

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS
PARA ENGENHARIA

THIAGO AMARO VICENTE

**Influência do metal de adição na susceptibilidade à
corrosão sob tensão de juntas soldadas dissimilares de aço
inoxidável AISI 310 e aço inoxidável duplex UNS S32304**

Setembro de 2013

Itajubá - MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS
PARA ENGENHARIA

THIAGO AMARO VICENTE

**Influência do metal de adição na susceptibilidade à
corrosão sob tensão de juntas soldadas dissimilares de aço
inoxidável AISI 310 e aço inoxidável duplex UNS S32304**

Dissertação submetida ao Programa de Pós- Graduação em
Materiais para Engenharia como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre em Ciências em Materiais
para Engenharia

Área de Concentração: Metais

Orientador: Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa

Itajubá 2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Jacqueline Balducci- CRB_6/1698

V632i

Vicente, Thiago Amaro

Influência do metal de adição na susceptibilidade à corrosão sob tensão de juntas soldadas dissimilares de aço inoxidável AISI 310 e aço inoxidável duplex UNS S32304 / Thiago Amaro Vicente. – Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.

78 p. il.

Orientador: Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Aços inoxidáveis. 2. Juntas soldadas dissimilares. 3. Corrosão sob tensão. I. Corrêa, Edmilson Otoni, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS
PARA ENGENHARIA

THIAGO AMARO VICENTE

**Influência do metal de adição na susceptibilidade à
corrosão sob tensão de juntas soldadas dissimilares de aço
inoxidável AISI 310 e aço inoxidável duplex UNS S32304**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 03 de
setembro de 2013, conferindo ao autor o título de *Mestre*
em Ciências em Materiais para Engenharia

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wanderley Xavier Pereira - CEFET/MG

Prof. Dr. Manoel Ribeiro da Silva - UNIFEI

Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa - UNIFEI
(Orientador)

Itajubá

2013

Dedico essa dissertação aos meus pais que sempre me incentivaram na minha vida.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus pela minha Vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa, pela orientação, competência, amizade e paciência durante o trabalho.

À todos os professores do Programa de Mestrado em Materiais para Engenharia.

Aos meus colegas de Mestrado pela amizade e companheirismo durante o decorrer da pesquisa.

Aos funcionários do laboratório de Metalurgia do IEM, pela grande ajuda prestada.

A ESAB pelo fornecimento dos arames

Ao CNPq e a FAPEMIG através do programa de bolsas pelo apoio financeiro.

Resumo

Neste trabalho foi investigado a influência do metal de adição sobre a susceptibilidade ao trincamento por corrosão sob tensão (CST) de juntas soldadas do aço inoxidável austenítico AISI 310 e do aço inoxidável duplex 2304 em solução aquosa de $MgCl_2$ (43%). Dois tipos de metal de adição (E309L e E2209) foram usados com o intuito de se produzir juntas soldadas com zonas fundidas de diferentes composições químicas. Para analisar a microestrutura das juntas soldadas foi utilizado um microscópio ótico. As propriedades mecânicas das juntas soldadas foram analisadas através de ensaios de tração e dureza Vickers. Para avaliar a susceptibilidade das juntas soldadas ao trincamento por corrosão sob tensão, foi usado o método de teste sob carga constante seguido da caracterização microestrutural dos corpos de prova CST testados. A susceptibilidade à CST foi avaliada em termos do tempo para fratura. Os testes de CST revelaram que o eletrodo E2209 apresentou melhor resistência ao trincamento por corrosão sob tensão.

Palavras- chave: Aços inoxidáveis, juntas soldadas dissimilares, corrosão sob tensão (CST)

Abstract

In this study we investigated the influence of the filler metal on the susceptibility to stress corrosion cracking by (CST) of welded joints of austenitic stainless steel AISI 310 and duplex 2304 stainless steel in aqueous MgCl₂ (43%). Two types of filler metal (E309L and E2209) were used for the purpose of producing welded joints fused areas with different chemical compositions. To analyze the microstructure of the welded joints was used an optical microscope. The mechanical properties of the welded joints were analyzed by tensile tests and Vickers hardness. To evaluate the susceptibility to cracking of welded joints by stress corrosion cracking method was used to test under constant load followed by microstructural characterization of the specimens tested CST. The susceptibility to SCC was assessed in terms of time to fracture. The CST tests revealed that the E2209 electrode showed better resistance to stress corrosion cracking.

Key words: stainless steels, dissimilar welds, stress corrosion cracking (SCC)

Lista de Figuras

Figura 2.1- Processo de passivação do aço inoxidável.....	3
Figura 2.2- Taxa de corrosão de aços exposto a uma atmosfera industrial ao longo do tempo .	4
Figura 2.3- Pré- requisitos para a ocorrência da corrosão sob Tensão	10
Figura 2.4- Comportamento da fratura de aços inoxidáveis austeníticos a CST em solução de cloreto de magnésio	13
Figura 2.5- Tempo de fratura versus temperatura para o aço AISI 316	16
Figura 2.6- Comportamento da velocidade da trinca em relação a temperatura do meio corrosivo	17
Figura 2.7- Fissuração por corrosão sob tensão em arames de Fe-Cr-Ni submetidos a uma solução fervente de cloreto de magnésio	18
Figura 2.8- Evolução da tensão real e da tensão nominal nos ensaios a carga constante ou deformação constante	21
Figura 2.9- Curva esquemática para o tempo de falha típico em função de uma tensão aplicada em ensaios de corrosão	22
Figura 2.10- Corpos de prova utilizados nos ensaios a deformação plástica constante por flexão, em forma de U (a) ou C (b,c), ou por tração (d).....	23
Figura 2.11- Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de ferro 70%	25
Figura 2.12- Trincas intergranulares na ZTA e na região não misturada da zona fundida de uma peça fundida de aço inoxidável austenítico. Aumento: 100 X.....	25
Figura 3.1- Corte da chapa de aço inoxidável austenítico para preparação do corpo de prova	28
Figura 3.2- Corte da chapa de aço inoxidável duplex para preparação do corpo de prova	29
Figura 3.3- Chanfro de 30° realizadas nas chapas de aço para preparação do corpo de prova	29
Figura 3.4- Máquina de soldagem utilizada no experimento	30
Figura 3.5- União das chapas de aço 310 com aço duplex 2304 com arame de adição duplex E2209 após o processo de soldagem.....	30
Figura 3.6- União das chapas de aço 310 com aço duplex 2304 com arame de adição 309L após processo de soldagem.....	31
Figura 3.7- Geometria e dimensões do corpo de prova (unidade em mm)	32

Figura 3.8- Máquina utilizada no ensaio de tração.....	33
Figura 3.9- Microscópio ótico utilizado na aquisição das micrografias.....	34
Figura 3.10- Dispositivo de ensaio de corrosão sob tensão.....	36
Figura 4.1- Microestrutura do metal base aço inoxidável austenítico AISI 310. Ataque: Ácido Oxálico	38
Figura 4.2- Micrografia do metal base aço inoxidável duplex 2304. Ataque : KOH.....	39
Figura 4.3- Microestrutura da junta soldada com arame E2209. Ataque: Ácido Oxálico	39
Figura 4.4- Microestrutura da junta soldada com arame E309L. Ataque: Ácido Oxálico	40
Figura 4.5- Propriedades Mecânicas dos aços estudados	41
Figura 4.6- Durezas obtidas ao longo da chapa de aço inoxidável 310.....	42
Figura 4.7- Durezas obtidas ao longo da chapa de aço inoxidável 2304.....	42
Figura 4.8- Gráfico da média das durezas soldadas com o metal de adição E309L.....	43
Figura 4.9- Gráfico da média das durezas soldadas com o metal de adição E2209.....	44
Figura 4.10- Trincas de corrosão sob tensão na zona de ligação da junta soldada com o metal de adição E2209. Ataque eletrolítico: Ácido Oxálico	46
Figura 4.11- Trincas de CST e fratura da amostra na ZTA/ZF no lado do aço duplex 2304 com o metal de adição E2209.....	47
Figura 4.12- Micrografia do aço duplex 2304 mostrando o crescimento de grão na ZTA. Ataque eletrolítico : KOH.....	49
Figura 4.13- Trincas transgranulares de CST no metal base aço AISI 310. Ataque eletrolítico : Ácido Oxálico.....	50
Figura 4.14- Trincas transgranulares de CST no metal base AISI 310. Ataque eletrolítico: Ácido Oxálico.....	50
Figura 4.15- Trinca na zona fundida do metal de adição E309L. Ataque Eletrolítico:Ácido Oxálico.....	51
Figura 4.16- Fratura na ZTA no lado do aço inoxidável duplex 2304 soldado com o arame de adição E309L.....	52

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Composição química de aços inoxidáveis austeníticos	7
Tabela 2.2- Propriedades Mecânicas de aços inoxidáveis austeníticos	7
Tabela 2.3- Composição química (%) do aço AISI 310	8
Tabela 2.4- Composição química do aço inoxidável duplex UNS S32304.....	9
Tabela 2.4- Tipos de corrosão em alguns sistemas material-meio corrosivo.....	14
Tabela 2.6- Influência da concentração de cloretos, temperaturas e pH na CST para o aço AISI 304.....	14
Tabela 2.7- Valores típicos de propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis a temperatura ambiente.....	26
Tabela 3.1- Parâmetros de soldagem adotados.....	31
Tabela 3.2- Composição química dos aços inoxidáveis estudados conforme norma ASTM A240/A240M.....	32
Tabela 4.3- Valores de dureza dos aços estudados com metal de adição E309L.....	44
Tabela 4.4- Valores de dureza dos aços estudados com metal de adição E2209	45
Tabela 4.5-Resultado do ensaio de corrosão sob tensão	46

Lista de Abreviaturas e siglas

AISI - American Iron and Steel Institute

ASTM - American Society for Testing and Materials

CNC - Controle Numérico computadorizado

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CP - Corpo de prova

CST - Corrosão Sob Tensão

FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais

IEM - Instituto de Engenharia Mecânica

MB - Metal Base

ZF - Zona Fundida

ZTA - Zona Termicamente Afetada

UNS – Unified Numbering System

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO	1
2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1- Aços Inoxidáveis	3
2.1.1 Efeito dos elementos de liga nos aços inoxidáveis	5
2.1.2- Aços inoxidáveis austeníticos	6
2.1.3- AISI 310.....	8
2.2- Aço inoxidável duplex.....	8
2.2.1- Aço inoxidável duplex 2304.....	9
2.3-Corrosão sob Tensão	10
2.4-Fatores importantes da corrosão sob tensão	12
2.4.1-Tensão	12
2.4.2-Meio corrosivo	13
2.4.3- Tempo	15
2.4.4- Temperatura	16
2.5- Fator metalúrgico da Corrosão sob tensão	17
2.6- Metodos de ensaio de corrosão sob tensão.....	19
2.6.1- Ensaios estaticos com corpo de prova não entalhados.....	20
2.7 - Soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos	23
2.8-Soldabilidade de aços inoxidáveis duplex	26
3-MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1-Preparação dos corpos de prova	29
3.2- Preparação da solução de ataque	33
3.3- Ensaio de Tração	33
3.4- Ensaio de Dureza Vickers	34
3.5-Ensaio Metalográficos	35
3.6- Ensaio de corrosão sob tensão	36

3.6.1- Dispositivo de Ensaio de Corrosão sob Tensão.....	36
3.6.2- Procedimento do ensaio	37
4-RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1- Microestrutura do metal base e das juntas soldadas	39
4.2-Ensaio de tração	42
4.4-Resultados dos ensaios de corrosão sob tensão	46
4.5- Análise microestrutural após o ensaio de corrosão sob tensão.....	47
5-CONCLUSÃO.....	53
6-SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
6- BIBLIOGRAFIA.....	59

1-Introdução

Os aços inoxidáveis são utilizados em aplicações cujo requisito básico é ter uma elevada resistência ao ataque químico por diferentes meios. Existem diversas aplicações para estes aços que se baseiam em suas características mecânicas, tanto à temperatura ambiente como a baixa ou alta temperatura, nas propriedades magnéticas e muitas outras [3]. São encontrados principalmente na indústria química, indústria alimentícia, nos grandes centros urbanos, na fabricação de bens duráveis, em peças de cutelaria, instrumentos de precisão e em diversas aplicações onde é necessário o uso de operações de soldagem [8].

