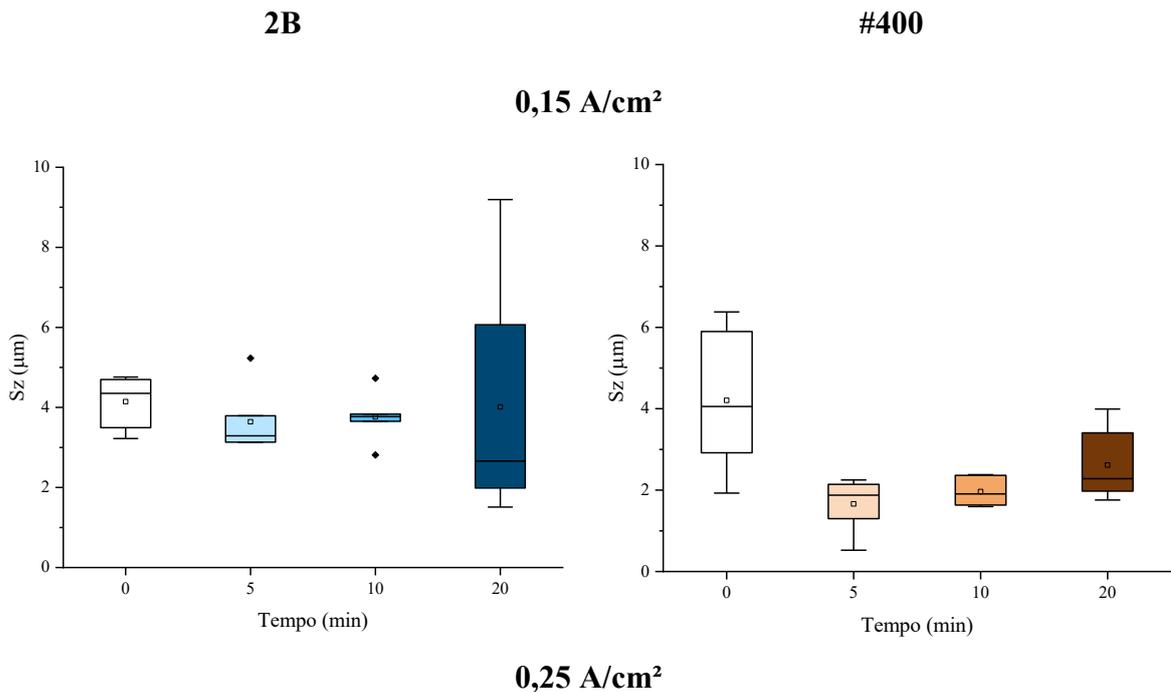
Superfície Inicial	$j \text{ (A/cm}^2\text{)}$	$t \text{ (min)}$	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	Intervalo Interquartilico ( $\mu\text{m}$ )	Diferença em relação condição inicial (%)
2B	0	0	0,177	0,102	0%
2B	0,15	5	0,230	0,027	30%
2B	0,15	10	0,231	0,050	30%
2B	0,15	20	0,188	0,051	6%
2B	0,25	5	0,246	0,047	39%
2B	0,25	10	0,241	0,006	36%
2B	0,25	20	0,118	0,025	-33%
2B	0,5	5	0,250	0,053	41%
2B	0,5	10	0,158	0,037	-11%
2B	0,5	20	0,077	0,014	-56%
#400	0	0	0,049	0,011	0%
#400	0,15	5	0,015	0,002	-69%
#400	0,15	10	0,040	0,008	-19%
#400	0,15	20	0,042	0,004	-16%

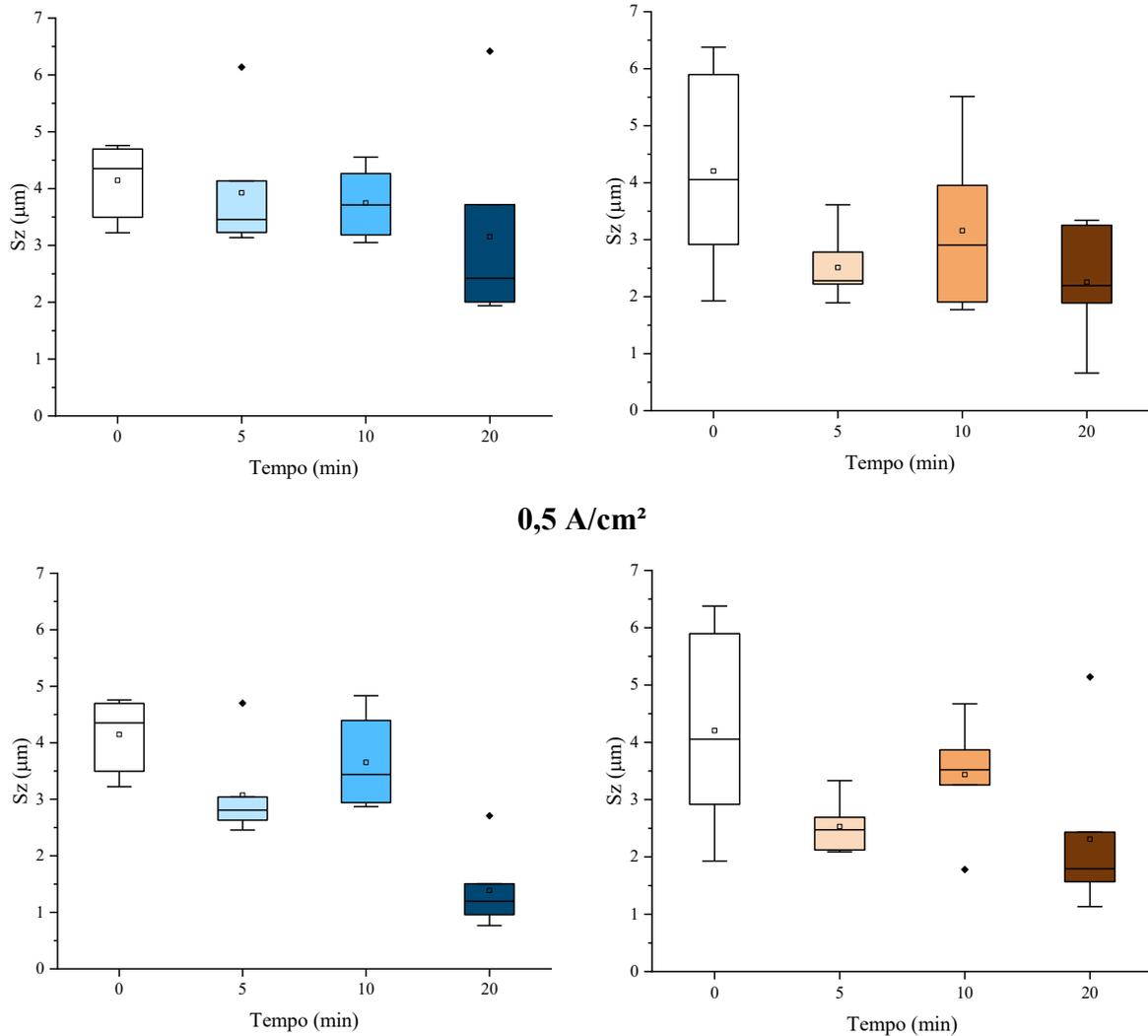
#400	0,25	5	0,025	0,013	-50%
#400	0,25	10	0,052	0,029	5%
#400	0,25	20	0,022	0,009	-56%
#400	0,5	5	0,063	0,022	28%
#400	0,5	10	0,077	0,019	56%
#400	0,5	20	0,072	0,022	45%

O efeito da densidade de corrente em  $S_q$  é similar ao observado anteriormente. Tal resultado concorda com o obtido para  $S_a$ , o que é esperado, visto que esses dois parâmetros, que representam a média de rugosidade estão relacionados.

Como já observado, a diferença entre o maior pico e o vale mais profundo é dada pelo parâmetro  $S_z$ . A Figura 45 mostra o gráfico de  $S_z$  em função do tempo. A Tabela 13 apresenta valores principais para as diferentes densidades de corrente fixadas no presente estudo.

Figura 45:  $S_z$  em função do tempo para as diferentes densidades de corrente





As amostras com superfície inicial 2B, nas densidades de corrente de 0,15 e 0,25 A/cm<sup>2</sup> mostram uma redução de valores de Sz em relação à amostra inicial, porém com pouca variação entre as amostras, com exceção da obtida para o tempo de 20 minutos para 0,15 A/cm<sup>2</sup>, que apresentou uma grande dispersão. Já os resultados para  $j = 0,5$  A/cm<sup>2</sup>, e para os tempos de 5 e 10 min se mostram com pouca variação. Uma grande redução de Sz foi observada para 20 minutos.

Uma redução dos valores de Sz, para todas as condições eletropolidas, é a tendência mostrada pelas amostras inicialmente lixadas (#400), para as três densidades de correntes. Pouca variação entre os resultados do polimento final foi observada, com exceção da amostra de 10 minutos e  $j = 0,5$  A/cm<sup>2</sup>, que apresentou uma redução menor quando comparada às outras condições.

Tabela 13: Principais valores retirados dos gráficos de Sz em função do tempo.

Superfície Inicial	j (A/cm <sup>2</sup> )	t (min)	Mediana (μm)	Intervalo Interquartilício (μm)	Diferença em relação condição inicial (%)
2B	0	0	4,351	1,201	0%
2B	0,15	5	3,291	0,659	-24%
2B	0,15	10	3,773	0,179	-13%
2B	0,15	20	2,659	4,079	-39%
2B	0,25	5	3,456	0,908	-21%
2B	0,25	10	3,712	1,079	-15%
2B	0,25	20	2,423	1,713	-44%
2B	0,5	5	2,809	0,410	-35%
2B	0,5	10	3,438	1,455	-21%
2B	0,5	20	1,196	0,546	-73%
#400	0	0	4,054	2,979	0%
#400	0,15	5	1,876	0,843	-54%
#400	0,15	10	1,906	0,730	-53%
#400	0,15	20	2,282	1,432	-44%
#400	0,25	5	2,281	0,559	-44%
#400	0,25	10	2,906	2,045	-28%
#400	0,25	20	2,195	1,366	-46%
#400	0,5	5	2,473	0,570	-39%
#400	0,5	10	3,522	0,612	-13%
#400	0,5	20	1,792	0,865	-56%

Em geral, pode-se notar que todas as condições eletropolidas apresentaram algum tipo de redução em seus valores de Sz com o passar do tempo, mesmo que tal redução não seja contínua. As medianas das condições sem eletropolimento foram de 4,351 μm, para a superfície 2B e 4,054 μm para a superfície lixada.

Para as superfícies em condição inicial 2B as reduções foram: em  $j = 0,15$  A/cm<sup>2</sup> a com medianas entre 3,773 μm ( $t = 10$  min) e 2,659 μm ( $t = 20$  min); para a densidade de corrente de 0,25 A/cm<sup>2</sup> teve-se medianas entre 3,712 μm ( $t = 10$  min) e 2,423 μm ( $t = 20$  min); e na maior densidade de corrente, 0,5 A/cm<sup>2</sup>, as medianas variaram entre 3,438 μm ( $t = 10$  min) e 1,196 μm ( $t = 20$  min).

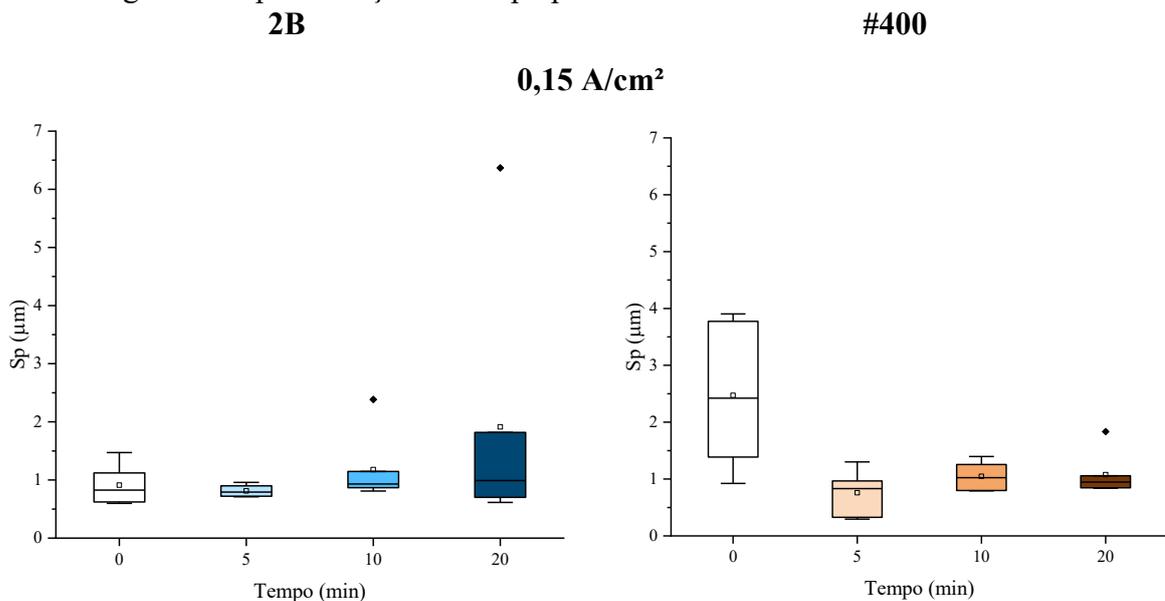
Já para as condições inicialmente lixadas, os percentuais de redução são os apresentados a seguir: para  $j = 0,15$  A/cm<sup>2</sup>, os valores de mediana reduziram para um máximo de 2,282 μm ( $t = 20$  min) e um mínimo de 1,876 μm ( $t = 5$  min); para a densidade de corrente de 0,25 A/cm<sup>2</sup> a mediana variou entre 2,906 μm ( $t = 10$  min) e 2,195 μm ( $t = 20$  min); e para  $j = 0,5$  A/cm<sup>2</sup> a mediana foi entre 3,522 μm ( $t = 10$  min) e 1,792 μm ( $t = 20$  min).

