

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**LUIS ANDRÉ SOUSA ANDRADE**

**ESTUDO DA ALTERAÇÃO EM TAXA DE CORROSÃO DA LIGA  
DOMEX 700 MC DEVIDO A SOLDAGEM A LASER**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**

**2018**

**LUIS ANDRÉ SOUSA ANDRADE**

**ESTUDO DA ALTERAÇÃO EM TAXA DE CORROSÃO DA LIGA  
DOMEX 700 MC DEVIDO A SOLDAGEM A LASER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, da Coordenação de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Dra. Viviane Teleginski Mazur

**GUARAPUAVA**

**2018**



**TERMO DE APROVAÇÃO**  
Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Guarapuava

Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Coordenação de Engenharia Mecânica  
Bacharelado em Engenharia Mecânica



---

**ESTUDO DA ALTERAÇÃO EM TAXA DE CORROSÃO DA LIGA DOMEX 700 MC DEVIDO A  
SOLDAGEM A LASER**

por

**LUIS ANDRÉ SOUSA ANDRADE**

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 06 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Dra. Viviane Teleginski Mazur  
Orientadora

---

Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz  
Membro titular

---

MSc. Henrique Ajuz Holzmann  
Membro titular

---

Dr. Aldo Przybysz  
Coordenador de curso

Dedico esse trabalho primeiramente à  
toda equipe da UTFPR Câmpus  
Guarapuava, especialmente a minha  
orientadora. Dedico também a família, em  
especial a minha querida irmã e a todos  
que me apoiaram direta ou indiretamente  
nessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Dr. Milton Sérgio Fernandes de Lima, do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos, SP pelos processamentos a laser de amostras, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado. Ao Dr. José Alfredo Zara, da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa, PR, que nos auxiliou com as medidas eletroquímicas e análises de corrosão. Agradeço também a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), câmpus Guarapuava e Ponta Grossa pela infraestrutura de pesquisa e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço a minha orientadora professora Dra. Viviane Teleginski Mazur, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

A Coordenação do Curso, pela cooperação e disponibilidade em sempre me atender nas horas de necessidade.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

A liga DOMEX 700 DC é um aço de alta resistência e baixa liga, que é utilizada em projetos mecânicos de máquinas agrícolas e guindastes, por exemplo. Comparando-se suas propriedades mecânicas ao aço carbono AISI 1020, o DOMEX 700 MC possui um limite de elasticidade quatro vezes maior (777 MPa) e limite de resistência a tração duas vezes maior (826 MPa). Reconhecidamente, a soldagem de ligas metálicas gera modificações microestruturais e, conseqüentemente, nas propriedades dos materiais. A soldagem a laser é um processo tecnológico de destaque na indústria, que permite a obtenção de união de peças com menores distorções devido a redução da área exposta ao calor durante o processamento. Dadas essas premissas, este trabalho teve como objetivo analisar as alterações microestruturais, em resistência à corrosão, dimensões dos cordões de solda e da zona termicamente afetada, devido a soldagem a laser do aço DOMEX 700 MC, em função da velocidade de varredura e potência do feixe laser. Para os parâmetros estudados, verificou-se que houve redução dimensional dos cordões de solda em até 64% de forma inversamente proporcional à potência e diretamente proporcional à velocidade de varredura. A existência de cordões de solda realizados por soldagem a laser reduz a resistência à corrosão do aço quando este apresenta um revestimento de zinco, pois o calor do laser causa evaporação parcial do zinco, expondo o metal base de menor resistência à corrosão. Quando o aço não possui revestimento de zinco a presença do cordão de solda melhora a resistência à corrosão em até 30%, devido às mudanças microestruturais como refino de tamanho de grão e mudança de fases.

**Palavras-chave:** ARBL. Microestrutura. Curvas de Tafel.

## ABSTRACT

The DOMEX 700 DC is a high strength, low alloy steel that is used in mechanical design of agricultural machinery and cranes, for example. Comparing its mechanical properties to AISI 1020 carbon steel, the DOMEX 700 MC has fourfold higher tensile strength limit (777 MPa) and twofold higher tensile strength limit (826 MPa). It is well established that welding metal alloys generates microstructural changes and, consequently, changes in the materials properties. Laser welding is an industry-leading technology process that allows metal joining with less distortion due to the reduction of the area exposed to heat during processing. Given these assumptions, this work aimed to analyze the microstructural changes, corrosion resistance, hardness, weld bead and thermally affected zone dimensions, due to laser welding of DOMEX 700 MC steel, as a function of scanning speed and laser beam power. For the studied parameters, it was verified that there was a dimensional reduction of the weld beads up to 64% inversely proportional to laser power and directly proportional to the sweep speed. The laser welding reduces the corrosion resistance of the steel when it has a zinc coating, due to partial evaporation of the zinc caused by the laser heating, exposing the base metal with lower corrosion resistance. If the zinc coating is absent, the presence of the weld beads improves the corrosion resistance by up to 30% due to microstructural changes such as grain size refining and phase shifting.

**Keywords:** HSLA. Microstructure. Tafel Curves.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Micrografias do aço DP 600 soldada a laser.....	16
Figura 2: Micrografia de uma junta soldada por arco elétrico submerso em aço A-710 .....	17
Figura 3: Taxa de absorção da luz em função do comprimento de onda para alguns metais.....	18
Figura 4: Desenho esquemático da fibra de laser dopada com itérbio.....	19
Figura 5: Soldagem a laser (A) por condução térmica e (B) soldagem profunda ou <i>keyhole</i> .....	21
Figura 6: Plataforma petrolífera após o processo de corrosão da maresia .....	23
Figura 7: Célula eletroquímica convencional a três eletrodos .....	24
Figura 8: Representação esquemática das curvas de polarização anódica e catódica. .....	25
Figura 9: Equipamento laser Yb: YAG utilizado no processo de soldagem .....	28
Figura 10: Esquemático da célula de corrosão. ....	30
Figura 11: Montagem da amostra na célula eletroquímica para ensaios de corrosão .....	31
Figura 12: (a) Célula eletroquímica e (b) Potenciosatato/Galvanostato .....	32
Figura 13: Chapa soldada com os diferentes parâmetros de laser .....	33
Figura 14: Micrografia do material base (A) em aspecto geral e (B) ampliação .....	34
Figura 15: Micrografia da (A) zona fundida, (B) ZTA, (C) zona de transição e (D e E) do material base.....	35
Figura 16: Micrografia da zona de transição .....	36
Figura 17: Micrografia dos cordões de solda em função da velocidade para potência de 2000 W .....	37
Figura 18: Parâmetro de solda P9 usado como exemplo esquemático da medição na ZTA .....	38
Figura 19: Velocidade da soldagem em função da profundidade e da largura do cordão de solda, para potência de 2000 W .....	39
Figura 20: Comparação de dois parâmetros de velocidade de varredura e potência de laser .....	40
Figura 21: Micrografia e mapeamento de elementos para os cordões de solda realizados com potência de 1500 W e velocidade de varredura de (A) 1000 mm/s e (B) 3000 mm/s.....	41
Figura 22: Micrografia e EDS em linha dos cordões de solda (A) P3 e (B) P5.....	42
Figura 23: Potencial de circuito aberto para o metal base polido e como recebido...	43
Figura 24: Potencial de circuito aberto para as diferentes velocidades de varredura do laser com potência de 2000 W .....	44
Figura 25: Desenho esquemático do processo de corrosão galvânica .....	45
Figura 26: Potencial de circuito aberto para as diferentes velocidades de varredura do laser com potência de 2000 W, após retificação da superfície.....	46

Figura 27: Potencial de circuito aberto para velocidades de varredura do laser 1500 mm/s com potência de 2000 W e MB em duas condições .....	47
Figura 28: Micropolarização para o material base polido e como recebido .....	48
Figura 29: Micropolarização para o material base polido e como recebido, para P 2000 W .....	49
Figura 30: Micropolarização para os cordões de solda após a retificação, para P 2000 W .....	50
Figura 31 Micropolarização para velocidades de varredura do laser 1500 mm/s com potência de 2000 W e MB em duas condições .....	50
Figura 32: Macropolarização para o material base polido e como recebido .....	51
Figura 33: Macropolarização para o material base polido e como recebido, para P 2000 W .....	52
Figura 34: Macropolarização para os cordões de solda após a retificação, para P 2000 W .....	53
Figura 35: Macropolarização para velocidades de varredura do laser 1500 mm/s com potência de 2000 W e MB em duas condições. ....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço DOMEX 700 .....	27
Tabela 2: Propriedades mecânicas material base.....	27
Tabela 3: Parâmetros de soldagem a laser.....	28
Tabela 4: Parâmetros de soldagem, largura da ZTA, largura e profundidade do cordão de solda.....	39
Tabela 5: Parâmetros de laser em função da profundidade e largura do cordão de solda.....	40
Tabela 6: Parâmetros eletroquímicos para MB como recebido e parâmetros de laser .....	54
Tabela 7: Parâmetros antes e depois da retificação .....	55

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
2.1 DOMEX 700 MC	15
2.2 SOLDAGEM E MICROESTRUTURA	15
2.3 TIPOS DE LASER	17
2.3.1 Soldagem com laser de CO <sub>2</sub>	18
2.3.2 Laser de fibra	19
2.4 SOLDAGEM A LASER	20
2.5 CORROSÃO	22
2.6 METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE CORROSÃO	24
2.6.1 Célula eletroquímica ou eletrolítica	24
2.6.2 Potencial de corrosão e polarização	25
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>27</b>
3.1 MATERIAIS	27
3.2 SOLDAGEM A LASER	27
3.3 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA	29
3.4 CARACTERIZAÇÃO POR MICROSCOPIA	29
3.5 CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA	30
3.5.1 Preparação da célula eletroquímica	30
3.5.2 Preparação do eletrodo de trabalho	31
3.5.2 Ensaio eletroquímico	31
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>33</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	34
4.1.1 Microestrutura do Metal Base	34
4.1.2 Microestrutura e dimensões dos cordões de solda	34
4.2 ENSAIOS DE CORROSÃO	43
4.2.1 Ensaio Potencial de Circuito Aberto	43
4.2.2 Micropolarização	47
4.2.3 Macropolarização	51
4.2.4 Taxa de Corrosão	54
<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>56</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, as indústrias siderúrgicas desenvolveram produtos de aço com maior resistência mecânica, maior tenacidade e melhor soldabilidade, usando elementos de liga de menor custo. Os modernos processos de fabricação possibilitaram a produção de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) ou *High Strength Low Alloy* (HSLA), atingindo resistência máxima de até 1200 MPa. Isso foi possível devido a introdução de processos como o termomecânico controlado (TMCP – *Thermal Mechanical Controlled Process*), que combina a laminação controlada e resfriamento acelerado, simultaneamente. A microestrutura dos aços TMCP é refinada em comparação com os aços convencionais, resultando em uma melhoria significativa na resistência e tenacidade (FUKUMOTO, 1996).

Desde o ano de 2015, os aços ARBL da empresa SSAB, chamados comercialmente de DOMEX, passaram a ser chamados de STRENX. Este aço é conformado a frio, destinado a uso nas indústrias automotiva e de estruturas para engenharia. A composição química consiste de baixos níveis de carbono e manganês, com adições precisas de refinadores de grãos como nióbio, titânio e vanádio. Suas características químicas, juntamente com o refinamento microestrutural torna o aço DOMEX uma alternativa técnica e economicamente viável para produtos conformados a frio e soldados (SSAB TUNNPLANT, 2017).

Para produção de estruturas, os aços passam por processos de soldagem, o que reconhecidamente modifica suas propriedades mecânicas, químicas e microestruturais, podendo acarretar em alteração de sua resistência à corrosão. Dentre os processos de soldagem mais utilizados na indústria automotiva está o de soldagem a laser, que pode ser realizado por condução ou penetração, com lasers de CO<sub>2</sub> ou laser de fibra, por exemplo. A soldagem a laser se diferencia dos processos convencionais por gerar uma zona termicamente afetada de tamanho reduzido, o que é interessante para preservar as características originais do metal base.

Com o desenvolvimento de novos materiais, sistemas inovadores para o seu processamento também foram criados. O laser é uma ferramenta de processamento que pode ser considerada flexível e com ampla gama de aplicações relevantes para a indústria e para a ciência. Seu uso está se difundindo cada vez mais como consequência do desenvolvimento de sistemas a laser modernos, com maior confiabilidade e menor custo. Os lasers fornecem à indústria soluções técnicas a

muitos problemas na área do processamento de materiais e além de substituírem muitas tecnologias já estabelecidas, ainda apresentam maior produtividade (VENTRELLA et al., 2010).

Considerando o exposto acima, neste trabalho foi realizada a soldagem da liga DOMEX 700 MC, com diferentes parâmetros de laser para se estudar as alterações que a soldagem resultou na microestrutura e na taxa de corrosão do material. A utilização do método de Tafel determina o comportamento anódico/catódico dos materiais através de curvas de polarização dadas pelo gráfico de potencial versus logaritmo da corrente. A partir do conhecimento das inclinações de Tafel obtidas pela curva de polarização foi possível calcular a densidade de corrente de corrosão e os valores de resistência à polarização (WOLYNEC, 2003). Com isso, foi possível calcular a taxa de corrosão e obter argumentos técnicos e científicos sobre a utilização do laser para união de partes em aço DOMEX 700 MC.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar as alterações microestruturais e em resistência à corrosão da liga DOMEX 700 MC devido à soldagem a laser.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a microestrutura do metal base e dos cordões de solda em função dos parâmetros de laser;
- Identificar relação da alteração das dimensões do cordão de solda com os parâmetros estudados.
- Calcular a taxa de corrosão, verificando os tipos de corrosão que ocorreram durante os ensaios;
- Comparar os resultados obtidos de taxa de corrosão com as características apresentadas nos diferentes parâmetros de soldagem.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 DOMEX 700 MC

Segundo Borko (2017) a microestrutura do aço DOMEX 700 MC é formada uma matriz de grãos ferríticos finos, com um diâmetro médio de grãos de 9  $\mu\text{m}$ . DOMEX é a marca registrada da chapa de aço laminada a quente da siderúrgica SSAB Turnplat, sendo um aço para conformação a frio. Na gama DOMEX, pode-se encontrar aços resistentes à corrosão, ao desgaste, chapa de aço para proteção balística, chapa de aço magnética e aços para têmpera. Os aços DOMEX de alto limite elástico para conformação a frio são também designados como aços estruturais modernos. A nomenclatura para estes aço de alta resistência é descrita na Norma DIN EN 10149, sendo que a nomenclatura do aço em estudo, o Domex 700MC, conforme esta norma é S700MC.

Segundo SSAB TURNPLAT (2001), os aços DOMEX YP/XP, por exemplo, são utilizados há vários anos na indústria, e o seu desenvolvimento contínuo busca atender as exigências do mercado constantemente. Os aços DOMEX MC de elevado limite elástico tiveram a sua posição consolidada no mercado e tornaram-se uma boa alternativa aos aços DOMEX YP/XP.

Segundo Rodrigues (2012, apud SSAB TURNPLAT 2001; DIN EN 10149-1 2005; SSAB TURNPLAT 2002) a sigla MC que é utilizada no DOMEX 700 MC refere-se a uma gama de aços de alto limite elástico para conformação a frio, com boa soldabilidade e conformação. Estas características tornam estes aços adequados para aplicações estruturais para guindastes, equipamentos para terraplanagem, chassis de maquinários e também na indústria automobilísticas. Nestas aplicações, a elevada resistência é usada para diminuir o peso das estruturas e aumentar a carga suportada.

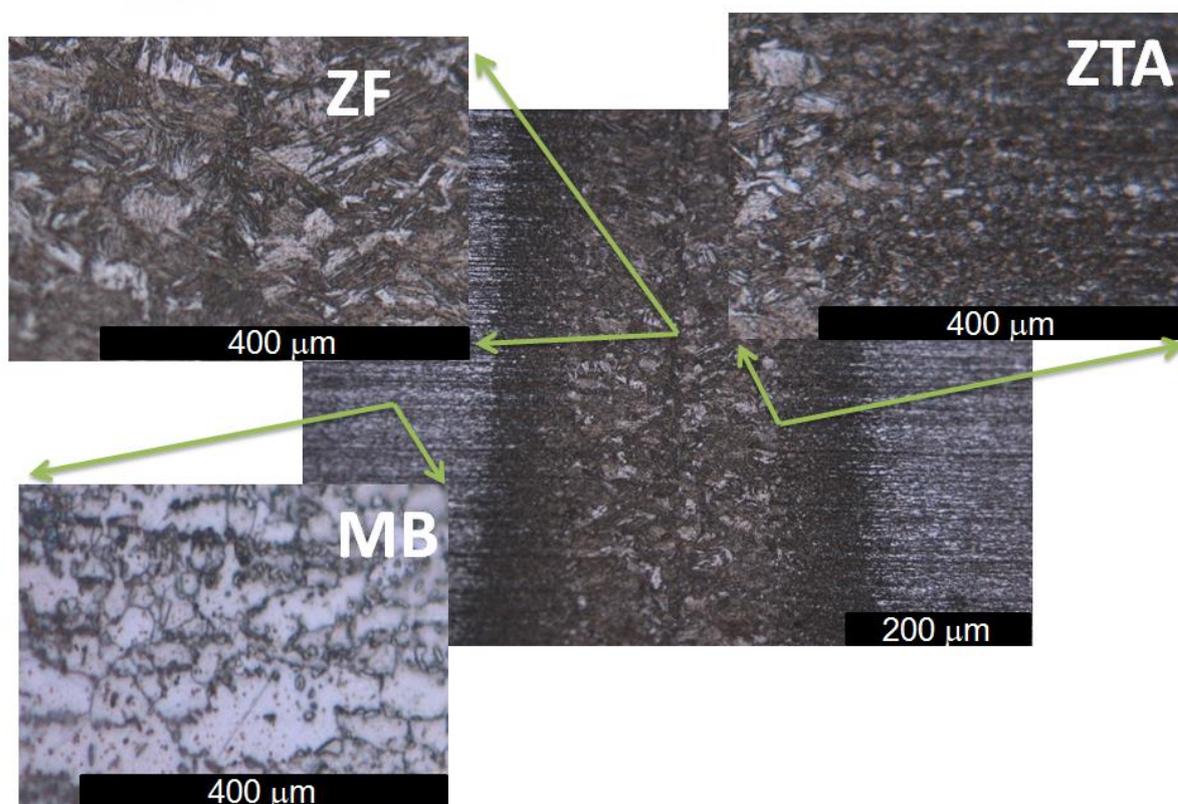
### 2.2 SOLDAGEM E MICROESTRUTURA

A soldagem é o processo mais importante na união permanentemente de partes metálicas. Durante a solda, a energia térmica em forma de calor promove a fusão parcial dos componentes a serem unidos, misturando-os em uma poça de fusão,

a qual após a solidificação promove a junção permanente dos metais em uma região chamada zona de fusão (ZF) (MODENESI, 2012).