A soldagem é um processo industrial de junção de metais sendo utilizado na recuperação de peças desgastadas e para a aplicação de revestimentos de características especiais, frequentemente de aço inoxidável, sobre superfícies metálicas [34]. Os processos de soldagem afetam as propriedades mecânica, térmica e metalurgicamente de uma forma intensa na solda e regiões vizinhas a esta. Com isso podem ocorrer nessas regiões alterações de microestrutura, composição química, aparecimento de um elevado nível de tensões residuais e degradação nas propriedades mecânicas [3].

A corrosão consiste na destruição dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio podendo ou não estar associada a esforços mecânicos. De um modo geral, a corrosão consiste num processo espontâneo e está constantemente transformando os materiais metálicos acarretando na perda de suas propriedades mecânicas. Com isto, estes materiais deixam de satisfazer os fins a que se destinam [1]. A necessidade de redução de custos e o aumento de vida útil de componentes estruturais para as indústrias e empresas, tem motivado pesquisas aplicadas à este campo melhorando os materiais quanto ao aspecto da corrosão. Com relação ao emprego de materiais na construção de equipamentos ou instalações, é necessário verificar se os mesmos resistem à ação do meio ambiente, além de apresentar propriedades mecânicas e características de fabricação adequadas [2].

O fenômeno da corrosão sob tensão (CST) está associado à presença de uma ação mecânica combinada com um meio corrosivo específico e se caracteriza principalmente pelo surgimento de trincas que favorecem a fratura do material, tornando-se um dos mecanismos de degradação mais severos que influenciam na vida útil de componentes estruturais [7].

Os altos custos associados ao processo da CST justificam os esforços empenhados por diversos pesquisadores em buscar alternativas para as diversas situações práticas em que a CST possa estar inserida [7]. Nesse sentido, os ensaios de CST feitos em laboratório fornecem informações sobre o comportamento do material à corrosão em menor tempo se comparado com aquelas obtidas através de experiências em serviço.

A importância das juntas soldadas dissimilares de aço inoxidável austenítico e aço inoxidável duplex no trabalho estudado é de grande relevância no meio industrial, com a união desses dois tipos de aços pode-se gerar redução de custos de fabricação das unidades de destilação e de processamento de petróleo.

Assim neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar a influência do metal de adição E2209 e E309L na susceptibilidade à corrosão sob tensão de juntas soldadas dissimilares de aço inoxidável austenítico AISI 310 e aço inoxidável duplex UNS S32304.

2- Revisão Bibliográfica

2.1- Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis pertence a uma família de aços que contêm cromo, níquel e outros elementos de liga. Apresentando o cromo, como principal elemento responsável pela resistência à corrosão destes aços e contendo no mínimo 11% do mesmo conforme mostra a figura 2.2 [34]. A superfície desses aços ao entrar em contato com oxigênio do ar atmosférico ou meio oxidante, permite a formação de uma película finíssima de óxido de cromo na superfície destes aços protegendo o mesmo contra ataques de vários meios corrosivos [3].

A figura 2.1 mostra um esquema da formação do filme passivo:

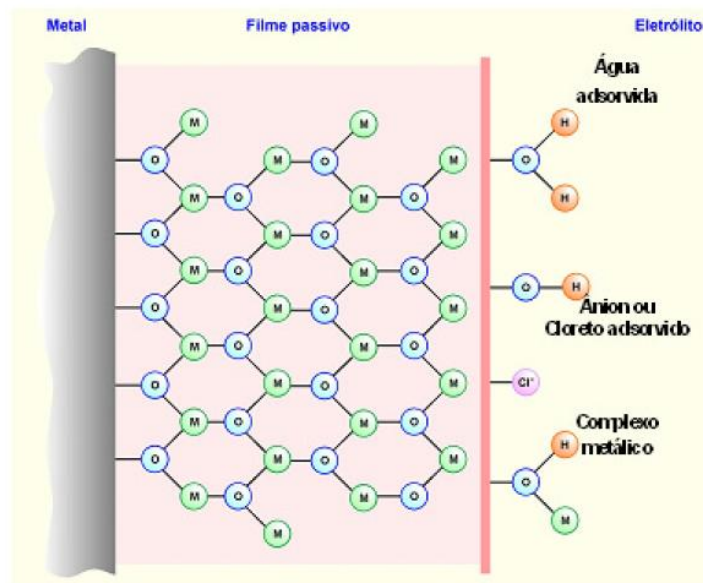


Figura 2.1- Processo de passivação do aço inoxidável [27]

A formação do filme passivo é muito aderente ao aço inoxidável e tem sua resistência aumentada à medida que se adiciona mais cromo à mistura, onde mesmo se o aço sofrer algum tipo de dano como por exemplo: arranhões ou cortes o oxigênio do ar atmosférico se combina com o cromo e forma novamente o filme protetor [25].

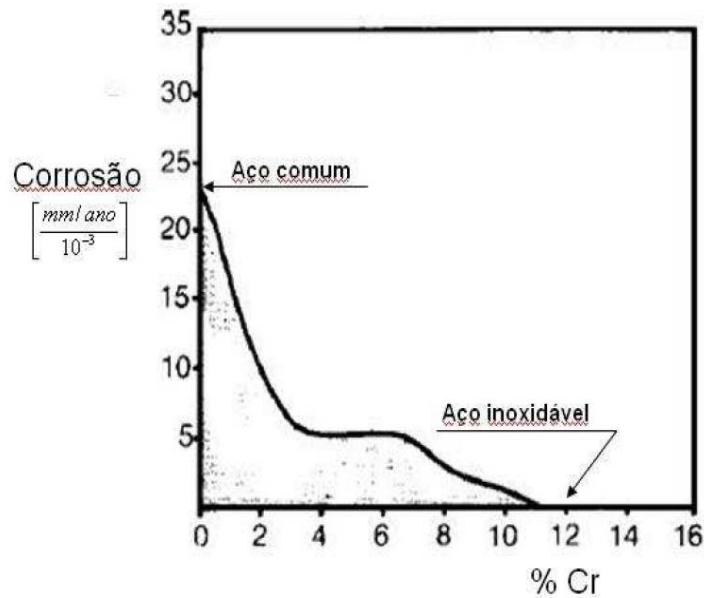


Figura 2.2- Taxa de corrosão de aços exposto a uma atmosfera industrial ao longo do tempo [3]

De acordo com Modenesi [3], os aços inoxidáveis apresentam adições de outros elementos de liga como :

- carbono, silício, manganês e nitrogênio, utilizados na fabricação do aço ou adicionados para favorecer a sua fabricação ou modificar determinadas propriedades.

- alumínio, molibdênio, cobre, titânio, tungstênio, nióbio e cobalto são incluídos nesta categoria, por ser elementos de adição que melhoram as propriedades do aço para certas aplicações.

- oxigênio, fósforo, e enxofre são elementos presentes como impurezas e considerados indesejáveis nos aços inoxidáveis, apesar do enxofre possa ser adicionado e melhorar a usinabilidade destes aços.

Segundo Chiaverini [8], os aços inoxidáveis apresentam uma classificação mais usada e simples de acordo com a sua microestrutura à temperatura ambiente. A partir dessas considerações, temos os seguintes grupos:

- I- Aços inoxidáveis Martensíticos.
- II- Aços inoxidáveis Ferríticos.
- III- Aços inoxidáveis Austeníticos.

Existem ainda, outras duas classificações de aços inoxidáveis que são resistentes à corrosão e que apresentam características importantes para diversas aplicações :

- Aços inoxidáveis duplex;
- Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.

2.1.1 Efeito dos elementos de liga nos aços inoxidáveis

Cromo (Cr)

- A sua presença é indispensável para conferir a resistência à corrosão desejada dos aços inoxidáveis e depende do teor de cromo contido.
- A medida que se acrescenta Cr no aço inoxidável a sua resistência a corrosão aumenta progressivamente.

Níquel (Ni)

- Aumenta a estabilidade da austenita.
- com sua adição o aço se torna mais dúctil.
- Apresenta um pequeno efeito na resistência a corrosão.
- Com a sua presença, o aço se torna não- magnético [3].

Carbono (C)

- Adições desse elemento, aumenta a formação de fase σ nos aços inoxidável por formarem carbonetos de cromo.

Titânio (Ti) e Nióbio (Nb)

- Com a adição desses elementos, previne-se a ligação do carbono com o cromo minimizando a perda da resistência a corrosão [7].
- Age como refinador de grão.
- Promove a formação de ferrita.

De acordo com o objetivo do trabalho, é feito nos tópicos seguintes uma breve descrição sobre os aços austeníticos e os aços inoxidáveis duplex, dando uma maior atenção aos aços estudados na pesquisa para o experimento.

2.1.2- Aços inoxidáveis austeníticos

São aços que apresentam uma microestrutura predominantemente austenítica e uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Em sua composição contém principalmente ligas Fe-Cr-Ni e constituem a maior família dos aços inoxidáveis em relação a sua utilização e em termos de quantidades de ligas [3].

A adição do elemento químico níquel melhora a sua resistência a corrosão, formando uma camada de óxido protegendo o aço espontaneamente. Para comprovar esse fato, de acordo com Chiaverini a restauração da película inerte protetora (filme passivo) que tenha sido retirada de um aço inoxidável contendo Cr-Ni é muito mais rápida do que a de um aço inoxidável contendo somente cromo [8]. Apresentam também uma maior facilidade de serem soldados e conformados mecanicamente.

Suas principais características são: [7]

- Apresenta boa resistência mecânica e à corrosão sob temperaturas elevadas;
- Tem uma soldabilidade relativamente boa, com a escolha adequada do processo de soldagem e do metal de adição;
- Possuem alta tenacidade e ductilidade superiores a maioria dos outros aços em condições de baixas temperaturas;
- Apresentam alto custo principalmente devido ao níquel adicionado;
- Esses aços são essencialmente não-magnéticos.

Com as propriedades listadas acima, o aço inoxidável austenítico torna-se muito utilizado nas indústrias químicas e petroquímicas.

As composições químicas e as propriedades mecânicas de alguns tipos de aços inoxidáveis austeníticos são descritas abaixo conforme tabelas :

Tabela 2.1- Composição química de aços inoxidáveis austeníticos [28]

Normas			Composição Química (% em peso)							
AISI	ASTM	DIN	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
301	S30100	1.4310	0,15	2,00	1,00	0,045	0,03	16,00-18,00	6,00 - 8,00	-
304	S30400	1.4301	0,08	2,00	0,75	0,045	0,03	17,50-19,50	8,00 - 10,50	-
304L	S30403	1.4307	0,03	2,00	0,75	0,045	0,03	17,50-19,50	8,00 - 12,00	-
316	S31600	1.4401	0,08	2,00	0,75	0,04	0,03	16,00-18,00	10,00-14,00	2,00-3,00
316L	S31603	1.4404	0,03	2,00	0,75	0,04	0,03	16,00-18,00	10,00-14,00	2,00-3,00
321	S32100	1.4541	0,08	2,00	0,75	0,04	0,03	17,00-19,00	9,00-12,00	-

Tabela 2.2- Propriedades Mecânicas de aços inoxidáveis austeníticos [28]

Normas			Propriedades Mecânicas			
AISI	ASTM	DIN	Limite de Resistência Mínimo (MPa)	Limite de Escoamento mínimo (0,2%) (MPa)	Alongamento 50 mm mínimo (%)	Dureza Rockwell - B máxima (HRB)
301	S30100	1.4310	515	205	40	95
304	S30400	1.4301	515	205	40	92
304L	S30403	1.4307	485	170	40	92
316	S31600	1.4401	515	205	40	95
316L	S31603	1.4404	485	170	40	95
321	S32100	1.4541	515	205	40	95

2.1.3- AISI 310

O aço inoxidável austenítico 310 cromo-níquel é não-temperável e não-magnético. Possui boas propriedades mecânicas e resistência a oxidação a quente e a fadiga térmica. Seu elevado teor de níquel (Ni) e cromo (Cr) lhe conferem excelente resistência a diversos agentes corrosivos, apresentando boas características mecânicas em temperaturas elevadas [7].

As suas principais aplicações típicas são em peças de fornos, caixas para recozimento e para cementação, equipamentos para indústria química e do petróleo, peças de motores a jato e de turbinas à gás, permutadores de calor, aquecedores de ar, transportadores internos de fornos, eletrodos e varetas de solda, etc [8].

A sua composição química típica é apresentada na tabela abaixo:

Tabela 2.3- Composição química (%) do aço AISI 310 (catalogo Carbinox)

ABNT/SAE/AISI	C máx.	Mn Max.	P máx.	S máx.	Si Max.	Ni	Cr
310	0,25	2,00	0,045	0,030	1,5	19,0 - 22,0	24,0 - 26,0

2.2- Aço inoxidável duplex

Os aços inoxidáveis duplex (AID) são assim chamados por apresentarem uma microestrutura bifásica, ou seja, formada por duas fases (ferrita e austenita) em quantidades aproximadamente iguais e determinadas sobretudo pelos teores de ferro, cromo e níquel [3].