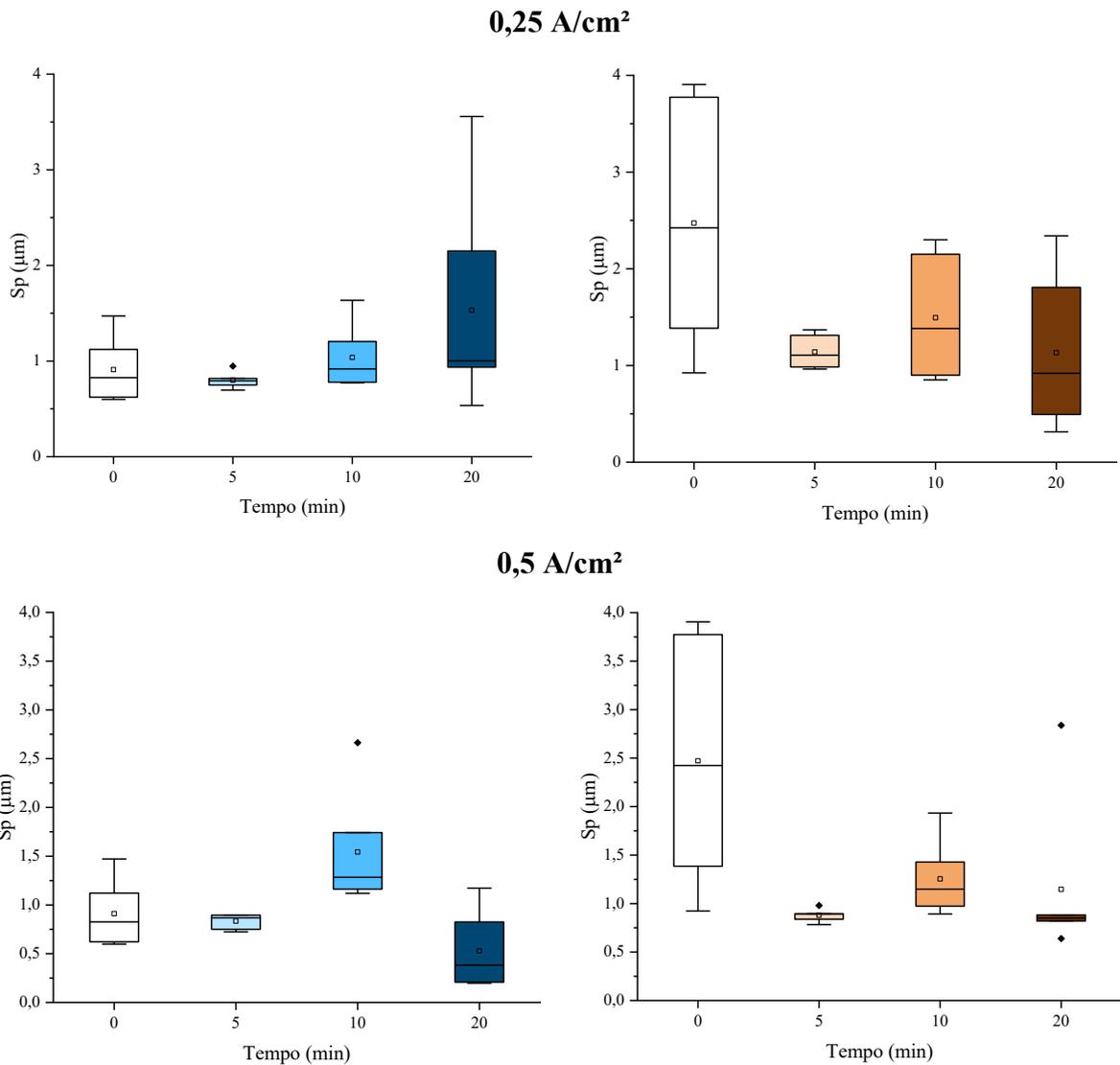
Com exceção da condição de densidade fixa em  $0,15 \text{ A/cm}^2$  para superfície lixada, todas as outras condições apresentaram seu maior valor de mediana de Sz em 10 min e seu mínimo em 20 min. Tal resultado pode ter sido motivado pela mesma razão já abordada na discussão do efeito do eletropolimento para o parâmetro de Sp, na seção anterior: as mudanças na superfície que ocorrem durante os primeiros minutos de eletropolimento resultam em novos picos e vales e, conforme o tempo passa, o processo de polimento eletrolítico age nesses novos picos formados, dissolvendo-os, nivelando a superfície e assim, diminuindo o Sz e outros parâmetros de rugosidade.

Ao comparar esses resultados com os obtidos em função da variação da densidade de corrente, percebe-se que há uma diferença em suas tendências para ambos os tipos de superfície. Para os resultados em função do tempo a taxa da redução dos valores de Sz não é constante, ou seja, esta variação não é contínua, enquanto que, considerando o efeito da densidade de corrente, esta redução é contínua de forma que, quanto maior o j, menor o valor de Sz. Uma explicação para tal fato está em que a densidade de corrente é a força motriz da dissolução dos picos de rugosidade, logo quanto maior o j, maior a corrente que estará passando pela topografia de superfície e assim, maior a dissolução anódica.

Para analisar separadamente o tamanho máximo de pico com a evolução do eletropolimento, emprega-se o parâmetro Sp, cujos gráficos, em função do tempo são expressos na Figura 46, para cada uma das densidades de corrente fixadas. Os principais valores retirados destes gráficos são apresentados na Tabela 14.

Figura 46: Sp em função do tempo para as diferentes densidades de corrente.





Os resultados das amostras com condição inicial 2B, para a densidade de corrente de 0,15 A/cm<sup>2</sup>, mostram um leve aumento nos valores de Sp, conforme o tempo aumenta. Ainda, para  $j = 0,25$  A/cm<sup>2</sup> pode-se notar uma tendência de crescimento do Sp bem como um aumento da dispersão. Para a densidade de corrente de 0,5 A/cm<sup>2</sup>, observa-se um aumento nos valores de altura máxima do pico e então sua diminuição, para a condição de 20 minutos, que apresenta a menor redução dentre todos os parâmetros estudados para esse tipo de superfície.

Para as amostras onde a condição inicial é o lixamento, todos os valores de Sz, para  $j = 0,15$  A/cm<sup>2</sup>, reduziram significativamente após o eletropolimento. Na densidade de corrente de 0,25 A/cm<sup>2</sup>, observa-se uma tendência de redução em seus valores de Sp assim como para  $j = 0,5$  A/cm<sup>2</sup>, este último com valores de Sp bem próximos entre si.

Tabela 14: Principais valores retirados dos gráficos de Sp em função do tempo.

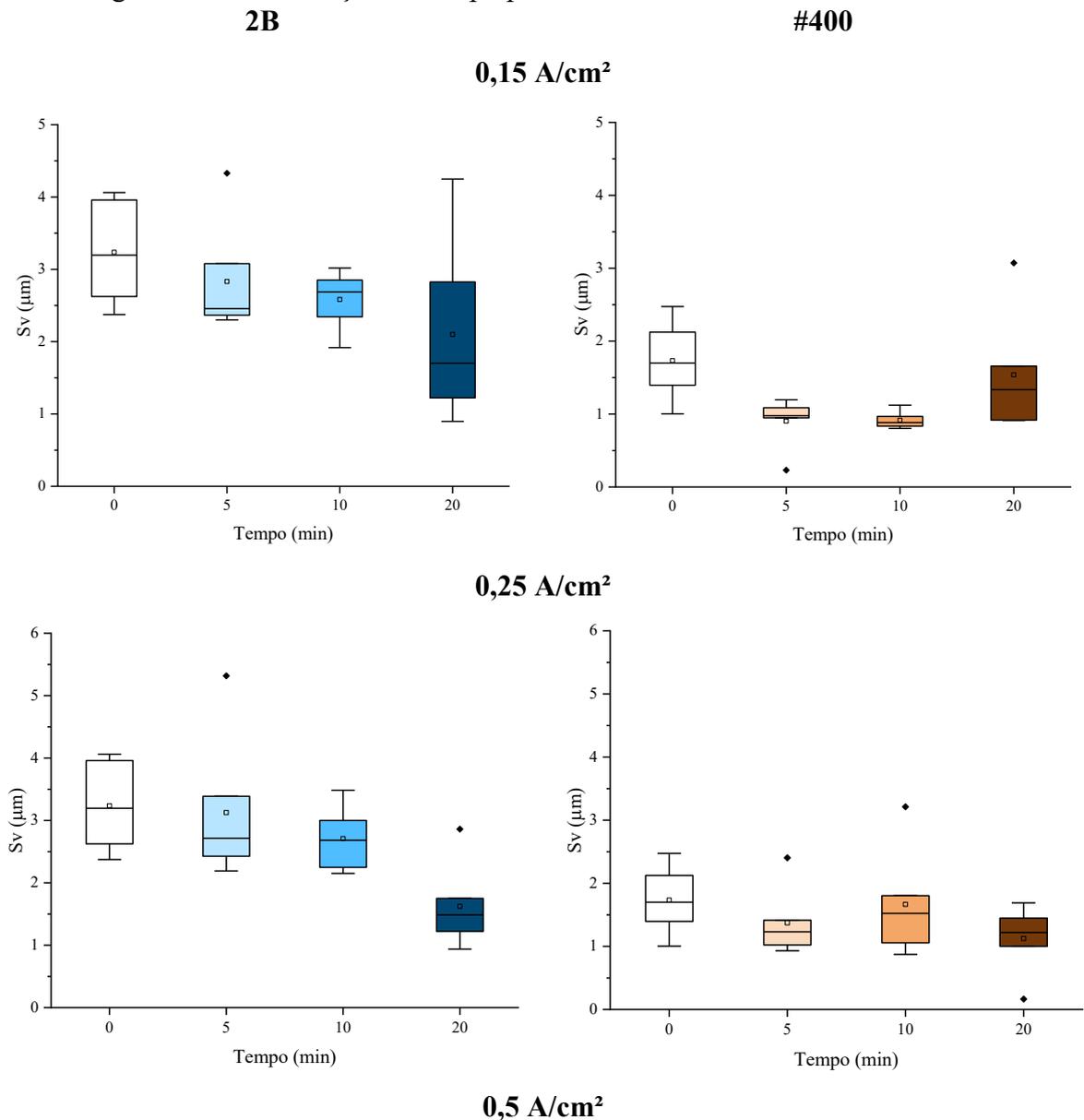
Superfície Inicial	j (A/cm <sup>2</sup> )	t (min)	Mediana (μm)	Intervalo Interquartilico (μm)	Diferença em relação condição inicial (%)
2B	0	0	0,826	0,499	0%
2B	0,15	5	0,792	0,179	-4%
2B	0,15	10	0,931	0,280	13%
2B	0,15	20	0,990	1,117	20%
2B	0,25	5	0,793	0,069	-4%
2B	0,25	10	0,918	0,425	11%
2B	0,25	20	1,003	1,214	21%
2B	0,5	5	0,868	0,144	5%
2B	0,5	10	1,283	0,580	55%
2B	0,5	20	0,382	0,616	-54%
#400	0	0	2,423	2,388	0%
#400	0,15	5	0,831	0,638	-66%
#400	0,15	10	1,023	0,458	-58%
#400	0,15	20	0,946	0,211	-61%
#400	0,25	5	1,106	0,327	-54%
#400	0,25	10	1,382	1,250	-43%
#400	0,25	20	0,919	1,314	-62%
#400	0,5	5	0,893	0,057	-63%
#400	0,5	10	1,149	0,455	-53%
#400	0,5	20	0,850	0,062	-65%

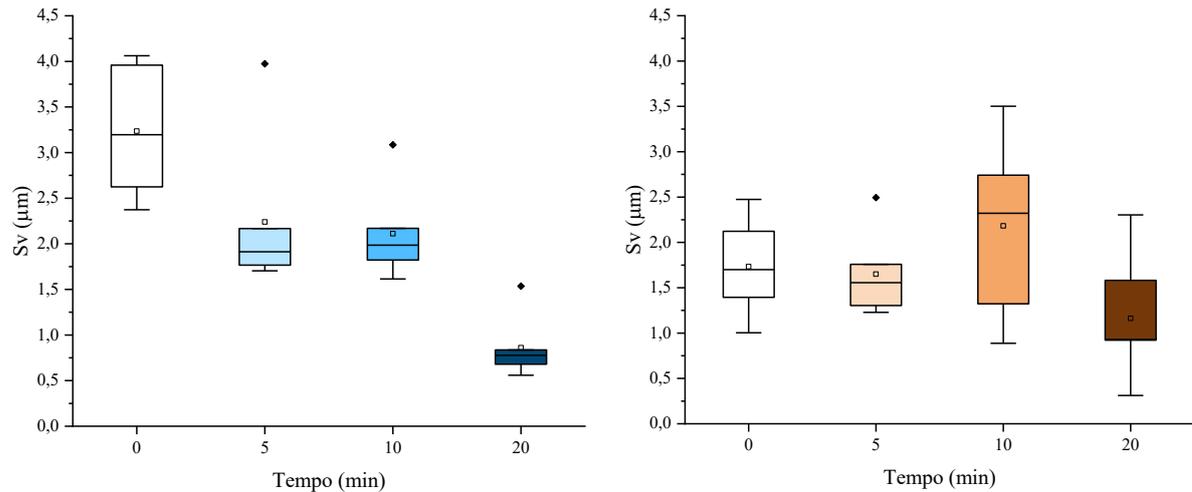
Nota-se novamente o aumento de Sp após os minutos iniciais e posterior redução dos valores à medida que há mais tempo disponível para o processo de eletropolimento ocorrer efetivamente, conforme discutido para parâmetro Sz. No geral, todas as amostras da superfície inicialmente lixada obtiveram reduções em seus valores de Sp em relação à condição inicial, com 2,423 μm de mediana, enquanto que apenas três amostras da superfície inicial 2B apresentaram reduções em relação a condição sem eletropolimento, que obteve uma mediana de 0,826 μm: para as densidades de corrente de 0,15 A/cm<sup>2</sup> e 0,25 A/cm<sup>2</sup>, ambas no tempo de 5 minutos, apresentaram medianas de 0,792 e 0,793 μm, respectivamente e a última com j = 0,5 A/cm<sup>2</sup>, t = 20 min, com uma mediana de 0,382 μm.

