

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LUIZA HAUSER NOVICKI

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM AÇO INOXIDÁVEL
DUPLEX AISI 318 PÓS SOLDAGEM TIG**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2019

LUIZA HAUSER NOVICKI

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM AÇO INOXIDÁVEL
DUPLEX AISI 316 PÓS SOLDAGEM TIG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Cleberson Cipriano de Paula.

Co-orientador: Alexei Lorenzetti Novaes Pinheiro.

LONDRINA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

Luiza Hauser Novicki

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX AISI 318 PÓS SOLDAGEM TIG

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 02 de 12 de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Amadeu Lombardi Neto
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Mecânica)

Prof. Dr. Cleberson Cipriano De Paula
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me capacitado a realizar todas as minhas obrigações durante o período da graduação.

Aos meus pais, Luiz e Verena, que me educaram e me ajudaram a trilhar meus caminhos e completar as dificuldades enfrentadas, sempre aconselhando da maneira a tomar as melhores decisões.

Gostaria de agradecer ao meu namorado Felipe, por toda dedicação e amor durante a minha caminhada da graduação, estando sempre ao meu lado nos momentos de felicidade e de dificuldade.

Agradeço também ao apoio do meu professor e orientador Cleberson Cipriano De Paula que pacientemente me acolheu como orientando e me passou seus ensinamentos de forma brilhante e também ao meu coorientador Alexei Lorenzetti Novaes Pinheiro por toda a sua dedicação e apoio em me auxiliar na execução deste trabalho.

Estendo meus agradecimentos a professora Silvia Midori Higa que me ajudou de forma participativa durante minha graduação, bem como neste trabalho. E também aos professores Odney Carlos Brondino e Amadeu Lombardi Neto por terem aceitado em participarem da minha banca e deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que participaram de forma direta ou indireta durante essa etapa cheia de dificuldades e sucesso que foi a graduação em Engenharia de Materiais na minha vida.

RESUMO

NOVICKI, L. H. **Avaliação da resistência à corrosão em aço inoxidável duplex pós soldagem TIG**. 2019. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

Os aços inoxidáveis duplex são ligas de aço de baixo teor de carbono, ligados principalmente ao cromo, níquel e molibdênio que possuem composição balanceada, de modo a se obter uma microestrutura mista, com frações volumétricas aproximadamente iguais de ferrita e austenita; são amplamente utilizados por possuírem alta resistência mecânica e ductilidade, aliada à uma boa resistência à corrosão. Os aços duplex requerem um cuidado especial com o potencial de precipitação de fases intermetálicas, como sigma(σ) e chi (χ), que fragilizam o material e comprometem sua resistência a corrosão. Com isso, evitar a precipitação destes compostos é um desafio muito grande, especialmente no desenvolvimento de procedimento de solda para estes materiais. Este trabalho visou o estudo da caracterização da resistência a corrosão de uma amostra de AID 318 soldada pela TIG, sendo avaliado através do ensaio potenciodinâmico e caracterização microestrutural. Os resultados obtidos mostraram que a solda influenciou negativamente na resistência a corrosão do material.

Palavras-chave: Aço inoxidável duplex. Soldagem TIG. Resistência à corrosão.

ABSTRACT

NOVICKI, L. H. **Evaluation of corrosion resistance in duplex stainless steel after TIG welding**. 2019. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

Duplex stainless steels are low carbon alloy steels, mainly associated with chromium, nickel and molybdenum that have a balanced composition to obtain the wrong microstructure with approximately equal volumetric fractions of ferrite and austenite; They are widely used because of their high mechanical strength and ductility, combined with good corrosion resistance. Duplex steels use special care with the potential for phase interference, such as sigma (σ) and chi (χ), which weaken the material and compromise its corrosion resistance. Therefore, avoiding the use of these compounds is a major challenge, especially in the development of welding procedures for these materials. This work visualizes the corrosion resistance characterization study of a sample of AID 318, welded by TIG welding, being evaluated by potentiodynamic tests and microstructural characterization. The results show that the weld negatively influenced the corrosion resistance of the material.

Keywords: Stainless steel duplex. TIG welding. Resistance to corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Schaeffler. Regiões de composição química das diferentes famílias indicadas (Constituintes: A (austenita), F (ferrita), M (martensita)).	16
Figura 2: Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex, aumento de 400x	17
Figura 3: Curva de transformação isotérmica de precipitação em aço W.Nr. 1.4462 (2205/UNSS31803) após solubilização a 1050°C.	19
Figura 4: Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união.	21
Figura 5: Processo de Soldagem TIG.	22
Figura 6: Equipamento básico para a soldagem TIG.	23
Figura 7: Curva de polarização esquemática ilustrando as condições sob as quais pites podem ou não ocorrer.	26
Figura 8: Equipamento de usinagem por eletroerosão.	27
Figura 9: Equipamento de soldagem	28
Figura 10: Amostras usinadas e pós solda TIG.	28
Figura 11: Fluxograma das etapas realizadas no trabalho.	29
Figura 12: Recipiente contendo a solução de NaCl, amostra e eletrodos de referência.	30
Figura 13: Equipamento e aparato utilizado para levantamento das curvas.	31
Figura 14: Micrografia obtida após ataque da amostra sem solda. Aumento de 100x.	32

Figura 15: Esquema da localização das micrografias na amostra presentes na imagem 16.	33
Figura 16: Micrografias obtidas após ataque da amostra soldada. Aumento de 100x.	34
Figura 17: Curvas de polarização potenciodinâmica para amostra sem solda.	35
Figura 18: Curvas de polarização potenciodinâmica para amostra soldada.	36
Figura 19: Micrografias da amostra sem solda pós polarização, a) Curva1, b) Curva 2, c) Curva 3, d) Curva 4. Aumento de 50x.	38
Figura 20: Micrografias da amostra soldada pós polarização, (a) Curva1, (b) Curva 2, (c) Curva 3, (d) Curva 4. Aumento de 50x.	39
Figura 21: Micrografias SEM - BSE após polarização, região da fresta na amostra sem solda. Aumento de 42x, 300x, 1.2kx, 5kx.	40
Figura 22: Micrografias SEM - SE após polarização, região da fresta na amostra sem solda. Aumento de 42x, 300x, 1.2kx, 5kx.	41
Figura 23: Micrografias SEM - SE após polarização, região da soldada. Aumento de 42x, 300x, 1.2kx, 5kx.	42
Figura 24: Micrografias SEM - BSE após polarização, região da fresta na amostra solda. Aumento de 42x, 300x, 1.2kx, 5kx.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composições típicas (%) dos aços inoxidáveis duplex mais comuns.	20
Tabela 2: Composição química da liga SAF 2205 conforme certificado do fornecedor.....	27
Tabela 3: Parâmetros da soldagem.	28
Tabela 4: Dados obtidos para fase Austenita através do ImageJ.....	33
Tabela 5: Parâmetros eletroquímicos para amostra sem solda.....	36
Tabela 6: Parâmetros eletroquímicos para amostra soldada.....	37
Tabela 7: Composição em % de peso dos elementos químicos na amostra sem solda.....	44
Tabela 8: Composição em % de peso dos elementos químicos na amostra soldada.....	44

LISTA DE SIGLAS

AID	Aço Inoxidável Duplex
AISI	The American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
DAEMA	Departamento acadêmico de engenharia de materiais
E	Potencial
E_b	Potencial de quebra
E_p	Potencial de pite
E_{prot}	Potencial de proteção
E_{rp}	Potencial de repassivação
GTAW	Gas-Shielded Tungsten Arc Welding
i	Corrente
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
TIG	Tungsten Inert Gas
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
3 JUSTIFICATIVA	14
4 REFERENCIAL TEÓRICO	15
4.1 AÇO INOXIDÁVEL	15
4.1.1 Aço Inoxidável Duplex	17
4.2 SOLDAGEM	20
4.2.1 Classificação dos processos de soldagem	20
4.2.2 Soldagem Tungsten Inert Gas (TIG)	21
4.3 CORROSÃO	23
4.3.1 Corrosão localizada	24
4.3.2 Técnicas Eletroquímicas	24
5 MATERIAIS E MÉTODOS	26
5.1 MATERIAIS	26
5.2 MÉTODOS	29
5.2.1 Caracterização Microestrutural	29
5.2.2 Ensaios Eletroquímicos	30
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
6.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	32
6.2 POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA	34
6.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	39
7 Conclusão	46
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex (AID) são aços de baixo teor de carbono, ligados principalmente ao cromo (18 a 27%), níquel (4 a 7%) e molibdênio (0 a 4%), que possuem composição balanceada, o que permite obter uma microestrutura mista, com frações volumétricas aproximadamente iguais de ferrita e austenita; esta microestrutura mista que proporciona ao aço inoxidável duplex uma elevada resistência à corrosão. (ZHONG, 2012)

Os AID SAF 2205, também conhecido como AISI 318 tem tido um aumento considerável em sua utilização nas indústrias petroquímicas offshore, indústria química e indústria nuclear, devido as suas elevadas propriedades mecânicas e resistência à corrosão e, portanto, esse fato torna o interessante do ponto de vista tecnológico e econômico. (LESSA, 2016)

Do ponto de vista de projeto, as estruturas industriais precisam ser restauradas devido aos desgastes e/ou falhas que ocorrem. A manutenção mais usual, devida a sua alta versatilidade e custo baixo, é a soldagem através do processo de soldagem TIG (GTAW), com diversas implicações técnicas (utilização de gases, parada de produção, etc.) e metalúrgicas (fases resultantes frágeis, intermetálicas e/ou carbonetos complexos), que demandam custo e geram riscos à integridade mecânica do material, pois traz efeitos que alteram sua microestrutura e afetam suas propriedades anticorrosivas. (LESSA, 2016)

Com isso, o presente trabalho irá avaliar a resistência a corrosão do aço inoxidável duplex AISI 318 após ser submetido a soldagem TIG. Foram considerados os ensaios de polarização potenciodinâmica cíclica, e técnicas de caracterização microestrutural MO e MEV.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar a resistência a corrosão do aço inoxidável duplex AISI 318, após ser submetido a soldagem TIG.

Como objetivos específicos, foram definidos:

- Cortar a peça para a soldagem;
- Preparar a superfície da peça aplicação da solda;
- Realização da soldagem TIG
- Caracterização microestrutural da liga;
- Caracterizar a resistência à corrosão localizada das ligas.

3 JUSTIFICATIVA

Os AID surgiram na década de 30 e adquiriram importância comercial com o grande avanço das atividades de exploração e produção de petróleo offshore, e o aumento da produtividade em meios mais agressivos que necessitam de materiais que possuam elevadas propriedades mecânicas, assim como uma excelente resistência à corrosão em contato com estes meios.

Os AID são materiais que aliam uma alta resistência à corrosão com valores elevados de resistência mecânica, produto dos diversos elementos de liga contidos em solução sólida na liga, além da fina microestrutura bifásica composta por proporções semelhantes das fases Ferrita (α) e Austenita (γ). Porém, é interessante salientar que estes aços podem sofrer fenômenos de fragilização e perda de resistência à corrosão provocados pelo aquecimento localizado, tal como acontece em diversos processos de soldagem.

Mas na fabricação e na manutenção de equipamentos de processo, empregados em plataformas semissubmersíveis utilizadas na exploração de petróleo em águas submersas, muitas vezes se torna necessário empregar o processo de união por soldagem, que como já citado, acabam fragilizando o material e os deixando mais suscetíveis a corrosão.

