

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LEONARDO CAMILO SUTER

**APLICAÇÃO DA LIGA DE NÍQUEL MONEL 400 COMO METAL DE ADIÇÃO NA
SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL UNS S32750 COM LASER PULSADO
Nd:YAG**

Ilha Solteira

2023

LEONARDO CAMILO SUTER

**APLICAÇÃO DA LIGA DE NÍQUEL MONEL 400 COMO METAL DE ADIÇÃO NA
SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL UNS S32750 COM LASER PULSADO
Nd:YAG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella
Orientador

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S965a Suter, Leonardo Camilo.
Aplicação da liga de níquel Monel 400 como metal de adição na soldagem de aço inoxidável UNS S32750 com laser pulsado Nd:YAG / Leonardo Camilo Suter. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
55 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Vicente Afonso Ventrella

Inclui bibliografia

1. Soldagem. 2. Laser. 3. Nd:YAG. 4. Aço Inoxidável. 5. Superduplex UNS S32750. 6. Monel 400.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "Júlio de Mesquita Filho".
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ATA DA DEFESA TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: APLICAÇÃO DA LIGA DE NÍQUEL MONEL 400 COMO METAL DE ADIÇÃO NA
SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL UNS S32750 COM LASER PULSADO Nd:YAG

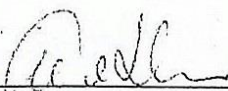
ALUNO: LEONARDO CAMILO SUTER

ORIENTADOR: Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella

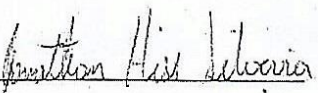
Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora

Nota: 9,0

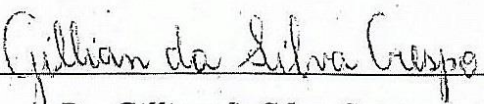
Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella
Presidente (Orientador)



Eng. Jonathan Hess Silveira



Dr. Gillian da Silva Crespo

Ilha Solteira, 03 de Maio de 2023

Dedico este trabalho aos meus pais Wesller e Fabiana, pois foram seus esforços que me fizeram chegar onde estou, e também à minha namorada Beatriz, por todo o apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Vicente, pela oportunidade e todo o acompanhamento durante a pesquisa.

Aos meus colegas Jonatas e Bruna, pela ajuda cedida durante a preparação das amostras utilizadas na pesquisa.

À minha família, por todo o apoio e pela oportunidade que me levaram a uma educação de qualidade.

Aos meus companheiros da República Sedex e do Centro Acadêmico “Ozires Silva”, pelo acolhimento e por todos os aprendizados que levarei para toda a vida.

Aos meus colegas de curso, pelo companheirismo e pelas experiências que agregaram na minha formação.

Ao meu computador, por ter aguentado até o fim do curso sem maiores complicações.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, seu corpo docente e técnicos.

À esta universidade e seus funcionários.

“Ler é soldar novos conhecimentos a memória.”

(Thiago Lucarini)

RESUMO

Os aços inoxidáveis superduplex são aços que apresentam alta resistência à corrosão aliada com uma boa resistência mecânica. Por isso, vêm sendo cada vez mais empregados na indústria petrolífera, em peças e componentes submetidos à água do mar, ambiente este que promove a oxidação e corrosão de metais. Assim, também é necessário que se tenha controle no processo de soldagem desses aços, pois o aço inoxidável superduplex forma excesso de ferrita quando soldado, reduzindo a porcentagem de austenita em sua estrutura, o que reduz sua resistência à corrosão. Por conta disso, uma forma de prevenir esse desbalanceamento é soldando com adição de liga de níquel (pois o níquel é um elemento de liga que promove a formação de austenita) no aço superduplex. No trabalho foi estudado o processo de solda no aço inoxidável superduplex UNS S32750 com adição de liga de níquel Monel 400. Para isso, utilizou-se uma máquina de *laser* pulsado Nd:YAG, com potência de pico de 1 kW e largura temporal de 10 ms, resultando em uma energia de pulso igual a 10 J, frequência de 9 Hz, e velocidade de solda de 1,0 mm/s, obtendo assim taxa de sobreposição igual a 85% e aporte térmico igual a 1,0 kJ/mm, sendo que as chapas foram soldadas nos dois lados, gerando assim dois cordões de solda. Então, foram produzidas duas amostras contendo o cordão de solda, realizado um ensaio metalográfico com ácido oxálico 10%, analisando as macrografias e micrografias de cada uma das amostras. Não foram detectadas zonas termicamente afetadas (ZTAs) macroscopicamente visíveis nas amostras, mas ambas apresentaram formação de poros e trincas. Também foi detectado que as amostras mantiveram um balanceamento entre a ferrita e austenita, possuindo aproximadamente 52% de ferrita e 48% de austenita, indicando uma eficácia na adição na liga Monel 400 no metal de solda. Por fim, foi possível perceber que o ataque eletroquímico realizado com 6 V por 5 s foi o que melhor revelou a microestrutura do cordão de solda.

Palavras-chave: Soldagem, *Laser*, Nd:YAG, Aço Inoxidável, Superduplex UNS S32750, Monel 400.

ABSTRACT

The superduplex stainless steels are steels that exhibit high corrosion resistance combined with great mechanical strength. Therefore, they've been increasingly used in the oil industry, in parts and components subjected to seawater, an environment that promotes oxidation and corrosion of metals. Thus, it is also necessary to control the welding of these steels, for the superduplex stainless steel forms an excess of ferrite when welded, reducing the percentage of austenite in its microstructure, which reduces its corrosion resistance. For that, one way to prevent that imbalance is to weld with the addition of nickel alloy (as nickel is an alloy element that promotes the formation of austenite), in superduplex stainless steel. In this research, the welding process was studied in superduplex stainless steel UNS S32750 with the addition of nickel alloy Monel 400. For this, a pulsed Nd:YAG laser welding machine was used, using 1 kW as peak power and temporal width of 10 ms, resulting in a pulse energy of 10 J, frequency of 9 Hz and welding speed of 1.0 mm/s, obtaining an overlapping rate of 85%, and heat input of 1.0 kJ/mm, and the plates were welded on both sides, generating two weld beads. Then, two samples were produced containing the weld bead, a metallographic test was performed with 10% oxalic acid, analyzing the macrographs and micrographs of each sample. Macroscopically visible heat affected zones (HAZ) were not detected in the samples, but both presented pore and cracks formation. It was also detected that the samples maintained a balance between the ferrite and austenite, with approximately 52% of ferrite and 48% of austenite, indicating an effectiveness in adding Monel 400 alloy to the weld metal. Finally, it was possible to notice that the electrochemical attack performed with 6 V for 5 s was the best to reveal the microstructure of the weld bead.

Keywords: Welding, Laser, Nd:YAG, Stainless Steel, Superduplex UNS S32750, Monel 400.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de soldagem a <i>laser</i>	18
Figura 2	Cordão de solda resultante de um processo de soldagem a <i>laser</i> pulsado Nd:YAG	19
Figura 3	Foto da máquina de soldagem a <i>laser</i>	27
Figura 4	Representação da disposição dos metais antes da soldagem	27
Figura 5	Representação da produção das amostras analisadas	28
Figura 6	Fotos: a) do apoio para as lixas; b) da politriz metalográfica	28
Figura 7	Foto da máquina de banho ultrassônico	29
Figura 8	Representação do ataque eletroquímico empregado	29
Figura 9	Foto das amostras, em ordem, 1 e 2	30
Figura 10	Foto do Stereo Microscópio Zeiss – Discovery V8	30
Figura 11	Foto do microscópio Carl Zeiss com câmera QColor 5	31
Figura 12	Cordão de solda da: a) Amostra 1; b) Amostra 2, divididos em setores	31
Figura 13	Foto do cordão de solda	33
Figura 14	Macroestrutura da Amostra 1 com dimensões de descontinuidades	35
Figura 15	Macroestrutura da Amostra 2 com dimensões de descontinuidades	36
Figura 16	Foto da Amostra 1 com ataque a 6 V antes do tratamento com software	37
Figura 17	Exemplo de análise da Amostra 1 com ataque a 6 V depois do tratamento com software	37
Figura 18	Foto da Amostra 2 com ataque a 6 V antes do tratamento com software	39
Figura 19	Exemplo de análise da Amostra 2 com ataque a 6 V depois do tratamento com software	39
Figura A.1	Fotos nos setores: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; e f) 6 da Amostra 1 com ataque a 5 V	44
Figura A.2	Análise no setor 1 da Amostra 1 com ataque a 5 V	45
Figura A.3	Análise no setor 2 da Amostra 1 com ataque a 5 V	45

Figura A.4	Análise no setor 3 da Amostra 1 com ataque a 5 V	45
Figura A.5	Análise no setor 4 da Amostra 1 com ataque a 5 V	46
Figura A.6	Análise no setor 5 da Amostra 1 com ataque a 5 V	46
Figura A.7	Análise no setor 6 da Amostra 1 com ataque a 5 V	46
Figura A.8	Fotos nos setores: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; e f) 6 da Amostra 1 com ataque a 6 V	47
Figura A.9	Análise no setor 1 da Amostra 1 com ataque a 6 V	48
Figura A.10	Análise no setor 2 da Amostra 1 com ataque a 6 V	48
Figura A.11	Análise no setor 3 da Amostra 1 com ataque a 6 V	48
Figura A.12	Análise no setor 4 da Amostra 1 com ataque a 6 V	49
Figura A.13	Análise no setor 5 da Amostra 1 com ataque a 6 V	49
Figura A.14	Análise no setor 6 da Amostra 1 com ataque a 6 V	49
Figura A.15	Fotos nos setores: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; e f) 6 da Amostra 2 com ataque a 5 V	50
Figura A.16	Análise no setor 1 da Amostra 2 com ataque a 5 V	51
Figura A.17	Análise no setor 2 da Amostra 2 com ataque a 5 V	51
Figura A.18	Análise no setor 3 da Amostra 2 com ataque a 5 V	51
Figura A.19	Análise no setor 4 da Amostra 2 com ataque a 5 V	52
Figura A.20	Análise no setor 5 da Amostra 2 com ataque a 5 V	52
Figura A.21	Análise no setor 6 da Amostra 2 com ataque a 5 V	52
Figura A.22	Fotos nos setores: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; e f) 6 da Amostra 2 com ataque a 6 V	53
Figura A.23	Análise no setor 1 da Amostra 2 com ataque a 6 V	54
Figura A.24	Análise no setor 2 da Amostra 2 com ataque a 6 V	54
Figura A.25	Análise no setor 3 da Amostra 2 com ataque a 6 V	54
Figura A.26	Análise no setor 4 da Amostra 2 com ataque a 6 V	55
Figura A.27	Análise no setor 5 da Amostra 2 com ataque a 6 V	55
Figura A.28	Análise no setor 6 da Amostra 2 com ataque a 6 V	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição química do aço inoxidável superduplex UNS S32750, em porcentagem de massa (%)	26
Tabela 2	Composição química, em porcentagem de massa (%), da liga de níquel Monel 400	26
Tabela 3	Dados obtidos por análise do cordão de solda	33
Tabela 4	Percentual de ferrita e austenita em cada seção analisada da Amostra 1	38
Tabela 5	Percentual de ferrita e austenita em cada seção analisada da Amostra 2	40

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CO ₂	Dióxido de carbono
°C	Graus Celsius
Hz	Hertz
J	Joule
J/mm	Joule por milímetro
kJ/mm	Kilojoule por milímetro
kW	Kilowatt
<i>Laser</i>	Do inglês, <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
MPa	Megapascal
MIG	Do inglês, <i>Metal Inert Gas</i>
µm	Micrômetro
mm	Milímetro
mm/s	Milímetro por segundo
ms	Milisegundo
PRE	Do inglês, <i>Pitting Resistance Equivalent</i>
TIG	Do inglês, <i>Tungsten Inert Gas</i>
V	Volts
YAG	Do inglês, <i>Yttrium-Aluminum-Garnet</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Aporte térmico (J/mm)
D	Diâmetro dos pulsos (mm)
$D_{\text{médio}}$	Diâmetro médio dos pulsos (mm)
$\Delta d_{\text{médio}}$	Distância média entre os pulsos (mm)
E	Energia de pulso (J)
f	Frequência dos pulsos (Hz)
t	Largura temporal (ms)
P	Potência de pico (kW)
TS	Taxa de sobreposição
v	Velocidade de solda (mm/s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	SOLDAGEM	18
2.1.1	Princípios da solda a <i>laser</i>	18
2.1.2	Taxa de sobreposição	19
2.1.3	Aporte térmico	20
2.1.4	Refletividade	20
2.1.5	Gás de proteção	21
2.2	AÇOS INOXIDÁVEIS	21
2.2.1	Aços inoxidáveis martensíticos	22
2.2.2	Aços inoxidáveis ferríticos	22
2.2.3	Aços inoxidáveis austeníticos	23
2.2.4	Aços inoxidáveis duplex	23
2.2.5	Aços inoxidáveis superduplex	24
2.3	LIGAS DE NÍQUEL	24
2.3.1	Monel 400	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	26
3.2	PROCEDIMENTO	26
3.2.1	Soldagem das chapas	26
3.2.2	Preparação das amostras	27
3.2.3	Análise macrográfica	30
3.2.4	Análise micrográfica	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	TAXA DE SOBREPOSIÇÃO E APORTE TÉRMICO	33

4.1.1	Taxa de sobreposição	33
4.1.2	Aporte térmico	34
4.2	ANÁLISE MACROGRÁFICA	35
4.2.1	Amostra 1	35
4.2.2	Amostra 2	35
4.3	ANÁLISE MICROGRÁFICA	36
4.3.1	Amostra 1	36
4.3.2	Amostra 2	38
5	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42
	APÊNDICE A – Fotos das análises micrográficas	44

1 INTRODUÇÃO

Diversos tipos de aços são empregados hoje em dia para construções e equipamentos na indústria petrolífera, e dentre eles destaca-se a utilização dos aços inoxidáveis em componentes metálicos, em função do ambiente agressivo do ponto de vista corrosivo em que esses componentes trabalham, já que estes tipos de aço possuem elevada resistência à corrosão.