Para as amostras inicialmente lixadas, obteve-se as seguintes reduções: para j = 0,15 A/cm<sup>2</sup>, a maior mediana foi de 1,023 μm (t = 10 min) e a menor de 0,831 μm (t = 5 min); para j = 0,25 A/cm<sup>2</sup>, a maior mediana foi de 1,382 μm (t = 10 min) e a menor de 0,919 μm (t = 20 min); e para j = 0,5 A/cm<sup>2</sup> a maior mediana foi de 1,149 μm (t = 10 min) e a menor de 0,850 μm (t = 20 min).

Não se percebe uma diferença significativa na tendência dos valores de Sp e Sz para os diferentes parâmetros analisados, ou seja, tempo e densidade de corrente. O Sv, ou a profundidade máxima dos vales presentes para a região analisada é também um parâmetro estatístico de importância que deve ser analisado, uma vez que mostra a profundidade que deve ser preenchida durante o processo de união por difusão. A Figura 47 mostra Sv em função do tempo, para os diferentes níveis de densidade de corrente estabelecidas. A Tabela 15 apresenta os principais valores retirados dos gráficos para cada condição.

Figura 47: Sv em função do tempo para as diferentes densidades de corrente.





A tendência observada para as amostras com superfície inicial 2B para a densidade de corrente de  $0,15 \text{ A/cm}^2$  é de redução nos valores de profundidade máxima à medida que o tempo cresce. Em  $j = 0,25 \text{ A/cm}^2$  e  $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$  nota-se uma redução contínua da profundidade máxima dos vales à medida que o tempo aumenta.

Nas amostras em condição inicial lixada (#400) e, para as três densidades de correntes, todos os valores de mediana e média exibem redução em relação à condição inicial, com pequenas variações de valores, com exceção da condição de 10 minutos para a maior densidade de corrente, que apresentou um aumento de sua mediana em relação a amostra sem eletropolimento.

Tabela 15: Principais valores retirados dos gráficos de Sv em função do tempo.

Superfície Inicial	$j \text{ (A/cm}^2\text{)}$	$t \text{ (min)}$	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	Intervalo Interquartilico ( $\mu\text{m}$ )	Diferença em relação condição inicial (%)
2B	0	0	3,196	1,335	0%
2B	0,15	5	2,456	0,714	-23%
2B	0,15	10	2,687	0,508	-16%
2B	0,15	20	1,702	1,603	-47%
2B	0,25	5	2,716	0,961	-15%
2B	0,25	10	2,683	0,752	-16%
2B	0,25	20	1,485	0,528	-54%
2B	0,5	5	1,913	0,401	-40%
2B	0,5	10	1,986	0,348	-38%
2B	0,5	20	0,776	0,156	-76%
#400	0	0	1,700	0,728	0%
#400	0,15	5	0,978	0,138	-42%

#400	0,15	10	0,883	0,132	-48%
#400	0,15	20	1,334	0,741	-22%
#400	0,25	5	1,231	0,391	-28%
#400	0,25	10	1,524	0,747	-10%
#400	0,25	20	1,218	0,447	-28%
#400	0,5	5	1,557	0,453	-8%
#400	0,5	10	2,321	1,419	37%
#400	0,5	20	0,929	0,659	-45%

Observando os resultados da Tabela 15, é possível observar que todas as condições eletropolidas apresentaram algum tipo de redução em seus valores de Sv com o aumento do tempo, com exceção de uma única condição lixada. As medianas das condições sem eletropolimento foram de 3,196  $\mu\text{m}$  para a superfície 2B e 1,700  $\mu\text{m}$  para a superfície lixada.

Para as superfícies em condição inicial 2B as reduções são: em  $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$  a maior mediana foi de 2,687  $\mu\text{m}$  ( $t = 10 \text{ min}$ ) e a menor de 1,702  $\mu\text{m}$  ( $t = 20 \text{ min}$ ); para a densidade de corrente de 0,25  $\text{A/cm}^2$  teve-se mediana entre 2,712  $\mu\text{m}$  ( $t = 5 \text{ min}$ ) e 1,485  $\mu\text{m}$  ( $t = 20 \text{ min}$ ) e na maior densidade de corrente,  $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ , os valores de mediana variaram entre 1,986  $\mu\text{m}$  ( $t = 10 \text{ min}$ ) e 0,776  $\mu\text{m}$  ( $t = 20 \text{ min}$ ).

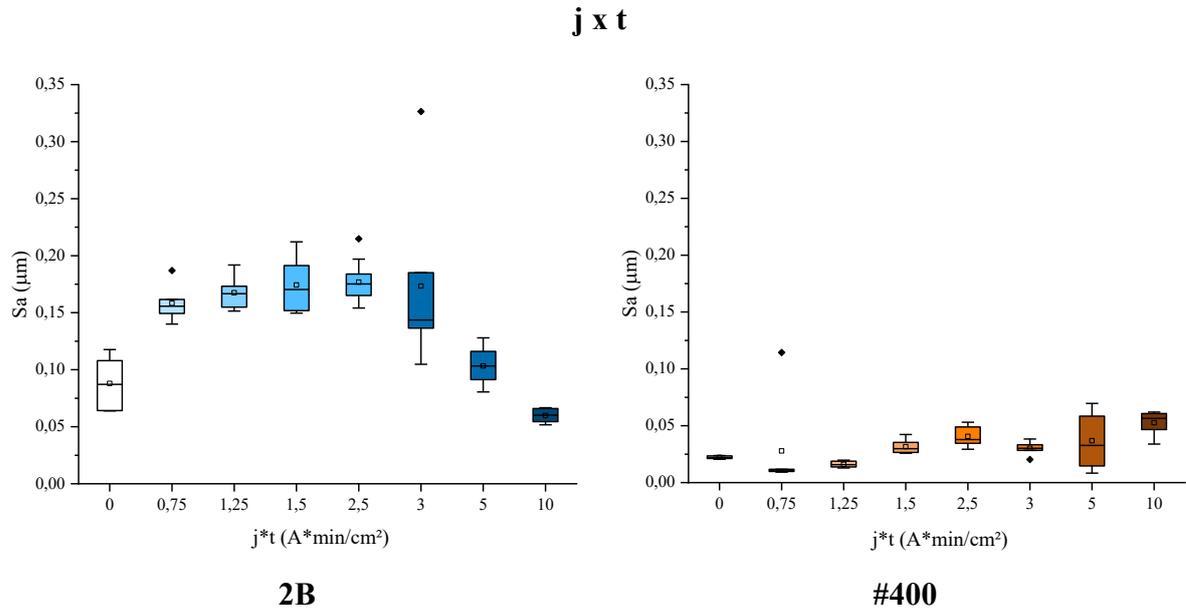
Para as condições das amostras inicialmente lixadas, as reduções são: para  $j = 0,15 \text{ A/cm}^2$ , a maior mediana foi de 1,334  $\mu\text{m}$  ( $t = 20 \text{ min}$ ) e a menor de 0,883  $\mu\text{m}$  ( $t = 10 \text{ min}$ ); para a densidade de corrente de 0,25  $\text{A/cm}^2$  a mediana variou de 1,524  $\mu\text{m}$  ( $t = 10 \text{ min}$ ) e 1,218  $\mu\text{m}$  ( $t = 20 \text{ min}$ ); e para  $j = 0,5 \text{ A/cm}^2$ , a mediana variou entre 1,557  $\mu\text{m}$  ( $t = 5 \text{ min}$ ) e 0,929  $\mu\text{m}$  ( $t = 20 \text{ min}$ ).

Não foi possível observar uma diferença significativa na influência das variáveis tempo e densidade de corrente nos valores de Sv, para ambos os tipos de superfície avaliados neste trabalho.

#### 4.1.2.2.3 Influência do Produto Densidade de Corrente x Tempo

Uma vez estudada a influência dos parâmetros de densidade de corrente e tempo separadamente, é importante também avaliar o efeito dessas duas variáveis em conjunto. É de se esperar que o produto entre densidade de corrente e tempo deveria ser diretamente proporcional à quantidade de material dissolvido por unidade de área. A Figura 48 apresenta o parâmetro Sa em função do produto  $j \cdot t$  enquanto que a Tabela 16 apresenta, para cada combinação de parâmetros: mediana, média, dispersão dada pelo intervalo interquartil e a variação percentual de mediana em relação a condição sem eletropolimento.

Figura 48: Sa em função do produto de tempo e densidade de corrente.



Analisando primeiramente o comportamento das condições das amostras obtidas a partir da superfície 2B, observa-se que os valores de Sa apresentam uma tendência de crescimento, seguido de um intervalo cujos valores da mediana se mantêm aproximadamente constantes, para então se ter um decréscimo, atingindo apenas na última condição com o maior produto  $j \cdot t$  (10 A\*min/cm<sup>2</sup>), uma redução de Sa em relação à condição inicial.

Não é possível determinar uma tendência de Sa com o tempo, para as amostras obtidas a partir da superfície lixada (#400), como já observado em outras condições. Entretanto, observa-se que, inicialmente, há uma redução dos valores da rugosidade média, onde as densidades de corrente de 0,75 e 1,25 A\*min/cm<sup>2</sup> são as únicas que resultam em superfícies eletropolidas com valores de mediana menores que a condição inicial. Nestes casos, após a redução, há um crescimento de Sa, conforme o aumento do produto  $j \cdot t$ . Entretanto, é importante salientar que a variação entre os valores de Sa para a condição #400 é pequena, em comparação as variações apresentadas pelas amostras com condição inicial 2B.

Tabela 16: Valores de Sa para o produto de tempo e densidade de corrente.

Superfície Inicial	j x t (A.min/cm <sup>2</sup> )	Mediana (µm)	Média (µm)	Intervalo Interquartilico (µm)	Varição em relação condição inicial (%)
2B	0	0,087	0,088	0,044	0%
2B	0,75	0,156	0,158	0,012	79%
2B	1,25	0,167	0,167	0,018	91%
2B	1,5	0,170	0,174	0,017	95%
2B	2,5	0,175	0,177	0,015	101%

2B	3	0,144	0,173	0,049	65%
2B	5	0,103	0,103	0,021	18%
2B	10	0,060	0,060	0,012	-31%
#400	0	0,022	0,022	0,002	0%
#400	0,75	0,011	0,028	0,002	-51%
#400	1,25	0,016	0,016	0,005	-29%
#400	1,5	0,030	0,032	0,012	35%
#400	2,5	0,038	0,041	0,013	71%
#400	3	0,030	0,030	0,005	37%
#400	5	0,033	0,037	0,044	48%
#400	10	0,056	0,053	0,014	155%

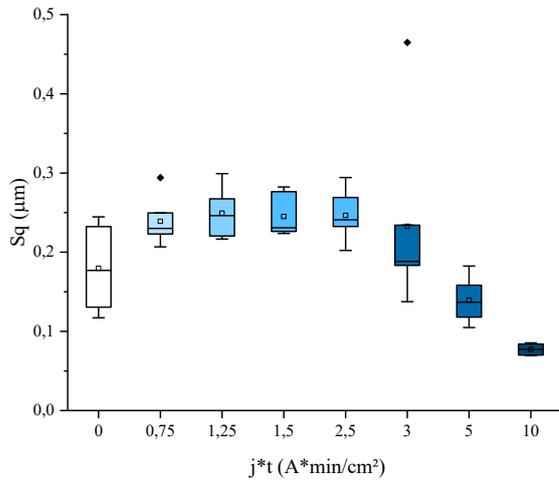
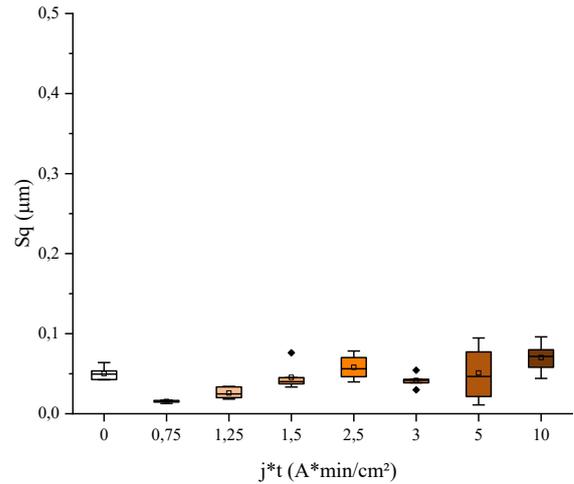
As tendências observadas entres as duas condições são as mesmas que foram apresentadas anteriormente. As amostras que passaram por lixamento antes do eletropolimento apresentam rugosidade menor do que as da condição inicial 2B, também mostrando uma variação de rugosidade menor, dando a entender que há um limite para o efeito que o eletropolimento consegue atingir a partir das amostras lixadas.