Portanto, este trabalho tem como intuito avaliar a resistência a corrosão do aço AID soldado, para poder prevenir futuras falhas em serviço, devido as alterações que o processo de soldagem provoca na microestrutura do material.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 AÇO INOXIDÁVEL

Aço inoxidável é o termo empregado para identificar uma família de aços que contêm o elemento cromo em teores iguais ou superiores a 12%, o que lhe confere a característica de elevada resistência à corrosão. Este alto teor de cromo possibilita que os AID também sejam utilizados em aplicações que requeiram resistência ao calor e à fluência. De acordo com a teoria clássica, nesses aços o mecanismo de proteção contra a corrosão provocada pelo meio ambiente se dá pela formação de uma fina camada de óxido na superfície do material, conseqüente do contato do metal com o oxigênio do ar, a qual apresenta características de ser contínua e muito aderente. Esse filme de óxido, por tais características, protege toda a superfície do aço inoxidável e, de maneira geral, a resistência contra a corrosão aumenta à medida que mais cromo é adicionado à liga. (LOPES, 2006)

De acordo com a microestrutura que apresentam à temperatura ambiente, e com a possibilidade de endurecimento por precipitação, os aços inoxidáveis existentes podem ser classificados em quatro grandes grupos principais, facilitando a seleção do material e a sua adequação ao tipo de aplicação exigida, os quais são denominados de ferríticos, martensíticos, austeníticos e endurecíveis por precipitação. Entretanto, a classificação mais simples e mais usada dos aços inoxidáveis leva em consideração somente a sua microestrutura e, dessa forma, apenas os três primeiros grupos serão aqui considerados: aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis martensíticos e aços inoxidáveis austeníticos, (além dos denominados duplex, que são uma combinação das fases austenita e ferrita). (LOPES, 2006)

A microestrutura tem efeito dominante sobre o desempenho dos aços inoxidáveis e dependem, diretamente, da composição química e do tratamento térmico realizado. Em vista da complexidade dos sistemas envolvidos buscam-se representações simplificadas das relações de fases em função da composição química. Um dos enfoques mais bem-sucedidos é o proposto por

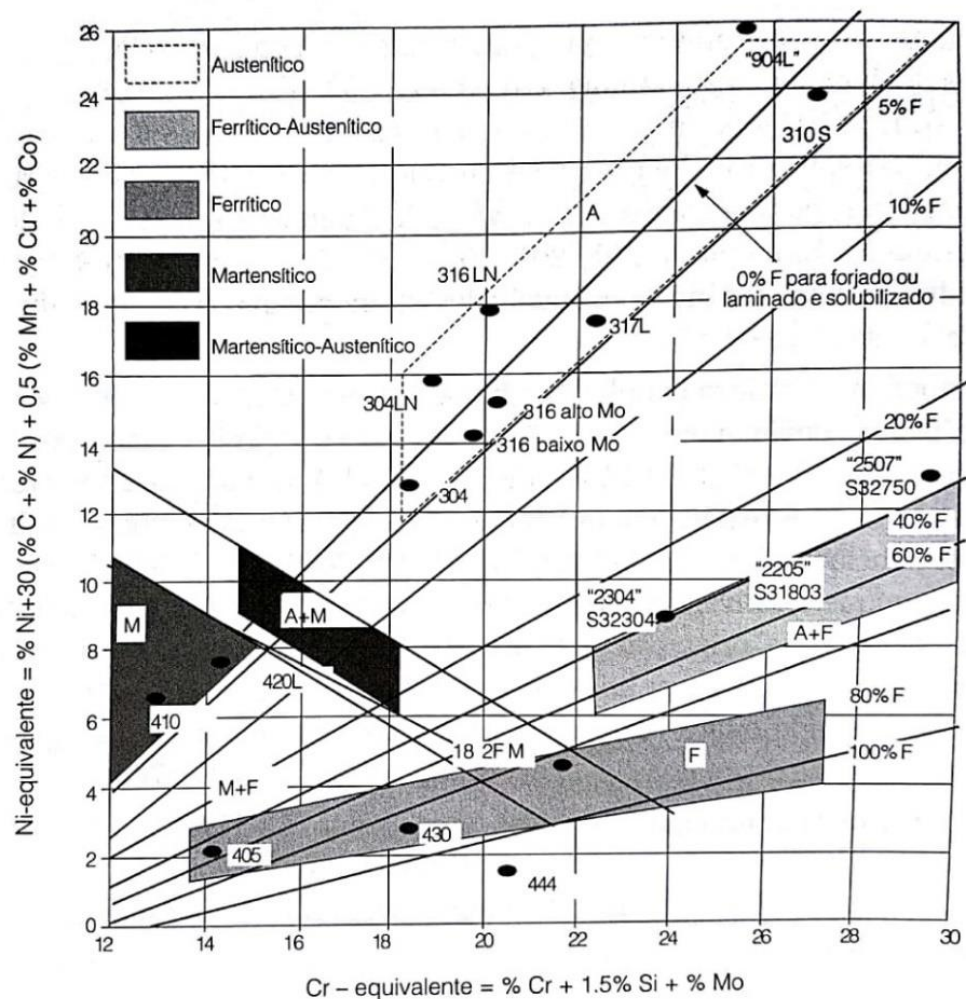
Schaeffer e Delong. Todos os elementos estabilizadores da estrutura CCC são computados em um valor de “Cr equivalente” e os estabilizadores de CFC em um valor de “Ni equivalente”. (SILVA, MEI, 2006)

$$Cr_{eq} = \%Cr + 1,5 \times \%Si + \%Mo \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times (\%C + \%N) + 0,5 \times (\%Mn + \%Cu + \%Co) \quad (2)$$

A Figura 1 apresenta o Diagrama de Schaeffer com as faixas de composição aproximadas de cada família de aços inoxidáveis indicadas.

Figura 1: Diagrama de Schaeffer. Regiões de composição química das diferentes famílias indicadas (Constituintes: A (austenita), F (ferrita), M (martensita)).



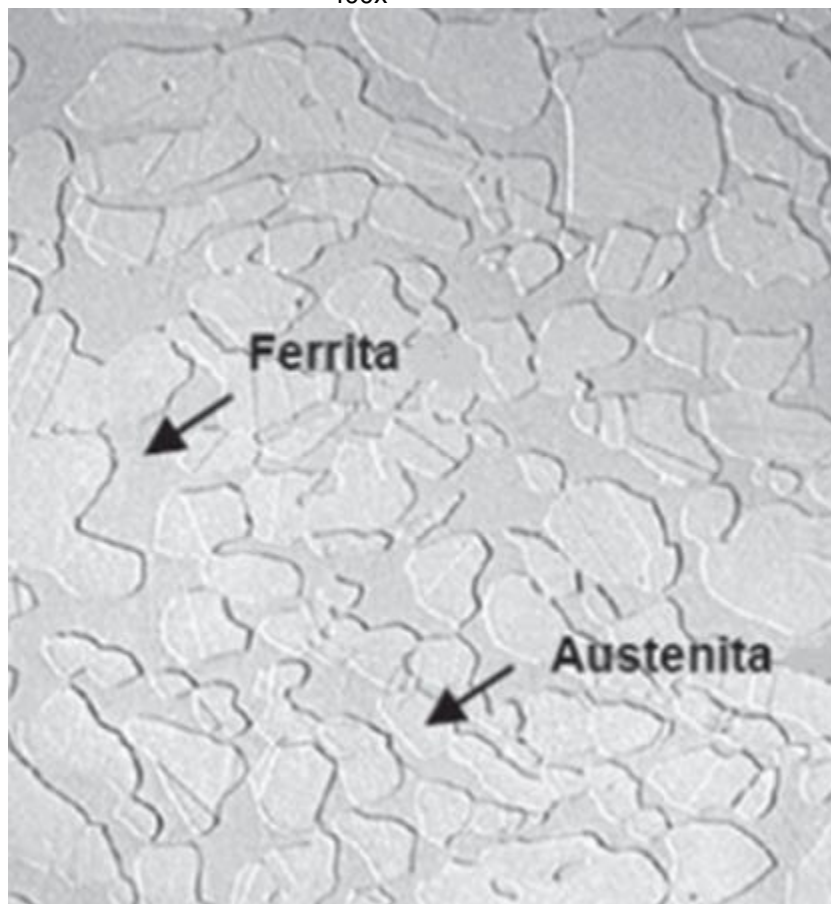
Fonte: (SILVA, MEI, 2006)

4.1.1 Aço Inoxidável Duplex

Os aços inoxidáveis duplex ferrítico-austenítico têm microestruturas que consistem em frações aproximadamente iguais destas fases. Estes aços são caracterizados por uma combinação favorável das propriedades dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos: têm elevada resistência mecânica, boa tenacidade, resistência a corrosão muito boa em diversos meios e excelente resistência a corrosão sob tensão e fadiga. (COLPAERT,2008)

A microestrutura de um aço AID é observada na Figura 2

Figura 2: Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex, aumento de 400x



Fonte: Adaptado de Senatore; Finzetto; Perea (2007).

Esta microestrutura e a combinação de propriedades é obtida, em geral pelo aumento dos teores de cromo e molibdênio em relação aos aços

austeníticos e com o aumento do teor de nitrogênio. Essas alterações de composição química, entretanto, aumentam a estabilidade de fase sigma (σ) e possibilitam o aparecimento de fases intermetálicas, especialmente a chamada fase chi (χ). (COLPAERT,2008)

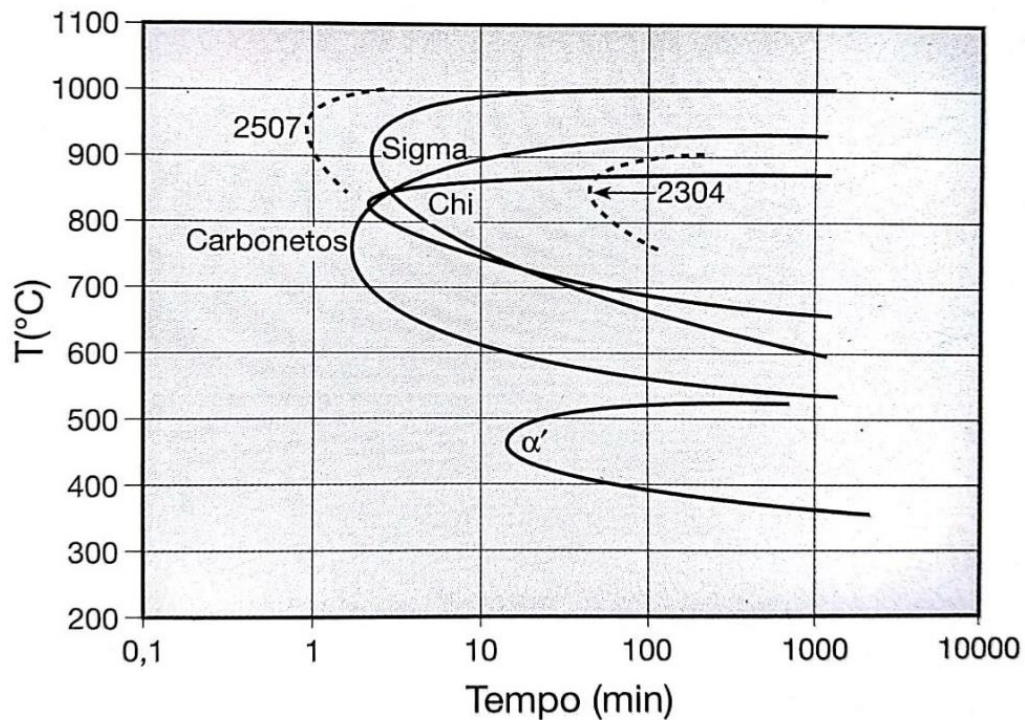
Além dos cuidados para prevenir a precipitação de carbonetos após a solubilização, os aços duplex requerem, portanto, cuidado com o potencial de precipitação de fases intermetálicas, como sigma (σ) e a chi (χ), que fragilizam o material e comprometem sua resistência a corrosão (COLPAERT,2008).