Para tanto, deve-se escolher o melhor aço para que este cumpra sua função de forma mais eficiente, e nesse contexto, existem os aços superduplex, pois apresentam maior resistência à corrosão e maior resistência mecânica quando comparados aos aços convencionais pela presença principalmente de níquel e cromo, entre outros metais, na sua composição.

No entanto, esses aços apresentam alta dificuldade no seu manuseio, e seu processo de soldagem não é diferente. Deve-se manter um controle durante todo o processo, para que as propriedades citadas não sejam comprometidas, e assim consiga manter o equipamento, componente ou estrutura funcionando corretamente.

Os aços inoxidáveis superduplex possuem uma matriz volumétrica binária composta de aproximadamente 50% de ferrita e 50% de austenita. Porém, sem o devido controle, após a soldagem desses aços ocorre um desbalanceamento entre o percentual de componente, predominando a presença de ferrita na sua microestrutura.

Uma forma de evitar o comprometimento da resistência à corrosão dos aços inoxidáveis superduplex é adicionando uma liga de níquel, tal qual o Monel 400, de modo a promover a formação de austenita novamente na estrutura do aço inoxidável e, conseqüentemente, manter o balanceamento das fases.

Essa soldagem pode ser feita utilizando um feixe de *laser*, que derrete o metal base para formar o metal de solda com alta taxa de resfriamento. Uma das formas de se soldar com o *laser* é utilizando o *laser* pulsado Nd:YAG, onde libera-se pulsos de *laser* que derretem o metal formando poças de metal líquido que se solidificam rapidamente em seguida, soldando o metal em pequenos pulsos sobrepostos entre si.

1.1 OBJETIVO

O objetivo principal do estudo foi avaliar a adição da liga de níquel Monel 400 na soldagem do aço inoxidável superduplex UNS S32750, através de uma fonte *laser*

pulsada Nd:YAG, verificando o balanceamento de fases na junta soldada, já que o níquel promove a formação de austenita na sua estrutura.

Além disso, também foi analisada a metalografia, tentando encontrar um ataque químico que melhor revelasse a microestrutura do cordão de solda, permitindo assim uma melhor análise com o uso do microscópio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM

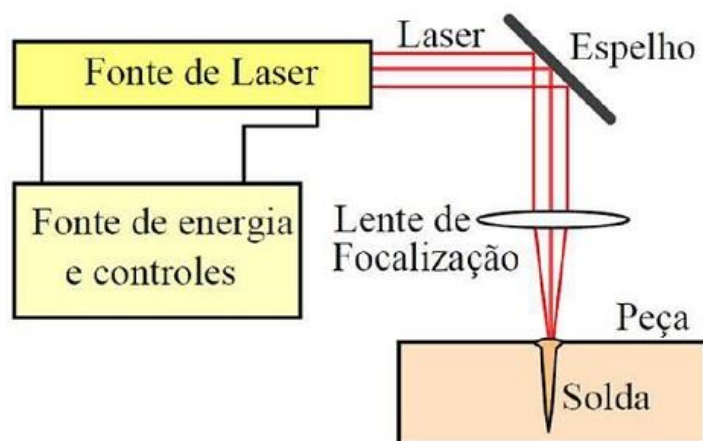
Segundo Drapinski (1979), "soldagem é um processo de união ou revestimento de materiais, através da aplicação de calor, assistido ou não de pressão". Para os aços, eles se fundem e com a subsequente retirada da fonte de calor eles se solidificam novamente, porém dessa vez unidos.

Também de acordo com Griffing, et al (1971), existem diferentes formas de soldagem, como por arco elétrico, por gás inerte de tungstênio (TIG), gás metálico inerte (MIG) e a soldagem a *laser* (em inglês, *light amplification by stimulated emission of radiation*, ou amplificação da luz por emissão estimulada de radiação), sendo que esta última será o foco desse relatório.

2.1.1 Princípios da solda a *laser*

Griffing, et al (1971) definem a solda a *laser* como a concentração de um *laser* em um ponto da região que se deseja soldar, promovendo assim a sua fundição (Figura 1). A quantidade de metal que será fundido depende da intensidade e da energia transferida pelo *laser*. O *laser* pode ser originário de uma fonte sólida ou de um gás, e é focado através de lentes e espelhos para ajustar a energia transferida de acordo com os parâmetros desejados.

Figura 1 – Esquema de soldagem a *laser*



Fonte: Almeida (2013).

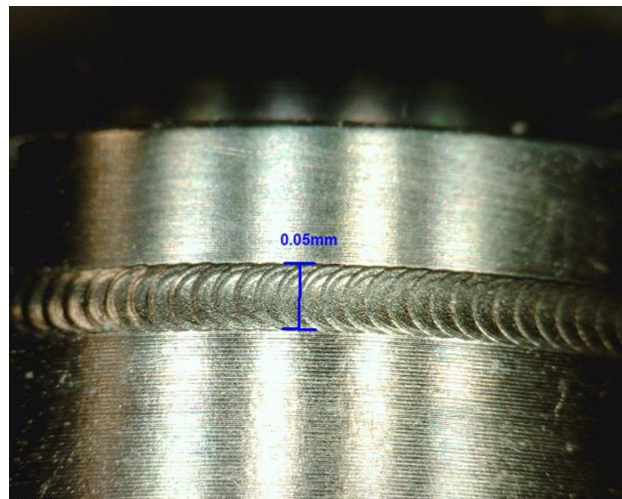
De acordo com Kou (2003), em um *laser* de estado sólido, um cristal é dopado com algum elemento de transição. No caso do *laser* Nd:YAG, é utilizado um cristal ítrio-alumínio-granada (em inglês *yttrium-aluminum-garnet*) dopado com neodímio, metal cujos elétrons podem ser excitados para as camadas externas da eletrosfera (mais energéticas) através da sua exposição à pulsação de luz intensa. Essa energia armazenada é então liberada na forma de calor e luz quando os elétrons retornam às camadas mais internas (menos energéticas), soldando assim o material através de pulsos. Os níveis de energia de um *laser* Nd:YAG pode ser de 3 kW e até mesmo de 5 kW.

Ainda segundo Kou (2003), como exemplo de *laser* de gás, tem-se o *laser* de CO₂, que é na verdade composto por, além do CO₂, por gás nitrogênio (N₂) e gás hélio (He). Essa mistura de gases é continuamente estimulada por eletrodos, gerando assim uma soldagem contínua (diferentemente dos pulsos gerados pelo *laser* Nd:YAG). Os níveis de energia desse tipo de solda são maiores, podendo alcançar valores iguais a 15 kW.

2.1.2 Taxa de sobreposição

O cordão de solda formado com o uso da solda a *laser* pulsado Nd:YAG resulta em uma solda semelhante à indicada pela Figura 2.

Figura 2 – Cordão de solda resultante de um processo de soldagem a *laser* pulsado Nd:YAG



Fonte: LaserStar Technologies Corporation (s.d.)

Na Figura 2 pode-se notar vários pulsos, sobrepostos uns aos outros, causados por uma máquina de solda a *laser*. Como mostram Ghaini et al (2007), existe uma equação, demonstrada pela Equação (1), que indica a taxa de sobreposição (TS) da solda, em função da velocidade de solda (v), da frequência dos pulsos (f), e do diâmetro de cada pulso (D).

$$TS = 1 - \frac{v}{f \cdot D} \quad (1)$$

Segundo Zeemann (2013), também é possível calcular a taxa de sobreposição através de imagens de microscópio pela Equação (2), calculada pelo diâmetro médio de cada pulso ($D_{médio}$) e da distância média entre cada pulso ($\Delta d_{médio}$).

$$TS = \frac{D_{médio} - \Delta d_{médio}}{D_{médio}} \quad (2)$$

Os valores médios são retirados a partir da análise de uma imagem do cordão de solda.

2.1.3 Aporte térmico

Zeemann (2013) também mostra que o aporte térmico (H) é a quantidade de energia gerada pelo processo de solda por cada unidade de comprimento do cordão de solda, representada pela Equação (3).

$$H = \frac{P}{v} \quad (3)$$

onde P é a potência aplicada em cada pulso da solda.

2.1.4 Refletividade

Segundo Kou (2003), existe, porém, um problema na utilização do *laser* para o processo de soldagem, que é a refletividade do *laser* na superfície do metal a ser

soldado, pois aproximadamente 95% da energia pode ser refletida em um *laser* de CO₂, por exemplo, se a superfície estiver bem polida. No *laser* Nd:YAG, esse valor é ligeiramente menor. Essa reflexão pode danificar o equipamento, o que pode gerar altos custos para manutenção, pois o próprio equipamento já possui um custo elevado. Assim, pode-se recorrer a técnicas que visem aumentar a rugosidade da região que sofrerá a solda para reduzir a refletividade, ou ainda inclinar o *laser*, de modo que a energia refletida seja direcionada para fora da lente da máquina de solda, garantindo assim o seu funcionamento.

2.1.5 Gás de proteção

Kou (2003) também ressalta que, devido à ionização derivada do raio *laser*, existe a produção de plasma durante o processo de soldagem a *laser*. Esse plasma absorve e dispersa o raio *laser*, reduzindo assim a profundidade da penetração da solda. Então, para evitar que exista essa ionização, utiliza-se um gás de proteção, que pode ser hélio (He) ou argônio (Ar), que repele o plasma da direção do *laser*.

2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS

De acordo com Silva & Mei (2010), aços inoxidáveis são aços ligados com cromo com teores em peso mínimos de 12% deste metal. São aços altamente resistentes à corrosão e oxidação, que aliado às suas propriedades mecânicas, mesmo a altas temperaturas, se tornam muito interessantes para diversas aplicações em engenharia, principalmente onde o meio é bastante corrosivo.

Também segundo Silva & Mei (2010), a sua resistência se dá pela formação de uma camada superficial de óxido que previne a oxidação das camadas mais profundas do aço, fenômeno este chamado de passivação. Como dizem Lippold & Kotecki (2005) essa camada se forma justamente a teores de cromo superiores a 12% no aço.

Silva & Mei (2010) dizem também que esses aços são amplamente utilizados nas indústrias de geração de energia, química, de fabricação de papel, nas áreas farmacêuticas e alimentícias, e em utensílios de cozinha e automóveis, por exemplo.

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em quatro tipos: martensíticos, ferríticos, austeníticos e duplex.

2.2.1 Aços inoxidáveis martensíticos

De acordo com Lippold & Kotecki (2005), os aços inoxidáveis martensíticos são ligas baseadas em ferro-cromo-carbono, onde há a formação de martensita através da austenita em sua microestrutura quando esse aço sofre um processo termomecânico, desde que seu resfriamento não seja de maneira lenta, como dentro de um forno recém-utilizado. Entretanto, um resfriamento ao ar livre já é rápido o suficiente para formar martensita no aço.

Possuem limite de escoamento ao redor de 275 MPa, apesar de que podem alcançar até 1900 MPa quando submetidos a um processo de têmpera. Porém, não são muito resistentes à corrosão quando comparados a outros aços inoxidáveis por terem menores quantidades de cromo em sua composição química. Também possuem menor quantidade de elementos de liga no geral, e por conta disso são mais baratos do que os outros aços inoxidáveis.

São bastante empregados em hélices de turbinas que operam em baixa temperatura, tubulações de vapor, em dutos e válvulas na extração de petróleo, entre outros. Não podem ser utilizados em ambientes acima de 650 °C, pois eles perdem suas propriedades mecânicas e a resistência à corrosão.

2.2.2 Aços inoxidáveis ferríticos

Lippold & Kotecki (2005) explicam que os aços inoxidáveis ferríticos são assim chamados pois apresentam uma microestrutura majoritariamente composta por ferrita. São mais utilizados quando a prioridade é a resistência à corrosão, e não suas propriedades mecânicas (como tensão, dureza e ductilidade), como na carcaça e no sistema de exaustão de automóveis, e também na arquitetura. São limitados à temperatura de 400 °C, pois acima dessa temperatura começa a se formar regiões frágeis na estrutura do material.

Na soldagem deste aço também existem alguns problemas, sendo o principal a manutenção da dureza e da ductilidade assim que a solda é realizada. Também, como a estrutura é principalmente ferrítica, podendo também conter martensita em certas situações, é comum a precipitação de carbonetos e nitretos, como apontam Lippold & Kotecki (2005).

2.2.3 Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos representam, segundo Lippold & Kotecki (2005), a maior parte dos aços inoxidáveis e são também os que mais são produzidos mundialmente. Apresentam superior resistência à corrosão, mas resistência mecânica equivalente aos aços convencionais (com limite de escoamento em torno de 210 MPa à temperatura ambiente). Podem ser utilizados em temperaturas de até 760 °C, acima disso sua dureza e resistência à oxidação ficam comprometidas. Por conta da sua alta temperatura em que pode ser aplicado, é bastante utilizado onde se necessita resistência à corrosão nessas condições. Se as devidas precauções forem tomadas, a sua soldagem é bem vista.