Além da ZF a soldagem promove alterações na microestrutura adjacente, gerando a zona termicamente afetada (ZTA), na qual se observa a ocorrência de endurecimento parcial localizado, devido a alteração granular e anisotrópica do metal. Na região não afetada pelo calor, permanece o material base (MB), que não apresenta alterações em comparação com o material antes da soldagem. A Figura 1 é uma micrografia de um exemplo de microestrutura gerada por soldagem a laser, com destaque e ampliação nas três diferentes regiões (BRAZ, 2018).

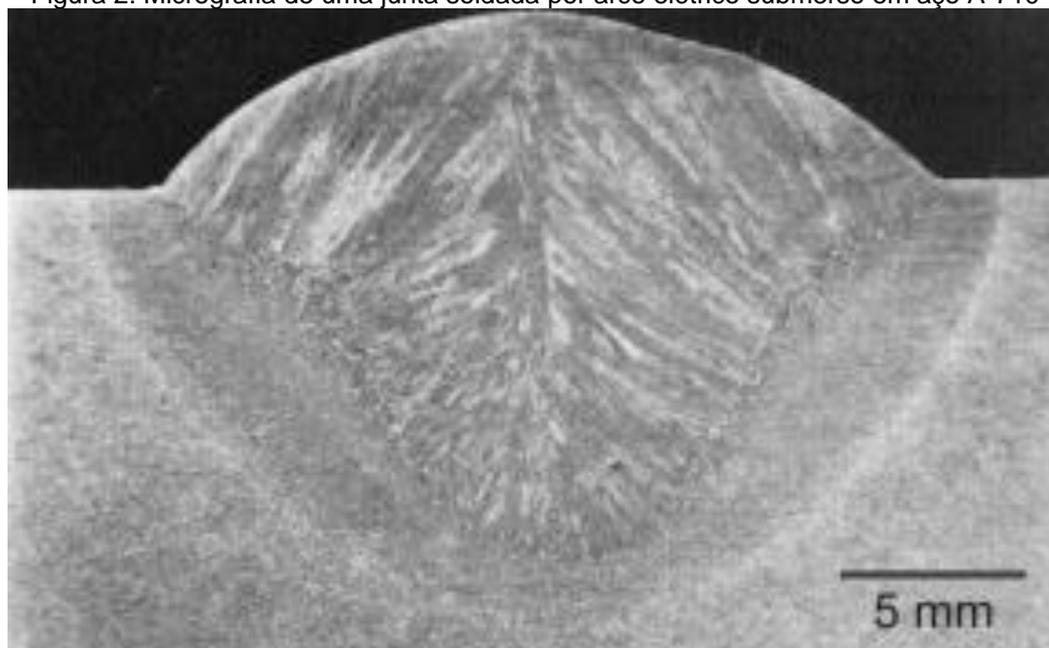
Figura 1: Micrografias do aço DP 600 soldada a laser



Fonte: BRAZ (2018)

É possível observar na Figura 1 ampliações das diferentes regiões formadas e que neste caso, a largura do cordão de solda foi da ordem de 250 µm. A Figura 2 mostra um cordão de solda realizado por soldagem a arco elétrico, para efeitos de comparação da largura do cordão de solda.

Figura 2: Micrografia de uma junta soldada por arco elétrico submerso em aço A-710



Fonte: PFEIFER (2009)

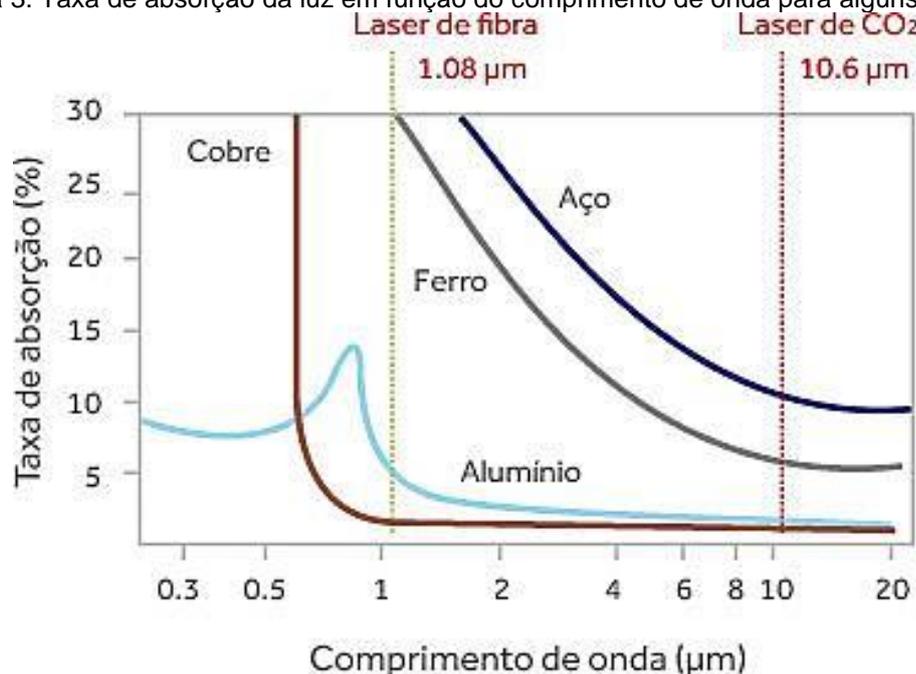
Nos processos de soldagem convencionais de arco elétrico, tais como a TIG (*Tungsten Inert Gas*), arco submerso ou ainda com os processos MIG/MAG (*Metal Inter Gas / Metal Active Gas*), a largura do cordão de solda e ZTA juntos são de ordem milimétrica, dependendo dos parâmetros de soldagem utilizados. Devido a isso, a soldagem a laser torna-se uma alternativa aos processos convencionais por ocasionar menores níveis de alterações nos metais.

### 2.3 TIPOS DE LASER

O laser é uma energia luminosa de comprimento de onda ( $\lambda$ ) específico, altamente concentrada, que quando interage com a superfície de algum material pode ser refletida, absorvida ou ainda transmitida, em caso de materiais transparentes.

Além da característica do material irradiado, sua composição química e estrutura da superfície, a natureza da luz laser, ou seja, seu comprimento de onda, energia, frequência, largura do pulso laser e ainda a atmosfera ao redor influenciam diretamente nessa interação. Na gama dos equipamento de soldagem a laser, o laser de fibra e o de CO<sub>2</sub> possuem  $\lambda$  diferentes, atendendo a processos de soldagem de diferentes ligas metálicas. A Figura 3 mostra a taxa de absorção da luz laser em função de  $\lambda$  para diferentes materiais.

Figura 3: Taxa de absorção da luz em função do comprimento de onda para alguns metais



Fonte: AMERICA (2016)

A absorção da energia do laser pelos materiais também aumenta conforme aumenta a temperatura na região irradiada da peça (BATALHA, 2000). Quando a densidade de energia do laser, ou seja, a relação entre potência e área de concentração, é suficientemente alta e há absorção pelo material, o aquecimento gerado provoca a fusão, vaporização ou absorção atômica como a ablação (A VOZ DA INDÚSTRIA, 2018). A densidade de energia do laser também é chamada de intensidade do laser, medida em  $W/cm^2$ . Para a soldagem a laser é necessário que a temperatura no metal irradiado seja igual ou superior ao seu ponto de fusão.

Segundo Carvalho (2012), são processos que minimizam as dimensões da ZTA a soldagem por feixes de elétrons (*Electron Beam Welding* – EBW) ou soldagem a laser, que faz parte do estudo desse trabalho.

### 2.3.1 Soldagem com laser de CO<sub>2</sub>

Um dos lasers mais comuns de utilização em soldagem automotiva é o laser de CO<sub>2</sub>, que produz um laser com  $\lambda$  de 10,6 μm e é um tipo de laser de estado gasoso. Em geral, os materiais possuem menor absorvância quanto maior o  $\lambda$  incidente, pois fótons de menor  $\lambda$  possuem uma energia maior, com maior possibilidade de interagir com o maior número de elétrons ligados. Em comparação com outros tipos de laser,

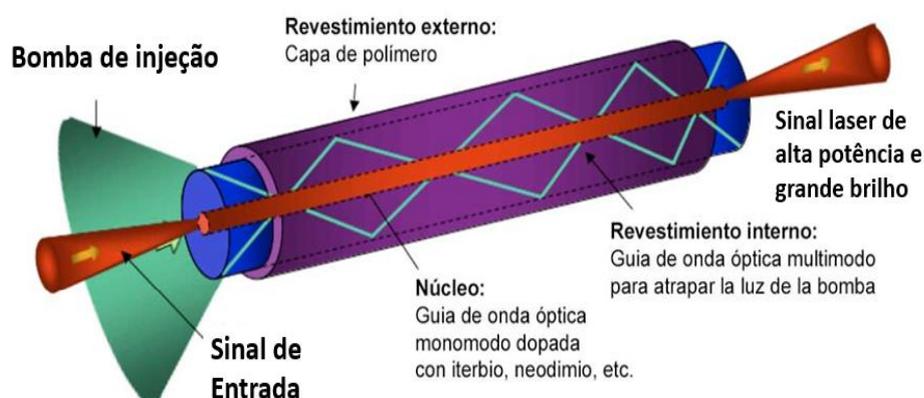
pode-se dizer que o laser de CO<sub>2</sub> possui  $\lambda$  elevado, sendo situado no infravermelho (ION, 2005).

Lasers de CO<sub>2</sub> realizam processos de corte e solda em fábricas de todo o mundo. Empresas que utilizam este tipo de equipamento valorizam-no por sua alta confiabilidade, inclusive em aplicações com exigências mais robustas. Os lasers de CO<sub>2</sub> são encontrados em níveis de potência entre 2 a 20 kW. O comprimento de onda de 10,6  $\mu\text{m}$  é bastante flexível em diversos tipos e espessuras de material. Os processos laser são executados de maneira estável, produtiva e sem respingos. Por causa de seu formato compacto, os lasers de CO<sub>2</sub> podem ser facilmente integrados aos sistemas automatizados existentes (TRUMPF, 2018b).

### 2.3.2 Laser de fibra

Este é o tipo de laser de estado sólido, constituído por um segmento de fibra óptica cujo núcleo é dopado com íons de terras raras (Figura 4) como érbio, itérbio, neodímio, disprósio, praseodímio ou túlio. Os lasers de itérbio de estado sólido bombeados por diodo têm suprido grande parte da demanda por lasers de alta potência. Estes equipamentos possuem boa qualidade de feixe, gerando  $\lambda$  de 1,06  $\mu\text{m}$  e são capazes de atingir potências elevadas, mantendo-se a qualidade de feixe devido a sua forma especial, que confina a radiação por longas extensões da fibra (MELO et al., 2011).

Figura 4: Desenho esquemático da fibra de laser dopada com itérbio



Fonte: PLANES (2019)

Embora seja possível utilizar a fibra do laser como a fibra de entrega final do feixe, é aconselhável a utilização de um acoplamento entre a fibra de entrega do feixe e uma fibra específica para o processamento de materiais, aumentando sua resistência e servindo como meio de proteção contra reflexões indesejadas que podem retornar pela fibra óptica a partir da superfície da peça, danificando o laser (TZENG, 2000). Já os lasers de CO<sub>2</sub> não podem ser conduzidos por fibras ópticas, necessitando ser colocados próximos ao local de aplicação.

Segundo a empresa fabricante de lasers Trumpf (2018 a), os lasers de fibra são versáteis, sendo utilizados tanto para corte como para soldagem, além de permitir o microprocessamento de materiais e marcação a laser. A grande densidade de energia sobre a peça é diretamente transformada em alta velocidade de processamento em materiais de espessura reduzida. O laser de fibra gera cordões de solda estreitos e, no corte a laser, gera pequenas fendas de corte, reduzindo as perdas.

## 2.4 SOLDAGEM A LASER

A cordão de solda realizado pelo processo a laser é formado conforme a intensa luz do laser interage com a superfície do metal, aquecendo-o rapidamente (AMERICA, 2016). Segundo Infosolda (2013), algumas vantagens do processo de soldagem a laser são:

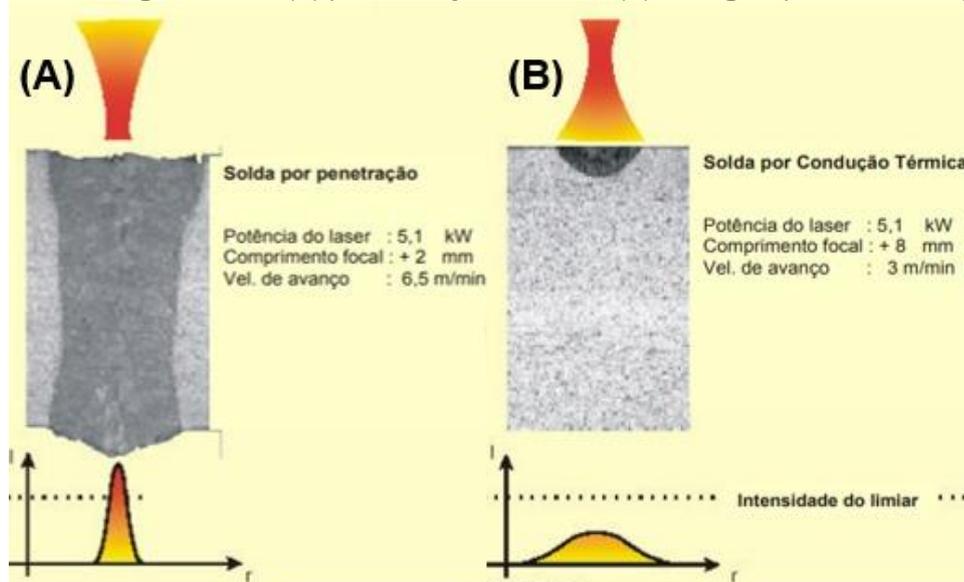
- Aporte de energia concentrado;
- Minimização dos efeitos metalúrgicos sofridos pela ZTA;
- Menores níveis de distorções;
- Soldagens em um único passe;
- Pode ser realizada sem metal de adição;
- Facilidade em soldar locais de difícil acesso, uma vez que não há contato com a peça;
- Soldagem de peças muito finas;
- Possibilidade de automatização do processo.

Em função da absorção da intensidade de radiação do laser e de uma intensidade de limiar específica para cada material, podem ser distinguidos dois processos: a soldagem profunda e a soldagem por condução térmica (BATALHA,

2003). Na soldagem, a absorção da energia do laser depende de diferentes características específicas do processo como a natureza do material e sua condição de superfície, do comprimento de onda do laser e do ângulo de incidência do feixe de laser na superfície a ser soldada (BATALHA, 2003).

A solda de penetração consome uma densidade de energia média e resulta em cordões de solda estreitos e profundos (AMERICA, 2016), como mostra a Figura 5a. As soldas de penetração, também chamada de *keyhole* ou buraco de fechadura, são o resultado da energia direta sobre o material que está sendo soldado (AMERICA, 2016). Quando a intensidade do feixe é maior que a intensidade limiar, têm-se o acoplamento no chamado capilar de vapor, o qual devido a elevada absorção no vapor do metal (absorção do plasma) e das reflexões múltiplas da luz de laser no *keyhole*, resulta em uma solda a laser mais profunda ou de penetração (BATALHA, 2003).

Figura 5: Soldagem a laser (A) por condução térmica e (B) soldagem profunda ou *keyhole*



Fonte: BATALHA (2003)

São características da soldagem a laser profunda:

- Elevada velocidade de avanço;
- Menor espectro de energia (= Potência / Velocidade);
- Menor distorção da peça;
- Maior razão profundidade / largura de cordão (em comparação com a solda por condução);
- Contornos superior e raiz do cordão de solda muito uniformes.

Os cordões de soldas realizados por condução são feitos com baixo consumo de energia, resultando em cordões amplos e pouco profundos, como mostra a Figura 5b. Quando a intensidade do feixe é menor que a intensidade limiar, têm-se o acoplamento de superfícies de peças lisas ou não substancialmente deformadas. A potência absorvida pelo metal é maior que a potencial dissipada por condução, promovendo a fusão da superfície do material. Entretanto, não se atinge uma formação do *keyhole* e uma ZTA pouco profunda é gerada (AMERICA, 2016).

São características da soldagem por condução térmica:

- Velocidade de avanço comparativamente menor;
- Maior espectro de energia (= Potência / Velocidade);
- Seção do cordão de solda em forma de meio círculo com largura do cordão » 2.
- Contorno externo e raiz do cordão de solda muito uniforme;
- Junção por soldagem apenas de materiais com uma camada de óxido de baixo ponto de fusão.

A transição a partir do modo de condução para a penetração profunda ocorre com o aumento da intensidade do laser.

## 2.5 CORROSÃO

Num aspecto muito difundido e aceito universalmente, pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 1982). A água, quimicamente pura, é constituída de moléculas, que se apresentam associadas devido às ligações por ponte de hidrogênio. Todas as outras substâncias presentes, dissolvidas ou em suspensão, podem ser consideradas impurezas, como:

- Sais dissolvidos como, por exemplo, cloreto de sódio, de ferro e de magnésio, carbonato de sódio, bicarbonato de cálcio, de magnésio e de ferro;
- Gases dissolvidos – oxigênio, nitrogênio, gás sulfídrico, óxidos de enxofre, SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub>, amônia, cloro e gás carbônico;
- Matéria orgânica;
- Sólidos suspensos;
- Bactérias – crescimento biológico.

As impurezas podem ocasionar deterioração dos equipamentos e tubulações, nas quais há circulação ou contato com a água. A Figura 6 mostra um exemplo de corrosão ocasionada pela ação da água do mar e da maresia, mostrando o aspecto alaranjado característico da corrosão do aço.

Figura 6: Plataforma petrolífera após o processo de corrosão da maresia



Fonte: INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS (2013)

Devido a isso, convém estabelecer algumas considerações sobre os fatores que mais frequentemente influenciam a ação corrosiva da água, como como pH, temperatura, velocidade e ação mecânica. Dependendo da combinação desses fatores podem ocorrer diferentes tipos de corrosão, dentre os quais se destacam a corrosão do tipo (GENTIL, 1982):

- Uniforme: Corrosão eletroquímica que se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura;
- Pites: extremamente localizada e causa a formação de pequenos furos no metal, orifícios que adentram formando uma espécie de “poço”;
- Intragranular: É uma corrosão que ocorre nos contornos do grão. Esta corrosão é também chamada corrosão intercrystalina;
- Intergranular: ocorre em torno de cordão de solda.

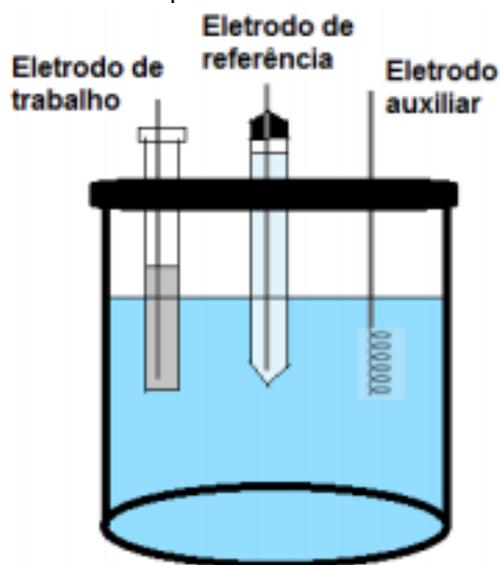
O tipo intergranular ocorre comumente nos cordões de solda devido a modificação microestrutural que a soldagem promove no material, onde são identificadas as regiões de ZF, ZTA e o MB.