A fase sigma (σ) é uma fase rica em Cr e Mo, sendo formada entre as temperaturas de 600°C e 1000°C. Ela é uma das responsáveis pela fragilização do material, reduzindo a tenacidade ao impacto e a resistência à corrosão. Tem-se como exemplo, que a precipitação de 4% desta fase em volume pode resultar em um decréscimo de aproximadamente 90% da tenacidade. (BARROS; MOREIRA, 2013)

A fase Chi (χ) é formada quando exposta a temperaturas entre 700°C e 900°C e apresenta as mesmas características que a fase σ , que são diminuição da tenacidade ao impacto e da resistência à corrosão. Ela apresenta grande similaridade a fase σ , tanto que surgem simultaneamente, porém em menor fração volumétrica, o que se deve ao fato de possuir uma concentração muito maior de Cr e Mo, quando comparada a fase sigma. (BARROS; MOREIRA, 2013)

A Figura 3 apresenta a curva de transformação isotérmica de precipitação em aço W.Nr. 1.4462 (2205/UNSS31803) após solubilização a 1050°C.

Figura 3: Curva de transformação isotérmica de precipitação em aço W.Nr. 1.4462 (2205/UNSS31803) após solubilização a 1050°C.



Fonte: COLPAERT,2008.

Evitar a precipitação destes compostos é um desafio importante, especialmente no desenvolvimento de procedimentos de solda.

A composição química do aço é um fator muito importante para o estudo, pois os componentes de liga possuem finalidades específicas que alteram as propriedades do material, como exemplo o Cromo, que a sua principal função é promover resistência à corrosão, e o Nitrogênio que além de aumentar a resistência mecânica, também é capaz de aumentar a resistência de corrosão por pite e fresta. Na Tabela 1 é apresentada a composição típicas (%) dos aços inoxidáveis duplex mais comuns.

Tabela 1: Composições típicas (%) dos aços inoxidáveis duplex mais comuns.

Nome comum	UNS	W.Nr. (EN)	C máx	Cr	Ni	Mo	N	Outros
AISI329	S32900	1.4460	0,08	23-28	2,5-5,0	1-2	Não esp.	
3RE60	S31500	1.4417	0,03	18-19	4,3-5,2	2,5-3	0,05-0,1	
2304	S32304	1.4362	0,03	21,5-24,5	3-5,5	0,05-0,6	0,05-0,2	
2205	S31803	1.4462	0,03	21-23	4,5-6,5	2,5-3,5	0,1-0,22	
F55	S32760	1.4501	0,03	24-26	6-8	3-4	0,2-0,3	Cu = 0,7 W = 0,7
2507	S32750	1.4410	0,03	24-26	6-8	3-5	0,2-0,3	Cu = 0,5

Fonte: (SILVA, MEI, 2006)

4.2 SOLDAGEM

A soldagem se destaca como o processo de união de metais mais utilizado industrialmente, e é definida como uma união localizada de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios metais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos. (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009)

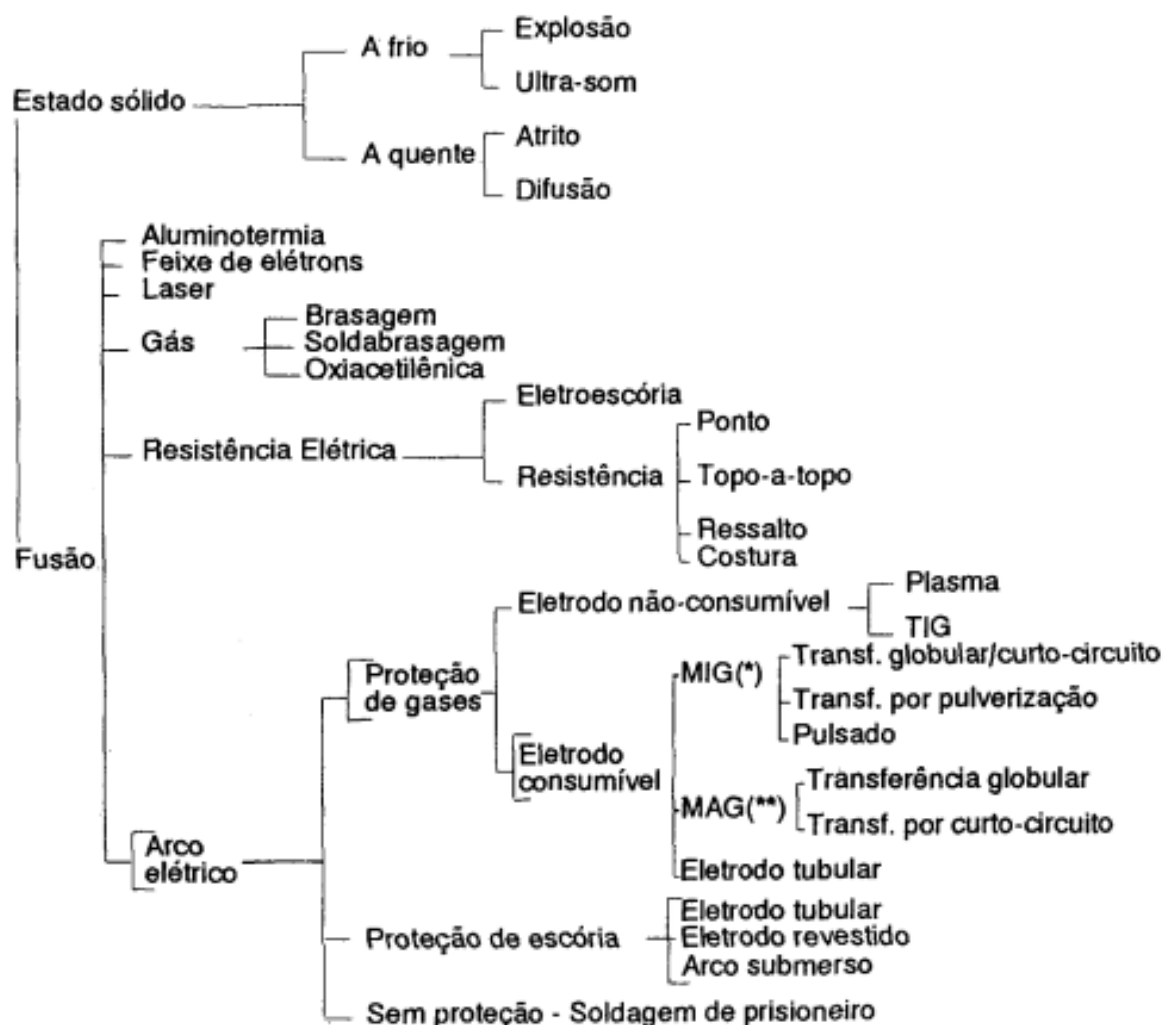
4.2.1 Classificação dos processos de soldagem

Os processos de soldagem podem ser classificados em função de dois parâmetros: tipo de fonte de energia utilizada ou natureza da união. Usando a classificação por tipo de fonte de energia podemos dividir em quatro tipos: fonte mecânica, onde o calor é gerado através do atrito, por ondas de choque ou por deformação plástica do material; fonte química, onde o calor é gerado através de reações químicas exotérmicas; fonte elétrica, onde o calor é gerado pela passagem de corrente elétrica ou pela formação de um arco elétrico; e fonte radiante, onde o calor é gerado por radiação eletromagnética ou por um feixe de elétrons acelerados através de um potencial. (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992)

Em geral, são classificados na AWS (American Welding Society) mais de 50 tipos de soldagem. A Figura 4 representa o tipo de classificação pela

natureza da união, usando a distinção entre soldagem no estado sólido e por fusão.

Figura 4: Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união.



Observ.: (*) com argônio ou hélio.

(**) com argônio, oxigênio, CO₂ ou misturas desses gases.

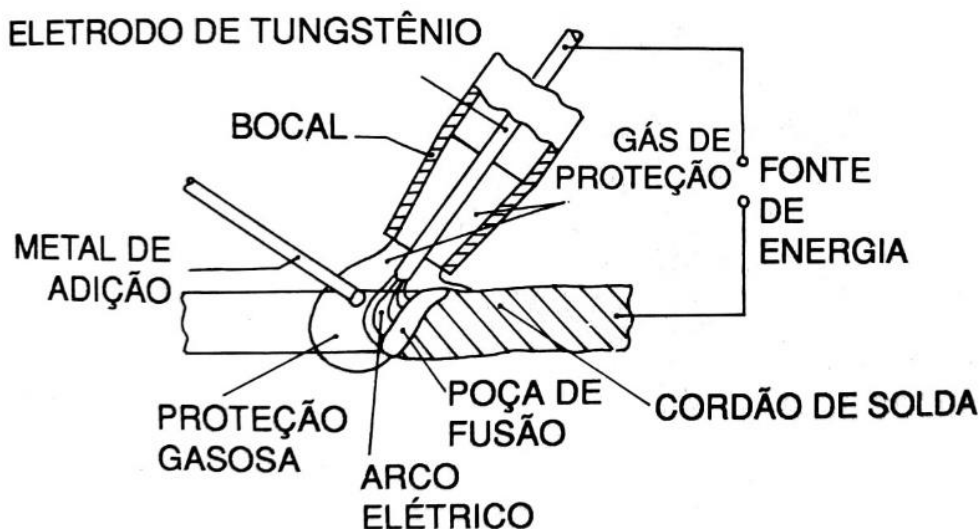
Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009).

4.2.2 Soldagem Tungsten Inert Gas (TIG)

Soldagem TIG é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e a peça a unir.

Um esquema do processo é representado na Figura 5. (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009)

Figura 5: Processo de Soldagem TIG.



Fonte: WAINER, BRANDI e MELLO (1992).

Este processo é aplicável à maioria dos metais e suas ligas, numa ampla faixa de espessuras. Entretanto, em virtude de seu custo relativamente elevado, é usado principalmente na soldagem de metais não ferrosos e aços inoxidáveis, na soldagem de peças de pequena espessura e no passe de raiz na soldagem de tubulações. (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009)

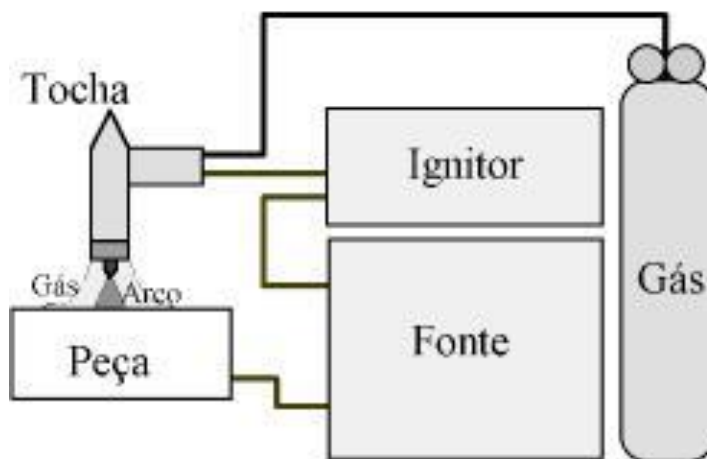
O arco elétrico na soldagem TIG é bastante estável, suave e produz, em geral, soldas com boa aparência e acabamento, que exigem pouca ou nenhuma limpeza após a operação.