Possui uma microestrutura basicamente composta por austenita. São adicionados como elementos de liga o níquel (Ni), o carbono (C) e o nitrogênio (N), pois são elementos que promovem a formação de austenita no aço, com foco maior no níquel. O carbono é utilizado para aumentar a dureza do aço à altas temperaturas. O nitrogênio por sua vez é adicionado quando se deseja aumentar a dureza à temperatura ambiente e à temperaturas ainda mais baixas.

Existe uma grande variedade nos aços inoxidáveis austeníticos, sendo que os da série 300 são os mais utilizados. Eles possuem uma composição aproximada de 18% em cromo (Cr) e 8% de Ni, entre outros elementos. São empregados nas mais diversas aplicações, como em construções, utensílios de cozinha e equipamentos médicos, exatamente por conta da sua alta resistência à corrosão e durabilidade.

2.2.4 Aços inoxidáveis duplex

Por fim, Lippold & Kotecki (2005) expõem que os aços inoxidáveis duplex são uma liga de Fe-Cr-Ni-N, com ao menos 10,5% de quantidade de cromo (Cr). Possuem uma microestrutura composta tanto por ferrita quanto por austenita em quantidade aproximadamente iguais e foram descobertos em meados da década de 1930. Na década de 1950, foi desenvolvida a liga CD4MCu, conhecida pela alta fragilidade quando submetida à solda. Esses aços foram evoluindo com o passar do tempo, inclusive do ponto de vista da soldagem, quando foi descoberto os benefícios da utilização do nitrogênio (N) como elemento de liga.

Atualmente são mais utilizados em componentes e equipamentos que

necessitem de uma maior resistência à corrosão e maior resistência mecânica. São ainda usados para substituir os aços austeníticos em componentes onde a corrosão por pites e a corrosão sob tensão são problemas preocupantes. Um exemplo característico do seu uso é em tubulações de gás e petróleo.

Comparando com os aços inoxidáveis austeníticos, os aços duplex apresentam um limite de escoamento muito maior, acima de 425 MPa, contra 210 MPa dos austeníticos. A partir disso, é possível perceber que seu uso em abrasivos também é viável. A maioria dos aços duplex possuem uma boa dureza combinada com boa ductilidade, porém seu uso é recomendado apenas em uma faixa de temperatura entre -40 °C e 280 °C, pois apresentam uma baixa temperatura de transição dúctil-frágil e também por formarem fases frágeis em temperaturas acima de 280 °C.

2.2.5 Aços inoxidáveis superduplex

De acordo com Tan, et al. (2009), os aços inoxidáveis superduplex diferem dos aços duplex por apresentarem maior resistência à corrosão e maior resistência mecânica, causada pela diferença na concentração dos elementos de liga presentes.

Tan, et al. (2009) também mostram que esses aços possuem uma resistência equivalente à corrosão por pites (PRE, em inglês *pitting resistance equivalent*) maior do que 40, onde PRE é definido conforme a Equação (4).

$$PRE = \%Cr + 3,3 \%Mo + 20 \%N \quad (4)$$

onde %Cr, %Mo e %N são as porcentagens, em massa, de Cromo, Molibdênio e Nitrogênio, respectivamente.

2.3 LIGAS DE NÍQUEL

O níquel é, segundo Silva & Mei (2010), um dos metais mais importantes utilizados na área da engenharia, muito em virtude de sua alta resistência à corrosão e mecânica, e também alta ductilidade até em baixas temperaturas, e o que não é diferente com suas ligas. Por isso, possuem ampla aplicação, como nas indústrias alimentícia e química, e em componentes elétricos e eletrônicos.

Várias ligas desse metal são utilizadas na indústria, como o Monel, o Hastelloy e o Kovar.

2.3.1 Monel 400

Uma das ligas de níquel utilizadas é o Monel 400, que segundo Silva & Mei (2010) é uma liga níquel-cobre, com aproximadamente 67% de níquel, que possui altas resistências à corrosão e mecânica, mesmo sob tensão. Também possui boa soldabilidade e tenacidade. É resistente à diversos meios corrosivos, como solventes com cloro e diferentes ácidos e bases.

Segundo Rosenberg (1968), possui uma ampla temperatura de trabalho, podendo ser utilizado até aproximadamente 480 °C, sendo também uma liga muito utilizada industrialmente.

Como diz a Realum (s.d.), essa liga é muito empregada em bombas e válvulas, equipamentos marítimos, na indústria química e em trocadores de calor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a pesquisa foram utilizadas duas chapas de aço inoxidável superduplex UNS S32750, com 1,5 mm de espessura, e uma tira de liga de níquel Monel 400 de espessura de 100 microns (0,1 mm) e largura de 1,5 mm, cujas composições químicas se encontram nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável superduplex UNS S32750, em porcentagem de massa (%)

Aço	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N
UNS S32750	0,03	1,20	≤0,035	≤0,02	≤0,80	24,75	6,70	4,00	0,28

Fonte: Adaptado de Villares Metals (s.d.)

Tabela 2 – Composição química, em porcentagem de massa (%), da liga de níquel Monel 400

Liga	Ni	Cu	C	Fe	Mn	Si	Al
Monel 400	≥63	28-34	≤0,16	1,0-2,5	≤2,0	≤0,5	≤0,5

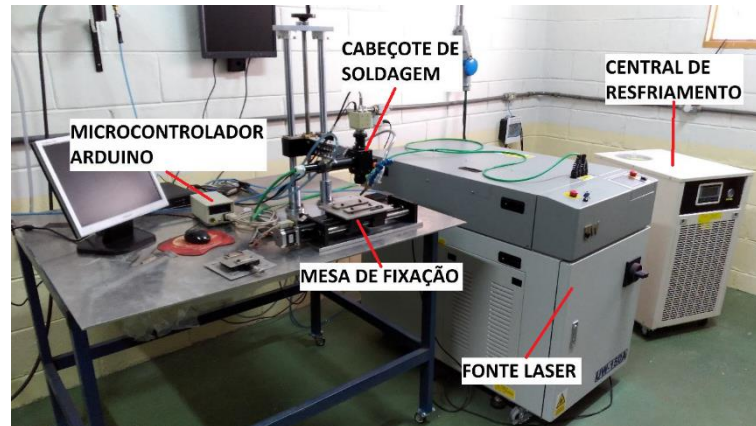
Fonte: Adaptado de Realum (s.d.)

3.2 PROCEDIMENTO

3.2.1 Soldagem das chapas

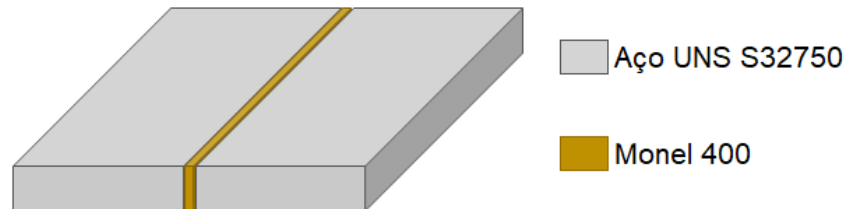
Com as chapas devidamente preparadas, utilizou-se uma máquina de soldagem a *laser* Nd:YAG da United Winners, modelo UW 150^a, mostrada pela Figura 3. Soldou-se as chapas de aço inoxidável superduplex UNS S32750, adicionando a tira de liga de níquel Monel 400 entre as chapas como metal de adição, como é representado na Figura 4, soldando nos dois lados da junção das chapas.

Figura 3 – Foto da máquina de soldagem a *laser*



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2018)

Figura 4 – Representação da disposição dos metais antes da soldagem



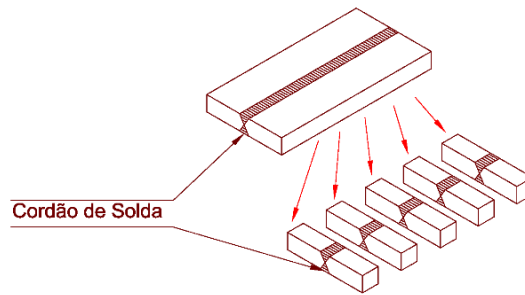
Fonte: Elaborado pelo autor

Para a solda, foram escolhidos como parâmetros de soldagem a velocidade v igual a 1,00 mm/s, frequência f igual a 9 Hz, largura temporal t igual a 10 ms e potência de pico P igual a 1 kW, o que resultava em uma energia de pulso E igual a 10 J, energia esta que resultava em pulsos com diâmetro D de aproximadamente 1,0 mm no cordão de solda.

3.2.2 Preparação das amostras

Com as chapas soldadas, foi utilizado um arco de serra para produzir as amostras, onde o corte foi realizado como indicado na Figura 5, de modo que cada uma delas tivesse largura de aproximadamente 3 mm de espessura. Deste processo foram produzidas duas amostras, que serão denominadas a partir de agora como Amostra 1 e Amostra 2.

Figura 5 – Representação da produção das amostras analisadas

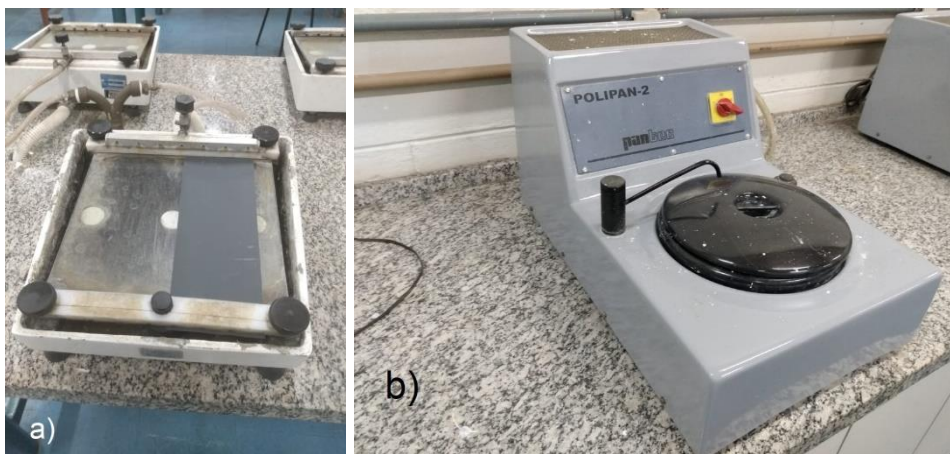


Fonte: Elaborado pelo autor

As amostras foram então submetidas a um embutimento com resina Epóxi 2001, uma resina transparente, de cura a frio, sobre um molde de silicone com uma amostra e com outros pedaços menores de aço (que serviram para auxiliar no processo de lixamento das amostras, a fim de evitar o abaulamento) já posicionados.

Em seguida, as amostras foram lixadas, utilizando lixas de granulação 220 até 1200 fixadas em um apoio, vista na Figura 6-a, como forma de garantir um melhor acabamento na superfície a ser analisada. Após serem lixadas, as amostras foram polidas utilizando uma politriz metalográfica POLIPAN-2, da Pantec, vista na Figura 6-b, com alumina 1,0 μm , até que as superfícies das amostras refletissem muito bem a luz, sem aparecer as marcas dos lixamentos anteriores.

Figura 6 – Fotos: a) do apoio para as lixas; b) da politriz metalográfica



Fonte: Próprio autor

Após o polimento, as amostras foram levadas para um banho ultrassônico com água deionizada para que fosse feita maior limpeza na sua superfície e removidas

quaisquer impurezas. O equipamento utilizado está indicado na Figura 7.

Figura 7 – Foto da máquina de banho ultrassônico

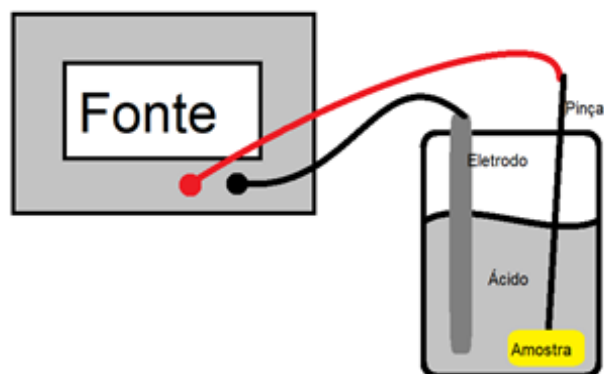


Fonte: Próprio autor

Para a melhor visualização no microscópio, foi realizado um ataque com reagente Behara por 15 e 30 segundos. No entanto, em nenhuma situação foi possível visualizar a microestrutura do cordão de solda, visto que o metal base (aço inox) "queimava", ou seja, sofria muita corrosão, mas o cordão permanecia sem revelar a sua microestrutura.

Então, realizou-se um ataque eletroquímico à superfície das amostras com ácido oxálico 10%. A voltagem e o tempo de ataque foram alterados, utilizando 5 e 6 volts para ambas as amostras, onde a Amostra 1 sofreu ataques por 5 segundos e a Amostra 2 por 15 segundos, de modo a determinar qual deles foi mais eficaz em revelar a microestrutura do cordão de solda, como representado pela Figura 8.

Figura 8 – Representação do ataque eletroquímico empregado



Fonte: Elaborado pelo autor

As amostras obtidas então podem ser visualizadas pela Figura 9.

Figura 9 – Foto das amostras, em ordem, 1 e 2



Fonte: Próprio autor

3.2.3 Análise macrográfica

Para a análise macrográfica das amostras, foi utilizado o Stereo Microscópio Zeiss – Discovery V8, com uma câmera ligado a um computador com o software AxioVision, mostrado na Figura 10.

Foram feitas análises macrográficas da seção transversal das duas amostras a fim de visualizar a presença de alguma descontinuidade, zonas termicamente afetadas (ZTAs) ou qualquer outro fator relevante para o estudo.

