

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

EFEITO DO CICLO TÉRMICO NA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL 316L SOLDADA COM CONSUMÍVEL 317L

DIEGO BASSANI

SÃO PAULO

2013

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

EFEITO DO CICLO TÉRMICO NA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL 316L SOLDADA COM CONSUMÍVEL 317L

Trabalho de Formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Orientadora: Prof. Dr. Neusa Alonso Falleiros

DIEGO BASSANI

SÃO PAULO
2013

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo constante incentivo e carinho durante meu curso de graduação.

À Böhler Welding Group, por ter fornecido as amostras para a confecção dos corpos de prova deste trabalho.

Aos soldadores Carlos Antônio Silva e Noel Rosa, por terem confeccionado as chapas de aço inoxidável.

Ao Sr. Adilson Moreno, por todo o apoio dado a mim.

Ao Sr. Antônio Lívio da Silva Nunes e José Wilmar Calderón pela valiosa ajuda em todos os momentos deste trabalho.

À professora Neusa Alonso Falleiros, pela orientação, atenção e pelo inestimável conhecimento ensinado durante todo o curso de engenharia, tanto na sala de aula quanto no desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso.

A todos vocês, muito obrigado!

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto do processo de soldagem "FCAW" nas características de corrosão de chapas de aço AISI 316L soldadas com consumível de especificação AWS A 5.22 E316LT1-4/1.

Esta avaliação foi feita através de três ensaios: Ataque metalográfico segunda a prática A da norma ASTM A262, Análise de curvas de polarização e ensaio de imersão em cloreto férrico segundo método A da norma ASTM G48-03.

Observamos que o aço AISI 316L possui grande resistência a corrosão por pite, e o processo de soldagem FCAW não teve efeitos significativos para a degradação desta propriedade.

Abstract

This work aims to evaluate the impact of the welding process "FCAW" on the characteristics of corrosion in steel plates AISI 316L welded with consumable AWS 5:22 E316LT1-4/1.

This evaluation was performed by three tests: Attack metallographic based on ASTM A262, analysis of polarization curves and immersion test in ferric chloride second method A of ASTM G48-03.

We observed that the AISI 316L steel has a high resistance to pitting corrosion, and welding process FCAW no significant effects for the degradation of this property.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Influência da quantidade de cromo na corrosão atmosférica de aço baixo carbono (Sedriks, 1996)	11
Figura 2: Comparação entre as designações AISI e UNS para aços inoxidáveis ferríticos.....	12
Figura 3: Composição química dos aços inoxidáveis da série 300 (Schweitzer, 2007).....	14
Figura 4: Aços inoxidáveis austeníticos (Sedriks, 1996)	15
Figura 5: Processo de soldagem MIG/MAG (Wainer, 1992).....	17
Figura 6: Esquema dos equipamentos para o processo MIG/MAG (Wainer, 1992)	18
Figura 7: Pistola manual refrigerada a ar (Wainer, 1992)	19
Figura 8: Pistola manual refrigerada a água (Wainer, 1992).....	19
Figura 9: Representação da propagação de pite (Zanetic, 2001).....	22
Figura 10: Representação da preparação dos corpos de prova para realização dos ensaios	25
Figura 11: Direção do corte da Chapa 1. A linha pontilhada vermelha indica a direção que a amostra foi cortada.....	26
Figura 12: Corpo de prova 3 para ensaio de imersão	27
Figura 13: Cloreto férrico utilizado no ensaio de perda de massa	28
Figura 14: Posicionamento dos corpos de prova para ensaio de imersão antes da imersão em solução de cloreto férrico	28
Figura 15: Corpos de prova imersos em solução de cloreto férrico.....	29
Figura 16: Amostras imersas em solução de cloreto férrico após 72 horas de ensaio	30

Figura 17: Célula plana utilizada na polarização potenciodinâmica (Cordeiro, 2001)	32
Figura 18: Corpo de prova para ataque metalográfico	33
Figura 19: Taxa de corrosão obtida do ensaio de imersão em cloreto férrico	35
Figura 20: Comparação entre os resultados obtidos por (Bassani), (Zanetic, 2001) e (Kobayash, 1985) para ensaio de imersão em cloreto férrico	36
Figura 21: Superfície superior da amostra 1 após ensaio de imersão em cloreto férrico	37
Figura 22: Superfície inferior da amostra 1 após ensaio de imersão em cloreto férrico	38
Figura 23: Superfície superior da amostra 2 após ensaio de imersão em cloreto férrico	38
Figura 24: Superfície inferior da amostra 2 após ensaio de imersão em cloreto férrico	39
Figura 25: Superfície superior da amostra 3 após ensaio de imersão em cloreto férrico	39
Figura 26: Superfície inferior da amostra 3 após ensaio de imersão em cloreto férrico	40
Figura 27: Evidências da região de apoio da amostra nos bastões de vidro	41
Figura 28: Sessão transversal do pite formado no ensaio de imersão em cloreto férrico.....	42
Figura 29: Resultado do ensaio de polarização potenciodinâmica para ZAC 3	43
Figura 30: Curvas de polarização para o metal base (aço 316L)	44
Figura 31: Curvas de polarização para a região adjacente ao cordão de solda (região que contém a ZAC)	44
Figura 32: Curvas de polarização para a região do cordão de solda (aço 317L)	45
Figura 33: Ajuste linear para a determinação do potencial de pite para o ensaio Base 2	46
Figura 34: Pite formado na região do metal base. Aumento 100X.....	48
Figura 35: Pite formado na região do metal base. Aumento 200X.....	48

Figura 36: Pite formado na região do cordão de solda. Aumento 100X	49
Figura 37: Pite formado na região do cordão de solda. Aumento 200X	49
Figura 38: Corpo de prova após ataque metalográfico	50
Figura 39: Corpo de prova após ataque metalográfico	51
Figura 40: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Cordão de solda. Aumento 50X	52
Figura 41: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Interface entre cordão de solda e metal base. Aumento 50X	52
Figura 42: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Região distante 1mm do cordão de solda. Aumento 50X	53
Figura 43: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Região distante 5mm do cordão de solda. Aumento 50X	53
Figura 44: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Região distante 9mm do cordão de solda. Aumento 50X	54
Figura 45: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Região distante 12mm do cordão de solda. Aumento 50X	54
Figura 46: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Interface entre cordão de solda e metal base. Aumento 200X	55
Figura 47: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Região distante 5mm do cordão de solda. Aumento 500X	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condições de soldagem para as chapas de aço inoxidável.....	22
Tabela 2: Composição química das chapas de aço 316L	23
Tabela 3: Dimensões das chapas de aço antes e após a soldagem	23
Tabela 4: Composição química do arame tubular utilizado como consumível de soldagem	23
Tabela 5: Massa dos corpos de prova para o ensaio de imersão	26
Tabela 6: Dimensões dos corpos de prova para ensaio de imersão	27
Tabela 7: Dimensões dos corpos de prova para levantamento das curvas de polarização	31
Tabela 8: Taxa de corrosão para imersão em cloreto férrico.....	34
Tabela 9: Composição química para a liga 6 (Kobayash, 1985)	36
Tabela 10: Comparação entre os resultados obtidos por (Bassani), (Zanetic) e (Kobayash) para ensaio de imersão em cloreto férrico	36
Tabela 11: Potenciais de pites encontrados para os ensaios de polarização potenciodinâmica ...	46
Tabela 12: Comparação entre os resultados de potencial de pite para o aço 316L solubilizado para os corpos de provas ensaiados por (Botton, 2008) e para os corpos de prova ensaiados neste trabalho.....	47

Conteúdo

1	Introdução	10
2	Revisão Bibliográfica	10
2.1	Aços Inoxidáveis	10
2.1.1	Aços Inoxidáveis Austeníticos	12
2.1.2	Aço inoxidável 316/316L.....	15
2.1.3	Aço Inoxidável 317/317L.....	16
2.2	Processo de Soldagem	16
2.2.1	Processo de Soldagem MIG/MAG	16
2.2.2	Soldabilidade de Aços Inoxidáveis Austeníticos	19
2.2.3	Resistência a Corrosão de Soldas de Aço Inoxidável Austenítico.....	20
2.3	Corrosão por Pite.....	21
3	Materiais e Métodos	22
3.1	Preparação das Amostras	22
3.2	Imersão em Cloreto Férrico	26
3.2.1	Preparação dos Corpos de Prova	26
3.2.2	Descrição do Ensaio.....	27
3.3	Polarização Potenciodinâmica.....	30
3.3.1	Preparação dos Corpos de Prova	30
3.3.2	Descrição do Ensaio.....	31

3.4	Exame Metalográfico Baseado na Prática A da Norma ASTM A262	32
3.4.1	Preparação do corpo de prova.....	32
3.4.2	Descrição do ensaio	33
4	Resultados e Discussão.....	33
4.1	Imersão em Cloreto Férrico	33
4.2	Polarização Potenciodinâmica.....	42
4.3	Exame Metalográfico baseado na Prática A da Norma ASTM A262	50
5	Conclusão	56
6	Bibliografia.....	57

1 Introdução

A operação de soldagem, apesar de ser um processo bastante prático para unir chapas metálicas, pode alterar as propriedades do material devido ao intenso ciclo térmico resultante da energia necessária para fundir as partes da peça. O objetivo deste trabalho é verificar se a soldagem de chapas de aço AISI 316L soldadas com consumível de composição química 317L altera a resistência à corrosão por pite desse material.

Foram fabricadas duas chapas de aço soldada pelo processo de soldagem por arame tubular (FCAW), a partir das quais foram confeccionados os corpos de prova para os ensaios de imersão em cloreto férrico, polarização potenciodinâmica e ataque metalográfico baseado na prática A da norma ASTM A262.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Aços Inoxidáveis

A perda de peças metálicas por ação da corrosão tem preocupado engenheiros e metalurgistas que procuram constantemente não só aperfeiçoar ou desenvolver novos métodos de proteção, como também aperfeiçoar ou criar novas ligas que apresentem a característica de resistência à corrosão (CHIAVERINI, 1998). Para tanto, uma classe de materiais que é amplamente usada em situações onde se deseja evitar problemas devido à corrosão são os *aços inoxidáveis*.

Os *aços inoxidáveis* não são um único tipo de material, como o nome sugere, mas sim um amplo grupo de ligas metálicas, cada uma possuindo suas próprias propriedades físicas, mecânicas e de resistência à corrosão (Schweitzer, 2007).

Estes aços são produzidos tanto como ligas fundidas (Alloy Casting Institute – ACI) quanto como em forma forjada (American Iron and Steel Institute – AISI) (Schweitzer, 2007).

Podemos assim definir o *aço inoxidável* como uma liga ferrosa contendo um mínimo de aproximadamente 11% de cromo em sua composição. Esta quantidade de cromo previne a

formação de ferrugem nesta liga em ambientes poluídos, como mostra a Figura 1. É devido a esta característica que a designação popular “*inoxidável*” é derivada para estes tipos de aço. A sua resistência a corrosão se dá devido a um filme bastante fine presente em sua superfície, conhecido como **camada passiva**, o qual se auto regenera em diferentes tipos de ambientes ao qual é exposto (Sedriks, 1996).

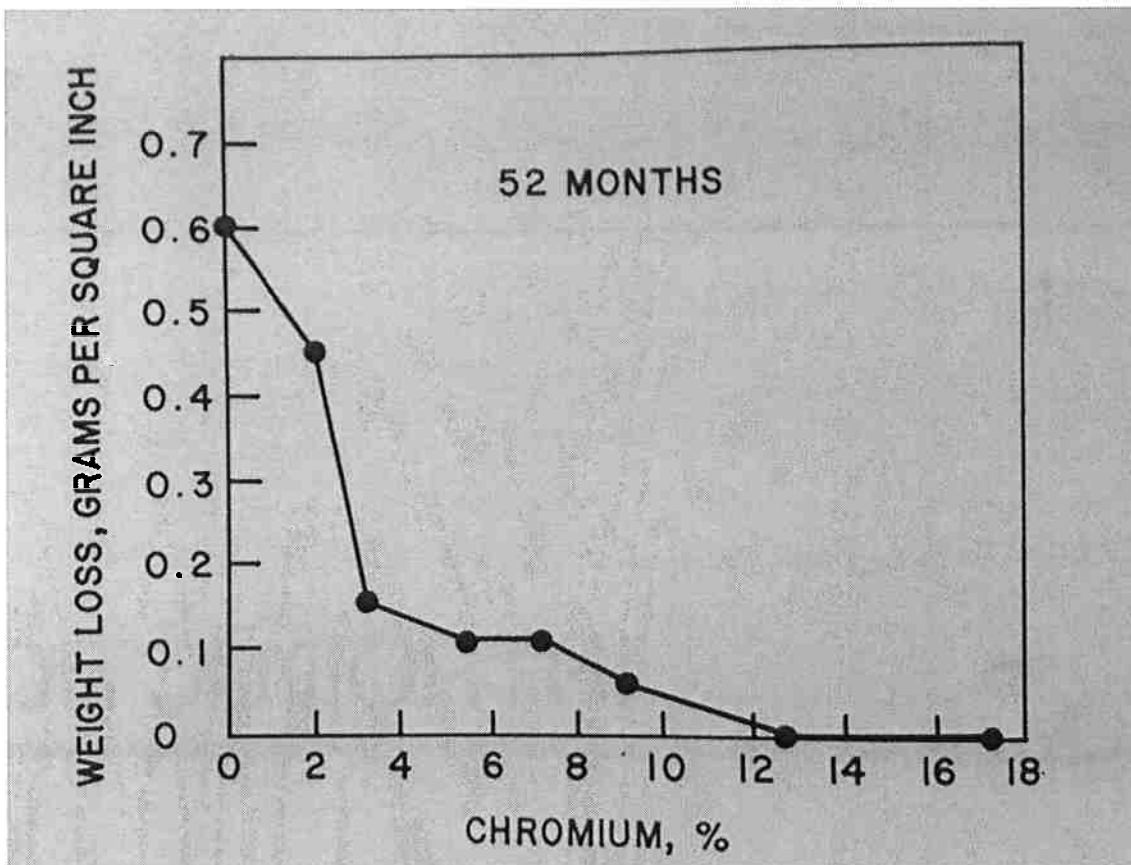


Figura 1: Influência da quantidade de cromo na corrosão atmosférica de aço baixo carbono (Sedriks, 1996)

Atualmente, mais de 180 tipos diferentes de ligas são reconhecidas como pertencentes ao grupo dos aços inoxidáveis, e a cada ano surgem mais ligas novas ou modificações das existentes. Em algumas ligas de aço inoxidável, a quantidade de cromo pode chegar a 30%, e muitos outros elementos podem ser adicionados para prover propriedades específicas ou então facilitar o processo de fabricação. Por exemplo, níquel, nitrogênio e molibdênio são adicionados para melhorar a resistência à corrosão; carbono, molibdênio, nitrogênio, titânio, alumínio e cobre melhoram a resistência do aço; e enxofre e selênio melhoram a usinabilidade (Sedriks, 1996).