Durante os últimos anos, esses aços vem sendo utilizados em diversas aplicações industriais em setores químicos e petroquímicos onde exijam uma maior resistência mecânica, boa ductilidade e tenacidade. Também deve ser destacado, a sua alta resistência a corrosão sob tensão se comparado aos aços inoxidáveis austeníticos [8].

De acordo com Silva [11], os AID são divididos em dois grupos de acordo com o seu teor de carbono:

1 – aços com baixo teor de carbono ($0,01\% \text{ peso} \leq C \leq 0,08\% \text{ peso}$). São ligas forjadas (trabalhadas mecanicamente);

2 – aços com alto teor de carbono ($0,3\% \text{ peso} \leq C \leq 0,5\% \text{ peso}$). São ligas utilizadas na condição fundida (condição bruta de fusão).

As ligas de AID com baixo teor de carbono entre temperaturas de 900°C e 1200°C durante trabalho a quente, a microestrutura formada é disposta em lamelas alternadas de ferrita e austenita. Já em relação as ligas com alto teor de carbono, a fase que se solidifica primeiro é a ferrita.

Os AID apresentam geralmente excelente resistência a corrosão uniforme e boa resistência a corrosão sob tensão em meios contendo altos teores de íons cloretos em solução aquecida[11].

Chiaverini [8] aponta as propriedades superiores dos AID como a principal causa em relação aos outros tipos de aços inoxidáveis na crescente utilização desses materiais em aplicações de grande responsabilidade, como por exemplo: Tanques de produtos químicos, indústria de polpa e papel, trocadores de calor, indústria de extração de petróleo e gás entre outras.

2.2.1- Aço Inoxidável duplex 2304

O Aço inoxidável duplex 2304, comumente designados por *lean duplex* são aços duplex de baixa liga e apresenta uma boa resistência geral à corrosão devido ao seu alto teor de cromo. É importante destacar, que na corrosão por pites o mesmo apresenta um comportamento melhor do que o aço inoxidável austenítico 316. Souza [41] destaca a sua utilização em aplicações como tanques de estocagem, tubos flexíveis, transportes e engenharia civil, onde vem gerando uma economia nos custos deste material.

A sua composição química é apresentada na tabela abaixo:

Tabela 2.4- Composição química do aço inoxidável duplex UNS S32304 [41]

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Cu	Mo	N
%	0,019	1,35	0,39	22,0- 24,0	3,5- 5,5	0,028	0,015	0,5	0,44	0,11

2.3-Corrosão sob Tensão

A corrosão sob tensão (CST) consiste de um processo destrutivo que causa a alteração dos materiais quando em contato com um meio corrosivo, através da aplicação de uma tensão de tração e tendo como resultado o desenvolvimento progressivo de trincas em materiais susceptíveis. Com isso, os materiais deixam de satisfazer os fins que se destinam [7].

A propagação das trincas é geralmente lenta e depende do material, meio corrosivo e aos níveis de tensão aplicado ou residual que deve ser necessariamente maior que certo valor limite [5].

O fenômeno de CST tem apresentado vários estudos tanto na área científica e tecnológica, pois através dos ensaios de CST, é possível fazer uma estimativa do tempo de vida útil dos equipamentos e peças em meios agressivos prevendo riscos e selecionando adequadamente o material para uma aplicação específica [7].

A figura 2.3 mostra as condições necessárias para que ocorra a CST :

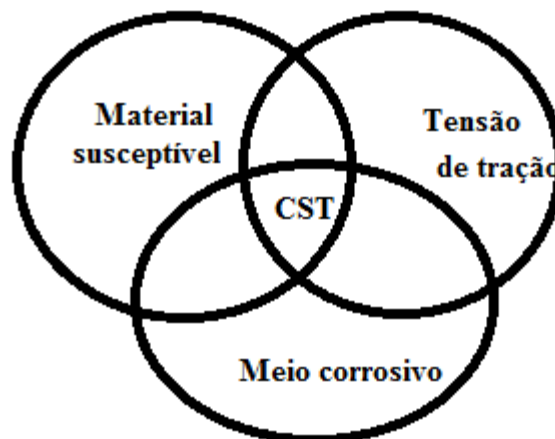


Figura 2.3- Pré- requisitos para a ocorrência da CST [35]

O mecanismo da CST ainda não está totalmente esclarecido, devido a complexa relação entre o metal e as propriedades do meio, sendo assim de uma forma geral, a CST envolve três estágios [7]:

- 1º estágio (inicial) ocorre o surgimento de pontos de concentrações de tensões onde pode se desenvolver uma trinca.
- 2º estágio leva a propagação da trinca devido aos efeitos combinados da corrosão e tensão.
- 3º estágio ocorre a continuação da propagação da trinca unicamente devido a tensão de tração e reduzindo a espessura do material.

Devido a diversidade de mecanismos propostos em explicar a propagação de trincas de CST em aços inoxidáveis, e também na dificuldade em associá-lo em torno de um processo único, o trincamento de CST está sendo descrito em torno da influência do meio corrosivo.

As características fundamentais da CST podem ser assim descritas como segue [11]:

- Dois processos distintos são verificados. O primeiro período de incubação, correspondente a um lento processo de corrosão e o segundo correspondente ao processo de propagação das mesmas.

- A fratura de CST ocorre num plano perpendicular à tensão principal .

- As trincas de CST podem ser transgranulares ou intergranulares, dependendo do material e do meio que cause as mesmas.

- A fratura microscopicamente pode apresentar presença de facetas de clivagem característica de uma ruptura frágil, onde as trincas podem se espalhar de maneira rápida.

- Podem ocorrer ramificações nas trincas de CST, dependendo do nível de tensão que é aplicado no material.

- Os aços inoxidáveis austeníticos são susceptíveis a CST envolvendo meios contendo cloretos, mas o mesmo não se pode dizer se o meio envolvido é a amônia. Mas podem também sofrer CST em soluções contendo elevada concentração de íons OH⁻ [3] .

2.4-Fatores importantes da CST

Alguns fatores são importantes na susceptibilidade na corrosão sob tensão dentro os quais se destacam:

2.4.1-Tensão

As tensões internas ou tensões externas resultantes das condições de trabalho, abaixo do limite de elasticidade do material (tensão mínima) provocam a CST associadas a um meio agressivo [7].

Segundo Gemelli [4], quando uma fissura ao ser observada no interior do material também há uma concentração de tensão induzida pela presença da mesma. Porém, se a fissura é observada dentro do meio agressivo, as paredes da mesma estão praticamente ausentes de tensões.

Fontana [5] ressalva que os critérios para essas tensões é que sejam simplesmente tensões de tração e que tenham um valor suficiente com diferentes fontes: aplicada, residual, térmica, ou de soldagem.

A figura 2.4 mostra curvas típicas de tensão em função do tempo de fratura de alguns aços inoxidáveis austeníticos. Em cada curva observa-se que com o aumento da tensão aplicada há uma diminuição do tempo de ruptura [7] .

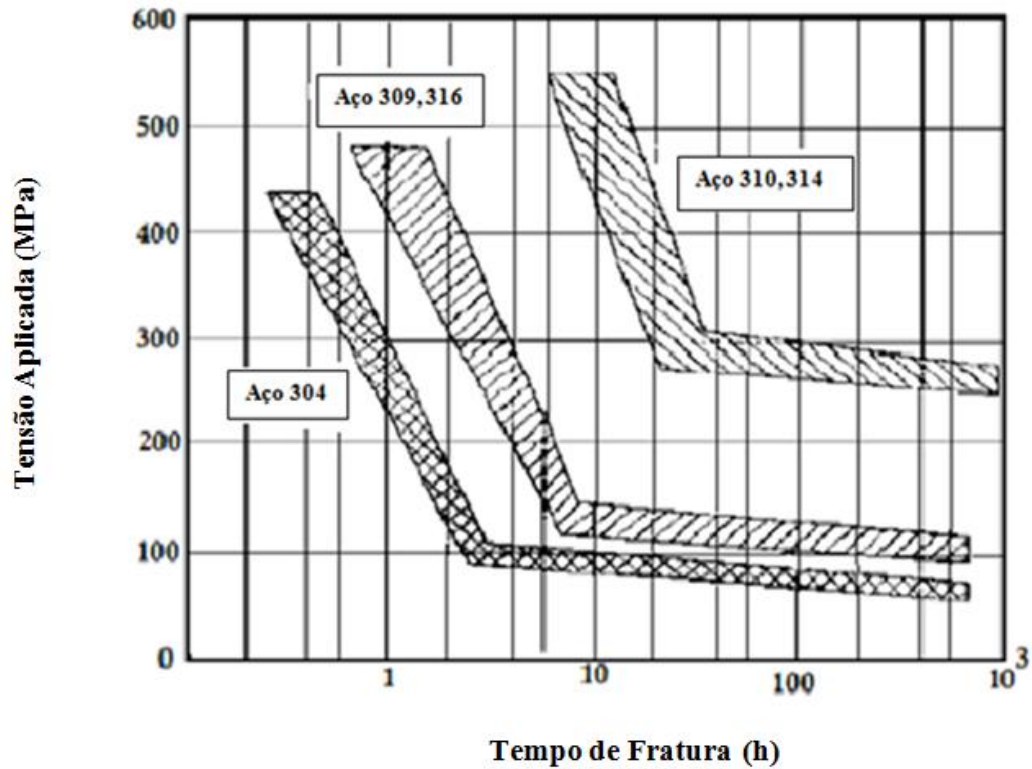


Figura 2.4- Comportamento da fratura de aços inoxidáveis austeníticos a CST em solução de cloreto de magnésio [29]

2.4.2-Meio corrosivo

A influência do meio corrosivo na manifestação do fenômeno de corrosão e o seu tipo de propagação no interior do metal depende do sistema metal- meio corrosivo. A tabela 2.5 indica alguns desses sistemas.

Tabela 2.5 - Tipos de corrosão em alguns sistemas material-meio corrosivo [4]

Material	Meio corrosivo
Aços inoxidáveis austeníticos	Soluções contendo íons de alogetos OH ⁻ + H ₂ O H ₂ O à alta temperatura Ácidos politiônicos
Aços ao carbono	OH ⁻ + H ₂ O NO ₃ ⁻ + H ₂ O H ₂ S + H ₂ O Água do mar
Ligas de alumínio	Cl ⁻ + H ₂ O Br ⁻ + H ₂ O I ⁻ + H ₂ O
Latão Cu- 30 Zn	Soluções de amoníaco e mercúrio
Ligas de Titânio	Soluções de H ₂ NO ₃ , soluções contendo íons agressivos (Cl ⁻ , Br ⁻ ,I)

Segundo Gemelli [4], o surgimento da CST em metal ocorre quando o meio corrosivo induz uma reação eletroquímica em uma determinada região da superfície do metal promovendo o aparecimento das trincas. Alguns fatores como por exemplo: concentração dos reagentes e temperatura do meio corrosivo, podem influenciar no surgimento do trincamento por CST [4]. Alguns meios corrosivos podem causar a CST em metais como por exemplo soluções aquosas, líquidos contendo sais fundidos, gases e líquidos não aquosos orgânicos e inorgânicos [7].

Nos aços inoxidáveis austeníticos, os casos em que ocorre a CST é na presença de meios contendo cloretos [7]. Os íons cloretos promove uma sensibilidade nesses aços e

fatores como temperatura, concentração de íons agressivos e composição química estabelecem essa fragilidade. Assim em uma solução de cloreto de magnésio por exemplo, a resistência ao trincamento por CST aumenta com a concentração de molibdênio (Mo), cromo (Cr) e níquel (Ni) como mostra a tabela 2.6 [4].

Tabela 2.6- Influência da concentração de cloretos, temperatura e pH na CST para o aço austenítico AISI 304 [2].