Figura 10 – Foto do Stereo Microscópio Zeiss – Discovery V8



Fonte: Próprio autor

3.2.4 Análise micrográfica

Já para a análise micrográfica, foi utilizado um microscópio Carl Zeiss com uma câmera QColor 5 acoplada a um computador, como mostra a Figura 11.

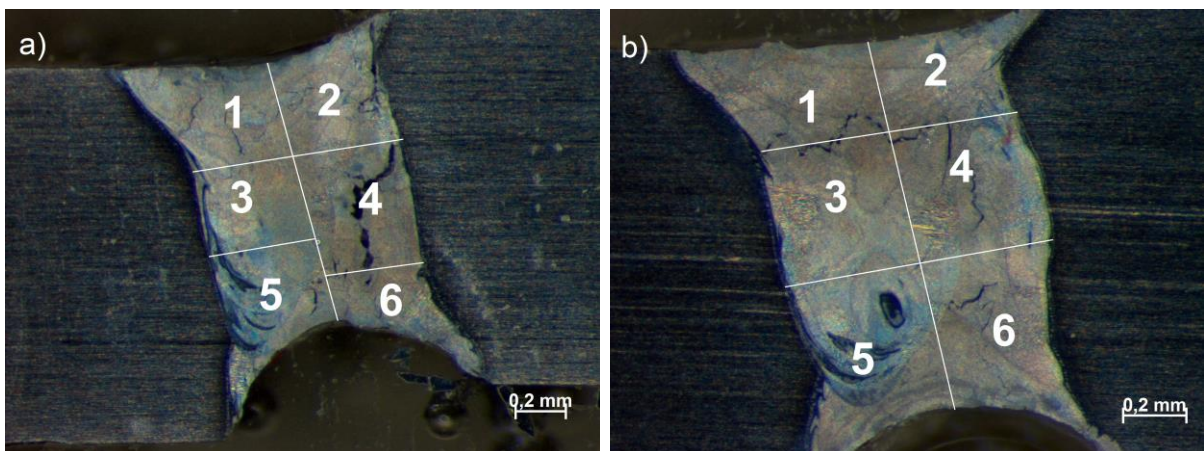
Figura 11 – Foto do microscópio Carl Zeiss com câmera QColor 5



Fonte: Próprio autor

Então, para cada ataque eletroquímico realizado com diferentes parâmetros, o cordão de solda das duas amostras foi dividido em 6 setores, divididos ao longo da seção transversal do cordão de solda, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Cordão de solda da: a) Amostra 1; b) Amostra 2, divididos em setores



Fonte: Próprio autor

Foi tirada uma foto em cada um dos setores utilizando o software QCapture

Pro, acoplado a uma câmera QColor 5 no microscópio Carl Zeiss. Em cada foto, foi analisada uma seção que melhor representava a distribuição de ferrita e de austenita na microestrutura (onde os contornos de grãos são compostos majoritariamente por ferrita e o interior por austenita), e então analisada a porcentagem de ferrita utilizando o software ImageJ.

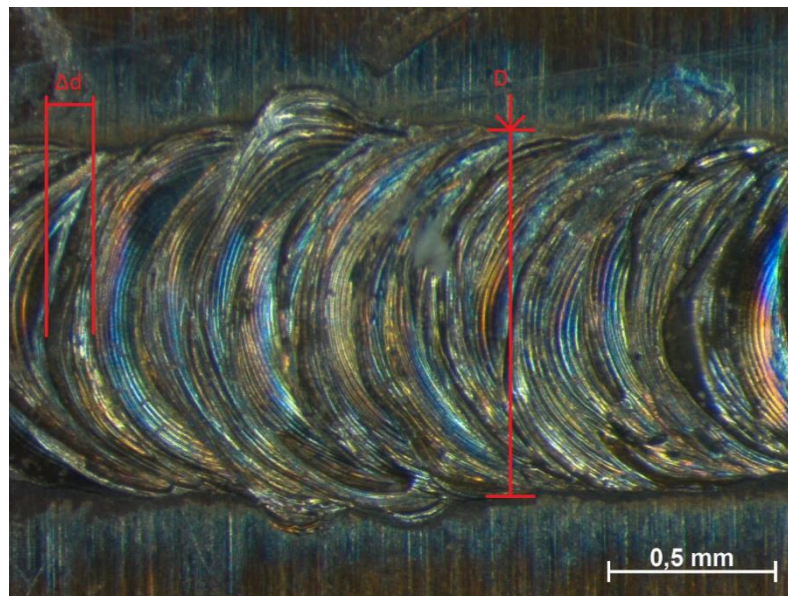
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TAXA DE SOBREPOSIÇÃO E APORTE TÉRMICO

4.1.1 Taxa de sobreposição

A Figura 13 mostra o cordão de solda obtido, com as devidas cotas indicando o diâmetro (D) e a distância entre os pulsos (Δd). Assim, utilizando o software ImageJ foi possível determinar os valores de D e Δd . Com os valores indicados, calculou-se a média dos diâmetros e das distâncias, como mostra a Tabela 3.

Figura 13 – Foto do cordão de solda



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Dados obtidos por análise do cordão de solda

Medida	D [mm]	Δd [mm]
1	0,967	0,148
2	0,977	0,133
3	1,025	0,169
4	1,035	0,154
5	1,030	0,132

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3 – Dados obtidos por análise do cordão de solda (continuação)

Medida	D [mm]	Δd [mm]
6	1,088	0,118
7	1,055	0,145
8	1,053	0,179
9	1,169	0,107
10	1,195	0,224
11	1,099	0,218
12	1,015	0,138
13	1,019	0,138
14	-	0,183
15	-	0,167
Média	1,056	0,157
Desvio padrão	0,067	0,034

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, calculou-se as taxas de sobreposição teórica, através da Equação (1), e experimental, através da Equação (2), encontrando, respectivamente, os valores 0,8948 e 0,8514, bem como o erro experimental ($E\%$), indicado pela Equação (5).

$$E\% = \frac{|Valor\ te\acute{o}rico - Valor\ experimental|}{Valor\ te\acute{o}rico} \cdot 100\% \quad (5)$$

Logo, o erro experimental encontrado foi de 4,84%.

4.1.2 Aporte térmico

Calculado o aporte térmico, conforme indicado pela Equação (3), foi obtido 1000 J/mm, ou 1,0 kJ/mm, ou seja, para cada milímetro do cordão de solda, foi gasto 1,0 kJ para realizar a soldagem.

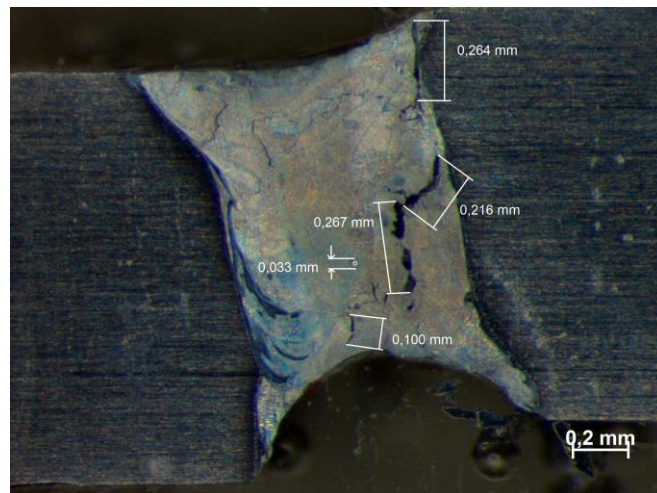
4.2 ANÁLISE MACROGRÁFICA

4.2.1 Amostra 1

Analisando a macroestrutura do cordão de solda da Amostra 1, é possível encontrar diversas trincas e uma bolha na região central da seção, ocasionada pelo acúmulo de ar durante a soldagem que ficou presa dentro do metal durante sua solidificação, sem presença de ZTAs macroscopicamente visíveis. Também se nota um desnivelamento entre as chapas e uma concavidade na porção inferior do cordão, que possivelmente ocorreu devido a uma abertura de raiz não-projetada pelas chapas estarem ligeiramente afastadas uma da outra durante a soldagem.

A Figura 14 mostra a macroestrutura da Amostra 1 com as dimensões das discontinuidades.

Figura 14 – Macroestrutura da Amostra 1 com dimensões de discontinuidades



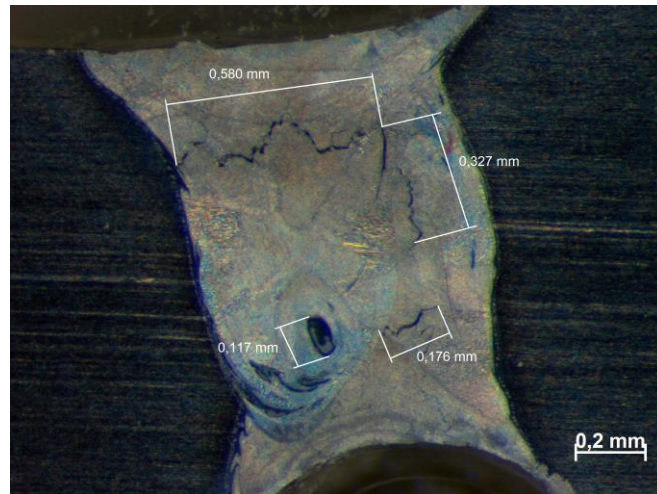
Fonte: Próprio autor

4.2.2 Amostra 2

Assim como na Amostra 1, também é possível notar na Amostra 2 diversas trincas e uma bolha, sem presença de ZTAs macroscopicamente visíveis, e também nota-se uma concavidade na porção inferior do cordão de solda.

A Figura 15 mostra a macroestrutura da Amostra 2, com dimensões das discontinuidades.

Figura 15 – Macroestrutura da Amostra 2 com dimensões de descontinuidades



Fonte: Próprio autor

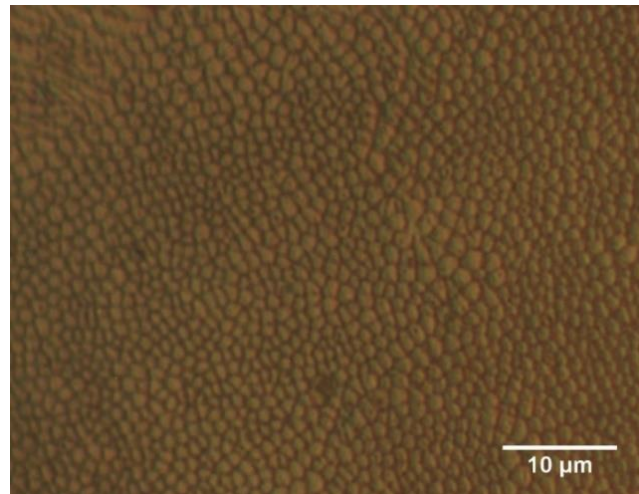
4.3 ANÁLISE MICROGRÁFICA

4.3.1 Amostra 1

Na Amostra 1 foram obtidas doze fotos, seis para o ataque com 5 V e seis para o ataque com 6 V.

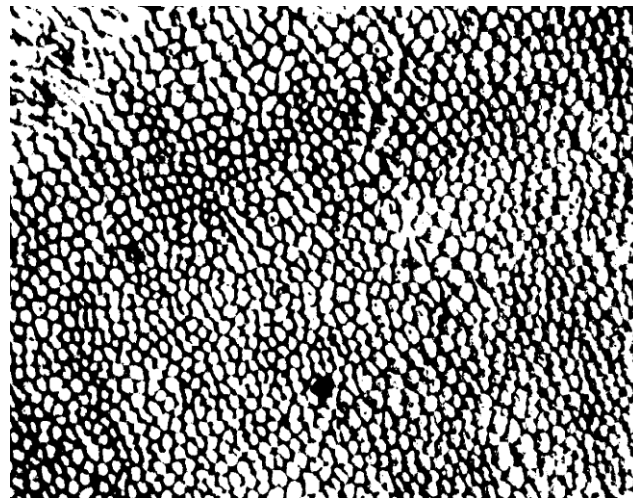
Em cada foto foi realizada uma análise, com auxílio do software ImageJ, obtendo-se fotos em preto e branco. Nessas imagens foi observado, em cada setor, onde havia maior diferenciação dos grãos, ou seja, os grãos estavam mais nítidos na análise *threshold* do ImageJ, que analisa os *pixels* das fotos. A Figura 16 mostra uma micrografia e a figura 17 mostra um exemplo de uma imagem gerada por essa seleção, onde o preto representa a ferrita e o branco a austenita, mais especificamente de uma foto da amostra com ataque a 6 V.