Existem três diferentes sistemas de classificação usados para identificar os aços inoxidáveis. O primeiro deles está relacionado à estrutura metalúrgica e divide estas ligas em famílias de aço inoxidável. Os outros dois, chamados de “*AISI Numbering System*” e “*Unified Numbering System (UNS)*”, foram desenvolvidos pela ASTM e SAE para serem aplicados a todas as ligas comerciais, definindo a composição química específica da liga. A Figura 2 mostra uma comparação entre as designações AISI e UNS de alguns dos aços inoxidáveis comerciais (Schweitzer, 2007).

AISI Type	UNS Designation	AISI Type	UNS Designation
405	S40500	446	S44600
409	S40900	439	S43035
429	S42900	444	S44400
430	S43000	26-1	S44627
430F	S43020	26-3-3	S44660
430FSe	S43023	29-4	S44700
434	S43400	29-4C	S44735
436	S43600	29-4-2	S44800
442	S44200		

Figura 2: Comparação entre as designações AISI e UNS para aços inoxidáveis ferríticos

As várias ligas de aço inoxidável podem ser divididas em sete famílias: ferríticos, martensíticos, austeníticos, superferríticos, duplex (ferrítico- austeníticos), superausteníticos e endurecidos por precipitação

2.1.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

A família dos aços inoxidáveis austeníticos representa os aços inoxidáveis mais utilizados atualmente. Estes materiais não são magnéticos, possuem estrutura cúbica de face centrada e possuem boas propriedades mecânicas. O sistema de classificação AISI identifica a maioria dos aços inoxidáveis austeníticos com números iniciando do 300, o que gerou o termo “série 300” para estes tipos de aço inoxidável (Schweitzer, 2007).

Os aços inoxidáveis austeníticos são caracterizados por apresentar boa resistência à corrosão, elevada tenacidade e boa soldabilidade. A estrutura austenítica (CFC) é estabilizada à

temperatura ambiente pela adição de níquel e outros estabilizadores desta estrutura, como manganês, por exemplo. A estrutura austenítica os torna especialmente interessantes tanto para aplicações criogênicas (por não sofrerem transição dúctil-frágil), como para aplicações à elevada temperaturas, em função da resistência ao amolecimento e resistência à deformação a quente (COSTA E SILVA, 1988).

A composição química dos aços inoxidáveis da série 300 está listada na Figura 3. Uma visão geral dos aços inoxidáveis desta família é mostrada na Figura 4. Melhorias na resistência à corrosão localizada, corrosão generalizada e corrosão a altas temperaturas são conseguidas através de adições de cromo, níquel, molibdênio ou outras pequenas quantidades de elementos de liga (Schweitzer, 2007).

AISI Type	Nominal Composition (%)					
	C Max	Mn Max	Si Max	Cr	Ni	Others ^a
201	0.15	7.5 ^b	1.00	16.00–18.00	3.50–5.50	0.25 max N
202	0.15	10.00 ^c	1.00	17.00–19.00	4.00–6.00	0.25 max N
205	0.25	15.50 ^d	0.50	16.50–18.00	1.00–1.75	0.32/0.4 max N
301	0.15	2.00	1.00	16.00–18.00	6.00–8.00	
302	0.15	2.00	1.00	17.00–19.00	8.00–10.00	
302B	0.15	2.00	3.00 ^e	17.00–19.00	8.00–10.00	
303	0.15	2.00	1.00	17.00–19.00	8.00–10.00	0.15 min S
303(Se)	0.15	2.00	1.00	17.00–19.00	8.00–10.00	0.15 min Se
304	0.08	2.00	1.00	18.00–20.00	8.00–12.00	
304L	0.03	2.00	1.00	18.00–20.00	8.00–12.00	
304N	0.08	2.00	1.00	18.00–20.00	8.00–10.50	0.1/0.16 N
305	0.12	2.00	1.00	17.00–19.00	10.00–13.00	
308	0.08	2.00	1.00	19.00–21.00	10.00–12.00	
309	0.20	2.00	1.00	22.00–24.00	12.00–15.00	
309S	0.08	2.00	1.00	22.00–24.00	12.00–15.00	
310	0.25	2.00	1.50	24.00–26.00	19.00–22.00	
310S	0.08	2.00	1.50	24.00–26.00	19.00–22.00	
314	0.25	2.00	3.00 ^f	23.00–26.00	19.00–22.00	
316	0.08	2.00	1.00	16.00–18.00	10.00–14.00	2.00–3.00 Mo
316F	0.08	2.00	1.00	16.00–18.00	10.00–14.00	1.75–2.50 Mo
316L	0.03	2.00	1.00	16.00–18.00	10.00–14.00	2.00/3.00 Mo
316N	0.08	2.00	1.00	16.00–18.00	10.00–14.00	2.00–3.00 Mo
317	0.08	2.00	1.00	18.00–20.00	11.00–15.00	3.00–4.00 Mo
317L	0.03	2.00	1.00	18.00–20.00	11.00–15.00	3.00–4.00 Mo
321	0.08	2.00	1.00	17.00–19.00	9.00–12.00	5 × C min Cb-Ta
330	0.08	2.00	1.5 ^g	17.00–20.00	34.00–37.00	0.10 TA
347	0.08	2.00	1.00	17.00–19.00	9.00–13.00	0.20 Cb
348	0.08	2.00	1.00	17.00–19.00	9.00–13.00	10 × C min Cb-Ta
						10C min Cb-Ta
20Cb3	0.07	0.75	1.00	20.0	29.0	2.0 Mo
904L	0.02	—	—	21.0	25.5	3.0 Cu
						8 × C min Cb-Ta
						4.7 Mo
						1.5 Cu

Figura 3: Composição química dos aços inoxidáveis da série 300 (Schweitzer, 2007)

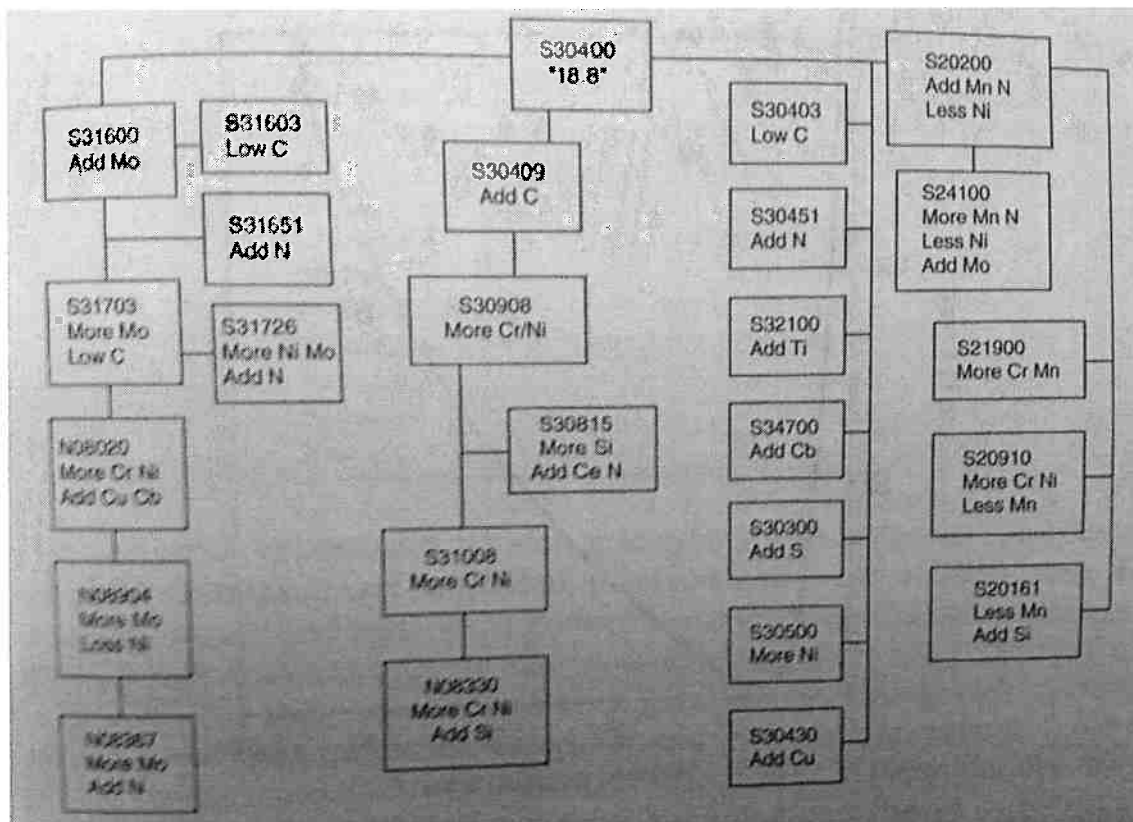


Figura 4: Aços inoxidáveis austeníticos (Sedriks, 1996)

2.1.2 Aço inoxidável 316/316L

Estes aços inoxidáveis à base de cromo e níquel possuem adições de molibdênio entre 2 e 3%.

O molibdênio aumenta substancialmente a resistência à corrosão por pite em sistemas contendo cloretos e melhora a resistência geral à corrosão para a maioria dos tipos de corrosão.

No geral, estas ligas apresentam maior resistência à corrosão do que os aços inoxidáveis do tipo 304. À exceção de ácidos oxidantes, como o ácido nítrico, as ligas de aço inoxidável 316 irão prover satisfatória resistência aos mesmos agentes corrosivos suportados pelos aços 304 (Schweitzer, 2007).

O aço 316L é a versão baixo carbono do aço 316 e oferece maior prevenção à excessiva precipitação intergranular de carbonetos de cromo durante a operação de soldagem e alívio de tensões (Schweitzer, 2007).

2.1.3 Aço Inoxidável 317/317L

O aço inoxidável do tipo 317 contém maiores quantidades de molibdênio, cromo e níquel do que o tipo 316. Como resultado da maior adição de elementos de liga, esses aços apresentam maior resistência à corrosão por pite do que o tipo 316 em vários ambientes encontrados em processos industriais. Entretanto, este tipo de aço ainda está sujeito à corrosão sob tensão causada por cloretos. A liga é não-magnética e não endurecida sob as condições de recozimento, mas se torna levemente magnética quando trabalhadas a frio. As ligas do tipo 317 são comumente empregadas nas indústrias química, de petróleo e de papel em trocadores de calor, evaporadores e tubos de condensação (Schweitzer, 2007).

As ligas do tipo 317L são a versão baixo carbono das ligas 317. Assim como a liga 316L, a liga 317L oferece maior prevenção à excessiva precipitação intergranular de carbonetos de cromo durante a operação de soldagem e alívio de tensões (Schweitzer, 2007).

O aço inoxidável 317L é usado em operações de soldagem, brasagem, e outras operação de curta exposição a elevadas temperaturas.

2.2 Processo de Soldagem

2.2.1 Processo de Soldagem MIG/MAG

Os processos MIG (metal inert gas) e MAG (metal active gas) utilizam como fonte de calor um arco elétrico mantido em um eletrodo nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região de soldagem é feita por fluxo de gás inerte (MIG) ou gás ativo (MAG). A soldagem pode ser semi-automática ou automática (Wainer, 1992). A Figura 5 mostra esquematicamente o processo. O consumível utilizado neste processo de soldagem pode ser tanto um arame sólido quanto um arame tubular, que contém em seu interior um fluxo constituído de pós metálicos, responsável pela formação da escória durante a soldagem.

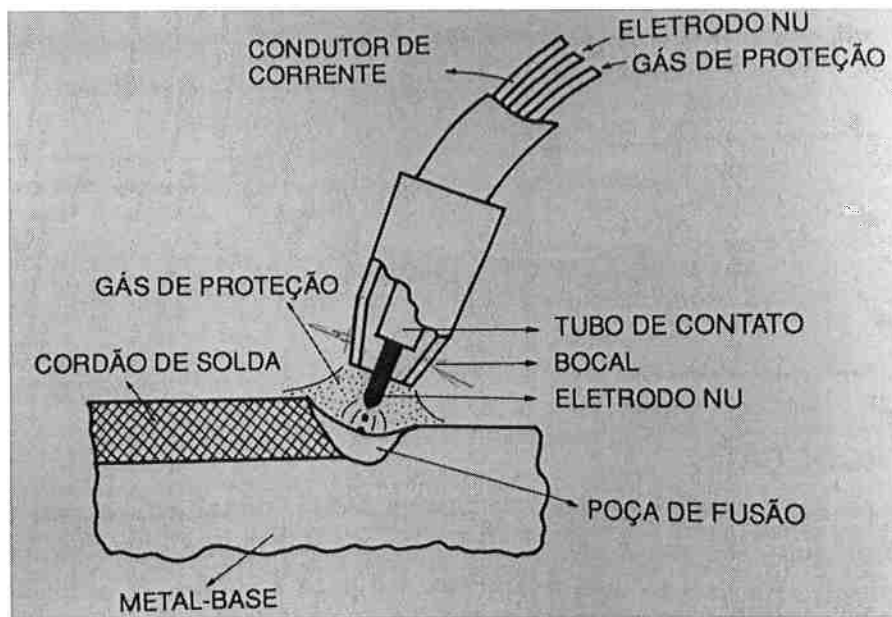


Figura 5: Processo de soldagem MIG/MAG (Wainer, 1992)

Os primeiros trabalhos com estes processos foram feitos com gás ativo, em peças de aço, no início dos anos 30. O processo foi inviabilizado e, somente após a II guerra mundial, foi possível viabilizá-lo, primeiro para soldagem de magnésio e suas ligas e em seguida para outros metais, sempre, porém, com gás inerte. Algum tempo depois foi introduzido no lugar do argônio o CO_2 , parcial ou totalmente, na soldagem de aços.