A Figura 49 apresenta a rugosidade média quadrática,  $S_q$ , em função do produto da densidade de corrente com o tempo. Na Tabela 17 pode-se ver os valores de média, mediana, intervalo interquartilico e variação percentual de medianas em relação à condição inicial.

A condição com superfície inicial 2B apresentou comportamento similar à tendência de  $S_a$ , em que houve aumento dos valores de  $S_q$ , seguido de um intervalo com valores aproximadamente constantes, seguidos de uma redução do  $S_q$  à medida que o produto  $j \cdot t$  aumenta. Duas condições obtiveram reduções em relação a condição sem eletropolimento, 5 e 10  $A \cdot \text{min}/\text{cm}^2$ , sendo que a maior variação é apresentada pela condição de 10  $A \cdot \text{min}/\text{cm}^2$  com uma redução de 56% no valor da rugosidade média quadrática.

Figura 49:  $S_q$  em função do produto de tempo e densidade de corrente

**$j \times t$**

**2B****#400**

Por outro lado, não foi possível determinar uma tendência clara para os valores de Sq para as amostras com superfície inicial lixada (#400), uma vez que as medianas crescem e reduzem alternadamente com o aumento do produto de densidade de corrente e tempo. Porém, 5 densidades de corrente apresentaram reduções de rugosidade em relação a amostra sem eletropolimento, sendo elas: 0,75, 1,25, 1,5, 3 e 5 A\*min/cm<sup>2</sup>, sendo que a maior redução foi alcançada pela condição de 0,75 A\*min/cm<sup>2</sup> com uma variação 69% em relação a condição inicial. De uma forma geral, em termos numéricos, a variação entre as rugosidades das amostras lixadas não foi tão significativa como as da condição inicial 2B.

Tabela 17: Valores de Sq para o produto de tempo e densidade de corrente.

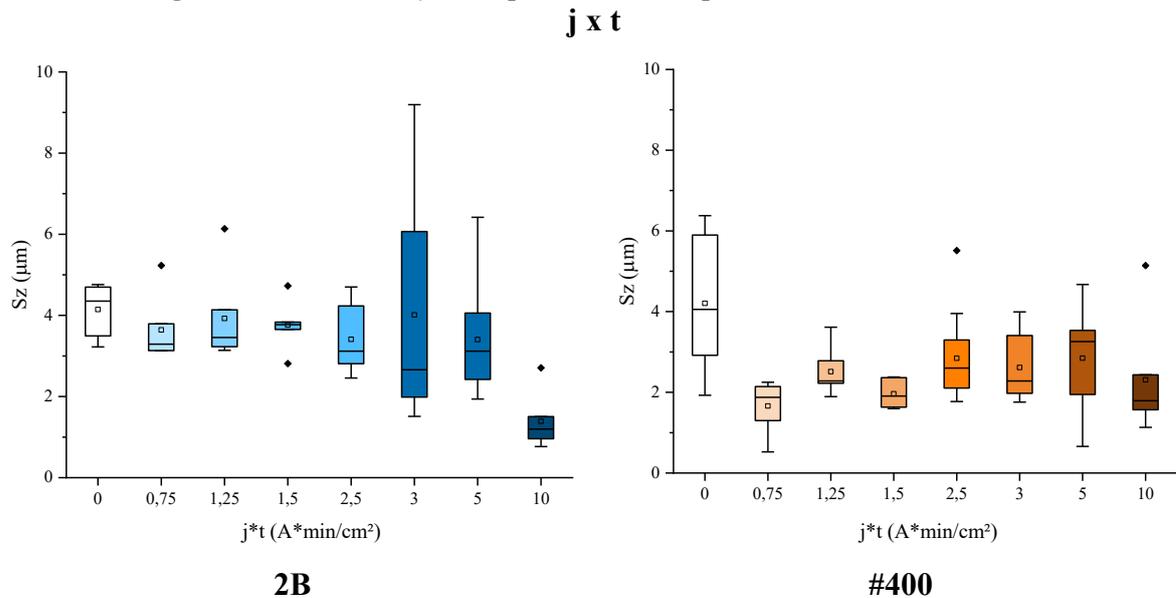
Superfície Inicial	j x t (A.min/cm <sup>2</sup> )	Mediana (µm)	Média (µm)	Intervalo Interquartilico (µm)	Varição em relação a condição inicial (%)
2B	0	0,177	0,180	0,102	0%
2B	0,75	0,230	0,239	0,027	30%
2B	1,25	0,246	0,249	0,047	39%
2B	1,5	0,231	0,245	0,005	30%
2B	2,5	0,241	0,246	0,035	36%
2B	3	0,188	0,233	0,051	6%
2B	5	0,137	0,140	0,034	-23%
2B	10	0,077	0,077	0,014	-56%
#400	0	0,049	0,050	0,011	0%
#400	0,75	0,015	0,015	0,002	-69%
#400	1,25	0,025	0,026	0,013	-50%
#400	1,5	0,040	0,045	0,033	-19%
#400	2,5	0,056	0,058	0,026	14%
#400	3	0,042	0,042	0,004	-16%
#400	5	0,047	0,051	0,056	-6%

#400	10	0,072	0,070	0,022	45%
------	----	-------	-------	-------	-----

Levando em consideração que o parâmetro  $S_q$  é uma média quadrática, seus valores são mais sensíveis a picos e vales. Por isso, os valores de  $S_q$  são numericamente maiores que  $S_a$ . Mas a tendência observada é similar para a rugosidade média. Novamente menores valores são observados para a condição #400, enquanto que para 2B são necessários maiores tempos e densidades de corrente para atingir uma sensível redução de rugosidade.

Como já observado, a diferença de altura entre o pico mais alto e o vale mais profundo é melhor analisada pelo parâmetro  $S_z$ , que está no gráfico da Figura 50 em função do produto de densidade de corrente e tempo. A Tabela 18 mostra os valores principais retirados do gráfico, como mediana, média, a dispersão de resultados e a variação dos valores de mediana considerando a condição sem eletropolimento.

Figura 50:  $S_z$  em função do produto de tempo e densidade de corrente



Observando primeiramente as amostras eletropolidas a partir da superfície inicial 2B, percebe-se reduções nos valores de mediana sendo que a maior variação, em relação a condição inicial, é observada para  $10 \text{ A} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$ , com uma redução percentual de 73%.

Também é possível observar reduções dos valores de mediana de  $S_z$  das amostras com superfície inicial lixada (#400), após o eletropolimento. Em sua maioria, a variação de mediana em relação a condição inicial são maiores para a superfície #400 do que 2B, com exceção da condição  $j \times t = 10 \text{ A} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$  na superfície 2B, que apresentou a maior redução de  $S_z$ , de 73%.

Tabela 18: Valores de Sz para o produto de tempo e densidade de corrente.

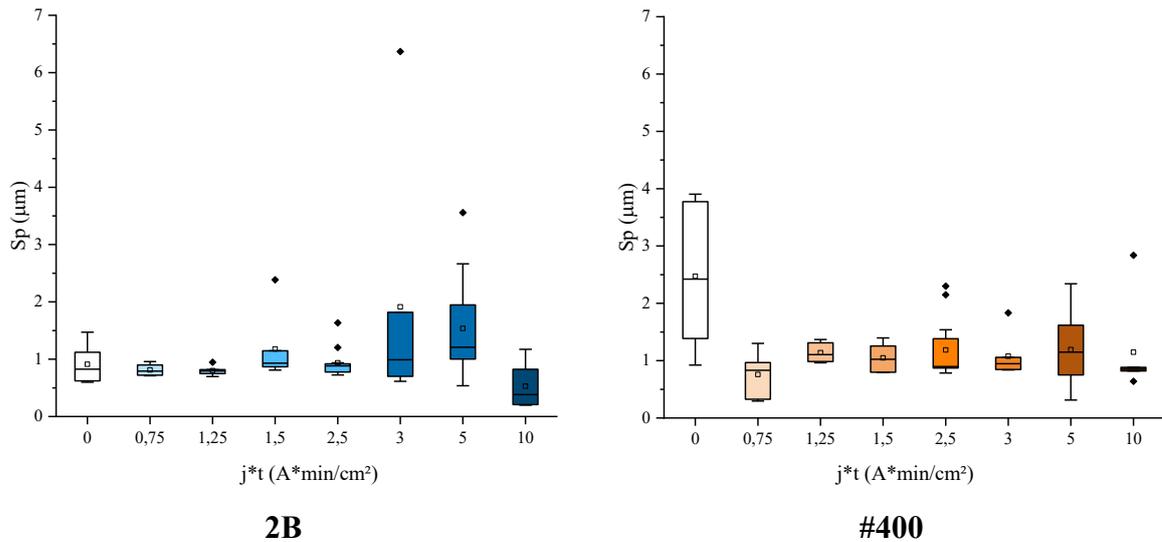
Superfície Inicial	$j \times t$ (A.min/cm <sup>2</sup> )	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	Média ( $\mu\text{m}$ )	Intervalo Interquartilico ( $\mu\text{m}$ )	Diferença em relação condição inicial (%)
2B	0	4,351	4,146	1,201	0%
2B	0,75	3,291	3,643	0,659	-24%
2B	1,25	3,456	3,925	0,908	-21%
2B	1,5	3,773	3,762	-1,914	-13%
2B	2,5	3,118	3,410	1,517	-28%
2B	3	2,659	4,013	4,079	-39%
2B	5	3,120	3,404	1,558	-28%
2B	10	1,196	1,389	0,546	-73%
#400	0	4,054	4,205	2,979	0%
#400	0,75	1,876	1,661	0,843	-54%
#400	1,25	2,281	2,512	0,559	-44%
#400	1,5	1,906	1,964	0,015	-53%
#400	2,5	2,600	2,845	1,174	-36%
#400	3	2,282	2,616	1,432	-44%
#400	5	3,256	2,846	1,452	-20%
#400	10	1,792	2,310	0,865	-56%

A partir dos resultados apresentados, nota-se que a diferença entre os tamanhos de pico-vale, dada por Sz, diminui com a aplicação do eletropolimento. Tal redução entre o pico mais alto com o vale mais profundo contribui para o nivelamento da superfície e a adequa de forma a proporcionar uma maior área de contato num possível processo subsequente de união por difusão.

Na Figura 51 é apresentado o parâmetro Sp, ou seja, a altura máxima dos picos, em função do produto densidade de corrente e tempo, enquanto que na Tabela 19 estão apresentados os valores de média, mediana, dispersão de resultados e a variação percentual de Sp em relação à condição sem eletropolimento.

Figura 51: Sp em função do produto de tempo e densidade de corrente

$j \times t$



Nota-se que apenas 3 condições (0,75, 1,25 e 10 A\*min/cm<sup>2</sup>) para a superfície inicial 2B, apresentaram redução nos valores de mediana de Sp em relação a amostras sem eletropolimento, sendo que a maior variação é dada pela condição 10 A\*min/cm<sup>2</sup>, mostrando uma redução de 54%. Observou-se uma ligeira redução da medida em função do produto  $j*t$ , seguido de um crescimento (atingindo valores maiores que a condição inicial), para então, em maiores valores de  $j*t$ , reduzir bruscamente.

Tal comportamento, contraintuitivo, pode ser explicado pela hipótese de que a topografia da condição inicial 2B (ver seção 4.1.2.1), com picos menores e em menor quantidade na superfície, tenha prejudicado no processo de dissolução anódica durante o eletropolimento, aumentando a rugosidade da peça antes desta alcançar uma redução efetiva, como o visto para a condição de 10 A\*min/cm<sup>2</sup>.

Tabela 19: Valores de Sp para o produto de tempo e densidade de corrente.

Superfície Inicial	$j \times t$ (A.min/cm <sup>2</sup> )	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	Média ( $\mu\text{m}$ )	Intervalo Interquartílico ( $\mu\text{m}$ )	Diferença em relação condição inicial (%)
2B	0	0,826	0,911	0,499	0%
2B	0,75	0,792	0,812	0,179	-4%
2B	1,25	0,793	0,800	0,069	-4%
2B	1,5	0,931	1,179	-1,489	13%
2B	2,5	0,884	0,936	0,126	7%
2B	3	0,990	1,913	1,117	20%
2B	5	1,209	1,537	0,804	46%
2B	10	0,382	0,528	0,616	-54%
#400	0	2,423	2,472	2,388	0%
#400	0,75	0,831	0,759	0,638	-66%

#400	1,25	1,106	1,140	0,327	-54%
#400	1,5	1,023	1,048	-0,140	-58%
#400	2,5	0,897	1,187	0,375	-63%
#400	3	0,946	1,078	0,211	-61%
#400	5	1,149	1,193	0,821	-53%
#400	10	0,850	1,147	0,062	-65%

Assim, em tese, uma superfície que apresente uma quantidade superior de picos desde o início, poderia apresentar reduções em seus valores de  $S_p$  em condições de eletropolimento mais brandas. É exatamente isso que se observa nas amostras com superfície inicialmente lixadas. O aspecto da superfície lixada deixa picos e vales espalhados homoganeamente, contribuindo para que o eletropolimento, em todas as combinações de tempo e densidade de corrente, alcancem alguma redução de  $S_p$ .