Concentração de cloretos (ppm)	Temperatura (°C)	pH	Corrosão por pite	CST
1000	35	7	ausente	presente
1000	60	7	presente	ausente
1000	100	7	ausente	presente
1000	100	12	ausente	ausente
1000	100	2	presente	presente
10000	20	12	presente	ausente
10000	60	2	presente	presente
10000	85	12	ausente	presente

2.4.3- Tempo

O tempo de ruptura ou falha pode levar algumas horas ou até alguns anos. Assim desse modo, quatro estágios caracterizam a influência do parâmetro tempo na CST [7]:

- Período de incubação
- formação de um filme passivo
- formação (nucleação) e propagação de fissuras (trincas)
- ruptura do material

O tempo de incubação se caracteriza pela nucleação das trincas após um certo tempo. Após esse período, tem-se a propagação das trincas (fissuras) até a fratura do material. Logo o tempo de fratura é a soma do tempo de incubação com o tempo de propagação das fissuras [4]. Na figura 2.5, observa-se o tempo de fratura em função da temperatura para o aço

inoxidável austenítico 310. Para este aço a relação entre o tempo de ruptura e a temperatura diminui em uma função linear no intervalo mostrado na região 1.

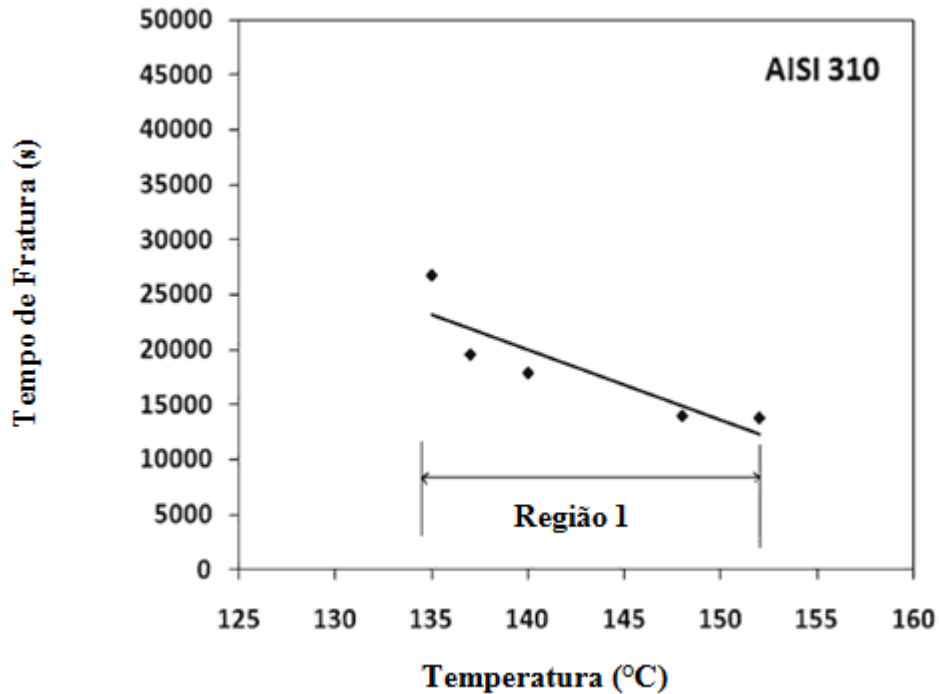


Figura 2.5- Tempo de fratura versus temperatura para o aço AISI 310 [10]

2.4.4- Temperatura

A influência da temperatura no estudo da CST dos aços inoxidáveis diminui a estabilidade dos filmes passivos quando a mesma ultrapassar um determinado valor crítico. Com o aumento da temperatura ocorre o aumento da velocidade de fratura na CST, e a partir de um determinado valor de temperatura a cinética da reação ocorre mais lentamente [4]. Uma análise feita na figura 2.6, observa-se que a curva perde a sua linearidade próximo a uma temperatura de 80°C com a elevação da temperatura [31].

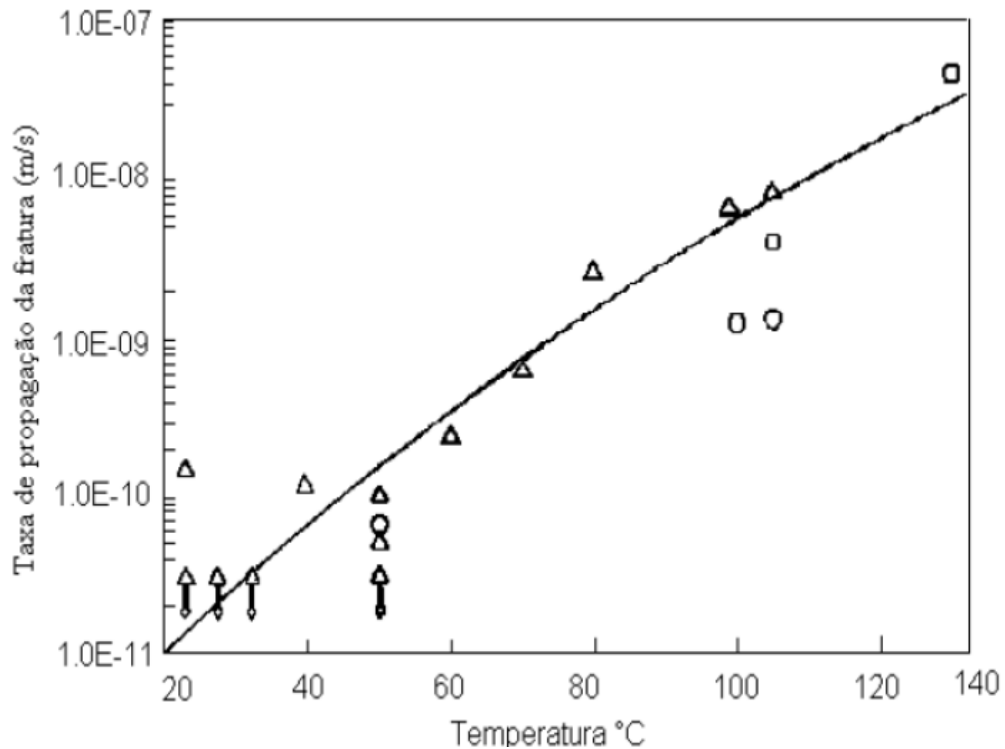


Figura 2.6- Comportamento da velocidade da trinca em relação a temperatura do meio corrosivo [31]

2.5- Fator metalúrgico da CST

Os aspectos metalúrgicos como composição química média de algumas ligas, interações das discordâncias, orientação preferencial dos grãos, composição e distribuição dos precipitados e ocorrência das transformações de fase influenciam na CST [7].

A escolha de materiais que são imunes a CST torna-se necessário, pois a composição química do metal altera a susceptibilidade, como por exemplo, nos aços inoxidáveis compostos por Fe-Cr-Ni que adquirem uma susceptibilidade máxima com o níquel (Ni) em torno de 9% [32].

Quando o elemento químico nitrogênio é adicionado aos aços inoxidáveis, possibilita uma melhora na resistência ao desgaste, resistência à corrosão e na sua resistência mecânica. Já a sua substituição por carbono, permite a obtenção de materiais com elevado limite de escoamento. O que difere em suas propriedades mecânicas e na resistência a corrosão quando

os aços inoxidáveis são ligados com carbono (C) ou nitrogênio, está relacionado as diferenças na configuração eletrônica da rede cristalina [33].

O trincamento por CST geralmente é causado pela contaminação acidental em processos industriais através de soluções aquosas contendo cloretos ou pela contaminação da superfície do material durante a fabricação ou o seu transporte. Sendo as soluções contendo cloretos, as condições mais severas quando entram em contato com a superfície do material conforme mostra a figura 2.7 [4]. Algumas precauções podem ser tomadas para evitar a contaminação, por exemplo, por água do mar durante a fabricação, transporte e armazenagem desses materiais. Em aços inoxidáveis austeníticos a CST pode ocorrer com elevadas concentrações de íons hidroxila e em ambientes oxigenados com água fervente o trincamento por CST também pode ocorrer [3].

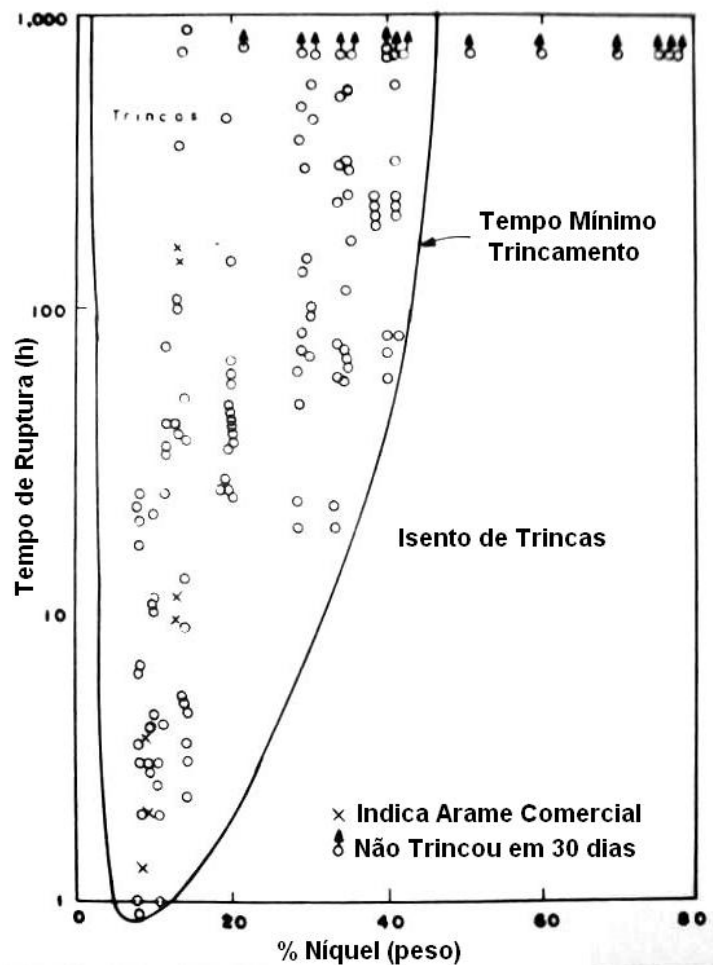


Figura 2.7- Fissuração por corrosão sob tensão em arames de Fe-Cr-Ni submetidos a uma solução fervente de cloreto de magnésio [5]

Segundo Gentil [2], são observadas algumas características de interação de tensões estáticas e corrosão associados ao fenômeno do trincamento por CST como por exemplo: deformação do metal, fraturas frágeis e seletividade dos meios corrosivos em relação aos metais.

Modenesi [3] ressalva que os aços inoxidáveis austeníticos podem sofrer contaminação superficial em contato com zinco, por ser um metal de baixo ponto de fusão causando penetrações e fissuração intergranular nesses aços. Também é aconselhável evitar qualquer contaminação superficial com tintas por exemplo, se estes aços forem expostos a temperaturas superiores à 400°C.

2.6- Métodos de ensaio de CST

Tem sido desenvolvido diferentes técnicas experimentais para se fazer uma avaliação comportamental de materiais que são susceptíveis a CST, onde algumas dessas técnicas retratam o comportamento o mais real possível sob esforços mecânicos e à meios corrosivos [2].

Por ser um tema muito vasto, a CST envolve uma análise de avaliação do material e do ambiente em condições de tensões aplicadas ou residuais, que podem afetar o seu desempenho durante o decorrer de seu uso. O uso de métodos de ensaios de CST, serve para avaliar fatores como: histórico de processo, composição do produto, condições ambientais de serviço e carga de trabalho [7].

Também é fundamental estabelecer uma conexão entre os resultados das avaliações dos testes de CST em laboratório com as aplicações reais de serviços. Por isso esses ensaios nos fornecem resultados com um maior nível de confiança, resultando em um menor custo para as indústrias e empresas [2].

Os métodos utilizados para verificar a CST são os ensaios de iniciação de trincas, ensaios de crescimento de trinca e ensaios de propagação de trincas. De acordo com Gemelli [4], o estudo da CST e a fragilização por hidrogênio é feita através de ensaios realizados em laboratório classificados em:

- ensaio com carga ou deformação constante;
- ensaios com velocidade de deformação constante.

Podem se obter resultados quantitativos ou qualitativos de acordo com o dispositivo de ensaio utilizado. Nos ensaios quantitativos geralmente são feitos em uma máquina de tração.

Dependendo do corpo de prova utilizado, os ensaios são classificados em três tipos [4]:

- ensaios estáticos com corpo de prova não entalhados;
- ensaios estáticos com corpo de prova entalhados;
- ensaios de tração a baixa velocidade de deformação.

No presente contexto, somente será comentado os ensaios estáticos com corpo de prova não entalhados, pois foram os utilizados em laboratório do IEM (Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI) para fazer a pesquisa.