O processo MIG é adequado para a soldagem de aços-carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e ligas, magnésio e ligas e cobre e ligas. O processo MAG é utilizado na soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga.

Os equipamentos básicos para a soldagem MIG/MAG são mostrados esquematicamente na Figura 6.

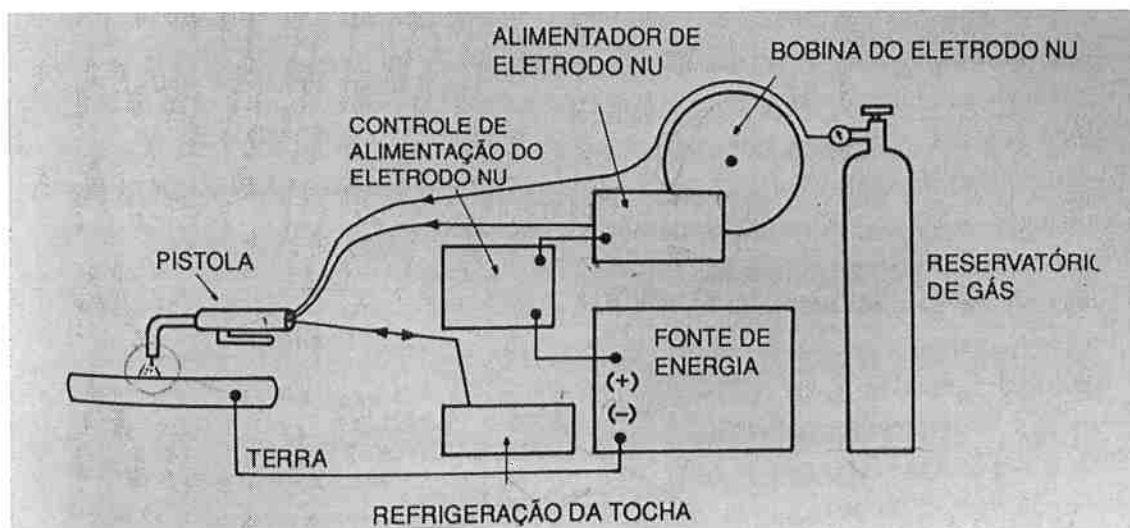


Figura 6: Esquema dos equipamentos para o processo MIG/MAG (Wainer, 1992)

A fonte de energia pode ser um gerador ou um retificador, ambos com características de potencial constante. A soldagem pelo processo MIG/MAG é geralmente feita em corrente contínua, que pode até ser pulsada.

O alimentador de eletrodo é ligado à fonte de energia e possui controle para velocidade de alimentação; a velocidade junto com a tensão selecionada na fonte determina o valor da corrente de soldagem.

A pistola pode ser refrigerada a ar ou a água, dependendo da escolha da corrente de soldagem, do tipo de gás de proteção e do tipo de junta. As figuras Figura 7 e Figura 8 mostram dois tipos de pistola para o processo MIG/MAG.

O reservatório de gás é um cilindro de aço com o gás adequado à soldagem. Acoplado à válvula de abertura existe, geralmente, um regulador de pressão e um medidor e controlador de vazão do gás de proteção.

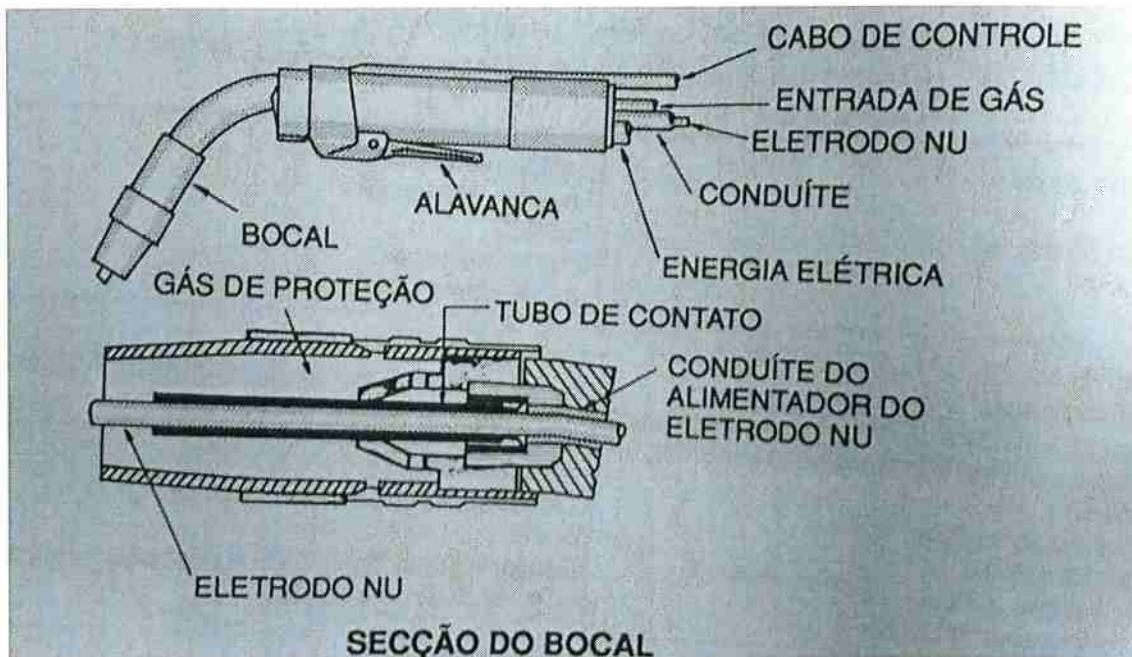


Figura 7: Pistola manual refrigerada a ar (Wainer, 1992)

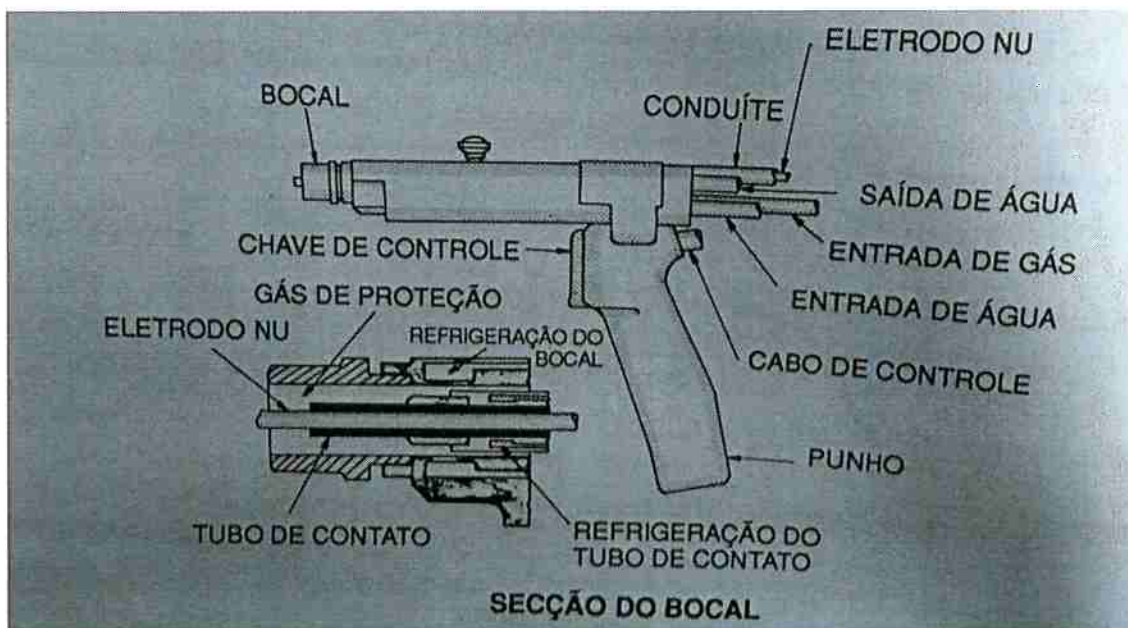


Figura 8: Pistola manual refrigerada a água (Wainer, 1992)

2.2.2 Soldabilidade de Aços Inoxidáveis Austeníticos

Para os aços inoxidáveis com teor de cromo até 11%, é formada ferrita delta em grande proporção durante a operação de soldagem. Acima deste teor, torna-se cada vez maior a presença de austenita, que se torna a única fase a solidificar quando o teor de níquel ultrapassa

14%. Por outro lado, quando é feito o resfriamento lento a partir de 1000 °C, para teores de níquel inferiores a 1,5%, forma-se apenas ferrita delta, entre 1,5 e 4% forma-se ferrita delta e austenita e acima somente austenita. No resfriamento rápido forma-se martensita, quando o teor de níquel for insuficiente para compensar o teor de cromo (Chiaverini, 2012).

Quando a quantidade de cromo no aço inoxidável é de 18 %, teores de níquel da ordem de 8 a 9 % já são suficiente para garantir uma microestrutura austenítica após resfriamento até a temperatura ambiente. Entretanto, quando o resfriamento é muito rápido, como no caso da soldagem, não há tempo suficiente para a ferrita delta formada em altas temperaturas se transformar totalmente em austenita, sendo retida parcialmente à temperatura ambiente. (Chiaverini, 2012).

Entretanto, pode haver precipitação de carbeto durante o resfriamento, principalmente se o teor de carbono for significativamente alto.

Os aços inoxidáveis austeníticos são menos sensíveis ao trincamento a frio que ocorre mais comumente nos aços inoxidáveis martensíticos, quando soldados. Entretanto, podem sofrer trincamento a quente (nos contornos das dendritas durante a contração associada ao resfriamento). A presença parcial de ferrita no metal de solda austenítico reduz um pouco a tendência ao trincamento a quente. A zona afetada pelo calor dos aços inoxidáveis austeníticos também podem ser sensível ao trincamento a quente intergranular, principalmente na região mais próxima ao metal de solda. Em geral o trincamento a quente está associado à segregação (durante a solidificação), que provoca a formação de fases ainda líquidas (com baixo ponto de fusão) nos contornos de grãos recém-solidificados.

2.2.3 Resistência a Corrosão de Soldas de Aço Inoxidável Austenítico

As diferenças de composição química entre as fases austenita e ferrita pode causar a formação de células de corrosão galvânica dentro do aço inox, limitando o teor de ferrita admissível no aço inoxidável austenítico. A presença de defeitos na superfície metálica também pode criar condições favoráveis à corrosão, como o acúmulo de agentes corrosivos ou a formação de frestas. A corrosão sob tensão pode acontecer nos aços inoxidáveis austeníticos submetidos

simultaneamente a tensões de tração (que podem surgir como tensões residuais pós-soldagem) e ataque por soluções contendo cloretos (Chiaverini, 2012).

2.3 Corrosão por Pite

A corrosão por pite é uma forma de corrosão localizada, em que os agentes corrosivos atacam a superfície ocasionando a formação de pites. Este tipo de corrosão pode ser bastante destrutivo, uma vez que o pite perfura a estrutura metálica, ocasionando estragos em seu interior que não são evidentes na superfície.

Entretanto, pequenos pites que não ocasionam a perfuração do material podem ser tolerados e até mesmo são aceitos em equipamentos de engenharia, devido a razões econômicas. Devido a esta importância, existem várias pesquisas para se desenvolver técnicas capazes de prever as condições propícias para o surgimento de pites em estruturas metálicas.

A propagação do pite envolve a dissolução do metal e manutenção de um ambiente ácido na superfície do pite, através da hidrólise dos íons de metal dissolvidos. A reação anódica de dissolução do metal na superfície do pite, $M \rightarrow M^{+n} + n e^-$, é balanceada pela reação catódica na superfície adjacente, $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$. O aumento da concentração de M^{+n} resulta na migração dos íons cloreto (Cl^-) para manter a neutralidade. O cloreto metálico formado, $M^{+n}Cl^-$, é hidrolisado pela água, pela reação $M^{+n}Cl^- + H_2O \rightarrow MOH + H^+Cl^-$ (Sedriks, 1996).

A Figura 9 apresenta um esquema de propagação de pite.