## 2.6 METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE CORROSÃO

### 2.6.1 Célula eletroquímica ou eletrolítica

Para se estudar e conhecer o comportamento dos materiais em relação a corrosão, são realizados ensaios eletroquímicos com o intuito de acelerar os processos naturais. Para isso, é comum a utilização de uma célula eletroquímica ou eletrolítica. O conjunto eletroquímico utilizado em análises é semelhante ao conjunto mostrado na Figura 7 (LIMA, 2017). A célula eletroquímica é constituída pelo eletrodo de trabalho (ET), eletrodo auxiliar (EA) e eletrodo de referência (ER), juntamente com uma cuba eletrolítica onde a solução onde será feita a análise é colocada.

Figura 7: Célula eletroquímica convencional a três eletrodos



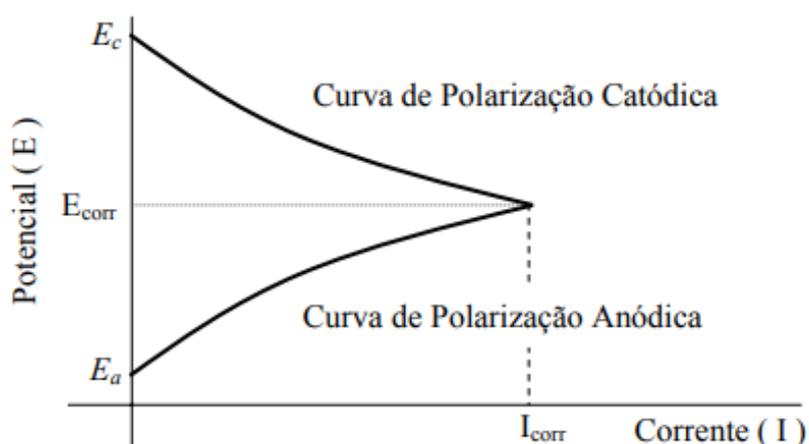
Fonte: LIMA (2017)

O ET consiste na amostra a ser analisada, com área de superfície conhecida e exposta na solução eletrolítica. Já o ER é aquele que não altera o seu potencial durante as análises, com que se tem por base as medidas eletroquímicas para realizar uma comparação com o eletrodo de trabalho. O eletrodo auxiliar normalmente é de material mais nobre, como platina, sendo este um metal inerte quimicamente.

## 2.6.2 Potencial de corrosão e polarização

Quando um metal está em equilíbrio com uma solução que contenha seus próprios íons, na ausência de reações que interfiram, haverá um potencial de equilíbrio  $E_{cor}$ . Se uma corrente circular por esse eletrodo, o potencial deste metal sofrerá alterações em função desta corrente, deslocando o  $E_{cor}$  para um novo valor. Conforme mostra a Figura 8, quando uma varredura de corrente elétrica flui, o potencial do ânodo  $E_a$  se aproxima do potencial do cátodo  $E_c$  e vice-versa. Com isso a diferença do potencial entre os eletrodos diminui à medida que a corrente se aproxima do  $E_{cor}$ , conforme a Figura 8.

Figura 8: Representação esquemática das curvas de polarização anódica e catódica



Fonte: ALBERTI (2004)

Desta forma é obtida a chamada polarização dos eletrodos, ou seja, polarização anódica no anodo e polarização catódica no catodo. Esta corrente é denominada corrente de corrosão  $I_{cor}$  e é proporcional à velocidade de corrosão do metal no sistema em questão. O potencial correspondente a este ponto é o potencial de corrosão do par ( $E_T$  e  $E_R$ ).

Técnicas experimentais de polarização permitem uma estimativa da taxa de corrosão dos metais, a partir da extrapolação da parte linear do gráfico mostrado na Figura 8, sendo esta chamada de extrapolação de Tafel. Além da curva para extrapolação de Tafel, uma polarização com menor variação de corrente em torno do

$E_{cor}$  permite a obtenção de uma curva que é aproximada para uma reta e de acordo com a Lei de Ohm, a corrente é proporcional ao potencial para um dado valor de resistência (OLIVEIRA, 2012), que é a resistência polarização do metal ( $R_p$ ). Com as inclinações de Tafel catódica ( $\beta_c$ ) e anódica ( $\beta_a$ ), obtidas em função da variação de potencial por década (V/dec), das retas anódicas e catódicas, calcula-se utilizando a Equação (1) a corrente de corrosão anódica  $I_{corr}$  (WOLYNEC, 2003).

$$I_{corr} = \frac{|\beta_c| \cdot |\beta_a|}{2,303 \cdot R_p \cdot (\beta_c + \beta_a)} \quad \text{Equação (1)}$$

Em função dos dados obtidos com esses ensaios, pode-se calcular as taxas de corrosão dos diferentes eletrodos pela aplicação da Equação (2):

$$\text{Taxa de corrosão} = \frac{P.A.t.I_{corr}}{n.\rho.S.F} \quad \text{Equação (2)}$$

onde PA é o peso atômico (g/mol) e n é o número de elétrons envolvidos na reação, S é a área do eletrodo (cm<sup>2</sup>), F constante de Faraday (96487 Coulomb) e t é o tempo de um ano, em segundos (31536000 s) (ASTM G59-97, 2009).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Essa seção apresenta a metodologia desenvolvida no estudo desse trabalho, contemplando técnicas e instrumentos utilizados para se atingir os objetivos.

#### 3.1 MATERIAIS

Foi utilizada uma chapa de 6 mm de espessura, com as dimensões 100 x 100 mm, do aço DOMEX 700 MC com composição química listada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço DOMEX 700

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Al	Nb	B	N
,061	,02	1,91	,014	,002	,03	,04	,10	,02	,10	,01	,036	,062	,0001	,005

Fonte: SSAB (2015 a)

Em relação as propriedades mecânicas, a Tabela 2 mostra os valores de referência do fabricante da liga.

Tabela 2: Propriedades mecânicas material base

Força de rendimento $R_{eh}$ (MPa)	Resistência à tração $R_m$ (MPa)	Alongamento/ruptura (%)
777	826	12

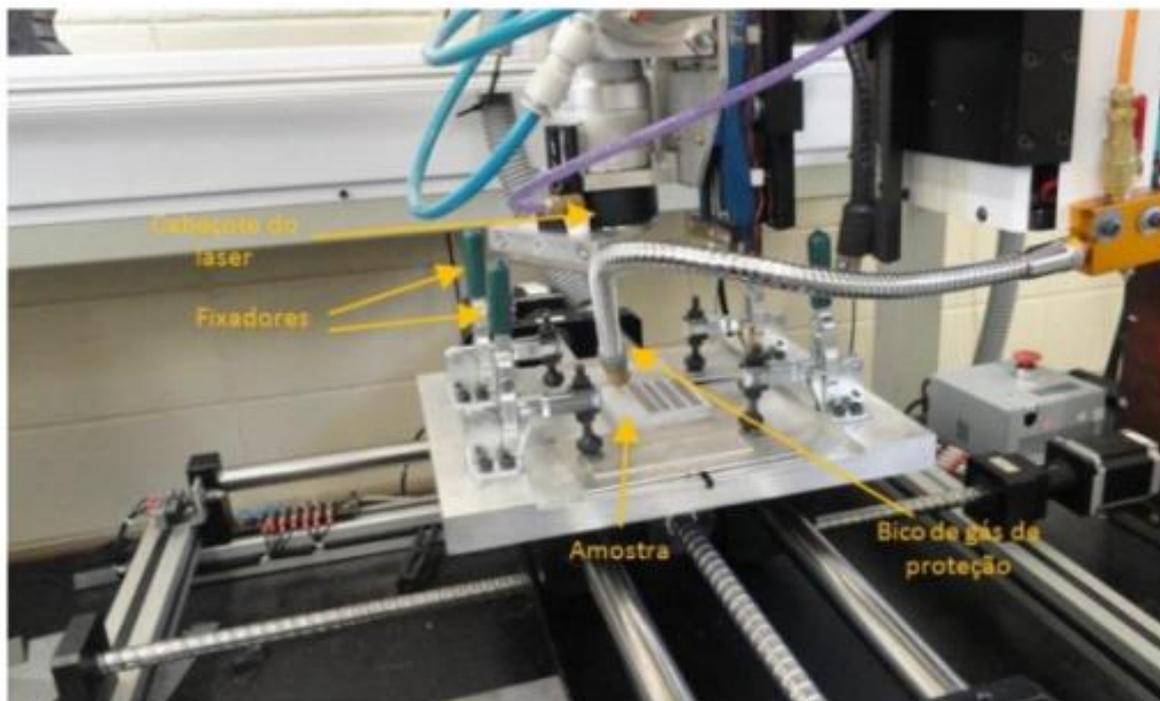
Fonte: SSAB (2015 a)

A soldagem a laser foi realizada na superfície em condições como recebida, recebendo apenas uma limpeza com detergente e álcool isopropílico antes do processo.

#### 3.2 SOLDAGEM A LASER

A soldagem foi realizada no Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos, SP. Utilizou-se um laser do tipo fibra dopado com itérbio Yb:YAG (IPG, YLR-2000) com potência máxima de 2000 W. O feixe é entregue usando uma fibra óptica de 100  $\mu$ m de diâmetro interno. A posição de focalização do feixe laser de 138 mm foi fixada na superfície da chapa. O gás de proteção utilizado foi argônio, com vazão de 8,5 L/min. Na Figura 9 é mostrada uma fotografia com as indicações das partes do sistema de soldagem a laser.

Figura 9: Equipamento laser Yb: YAG utilizado no processo de soldagem



Fonte: TELEGINSKI (2012)

A soldagem foi realizada variando-se a potência  $P$  (W) e velocidade de varredura  $V$  (mm/s), conforme a Tabela 3. O processo de soldagem foi realizado com oito parâmetros para se estabelecer qual a influência desses parâmetros nas propriedades do material.

Tabela 3: Parâmetros de soldagem a laser

Parâmetros	P1	P2	P7	P3	P9	P8	P4	P5
Potência (W)	1500	1500	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Velocidade (mm/s)	3000	1000	750	1000	1250	1500	2000	3000
Aporte térmico (J/mm)	0,50	1,50	2,67	2,00	1,60	1,33	1,00	0,67

Fonte: Autoria própria (2019)

O cálculo do aporte térmico (J/mm) foi realizado conforme a Equação 3:

$$Q = \frac{P}{V} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde  $P$  (W) é a potência e  $V$  é a velocidade de varredura (mm/s) do feixe de laser.

### 3.3 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

As preparações metalográficas foram realizadas nos laboratórios da UTFPR, Câmpus Guarapuava. Foram cortadas amostras na secção transversal dos cordões de solda para as análises posteriores. Os cortes foram realizados com cortadora metalográfica, modelo CM40, com o disco de corte 230 x 1,5 x 19 mm, Liso – HRC 35 a 60, para materiais ferros, com fluxo constante de fluido de corte.

Depois, essas amostras foram preparadas em uma embutidora da marca TECLAGO modelo EM30D. Utilizou-se baquelite TECLAGO em pó com uma pressão de 100 bar, a uma temperatura máxima de 170°C, sempre aplicando desmoldante na câmara de compressão, para facilitar a remoção da amostra embutida.

Realizou-se o lixamento das amostras com lixas 240, 480 e 600 em sequência, numa estrutura plana de vidro em que se tinham as lixas fixadas na sua superfície. Posteriormente, utilizou-se a lixa 1200# em politriz/lixadeira metalográfica. Realizou-se o polimento na politriz/lixadeira metalográfica, com alumina 2 µm e 1 µm e para o acabamento final foi utilizada pasta de diamante 1 µm. As amostras foram lavadas com detergente e água corrente.

Foi feito o ataque químico com Nital 3% para revelar a microestrutura de grãos do aço DOMEX 700 MC. Depois, as amostras foram lavadas com água corrente e secas com um soprador de ar quente. Através de tentativas e monitoramento percebeu-se que o tempo ideal de imersão no reagente foi entre 15 e 22 segundos, sendo possível observar a olho nu que a região do cordão de solda apresentava uma alteração em sua coloração, ficando acinzentado. Em seguida a amostra foi lavada com detergente e água corrente e posteriormente seca com um soprador de ar quente.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO POR MICROSCOPIA

Foram realizadas análises no material base e dos diferentes parâmetro de soldagem a laser. A microestrutura resultante foi observada em microscópio óptico (MO), marca OLYMPUS BX51, com câmera digital OLYMPUS UC30 para a captura de imagens, do laboratório de microscopia da UTFPR, Câmpus Guarapuava.

Foram realizadas análises com microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS), do laboratório de microscopia da

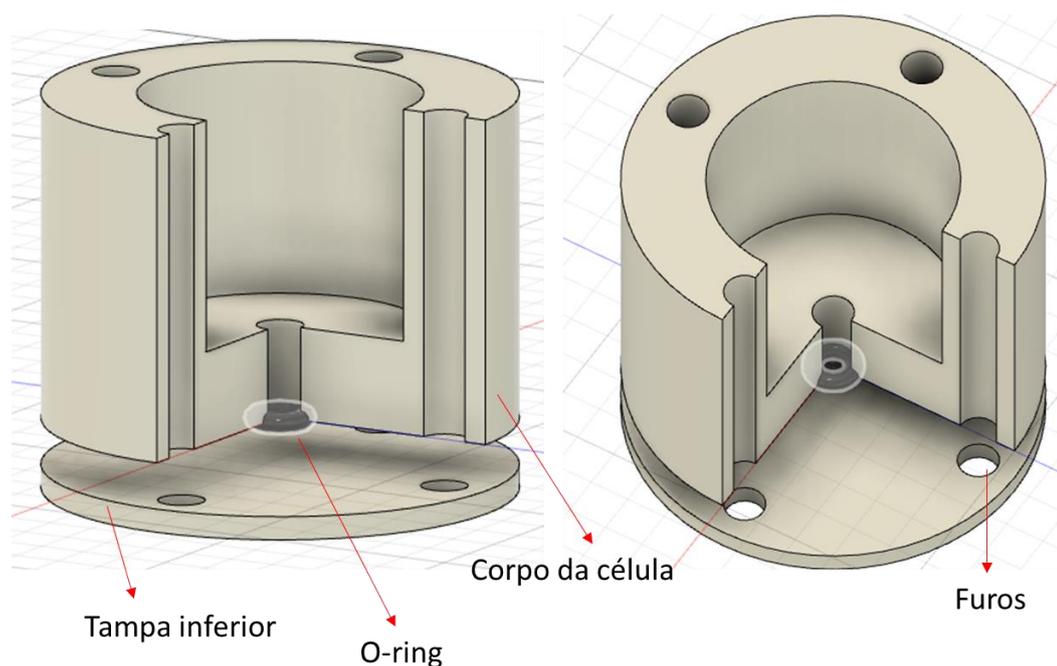
UTFPR, Câmpus Ponta Grossa, para análises em linha e de mapeamento qualitativo e semiquantitativo dos elementos químicos presentes.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

#### 3.5.1 Preparação da célula eletroquímica

Foi confeccionada uma célula eletroquímica, Figura 10, para os ensaios de corrosão, onde o corpo da célula foi usinado em nylon e para fechamento da célula utilizou-se barras roscadas M10 com porcas para fixação da base e da tampa, onde a mesma consiste em uma estrutura inferior para acomodar a amostra. O corpo central onde é colocado o eletrólito estabelece contato com a amostra através de um furo de 10 mm, localizado no fundo da estrutura central.

Figura 10: Esquemático da célula de corrosão.



Fonte: Autoria própria (2019).

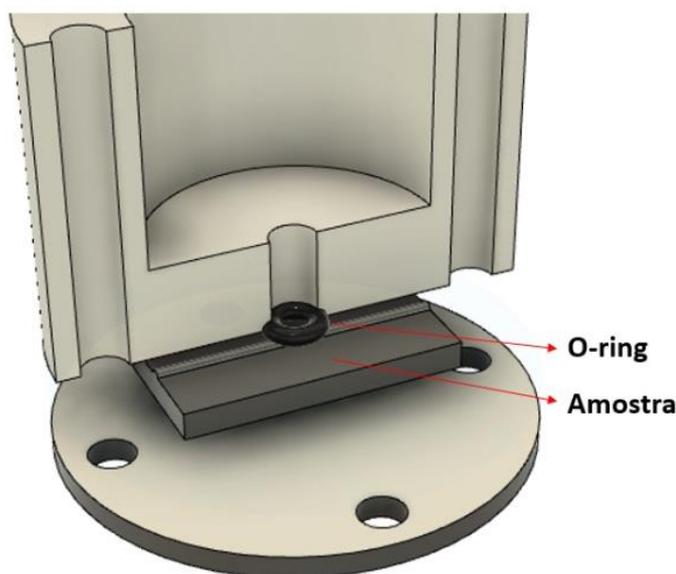
Para evitar vazamento, foi instalado um anel de vedação do tipo O-ring. Na tampa da célula foram feitos furos para possibilitar a inserção dos eletrodos de referência e contra eletrodo para realizar as análises de corrosão. Todo o procedimento de fabricação foi realizado no laboratório de Usinagem da UTFPR,

Câmpus Guarapuava, utilizando o torno Universal Nardine e fresadora Diplomat, bem como suas ferramentas, furadeira de bancada e brocas, serra manual e morsa.

### 3.5.2 Preparação do eletrodo de trabalho

O projeto da célula eletroquímica permitiu a utilização direta da superfície chapa de aço DOMEX 700MC com os cordões de solda. Foram realizados cortes para reduzir a largura da chapa para permitir o fechamento da célula, pressurizando o anel de vedação contra a superfície da chapa. A Figura 11 mostra esquematicamente como a amostra foi posicionada.

Figura 11: Montagem da amostra na célula eletroquímica para ensaios de corrosão



Fonte: Autoria própria (2018)

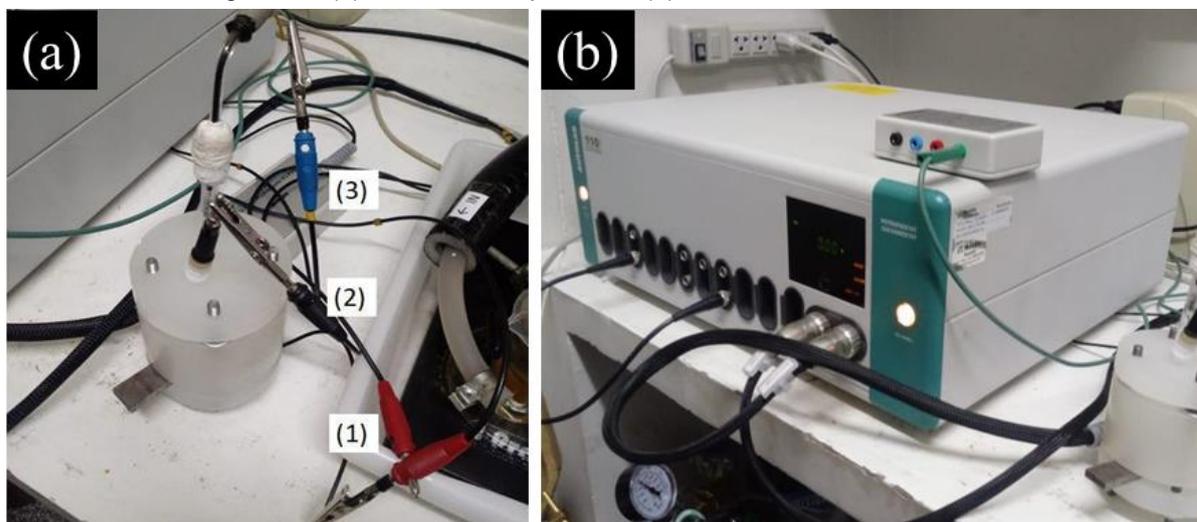
A área exposta da amostra é delimitada pelo diâmetro do O-ring, que é de 10 mm, totalizando uma área de 0,785 cm<sup>2</sup>.