4.2.2.1 Equipamento

O equipamento básico utilizado na soldagem TIG consiste de uma fonte de energia elétrica, uma tocha de soldagem apropriada, uma fonte de gás protetor, um dispositivo para a abertura do arco, cabos e mangueiras. Como

pode ser observado na Figura 6, que é a representação de um esquema do equipamento de soldagem.

Figura 6: Equipamento básico para a soldagem TIG.



Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009).

4.3 CORROSÃO

A corrosão consiste na deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo estar ou não associada a esforços mecânicos (NUNES, 2007).

A corrosão de materiais metálicos em soluções eletrolíticas ocorre por um mecanismo eletroquímico devido a formação de pilhas eletroquímicas, chamadas pilhas de corrosão (NUNES, 2007).

A elevada resistência à corrosão dos aços inoxidáveis se deve a capacidade de formação de um filme passivo, de óxidos de cromo, aderido à superfície do material. Esse filme atua impedindo a reação do metal com o meio. No entanto, íons mais agressivos, como cloretos, podem levar ao rompimento dessa camada passiva em determinadas regiões da superfície, principalmente pontos de heterogeneidades na microestrutura. Estes rompimentos levam a corrosão localizada do material (GALDINO, 2015).

4.3.1 Corrosão localizada

Corrosão localizada se caracteriza pelo desgaste em pontos ou regiões determinadas, enquanto outras não apresentam desgaste ou mostram um desgaste muito pouco pronunciado. (NUNES, 2007)

4.3.1.1 Corrosão por pites

A corrosão por pites é um ataque localizado de uma superfície passiva devido a presença de íons agressivos (principalmente Cl^- , Br^- , I^-) no eletrólito. Manifesta-se em certos pontos da superfície passiva pela formação de pequenas cavidades (pites) que variam de micrômetros a milímetros. (GEMELLI, 2014)

4.3.1.2 Corrosão por frestas

A corrosão em frestas, também chamada de corrosão cavernosa, ocorre devido a formação de uma pilha de aeração diferencial. Forma-se quando uma peça metálica fica em contato com uma parte do eletrólito que não é renovado. (GEMELLI, 2014)

4.3.2 Técnicas Eletroquímicas

Os métodos eletroquímicos são muito utilizados para a determinação das propriedades de corrosão. Uma das principais técnicas é a polarização potenciodinâmica.

Na técnica potenciodinâmica efetua-se o levantamento da curva de polarização do metal dentro da solução de ensaio (normalmente uma solução aquosa contendo 3,5% a 4% de NaCl) na direção anódica, a partir de um certo potencial (em geral a partir do potencial de corrosão E_{corr}) e com uma velocidade de varredura padronizada. Por se tratar de metal passivo, a densidade de corrente é inicialmente bastante pequena (da ordem de 10^{-6} A/cm^2 a 10^{-5} A/cm^2)

e a mesma varia muito pouco com o aumento do potencial. Quando se atinge o potencial de quebra (E_b), ocorre um brusco aumento no valor da densidade de corrente. Como se trata de um ensaio eletroquímico de corrosão em frestas, determina-se o potencial de quebra, E_b , que seria equivalente ao potencial de pite (E_p) na corrosão por pite. Neste potencial ocorre a quebra da camada passiva dentro da fresta e a densidade de corrente tende a aumentar significativamente de valor. Vale destacar que o potencial no qual um eletrodo com frestas sofre um rápido aumento de corrente é muito mais ativo (menos nobre) do que para um eletrodo sem frestas. (PECEQUILO; PANOSSIAN, 2013)

O potencial de quebra ou de pite é normalmente considerado como sendo a intersecção da reta definida pela curva antes do aumento brusco da densidade de corrente com a reta definida pela curva após esse aumento. (PECEQUILO; PANOSSIAN, 2013)

A técnica potenciodinâmica é frequentemente estendida para a técnica de polarização potenciodinâmica cíclica, pela qual, além do potencial de quebra, pode também ser determinado o potencial de proteção, E_{prot} , equivalente ao potencial de repassivação, E_{rp} , da corrosão por pite. Os procedimentos desta técnica estão especificados na norma ASTM G 61. Essa técnica, que tem o objetivo de determinar a susceptibilidade relativa à corrosão localizada de ligas à base de ferro, níquel ou cobalto em meios cloretados desaerados. Nesta técnica efetua-se o levantamento da curva de polarização do metal dentro da solução de ensaio na direção anódica, a partir de um certo potencial (em geral a partir do potencial de corrosão E_{corr}) e com uma velocidade padronizada. Quando atinge o potencial de quebra (E_b), ocorre um brusco aumento no valor da densidade da corrente, é neste potencial que ocorre a quebra da camada passiva, após o aumento brusco (a potenciais abaixo do potencial de evolução de oxigênio), atinge um determinado valor (5 mA), faz-se a reversão da direção de varredura do potencial. Com isto, a densidade de corrente em geral volta a diminuir e a varredura na direção catódica é continuada até a curva descendente cruzar com a curva ascendente (obtida durante a varredura inicial na direção anódica) ou até atingir o potencial de corrosão. O potencial de proteção E_{prot} corresponde ao potencial em que a curva descendente cruza a curva

ascendente, como pode ser observado na Figura 7. (PECEQUILO; PANOSSIAN, 2013)

A Figura 7 mostra a curva de polarização esquemática que ilustra as condições sob as quais pites podem ou não ocorrer.

Figura 7: Curva de polarização esquemática ilustrando as condições sob as quais pites podem ou não ocorrer.



Fonte: (PECEQUILO; PANOSSIAN, 2013)

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

Este trabalho teve como material de estudo o aço inoxidável duplex AISI 318, fornecido pela empresa Multialloy Metais e Ligas Especiais LTDA. A composição química fornecido pelo fornecedor pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química da liga SAF 2205 conforme certificado do fornecedor.

Elementos	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
% Atômica	0,0150	0,6000	1,0700	0,0180	0,0009	0,1900	22,7800	3,0900	5,4000	0,2000	0,0300	0,0600

Fonte: Certificado de qualidade do fornecedor.

A partir do material foram usinadas duas amostras cilíndricas de 13,0 mm de diâmetro e 5 mm de altura, pela a empresa TKJ Compressores LTDA, através do método de eletroerosão à fio, realizado no equipamento Agie Charmilles Cut 20, o qual pode ser observado na Figura 8.

Figura 8: Equipamento de usinagem por eletroerosão.



Fonte: Autoria própria.

Após usinadas, uma das amostras, passou pelo processo de soldagem TIG, este procedimento foi realizado pela empresa JTP Soldas LTDA utilizando o equipamento ESAB - HELIARC 255 AC/DC, o qual pode ser observado na Figura 9.

Figura 9: Equipamento de soldagem.



Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros de soldagem utilizados estão apresentados na Tabela 3. E na Figura 10 tem-se a imagem das amostras após serem submetidas pelos processos de preparação.

Tabela 3: Parâmetros da soldagem.

Parâmetros da soldagem	Valores
Soldadora	ESAB - HELIARC 255 AC/DC
Tensão	50 V
Corrente	Corrente contínua

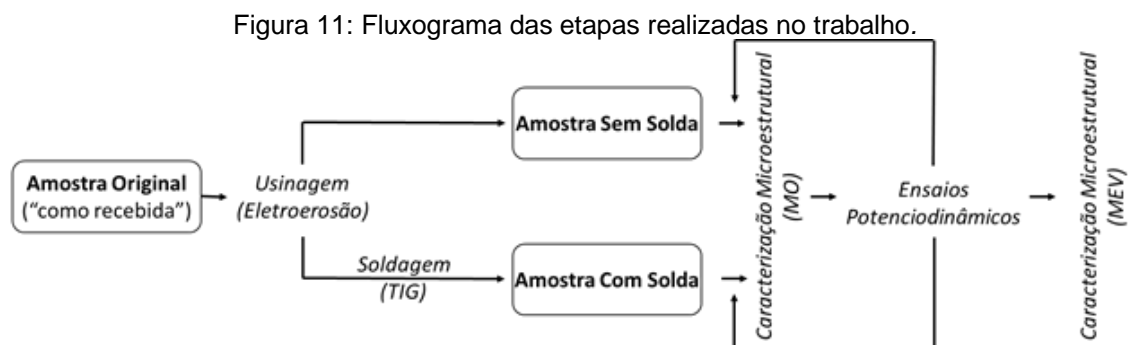
Fonte: Autoria própria.

Figura 10: Amostras usinadas e pós solda TIG.



Fonte: Autoria própria.

O fluxograma (Figura 11) é uma ilustração das etapas e os métodos que foram propostos e executados nesse trabalho.



Fonte: Autoria Própria.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Caracterização Microestrutural

Após a obtenção das amostras, foi realizada a caracterização microestrutural. Onde foi utilizada lixas de água com a sequência de granulométricas: 100, 220, 360, 600 e 1200, e seguidas de polimento em suspensão de alumina de 1,0 μm .

Para revelar a microestrutura, foi feito um ataque eletrolítico com uma solução de 10N de KOH (23g de KOH e 30 ml de H₂O) segundo a norma ASTM E407-07. O ataque foi realizado aplicando-se uma tensão 2,5V por período de aproximadamente 30 segundos.

A caracterização microestrutural após o ataque foi realizada no laboratório B004 do DAEMA – UTFPR – Londrina, com o auxílio do microscópio óptico ZEISS – Axio Scope A1 com câmera acoplada ZEISS – AxioCam ERc5s e do software AxioVs40.