Figura 16 – Foto da Amostra 1 com ataque a 6 V antes do tratamento com software



Fonte: Próprio autor

Figura 17 – Exemplo de análise da Amostra 1 com ataque a 6 V depois do tratamento com software



Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, foi possível obter, também pelo software ImageJ, a porcentagem de *pixels* pretos e brancos, ou seja, a porcentagem de ferrita e austenita, respectivamente, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Percentual de ferrita e austenita em cada setor analisado da Amostra 1

Setor	Ataque a 5 V		Ataque a 6 V	
	Ferrita	Austenita	Ferrita	Austenita
Setor 1	55,37%	44,63%	50,55%	49,45%
Setor 2	45,09%	54,91%	53,19%	46,81%
Setor 3	47,47%	52,53%	50,39%	49,61%
Setor 4	57,07%	42,93%	49,86%	50,14%
Setor 5	54,71%	45,29%	47,22%	52,78%
Setor 6	54,56%	45,44%	56,22%	43,78%
Média	52,38%	47,62%	51,24%	48,76%
Desvio padrão	4,87%	4,87%	3,09%	3,09%

Fonte: Elaborado pelo autor

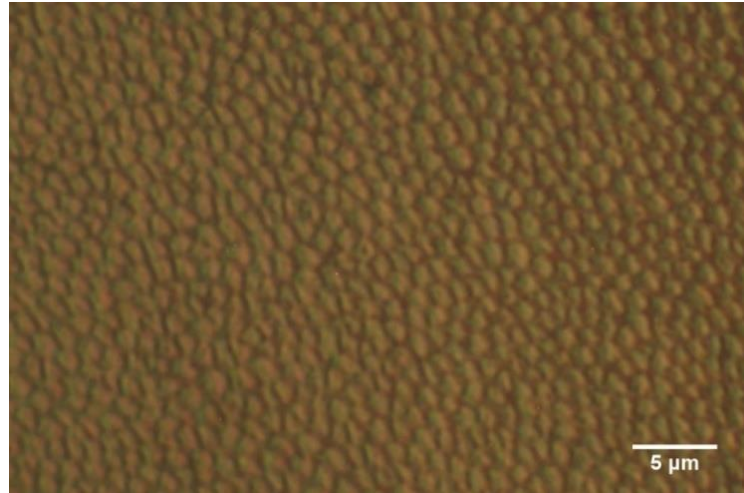
Analisando os dados, é possível notar que ambos os ataques apresentaram resultados médios semelhantes quanto a composição da microestrutura do cordão de solda da Amostra 1. No entanto, analisando as próprias fotos tiradas, é possível notar que as fotos do ataque com 6 V revelaram melhor o cordão de solda, visto que os contornos de grãos ficaram mais nítidos em grande parte das seções analisadas. Com o ataque com 5 V, algumas regiões permaneceram sem revelar com grande destaque a microestrutura, ficando mais "claras" em comparação com as regiões onde o ataque foi mais revelador.

4.3.2 Amostra 2

Na Amostra 2 também foram obtidas doze fotos, seis para o ataque com 5 V e seis para o ataque com 6 V.

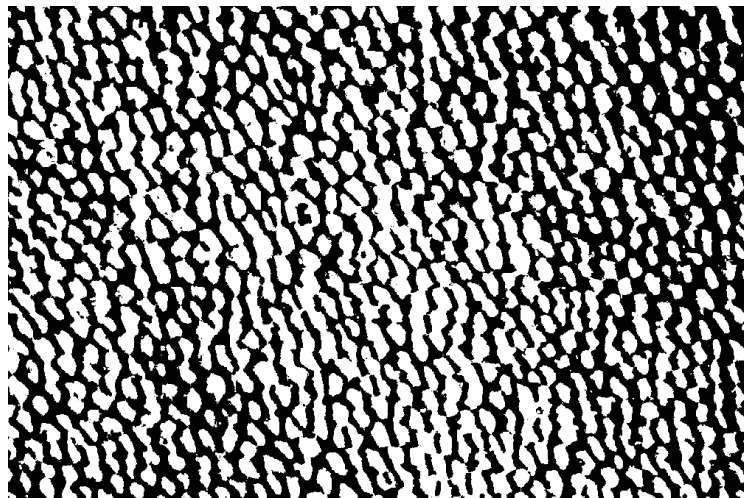
Assim como para a amostra 1, também foram obtidas as fotos em preto e branco, onde também foi observado onde havia maior diferenciação dos grãos, em cada setor. A Figura 18 também mostra uma micrografia, enquanto que a Figura 19 mostra uma imagem gerada com essa seleção, onde, também, o preto representa a ferrita e o branco a austenita. O exemplo é retirado de uma análise com ataque a 6 V.

Figura 18 – Foto da Amostra 2 com ataque a 6 V antes do tratamento com software



Fonte: Próprio autor

Figura 19 – Exemplo de análise da Amostra 2 com ataque a 6 V depois do tratamento com software



Fonte: Elaborado pelo autor

Temos assim, a porcentagem de ferrita e austenita, respectivamente, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Percentual de ferrita e austenita em cada seção analisada da Amostra 2

Setor	Ataque a 5 V		Ataque a 6 V	
	Ferrita	Austenita	Ferrita	Austenita
Setor 1	48,31%	51,69%	50,33%	49,67%
Setor 2	48,01%	51,99%	53,74%	46,26%
Setor 3	53,63%	46,37%	51,60%	48,40%
Setor 4	56,25%	43,75%	53,84%	46,16%
Setor 5	52,49%	47,51%	55,91%	44,09%
Setor 6	56,62%	43,38%	51,05%	48,95%
Média	52,55%	47,45%	52,75%	47,25%
Desvio padrão	3,74%	3,74%	2,11%	2,11%

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como na Amostra 1, é possível notar que ambos os ataques apresentaram resultados médios bem semelhantes quanto a composição da microestrutura do cordão de solda da Amostra 2.

Dessa forma, é comprovado que a adição da liga de níquel Monel 400 na soldagem do aço inoxidável superduplex UNS S32750 ajuda a reduzir o desbalanceamento das fases ferrita e austenita, mantendo assim a resistência à corrosão desse aço.

Também é possível notar que as fotos do ataque com 6 V revelaram melhor o cordão de solda do que o ataque a 5 V, embora tenham ficado mais "escuras", dificultando a análise. Visualizando as fotos qualitativamente, nota-se que a Amostra 1 que sofreu ataque a 6 V foi a que ficou com melhor qualidade, pois conseguiu revelar bem a microestrutura do cordão de solda e ainda ficou menos "queimada" que as fotos da Amostra 2.

5 CONCLUSÃO

Mantendo-se fixas a potência de pico em 1 kW, a largura temporal em 10 ms, a frequência em 9 Hz e a velocidade de solda em 1,0 mm/s, foram obtidos pulsos de aproximadamente 1,0 mm de diâmetro.

Observando-se as macrografias dos cordões de solda, percebeu-se que não houve a aparição de nenhuma ZTA macroscópica, pelo fato de que o aporte térmico na soldagem foi baixo e de que o resfriamento na solda a *laser* é rápido. Também é perceptível que em ambas as amostras haviam aparições de descontinuidades como trincas e bolhas, provocados pelo rápido resfriamento devido ao menor aporte térmico, que acaba aprisionando bolhas de gases e proporciona o surgimento de trincas, bem como uma concavidade bem acentuada no cordão de solda inferior, que pode ter sido provocado pelo afastamento e desnivelamento das chapas do metal base, como pode ser visto nas fotos das Figuras 14 e 15.

Analisando as microestruturas do cordão de solda, notou-se que as porcentagens de ferrita e austenita foram próximas, o que indica que a adição de liga de níquel Monel 400 é eficaz na manutenção do balanceamento da distribuição desses dois microconstituintes.

Por fim, foi notado que os ataques com 6 V revelaram melhor o cordão de solda, sendo que com 5 segundos (Amostra 1) ficou ainda mais visível do que com 15 segundos (Amostra 2) na maioria das fotos tiradas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D; CASEMIRO, H; DUTRA, E. **Processo de Soldagem LASER HÍBRIDO GMAW**. Fatec-SP, novembro de 2013. Disponível em: https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/processo-de-soldagem-laser-hibrido-gmaw.pdf>. Acesso em 25 Fev. 2020.

DRAPINSKI, J. **Elementos de Soldagem: Manual Prático de Oficina**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1979.

GRIFFING, L. et al. **Welding Handbook**. 6th ed. London: MACMILLAN & CO., 1971.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

LASERSTARS. **MICRO LASER WELDINGS APPLICATIONS**. Disponível em <<https://www.laserstar.net/industries/medical-device/laser-welding-fiber/fiber-laser-welding-applications/>>. Acesso em 25 Fev. 2020.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

MALEK, F. G.; HAMED, M. J.; TORKAMANY, M. J.; SABBAGHZADEH, J. **Weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd: YAG laser welding**. Scripta Mater., Cambridge, v. 56, p. 955–958, 2007.

REALUM. **UNS N04400 / 2.4360**. Disponível em <<http://www.realum.com.br/monel.php>>. Acesso em 7 Mar. 2020.

RODRIGUES, T, J. **SOLDAGEM DISSIMILAR AUTOGENA COM LASER PULSADO Nd:YAG DOS AÇOS SUPERDUPLEX UNS S32750 E SUPERAUSTENÍTICO AISI 904L**. 2018. 73 f. Exame de Qualificação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2018.

ROSENBERG, S. J. **Nickel and Its Alloys**. National Bureau of Standards Monograph 106, p. 79, 1968.

SILVA, A. V. da C. e; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2010.

STARRETT. **Arco de Serra Tubular com Lâmina de Serra - Cabo Fechado – 149**. Disponível em < <https://www.shopstarrett.com.br/Arco-de-Serra-Tubular-com-Lamina-de-Serra---Cabo-Fechado---149~14215~1297~153~Ferramentas-Manuais~Arco-de-Serra>>. Acesso em 7 Mar. 2020.

TAN, H. et al. **Effect of annealing temperature on the pitting corrosion resistance of super duplex stainless steel UNS S32750**. Department of Material Science, Fudan University, Shanghai 200433, PR China. Disponível em

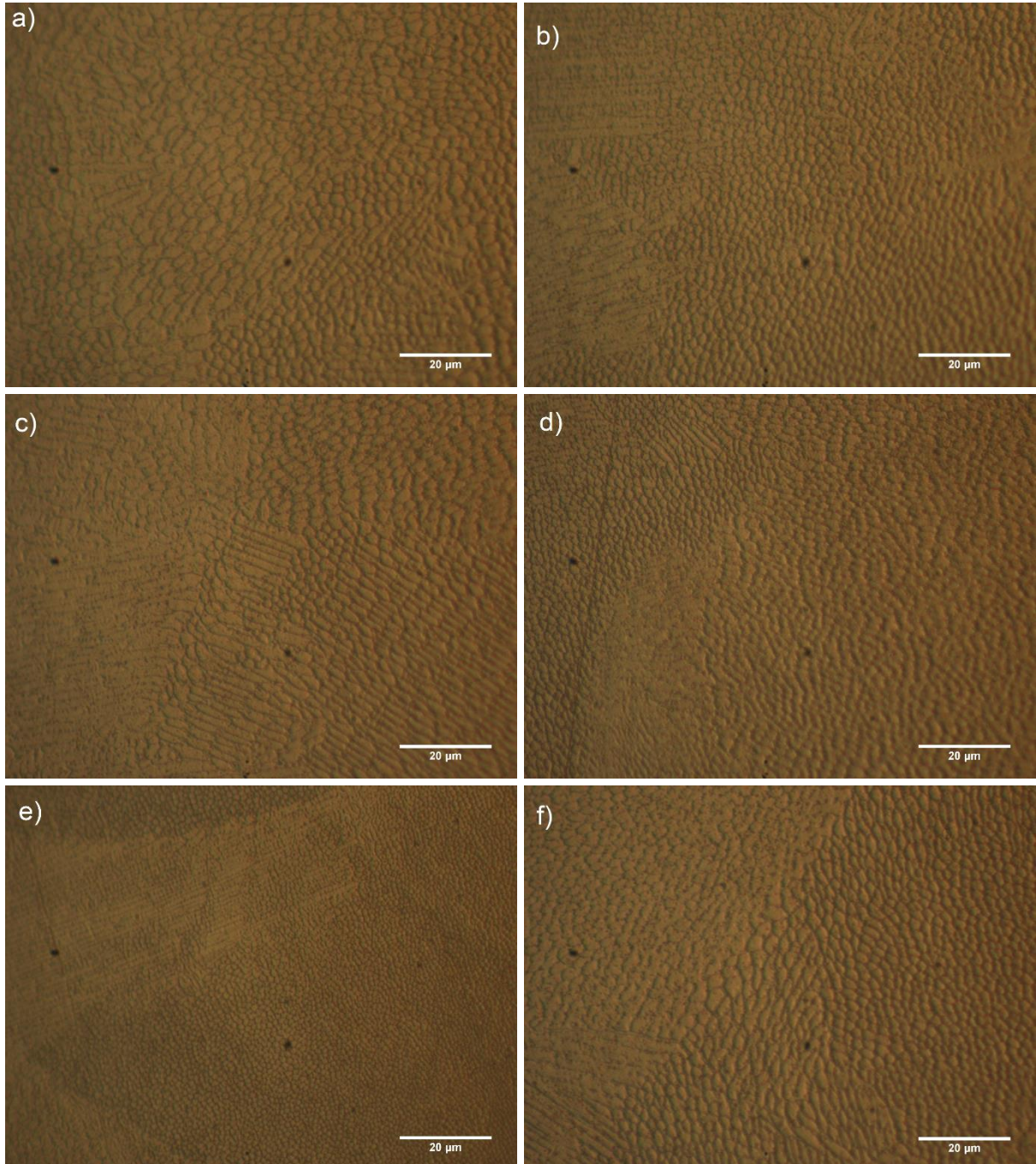
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580309001508>>. Acesso em 4 Mar. 2020.

VILLARES METALS. **VDF53 (SUPERDUPLEX 4410 / F53 / UNS S32750)**. Disponível em <<http://www.villaresmetals.com.br/villares/en/Products/Stainless-steel/Duplex-and-Super-Duplex/VDF53-SUPERDUPLEX-4410-F53-UNS-S32750>>. Acesso em 7 Mar. 2020.

ZEEMANN, A. **Energia de Soldagem**. 2 de abril de 2013. Disponível em <<https://infosolda.com.br/artigos/metalurgia/energia-de-soldagem-2>>. Acesso em 28 Fev. 2020.