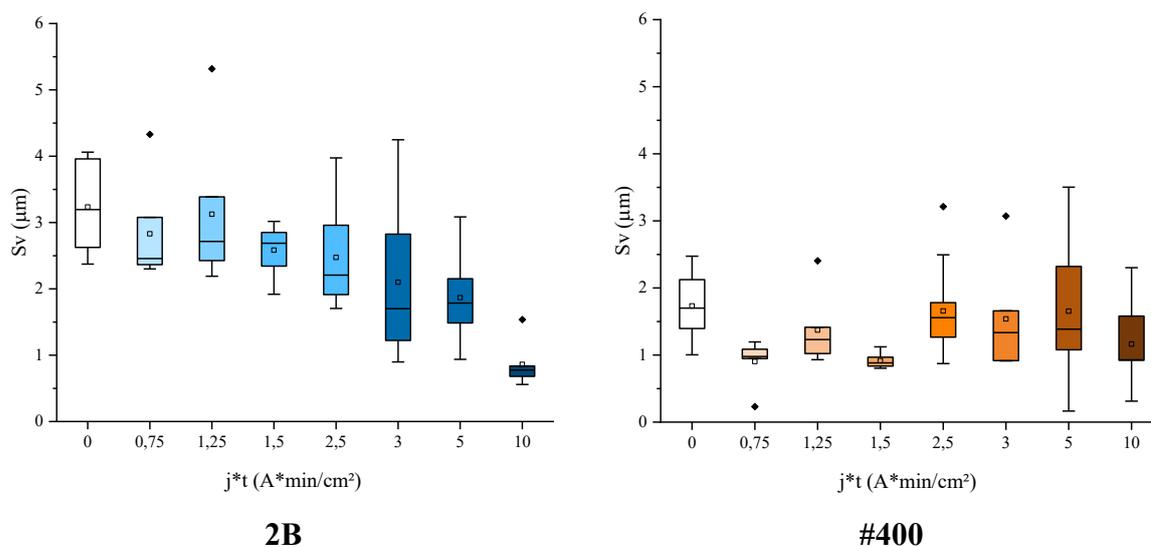
A maior redução de  $S_p$ , de 66%, foi alcançada pela condição de  $0,75 \text{ A} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$ , percentual próximo da redução de 65% apresentado pela condição de  $10 \text{ A} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$ . Além disso, os valores de  $S_p$  para as condições em #400 são bem próximos uns dos outros, reforçando a teoria de que o lixamento prévio leva à um limite máximo de eletropolimento.

A partir de todos os resultados de altura máxima de pico apresentados, pode-se observar a influência que as características da superfície inicial têm no resultado final do processo de eletropolimento. Ou seja, a quantidade de picos observados na superfície inicial tem influência diretamente no tempo necessário para reduzir a rugosidade da superfície de maneira efetiva. Tal informação deve ser levada em consideração na superfície a ser eletropolida.

Complementando as informações fornecidas pelos dados de  $S_z$  e  $S_p$ , a Figura 52 apresenta o parâmetro  $S_v$  em função do produto de densidade de corrente e tempo. A Tabela 20 apresenta os valores: mediana, média, dispersão de resultados e variação percentual em relação a amostra sem eletropolimento, obtidos a partir da figura.

Figura 52:  $S_v$  em função do produto de tempo e densidade de corrente

$j \times t$



Em todas as condições de eletropolimento da superfície inicial 2B, observou-se reduções nos valores da mediana, quando comparadas à condição sem eletropolimento. A maior redução, de 76%, foi atingida pela amostra sujeita ao produto  $j*t$  igual a 10  $A*min/cm^2$ . A tendência geral observada por essas amostras é de que à medida que o produto  $j*t$  aumenta, os valores de Sv diminuem.

Na maioria das amostras inicialmente lixadas, foi possível observar pouca variação nos valores numéricos de mediana de Sv. Por outro lado, nota-se que todas as condições de eletropolimento resultaram em alguma redução das medianas em relação à condição inicial. A maior redução foi observada para a condição de 1,5  $A*min/cm^2$ , com uma variação de 48%, porém esta redução é menor que a apresentada pela melhor condição na superfície 2B.

Tabela 20: Valores de Sv para o produto de tempo e densidade de corrente

Superfície Inicial	$j \times t$ ( $A*min/cm^2$ )	Mediana ( $\mu m$ )	Média ( $\mu m$ )	Intervalo Interquartilico ( $\mu m$ )	Diferença em relação condição inicial (%)
2B	0	3,196	3,235	1,335	0%
2B	0,75	2,456	2,831	0,714	-23%
2B	1,25	2,716	3,125	0,961	-15%
2B	1,5	2,687	2,584	-0,425	-16%
2B	2,5	2,207	2,474	1,127	-31%
2B	3	1,702	2,099	1,603	-47%
2B	5	1,786	1,867	0,732	-44%
2B	10	0,776	0,861	0,156	-76%
#400	0	1,700	1,732	0,728	0%
#400	0,75	0,978	0,903	0,138	-42%
#400	1,25	1,231	1,372	0,391	-28%
#400	1,5	0,883	0,916	0,155	-48%

#400	2,5	1,557	1,658	0,529	-8%
#400	3	1,334	1,538	0,741	-22%
#400	5	1,386	1,653	1,296	-18%
#400	10	0,929	1,163	0,659	-45%

Assim, pode-se inferir que o eletropolimento é efetivo na redução da profundidade dos vales, pois, ao remover o material da superfície, diminui a diferença entre o vale mais profundo e a linha média da superfície, promovendo assim o seu nivelamento.

Desta forma, analisando todos os resultados de topografia de superfície, pode-se observar que apenas três condições apresentaram reduções em todos os parâmetros de rugosidade: superfície 2B e  $j \cdot t = 10 \text{ A} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$ ; superfície #400 e  $j \cdot t = 0,75 \text{ A} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$ ; e superfície #400 e  $j \cdot t = 1,25 \text{ A} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$ . De cada tipo de superfície estudada as melhores condições foram de  $10 \text{ A} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$  para 2B e  $0,75 \text{ A} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$  para #400.

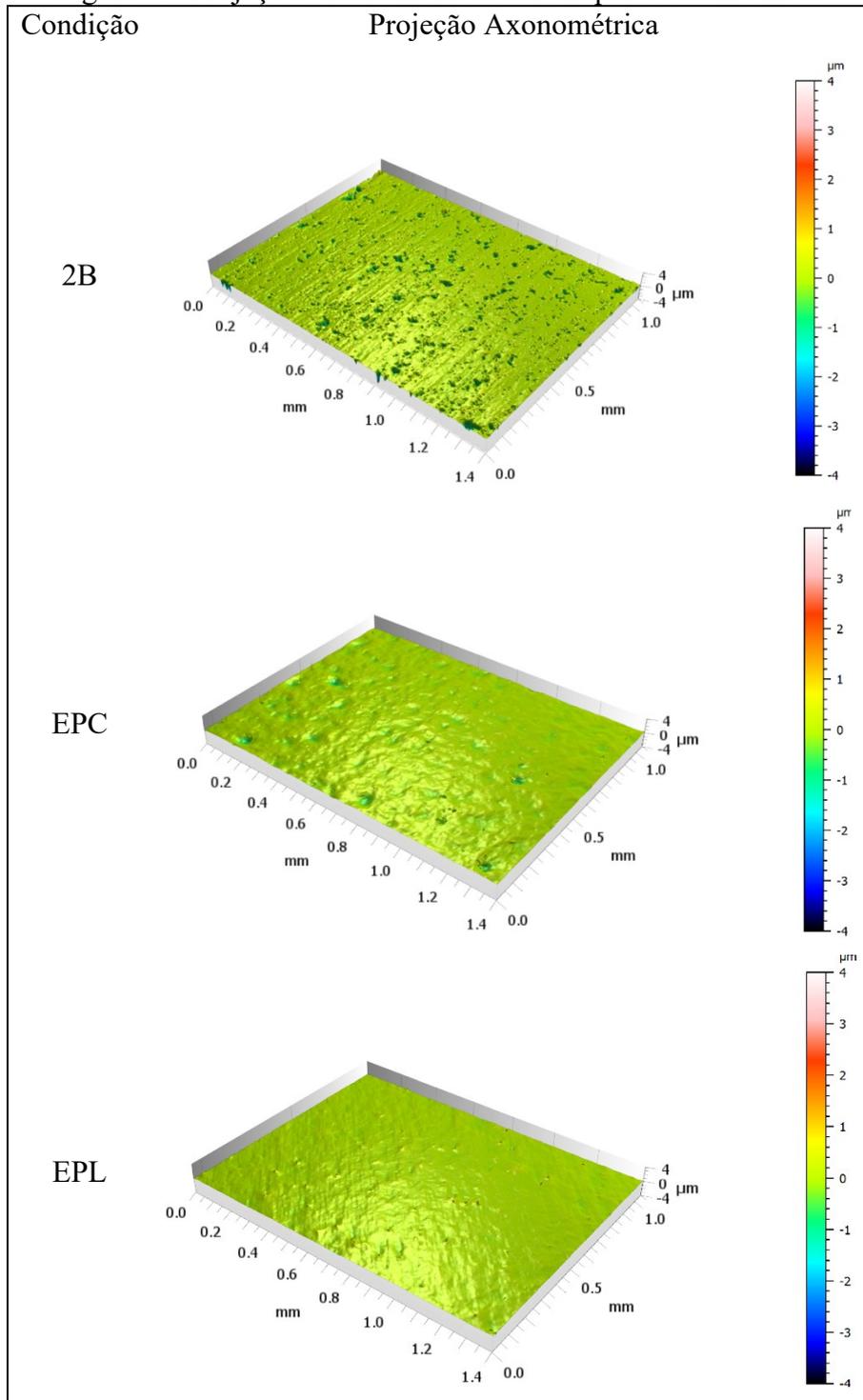
Assim, com o intuito de usar uma das condições estudadas na aplicação de eletropolimento de chapas que serão submetidas ao processo de união por difusão, foi decidido que a combinação adequada de parâmetros para o Estudo B seria a superfície 2B e com um produto de densidade de corrente e tempo de  $10 \text{ A} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$ . Tal escolha foi embasada no tempo que levaria para a preparação do material para o eletropolimento, caso o lixamento manual de todas as chapas que compõem a amostra do trocador fosse adotado: este seria um processo moroso pela grande quantidade de chapas usadas para a fabricação de um bloco unido por difusão.

#### 4.2 ESTUDO B: UNIÃO POR DIFUSÃO DE CHAPAS ELETROPOLIDAS

O Estudo B tem o intuito de avaliar e comparar a qualidade da união por difusão de estruturas na forma final de blocos, que foram fabricados a partir do empilhamento de chapas em três diferentes condições: a primeira com chapas sem eletropolimento (2B), a segunda com placas que passaram pelo processo de eletropolimento comercial (EPC) e a terceira a partir de chapas eletropolidas dentro das dependências do laboratório (EPL).

Com o intuito de avaliar as condições prévias de cada material antes da união por difusão, foram analisadas e comparadas as características da topografia das amostras para então relacioná-las com os resultados da interface de união e dos ensaios mecânicos obtidos após a fabricação dos blocos. A Figura 53 mostra as projeções axonométricas típicas das chapas em cada condição.

Figura 53: Projeções axonométricas das chapas a serem unidas



A projeção da condição 2B mostra uma superfície que possui platôs, intercalados com vales evidenciados pela parte com menos altura da projeção, com poucos picos presentes pela extensão da superfície. Além disso, é possível discernir uma direção preferencial, perpendicular

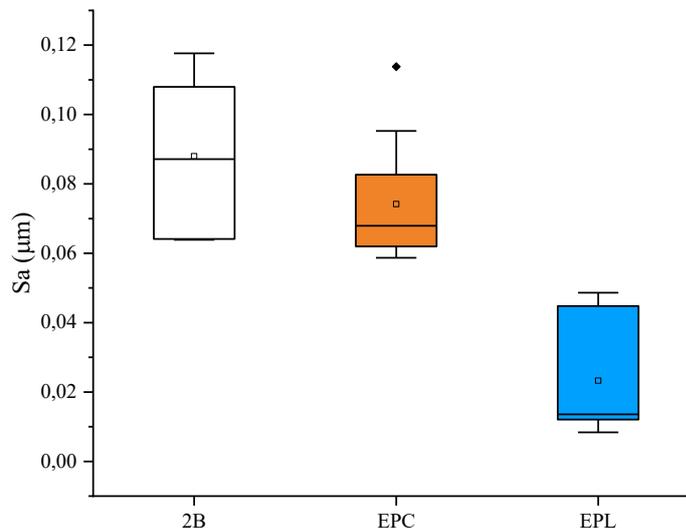
ao maior comprimento da projeção, causada pela deformação plástica típica do processo de manufatura das chapas, a laminação.

Para a condição EPC, nota-se que houve uma redução da profundidade dos vales, bem como um arredondamento das bordas desses vales e que a superfície se tornou mais nivelada, com um aspecto ondulado. Não é mais possível diferenciar a orientação oriunda da laminação.