2.6.1- Ensaios estáticos com corpo de prova não entalhados

Este ensaio é realizado a carga constante ou a deformação constante, onde os corpos de prova são submetidos a esforços mecânicos e em seguida expostos ao meio corrosivo, obtendo-se assim o tempo de ruptura que é o parâmetro avaliado na susceptibilidade a CST. Em ensaios com carga constante, o tempo de fratura corresponde ao tempo de ruptura do material (corpo de prova), na qual equivale a soma dos tempos de incubação e propagação das fissuras (trincas) [7].

Em ensaios de deformação constante, o tempo de fratura equivale ao tempo do surgimento das primeiras trincas (tempo de incubação). A tensão real em um ensaio de deformação constante diminui quando a trinca se propaga no material [30].

De acordo com Gemelli [4], nos ensaios com carga constante a tensão real em função do tempo aumenta com a propagação das trincas devido a diminuição da seção real do corpo de prova. Observa-se na figura 2.8 uma comparação da evolução da tensão real e da tensão nominal em função do tempo em ensaios a carga constante ou deformação constante, onde estabelece para os ensaios a deformação constante uma diminuição da tensão nominal com o decorrer do tempo.

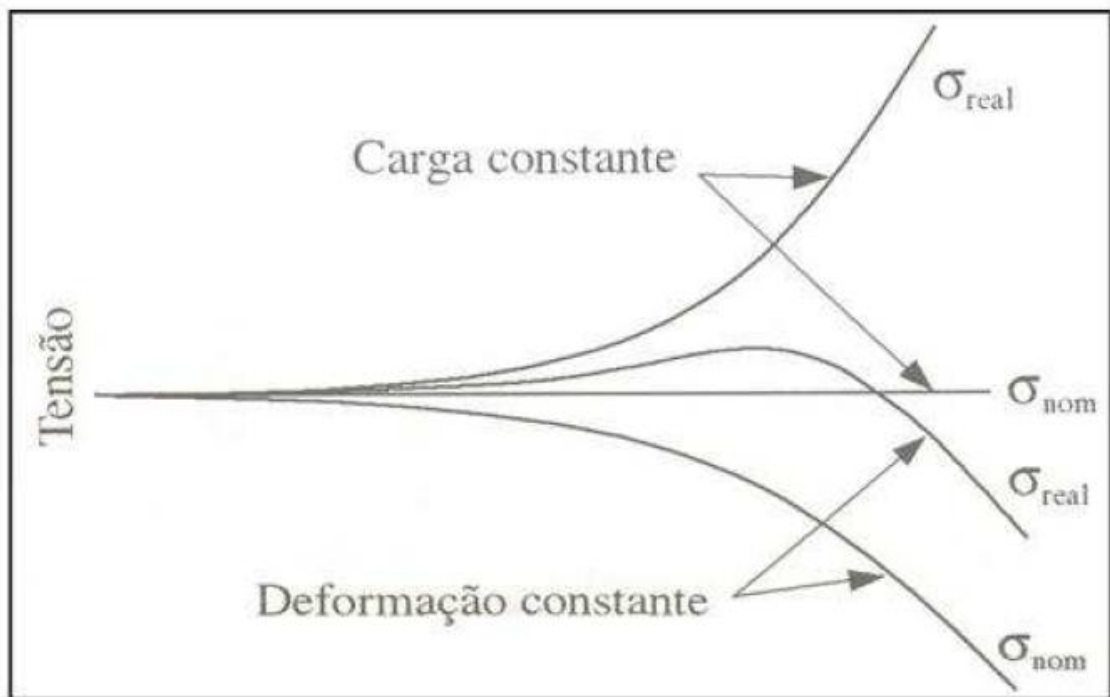


Figura 2.8- Evolução da tensão real e da tensão nominal nos ensaios a carga constante ou deformação constante [4]

Em ensaios estáticos com corpos de prova não entalhados e para pequenas deformações ($x_0/y_0 \ll 1$), a tensão constante σ_s é calculada a partir da seguinte equação:

$$\sigma_s = \frac{12E X_0 e}{3(Y_0^2 - 4Y_1^2)} \quad (2.1)$$

onde:

E - módulo de elasticidade em tração;

e - representa a espessura do corpo de prova;

X_0 - distância de deformação máxima;

Y_0 - distância entre os apoios externos;

Y_1 - distância entre os apoios externos e internos [4].

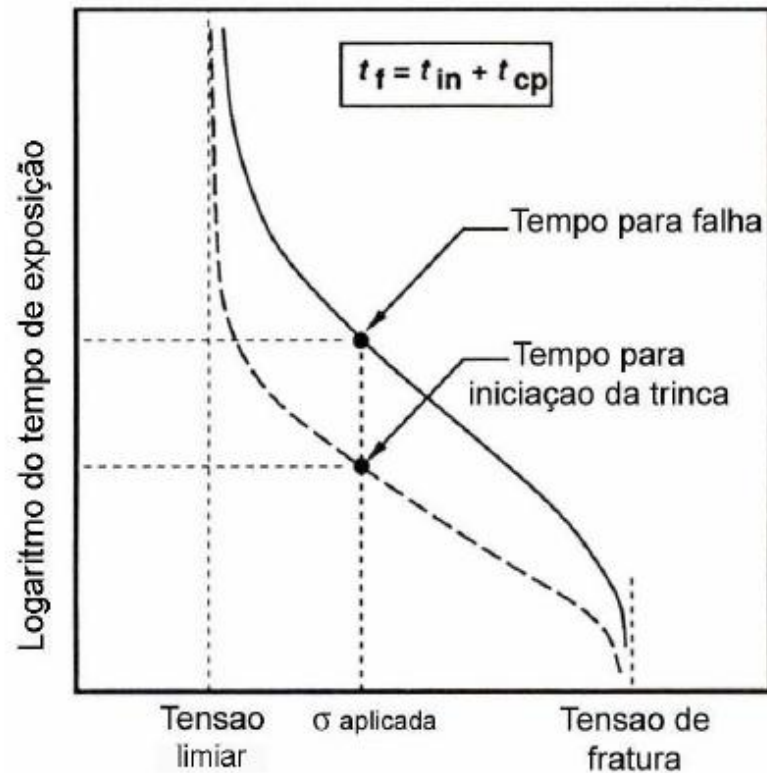


Figura 2.9- Curva esquemática para o tempo de falha típico em função de uma tensão aplicada em ensaios de corrosão [6]

Segundo Barbosa [35], o método de ensaio com corpo de prova não entalhado apresenta uma flexibilidade no tamanho do corpo de prova e na faixa de tensão utilizada. Uma outra vantagem a ser destacada na CST, é que as fraturas dos corpos de provas são completas e de fácil localização. A figura 2.9 mostra uma curva do logaritmo do tempo de exposição do material em um ensaio de corrosão em função da tensão aplicada. Nessa curva, observa-se que com uma determinada tensão σ aplicada no material, o tempo de fratura corresponde ao tempo de incubação (nucleação) das trincas com o tempo de propagação das mesmas.

Segundo a norma ASTM G36-73, apresenta a maneira como os ensaios em aços inoxidáveis austeníticos são feitos em solução efervescente de cloreto de magnésio. A utilização do cloreto de magnésio nos ensaios de CST em aços inoxidáveis se deve a enorme agressividade ao metal. Neste tipo de ensaio o tempo gasto para a fratura do material é o parâmetro a ser medido e relacionado à susceptibilidade à CST do material [7].

Gemelli [4] aborda que os ensaios de flexão a deformação plástica constante são realizados com corpos de prova em forma de U ou C conforme mostra a figura 2.10.

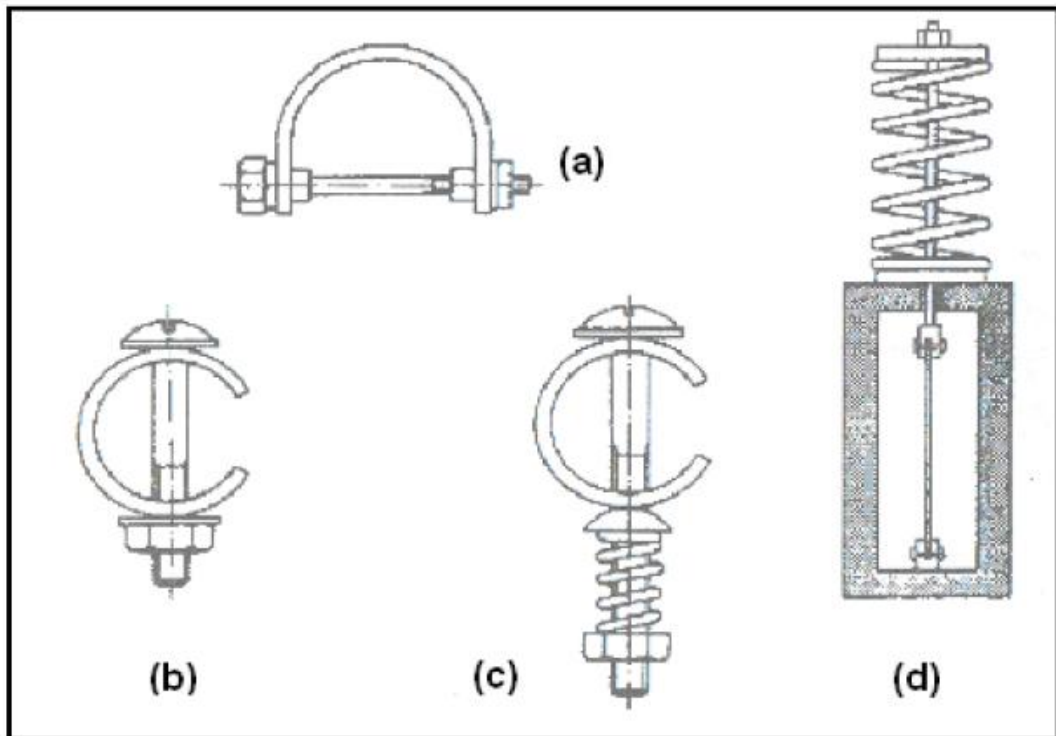


Figura 2.10- Corpos de prova utilizados nos ensaios a deformação plástica constante por flexão, em forma de U (a) ou C (b,c), ou por tração (d) [4]

2.7 - Soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam uma soldabilidade consideravelmente boa. Também tem uma sensibilidade baixa à formação de porosidade e a zona fundida contém propriedades que se assemelham as do metal de base. Normalmente é fácil se obter soldas adequadas sem pré-aquecimento e que podem ser postas em serviço sem tratamentos térmicos pós-soldagem. Isso só pode ser obtido pela escolha adequada do processo de soldagem e do metal de adição, na qual deve ser feito de acordo com os princípios da metalurgia da soldagem destes aços [3].

Teores de níquel de 10% a 11% no aço inoxidável austenítico, faz com que o mesmo se solidifique formando ferrita delta em grande proporção. Acima deste teor torna-se cada vez maior a presença de austenita, que torna-se a única fase a solidificar quando o teor de níquel ultrapassa 14% a 15%. Por outro lado, quando é feito o resfriamento lento a partir de 1000°C e quando o teor de níquel é inferior a 1,5 % forma-se apenas ferrita delta, entre 1,5% e 4% forma-se ferrita delta e austenita e acima somente austenita [43].

Quando o teor de cromo for de 18% e um teor de níquel da ordem de 8% ou 9% já é 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. Entretanto, a estabilidade da austenita, evitando a transformação martensítica, minimiza a possibilidade de trincamentos. E o agregado austenita-ferrita evita crescimento de grão rápido em altas temperaturas, aumentando a soldabilidade e diminuindo a necessidade de pré- ou pós-aquecimento[42].

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam uma sensibilidade ao trincamento a quente intergranular na ZTA mais próxima ao metal de solda. O trincamento a quente está associado à segregação e provoca a formação de fases ainda líquidas nos contornos de grãos recém-solidificados. Elementos como boro, fósforo e enxofre são particularmente nocivos neste aspecto por favorecerem a formação de fases com baixo ponto de fusão. Entretanto, outros elementos como silício, nióbio e manganês também podem provocar a formação dessas fases [34].

Modenesi [3] analisa a microestrutura da ZF do sistema Fe-Cr-Ni para 70% de ferro, conforme o diagrama apresentado na figura 2.11. A partir desse diagrama pseudo-binário, o metal líquido se solidifica inteiramente como austenita, inicialmente como austenita e posteriormente como ferrita, a medida que aumenta a relação entre de Cr e Ni. Durante o resfriamento, toda ou parte da ferrita formada anteriormente pode ainda se transformar em austenita, resultando em uma microestrutura com diferentes morfologias.