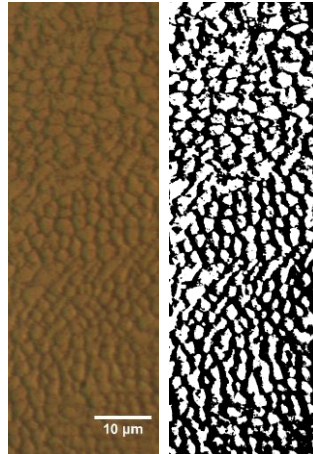
APÊNDICE A – Fotos das análises micrográficas

Figura A.1 – Fotos nos setores: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; e f) 6 da Amostra 1 com ataque a 5 V



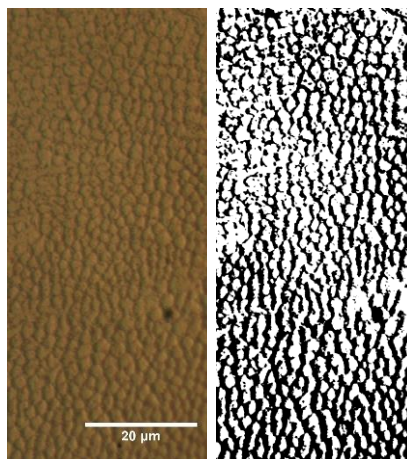
Fonte: Próprio autor

Figura A.2 – Análise no setor 1 da Amostra 1 com ataque a 5 V



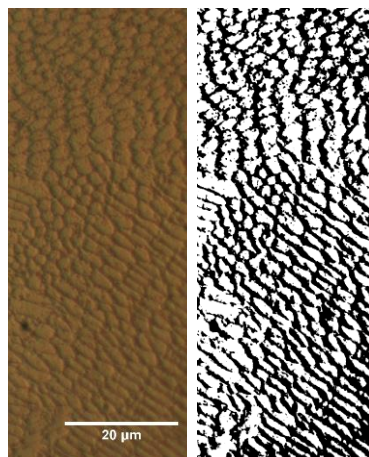
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.3 – Análise no setor 2 da Amostra 1 com ataque a 5 V



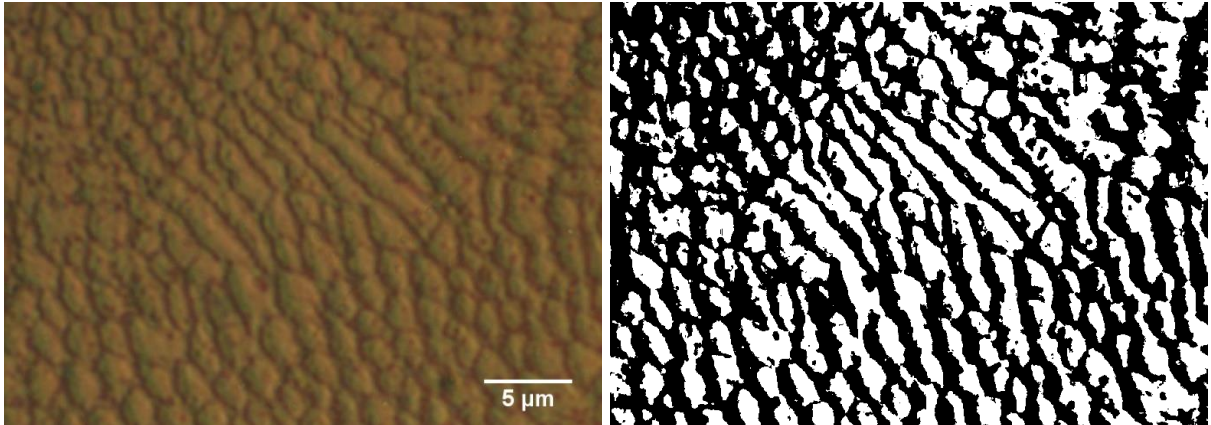
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.4 – Análise no setor 3 da Amostra 1 com ataque a 5 V



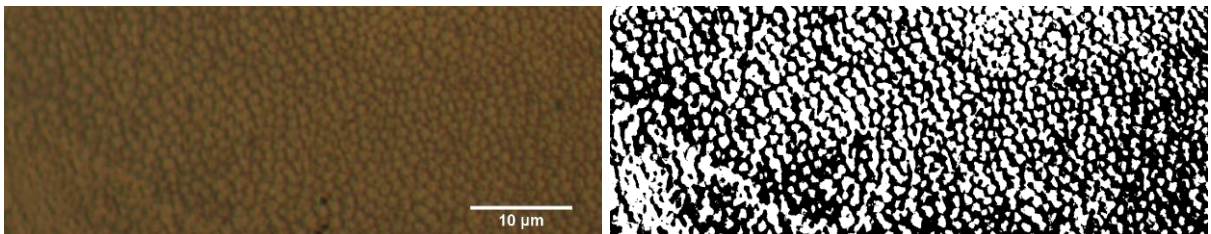
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.5 – Análise no setor 4 da Amostra 1 com ataque a 5 V



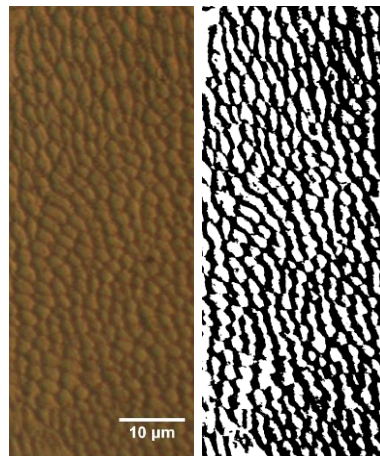
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.6 – Análise no setor 5 da Amostra 1 com ataque a 5 V



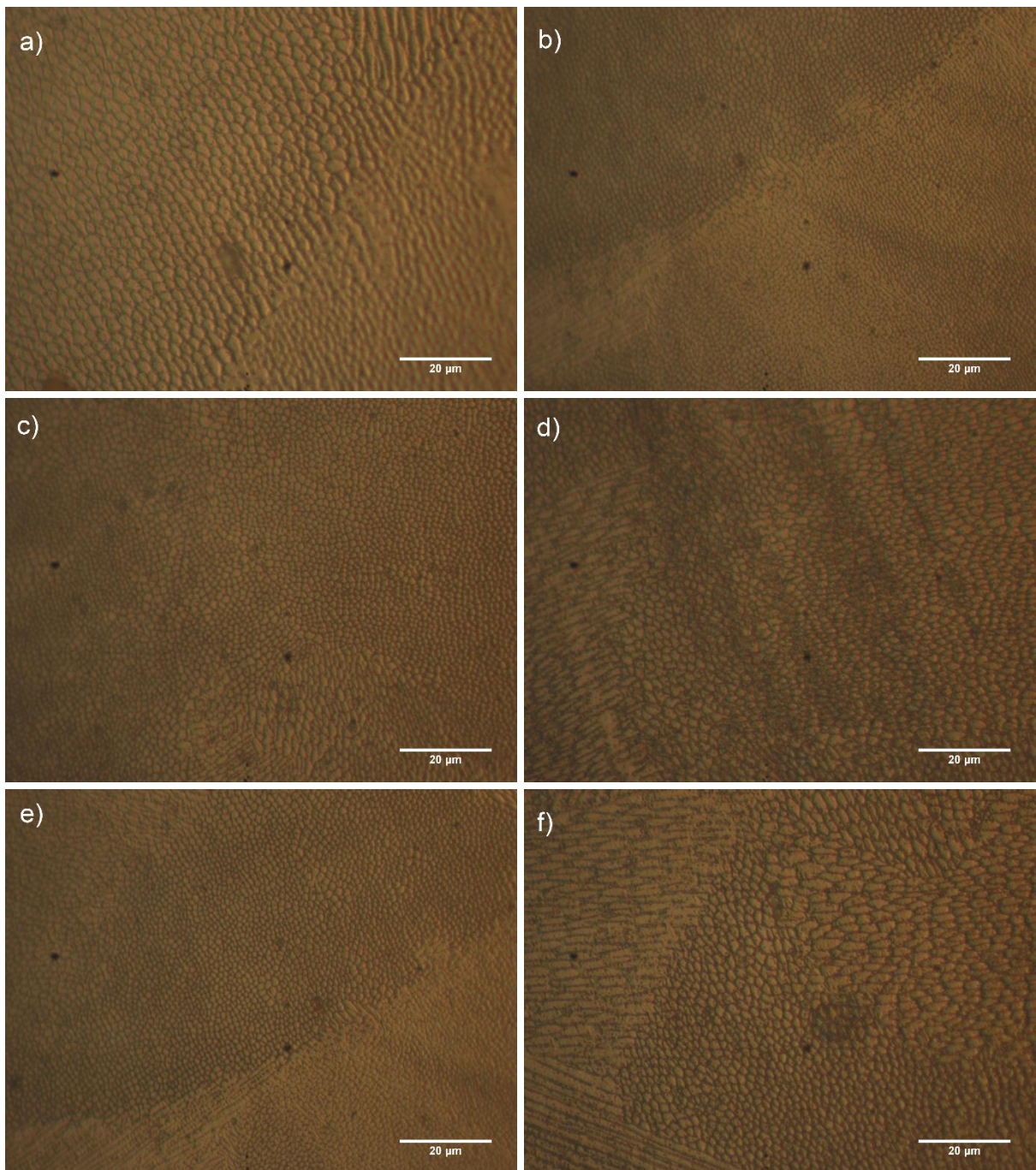
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.7 – Análise no setor 6 da Amostra 1 com ataque a 5 V



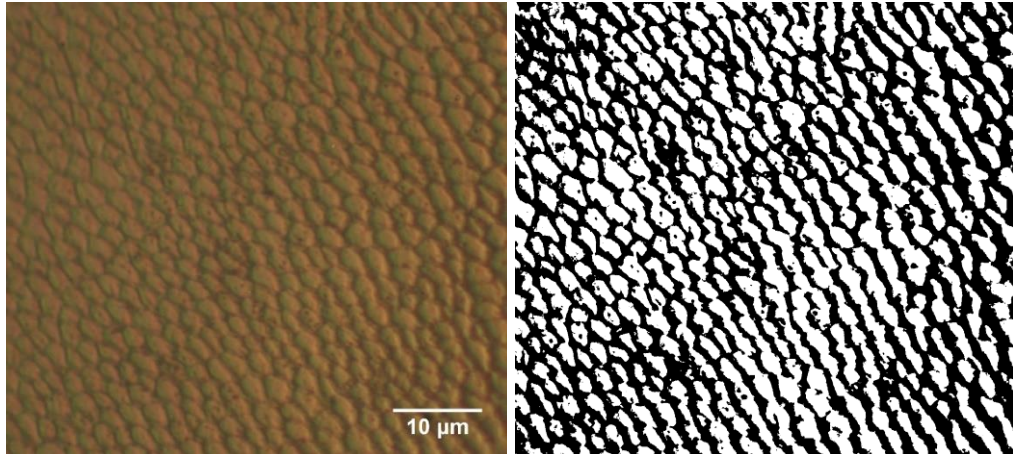
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.8 – Fotos nos setores: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; e f) 6 da Amostra 1 com ataque a 6 V



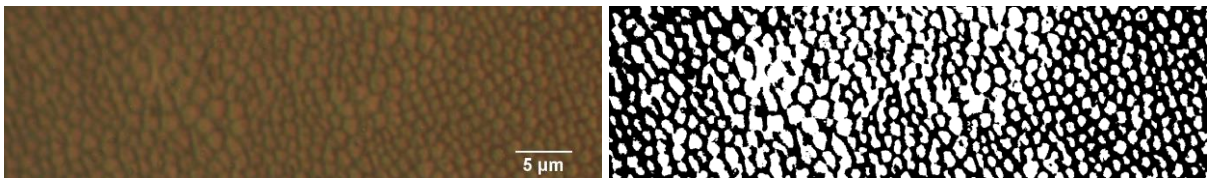
Fonte: Próprio autor

Figura A.9 – Análise no setor 1 da Amostra 1 com ataque a 6 V



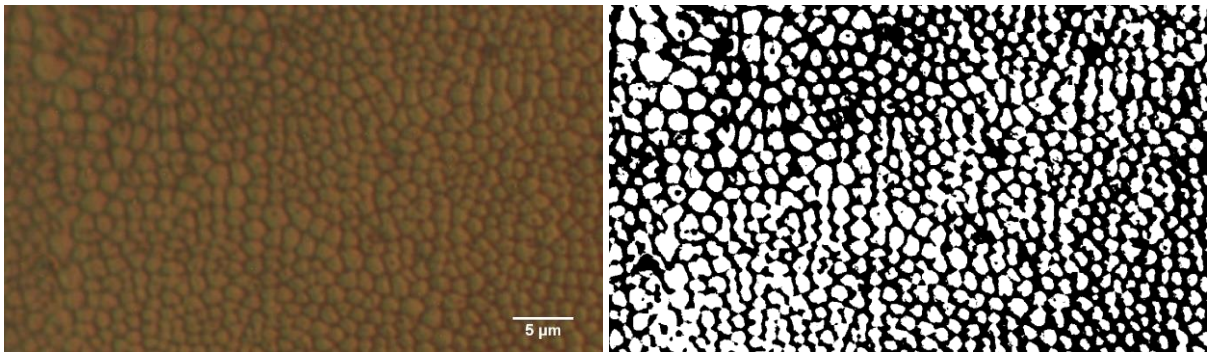
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.10 – Análise no setor 2 da Amostra 1 com ataque a 6 V