Por fim, a condição EPL é visualmente mais polida que o eletropolimento comercial, não apresentando vales tão destacados em sua extensão e tendo um aspecto livre de defeitos, sem nenhum resquício do processo anterior de laminação. Entretanto, é possível identificar alguns picos espalhados ao longo da projeção.

Com o objetivo de quantificar tais observações visuais das projeções axonométricas, os parâmetros de rugosidade foram medidos e comparados entre si. A Figura 54 apresenta a rugosidade média,  $S_a$ , para as três condições de chapas analisadas enquanto que a Tabela 21 apresenta os valores das medianas, médias, intervalos interquartílicos e as variações percentuais das medianas em relação a condição inicial, sem eletropolimento.

Figura 54:  $S_a$  para as chapas a serem unidas



Nota-se uma redução na rugosidade média para as duas condições eletropolidas, com destaque para a condição EPL que atingiu uma redução de 84% da mediana em relação a condição 2B. Um comportamento ainda mais efetivo que o visto no Estudo A. Pela falta de dados provenientes da empresa, infelizmente não é possível discernir a influência dos parâmetros utilizados para o acabamento da condição EPC. Porém, o aspecto geral da superfície

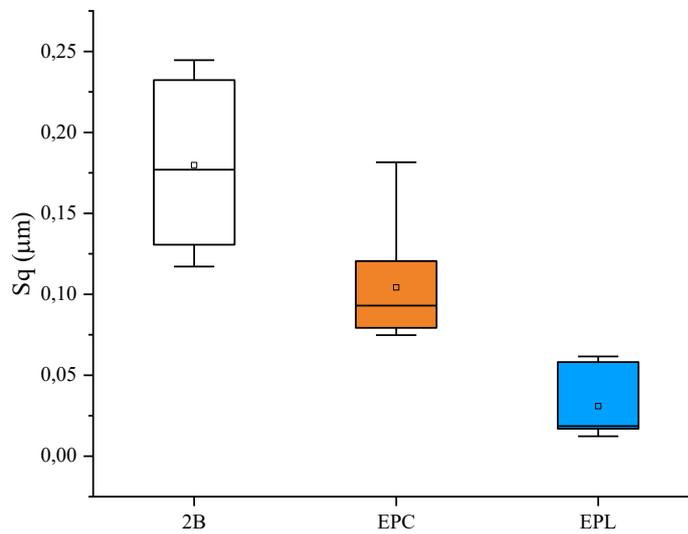
do eletropolimento em laboratório conseguiu superar o comercial em seus valores, embora os valores de  $S_a$  para a condição EPC apresentando menor dispersão, apresentando o menor intervalo interquartilico.

Tabela 21: Valores de  $S_a$  para condições a serem unidas por difusão.

Condição	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	Média ( $\mu\text{m}$ )	Intervalo Interquartilico ( $\mu\text{m}$ )	Varição mediana em relação a condição inicial (%)
2B	0,087	0,088	0,044	0%
EPC	0,068	0,074	0,018	-22%
EPL	0,014	0,023	0,032	-84%

Continuando a análise geral quantitativa da topografia das condições a serem unidas, a Figura 55 apresenta o parâmetro  $S_q$  em gráfico e a Tabela 22 os valores retirados da Figura 55. A rugosidade média quadrática segue na mesma tendência que o observado em  $S_a$ , onde as duas condições que passaram pelo processo de eletropolimento demonstraram valores menores do parâmetro quando comparado à valores da condição inicial.

Figura 55:  $S_q$  para as chapas a serem unidas.



O parâmetro  $S_q$ , obtido pela condição EPL foi de 89%, maior que o  $S_a$ , mostrando um comportamento similar a EPC. Entretanto, a dispersão dos resultados, para as condições eletropolidas usando ambos os parâmetros ( $S_q$  e  $S_a$ ) foi parecida entre si, com intervalos interquartilicos menores que o visto para a condição 2B. Tais resultados de rugosidade média concordam com as observações das projeções axonométricas, onde foi possível visualizar que

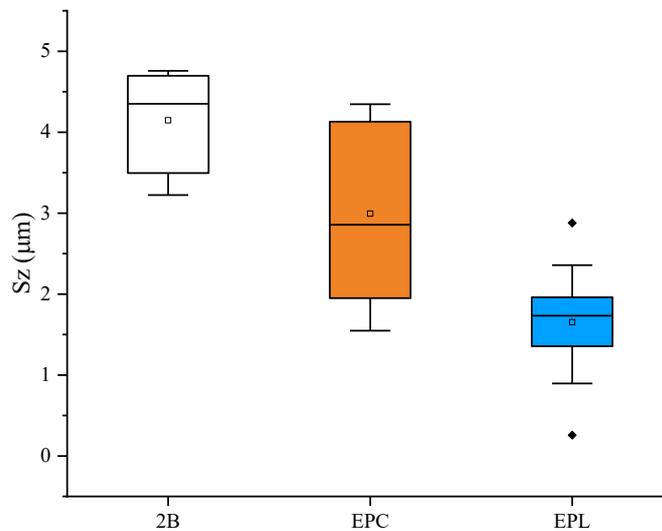
o aspecto rugoso diminuía com o uso dos dois tipos de eletropolimento, sendo alcançado um polimento mais efetivo no laboratório.

Tabela 22: Valores de Sq para condições a serem unidas por difusão.

Condição	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	Média ( $\mu\text{m}$ )	Intervalo Interquartílico ( $\mu\text{m}$ )	Varição Mediana em relação a condição inicial (%)
2B	0,177	0,180	0,102	0%
EPC	0,093	0,104	0,037	-47%
EPL	0,019	0,031	0,041	-89%

Outro aspecto importante para a união por difusão é a diferença de altura das superfícies, ou seja, a distância entre o maior pico ao vale mais profundo, dado pelo parâmetro Sz. A Figura 56 mostra os dados de Sz das amostras, enquanto a Tabela 23 mostra os mesmos valores apresentados no gráfico.

Figura 56: Sz para chapas a serem unidas



Pode-se observar que as tendências vistas nos parâmetros anteriores, Sa e Sq, podem ser confirmadas pelo parâmetro Sz, onde os maiores valores das distâncias pico-vale são dados pela condição 2B, seguido das amostras EPC e a EPL, sendo esta última a condição em que os valores de Sz apresentaram uma redução de 60% da sua mediana em relação a condição sem eletropolimento. Em relação a dispersão de resultados, novamente a melhor condição é a EPL

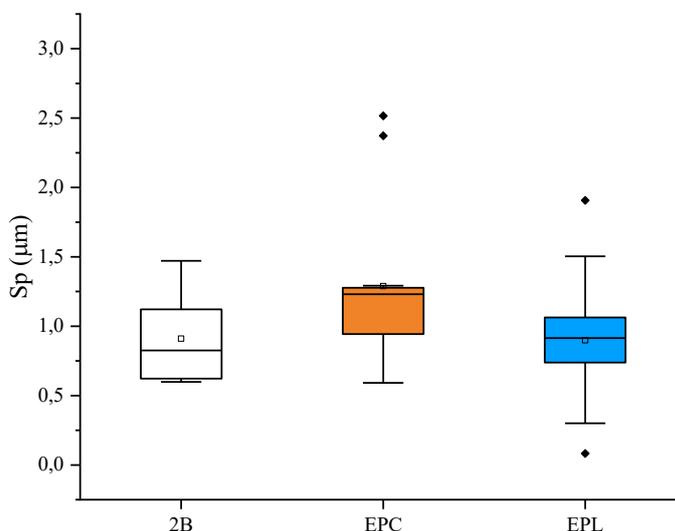
com o menor intervalo interquartilico de 0,597  $\mu\text{m}$ . Assim, pode-se chegar à conclusão de que a condição que alcançou o melhor nivelamento da superfície dentre as três estudadas, é a EPL.

Tabela 23: Valores de Sz para condições a serem unidas por difusão.

Condição	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	Média ( $\mu\text{m}$ )	Intervalo Interquartilico ( $\mu\text{m}$ )	Varição Mediana em relação a condição inicial (%)
2B	4,351	4,146	1,201	0%
EPC	2,857	2,993	2,164	-34%
EPL	1,732	1,653	0,597	-60%

Para avaliar separadamente os tamanhos máximos de pico e vale, apresenta-se primeiramente, o parâmetro de Sp, ou seja, a altura máxima de pico, na Figura 57 para as três chapas usadas. Na Tabela 24 são mostrados os principais valores retirados deste gráfico. Ao contrário do que foi observado pelos outros parâmetros, não há uma redução significativa nas medianas das condições eletropolidas em relação a 2B. Para a condição EPL, a diferença percentual em relação a 2B foi relativamente pequena, de 11%, bem diferente da redução de 54% observada para a mesma condição no Estudo A.

Figura 57: Sp para chapas a serem unidas



Como visto na Figura 53, a projeção axonométrica das amostras EPL mostrava picos espalhados em sua superfície. A hipótese mais provável para esses resultados é a saturação da solução à medida que esta é usada, diminuindo aos poucos a efetividade do eletropolimento. Nota-se que foram eletropolidas pelos menos 40 chapas para a confecção do bloco a ser unido por difusão, sendo que as amostras foram retiradas para análise aleatoriamente, sendo assim

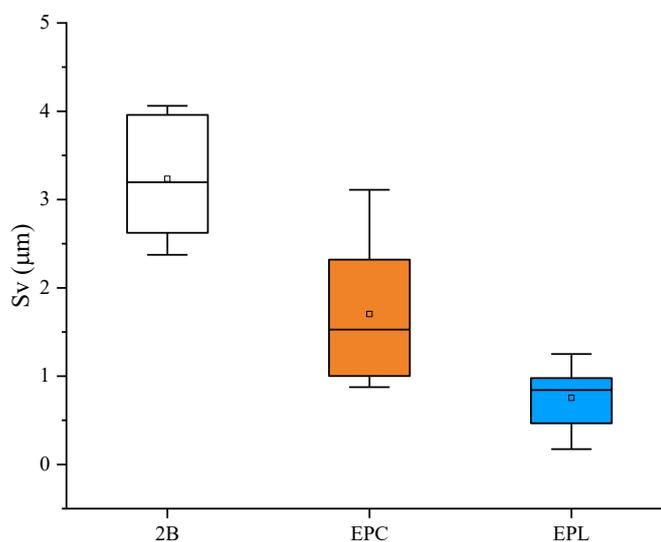
possível que as amostras usadas estivessem menos polidas. Entretanto não foi possível no presente trabalho determinar a influência da saturação da solução no processo de eletropolimento e nem o tempo necessário para trocá-la. Neste ponto, sugere-se que mais estudos sejam feitos. Não é possível especular sobre o que influenciou os resultados obtidos pela condição EPC, uma vez que a empresa que executou o serviço manteve sigilo quanto aos parâmetros de processo empregados.

Tabela 24: Valores de  $S_p$  para condições a serem unidas por difusão.

Condição	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	Média ( $\mu\text{m}$ )	Intervalo Interquartílico ( $\mu\text{m}$ )	Varição Mediana em relação a condição inicial (%)
2B	0,826	0,911	0,499	0%
EPC	1,231	1,289	0,320	49%
EPL	0,915	0,899	0,363	11%

Dados da profundidade máxima dos vales, dada por  $S_v$ , são apresentados na Figura 58, sendo os principais valores do gráfico organizados na Tabela 25. Analisando os resultados apresentados, percebe-se que os valores de  $S_v$  refletem diretamente os resultados de  $S_z$ , pois seguem a mesma tendência do parâmetro da distância pico-vale.

Figura 58:  $S_v$  para chapas a serem unidas



A condição EPL apresentou uma redução de 74% de  $S_v$ , em relação a condição sem eletropolimento. O eletropolimento feito em laboratório também obteve a menor dispersão, com um intervalo interquartílico de 0,518  $\mu\text{m}$ . Novamente o eletropolimento, ao remover o material

da superfície, faz com que a linha média da superfície se mova para baixo, nivelando a superfície e reduzindo o valor de Sv. Assim, infere-se com esses resultados que o maior contato é o obtido por superfícies tratadas na condição EPL, seguido da EPC e finalmente o bloco contendo as chapas 2B, sem eletropolimento.

Tabela 25: Valores de Sv para condições a serem unidas por difusão.

<b>Condição</b>	<b>Mediana (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Média (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Intervalo Interquartilico (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Varição Mediana em relação a condição inicial (%)</b>
2B	3,196	3,235	1,335	0%
EPC	1,528	1,704	1,017	-52%
EPL	0,843	0,754	0,518	-74%

A união por difusão foi realizada igualmente nas três condições de superfície estudadas, com o empilhamento de 40 chapas para formar cada bloco. A temperatura de união foi de 1040 °C, pressão de 9,5 MPa aplicada de maneira oscilante nos primeiros 10 minutos e constante nos minutos seguintes de aplicação, como o explicado anteriormente, com um tempo de 1 hora.