### 3.5.2 Ensaios eletroquímicos

Os ensaios de corrosão foram realizados no Laboratório de Caracterização Eletroquímica, da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). A Figura 12A mostra a célula eletroquímica finalizada com os eletrodos de referência (3), eletrodo auxiliar (2) e o eletrodo de trabalho (1). Utilizou-se um potenciostato/galvanostato

Autolab modelo PGSTAT30, conforme mostra a Figura 12B. Foi utilizado solução aerada de NaCl 3,5%, em temperatura ambiente ( $25 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Figura 12: (a) Célula eletroquímica e (b) Potenciostato/Galvanostato



Fonte: Autoria própria (2018)

A célula eletroquímica foi montada utilizando eletrodo auxiliar de platina e eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS), com capilar de Luggin. Dentre as técnicas de análise eletroquímica, foram realizados ensaios para medição de potencial de corrosão ( $E_{\text{cor}}$ ) e polarizações. O potencial de circuito aberto (OCP – *Open Circuit Potential*) foi medido conforme norma (ASTM G59-97, 2009), que indica que o  $E_{\text{cor}}$  é o valor do potencial após 55 minutos de imersão na solução. Quando o metal corrói, o potencial eletroquímico que apresenta passa a ser chamado de potencial de corrosão, e é medido em função do potencial padrão do eletrodo de referência.

A polarização foi realizada em duas etapas, sendo a primeira uma micropolarização, realizada com uma variação de tensão entre  $\pm 10 \text{ mV}$  em torno do  $E_{\text{cor}}$  e na segunda etapa realizou-se a macropolarização, com variação de  $\pm 100 \text{ mV}$ , em torno do  $E_{\text{cor}}$ . Com os resultados obtidos, foi calculada a corrente de corrosão  $I_{\text{cor}}$  e a taxa de corrosão, em mm/ano, de acordo com as Equações (1) e (2), respectivamente.

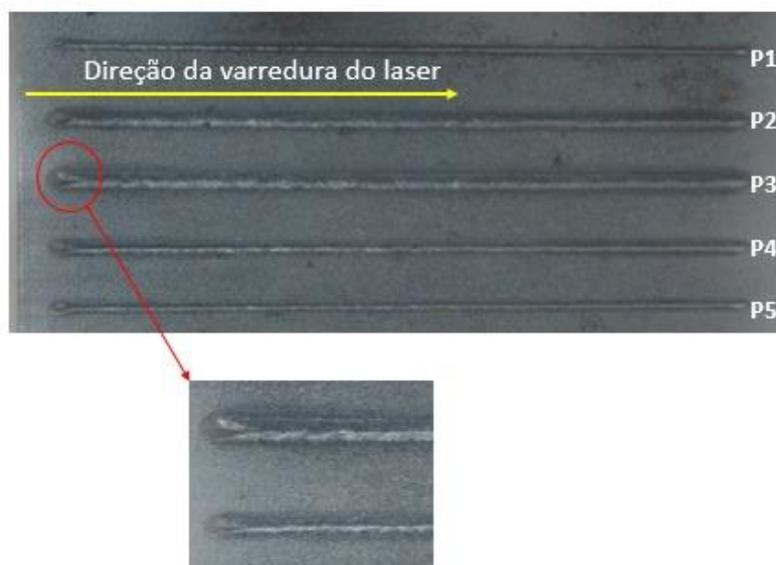
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e as discussões são apresentados comparando-se o metal base e os diferentes parâmetros de soldagem a laser. O capítulo foi dividido em duas etapas:

- Caracterização microestrutural do metal base e das regiões de zona fundida e zona termicamente afetada dos cordões de solda, discutindo a alteração de tamanho de grãos, morfologia e caracterização dimensional;
- Comparativo da resistência à corrosão entre o metal base e o material soldado, considerando os diferentes parâmetros de soldagem.

A Figura 13 mostra uma fotografia do corpo de prova, onde a seta indica a direção de deslocamento do feixe de laser para processamento dos diferentes cordões de solda, seguindo os parâmetros especificados na Tabela 3.

Figura 13: Chapa soldada com os diferentes parâmetros de laser



Fonte: Autoria própria (2019)

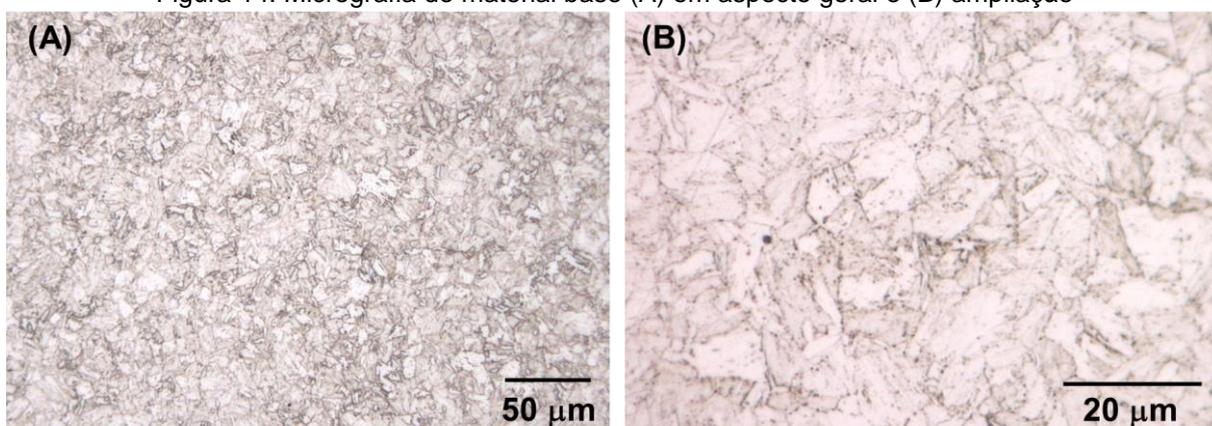
Observa-se que no início de cada cordão há defeitos de porosidade, pois esta é a região onde se iniciou o processo de soldagem. Para os ensaios realizados neste trabalho, a parte inicial dos cordões de solda foi desconsiderada, compreendendo uma região de 10 mm da borda da chapa. A partir dessa distância, o cordão de solda foi realizado em situação de regime de trabalho constante, ou seja, suas características se tornam mais homogêneas.

## 4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

### 4.1.1 Microestrutura do Metal Base

Foi realizada análise por MO do substrato para definir a microestrutura do aço DOMEX 700 MC. A Figura 14 mostra duas micrografias do material base, onde na Figura 14A é mostrado o aspecto geral do material e na Figura 14B é possível observar maiores detalhes dos grãos e contornos de grão.

Figura 14: Micrografia do material base (A) em aspecto geral e (B) ampliação



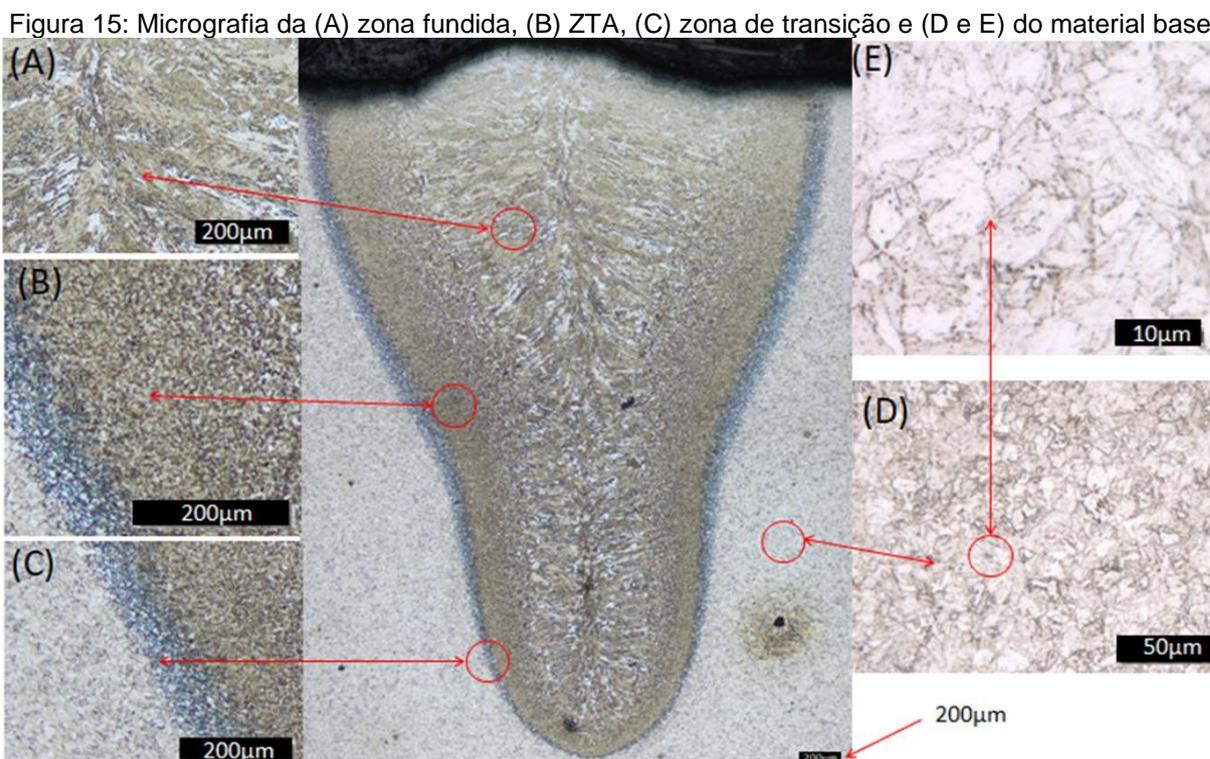
Fonte: Autoria própria (2019)

Os grãos de coloração clara são grãos de ferrita e as regiões escuras são os contornos de grão, sendo esta microestrutura semelhante a descrição da literatura (BORKO, 2017), bem como em trabalhos de Borges (2019). Comparando-se a barra de escala com o tamanho de grão, observa-se que possuem tamanhos menores que 20 µm. Em geral, a resistência mecânica dos aços está diretamente ligada ao tamanho de grão, sendo que quanto menor o tamanho de grão, maior sua resistência mecânica.

### 4.1.2 Microestrutura e dimensões dos cordões de solda

Foram realizadas análises de microscopia óptica na secção transversal de cada cordão de solda, com a sobreposição de imagens adjacentes. Todas as micrografias foram obtidas com a mesma ampliação, afim de se realizar comparações das dimensões obtidas de largura e profundidade dos cordões. A Figura 15 mostra as micrografias da secção transversal do parâmetro solda realizado com P 2000W e V

500mm/s. É possível verificar a ZF na Figura 15A, a ZTA na Figura 15C, uma Zona de Transição (ZT) na Figura 15B e o material base (MB) na Figura 15D e também na Figura 15E. O formato do cordão de solda indica que a soldagem foi por condução.



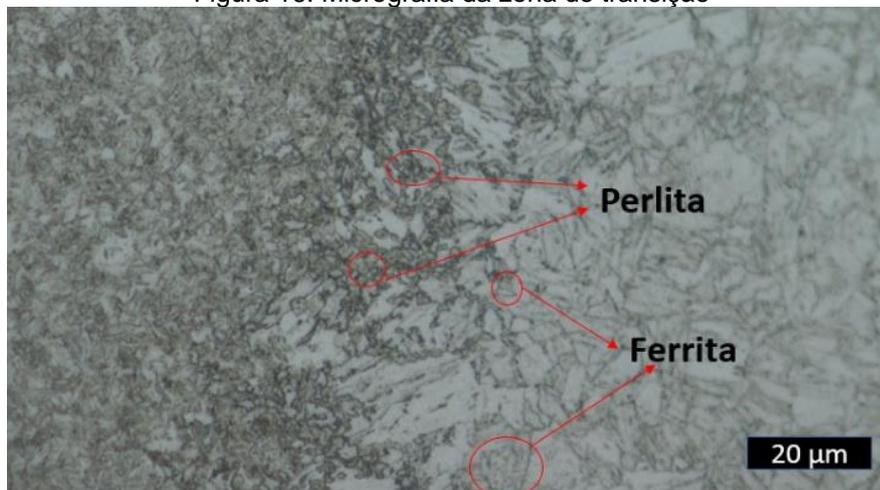
Fonte: Autoria própria (2018)

Durante a soldagem a laser, o material é aquecido e resfriado muito rapidamente, o que faz com que ocorram mudanças de fases e a microestrutura dos grãos adquire formato colunar, em direção ao centro. Na Figura 15A são visíveis grãos de ferrita acicular que são mais claros. Já os grãos de tonalidade mais escura correspondem a martensita, formada devido ao rápido resfriamento. Esse resultado é similar aos obtidos nos trabalhos de Zhang e colaboradores (2020).

Baseando-se na micrografia da Figura 15 a ZTA da parte superior da secção transversal do cordão de solda possui uma largura maior do que a ZTA formada na parte inferior. Isso ocorre devido a dissipação mais rápida do calor na parte inferior, pois o volume do material que atua como dissipador é maior na parte inferior, acelerando o processo de solidificação. Já na parte superior, especialmente na região central, o resfriamento ocorre de forma mais lenta, levando a uma ZTA maior e formação de perlita. Além disso, o tamanho de grãos da parte superior é maior, justamente devido ao processo de solidificação ocorrer de forma mais lenta.

A ZT é mostrada em maior detalhes na Figura 16, onde é possível observar duas fases distintas, uma mais clara, que corresponde a ferrita e uma mais escura que está na ZTA e corresponde a fase perlita (ZHANG et al., 2020).

Figura 16: Micrografia da zona de transição



Fonte: A autoria própria (2019)

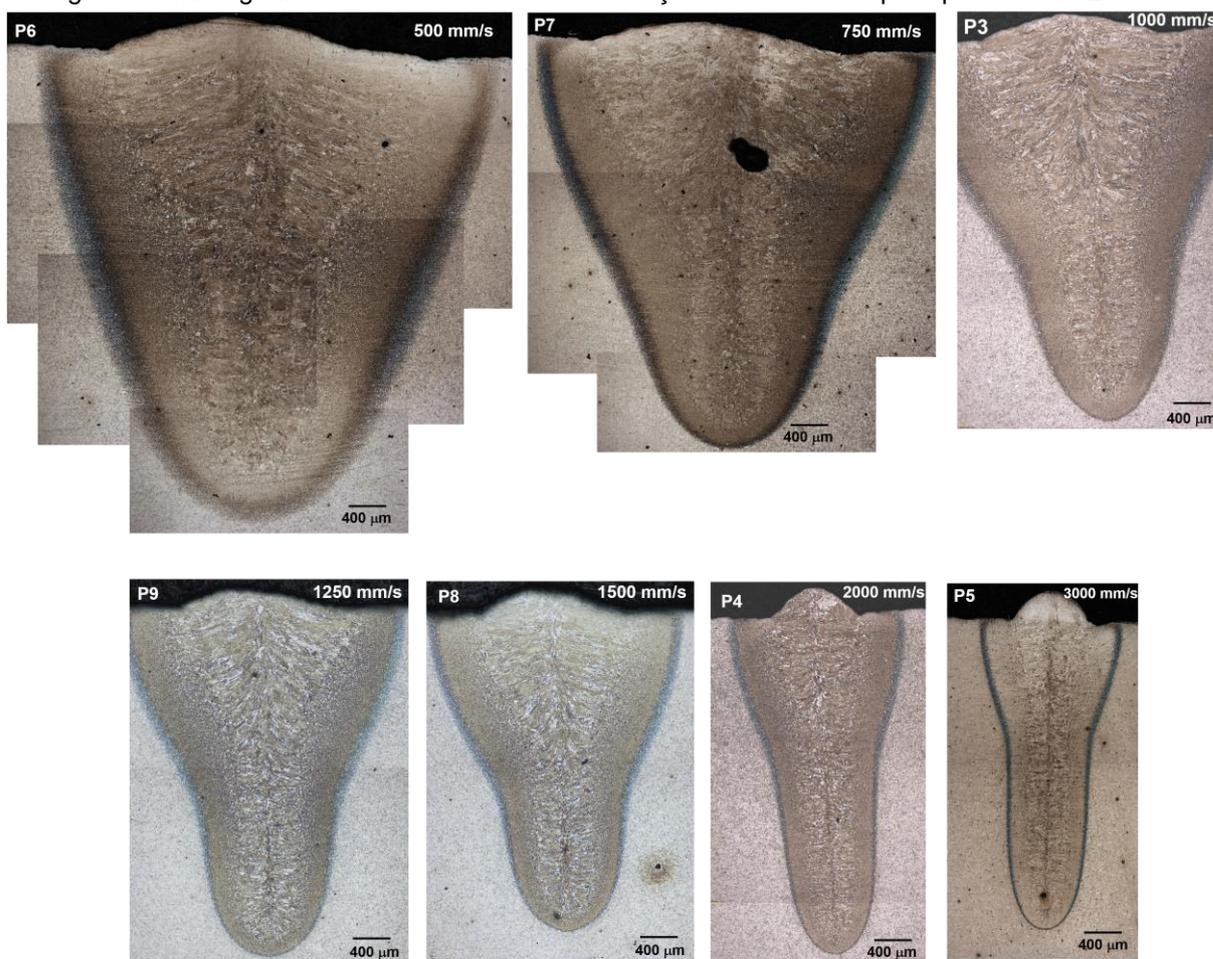
Conforme mostra a Figura 17, as micrografias foram organizadas em função da velocidade de varredura, realizadas com a mesma potência de 2000 W, onde é possível distinguir as regiões e interface características de cordões de solda, sendo a ZTA, ZF e MB (GEMELLI, 2001). A saliência observada nas micrografias da Figura 17 no centro do cordão de solda forma-se devido ao rápido resfriamento do cordão, associado com o fluxo de material fundido na poça de fusão que vai em direção ao centro (STEEN; MAZUMDER, 2010). Como não há tempo suficiente para que o metal se redistribua na superfície, a solidificação rápida gera uma protuberância. Conforme a velocidade de varredura aumenta, essa protuberância aumenta proporcionalmente, pois o tempo de resfriamento é menor.