Após o último ensaio de polarização realizado, as amostras foram analisadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica e de Microanálise (LMEM) da UEL com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 200

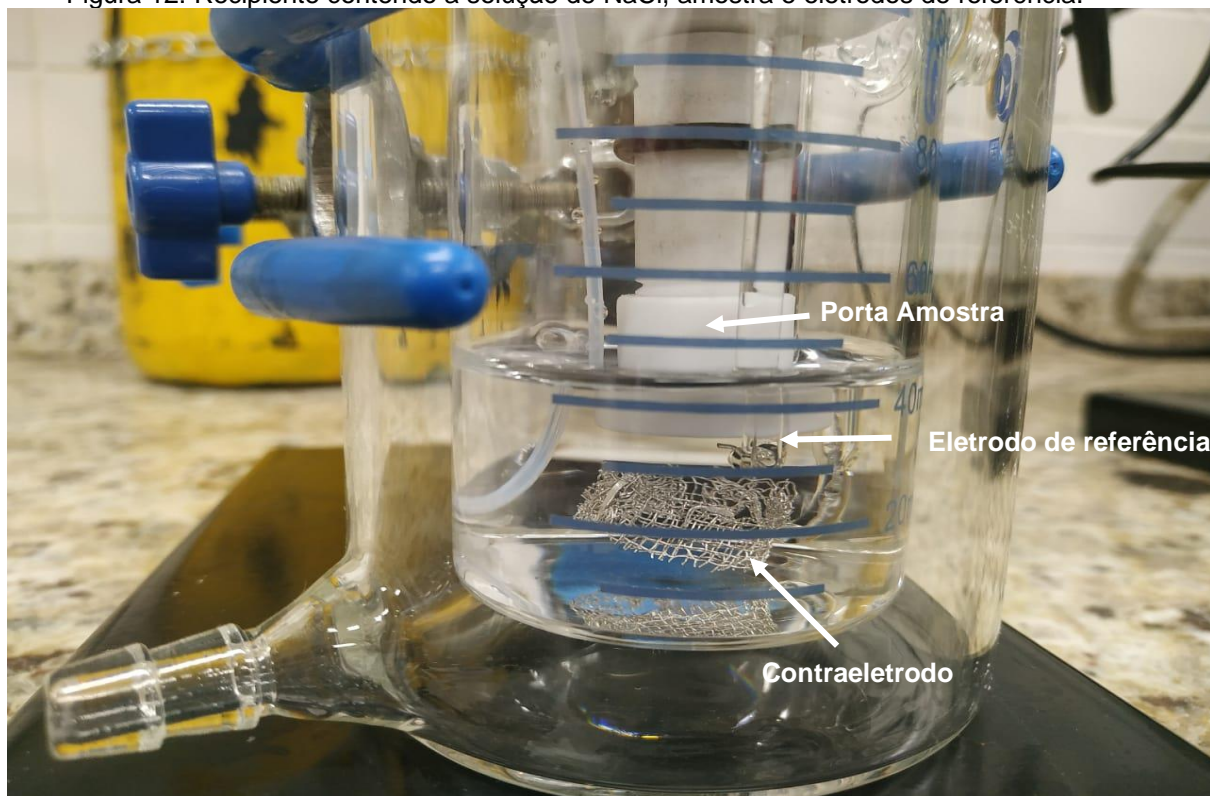
que permitiu também a realização do EDS com auxílio do software Oxford-INCA para verificar a composição química nas amostras.

5.2.2 Ensaio Eletroquímicos

O comportamento corrosivo das amostras foi obtido através das curvas de polarização potenciodinâmicas. Os ensaios eletroquímicos foram realizados foram baseados na norma ASTM 61-86, utilizando um meio aquoso de solução de NaCl a 3,56% (em peso), visando a comparação entre os comportamentos apresentados pelas duas amostras nesse meio.

Foi utilizado o Potenciostato/Galvonostat Model 273 da Eg&g Princeton no laboratório K015 do DAQUI – UTFPR – Londrina para levantamento das curvas de polarização. O sistema é composto pelo porta amostra, o eletrodo de referência de prata/cloreto de prata saturado (Ag/AgCl) e o eletrodo de platina como contraeletrodo, como mostra a Figura 12.

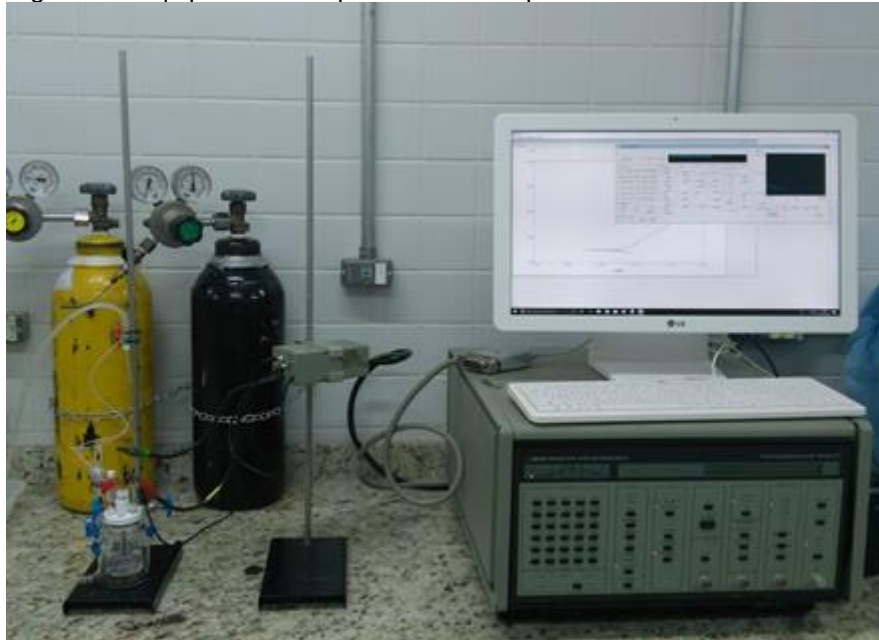
Figura 12: Recipiente contendo a solução de NaCl, amostra e eletrodos de referência.



Fonte: Autoria Própria.

O sistema utilizado para as análises potenciodinâmicas pode ser visto na Figura 13.

Figura 13: Equipamento e aparato utilizado para levantamento das curvas.



Fonte: Autoria Própria.

Foram realizados 4 ensaios potenciodinâmicos para cada amostra, onde a polarização se iniciou após 600 segundos da amostra imersa, para estabilização e determinação do potencial de circuito aberto, seguido de uma varredura de 1mV/s na amostra até 0,001 A/cm² onde o sentido de varredura se inverte, finalizando o ensaio quando o potencial inicial foi atingido.

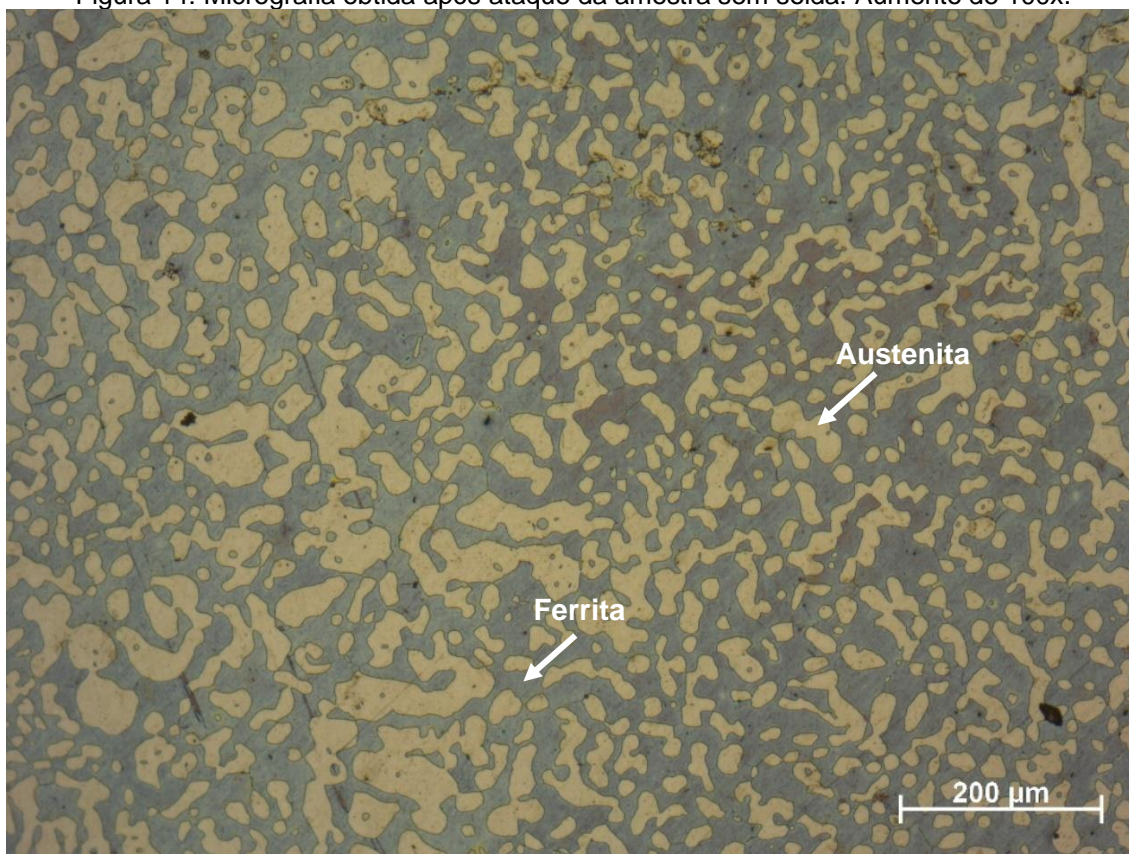
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos itens subsequentes serão apresentados os resultados e as discussões realizadas a partir dos resultados obtidos neste trabalho.

6.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

O ataque eletrolítico realizado com a solução de KOH revelou as microestruturas apresentadas nas Figuras 14 (sem solda) e 16 (com solda em duas regiões distintas).

Figura 14: Micrografia obtida após ataque da amostra sem solda. Aumento de 100x.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 14 observa-se uma micrografia típica do AID (Figura 2), onde se encontram fases ferrita (escura) e austenita (clara) bem distribuídas pela amostra. Porém, a relação entre as fases α/γ obtida em função das respectivas áreas na micrografia apresentada (estimada pelo software de domínio público

ImageJ) é abaixo do esperado para um AID, que se caracteriza por ser de 50% ferrita e 50% austenita.

Os dados obtidos pelo ImageJ podem ser vistos na Tabela 4.

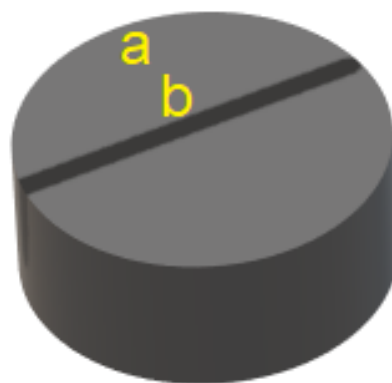
Tabela 4: Dados obtidos para fase Austenita e Ferrita através do ImageJ.

	Contagem	Área total (pixel)	Tamanho médio (pixel)	% Área
Austenita	622	1921784	3089,685	39,099
Ferrita	22	1921784	129485,045	60,901

Fonte: Autoria Própria.

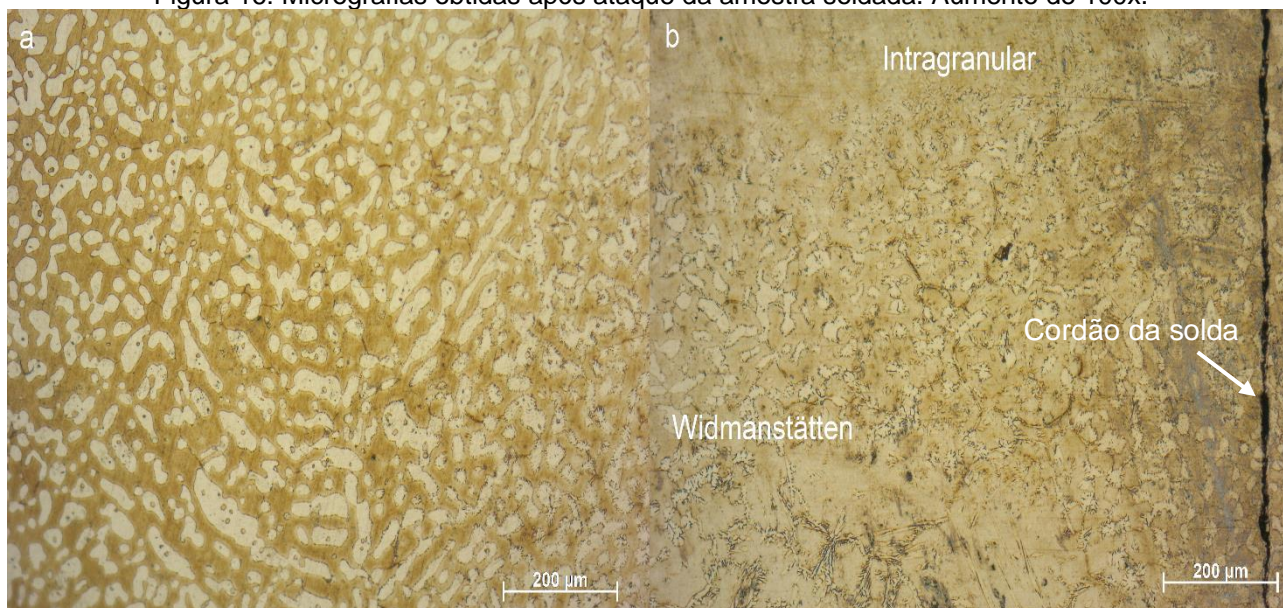
A caracterização microestrutural da amostra soldada foi realizada em duas regiões, assim identificadas: região (a) – região afastada da solda; região (b) – região próxima a solda. O esquema das localizações das regiões na amostra está apresentado na Figura 15 e na Figura 16 está apresenta as micrografias.