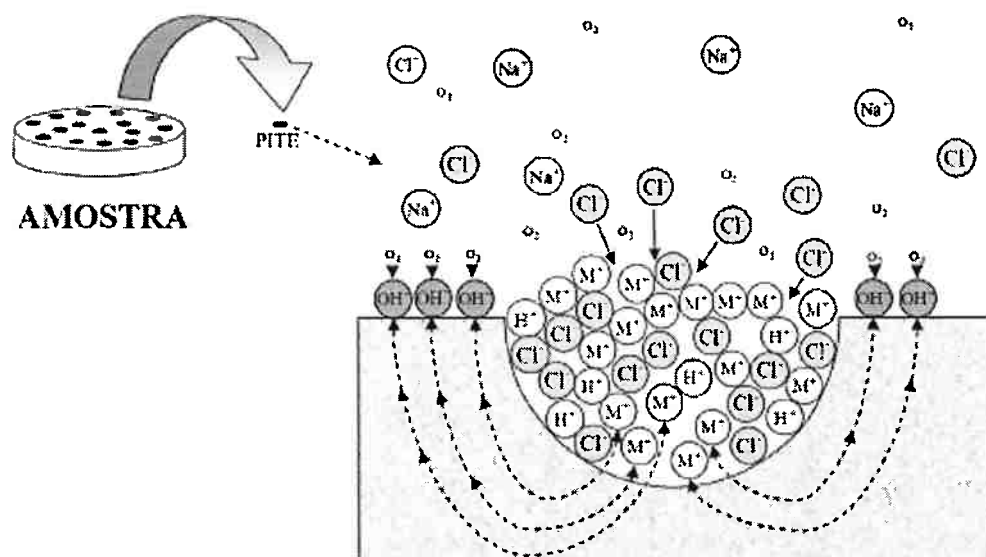


Figura 9: Representação da propagação de pite (Zanetic, 2001)

3 Materiais e Métodos

3.1 Preparação das Amostras

Para o presente trabalho foram confeccionadas duas chapas de aço inoxidável 316L soldadas com consumível arame tubular de composição química 317L. As chapas foram soldadas utilizando como gás de proteção CO₂ puro. As condições de soldagem para estas amostras estão relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1: Condições de soldagem para as chapas de aço inoxidável

Equipamento	Fronius TransSynergic 4000
Gás de proteção	CO ₂ 100%
Corrente	180 A
Velocidade do arame	10,5 cm/s
Diâmetro do arame	1,2mm

As chapas foram cortadas com utilizando-se uma guilhotina, para não alterar as propriedades do material.

A composição química das chapas de aço inoxidável 316L foi analisada antes da operação de soldagem e está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química das chapas de aço 316L

Elemento	%	Elemento	%
C	0,034	Al	< 0,0005
Si	0,442	Cu	0,088
Mn	1,33	Co	0,075
P	0,016	Ti	0,0045
S	0,011	Nb	< 0,0040
Cr	16,82	V	0,052
Ni	9,81	W	< 0,0070
Mo	2,12	Pb	< 0,0020

A Tabela 3 apresenta as dimensões das chapas antes e após a soldagem; as amostras foram identificadas como Chapa 1 e Chapa 2.

Tabela 3: Dimensões das chapas de aço antes e após a soldagem

Antes da soldagem (dimensões das chapas)				Após a soldagem (dimensões da chapa soldada)		
Amostra	Altura (cm)	Largura (cm)	Espessura (cm)	Altura (cm)	Largura (cm)	Espessura (cm)
Chapa 1	12,3	15,2	1,0	12,3	31,9	1,0
Chapa 2	12,3	15,2	1,0	12,3	32,1	1,0

O consumível de soldagem utilizado foi um arame tubular de composição química determinada pela norma AWS A5.22-95: E317LT1-4, de denominação comercial BÖHLER E317L PW-FD. A composição química desse material foi fornecida pelo fabricante e se apresenta na Tabela 4.

Tabela 4: Composição química do arame tubular utilizado como consumível de soldagem

Elemento	%
C	< 0,035
Si	0,7
Mn	1,3
Cr	18,8
Ni	13,1
Mo	3,4

Após a soldagem, as chapas de aço tiveram suas superfícies desbastadas para remover as marcas do cordão de solda e garantir que as superfícies superior e inferior estivessem planas.

Para a determinação das propriedades corrosivas das chapas de aço soldadas foram realizados os ensaios de imersão em cloreto férrico, o levantamento da curva de polarização potenciodinâmica e o ataque metalográfico baseado na prática A da norma ASTM A262. Os corpos de prova para a realização dos ensaios citados foram confeccionados a partir das amostras Chapa 1 e Chapa 2. A Figura 10 apresenta uma representação da preparação dos corpos de prova utilizados neste trabalho.

A partir da amostra Chapa 1 foram preparados três corpos de prova para o ensaio de imersão em cloreto férrico. A Chapa 1 foi cortada em três partes com a utilização de um disco abrasivo de corte com resfriamento da peça. As três partes coradas possuem o cordão de solda. A Figura 11 indica a direção em que a Chapa 1 foi cortada. Após o ensaio, cortou-se a região em que um pite foi formado de uma das três amostras para embutimento e visualização da sessão transversal deste pite. O corte foi realizado utilizando o mesmo disco abrasivo de corte com resfriamento da peça.

A Chapa 2 foi cortada em nove partes, onde seis destas partes, identificadas como B1, B2, B3, B4, B5 e B6 não possuem o cordão de solda; e as três partes restantes, denominadas C1, C2 e C3, possuem o cordão de solda. As amostras foram cortadas utilizando o mesmo disco abrasivo de corte com resfriamento da peça. A partir da amostra C3 foi confeccionado o corpo de prova para a realização do exame metalográfico baseado na Prática A da Norma ASTM A262. Este corpo de prova possui 4 cm de largura e contém parte do cordão de solda em sua extremidade.

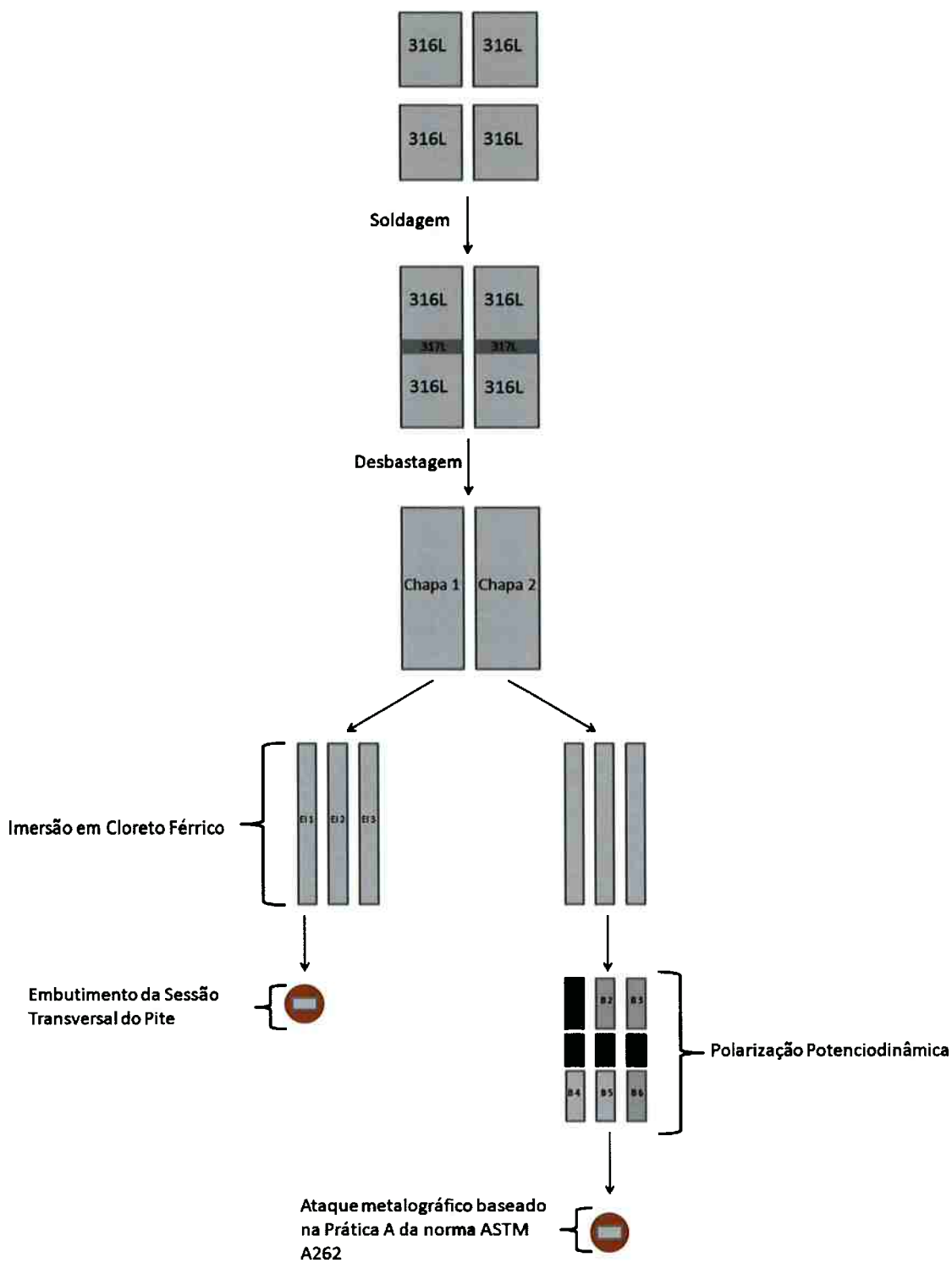


Figura 10: Representação da preparação dos corpos de prova para realização dos ensaios

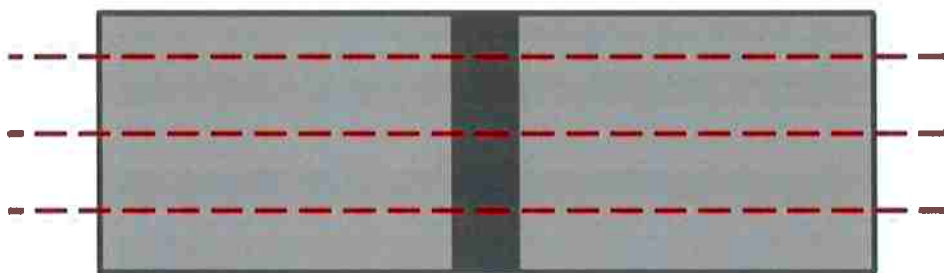


Figura 11: Direção do corte da Chapa 1. A linha pontilhada vermelha indica a direção que a amostra foi cortada.

3.2 Imersão em Cloreto Férrico

3.2.1 Preparação dos Corpos de Prova

Para a fabricação dos corpos de prova para o ensaio de imersão, cortou-se a Chapa 1 em três partes de dimensões 3,89cm X 11,30cm X 0,56cm; 3,66cm X 10,16cm X 0,69cm e 3,34cm X 10,05cm X 0,68cm; as quais foram identificadas de corpos de prova 1, 2 e 3, respectivamente. As amostras foram cortadas com disco abrasivo de corte com resfriamento da peça. Importante ressaltar que os corpos de prova foram cortados preservando o cordão de solda em seu centro.

Estas amostras foram então lixadas com lixas #80, #120 e #240 e #360. As amostras foram pesadas logo após o lixamento e os dados registrados na Tabela 5. A Figura 12 apresenta a amostra 3 logo após lixamento.

Tabela 5: Massa dos corpos de prova para o ensaio de imersão

Corpo de Prova	massa (g)
1	214,1413
2	216,2972
3	206,1766

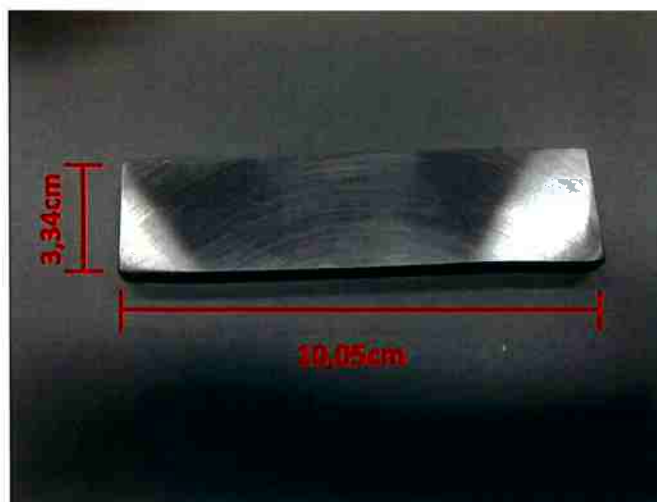


Figura 12: Corpo de prova 3 para ensaio de imersão

A Tabela 6 apresenta as dimensões dos corpos de prova preparados para este ensaio.

Tabela 6: Dimensões dos corpos de prova para ensaio de imersão

Corpo de prova	Altura (cm)	Largura (cm)	Espessura (cm)	Área Total (cm ²)
1	3,89	11,30	0,56	104,93
2	3,66	10,16	0,69	93,44
3	3,34	10,50	0,68	88,96

3.2.2 Descrição do Ensaio

O ensaio de imersão em cloreto férrico foi realizado conforme o *método A* da norma *ASTM G 48 – 03* (Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution).

O ensaio consiste em submergir as amostras em uma solução de cloreto férrico para avaliar a quantidade de massa perdida devido à corrosão por pite.

A solução de cloreto férrico foi preparada dissolvendo-se 100g de cloreto férrico (Figura 13) em 900ml de água destilada.



Figura 13: Cloreto férrico utilizado no ensaio de perda de massa

As amostras foram colocadas em uma vasilha de vidro, sendo apoiadas por bastões de vidro para permitir que todas as superfícies das peças entrassem em contato com a solução (Figura 14). Depois de posicionadas, a solução de cloreto férrico foi despejada na vasilha, garantindo que as amostras estivessem totalmente submersas (Figura 15). O recipiente foi coberto com papel filme para evitar que poeira e outras sujidades contaminassem o ensaio; os corpos de prova ficaram imersos por 72 horas.