Considerando-se a soldagem por condução e por *keyhole*, observa-se que o parâmetro com  $V$  500 mm/s é totalmente por condução. Segundo Silveira (2012), com baixas velocidades de soldagem o vapor gerado pela ação do feixe de laser entra em colapso, não permitindo que ocorram as múltiplas reflexões no interior da poça de fusão, o que é característico do processo *keyhole*, ocasionando a formação de bolhas.

Na Figura 17B é possível se observar uma bolha de aproximadamente 0,5 mm que se formou na poça de fusão. Em todos os parâmetros de soldagem a laser houve a formação de bolhas na ZF. Em alguns casos, como na Figura 17F, a formação de bolhas foi menor, porém para outros parâmetros, ocorreu em maior quantidade. Para

eliminar completamente a porosidade, é necessário que o parâmetro de laser que proporciona soldagem por *keyhole* promova o sangramento, ou seja, atravesse completamente a chapa a ser soldada para que o fluxo de gás de proteção na zona fundida eliminem os gases e vapores do processo pela parte inferior do cordão.

Figura 17: Micrografia dos cordões de solda em função da velocidade para potência de 2000 W



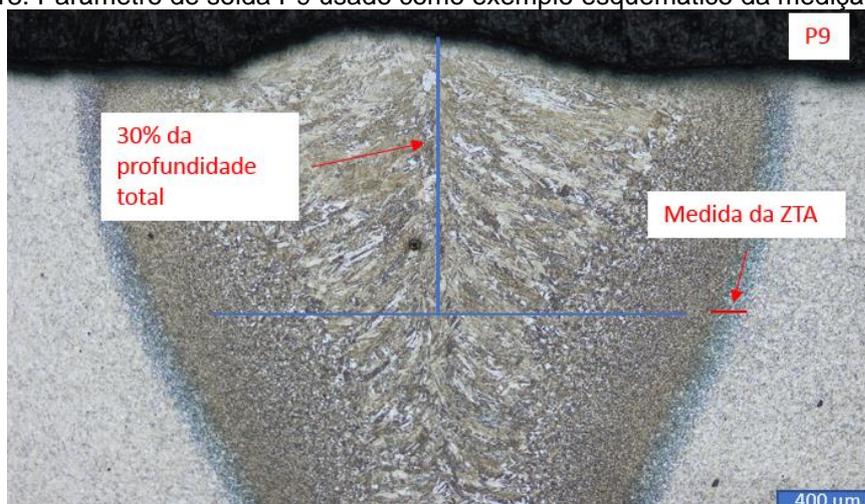
Fonte: Autoria própria (2019)

Conforme aumenta-se a velocidade, uma mudança no perfil da poça de fusão ocorre, ficando cada vez mais evidente que um processo o *keyhole* ocorre conforme a velocidade aumenta. Para os parâmetros analisados e apresentados na Figura 17, a maior penetração obtida foi utilizando V 500 mm/s, formando um cordão com profundidade de aproximadamente 5,2 mm e largura de 4,6 mm. Entretanto, como há formação de poros e bolhas, como evidenciado na micrografia da Figura 17B, que utiliza velocidade ligeiramente maior, pode-se obter um cordão com qualidade inferior com os parâmetros supracitados. Considerando-se a otimização do tempo de processo, e consequentemente os custos, o melhor parâmetro para obtenção de

cordões de profundidade elevada ocorre com velocidade acima de 1000 mm/s, o que gera cordões com largura mais estreita, conforme a velocidade aumenta.

Observa-se na Figura 17 que quanto menor a velocidade de varredura do feixe de laser, mais largo o cordão de solda. Isso ocorre porque o tempo de interação é o parâmetro principal que dita a temperatura máxima atingida na superfície do metal, pois os demais parâmetros como potência e diâmetro do feixe de laser foram mantidos constantes. Quanto mais lenta a velocidade de varredura, maior o tempo de interação, o que faz com que a largura do cordão aumente consideravelmente. Observa-se também que as dimensões da ZTA variam. A medição da ZTA foi realizada para cada parâmetro estudado, considerando-se uma distância da superfície de 30% da profundidade total do cordão de solda, traçando-se uma linha na horizontal e medindo-se a ZTA, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18: Parâmetro de solda P9 usado como exemplo esquemático da medição na ZTA



Fonte: Autoria própria (2019)

As medidas auferidas para cada parâmetro de soldagem são indicadas na Tabela 4. Quanto maior a velocidade de varredura, menor a largura da ZTA. Considerando-se apenas os cordões realizados com potência de 2000W, a diferença entre a menor velocidade (750 mm/s) e a maior (3000 mm/s) a variação da ZTA foi de 51%, ou seja, para uma velocidade quatro vezes maior, a largura da ZTA é a metade. Considerando-se a energia de soldagem entre os parâmetros P7 (2,67 J) e P5 (0,67), a proporção é a mesma, sendo quatro vezes maior a energia no P7 e a largura da ZTA é duas vezes maior.

Tabela 4: Parâmetros de soldagem, largura da ZTA, largura e profundidade do cordão de solda

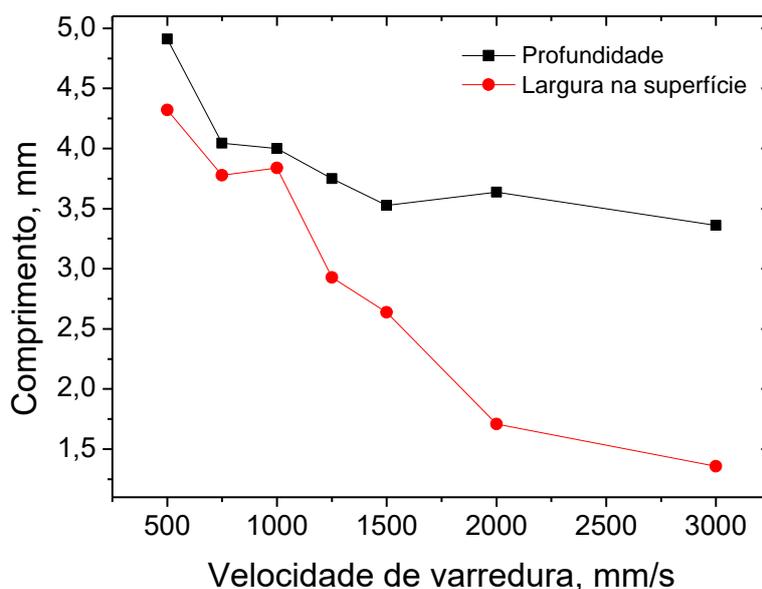
Parâmetros	P1	P2	P7	P3	P9	P8	P4	P5
Potência (W)	1500	1500	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Velocidade (mm/s)	3000	1000	750	1000	1250	1500	2000	3000
Aporte térmico (J/mm)	0,50	1,50	2,67	2,00	1,60	1,33	1,00	0,67
Largura ZTA ( $\mu\text{m}$ )	56	138	185	161	146	138	121	95
Largura cordão ( $\mu\text{m}$ )	1191	3030	3777	~3738	2926	2636	1709	1357
Profundidade cordão ( $\mu\text{m}$ )	3100	3360	4040	4000	3748	3526	3636	3360

Fonte: Autoria própria (2019)

O mesmo aumento da largura da ZTA ocorre com o aumento da potência, pois para a mesma velocidade, comparando-se os parâmetros P1 (56  $\mu\text{m}$ ) e P5 (95  $\mu\text{m}$ ) há aumento de 60% e para P2 (138  $\mu\text{m}$ ) e P3 (161  $\mu\text{m}$ ) há aumento de 85%.

A partir das micrografias apresentadas na Figura 17 foram realizadas medições da largura e profundidade de todos os cordões de solda e esses resultados foram representados graficamente na Figura 19. Observa-se o efeito que a velocidade de varredura se apresenta nas duas dimensões, sendo que quanto maior a velocidade menor a largura medida na superfície e maior a profundidade. Para a profundidade há uma tendência de estabilização acima de 1500 mm/s e as variações são resultado da formação da crista do cordão de solda.

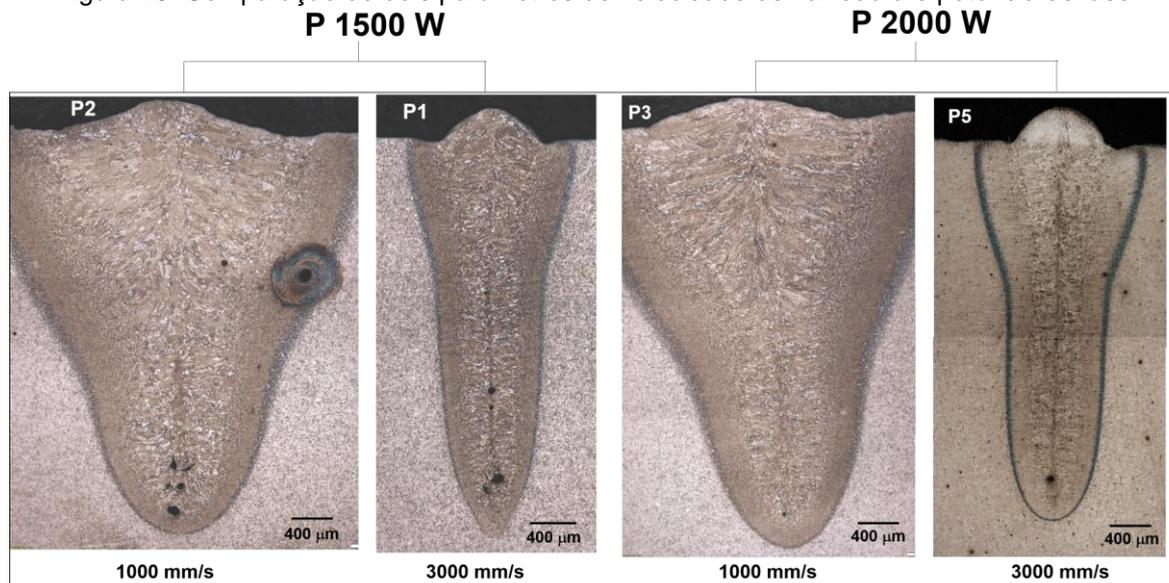
Figura 19: Velocidade da soldagem em função da profundidade e da largura do cordão de solda, para potência de 2000 W



Fonte: Autoria própria (2019)

A Figura 20 mostra a influência da potência do feixe de laser e da velocidade de varredura para os parâmetros de velocidade indicados.

Figura 20: Comparação de dois parâmetros de velocidade de varredura e potência de laser



Fonte: A autoria própria (2019)

Observa-se na Figura 20, que quanto maior a potência, mais profundo o cordão de solda. A Tabela 5 faz uma compilação dos parâmetros de processo e a largura e profundidade dos cordões. Observa-se que há cerca de 19% a mais de profundidade para o parâmetro P2 em relação a P3 e 7,7% a mais de P1 em relação a P5. Já a largura do cordão não se altera pronunciadamente para solda que ocorre com *keyhole*. Entretanto, na solda por condução a largura também aumenta consideravelmente com o aumento da potência, aproximadamente 27% de P2 para P3.

Tabela 5: Parâmetros de laser em função da profundidade e largura do cordão de solda

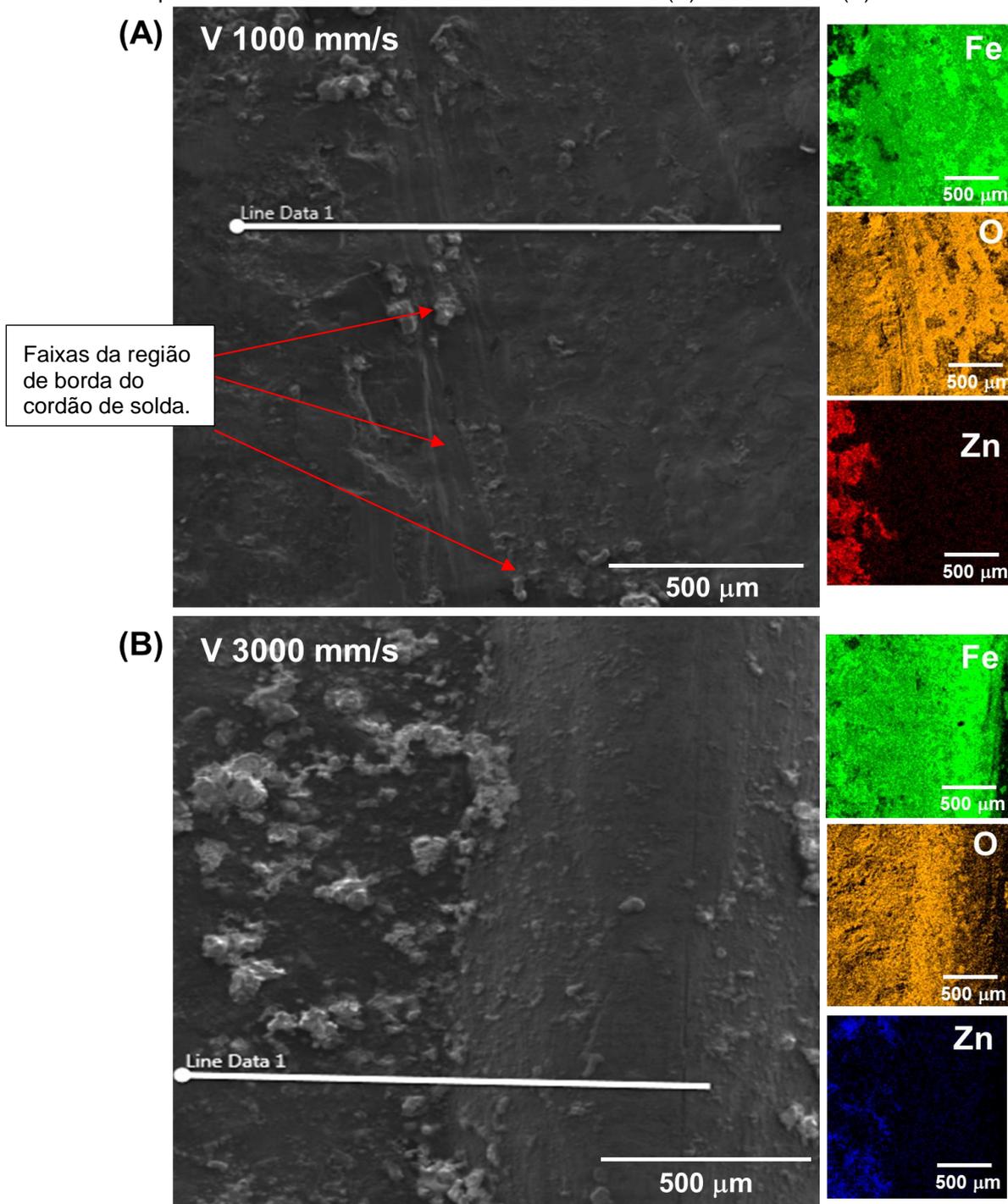
Parâmetros	P1	P2	P3	P5
Potência (W)	1500	1500	2000	2000
Velocidade (mm/s)	3000	1000	1000	3000
Aporte Térmico (J/mm)	0,50	1,50	2,00	0,67
Largura (µm)	1,19	3,03	3,84	1,39
Profundidade (µm)	3,10	3,36	4,00	3,36

Fonte: A autoria própria (2019)

Em relação a superfície dos cordões de solda, foram realizadas imagens utilizando MEV e mapeamento de elementos químicos. Análises de EDS em linha

foram realizadas a partir do centro do cordão de solda até o metal base. Foi verificada a composição química e os aspectos morfológicos dos cordões de solda realizados com  $V$  1000 e 3000 mm/s, com  $P$  1500 W. A Figura 21 mostra a micrografia e o mapeamento de EDS dos elementos mais significativos.

Figura 21: Micrografia e mapeamento de elementos para os cordões de solda realizados com potência de 1500 W e velocidade de varredura de (A) 1000 mm/s e (B) 3000 mm/s

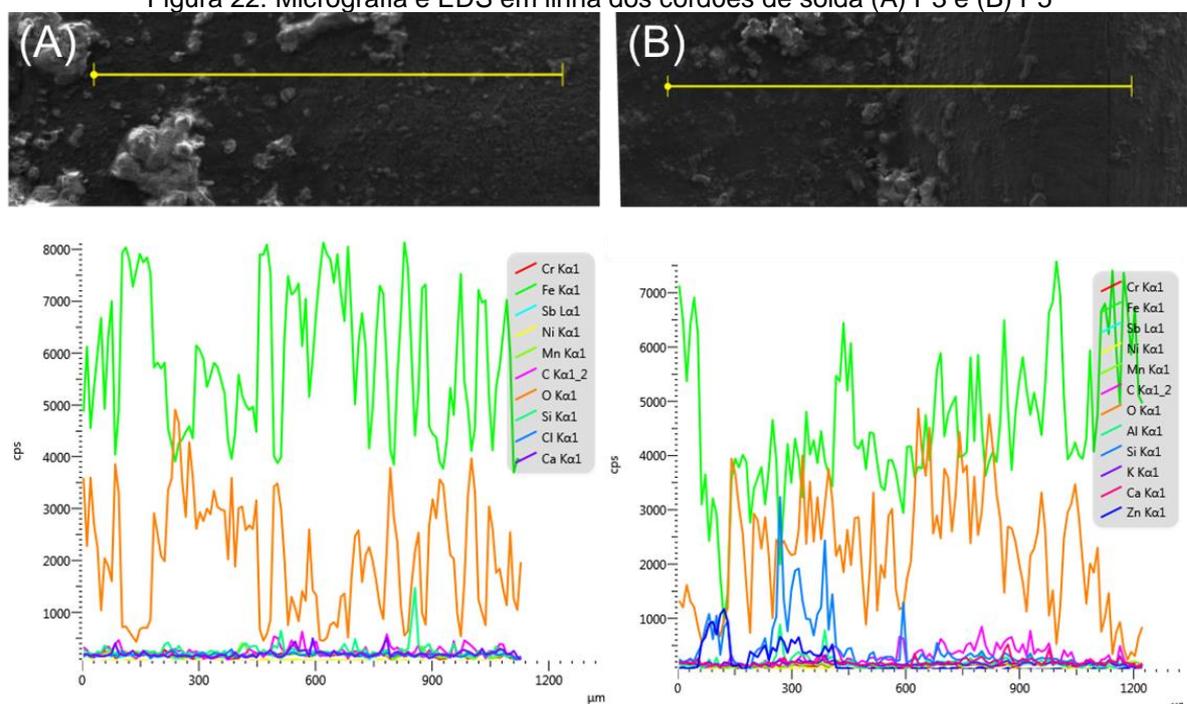


Fonte: Autoria própria (2019)

Como o cordão de solda da Figura 21A é mais largo, a micrografia apresentada parte do cordão de solda e no lado esquerdo está o metal base. Observa-se que há no metal base resquícios do elemento zinco, que não faz parte da composição química da liga em estudo. Desta forma, o zinco é um revestimento de proteção contra corrosão, presente no material na condição como recebido. Segundo Braz (2018) a soldagem a laser gera a evaporação parcial de revestimento de zinco em aço DP 600, sendo a evaporação uma função inversa da velocidade de varredura. Observa-se nos dois cordões de solda uma oxidação generalizada, tanto na superfície do metal base quanto no cordão de solda. O elemento ferro aparece distribuído uniformemente em todo o metal base e no cordão de solda, indicando que não houve segregação devido a soldagem.