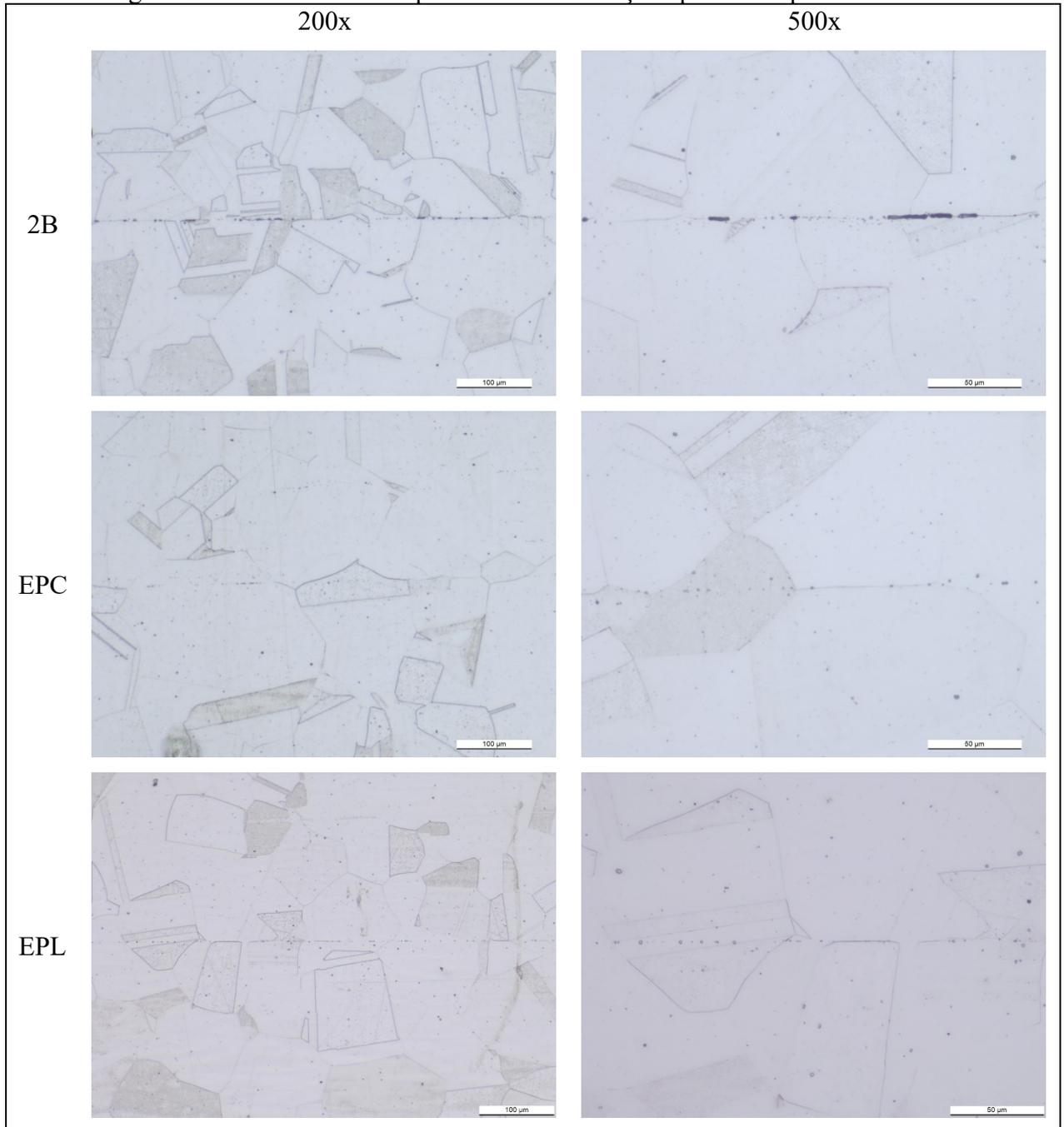
A Figura 59 apresenta as microestruturas na interface de união, após o processo termomecânico de união por difusão com dois diferentes aumentos, 200x e 500x. Avaliando as fotos não há uma diferença significativa em termos de tamanho de grão entre as três diferentes condições, visto que o ciclo térmico é o mesmo para as três condições o eletropolimento e não chega a afetar tais características do material.

A condição 2B mostra uma interface de união em que não há uma migração dos grãos através da linha de união e ainda há a presença de defeitos ao longo de sua extensão, mostrando que não houve um preenchimento total dos vazios durante a etapa de difusão volumétrica. Na imagem em 500x ainda é possível notar o tamanho e formato dos defeitos, em que alguns deles, apresentam um aspecto longo e contínuo, o que prejudica o comportamento mecânico da peça unida, sendo um ponto crítico de possível falha, já que reduzem a área transversal da amostra que suportaria esforços, além de serem nucleadores e propagadores de trinca.

As condições EPC e EPL exibem uma microestrutura similar, em que há uma migração e crescimento de grãos ao longo da interface de união, mostrando uma difusão mais efetiva que o visto para condição 2B, bem como defeitos significativamente menores e em menor quantidade, além de serem todos com o formato arredondado, o que diminui as chances de nuclearem e/ou propagarem trincas. Tal comportamento indica que a diminuição de rugosidade

e o aumento do contato entre as superfícies foi eficaz na qualidade da interface da união por difusão.

Figura 59: Microestruturas típicas de cada condição após união por difusão.

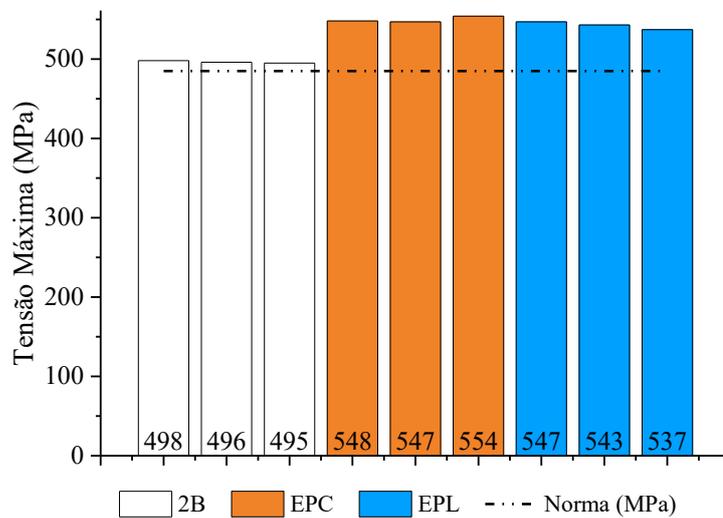


Os resultados de microestrutura têm influência direta no desempenho mecânico do material, sendo que para todas as propriedades estudadas, as condições que passaram pelo

processo de polimento eletrolítico, exibiram resultados satisfatórios e dentro dos valores da norma ASTM A240, considerando-se as propriedades do material de base, ou seja, como se o material não tivesse sofrido o processo de união por difusão.

A Figura 60 mostra os valores de tensão máxima obtidos a partir do ensaio mecânico de tração para cada uma das condições estudadas. O valor mínimo exigido por norma é de 485 MPa e todas as amostras submetidas ao ensaio de tração apresentaram tal valor, sendo que as condições de blocos com chapas eletropolidas mostraram um resultado de tensão máxima maior que para a condição sem eletropolimento.

Figura 60: Tensão Máxima dos blocos nas três diferentes condições



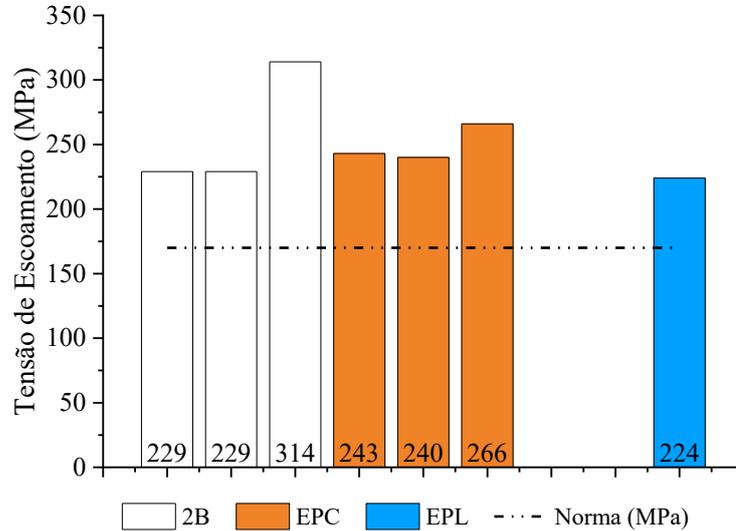
Vale ressaltar que todas as amostras foram ensaiadas de forma que a tensão fosse exercida de maneira transversal às linhas de união, a condição mais crítica de solicitação. Logo o resultado mostrado é ainda acima do requerido para o material de base, o que mostra o potencial do processo de união por difusão, mesmo para a condição sem eletropolimento.

A Figura 61 mostra a tensão de escoamento, com o valor mínimo exigido pela norma A240 representado pela linha tracejada no gráfico, sendo de 170 MPa. Os resultados para essa propriedade são similares e acima do mínimo requerido para todas as condições, não sendo vistas diferenças significativas entre os blocos sem ou com eletropolimento.

O único ponto de atenção é que há apenas um resultado para o bloco EPL. Isso se deu devido a um problema com as dimensões finais dos corpos de prova que acabaram por ter um tamanho menor que o necessário para a sua colocação no extensômetro, equipamento usado na medição da tensão de escoamento com a precisão necessária. Como tal propriedade não é um ponto crítico na avaliação das propriedades mecânicas da união por difusão, visto que o bloco

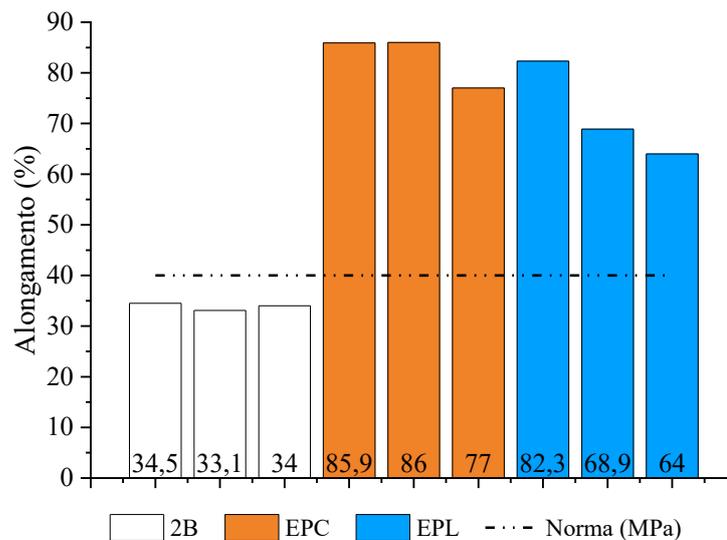
2B não apresenta problemas em atingir o valor mínimo, o estudo não foi prejudicado pela falta desses resultados.

Figura 61: Tensão de Escoamento dos blocos nas três diferentes condições



Para os resultados de alongamento, exibidos pela Figura 62, é possível observar que o bloco com condição 2B não alcançou o mínimo de 40% exigido pela norma ASMT A240, enquanto que as condições que passaram pelo processo de eletropolimento atingiram e ultrapassaram este valor com folga, sendo que a condição EPC apresentou os melhores resultados. Esta medida, juntamente com a propriedade de redução de área que será vista a seguir, demonstra o tipo de comportamento do material no sentido da ductilidade e tenacidade.

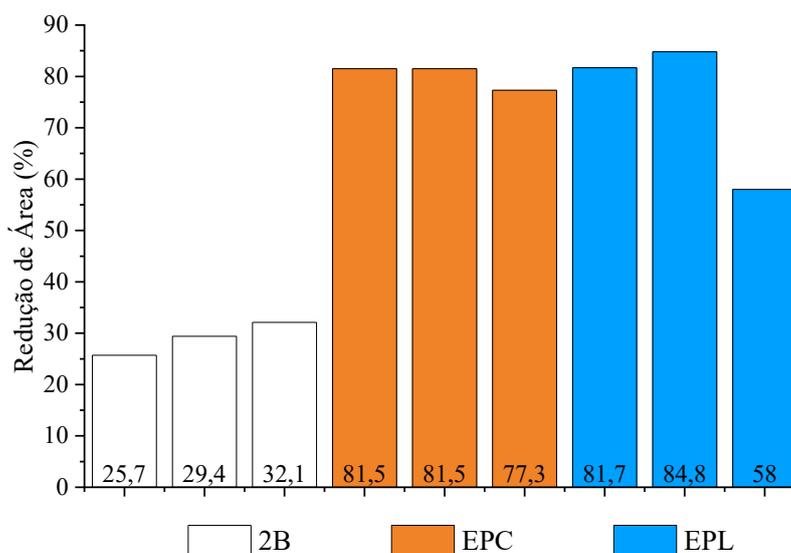
Figura 62: Alongamento dos blocos nas três diferentes condições



Os valores de alongamento para as condições eletropolidas indicam um comportamento típico de materiais dúcteis, indicando que o bloco 2B, apresentou um comportamento mais frágil que as outras condições. Tal resultado pode ser relacionado diretamente à quantidade e tamanho dos defeitos encontrados na interface de união, para as três condições. A presença de defeitos maiores e em maior quantidade se confirmou como um ponto crítico propício a falhas, demonstrado pelo comportamento mais frágil da condição 2B, enquanto que os blocos EPC e EPL, com defeitos menores, arredondados e em menor quantidade, atingiram valores maiores de alongamento.

Por fim, a Figura 63 apresenta os valores de redução de área obtidos pelos ensaios de tração. Apesar de não se ter um mínimo exigido por norma, essa propriedade está intimamente ligada com a propriedade de alongamento e a tenacidade do material. Novamente, o bloco com condição 2B apresenta valores de redução de área menores que para as condições eletropolidas, que demonstraram resultados maiores que o dobro para quase todas as amostras.