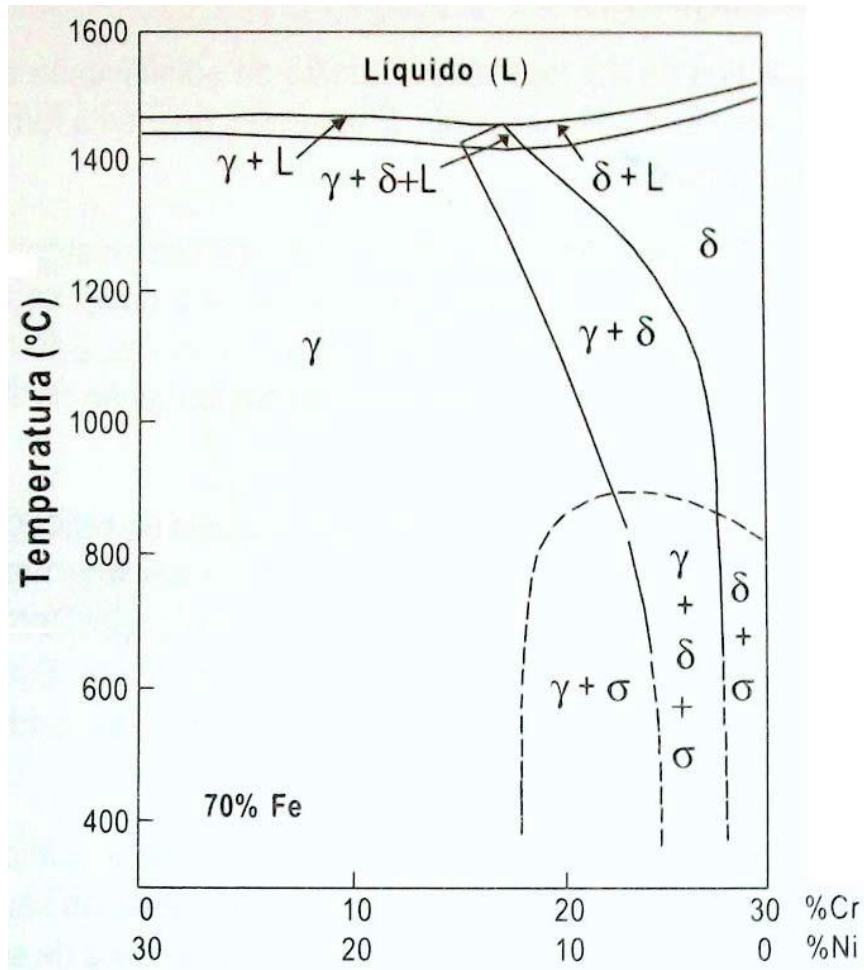


Figura 2.11- Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de ferro 70% [3]

As trincas após a soldagem, podem surgir no metal base adjacente a linha de fusão, podendo ocorrer na soldagem com alto grau de restrição ou de seções relativamente espessas de certos tipos de aços inoxidáveis. Essas fissuras formadas são intergranulares, podendo iniciar-se na ZTA ou em regiões não misturadas e se propagar na ZTA como pode ser observado na figura 2.12. Um outro caminho seguido por essas trincas, inicia-se na superfície da peça adjacente a margem da solda e se propaga internamente na direção normal à superfície [3].

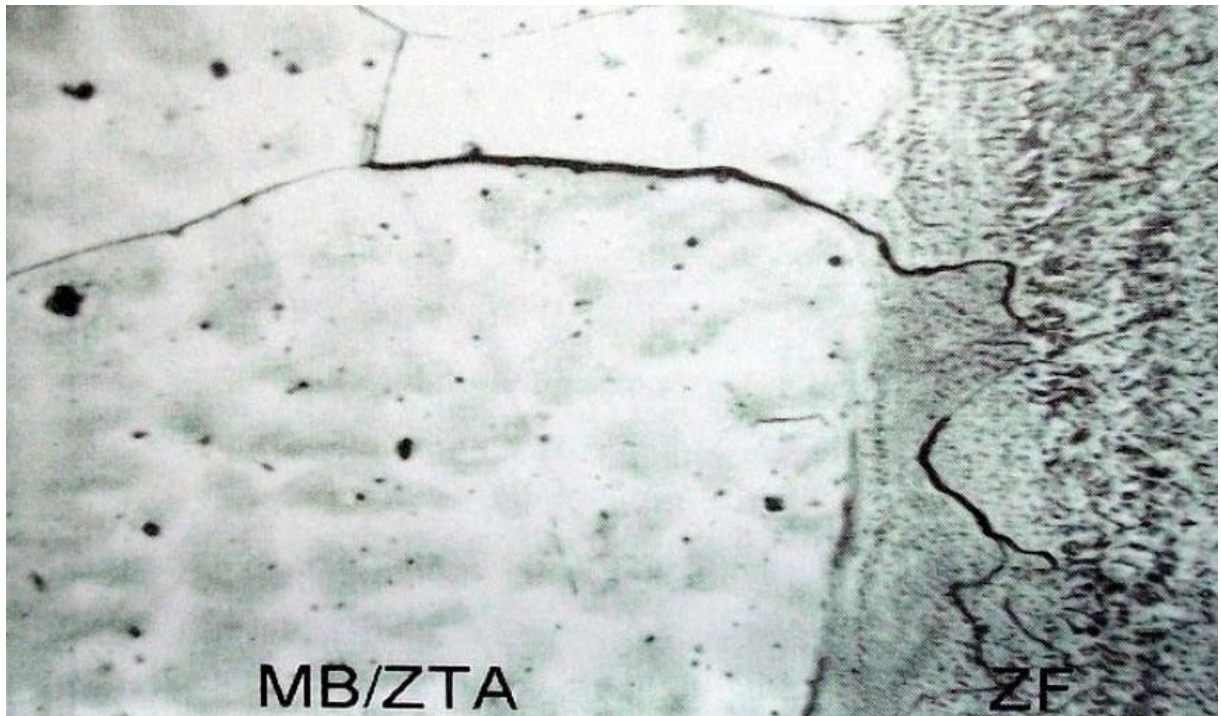


Figura 2.12- Trincas intergranulares na ZTA e na região não misturada da zona fundida de uma peça fundida de aço inoxidável austenítico. Aumento de 100 X [3]

2.8 -Soldabilidade de aços inoxidáveis duplex

Estes aços apresentam um uso relativamente recente em comparação com os aços inoxidáveis austeníticos. Tem uma soldabilidade intermediária entre os aços austeníticos e resistência a corrosão superior aos outros tipos de aços em vários meios, devido ao seu elevado teor de cromo e outros elementos de liga. Caracterizam-se ainda, por apresentar um limite de escoamento muito superior aos aços inoxidáveis austeníticos obtendo assim uma diminuição na espessura de um equipamento [3]. A tabela 2.4 compara as propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis .

Tabela 2.4- Valores típicos de propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis a temperatura ambiente [3]

Aço	Tipo	Lim.de Escoamento (MPa)	Lim.de Resistência (MPa)	Alongamento(%)
304	Austenítico	290	580	55
316	Austenítico	290	580	50
409	Ferrítico	240	450	25
430	Ferrítico	350	520	25
S31803	Duplex	480	680	25

De um modo geral, essas ligas solidificam-se abaixo de 1440°C e apresentam somente ferrita nessas temperaturas. Com a continuação do resfriamento da liga em torno de 1200°C, inicia-se a formação da austenita. Ao final tem-se aproximadamente 50% de cada uma dessas fases na microestrutura do aço. O aquecimento da zona fundida (ZF) e da zona termicamente afetada (ZTA) acima de 1200°C é comum [41]. Durante o resfriamento dessas regiões, a austenita tende a se formar novamente, entretanto, as velocidades de resfriamento são elevadas após a soldagem e a nova quantidade formada de austenita pode não ser suficiente para garantir o bom desempenho do material [3].

O controle dos parâmetros de soldagem, principalmente a corrente, tensão e velocidade de soldagem, podem influenciar para que a junta receba a quantidade de calor adequada e esfrie com condições de temperatura e tempo para que as quantidades desejadas de austenita voltem a ser formadas [44].

Também levar em consideração os possíveis problemas causados pelo aparecimento de precipitados indesejáveis na microestrutura da junta soldada. Essas fases conhecidas por secundárias (fase σ , fase χ , etc.) podem fragilizar as excelentes propriedades mecânicas e a

resistência à corrosão dos aços duplex que se formam durante um resfriamento rápido ou lento da junta soldada [24].

A formação da fase σ em aços inoxidáveis duplex se inicia com nucleação nos contornos de grãos, pontos triplos de grãos ou discordâncias. Estes núcleos formam-se, predominantemente, nos contornos entre ferrita-ferrita e ferrita-austenita, em temperaturas entre 600°C e 1000°C. Durante a precipitação desta fase, há difusão dos elementos Cr e Mo da ferrita para σ , podendo causar também a transformação de ferrita em austenita. Devido à lenta difusão de Mo da matriz de ferrita quando comparado ao Cr, pode-se afirmar que o molibdênio é o responsável pelo equilíbrio na formação de fase σ [11].

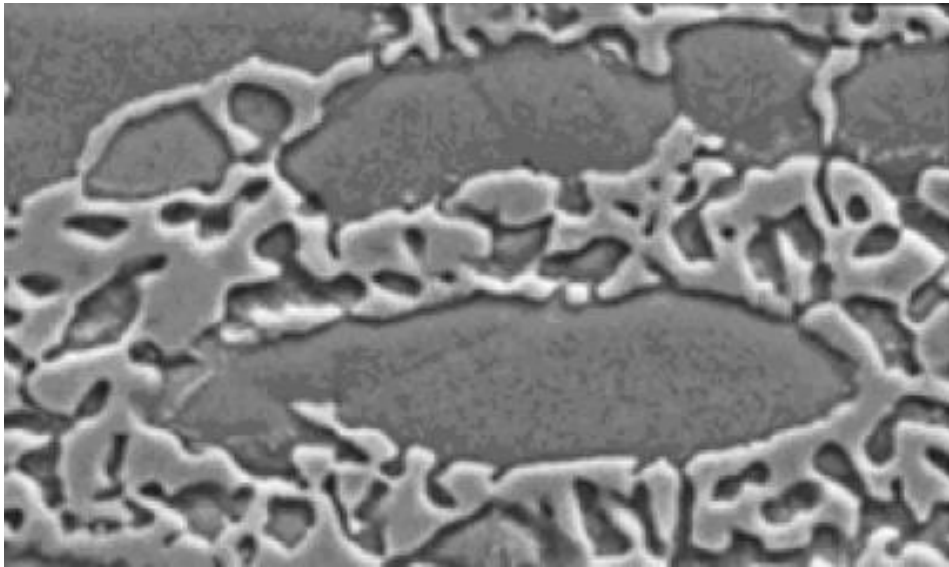


Figura 2.13 - Morfologia da fase σ após envelhecimento isotérmico à 750°C [11].

3-Materiais e Métodos

3.1-Preparação dos corpos de prova

Para realização do trabalho foram utilizadas seis chapas de aço inoxidável austenítico 310 de espessura 3mm, três chapas de aço inoxidável duplex 2304 de espessura de 4mm. O metal de adição utilizado na solda para união do aço inoxidável austenítico 310 com o aço inoxidável duplex 2304, foi o arame 309L austenítico e o arame 2209 duplex fornecidos pela ESAB.

As etapas de obtenção dos corpos de prova foram:

1ª) As chapas de aço inoxidável austenítico 310 na dimensão de (300x175)mm e do aço inoxidável duplex 2304 na dimensão de (255x210)mm foram cortadas e realizado um chanfro de 30° na empresa de usinagem CNW Industrial de Itajubá conforme figuras 3.1 e 3.2.