As análises de EDS em linha são mostradas na Figura 22. Observa-se que oxigênio e ferro são os elementos com maior contagem e estão distribuídos em toda a superfície, tanto para P3 como para P5.

Figura 22: Micrografia e EDS em linha dos cordões de solda (A) P3 e (B) P5



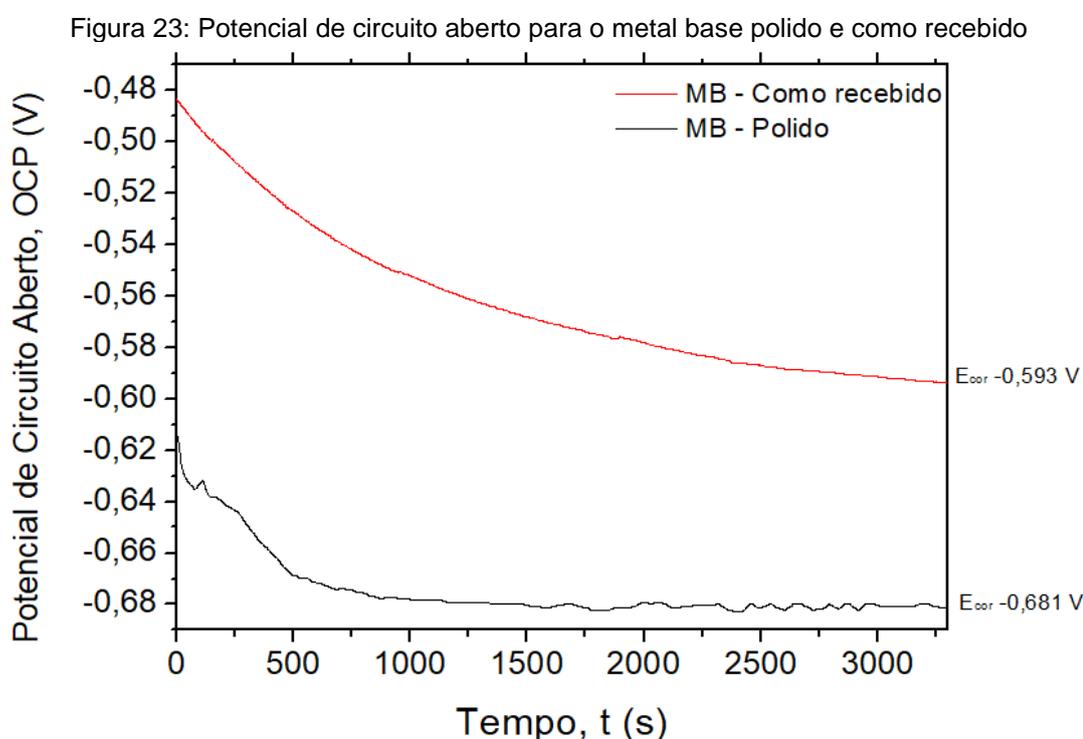
Fonte: Autoria própria (2019)

Silício e zinco também apresentam contagem mais elevada que os demais elementos, compondo uma escória formada nas bordas do cordão de solda.

## 4.2 ENSAIOS DE CORROSÃO

### 4.2.1 Ensaios Potencial de Circuito Aberto

Os ensaios de corrosão foram realizados para o material base (MB) na condição como recebido e na condição lixado (600#) logo antes do início do ensaio. A Figura 23 mostra a comparação do potencial de circuito aberto (OCP) para esses dois materiais.



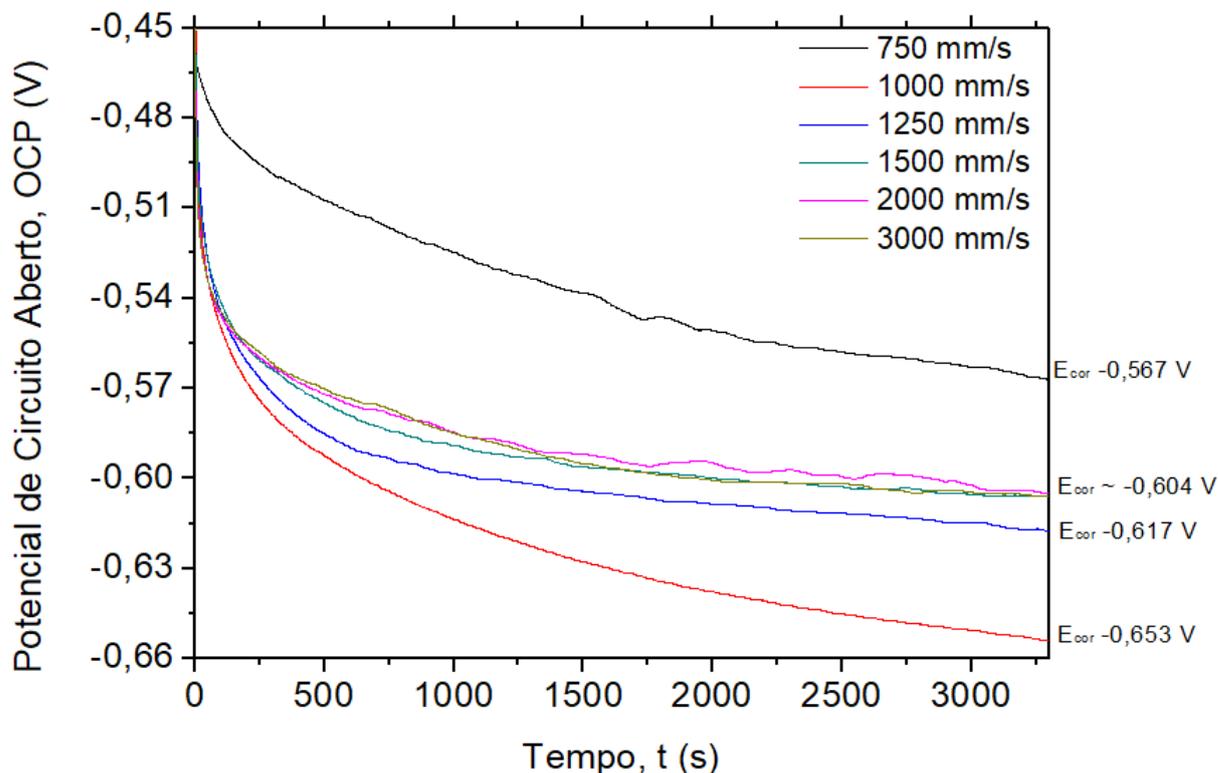
Fonte: Autoria própria(2019)

Observa-se uma diferença significativa da influência do polimento na superfície do material, alterando o potencial de corrosão  $E_{cor}$ , que é o valor medido ao final do ensaio, de -0,681 V para -0,593 V. Isso indica que o polimento removeu uma camada da superfície que atua como barreira de corrosão, pois quanto mais negativo o  $E_{cor}$ , maior a sua tendência a oxidação. Essa camada é formada pelo zinco, observado na análise de EDS (Figura 21).

Como a soldagem foi realizada no material na condição como recebido verificou-se qual a efetividade da barreira após a realização da soldagem. No gráfico

da Figura 24 são mostrados os resultados de OCP e  $E_{cor}$  para os diferentes parâmetros de soldagem.

Figura 24: Potencial de circuito aberto para as diferentes velocidades de varredura do laser com potência de 2000 W



Fonte: Autoria própria (2019)

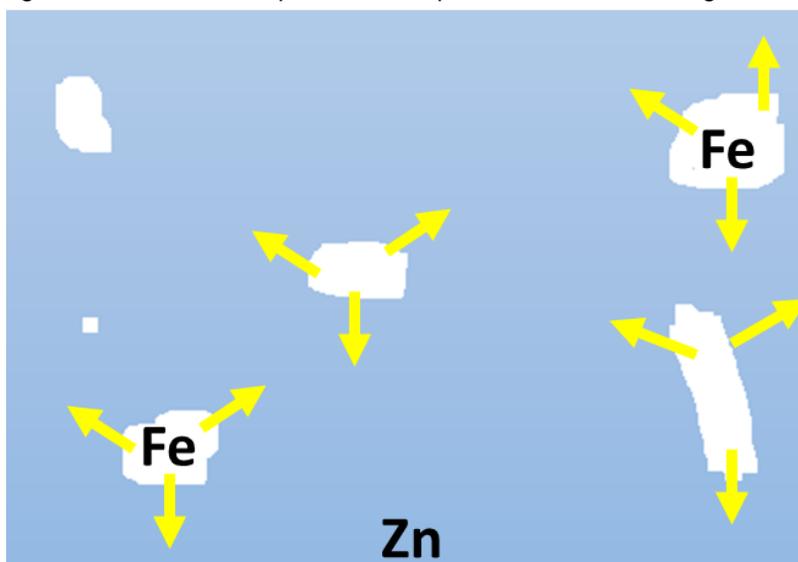
Observa-se que o potencial de corrosão mais negativo de -0,653 V foi obtido para o material soldado com velocidade de 1000 mm/s e o potencial mais positivo de -0,567 V para a soldagem realizada com V 750 mm/s. Os outros parâmetros foram similares, ficando em torno de -0,604 V, que é um valor próximo ao MB como recebido (-0,593 V).

O MB polido, MB como recebido e todos os parâmetros de soldagem a laser iniciam, em geral, com potencial na ordem de - 0,40 V, variando conforme atraso no início da medição do potencial após imersão do eletrodo de trabalho na solução. Para todos os casos, logo após a imersão na solução há uma redução gradual do potencial que corresponde ao tempo para estabelecimento de equilíbrio entre as reações de redução e oxidação. No caso do MB polido, o potencial reduz-se para - 0,60 V após 500 segundos, estabilizando-se até o final do ensaio com  $E_{cor}$  -0,63 V.

Comparando-se as Figura 23 e Figura 24, o MB como recebido mostra um comportamento semelhante aos diferentes parâmetros de soldagem a laser, com o potencial decaindo em função do tempo até o final do ensaio, o que indica que não há uma estabilização total da superfície em 55 minutos de imersão. Já o MB polido estabiliza o  $E_{cor}$  em torno de 750 s após imersão.

A falta de correlação direta entre a velocidade de soldagem e o  $E_{cor}$  pode ser explicada em termos da integridade ou homogeneidade da superfície do MB na condição como recebida. Conforme foi mostrado nas micrografias e mapeamento por MEV/EDS, o revestimento de zinco está presente no metal base. Entretanto, se houverem defeitos no revestimento, como mostra o esquemático da Figura 25, ocorre a formação de uma pilha galvânica.

Figura 25: Desenho esquemático do processo de corrosão galvânica

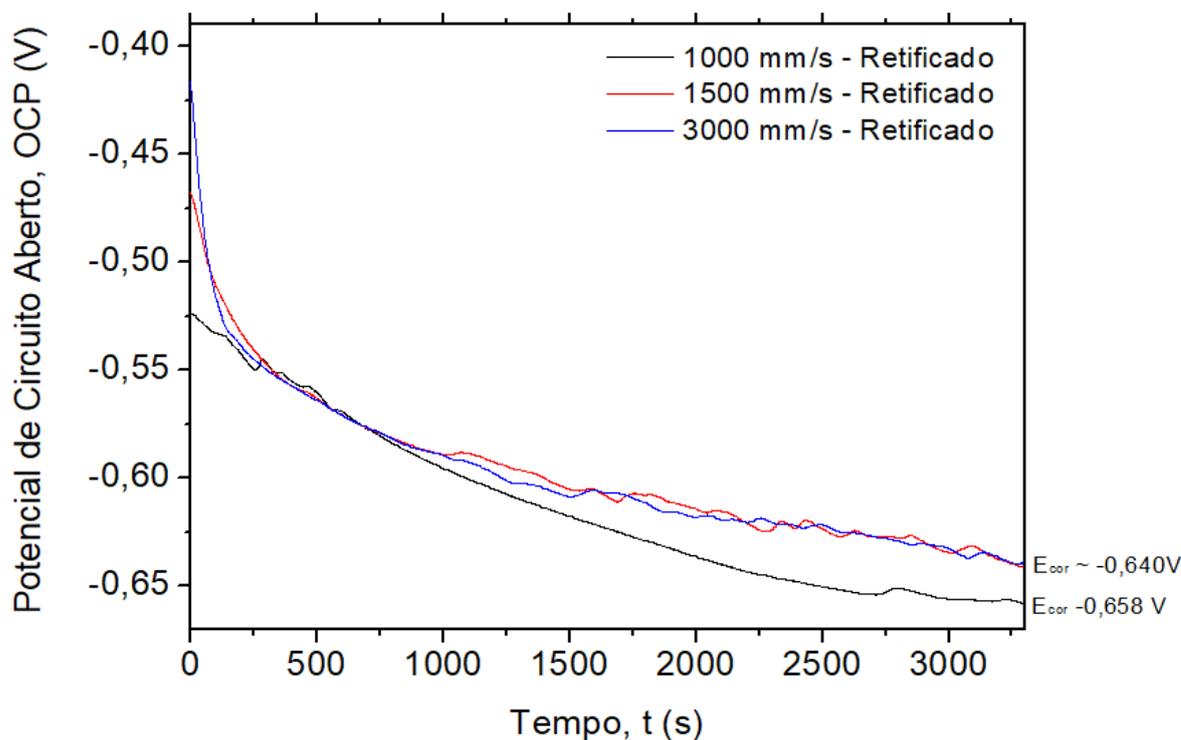


Fonte: Autoria própria (2019)

A pilha galvânica potencializa o processo de oxidação do zinco, que é o metal com maior potencial de corrosão em relação ao principal elemento de liga do aço DOMEX 700 MC, que é o ferro. Como não há controle em relação aos defeitos da superfície em cada um dos diferentes parâmetros de soldagem, foi necessário verificar influência da presença do cordão de solda na resistência a corrosão do aço, sem a presença do revestimento de zinco. Para isso as amostras com o cordão de solda foram retificadas até a remoção completa da camada de zinco presente no MB como recebido. Os ensaios de OCP foram realizados para as amostras retificadas e

soldadas com velocidades de 1000, 1500 e 3000 mm/s, com potência de 2000 W. A Figura 26 mostra os resultados do OCP.

Figura 26: Potencial de circuito aberto para as diferentes velocidades de varredura do laser com potência de 2000 W, após retificação da superfície

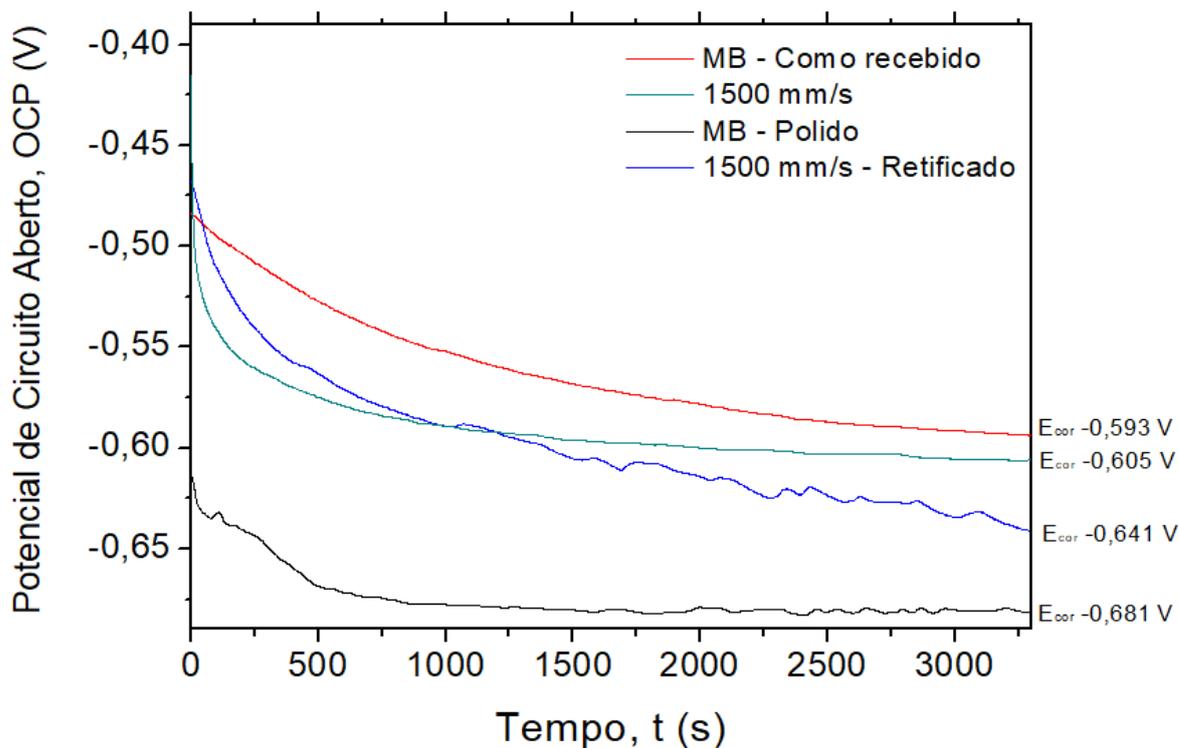


Fonte: Autoria própria(2019)

Com a remoção completa do revestimento de zinco pelo processo de retificação, observa-se que quanto mais lenta a velocidade de varredura, mais negativo o  $E_{cor}$ . A extensão das alterações microestruturais na superfície do cordão de solda são maiores para parâmetros de velocidade mais baixa, conforme foi mostrado na seção 4.1. Dessa forma, o material é mais susceptível aos processos corrosivos do aço conforme a velocidade de varredura diminui. O  $E_{cor}$  para o MB polido foi de -0,681 V e para o parâmetro V 1000 mm/s foi de -0,658, mostrando que a presença do cordão de solda é de fato positiva para o  $E_{cor}$ , pois quanto mais positivo, menor a susceptibilidade à corrosão.

A Figura 27 mostra o comportamento do OCP do parâmetro de velocidade 1500 mm/s com a camada de zinco na superfície e sem essa camada, após o processo de retificação. Essa figura é representativa, pois os outros parâmetros quando comparados, seguem o mesmo comportamento.