Figura 14: Posicionamento dos corpos de prova para ensaio de imersão antes da imersão em solução de cloreto férrico

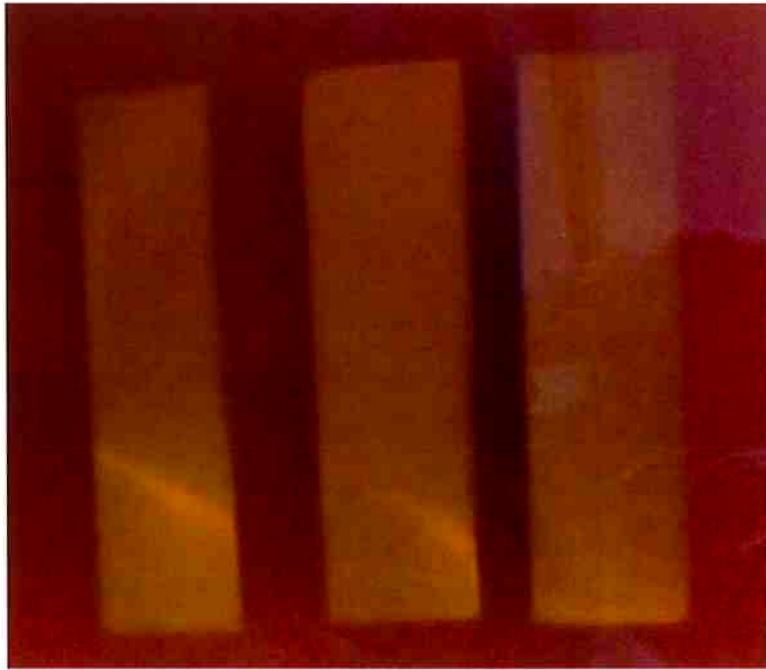


Figura 15: Corpos de prova imersos em solução de cloreto férrico

Após o término do ensaio, as amostras foram retiradas da vasilha e lavadas com água destilada. Os resíduos de corrosão contidos nas cavidades dos pites foram removidos e os corpos de prova foram limpos novamente com água destilada para garantir que toda a solução tenha sido removida. As amostras foram fotografadas e pesadas para determinação de perda de massa. A Figura 16 apresenta o sistema após as 72 horas de ensaio.



Figura 16: Amostras imersas em solução de cloreto férrico após 72 horas de ensaio

3.3 Polarização Potenciodinâmica

3.3.1 Preparação dos Corpos de Prova

Para o levantamento das curvas de polarização potenciodinâmica, foram preparados seis corpos de provas a partir da Chapa 2, cortada com disco de corte abrasivo e refrigeração da peça. Três desses corpos de provas são constituídos apenas do metal base (aço 316L), enquanto que os outros três corpos de prova possuem o cordão de solda no centro. Os corpos de prova que contém apenas o metal base são identificados como B-1, B-2 e B-3; os corpos de prova que contém o cordão de solda são identificados como C-1, C-2 e C3. A Tabela 7 apresenta as dimensões desses corpos de prova.

Tabela 7: Dimensões dos corpos de prova para levantamento das curvas de polarização

Corpo de Prova	Altura (cm)	Largura (cm)	Espessura (cm)
B-1	6,5	5,6	1,0
B-2	6,7	5,2	1,0
B-3	6,7	6,0	1,0
C-1	5,9	5,2	1,0
C-2	6,2	5,5	1,0
C-3	6,4	5,2	1,0

Os corpos de prova foram lixados com lixas #100, #240, #360 e #600 e polido com pasta de diamante 6 μ m, 3 μ m e 1 μ m.

3.3.2 Descrição do Ensaio

O ensaio foi realizado em um potenciostato PAR 273A da Princenton Applied Research, disponível no laboratório LPE/PMT. As configurações elétricas do ensaio foram feitas através de um computador pelo software SoftCorr III. Foi utilizada uma célula plana, conforme Figura 17, expondo a área de 1cm² dos corpos de prova, imersa em solução 3,5%NaCl. Utilizou-se como eletrodo de referência eletrodo de Ag/AgCl imerso em solução saturada de KCl. O tempo de imersão antes da polarização foi de 300 segundos. A velocidade de varredura de potencial adotada foi 1 mV/s.

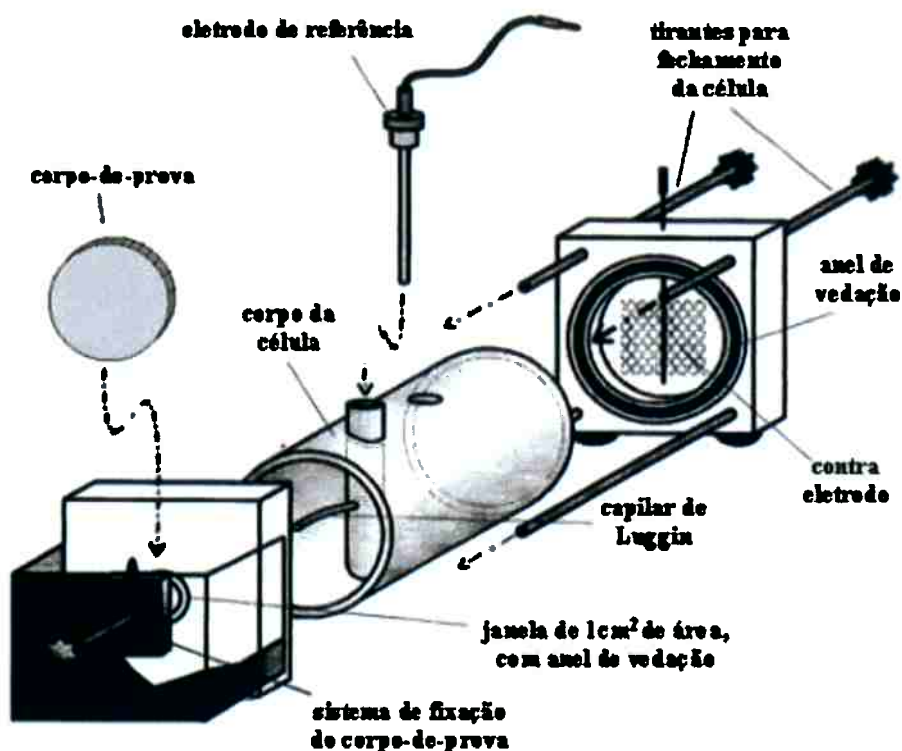


Figura 17: Célula plana utilizada na polarização potenciodinâmica (Cordeiro, 2001)

3.4 Exame Metalográfico Baseado na Prática A da Norma ASTM A262

3.4.1 Preparação do corpo de prova

Para a fabricação do corpo de prova para exame metalográfico baseado na prática A da norma ASTM A262 foi utilizada a amostra C3 preparada para o ensaio de polarização potenciodinâmica, o qual continha o cordão de solda em seu centro. Esta amostra foi cortada em máquina de corte de precisão automática modelo Isomet 4000, marca Buehler. Esta peça foi embutida em baquelite para a confecção do corpo de prova. As dimensões da peça podem ser observadas na mostra a Figura 18.



Figura 18: Corpo de prova para ataque metalográfico

Após o embutimento, o corpo de prova foi lixado com lixas #100, #240, #360 e #600 e polido com pasta de diamante 6 μ m, 3 μ m e 1 μ m.

3.4.2 Descrição do ensaio

O ensaio consiste em atacar o corpo de prova com uma solução aquosa de ácido oxálico 10%, utilizando-se água deionizada como soluto, aplicando uma corrente de 1A/cm² durante 90 segundos.

O ensaio foi realizado utilizando uma fonte de energia, mantendo a corrente constante em 2,8 ampères. O ataque metalográfico foi realizado no laboratório de metalografia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de São Paulo.

4 Resultados e Discussão

4.1 Imersão em Cloreto Férrico

O ensaio de imersão em cloreto férrico foi realizado conforme descrito no item 3.2.2 para os corpos de prova 1, 2 e 3, durante 72 horas e a temperatura ambiente de 22°C. Apresenta-se a seguir os resultados obtidos.

Taxa de Corrosão

Depois de concluído o ensaio, os corpos de prova foram pesados para determinação da perda de massa e da taxa de corrosão dos mesmos. Os resultados encontrados estão representados na Tabela 8. A taxa de corrosão foi calculada segundo a Equação 1.

$$TC = \frac{\Delta m}{AT * h}$$

Equação 1: Cálculo da taxa de corrosão para ensaio de imersão em cloreto férrico

Onde Δm = variação de massa, AT = área total do corpo de prova e h = tempo do ensaio em horas. Notar que o ensaio de imersão ocorreu durante 72 horas e os valores das dimensões dos corpos de prova estão indicados na Tabela 6.

Tabela 8: Taxa de corrosão para imersão em cloreto férrico

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Variação de massa (g)	Área Total (cm ²)	Taxa de Corrosão (g/cm ² .h)
1	214,1413	212,6325	1,5088	104,93	2,00E-04
2	216,2972	215,4098	0,8874	93,44	1,32E-04
3	206,1766	205,4782	0,6984	88,96	1,09E-04

O resultado da Tabela 8 foi plotado (Figura 19), para melhor visualização.

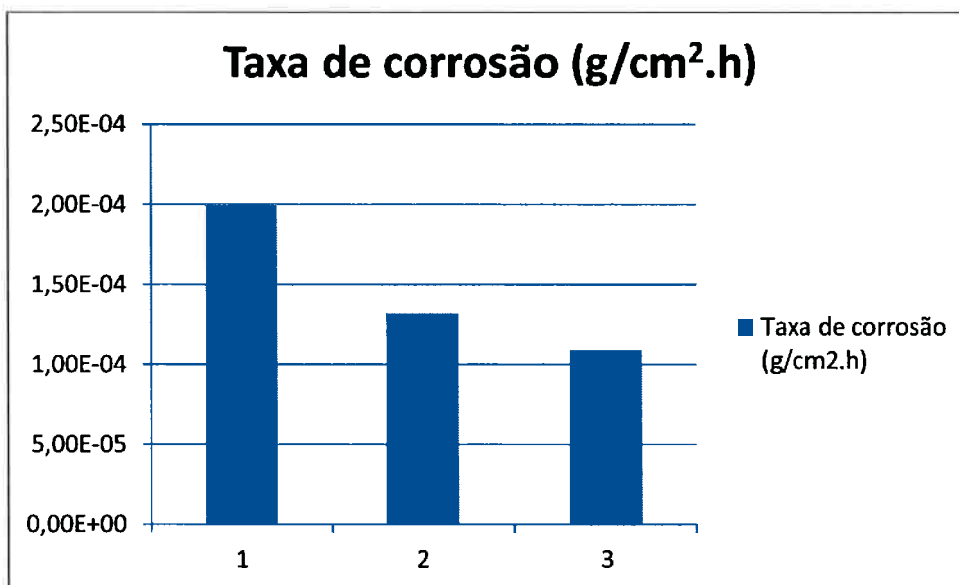


Figura 19: Taxa de corrosão obtida do ensaio de imersão em cloreto férrico

O valor médio para a taxa de corrosão foi de $1,47 \cdot 10^{-4} \pm 0,42 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$. Comparando os valores obtidos na neste trabalho com os resultados encontrados por (Zanetic, 2001) em sua tese de doutorado para ensaio de imersão em cloreto férrico realizado em condições similares ao deste trabalho, com amostras de aço inoxidável UNS S30400 solubilizada (ST-S) e solubilizada-sensitizada (ST-SS), pode-se perceber que as amostras de aço inoxidável 316L soldadas com aço 317L apresentaram valores de taxa de corrosão bastante menores do que as amostras de aço UNS S30400. O valor médio da taxa de corrosão para os corpos de prova do aço 316L soldado foi 3,5 vezes menor do que as mostras de aço UNS S30400 ensaiadas por (Zanetic, 2001). Este resultado confirma a melhor resistência à corrosão dos aços 316L e 317L, devido à adição de molibdênio em sua composição química. Os valores obtidos foram também comparados com os resultados encontrados por (Kobayashi, 1985) para uma liga de composição química similar ao aço 316L, denominada liga 6. O valor encontrado por (Kobayashi, 1985) foi bastante próximo aos valores obtidos neste trabalho, não evidenciando nenhuma perda na qualidade da resistência a corrosão por pite da chapa de aço soldada. A Tabela 10 e a Figura 20 mostram a comparação entre os resultados obtidos neste trabalho, na tese de Doutorado de (Zanetic, 2001) e na tese de mestrado de (Kobayashi, 1985).