Figura 63: Redução de área dos blocos nas três diferentes condições



A diferença entre as duas condições eletropolidas, EPC e EPL não foi tão significativa quanto para o alongamento, tendo os dois blocos apresentados valores similares com exceção de uma amostra para o bloco EPL que teve um ponto mais discrepante, mas ainda assim, com uma redução de área acima de 50%. Tal comportamento reforça ainda mais a ductilidade dos blocos eletropolidos e conseqüentemente a qualidade da união por difusão promovida pelo maior contato entre as chapas que passaram pelo processo de eletropolimento e que apresentam assim menor rugosidade.

Analisando os resultados mecânicos, pode-se chegar à conclusão de que as condições EPC e EPL, apesar de apresentarem superfícies com diferentes rugosidades, alcançam propriedades mecânicas similares. Infere-se desta forma, que há um limite na influência da redução da rugosidade por meio do eletropolimento nos resultados pós-união por difusão.

É possível relacionar os valores de rugosidade apresentados com os resultados obtidos pela união por difusão, principalmente os relacionados as alturas da topografia de superfície, com destaque para Sz e Sv. O parâmetro Sp, por si só, não foi crítico para os resultados do bloco eletropolido pois, apesar de ter apresentado um aumento em relação a condição sem eletropolimento, o processo de união por difusão pressionou esses picos, gerando micro deformações que posteriormente auxiliaram na difusão e preenchimento dos vazios ao longo da interface da união.

Já o parâmetro Sv, o mais crítico, foi significativamente melhorado após o processo de eletropolimento, refletindo diretamente nos resultados de Sz, mostrando um nivelamento da superfície e uma diminuição dos vales que seriam posteriormente preenchidos pelo processo de difusão volumétrica. Logo, com uma menor profundidade de vale, vê-se menores defeitos espalhados pela interface de união e conseqüentemente se obtém um comportamento mais dúctil e similar ao do material de base, tornando assim o eletropolimento um processo de grande potencial para a adequação da superfície para a união por difusão.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência dos principais parâmetros de eletropolimento bem como o efeito deste processo de acabamento na união por difusão de chapas empilhadas.

Foi possível determinar que os parâmetros de tempo e densidade de corrente possuem efeitos similares na redução da rugosidade e são intimamente relacionados, podendo ser compensados um pelo outro, mantendo o produto  $j \cdot t$ . No geral, quanto maior o tempo e a densidade de corrente, menor a rugosidade. A topografia inicial da superfície interfere diretamente no tempo e densidade necessários para atingir uma certa redução de rugosidade. Amostras com rugosidades iniciais menores, precisam de menos tempo e menor densidade de corrente para se obter um eletropolimento efetivo e vice-versa.

O eletropolimento é um processo efetivo para a diminuição e remoção da rebarba e incrustações provenientes da usinagem via jato d'água abrasivo bem como para promover a redução de rugosidade de superfícies. O processo de lixamento manual auxilia o polimento eletrolítico na redução da rugosidade, porém, há um claro limite de lixamento que, após atingido, não resulta em superfícies eletropolidas menos rugosas. Desta forma, o tempo de lixamento das chapas é um fator a ser considerado.

A condição escolhida para o processo de união por difusão em laboratório foi a de maior densidade de corrente e maior tempo, com um  $j \cdot t = 10 \text{ A} \cdot \text{min}/\text{cm}^2$ . Tal condição apresentou valores de rugosidade menores que o eletropolimento comercial, embora tais resultados não tenham se refletido de forma significativa nos resultados de união por difusão.

O bloco de referência, sem eletropolimento, demonstrou uma interface de união com muitos defeitos e sem migração de grão pela linha de união. Quanto às propriedades mecânicas, as propriedades de tensão máxima e tensão de escoamento apresentaram os valores superiores, mas próximos aos mínimos para o material de base, enquanto que as propriedades de alongamento e redução de área demonstraram um comportamento de fratura mais frágil. Ambas as condições eletropolidas apresentaram resultados microestruturais e mecânicos similares entre si, com poucos defeitos na interface de união e propriedades mecânicas ao nível do material de base, com comportamento dúctil de fratura, demonstrando que o eletropolimento foi fundamental na qualidade da união por difusão.

Para estudos futuros sugere-se a combinação do eletropolimento com um processo de acabamento mecânico automatizado, como por exemplo a lapidação, bem como a aplicação do eletropolimento na união por difusão de chapas com canais, sejam eles fabricados via jato

d'água abrasivo ou com outro tipo de usinagem, com o intuito de avaliar outros aspectos mecânicos, aplicados ao trocador de calor, como a rugosidade dentro dos canais após o eletropolimento e a sua influência nas propriedades térmicas do trocador.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287 Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** 2002.

AWAD, A. M. et al. Electropolishing of AISI-304 stainless steel for protection against SRB biofilm. **Surface and Coatings Technology**, v. 206, n. 14, p. 3165–3172, 15 mar. 2012.

BEAMUD, E. M. et al. Impact of electrolyte concentration on surface gloss in electropolished stainless steel. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 663–670, 2017.

BLATEYRON, F. Good practices for the use of areal filters. 2014.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN ISO 4288 Geometric product specifications (GPS) - surface texture: profile method: rules and procedures for the assessment of surface texture.** British Standards Institution, 1998.

CHEN, S. C.; TU, G. C.; HUANG, C. A. The electrochemical polishing behavior of porous austenitic stainless steel (AISI 316L) in phosphoric-sulfuric mixed acids. **Surface and Coatings Technology**, v. 200, n. 7, p. 2065–2071, 21 dez. 2005.

COELHO, L. B. et al. Mechanical and corrosion characterization of industrially treated 316L stainless steel surfaces. **Surface and Coatings Technology**, v. 382, 25 jan. 2020.

DATTA, M.; VERCRUYSSSE, D. Transpassive Dissolution of 420 Stainless Steel in Concentrated Acids under Electropolishing Conditions. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 137, n. 10, 1990.

DAVIM, J. P. **Surface Integrity in Machining.** London: Springer London, 2010.

DAVISON, R. M. et al. A review of worldwide developments in stainless steels. **Materials and Design**, v. 7, n. 3, p. 111–119, 1986.

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

DUNKERTON, S. B. Diffusion Bonding\*. Em: LIENERT, T. et al. (Eds.). **ASM Handbook: Welding Fundamentals and Processes.** v. 6Ap. 682–689.

GARMONG, G.; PATON, N. E.; ARGON, A. S. Attainment of full interfacial contact during diffusion bonding. **Metallurgical Transactions A**, v. 6, n. 6, p. 1269–1279, 1975.

GIETZELT, T.; TOTH, V.; HUELL, A. Diffusion Bonding: Influence of Process Parameters and Material Microstructure. Em: **Joining Technologies.** InTech, 2016. p. 195–216.

GIETZELT, T.; TOTH, V.; HUELL, A. **Challenges of Diffusion Bonding of Different Classes of Stainless Steels. Advanced Engineering Materials**Wiley-VCH Verlag, , 1 fev. 2018.

GOMEZ-GALLEGOS, A. A.; MILL, F.; MOUNT, A. R. Surface finish control by electrochemical polishing in stainless steel 316 pipes. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 23, p. 83–89, 1 ago. 2016.

GOULD, J. E. Mechanisms of bonding for solid-state welding processes. Em: **ASM Handbook: Welding Fundamentals and Processes**. v. 6Ap. 89–97.

GUOGE, Z.; CHANDEL, R. S. Effect of surface roughness on the diffusion bonding of Incoloy MA 956. **Journal of Materials Science**, v. 40, p. 1793–1796, 2005.

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. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 139, n. June 2018, p. 1–23, 2019.

HENSEL, K. B. Electropolishing. **Metal Finishing**, v. 97, p. 440–448, 1999.

HESSELGREAVES, J. E.; LAW, R.; REAY, D. A. **Compact Heat Exchangers**. 2017.

HOCHENG, H.; KAO, P. S.; CHEN, Y. F. Electropolishing of 316L Stainless Steel for Anticorrosion Passivation. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 10, p. 414–418, 2001.

ICMC JÚNIOR. **COMO INTERPRETAR UM BOXPLOT?** Disponível em: <<https://icmcjunior.com.br/como-interpretar-um-grafico-boxplot/>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 25178-3 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 3: Specification operators**. 2012.

ISLAM, M. F.; RIDLEY, N. ISOSTATIC DIFFUSION BONDING OF A MICRODUPLEX STAINLESS STEEL. **Scripta Materialia**, v. 38, p. 1187–1193, 1998.

KAZAKOV, N. F. **Diffusion Bonding of Materials**. 1985.

LANDOLT, D. Fundamental aspects of electropolishing. **Electrochimica Acta**, v. 32, n. 1, p. 1–11, 1987.

LATIFI, A. et al. Electrochemical and chemical methods for improving surface characteristics of 316L stainless steel for biomedical applications. **Surface and Coatings Technology**, v. 221, p. 1–12, 25 abr. 2013.

LEE, E.-S. Machining Characteristics of the Electropolishing of Stainless Steel (STS316L). **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 16, p. 591–599, 2000.

LEE, H.-S. Diffusion bonding of metal alloys in aerospace and other applications. Em: **Welding and Joining of Aerospace Materials**. Elsevier, 2012. p. 320–344.

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.

LIN, C. C.; HU, C. C. Electropolishing of 304 stainless steel: Surface roughness control using experimental design strategies and a summarized electropolishing model. **Electrochimica Acta**, v. 53, n. 8, p. 3356–3363, 10 mar. 2008.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel**. 2005.

LOCHYŃSKI, P. et al. Electrochemical Reduction of Industrial Baths Used for Electropolishing of Stainless Steel. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, 2018.

MAHONEY, M. W.; BAMPTON, C. C. Fundamentals of Diffusion Bonding\*. Em: **ASM Handbook: Welding Fundamentals and Processes**. 2011. v. 6Ap. 217–221.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. 2011. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf>>.

MOHAN, S. et al. Electropolishing of stainless steel - A review. **Transactions of the Institute of Metal Finishing**, v. 79, n. 4, p. 140–142, 2001.

MORTEAN, M. V. V. et al. Study of diffusion bonding parameters of AISI 316L stainless steel. **Soldagem e Inspecao**, v. 24, 2019.

NAZNEEN, F. et al. **Electropolishing of medical-grade stainless steel in preparation for surface nano-texturing**.

O'BRIEN, A.; GUZMAN, C. Diffusion Welding and Diffusion Brazing. Em: **Welding Handbook**. v. 3p. 421–450. 2007.

OLYMPUS. **Introduction to Surface Roughness Measurement Introduction to Noncontact Surface Roughness**. Olympus, 2017.

PETERSON, D. T.; HOPKINS, E. N. **ELECTROPOLISHING THE RARE-EARTH METALS**. 1964.

POPOV, K.; DJOKIC, S.; GRGUR, B. Electropolishing. Em: **FUNDAMENTAL ASPECTS OF ELECTROMETALLURGY**. 2002. p. 226–232.

ROKOSZ, K. et al. XPS depth profiling analysis of passive surface layers formed on austenitic AISI 304L and AISI 316L SS after high-current-density .... **Surface & Coatings Technology**, v. 276, p. 516–520, 2015.

ROTTY, C. et al. Electropolishing of CuZn brasses and 316L stainless steels: Influence of alloy composition or preparation process (ALM vs. standard method). **Surface and Coatings Technology**, v. 307, p. 125–135, 15 dez. 2016.

ROTTY, C. et al. Comparison of electropolishing behaviours of TSC, ALM and cast 316L stainless steel in H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. **Surfaces and Interfaces**, v. 6, p. 170–176, 1 mar. 2017.

ROTTY, C. et al. Electrochemical Superfinishing of Cast and ALM 316L Stainless Steels in Deep Eutectic Solvents: Surface Microroughness Evolution and Corrosion Resistance. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 166, n. 13, p. C468–C478, 2019.

SEEWIG, J. Areal filtering methods. Em: **Characterisation of Areal Surface Texture**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. v. 9783642364587p. 67–106.

SOJITRA, P. et al. Electropolishing of 316LVM Stainless Steel Cardiovascular Stents: An Investigation of Material Removal, Surface Roughness and Corrosion Behaviour. 2010.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B46.1 - Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay B46. 1. v. 2009, p. 2, 2009.

TYAGI, P. et al. Reducing the roughness of internal surface of an additive manufacturing produced 316 steel component by chempolishing and electropolishing. **Additive Manufacturing**, v. 25, p. 32–38, 1 jan. 2019.

VANDER VOORT, G. F. Chemical and Electrolytic Polishing. Em: **ASM Handbook**. ASM International, 2004. v. 9p. 281–293.

WANG, A.; OHASHI, O.; UENO, K. Effect of Surface Asperity on Diffusion Bonding. **Materials Transactions**, v. 47, p. 179–184, 2006.

WANG, Z. C. et al. Evaluation of diffusion bonds formed between superplastic sheet materials. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE**, v. 31, p. 5199–5206, 1996.

WASHKO, S. D.; AGGEN, G. Wrought Stainless Steels. Em: **ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. 1990. v. 1p. 841–907.

YANG, G. et al. Electropolishing of surfaces: theory and applications. **Surface Engineering**, v. 33, n. 2, p. 149–166, 2016.

ZHANG, C.; LI, H.; LI, M. Role of surface finish on interface grain boundary migration in vacuum diffusion bonding. **Vacuum**, v. 137, p. 49–55, 1 mar. 2017.

ZIOMEK-MOROZ, M. Electropolishing. Em: **ASM Handbook: Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection**. 2003. v. 13Ap. 139–142.