Figura 15: Esquema da localização das micrografias na amostra presentes na imagem 16.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 16: Micrografias obtidas após ataque da amostra soldada. Aumento de 100x.



Fonte: Autoria Própria.

Na região afastada da solda, Figura 16 (b), nota-se que a micrografia obtida foi muito próxima a típica esperada para os AID (Figura 2), por não ter sofrido influência da temperatura da solda nesta região. Porém, observar-se que na região a direita houve presença de austenita intragranular, isto nos evidencia que esta região foi termicamente afetada pela solda.

Duas diferentes morfologias básicas de austenita foram formadas na região próxima a solda, Figura 16 (b). Widmanstätten que nucleia nos contornos de grão de ferrita delta ou da austenita alotrimórfica pré-existente e cresce ao longo de planos específicos da matriz como placas paralelas. Também foi observado a nucleação de austenita intragranular nos grãos de ferrita, onde essas são precipitadas em temperaturas mais baixas devido a supersaturação da matriz ferrítica.

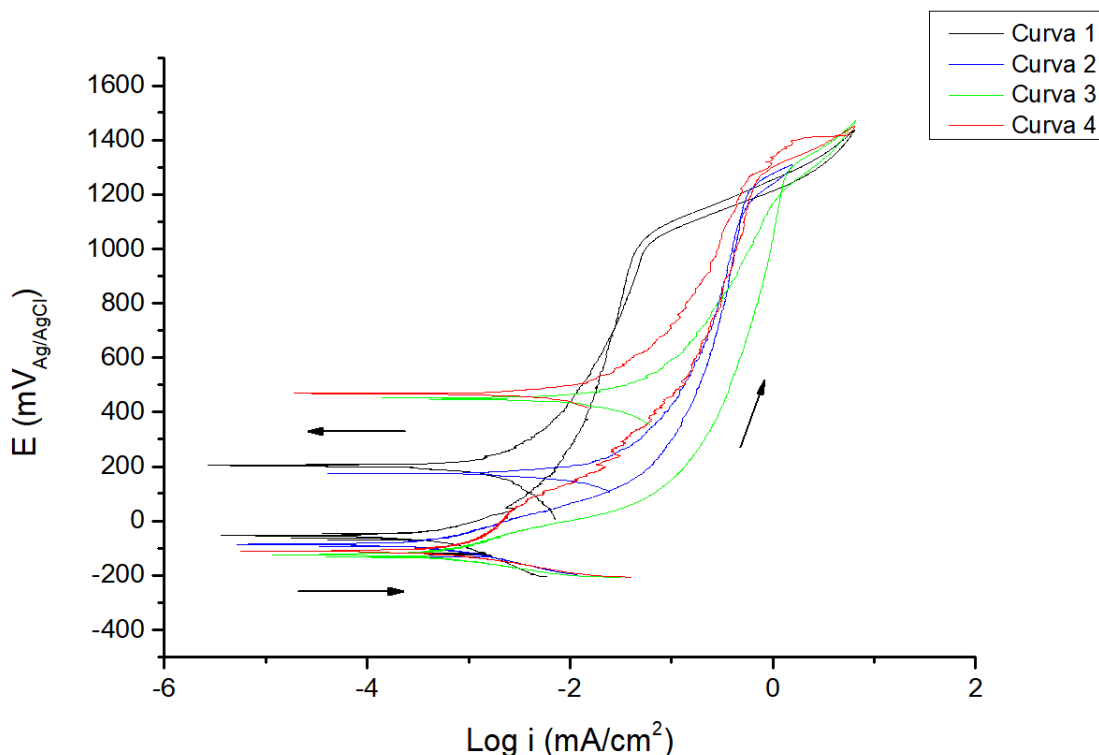
6.2 POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA

Os valores de potencial de circuito aberto estacionário, designado neste trabalho como potencial de corrosão, foram determinados previamente todos os ensaios de polarização cíclica. Os valores encontrados para as amostras sem solda para as quatro curvas de cada amostra estão apresentados na Tabela 5.

Este parâmetro é uma medida do comportamento da corrosão natural do sistema na ausência de efeitos de corrosão induzida.

Na Figura 17 está representada a curva de polarização cíclica da amostra não soldada.

Figura 17: Curvas de polarização potenciodinâmica para amostra sem solda.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 17 apresenta, que na amostra sem solda, o início da corrosão localizada ocorre em densidade de corrente negativos para todas as curvas. Podemos observar uma considerável uniformidade nos valores de potenciais de quebra (E_b), apenas a curva 1 apresentou a quebra do filme passível em um valor mais baixo. Na curva 4 é possível observar ruídos logo após atingir o potencial de quebra, isto ocorreu devido ao desprendimento de bolhas de hidrogênio do contraeletrodo que foram geradas pelo aumento da corrente e se depositaram na superfície da amostra.

O potencial de proteção (E_{prot}) das curvas da amostra sem solda, aumentaram conforme cada ensaio foi realizado, isto mostra que o lixamento não foi suficiente para retornar para camada precedente o que sugere ainda a presença de algum resíduo da camada anterior.

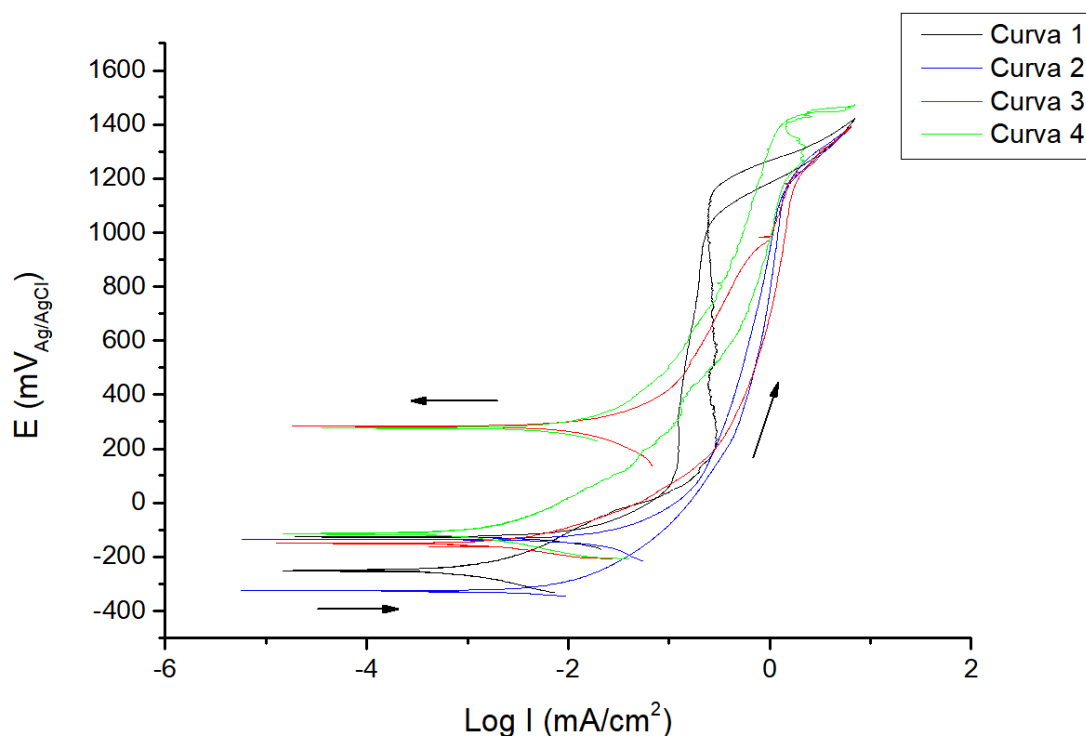
Tabela 5: Parâmetros eletroquímicos para amostra sem solda.

	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4
E_{corr}	-48	-62	-75	-70
E_b	1000	1200	1280	1270
E_{prot}	700	1105	1200	1405

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 18 está representada a curva de polarização cíclica da amostra soldada.

Figura 18: Curvas de polarização potenciodinâmica para amostra soldada.



Fonte: Autoria Própria.

Através da análise das curvas da Figura 18, obtidas da amostra soldada, pode-se os parâmetros eletroquímicos, estes presentes na Tabela 6. Para todas as curvas é possível observar que o início da corrosão localizada se dá em densidade de corrente negativos e que após atingir o potencial de corrosão é observado também um aumento na densidade de corrente no sentido positivo da varredura de potenciais. Melhor uniformidade nos valores dos potenciais de quebra, o que sugere pouca variação na microestrutura após sucessivos processos de polimento e caracterização eletroquímica, e estes pode ser observado na Tabela 6.

Assim como na amostra não soldada, o potencial de proteção (E_{prot}) das curvas da amostra sem solda, aumentaram conforme cada ensaio foi realizado, isto mostra que o lixamento não foi suficiente para retornar para camada precedente o que sugere ainda a presença de algum resíduo da camada anterior.

Durante a realização do ensaio da curva 4, houve a formação de bolhas de hidrogênio geradas pelo contraeletrodo com o aumento da corrente, que ao se desprenderem se depositaram na superfície da amostra, gerando interferência na leitura dos dados o que ocasionou ruídos na curva.

Tabela 6: Parâmetros eletroquímicos para amostra soldada.

	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4
E_{corr}	-238	-312	-139	-83
E_b	1180	1095	1195	1150
E_{prot}	1020	1180	1210	1405

Fonte: Autoria Própria.