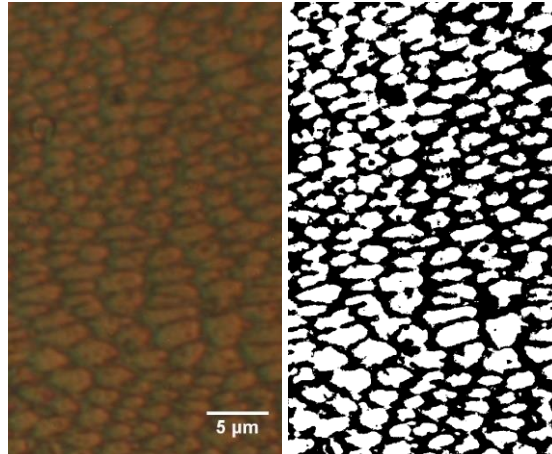
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.11 – Análise no setor 3 da Amostra 1 com ataque a 6 V



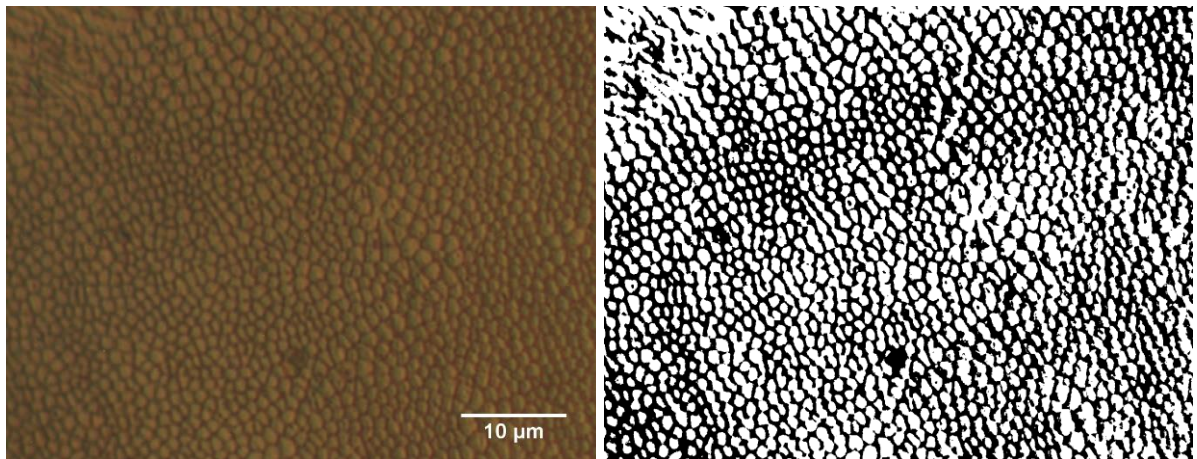
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.12 – Análise no setor 4 da Amostra 1 com ataque a 6 V



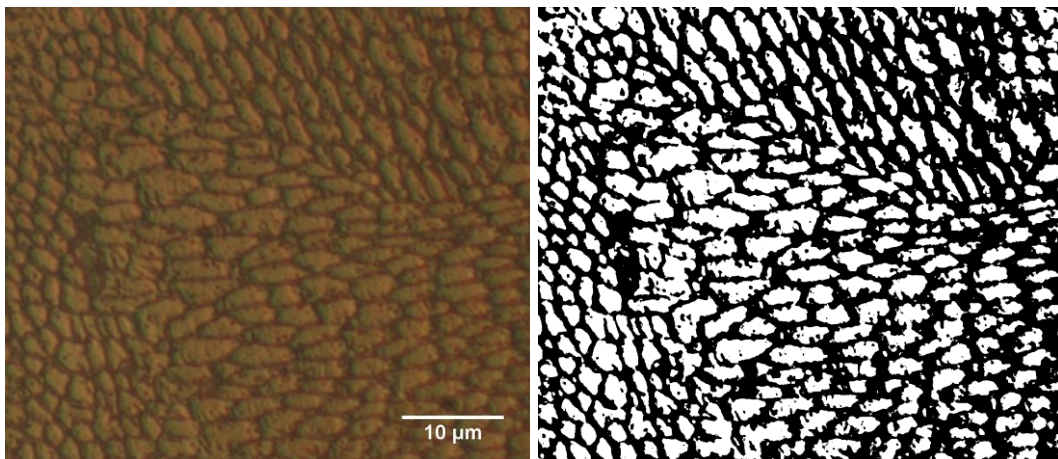
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.13 – Análise no setor 5 da Amostra 1 com ataque a 6 V



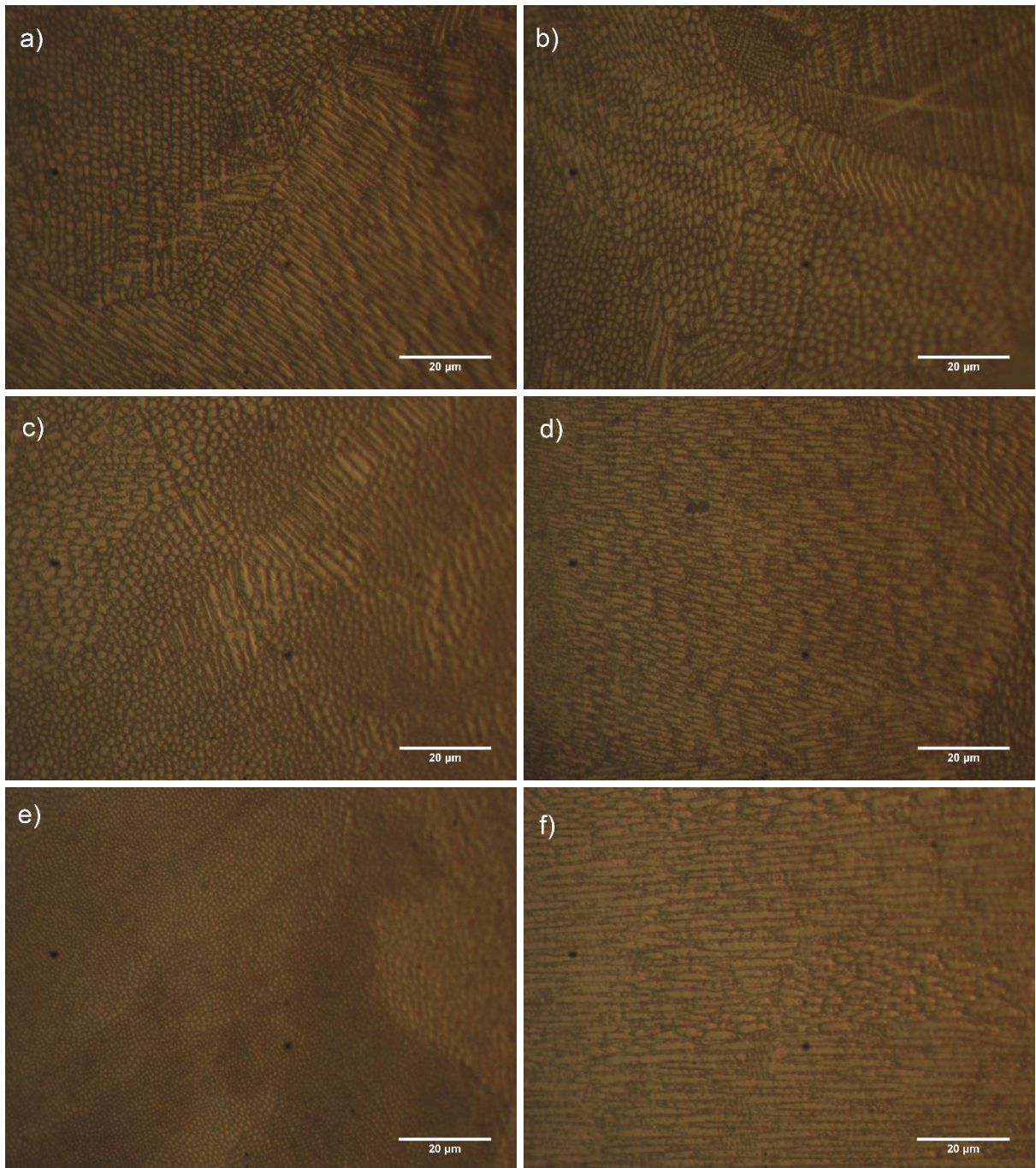
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.14 – Análise no setor 6 da Amostra 1 com ataque a 6 V



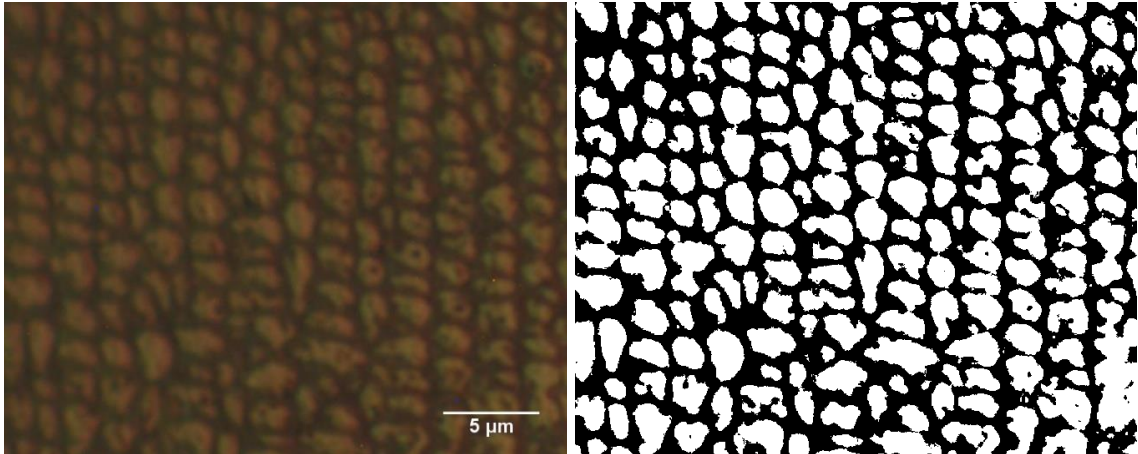
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.15 – Fotos nos setores: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; e f) 6 da Amostra 2 com ataque a 5 V



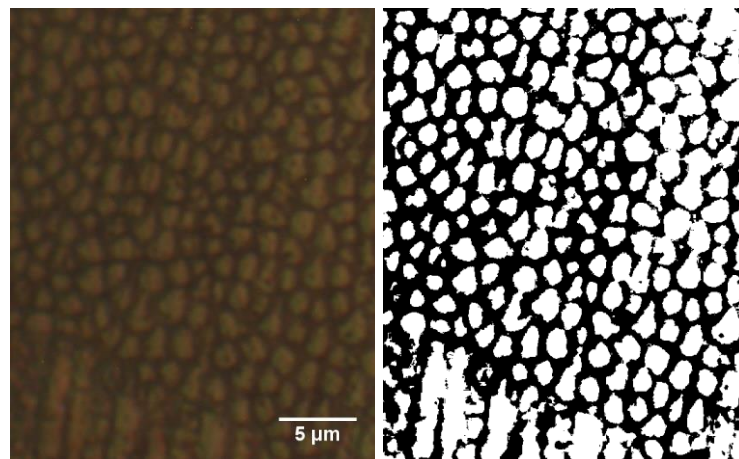
Fonte: Próprio autor

Figura A.16 – Análise no setor 1 da Amostra 2 com ataque a 5 V



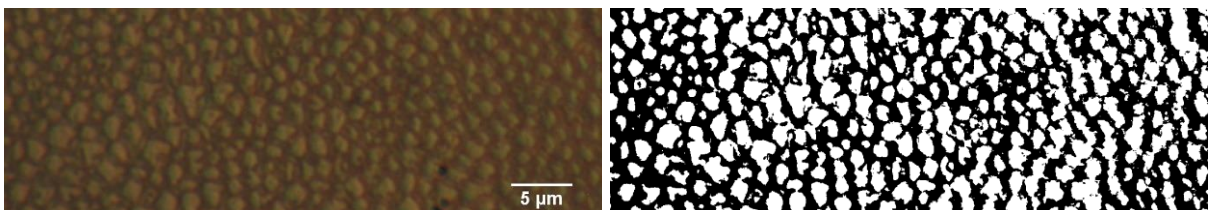
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.17 – Análise no setor 2 da Amostra 2 com ataque a 5 V



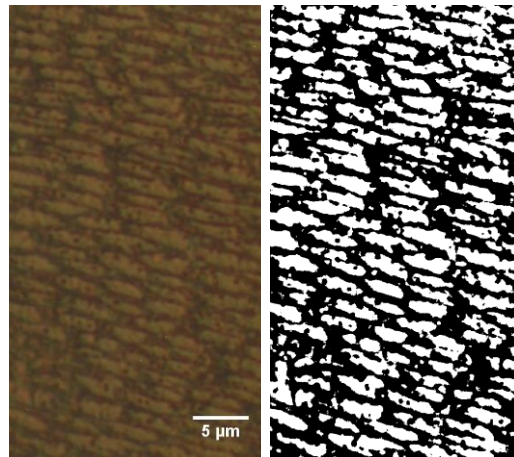
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.18 – Análise no setor 3 da Amostra 2 com ataque a 5 V



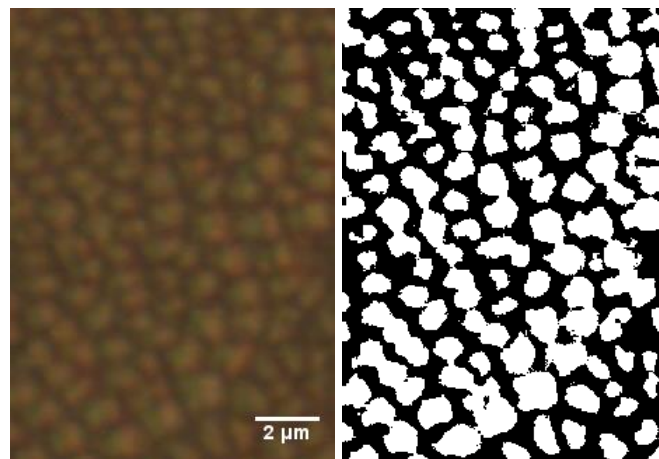
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.19 – Análise no setor 4 da Amostra 2 com ataque a 5 V