Figura 27: Potencial de circuito aberto para velocidades de varredura do laser 1500 mm/s com potência de 2000 W e MB em duas condições



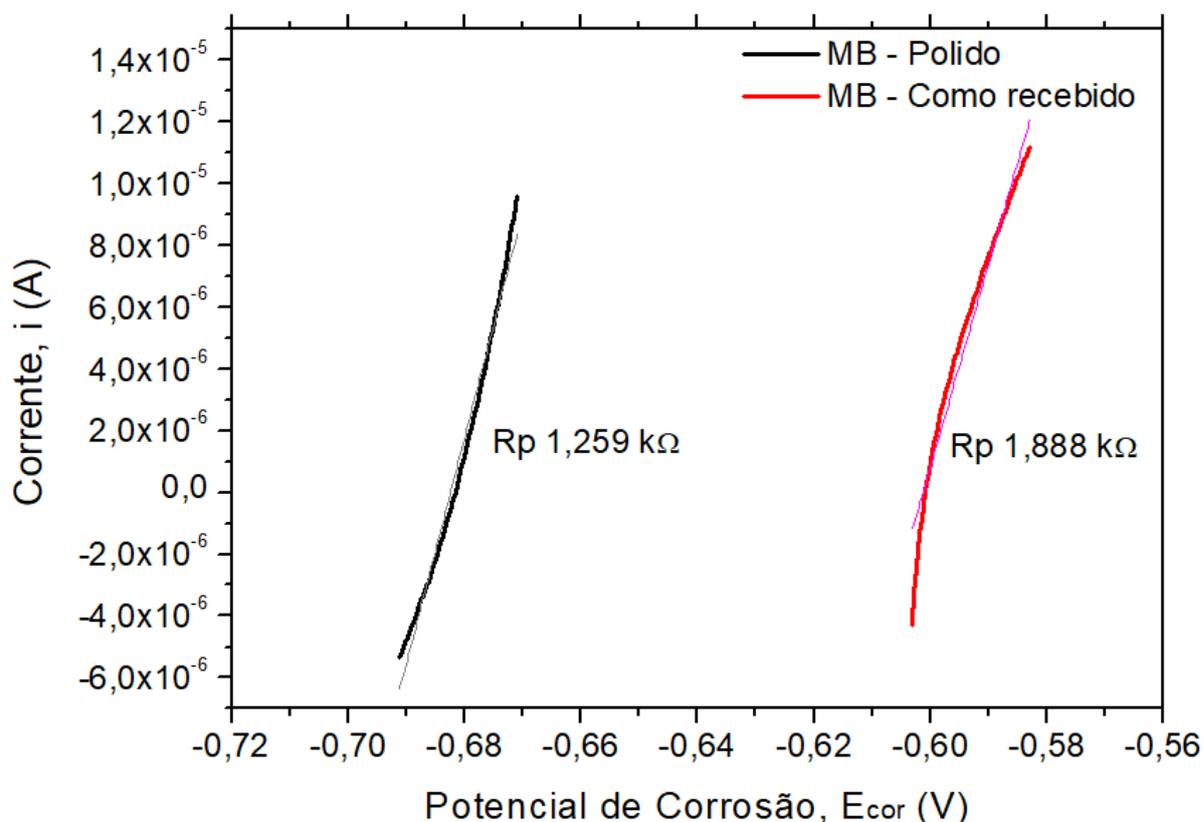
Fonte: Autoria própria (2019)

Observa-se que o comportamento do cordão de solda retificado é similar ao MB polido, com oscilações na curva de OCP e o  $E_{cor}$  foi de -0,641 V. Já o cordão de solda realizado no material como recebido observa-se um valor de  $E_{cor}$  de -0,605 V. Isso indica que mesmo com a presença do cordão de solda e com a remoção parcial do zinco por evaporação durante o processo de soldagem, o material continua com  $E_{cor}$  mais positivo do que o próprio metal base polido.

#### 4.2.2 Micropolarização

Após a medição do  $E_{cor}$ , realizou-se a micropolarização dos eletrodos, onde foi aplicada uma varredura de potencial de  $\pm 10\text{mV}$  em torno do  $E_{cor}$ . A Figura 28 mostra as curvas de polarização obtidas, para o metal base polido e como recebido. Quanto maior for a variação de corrente medida para a varredura do potencial, menor é a resistência de polarização ( $R_p$ ) do material, conforme a lei de Ohm (OLIVEIRA, 2012). Também são indicadas as curvas de ajuste linear utilizadas para estimar a  $R_p$ , que é indicada na Figura 28.

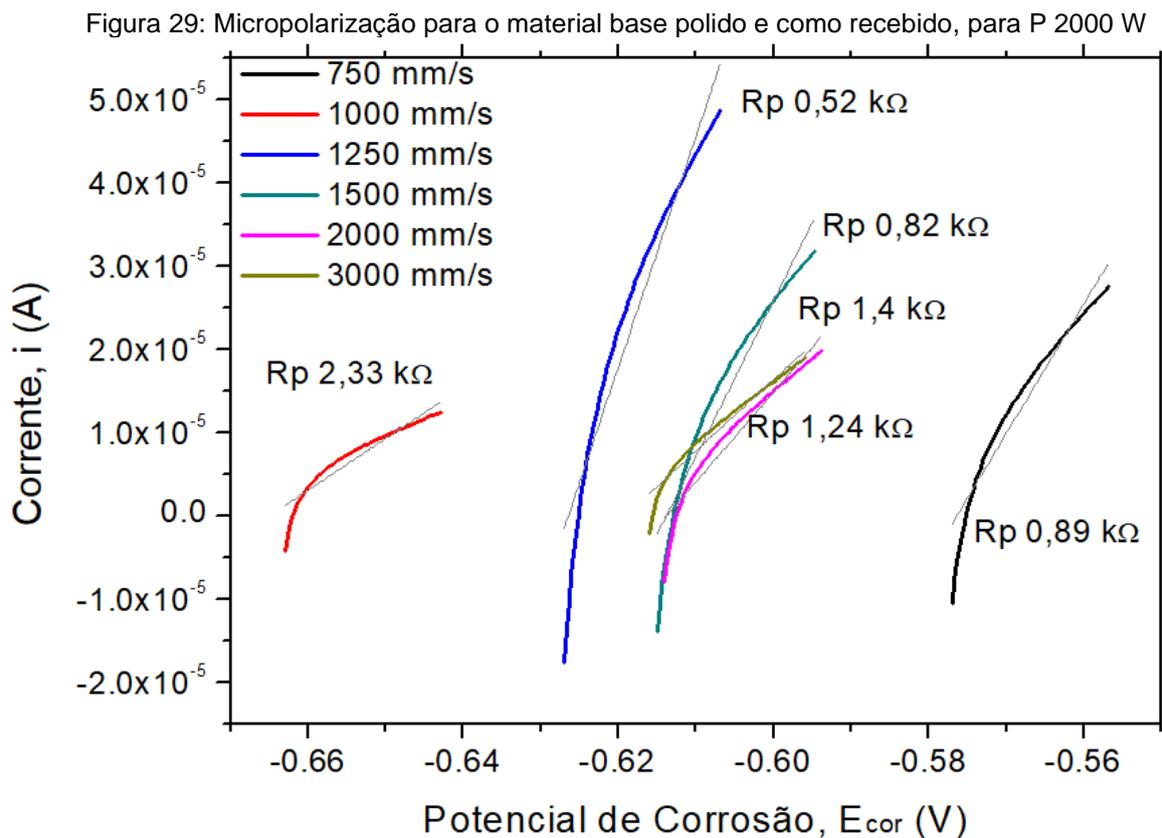
Figura 28: Micropolarização para o material base polido e como recebido



Fonte: Autoria própria (2019)

A  $R_p$  do MB polido foi menor que a  $R_p$  do MB como recebido, pois a camada de zinco atua aumentando a resistência de polarização do metal. A diferença entre o metal base polido e metal base como recebido é grande, pois o metal polido, além de possuir  $E_{cor}$  mais negativo, possui menor  $R_p$ , apresentando 1259  $\Omega$  contra 1855  $\Omega$  para o material como recebido. Isso indica que o processo de polimento removeu camadas da superfície que atuam com protetores de corrosão. Embora o processo de oxidação do ferro não seja passivador, a mudança para valores mais negativos indica a redução de sua capacidade de resistência a corrosão.

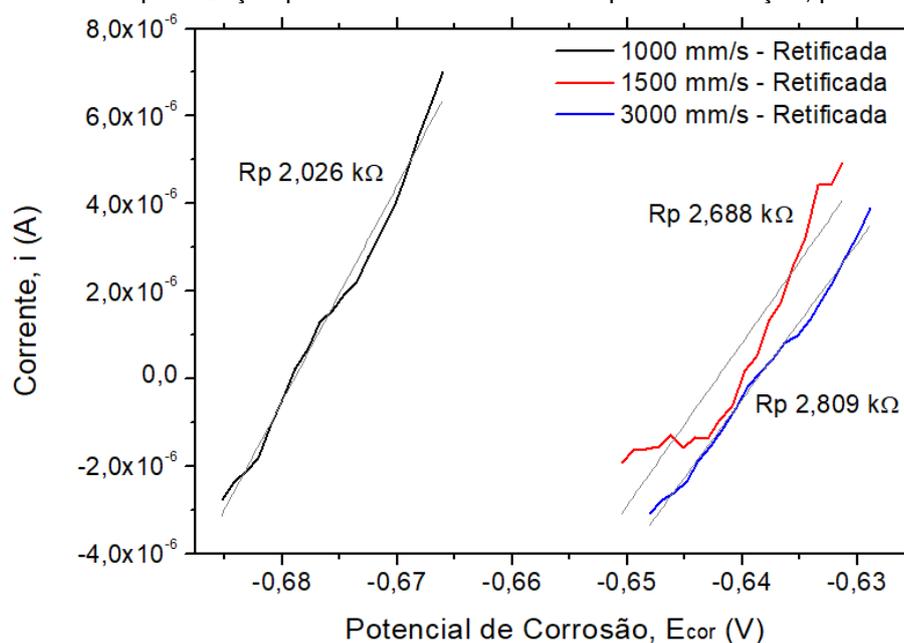
Para os parâmetros de soldagem a laser, a  $R_p$  não apresenta correlação direta com os parâmetros de velocidade de varredura do feixe laser pelos mesmos motivos já explanados para os resultados de  $E_{cor}$ , como pode ser visto na Figura 29.



Observa-se que a  $R_p$  dos cordões obtidos com  $V$  1250, 750 e 1500 mm/s, se destacam por possuir grande inclinação na curva de micropolarização, o que indica menor  $R_p$ . Para os cordões obtidos com  $V$  3000 e 2000 mm/s houve uma aproximação da posição e inclinações das retas de micropolarização. O maior valor de  $R_p$  (2,332 k $\Omega$ ) foi observado para o cordão realizado com  $V$  1000 mm/s. Embora este parâmetro tenha o  $E_{cor}$  reduzido a valores próximos do metal base polido, sua resistência a polarização foi o maior valor encontrado para estes ensaios.

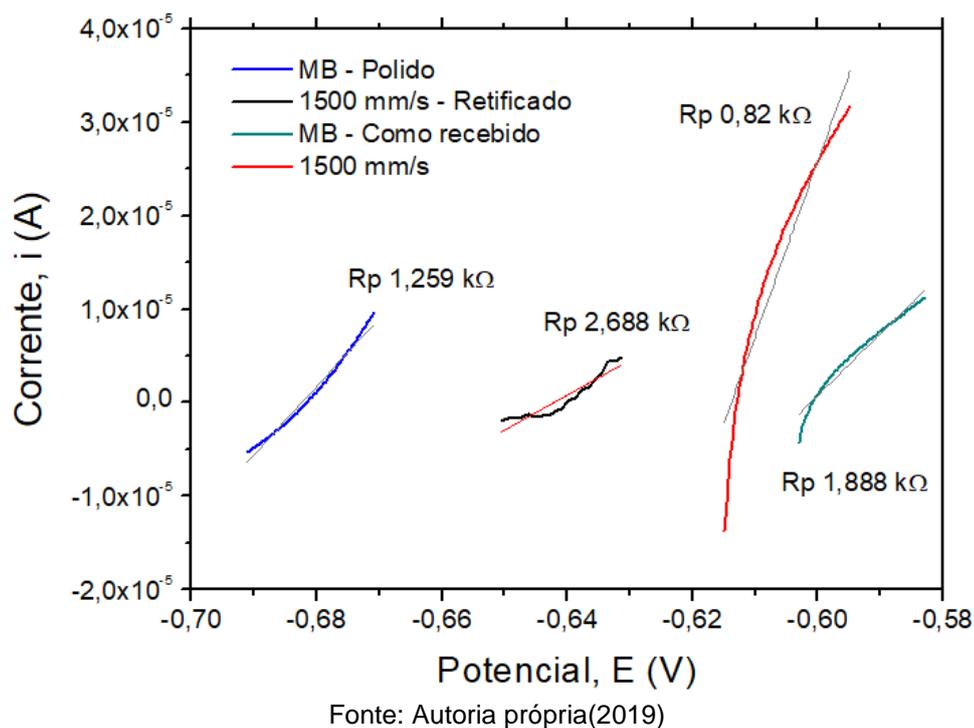
A Figura 30 mostra uma comparação dos valores de  $R_p$  e os gráficos de micropolarização para os cordões retificados, ou seja, sem revestimento de zinco.

Figura 30: Micropolarização para os cordões de solda após a retificação, para P 2000 W



Com a remoção completa do revestimento de zinco pelo processo de retificação, observa-se que quanto mais lenta a velocidade de varredura, menor a resistência de polarização.

Figura 31 Micropolarização para velocidades de varredura do laser 1500 mm/s com potência de 2000 W e MB em duas condições

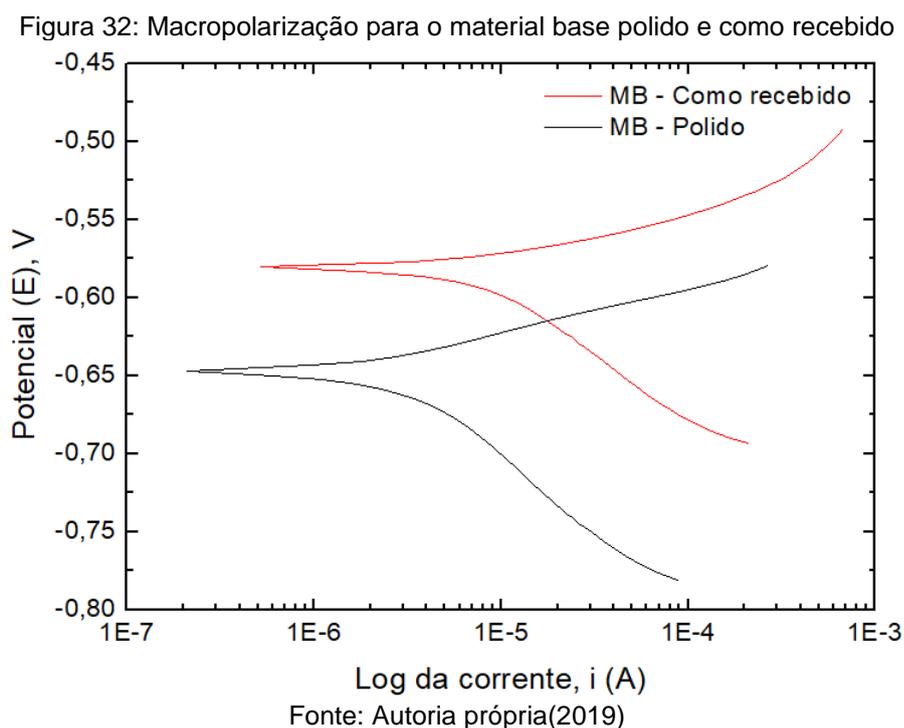


A Figura 31 mostra o comportamento da micropolarização do parâmetro de velocidade 1500 mm/s com a camada de zinco na superfície e sem essa camada, após o processo de retificação.

Observa-se que o comportamento do cordão de solda retificado tem  $R_p$  maior do que o MB polido. Já o cordão de solda realizado no material como recebido apresenta uma redução significativa quanto comparado ao MB como recebido. Isso indica que a presença do cordão de solda no material como recebido e a remoção parcial do zinco por evaporação durante o processo de soldagem piorou a  $R_p$  do material, que inclusive é menor que para o MB polido.

#### 4.2.3 Macropolarização

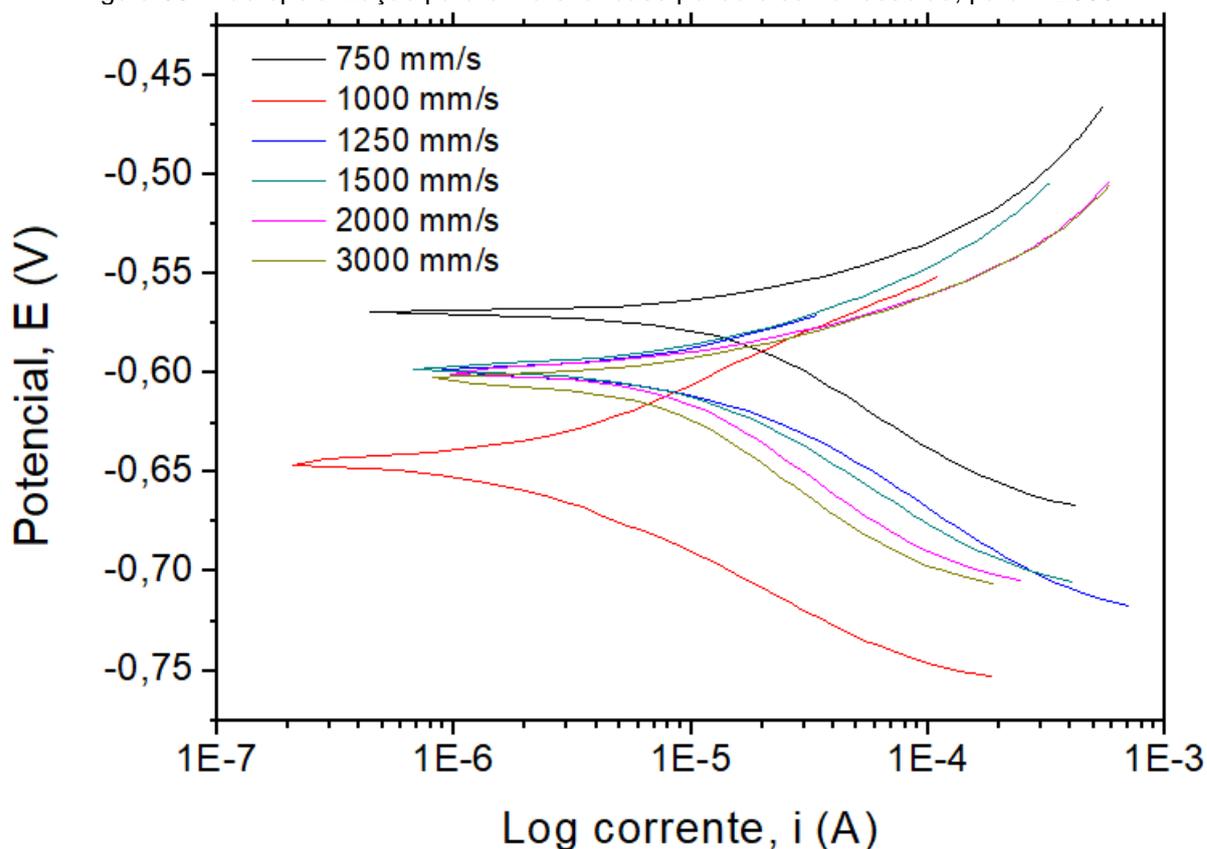
A macropolarização é semelhante a micro, mas a variação de potencial em torno do  $E_{cor}$  é de  $\pm 100$  mV. A Figura 32 mostra as curvas de polarização obtidas, considerando-se o metal base polido e como recebido. Não são observados domínios de passivação no braço anódico, ou seja, nenhum patamar é observado no braço da parte superior da curva. A ausência de um patamar indica que tipo de corrosão é uniforme, não havendo indícios de corrosão localizada, como pites, por exemplo (ZHANG et al., 2018).