Tabela 9: Composição química para a liga 6 (Kobayashi, 1985)

Elemento	%
C	0,04
Si	0,14
Mn	0,43
P	0,02
S	0,02
Cr	17,8
Ni	9,62
Mo	2,45

Tabela 10: Comparação entre os resultados obtidos por (Bassani), (Zanetic) e (Kobayash) para ensaio de imersão em cloreto férrico

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Variação de massa (g)	Área Total (cm ²)	Taxa de corrosão (g/cm ² .h)	Taxa de corrosão média (g/cm ² .h)
(Bassani) 1	214,1413	212,6325	1,5088	104,93	2,00E-04	1,47E-04
(Bassani) 2	216,2972	215,4098	0,8874	93,44	1,32E-04	
(Bassani) 3	206,1766	205,4782	0,6984	88,96	1,09E-04	
(Kobayashi) Liga 6	-	-	-	-	-	1,66E-04
(Zanetic) ST-S	96,605	94,657	1,948	54,68075	4,95E-04	5,01E-04
(Zanetic) ST-S	91,81	89,816	1,994	54,68075	5,06E-04	
(Zanetic) ST-SS	101,607	99,527	2,08	54,68075	5,28E-04	
(Zanetic) ST-SS	99,946	97,973	1,973	54,68075	5,01E-04	5,15E-04

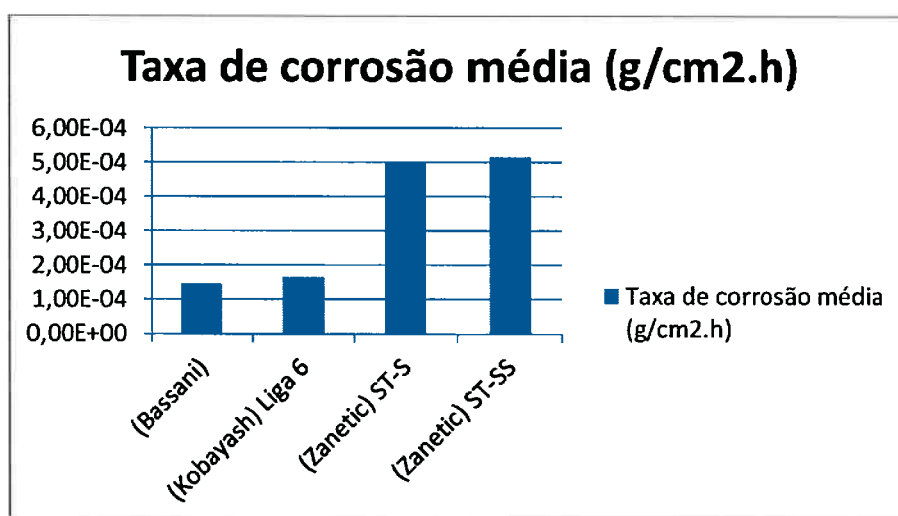


Figura 20: Comparação entre os resultados obtidos por (Bassani), (Zanetic, 2001) e (Kobayashi, 1985) para ensaio de imersão em cloreto férrico

Morfologia dos Corpos de Prova Ensaaiados

Apresenta-se a seguir um registro fotográfico da morfologia da superfície dos corpos de prova após o ensaio de imersão em cloreto férrico. Foram analisadas apenas as superfícies superiores e inferiores das amostras 1, 2 e 3. Consideramos a superfície superior a região que não estava apoiada durante o ensaio, e superfície inferior aquela que esteve em contato com os bastões de vidro.

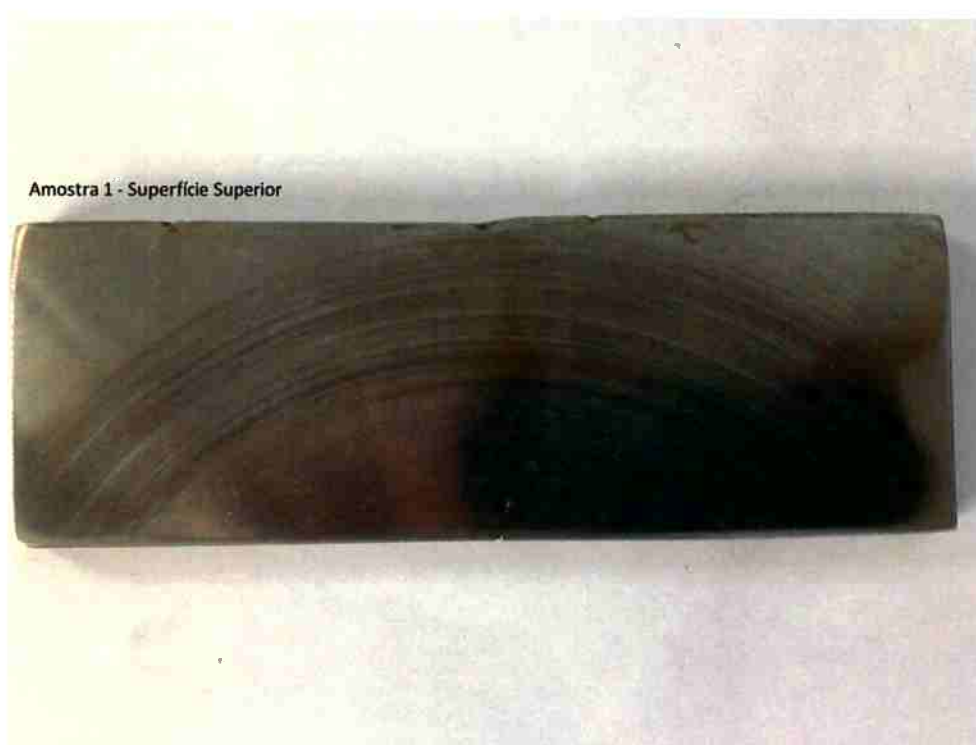


Figura 21: Superfície superior da amostra 1 após ensaio de imersão em cloreto férrico



Figura 22: Superfície inferior da amostra 1 após ensaio de imersão em cloreto férrico



Figura 23: Superfície superior da amostra 2 após ensaio de imersão em cloreto férrico



Figura 24: Superfície inferior da amostra 2 após ensaio de imersão em cloreto férrico



Figura 25: Superfície superior da amostra 3 após ensaio de imersão em cloreto férrico

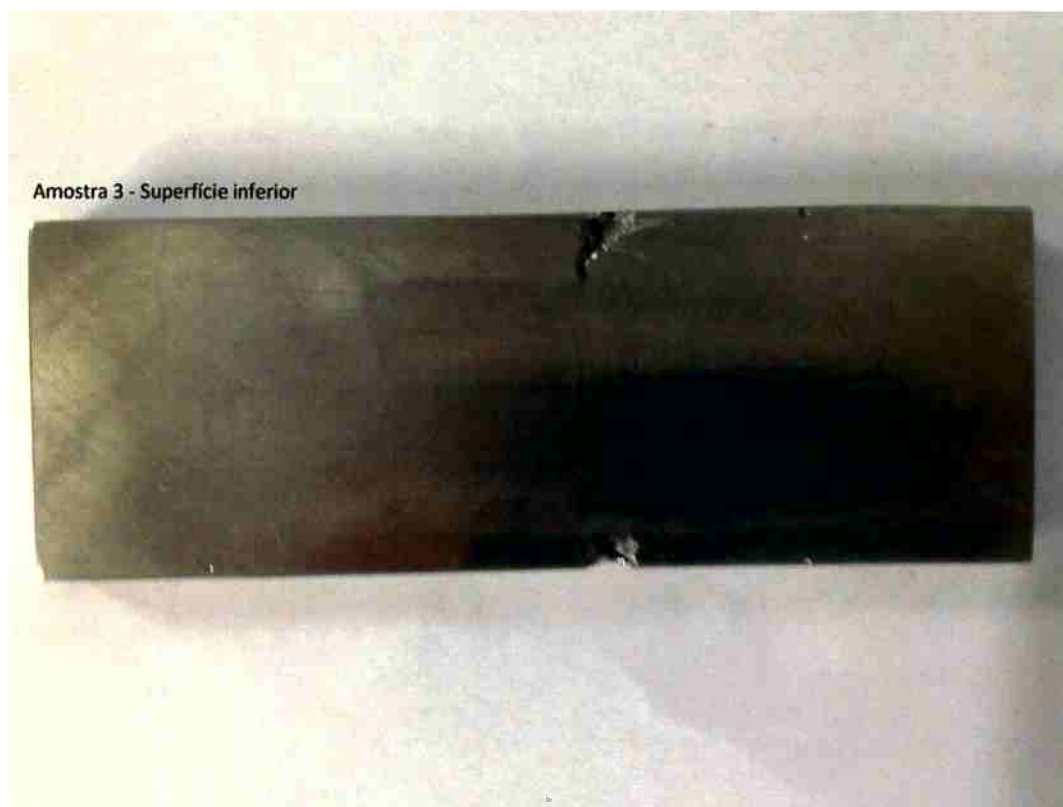


Figura 26: Superfície inferior da amostra 3 após ensaio de imersão em cloreto férrico

Podemos notar uma pequena quantidade de pites formado na superfície superior das três amostras analisadas. A amostra 1 apresentou um pite formado na região do cordão de solda, a amostra dois não formou pites e a amostra 3 apresentou três pites formados nas bordas do corpo de prova. Na superfície inferior, foi observada uma maior formação de pites. Isso ocorre pois a circulação do fluido corrosivo é prejudicada pela falta de espaço devido a limitação do recipiente, aumentando a probabilidade de corrosão. Observamos também que na superfície inferior foi formado marcas de corrosão ao longo da região onde a amostra estava apoiada nos bastões de vidro. A Figura 27 mostra estas marcas na Amostra 1.

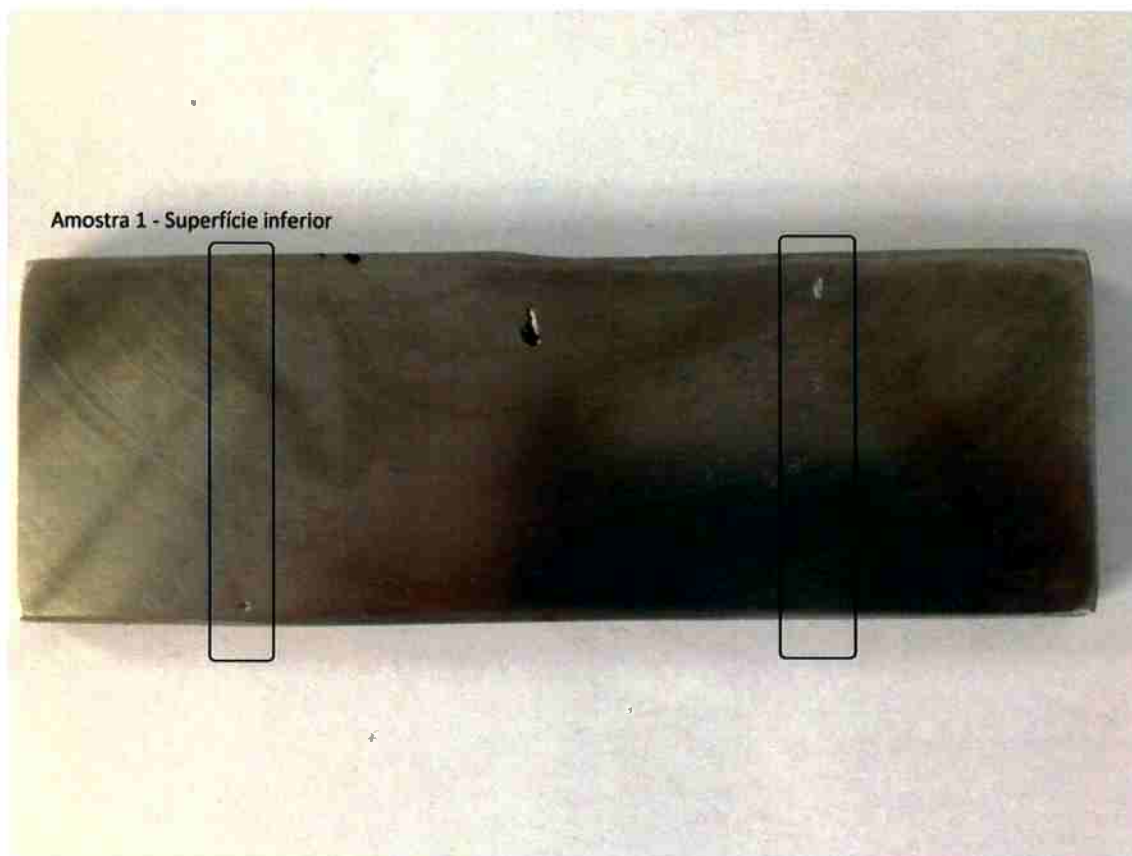


Figura 27: Evidências da região de apoio da amostra nos bastões de vidro

Morfologia do Pite Formado

Para a análise da morfologia dos pites formados durante o ensaio de imersão em cloreto férrico, foi embutido a sessão transversal do pite formado na região do cordão de solda da Amostra 1. A análise foi feita em microscópio ótico com aumento de 50X. O resultado apresenta-se na Figura 28.



Figura 28: Sessão transversal do pite formado no ensaio de imersão em cloreto férrico

Podemos notar a formação de um pite relativamente grande e pouco profundo, com contornos irregulares

4.2 Polarização Potenciodinâmica

Os ensaios de polarização potenciodinâmica foram realizados conforme descrito no capítulo

3.3.2 Os ensaios foram realizados para três regiões diferentes dos corpos de prova: a região que contém o cordão de solda (Cordão), a região adjacente ao cordão de solda, que contém a zona afetada pelo calor (ZAC) e a região do metal base localizada a uma distância superior a 10cm do cordão de solda (Base).

Curvas de Polarização

Foram chamados de base 1, base 2 e base 3 os ensaios de polarização potenciodinâmica para a região do metal base; ZAC 1, ZAC 2 e ZAC 3 os ensaios para a região adjacente ao cordão de solda; e cordão 1, cordão 2 e cordão 3 os ensaios realizados sobre o cordão de solda.

Primeiro, foi analisado resultado obtido para o ensaio ZAC 3, que apresentou o comportamento típico de corrosão por pite para os aços inoxidáveis. Neste ensaio, pode-se observar de maneira bastante didática as diferentes regiões da curva de polarização, como mostra a Figura 29.