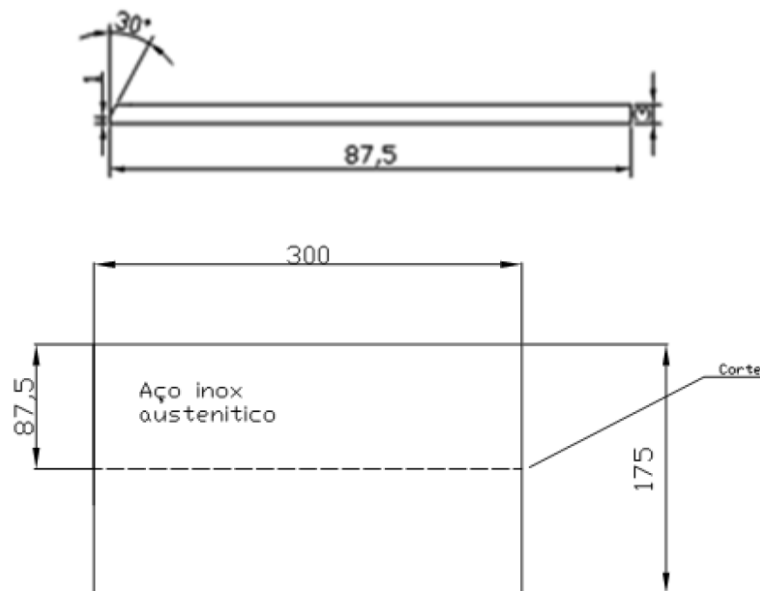


Figura 3.1- Vista frontal e corte da chapa de aço inoxidável austenítico para preparação do corpo de prova

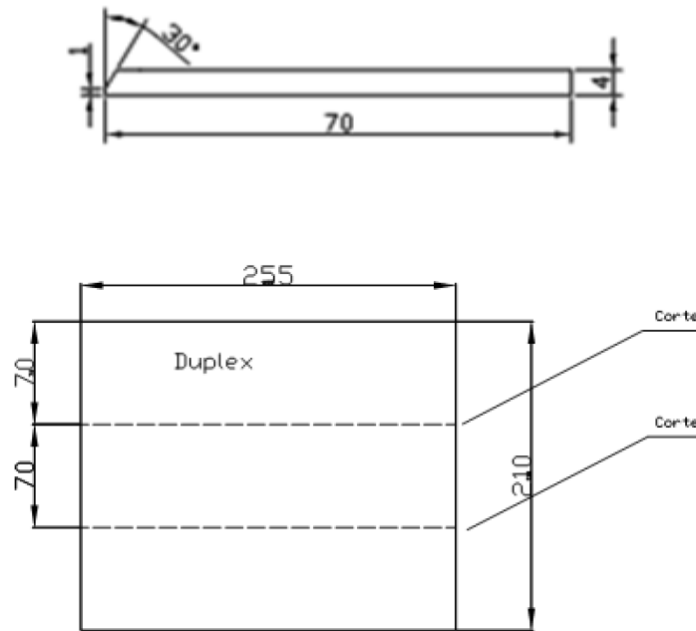


Figura 3.2 - Vista frontal e corte da chapa de aço inoxidável duplex para preparação do corpo de prova

2ª) As chapas foram soldadas com os arames austenítico 309L e duplex 2209L, obtendo-se 4 chapas para o eletrodo 309L e 3 chapas para o eletrodo 2209. Foi utilizado o processo de soldagem MIG/MAG com gás argônio 100%, com o equipamento ESAB Aristo POWER 460. (Figura 3.3)



Figura 3.3 - Máquina utilizada no experimento

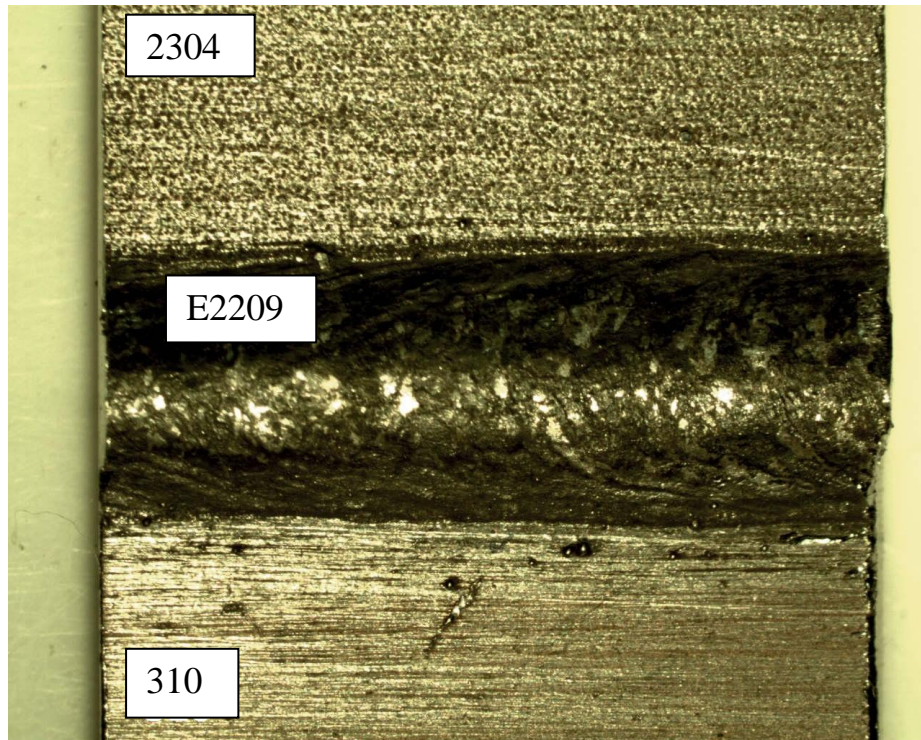


Figura 3.4 - União das chapas de aço 310 com aço duplex 2304 com arame de adição duplex E2209 após o processo de soldagem

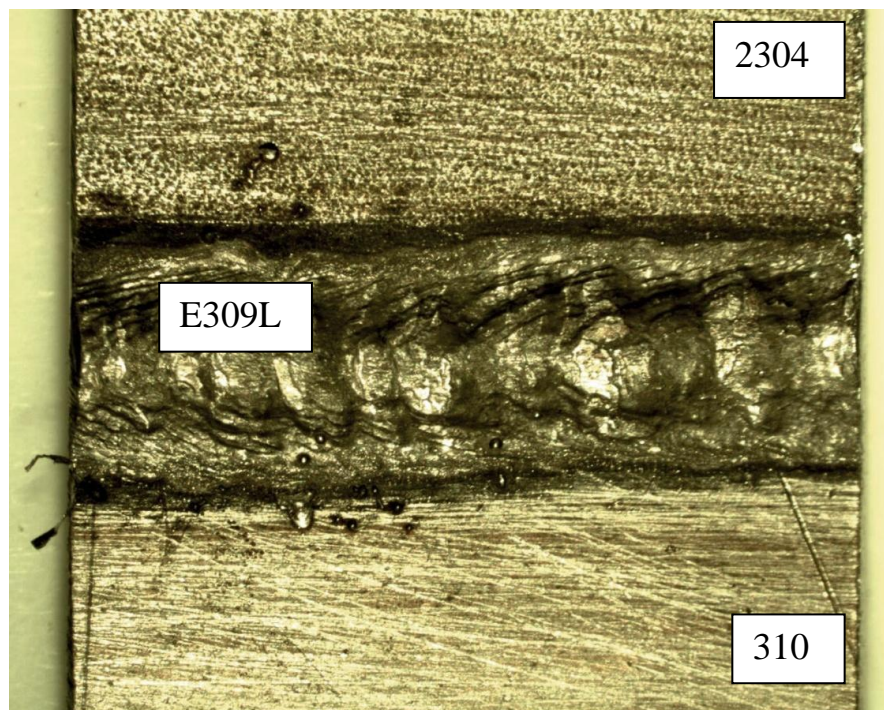


Figura 3.5 - União das chapas de aço 310 com aço duplex 2304 com arame de adição 309L após processo de soldagem

Os parâmetros de soldagem utilizados para os metais de adição e a composição química dos aços inoxidáveis estudados são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 3.1 - Parâmetros de soldagem adotados

	Voltagem (V)	Corrente (A)	Velocidade de soldagem(m/min)	Velocidade do arame(m/min)	Gás de proteção
Arame 309 L	19	93	0,35	2,3	Argônio 100%
Arame 2209	19	122	0,35	4,5	Argônio 100%

Tabela 3.2 - Composição química dos aços inoxidáveis estudados conforme norma ASTM A240/A240M

Composição química (% em peso)										
	C	Cr	Mo	Ni	Mn	Si	P	Cu	N	S
Metal base 310	0,25	26,0	-	19,0	2,0	1,5	0,045	-	-	0,03
Metal base 2304	0,019	22-24	0,44	3,5 - 5,5	1,35	0,39	0,028	0,5	0,11	0,004
Metal de adição E309L	0,03	23- 25	0,75	12-14	1,5	0,75	-	-	-	-
Metal de adição 2209	0,029	21,94	3,12	9,20	1,47	0,57	0,02	0,14	0,14	0,009

3ª) Após a soldagem, as chapas foram usinadas no centro de usinagem da UNIFEI utilizando uma fresa CNC, onde se extraiu 3 corpos de prova por chapa de cada eletrodo com as dimensões e geometria conforme a norma ASTM E8 para o ensaio de CST. (Figura 3.6)

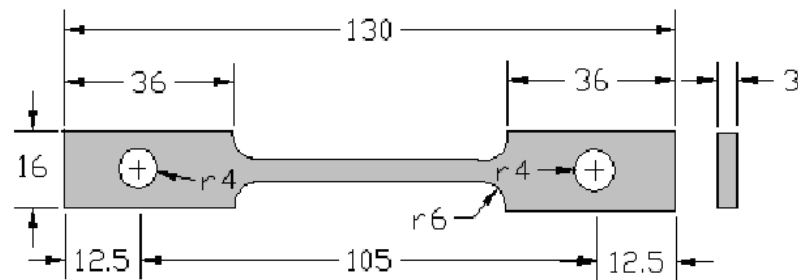


Figura 3.6 - Geometria e dimensões do corpo de prova (unidade em mm)

4^a) Após usinados os corpos de prova, foram lixados na lixadeira AROTEC no laboratório de materiais e metalurgia da UNIFEI utilizando a seguinte sequência de lixas de carbeto de silício : 100, 220, 400 e 600, para a realização do ensaio de CST.

3.2- Preparação da solução de ataque

Para o ensaio de corrosão sob tensão, o meio corrosivo utilizado foi uma solução aquosa de cloreto de magnésio com concentração de 43%, por ser muito agressiva ao aço inoxidável e conforme a norma ASTM G36-73.

Foi utilizado 400g de cloreto de magnésio hexa hidratado ($Mg Cl_2 \cdot 6H_2O$) e 35,2ml de água destilada pra se obter aproximadamente 300ml de solução. Foi encontrado o valor de 3,88 para o pH da solução a 25°C.

3.3- Ensaio de Tração

Foi realizado o ensaio de tração no laboratório do Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI (IEM), onde utilizou-se a máquina da marca EMIC interligada a um microcomputador onde se adquiriu os dados. (Figura 3.7)



Figura 3.7 - Máquina utilizada no ensaio de tração

No ensaio de tração foi utilizado 1 corpo de prova para cada metal de adição, afim de se obter a tensão de escoamento média para a realização do ensaio de CST.

3.4- Ensaio de Dureza Vickers

Para a realização dos ensaios de dureza Vickers foi utilizado uma carga de 10kgf (HV₁₀) para todos os corpos de prova soldados. Foi utilizado um microdurômetro da marca Digimes e modelo TESTER HV 1000. As medidas foram tomadas a uma distância de 1,2mm da face superior da superfície soldada, em sua seção transversal. Traçou-se um perfil de uma extremidade a outra do corpo de prova, iniciando no MB, passando pela ZTA, ZF, até a outra extremidade do MB. Foram obtidos 20 valores em cada amostra conforme mostra a figura 3.8.

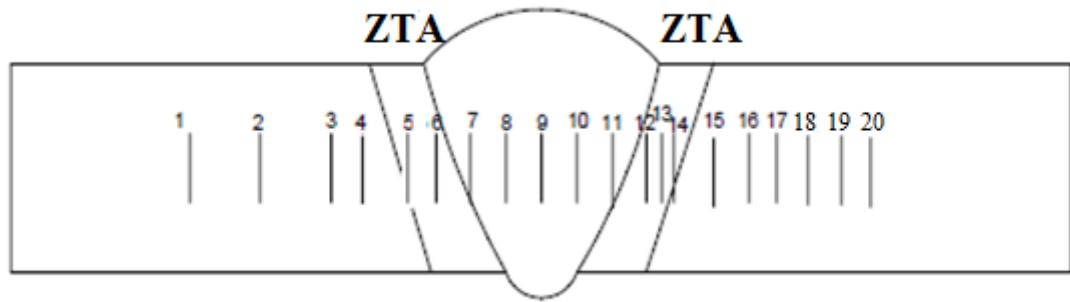


Figura 3.8 - Desenho esquemático das medições de dureza Vickers

3.5-Ensaio Metalográficos

As micrografias foram adquiridas no Laboratório de Materiais do Instituto de Engenharia Mecânica - IEM da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) por meio de um microscópio óptico interligado a um computador, onde era analisado as imagens. O microscópio utilizado é apresentado na figura 3.9.