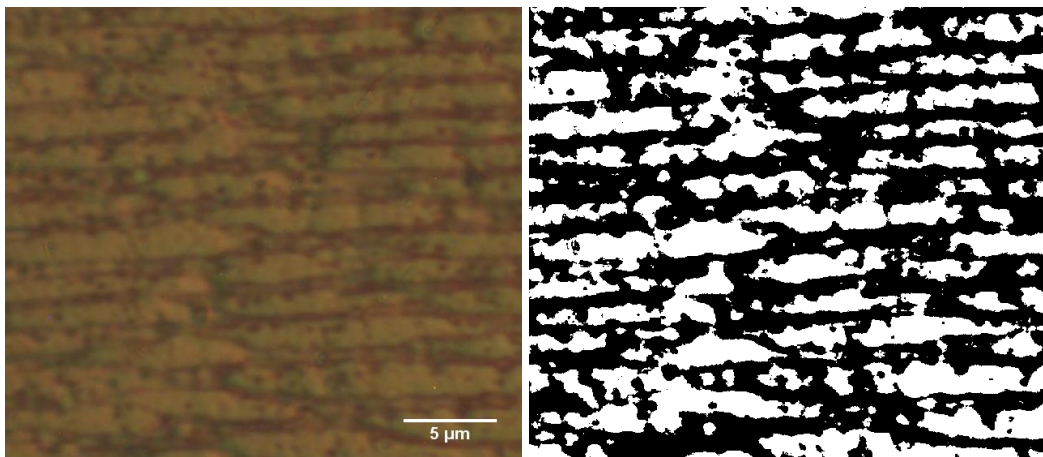
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.20 – Análise no setor 5 da Amostra 2 com ataque a 5 V



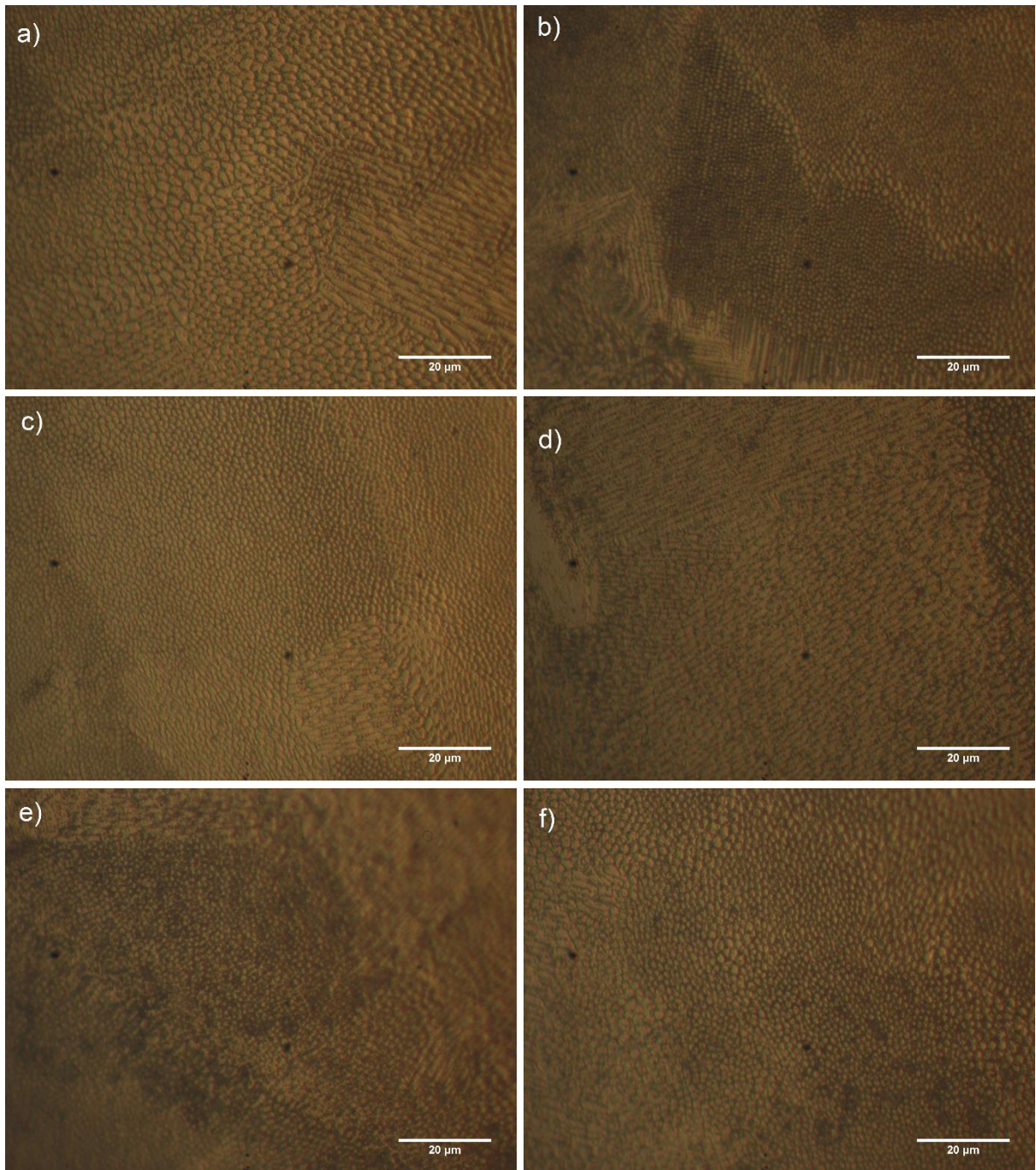
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.21 – Análise no setor 6 da Amostra 2 com ataque a 5 V



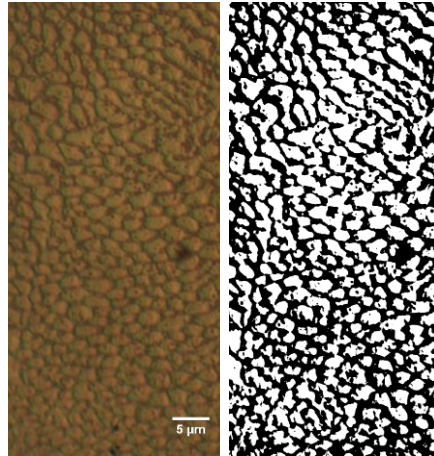
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.22 – Fotos nos setores: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; e f) 6 da Amostra 2 com ataque a 6 V



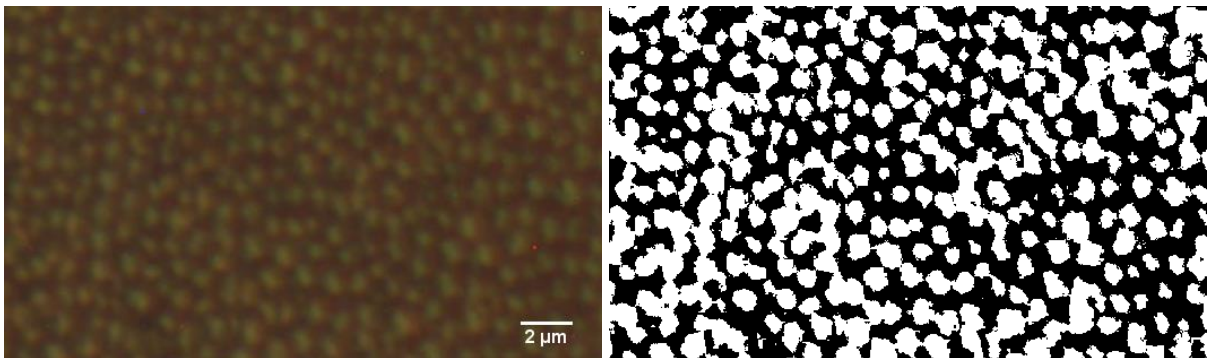
Fonte: Próprio autor

Figura A.23 – Análise no setor 1 da Amostra 2 com ataque a 6 V



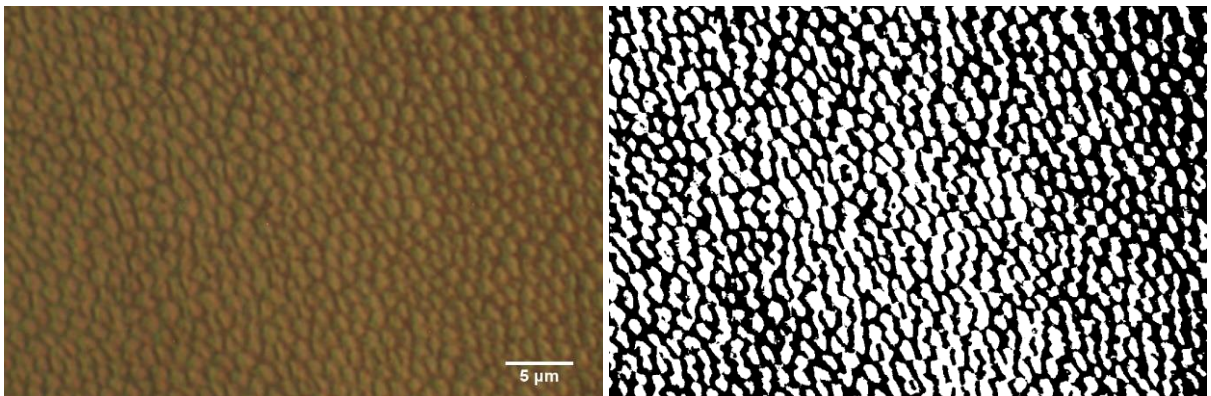
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.24 – Análise no setor 2 da Amostra 2 com ataque a 6 V



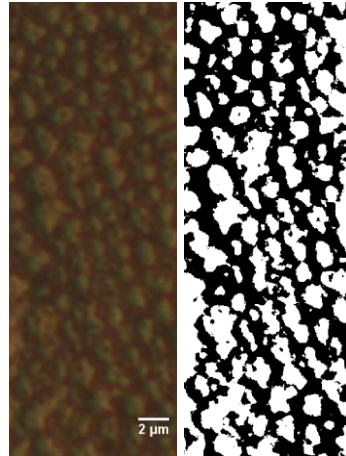
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.25 – Análise no setor 3 da Amostra 2 com ataque a 6 V



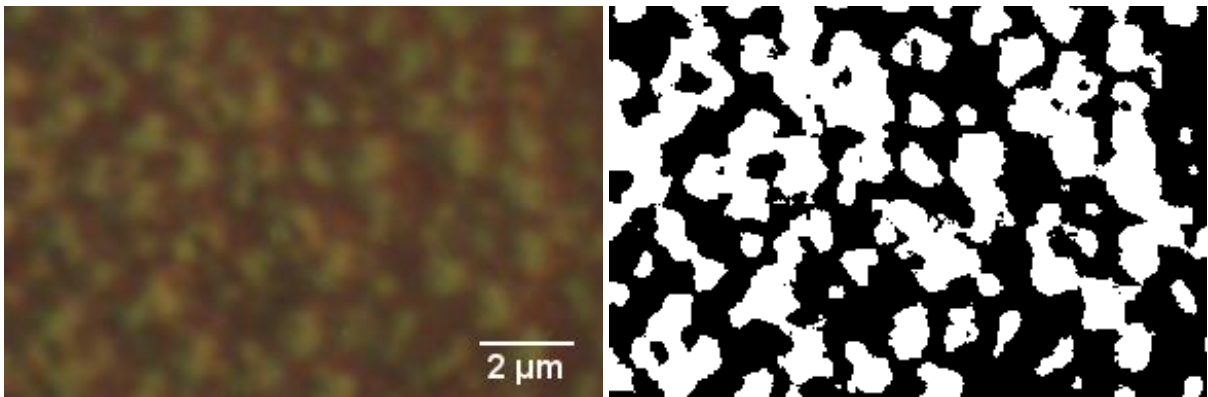
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.26 – Análise no setor 4 da Amostra 2 com ataque a 6 V



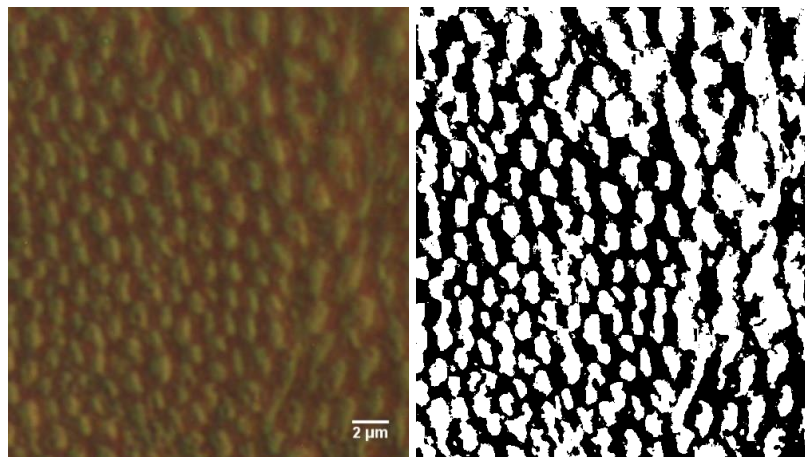
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.27 – Análise no setor 5 da Amostra 2 com ataque a 6 V



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura A.28 – Análise no setor 6 da Amostra 2 com ataque a 6 V



Fonte: Elaborado pelo autor