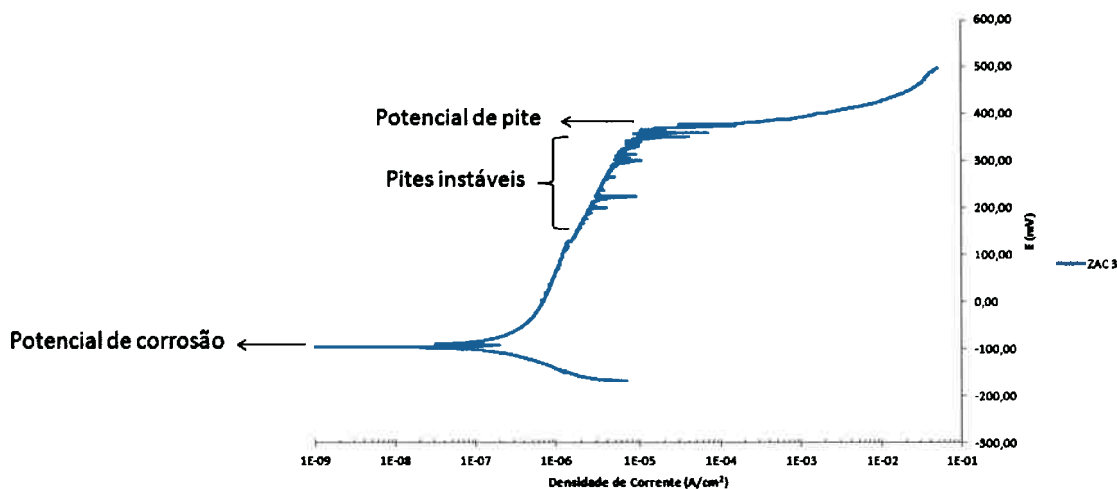


Figura 29: Resultado do ensaio de polarização potenciodinâmica para ZAC 3

Pode-se observar, após trecho catódico, o potencial de corrosão, que representa o potencial onde as densidades de corrente catódica e anódica são iguais em módulo, totalizando um valor nulo de corrente para a curva de polarização (SEDRICKS, 1986). O contínuo aumento do potencial de eletrodo acarreta o surgimento de pites instáveis. Estes pites se formam por um curto período de tempo, nucleiam e se passivam repetidas vezes. Por fim, é atingido o potencial de pite, onde um pite nucleia e cresce continuamente.

As curvas levantadas nestes ensaios estão mostradas nas Figura 30, Figura 31 e Figura 32.

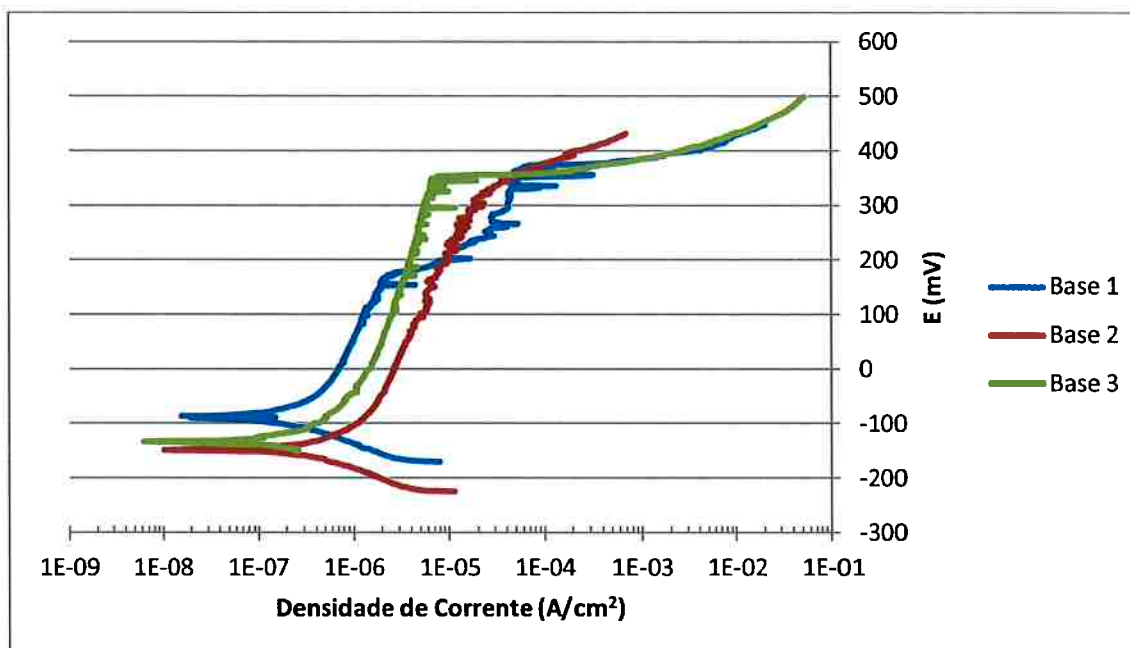


Figura 30: Curvas de polarização para o metal base (aço 316L)

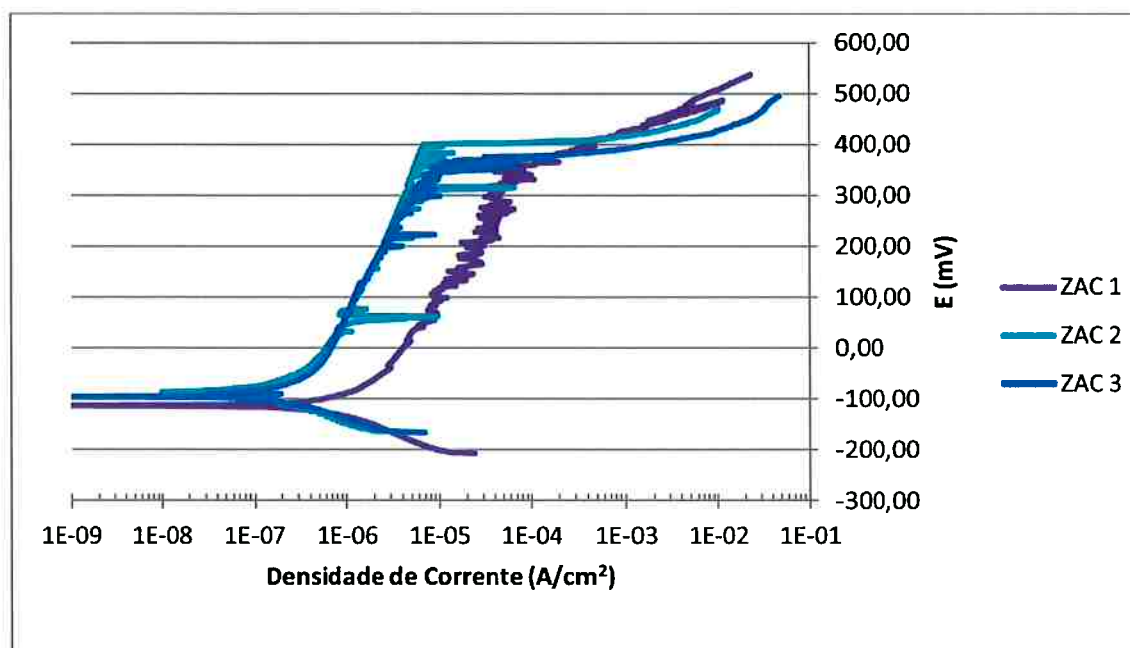


Figura 31: Curvas de polarização para a região adjacente ao cordão de solda (região que contém a ZAC)

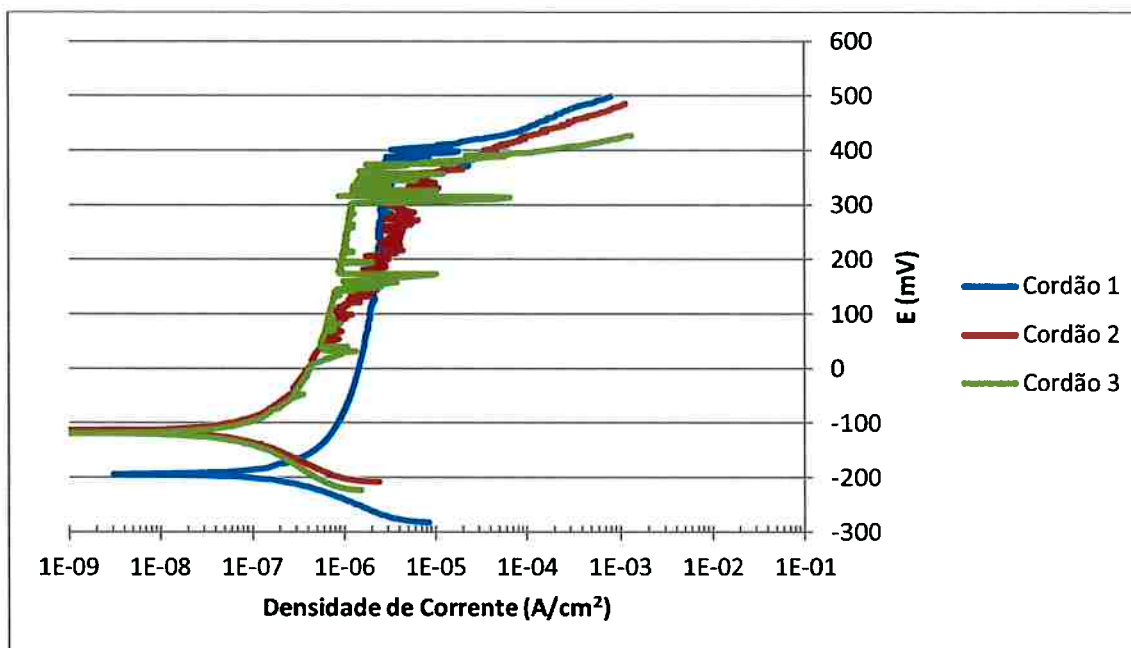


Figura 32: Curvas de polarização para a região do cordão de solda (aço 317L)

Uma maior intensidade de oscilação da densidade de corrente foi observada para a região do cordão de solda, também indicado possíveis instabilidades provenientes da estrutura bruta de fusão, como segregação interdendrítica e/ou precipitação de fases ricas em cromo e molibdênio, que levariam a uma maior susceptibilidade à nucleação de pites, nas regiões empobrecidas nesses elementos.

O potencial de pite para as curvas levantadas foram determinados pela leitura direta do gráfico no ponto em que a densidade de corrente aumenta de forma acentuada, definindo assim o potencial em que se nucleou um pite que cresce continuamente. A Figura 29 ilustra onde se localiza este ponto para o ensaio ZAC 3. Entretanto, na curva levantada no ensaio Base 2, houve um arredondamento do gráfico na região em que deveria aparecer o potencial de pite. Para determinar este potencial no ensaio citado, foi realizado um ajuste linear para os trechos compreendendo a região do gráfico em que a amostra está passiva e a região em que o pite está crescendo. A Figura 33 mostra como foi realizada esta aproximação linear.

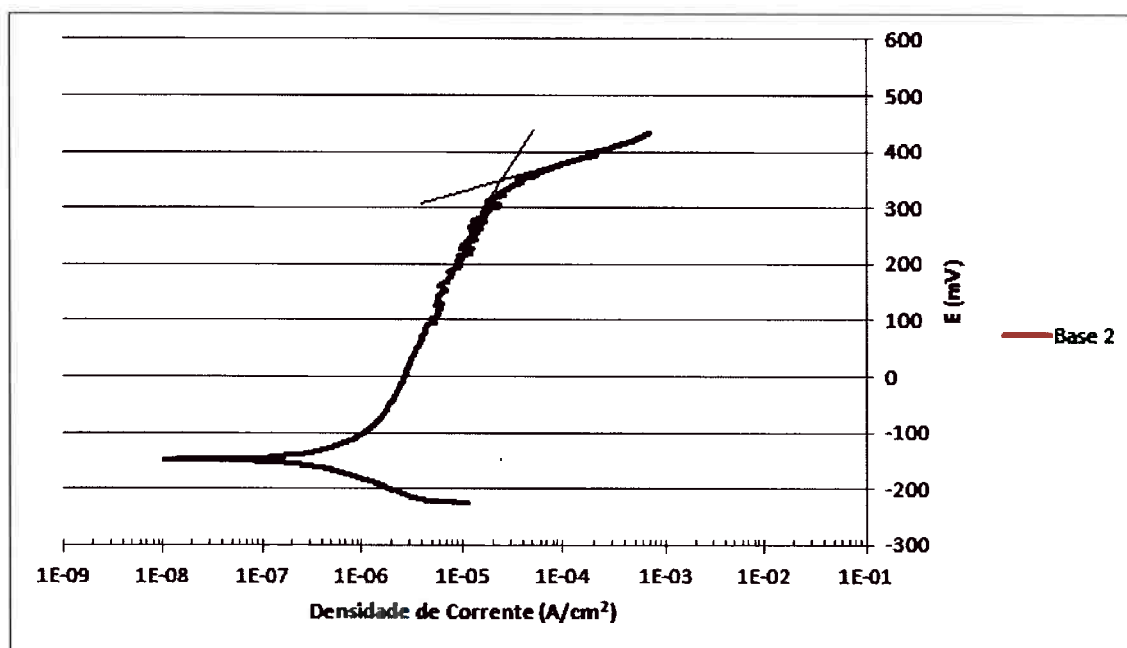


Figura 33: Ajuste linear para a determinação do potencial de pite para o ensaio Base 2

A Tabela 11 mostra os potenciais de pites encontrados para cada ensaio, juntamente com os valores do potencial de pite médio para os ensaios realizados nas diferentes regiões e seu desvio padrão.

Tabela 11: Potenciais de pites encontrados para os ensaios de polarização potenciodinâmica

Amostra	Potencial de Pite (mV) _{Ag/AgCl}	Potencial de Pite Médio (mV) _{Ag/AgCl}
Base 1	373	361
Base 2	356	
Base 3	355	
ZAC 1	360	379
ZAC 2	401	
ZAC 3	377	
Cordão 1	403	381
Cordão 2	364	
Cordão 3	375	

Comparando-se os resultados obtidos entre si, podemos afirmar que a operação de soldagem não ocasionou uma piora na resistência à corrosão por pite desta chapa de aço. Os valores de potencial de pite encontrados para a região do cordão de solda e para a região que contém a

zona afetada pelo calor estão próximos aos valores de potencial de pite obtidos para o metal base, distante do cordão de solda.

Botton em sua dissertação de mestrado (Botton, 2008) determinou o potencial de pite para o aço 316L após tratamento térmico de solubilização e lixamento até lixa #600 (SL), conferindo uma situação similar aos corpos de provas ensaiados neste trabalho. Comparando os resultados obtidos por Botton com as curvas levantadas para as amostras deste trabalho, podemos verificar que os resultados são bastante próximos entre si. A Tabela 12 mostra os resultados dos valores de potencial de pite médio para os ensaios citados.