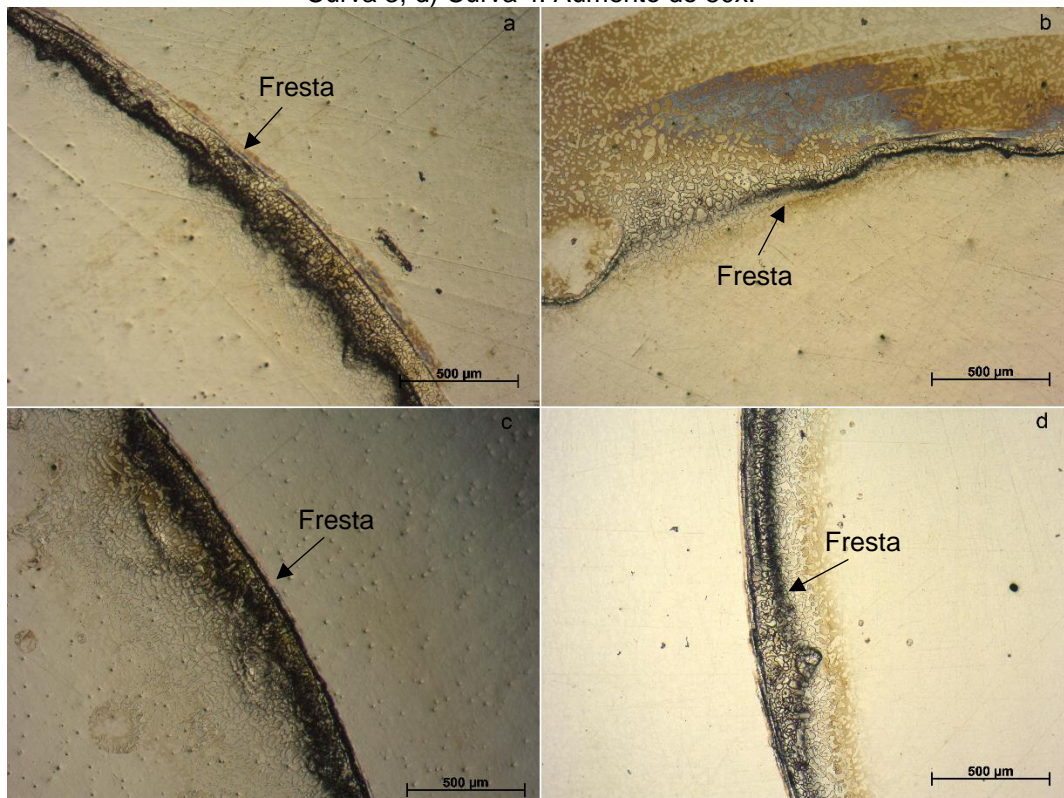
Comparando-se a densidade da corrente entre as duas amostras é possível observar a que a amostra soldada possui uma corrente 10x vezes maior que a amostra sem solda, conseqüentemente sua região de passivação é menor. Isto pode estar pode ser um indício de que a solda “roube” corrente e assim necessita-se maior corrente para que se inicie a corrosão na fresta.

Outro fator que pode ser observa ao se comparar os dados das amostras é que para a amostra soldada os potenciais de corrosão foram menores que para

a amostra sem solda, isto é um indício que a amostra seja mais susceptível a corrosão.

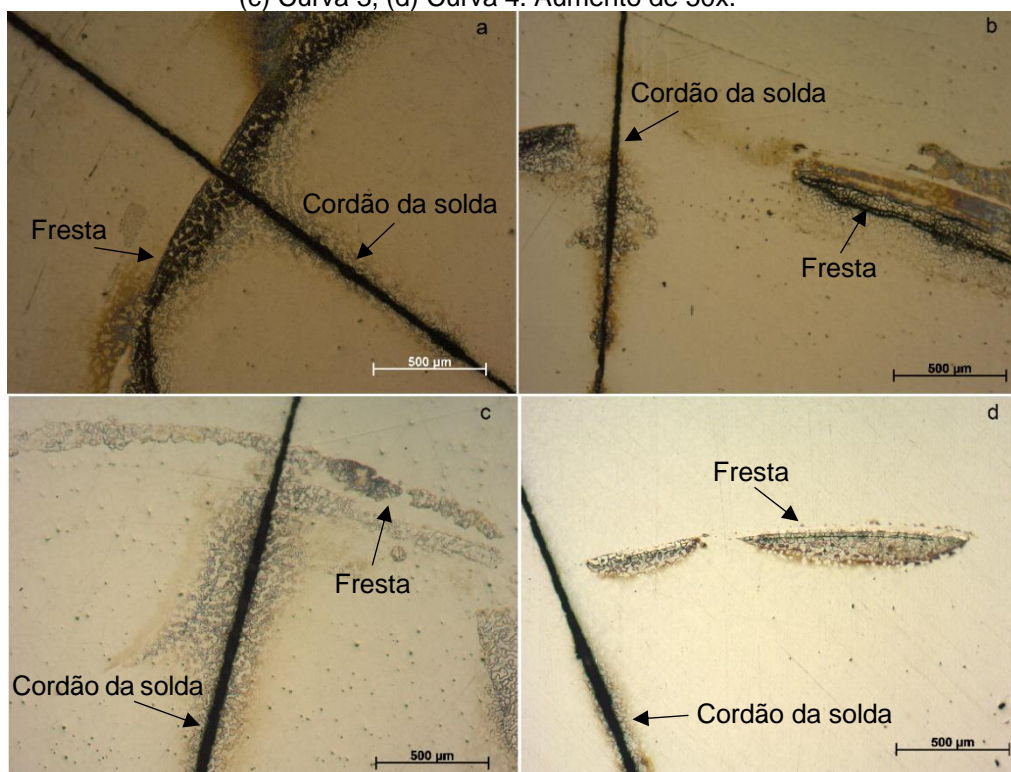
As micrografias realizadas após cada curva de polarização estão demonstradas na Figura 19 e 20.

Figura 19: Micrografias da amostra sem solda pós polarização, a) Curva 1, b) Curva 2, c) Curva 3, d) Curva 4. Aumento de 50x.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 20: Micrografias da amostra soldada pós polarização, (a) Curva 1, (b) Curva 2, (c) Curva 3, (d) Curva 4. Aumento de 50x.



Fonte: Autoria Própria.

Pode ser observada nas Figura 19 e 20 que tanto a amostras soldada quanto a não soldada sofreu corrosão ativa tendo sua superfície atacada gerando alguns pontos de pites

Ao serem comparados as micrografias das amostras, é possível observar que a corrosão por fresta foi mais significativa na amostra sem solda. Isto se deve pelo fato da presença da solda deixar a região soldada susceptível a corrosão e assim “roubar” o ataque para si, enfraquecendo o ataque na fresta.

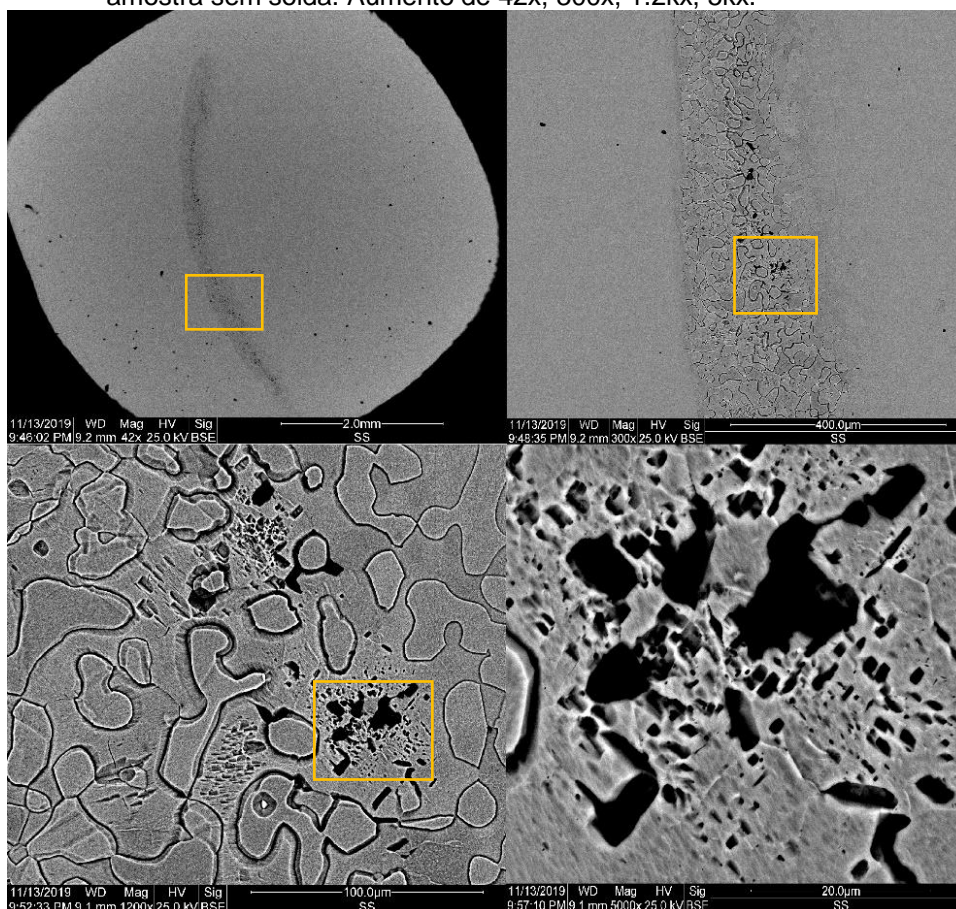
6.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

O MEV foi realizado na superfície das amostras após a última polarização, para se ter melhor conhecimento de como a corrosão agiu e para auxiliar em melhor entendimento foi realizado uma quantificação dos elementos presentes na composição em algumas regiões através do sinal de EDS.

Nas Figuras 21 e 22, são apresentadas as micrografias da amostra sem solda na região da fresta.

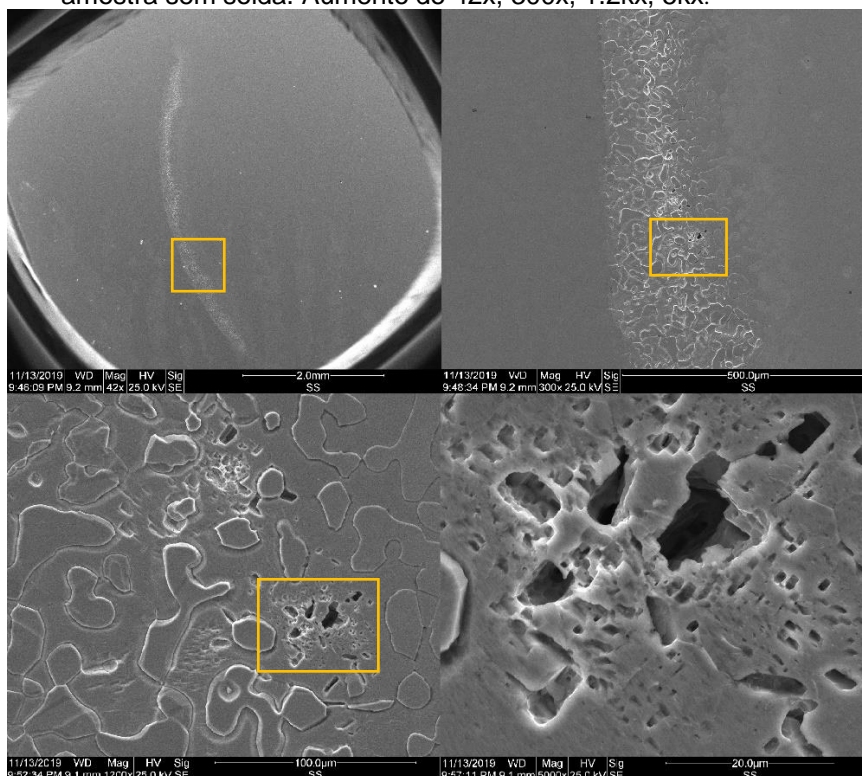
Analisando-as observa-se que corrosão ocorre na fase ferrita, mas nos contornos de grãos da austenita e que há ocorrência de pites próximos a essas regiões. Isto pode estar ligado a formação de fases deletérias, como fase σ , que fragiliza o material reduzindo a resistência à corrosão, como citado no referencial teórico.