A corrente de corrosão  $i_{cor}$  do material base polido foi  $2,04 \times 10^{-7}$  A, o que é menor que a  $i_{cor}$  do material como recebido de  $5,33 \times 10^{-7}$  A, pois a camada de zinco atua aumentando a resistência de polarização do metal e consequentemente a  $i_{cor}$ .

Para os parâmetros de soldagem a laser, a  $i_{cor}$  não apresenta correlação direta com os parâmetros de velocidade de varredura do feixe laser.

Figura 33: Macropolarização para o material base polido e como recebido, para P 2000 W



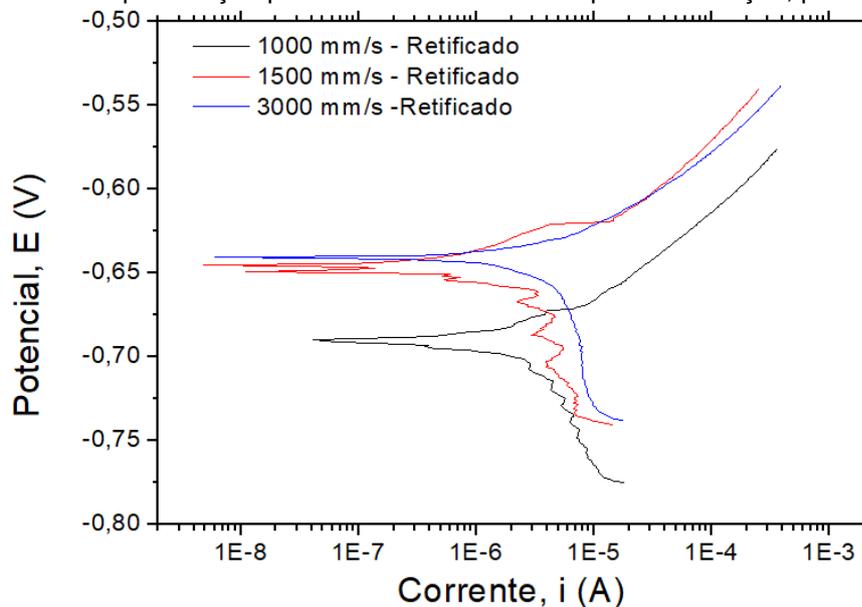
Fonte: Autoria própria (2019)

O cordão realizado com  $V$  1000 mm/s apresenta  $i_{cor}$  intermediário, com  $4,4 \times 10^{-7}$  A. Esse valor é intermediário entre os parâmetros  $V$  3000 ( $2,1 \times 10^{-7}$  A) e os demais, que se assemelham e que tem  $i_{cor}$  aproximadamente de  $7,9 \times 10^{-7}$  A. A Figura 34 mostra uma comparação da macropolarização para os parâmetros de  $V$  1000, 1500 e 3000 mm/s após a retificação.

Com a remoção completa do revestimento de zinco pelo processo de retificação, observa-se que para os parâmetros  $V$  3000 e 1500 mm/s não há grande diferença no  $i_{cor}$ , ficando ambos com aproximadamente  $5,7 \times 10^{-9}$  A. Já o parâmetro mais lento de velocidade, 1000 mm/s apresenta maior a corrente de corrosão, com  $4,36 \times 10^{-8}$  A. Esses resultados apresentam corrente menor que todos os outros

parâmetros apresentados anteriormente, indicando que a presença do cordão de solda atua melhorando a  $I_{cor}$ .

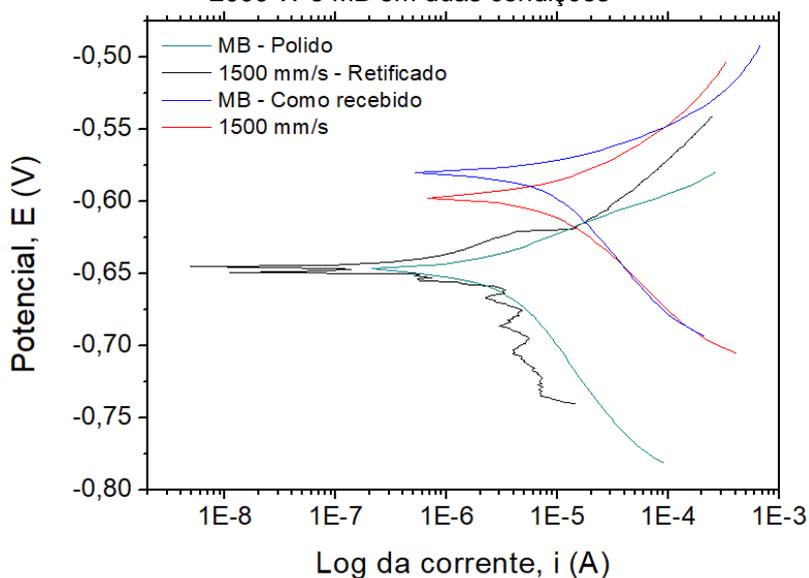
Figura 34: Macropolarização para os cordões de solda após a retificação, para P 2000 W



Fonte: Autoria própria (2019)

A Figura 35 mostra o comportamento da macropolarização do parâmetro de velocidade 1500 mm/s com a camada de zinco na superfície e sem essa camada, após o processo de retificação.

Figura 35: Macropolarização para velocidades de varredura do laser 1500 mm/s com potência de 2000 W e MB em duas condições



Fonte: Autoria própria (2019)

Observa-se que o comportamento do cordão de solda retificado tem um comportamento similar ao MB polido, mas com  $I_{cor}$  deslocada para valores mais positivos. Já o cordão de solda realizado no material como recebido é similar ao MB como recebido.

#### 4.2.4 Taxa de Corrosão

Com os dados dos ensaios de corrosão foi possível obter parâmetros eletroquímicos necessários para calcular a taxa de corrosão em milímetros por ano. Na Tabela 6 pode-se observar que os parâmetros para o MB na condição como recebido e para os parâmetros de soldagem laser realizados.

Tabela 6: Parâmetros eletroquímicos para MB como recebido e parâmetros de laser

Parâmetro	P (W)	V (mm/s)	$E_{cor}$ (V)	$\beta_c$ (V/dec)	$\beta_a$ (V/dec)	Rp (k $\Omega$ )	$I_{cor}$ (A)	Taxa de corrosão (mm/ano)
MB – Como recebido			-0,70	0,046	0,032	2,771	$2,9 \times 10^{-6}$	0,040
P7	2000	750	-0,57	0,075	0,045	0,8921	$1,4 \times 10^{-5}$	0,202
P3	2000	1000	-0,65	0,059	0,055	2,332	$1,3 \times 10^{-6}$	0,019
P9	2000	1250	-0,60	0,071	0,047	0,5267	$2,3 \times 10^{-5}$	0,344
P8	2000	1500	-0,60	0,074	0,043	0,8283	$8,2 \times 10^{-6}$	0,121
P4	2000	2000	-0,60	0,084	0,041	1,244	$9,6 \times 10^{-6}$	0,142
P5	2000	3000	-0,61	0,083	0,047	1,404	$1,3 \times 10^{-5}$	0,195
P2	1500	1000	-0,60	0,082	0,033	1,667	$6,1 \times 10^{-6}$	0,090
P1	1500	3000	-0,63	0,034	0,074	0,9516	$1,1 \times 10^{-5}$	0,157

Fonte: Autoria própria (2019)

Observa-se que o MB polido apresenta a menor taxa de corrosão, sendo 0,04 mm/ano. Isso se deve ao revestimento de zinco existente em sua superfície. Em relação aos parâmetros de laser, não há uma correlação direta com a taxa de corrosão, pois possíveis defeitos pré-existentes no revestimento tornam a comparação difícil. Entretanto, para os dados obtidos observa-se que o parâmetro de laser em que se obteve a taxa de corrosão mais próxima do material como recebido foi com o cordão de solda obtido com V 1000 mm/s e P 1500 W, onde a taxa de corrosão foi de 0,09 mm/ano.

Na Tabela 7 são mostrados comparativamente os parâmetros eletroquímicos obtidos para os cordões de solda antes e após a retificação, bem como para o metal base polido e como recebido.

Tabela 7: Parâmetros antes e depois da retificação

Parâmetros	P (W)	V (mm/s)	$E_{cor}$ (V)	$\beta_c$ (V/dec)	$\beta_a$ (V/dec)	Rp (k $\Omega$ )	$I_{cor}$ (A)	Taxa de corrosão (mm/ano)
MB – Como recebido			-0,70	0,046	0,032	2,771	$2,9 \times 10^{-6}$	0,040
MB- Polido			-0,59	0,090	0,042	1,855	$6,7 \times 10^{-6}$	0,100
P3-R	2000	1000	-0,66	0,016	0,012	2,2072	$1,4 \times 10^{-6}$	0,020
P3	2000	1000	-0,65	0,059	0,055	2,332	$1,3 \times 10^{-6}$	0,019
P8-R	2000	1500	-0,64	0,027	0,037	2,688	$2,5 \times 10^{-6}$	0,037
P8	2000	1500	-0,60	0,074	0,043	0,8283	$8,2 \times 10^{-6}$	0,121
P5-R	2000	3000	-0,64	0,439	0,047	2,8074	$6,6 \times 10^{-6}$	0,097
P5	2000	3000	-0,61	0,083	0,047	1,404	$1,3 \times 10^{-5}$	0,195

Fonte: Autoria própria(2019)

Observa-se que as menores taxa de corrosão ocorreram para a amostra que continha um cordão de solda, realizados com V 1000mm/s e P 2000 W no substrato como recebido, apresentando taxa de 0,019 mm/ano e para o cordão retificado, com taxa de 0,020 mm/ano.

O cordão com V 1500 mm/s e P 2000W teve a taxa de corrosão substancialmente reduzida após o processo de retificação, passando de 0,121 para 0,037 mm/ano. Isso indica que se a integridade do revestimento de zinco estiver comprometida, seja por manuseio e armazenamento incorreto, ou seja pela realização da soldagem, que gera um evaporação parcial do zinco, há piora na taxa de corrosão. Entretanto, a presença de um cordão de solda realizado por processo a laser pode aumentar a resistência a corrosão, pois todos os cordões retificados apresentam taxa de corrosão menor do que o metal base polido.

## 5 CONCLUSÕES

A soldagem a laser com os parâmetros estudados promoveu modificações microestruturais no material, formando martensita e grãos aciculares de ferrita na região de fusão e na ZTA há grãos de perlita. Foram formados cordões de solda com dimensões que são uma função do aporte térmico. Quanto maior o aporte térmico maior a ZTA, largura e profundidade do cordão de solda. Para velocidades de processamento e potência elevadas há menor formação de bolhas. Conforme aumenta-se a velocidade, há uma mudança no perfil da poça de fusão, onde o processo por *keyhole* passa a ocorrer.

A existência de cordões de solda realizados por soldagem a laser aumenta a taxa de corrosão do aço DOMEX 700 MC de 0,04 mm/ano para 0,1115 mm/ano, em média, quando este apresenta um revestimento de zinco, pois a ação do laser causa evaporação parcial do zinco, expondo o metal base de menor resistência à corrosão. Quando comparado ao metal base sem revestimentos (0,1 mm/ano), a presença do cordão de solda melhora a resistência à corrosão (0,051 mm/ano) devido às mudanças microestruturais causadas pelo processo, como refino de tamanho de grão e mudança de fases. Não houve formação de pites nas análises realizadas em solução de NaCl 3,5%, havendo corrosão homogênea.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios em meio  $H_2SO_4$  para comparar o comportamento de corrosão em meio ácido;
- Comparar e levantar as diferenças entre soldagem a laser e soldagem a arco elétrico, como MIG / MAG, arco submerso ou TIG;
- Realizar mais ensaios de corrosão para consolidar ainda mais as conclusões do presente trabalho;
- Estudar o fenômeno de *keyhole* para soldagem e união de chapas.

## REFERÊNCIAS

- A VOZ DA INDUSTRIA. **Como funciona a texturização de metais com solda a laser?** 2018. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/como-funciona-a-texturizacao-de-metais-com-laser/>>. Acesso em: 11 nov. 2018.
- ALBERTI, E. L. **Desenvolvimento de técnicas de diagnóstico da corrosão em pés de torres de linhas de transmissão, por meio de aplicação de técnicas eletroquímicas.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- AMERICA, A. M. **Laser welding (solda a laser)**, 2016. Disponível em: <<http://br.amadamiyachi.com/glossary/glosslaserwelding>>. Acesso em: 01 nov. 2018.
- ASTM E384-11. **Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, [www.astm.org](http://www.astm.org) Acessado em 10/11/2018.
- ASTM G59-97. **Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements**, 2009.
- BATALHA, G. F. **Processo de fabricação: Junção, Soldagem e Brasagem.** Apostila do curso de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da US, 2003.
- BORGES, G. C. **Estudo de corrosão de revestimento ferro/níquel/cromo em substrato de aço DOMEX 700.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- BORKO, K.; HADZIMA, B.; JACKOVÁ, M. N. **Corrosion Resistance Of Domex 700 Steel After Combined Surface Treatment In Chloride Environment.** Procedia engineering, v. 192, p. 58-63, 2017.
- BRAZ, W. C. **Estudo da resistência à corrosão da liga automobilística DP600 devido a soldagem a laser.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ir00661a&AN=roca.1.10205&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- CARVALHO, S. M. **Estudo da soldabilidade a laser e a TIG do titânio comercial puro grau 2 empregado em sistemas pneumáticos de aeronaves.** Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.
- FUKUMOTO, Y. **New constructional steel and structural stability.** Engineering Structures, v. 18, p. 786-791, Out., 1996.
- GEMELLI, E. **Corrosão de materiais e sua caracterização.** Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000000097&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>>. Acesso em: 27 de mai. 2019.

GIMENES, L. J.; RAMALHO, J. P.; **Soldagem a laser**. InfoSolda.com.br O portal brasileiro da soldagem. Disponível em: [https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos\\_solda/soldagem-laser.pdf](https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/soldagem-laser.pdf) Acessado em 08/12/2019.

INFOSOLDA. **Solda a laser: características do processo**. 2013. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/190-soldagem-a-laser>>. Acesso em: 01 nov. 2018.

INPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS: **Estudo de casos. Caso 035: E a Plataforma Virou – Mar do Norte (1980)**. <http://inspecaoequipto.blogspot.com/2013/09/caso-035-e-plataforma-virou-mar-do.html> Acessado em 16/09/2019

ION, J. C. **Laser Processing of Engineering Materials**. Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2005.

LIMA, J. B. S. **Sínteses e caracterizações de sílicas mesoporosas funcionalizadas para detecção eletroquímica de Cu<sup>2+</sup> em cachaça**. Dissertação. UFS, Sergipe, SE, Brasil, 2017.

MELO, M.; SOUSA, J. M.; BERENDT, M. O.; HENDOW, S. T.; SALCEDO, J. R. **Laser de fibra óptica de alta Potência: conceito, limitações e aplicações**. Revista Gazeta de Física, v. 34, n. 1, p. 22-28, Jan., 2011.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte, 2012. Apostila do curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG, 2012.

OLIVEIRA, A. R. **Corrosão e tratamento de superfície**, 2012. Disponível em: [http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo\\_ctrl\\_proc\\_indust/tec\\_metal/corr\\_trat\\_superf/161012\\_corr\\_trat\\_superf.pdf](http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/corr_trat_superf/161012_corr_trat_superf.pdf)>. Acesso em 24 jul. 2018.

PFEIFER, M. **Manufacturing Process Considerations**. Materials Enabled Designs, capítulo 5, p. 115-160, 2009.

PLANES. El láser de fibra: ¿qué es y qué ventajas aporta al corte de tubo? <https://ferroplanes.com/laser-fibra-ventajas/> Acessado em 30/11/2019

RODRIGUES, S. M. **Estudo do comportamento em fadiga de juntas soldadas de aços bifásicos de alta resistência mecânica**. FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL Escola de Engenharia, PPGE3M, 2012.

SABB. Inspection certificate en 10 204 – 3.1; **A02 Issuing department A05 Quality inspection**. Certificate no and date: 16836407.2017-09-29, 2015 a.

SILVEIRA, G. V. **Efeitos da alteração dos parâmetros do processo laser sobre a geometria do cordão de solda**. Universidade federal do Rio Grande do Sul, 2012. <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/66119/000870409.pdf?sequence=1>

SSAB TUNNPLAT, **Domex, gama de aços de alto limite elástico, laminados a quente**. SSAB Swedish Steel, Disponível em: <ssabdirect.com>, 2001. Acessado em 09/12/2019.

SSAB TUNNPLÂT. **Domex 700 mc hot rolled, extra high strength, cold forming steel**. Manual do aço estrutural Strenx® 700MC da Empresa SAAB, 2017.

SSAB. Strenx: the fastest route to efficient transport. **Trailer Design Guideline**, Confetti, Österbergs, v. 3, 2015 b.

STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. **Laser Material Processing**, 4° Ed. Nova York: Springer London Dordrecht Heidelberg, 2010.

TELEGINSKI, Viviane. **Resistência à corrosão e simulação numérica da temperatura e tensões induzidas na refusão superficial a laser da liga aero espacial Al-1,5% Fe**. 2012. Setor de ciências agrárias e de tecnologia. Universidade Estadual de Ponta Grossa.

TRUMPF. **Laser de Fibra, 2018 a**. Disponível em: <[https://www.trumpf.com/pt\\_BR/produtos/laser/laser-de-fibra/](https://www.trumpf.com/pt_BR/produtos/laser/laser-de-fibra/)>. Acesso em: 10 nov. 2018 a.

TRUMPF. **Laser de CO<sub>2</sub>, 2018 b**. Disponível em: <[https://www.trumpf.com/pt\\_BR/produtos/laser/laser-de-co2/](https://www.trumpf.com/pt_BR/produtos/laser/laser-de-co2/)>. Acesso em: 01 nov. 2018 b.

TZENG, Y. "**Process characterization of pulsed Nd:YAG laser seam welding**", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 16, n. 1, pp. 10-18, 2000.

VENTRELLA V. A. , BERRETTA J. R., ROSSI W. **Influência da Energia de Soldagem em Uniões de Lâminas Finas Através de Laser Pulsado de Nd:YAG**. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP, Departamento de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira-SP, Brasil. 2010.

VENTRELLA, V. A.; BERRETTA, J. R.; ROSSI, W. de. **Influência da energia de soldagem em uniões de lâminas finas através de laser pulsado de Nd:YAG**. Soldag. insp. (Impr.), São Paulo, v. 15, n. 4, p. 265-272, Dec., 2010.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

ZHANG, F. D. et al. Corrosion behavior of laser – claned aa7024 aluminium alloy. **Applied Surface Science**, v. 435, p. 452-461, 2018.

ZHANG, S.; SUN, J.; ZHU, M.; ZHANG, L.; NIE, P.; LI, Z. Fiber laser welding of HSLA steel by autogenous laser welding and autogenous laser welding with cold wire methods. **Journal of Materials Processing Technology**, January 2020.