Tabela 12: Comparação entre os resultados de potencial de pite para o aço 316L solubilizado para os corpos de provas ensaiados por (Botton, 2008) e para os corpos de prova ensaiados neste trabalho

Amostra	Potencial de Pite Médio (mV)_{Ag/AgCl}	Desvio Padrão (mV)_{Ag/AgCl}
(BOTTON) SL	374	54
(BASSANI) Base	361	-
(BASSANI) ZAC	379	-
(BASSANI) Cordão	381	-

Morfologia dos Pites

As figuras abaixo apresentam um registro dos pites formados durante o ensaio de polarização potenciodinâmica, obtidas em microscópio ótico com aumentos de 100X e 200X. Os pites encontrados apresentaram formato circular com diâmetro e profundidade relativamente grandes.

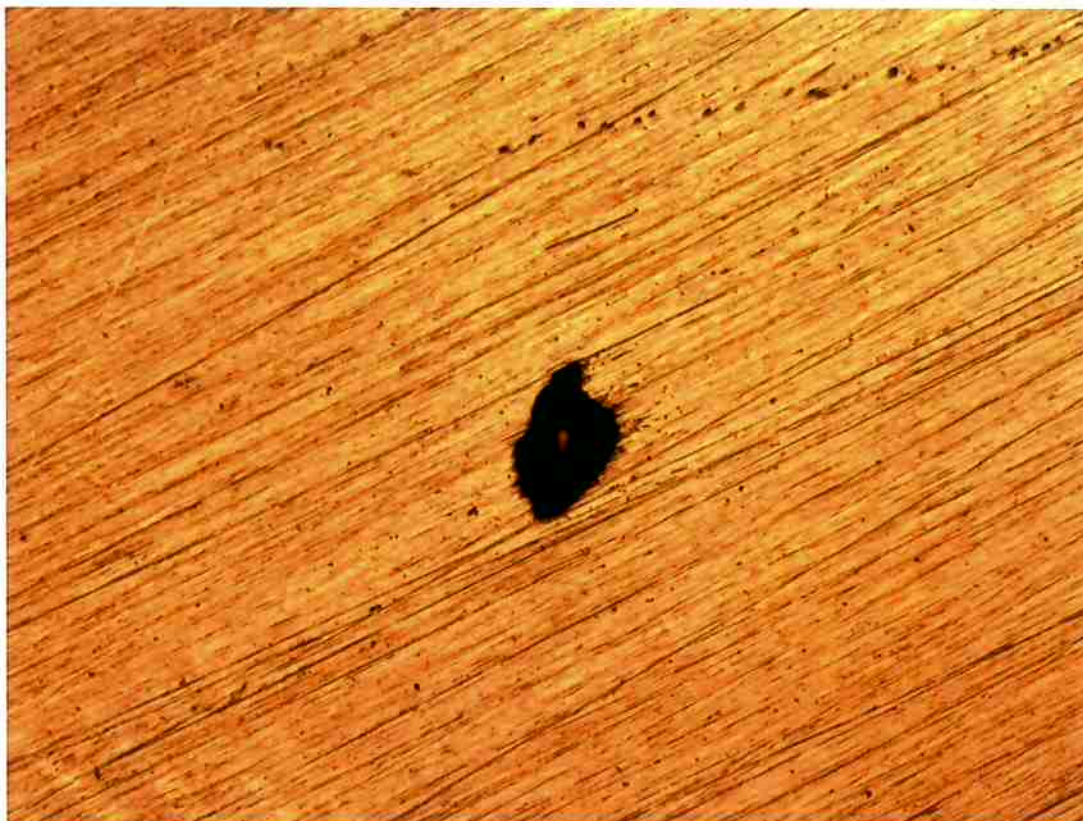


Figura 34: Pite formado na região do metal base. Aumento 100X



Figura 35: Pite formado na região do metal base. Aumento 200X



Figura 36: Pite formado na região do cordão de solda. Aumento 100X



Figura 37: Pite formado na região do cordão de solda. Aumento 200X

4.3 Exame Metalográfico baseado na Prática A da Norma ASTM A262

Este exame metalográfico foi realizado com o objetivo de verificar se ocorreu a sensitização do material durante a operação de soldagem. As figuras Figura 38 e Figura 39 são imagens deste corpo de obtidas em lupa estereoscópica com 0,65X de aumento.



Figura 38: Corpo de prova após ataque metalográfico

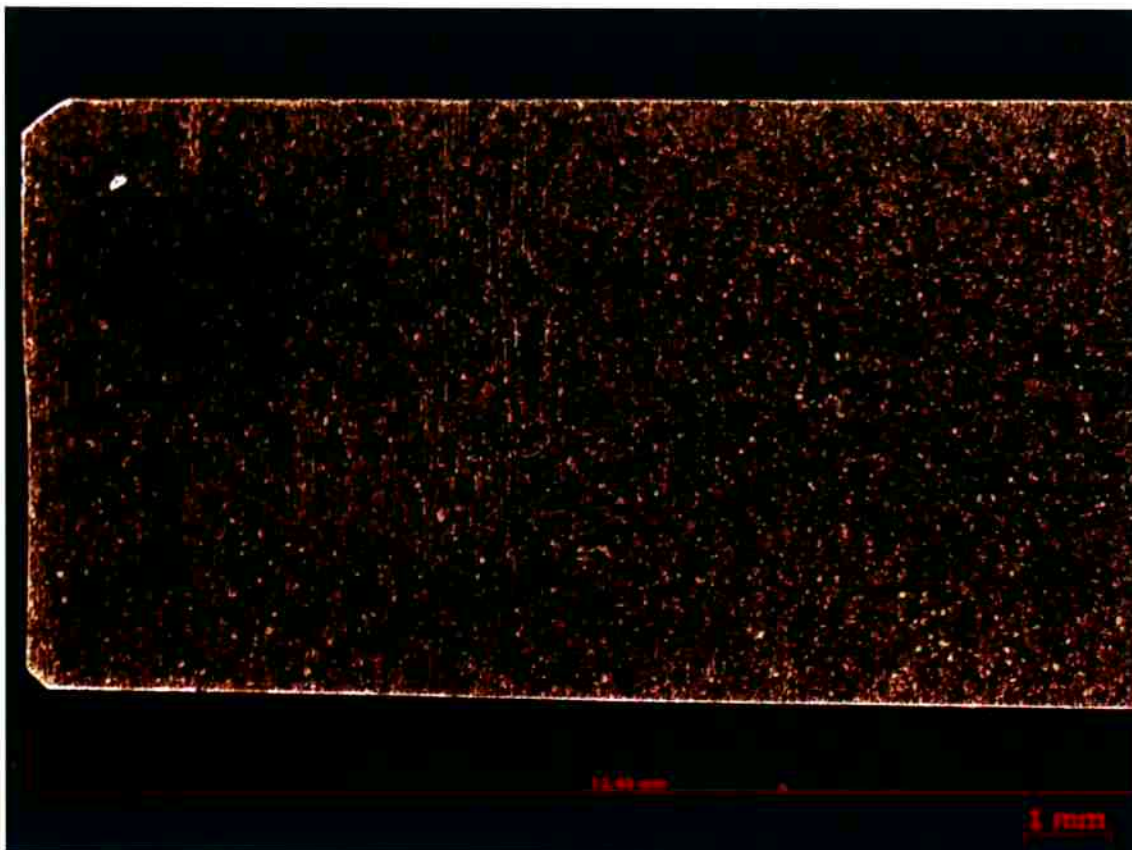


Figura 39: Corpo de prova após ataque metalográfico

Apresenta-se a seguir as imagens deste corpo de prova obtidas em microscópio ótico com aumentos de 50X, 200X e 500X, para diferentes regiões distantes do cordão de solda.



Figura 40: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Cordão de solda. Aumento 50X



Figura 41: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Interface entre cordão de solda e metal base. Aumento 50X



Figura 42: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Região distante 1mm do cordão de solda. Aumento 50X



Figura 43: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Região distante 5mm do cordão de solda. Aumento 50X



Figura 44: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Região distante 9mm do cordão de solda. Aumento 50X



Figura 45: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Região distante 12mm do cordão de solda. Aumento 50X

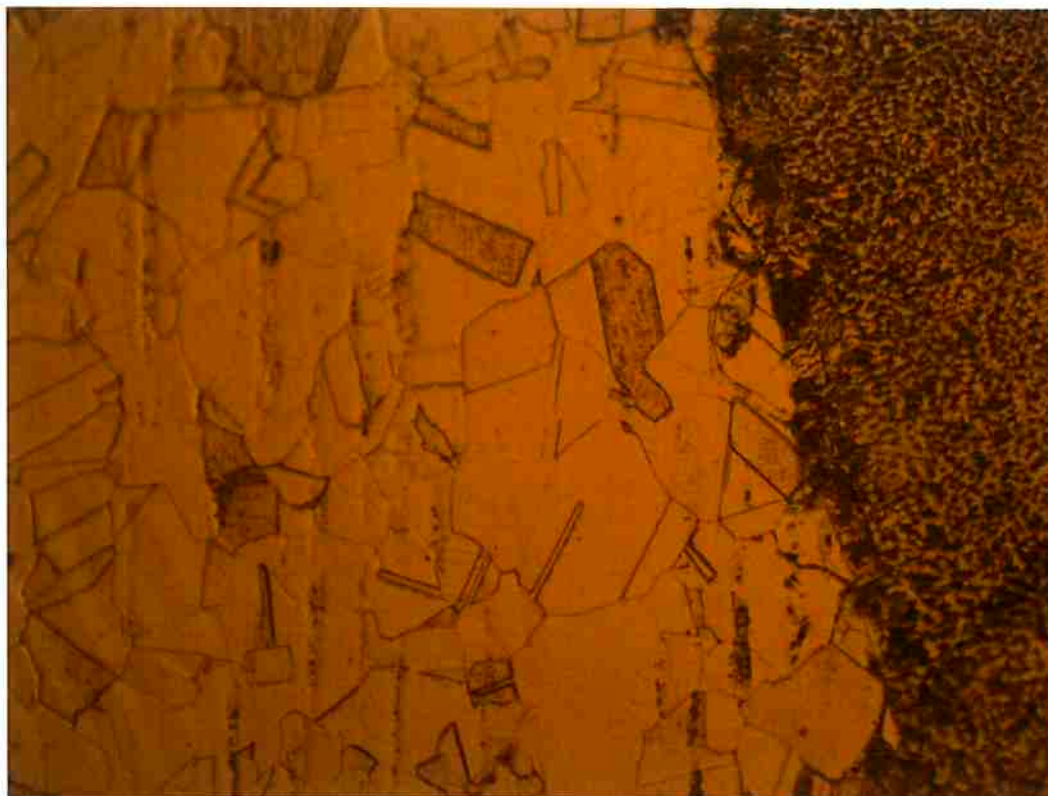


Figura 46: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Interface entre cordão de solda e metal base. Aumento 200X



Figura 47: Ataque metalográfico com ácido oxálico. Região distante 5mm do cordão de solda. Aumento 500X

A ausência de valas e a presença de degraus significa que não há fases ricas em cromo precipitadas nos contornos de grão, não evidenciando a ocorrência de sensitização.

5 Conclusão

Após analisar os resultados obtidos pelos ensaios realizados, não há evidência significativas de que a operação de soldagem tenha alterado a qualidade da resistência à corrosão das chapas de aço inoxidáveis.

A taxa de corrosão obtida no ensaio de imersão em cloreto férrico, quando comparada com dados obtidos em outros trabalhos, mostrou valores bastante coerentes para o esperado de uma chapa de aço inoxidável 316L, além de não ter sido observado um sítio de nucleação preferencial na região do cordão de solda.

Os valores de potencial de pite encontrados durante o levantamento da curva de polarização potenciodinâmica não mostraram uma queda deste potencial ao longo da chapa soldada. O resultado observado foi o oposto, devido a maior concentração de molibdênio adicionada pelo consumível 317L, conferindo maiores valores de potencial de pite.

O exame metalográfico baseado na prática A da norma ASTM A262 não mostrou evidências de que este material sofreu sensitização pela soldagem.

Assim, não há evidências de prejuízo às propriedades corrosivas deste material.

6 Bibliografia

Botton, T. Estudo Comparativo da Resistência a Corrosão em Meio Ácido e em Meio Contendo Cloreto dos Aços Inoxidáveis UNS S44400, UNS S30403 e UNS S31603, Obtidos por Laminação a Quente // Tese de mestrado apresentada a Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. - São Paulo : [s.n.], 2008.

Chiaverini, V. Infomet [Online] // Infomet. - Infomet, 2012. - 21 de Novembro de 2012. - http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=119&cod_conteudo=210.

Cordeiro, D. B. Resistência à corrosão de aço carbono nitretado e nitrocarbonetado por plasma pulsado.. - 2001.

Kobayashi, D. Y. Efeito do nióbio na resistência a corrosão de aços inoxidáveis austeníticos. // Dissertação de mestrado apresentada a Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. - São Paulo. - São Paulo : [s.n.], 1985.

Magri, M. Métodos Eletroquímicos para Avaliação de Sensitização no Aço inoxidável AISI 440 // Tese de mestrado apresentada a Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. - São Paulo : [s.n.], 1995.

Schweitzer, P. A. Fundamentals of Metallic Corrosion. - [s.l.] : CRC Press, 2007.

Sedriks, A. J. Corrosion of Stainless Steels. - 1996.

Wainer, E. Brandi, S. D. Mello, F.D.H. Soldagem-Processos e Metalurgia. [Livro]. - [s.l.] : Edgard Blücher LTDA, 1992.

Zanetic, S. T. Determinação do grau de sensitização de aços inoxidáveis austeníticos pelo método DL-EPR. // Tese de doutorado apresentada a Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. - São Paulo : [s.n.], 2001.