Figura 21: Micrografias SEM - BSE após polarização, região da fresta na amostra sem solda. Aumento de 42x, 300x, 1.2kx, 5kx.



Fonte: Autoria Própria.

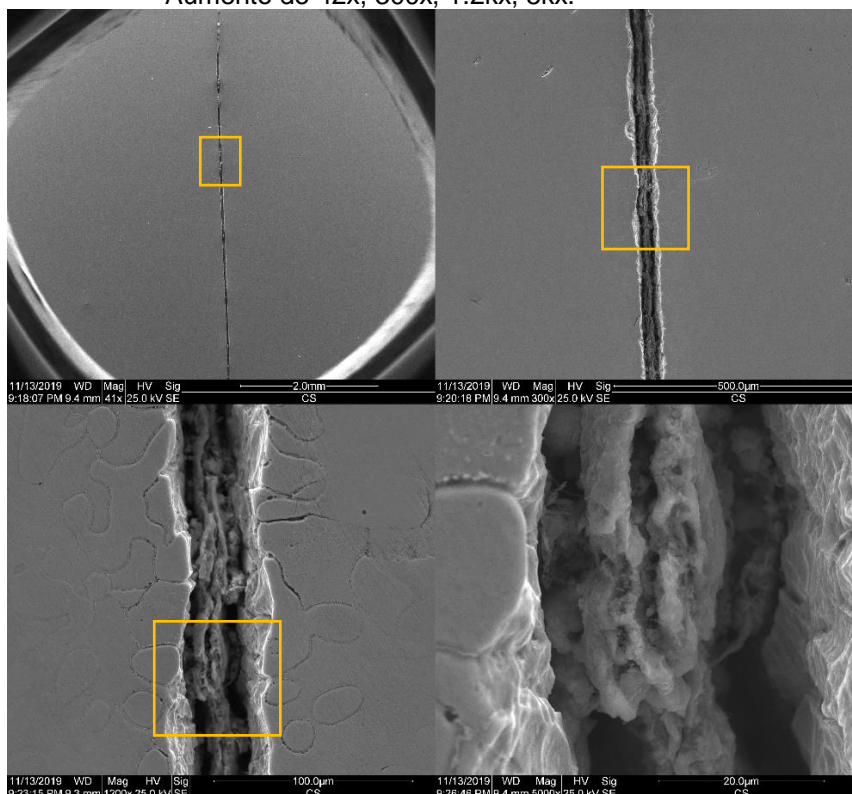
Figura 22: Micrografias SEM - SE após polarização, região da fresta na amostra sem solda. Aumento de 42x, 300x, 1.2kx, 5kx.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 23 é possível observar a superfície da amostra soldada, na região do cordão de solda.

Figura 23: Micrografias SEM - SE após polarização, região da soldada.
Aumento de 42x, 300x, 1.2kx, 5kx.

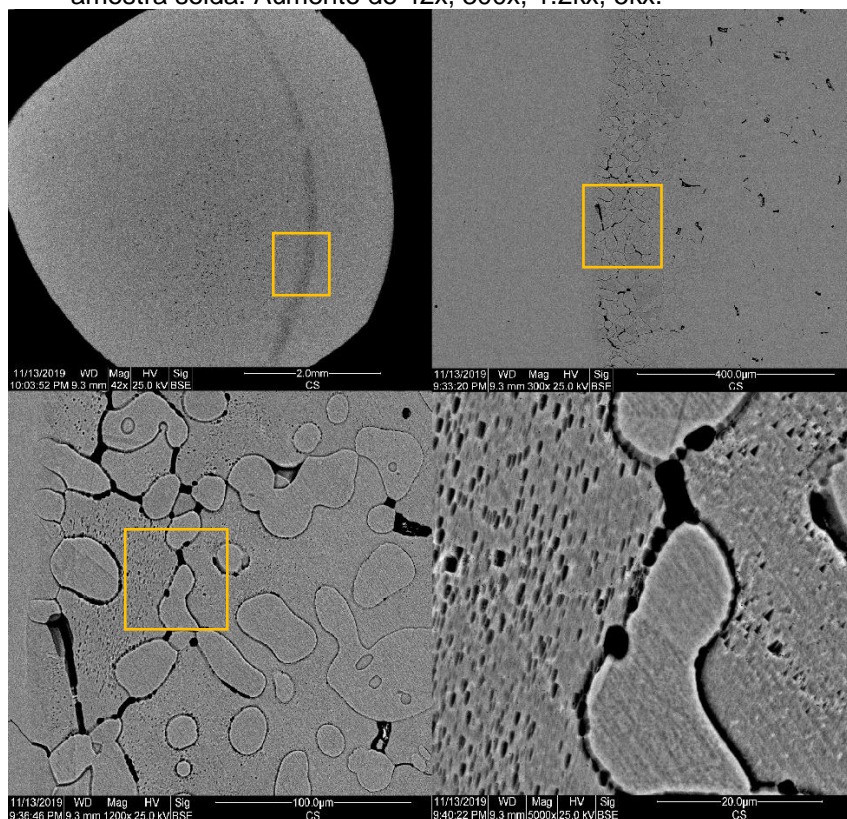


Fonte: Autoria Própria.

Observa-se na Figura 23 através dos aumentos 1,2 kx e 5kx que o cordão de solda foi corroído pelos íons cloreto .

Na Figuras 24, são apresentadas as micrografias da amostra soldada na região da fresta.

Figura 24: Micrografias SEM - BSE após polarização, região da fresta na amostra solda. Aumento de 42x, 300x, 1.2kx, 5kx.



Fonte: Autoria Própria.

É observado que a corrosão na região da fresta, na amostra soldada, teve a mesma característica que a da amostra sem solda, pois a corrosão também ocorre na fase ferrita entorno dos grãos da austenita. Porém, os pites formados apresentam menores diâmetros quando comparado com a amostra sem solda.

Através do EDS, foi possível obter a análise qualitativa de elementos nas regiões de estudo, onde estes estão apresentados na Tabela 7 para amostra não soldada e Tabela 8 para a amostra soldada.

Analisando a composição dos elementos químicos obtidos pelo o EDS com a composição química da Tabela 2, mostra que a composição obtida pelo o EDS foi muito próximo da composição fornecida pelo fornecedor.

Tabela 7: Composição em % de peso dos elementos químicos na amostra sem solda.

Elemento	Região Fresta (%)	Região afastada da fresta (%)
O	6,02	4,85
Si	0,97	1,16
Cr	21,41	23,29
Mn	0,80	1,19
Fe	52,78	62,25
Ni	3,77	5,64
Outros	14,25	1,63

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8: Composição em % de peso dos elementos químicos na amostra soldada.

Elemento	Região Soldada (%)	Região afastada da solda (%)
O	4,43	3,83
Si	1,04	1,33
Cr	21,26	23,95
Mn	0,98	1,33
Fe	55,30	62,97
Ni	4,19	4,95
Outros	12,79	1,65

Fonte: Autoria Própria.

Quando se analisa as duas tabelas pode-se observar que tanto na amostra soldada quanto na amostra sem solda houve redução no teor dos elementos como Si, Ni, Cr, Mn, Fe e aumento no O, isto mostra que realmente houve a formação de óxidos e perda de material.

A redução no teor de cromo, nas regiões onde ocorreu a corrosão, evidencia que possa ter ocorrido formação de fase sigma. Pois essa se forma pela decomposição da fase ferrita, e sua nucleação nos AID ocorre preferencialmente nas interfaces α/γ , coerente com apresentado por Londoño (2001).

7 CONCLUSÃO

Através dos dados obtidos experimentalmente e das discussões abordadas foi possível concluir:

- A soldagem influenciou nas propriedades de corrosão do material, deixando o mais susceptível.
- Com a realização da curva de polarização potenciodinâmica foi possível concluir que o material possui um comportamento padrão na formação da fresta tendo pouca alteração nos valores do potencial de quebra tanto para amostra soldada quanto para não soldada. A densidade da corrente na amostra soldada foi 10x maior que na amostra sem solda e houve redução na região de passivação, evidenciando que a solda deixou o material mais susceptível;
- Através do MEV foi possível observar como se caracterizou a corrosão no material, que se deu preferencialmente na fase ferrita entorno do grão de austenita. E através do EDS foi possível a quantificação dos elementos químicos nas regiões estudadas, onde apresentou menores valores dos elementos químicos nas regiões corroídas evidenciando a redução destes em forma de óxidos. Os menores valores de cromo nestas regiões podem ser evidencias de formação de fase deletérias, como a fase sigma.

Com os resultados obtidos dos ensaios foi possível cumprir todos os objetivos propostos para esse trabalho.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para uma visão mais abrangente nos estudos da caracterização da resistência corrosão do AID AISI 318, apresento as seguintes sugestões:

- Investigar a formação das fases sigma e chi;
- Verificar a influência da temperatura no potencial de corrosão;
- Caracterização da corrosão por meio da técnica de ruído eletroquímico.
- Realizar investigação da microestrutura do material através do MEV em todas as etapas dos ensaios eletroquímicos.

REFERÊNCIAS

ASTM E407-07(2015)e1, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

ASTM G61-86(2018), Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org.

BARROS, Artur Pratti de; MOREIRA, Filipe Luppi. **INFLUÊNCIA DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO À 475°C NA SENSITIZAÇÃO E NOS POTENCIAIS DE PITE E DE PROTEÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750**. 2013. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Blucher, 2008. 652 p. Revisão técnica André Luiz V. da Costa.

GALDINO, J. C. A. D. **Aços inoxidáveis utilizados na indústria petroquímica: microestrutura versus corrosão por pite**. 2015. 33f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2015.

GEMELLI, Enori. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: Ltc, 2014. 183 p.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1996. 345 p.

LESSA, Cleber Rodrigo de Lima. **QUALIFICAÇÃO MECÂNICA E METALÚRGICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM FHPP APLICADO NO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX SAF 2205**. 2016. 123 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LONDOÑO, A. J. R. **Precipitação de fases intermetálicas e austenita secundária na ZAC de soldagens multipasse de aços inoxidáveis duplex.** São Paulo, 2001. Tese (Doutorado) – Departamento de Eng. Metalúrgica, Escola Politécnica, U. de São Paulo.

LOPES, Jorge Teofilo de Barros. **Influência da presença de fases frágeis e da temperatura nas propriedade de propagação de trinca por fadiga do aço inoxidável duplex UNS S31803.** 2006. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264991>>. Acesso em: 18 out. 2018.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia.** 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2009. 362 p.

NUNES, Laerece de Paula. **Fundamentos de Resistência à corrosão.** Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 2007. 330 p.

PECEQUILO, Critiane Vargas; PANOSSIAN, Zehbour. Revisando Conceito: Corrosão em fresta - Parte 3. **Corrosão e Proteção: Ciência e Tecnologia em corrosão,** São Paulo, v. 47, n. 10, p.18-32, jun. 2013.

SENATORE, Marcelo; FINZETTO, Leandro; PEREA, Eduardo. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. **Rem:** Revista Escola de Minas, [s.l.], v. 60, n. 1, p.175-181, mar. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672007000100027>.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2006. 646 p.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: processos e metalurgia.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1992. 494 p.

ZHONG, H. et al. Effect of cooling rate on solidification structure and linear contraction of a duplex stainless steel. *Research & Development*, v. 9, n. 3, p. 239 -243, 2012.