Figura 3.9 - Microscópio óptico utilizado na aquisição das micrografias

Com o microscópio ótico, foi possível analisar nas imagens das amostras a morfologia, localização das trincas, a região onde ocorreu a ruptura (ZF, ZTA ou MB) e a avaliação das trincas de CST.

3.6- Ensaio de CST

O ensaio de CST foi realizado no Instituto de Engenharia Mecânica - IEM da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), utilizando um dispositivo de ensaio com carregamento tipo carga constante. Nesse tipo de ensaio a grandeza a ser medida é o tempo de ruptura ou tempo de falha. As grandezas como temperatura de ensaio, concentração do meio e a carga aplicada, devem permanecer constantes durante todo o ensaio.

3.6.1- Dispositivo de Ensaio de CST

O dispositivo de ensaio de CST, consiste de um sistema de aplicação de força constante sobre o corpo de prova, sendo este acionado por um sistema de peso morto (1). A força é transmitida através do movimento das roldanas, que movimentam o eixo principal o qual através da barra de torção movimentam o eixo de alavanca (2) no sentido vertical. Assim, este gira o eixo de sustentação (3) no sentido anti-horário provocando uma força de tração no corpo de prova (4). Esta força é avaliada por uma célula de carga (5) e é registrada por um indicador digital (6) acoplado ao painel de controle. Para a realização dos ensaios, o corpo de prova foi imerso numa solução de cloreto de magnésio $MgCl_2$ dentro de uma cuba de teflon (7) vedada com silicone de alta temperatura, sendo esta aquecida através de um aquecedor elétrico (8) de 110V e 800W, até a temperatura de ebulição da solução. Esta temperatura é registrada por um sensor digital de temperatura (9) no painel de controle. O tempo de ensaio até a ruptura do material é registrado por um cronômetro digital (10).

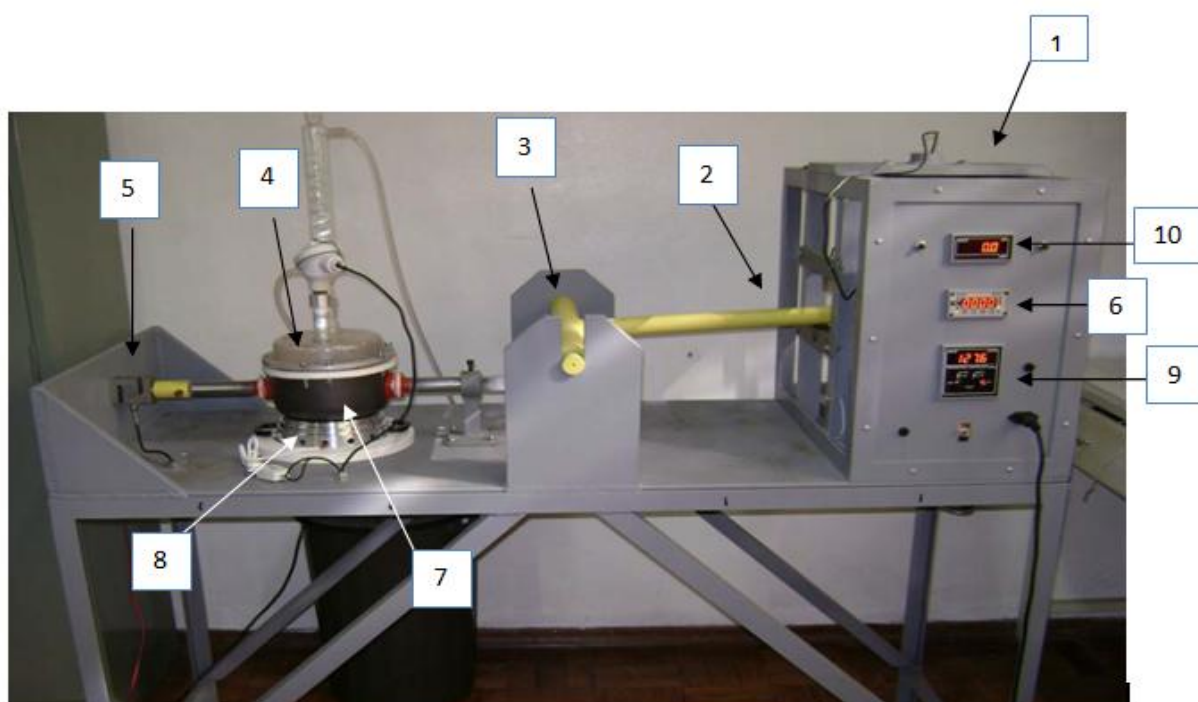


Figura 3.10 - Dispositivo de ensaio de CST

3.6.2- Procedimento do ensaio

O primeiro procedimento realizado no ensaio de CST, foi a vedação da cuba de teflon com silicone de alta temperatura antes de colocar a solução de cloreto de magnésio. Este procedimento tinha por objetivo evitar o vazamento da solução na tampa e nas garras de tração, onde ocorre um pequeno deslocamento devido ao alongamento do corpo de prova durante o ensaio. Esta preparação foi feita com 24 horas de antecedência para realizar o ensaio e garantir a vedação total do sistema.

Em seguida foi feito o isolamento do corpo de prova com fita de teflon (veda rosca) deixando apenas uma região central exposta à solução corrosiva para que a trinca ocorresse preferencialmente na região central do corpo de prova. Após estes procedimentos, o corpo de prova foi acomodado na cuba de teflon e se deu início à calibração do mecanismo de aplicação de força. A tensão utilizada foi de 80% da tensão de escoamento da média dos valores obtidos nos ensaios de tração realizados nas juntas soldadas. Após o procedimento de calibração da tensão, a solução de ataque foi preparada. Por tratar-se de ataque de corrosão sob tensão em aço inoxidável utilizou-se uma solução aquosa de cloreto de magnésio 43% conforme a norma G36-73. Para o preparo da solução de cloreto de magnésio, mediu-se o pH da mesma com o

objetivo de controlar a acidez do meio em todos os ensaios na mesma faixa de temperatura.

Após o preparo da solução corrosiva, a mesma foi colocada na cuba de teflon e iniciou-se o processo de vedação do sistema com silicone descrito anteriormente. Antes de se iniciar os ensaios, foi registrado o tempo de início dos testes, a identificação dos corpos de prova em ensaio e o valor da carga aplicada.

O parâmetro adotado para a avaliação da susceptibilidade à CST no experimento, foi o tempo levado para ocorrência da fratura dos corpos de prova, ou seja, o tempo de ruptura dos mesmos. No fim dos ensaios, os corpos de prova eram submetidos a um processo químico de limpeza superficial em solução aquosa 10% de HNO_3 por 20min à temperatura de 60°C , conforme norma ASTM G1-72.

4-Resultados e discussão

4.1- Microestrutura do metal base e das juntas soldadas

A figura 4.1 apresenta a microestrutura do metal base AISI 310, mostrando os contornos de grãos e a presença de maclas características desse tipo de aço inoxidável.

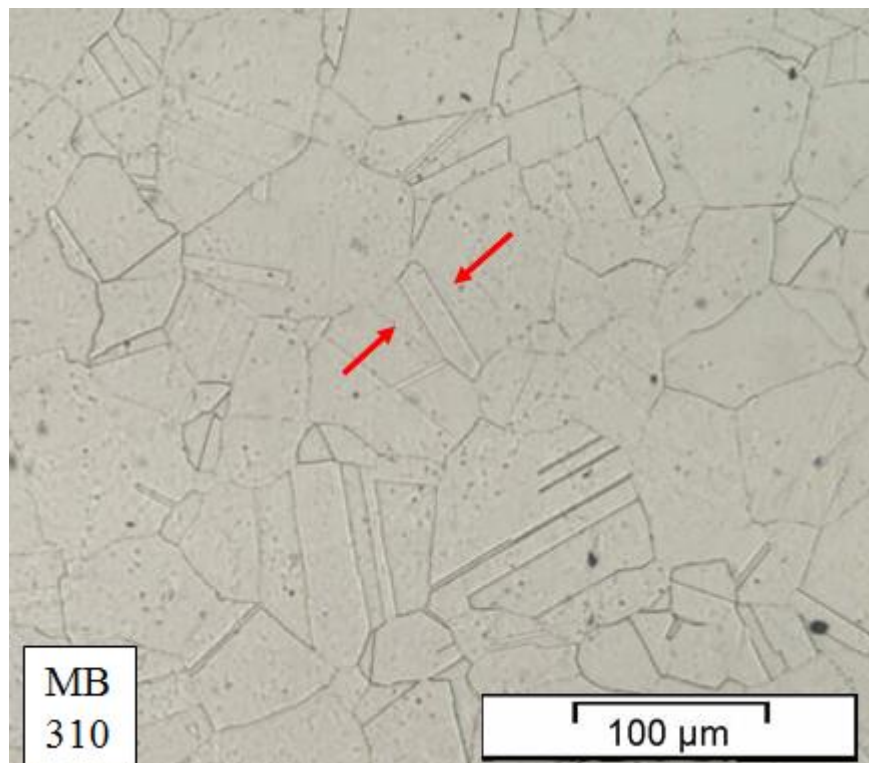


Figura 4.1 - Microestrutura do metal base aço inoxidável austenítico AISI 310. Ataque: Ácido Oxálico

A figura 4.2 mostra uma micrografia do metal base do aço inoxidável duplex 2304, onde a fase ferrita α (cor escura) e a fase austenita γ (cor clara) é disposta em forma de lamelas alternadas característica desse tipo de aço.

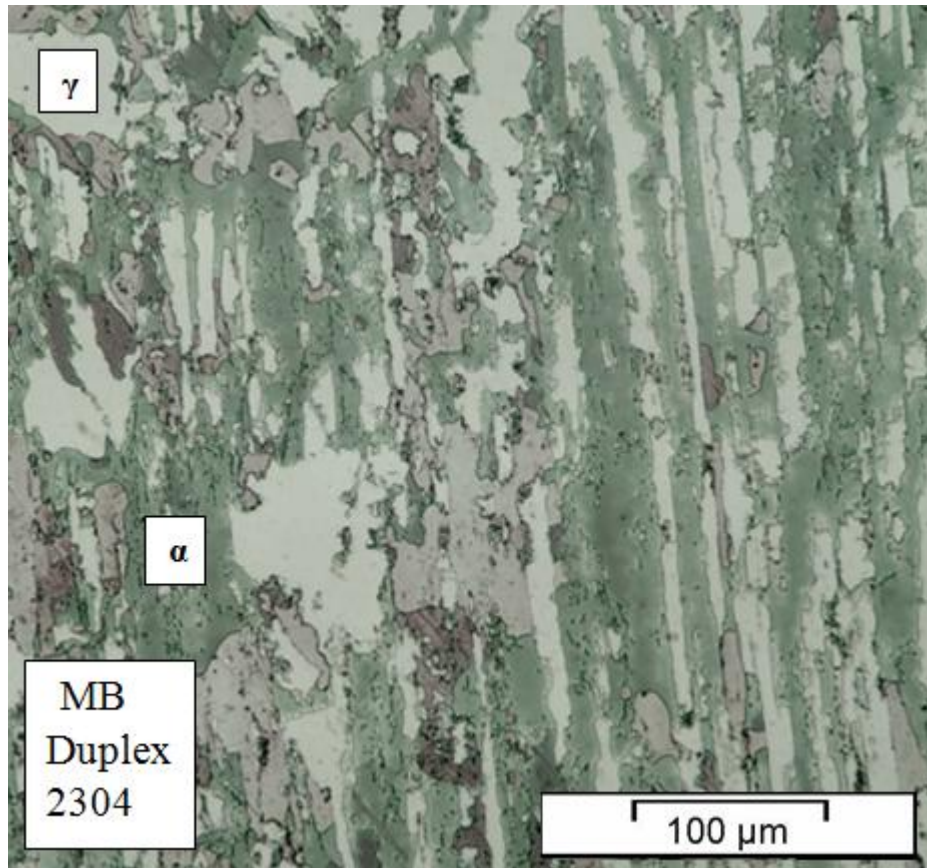


Figura 4.2 - Micrografia do metal base aço inoxidável duplex 2304. Ataque: KOH

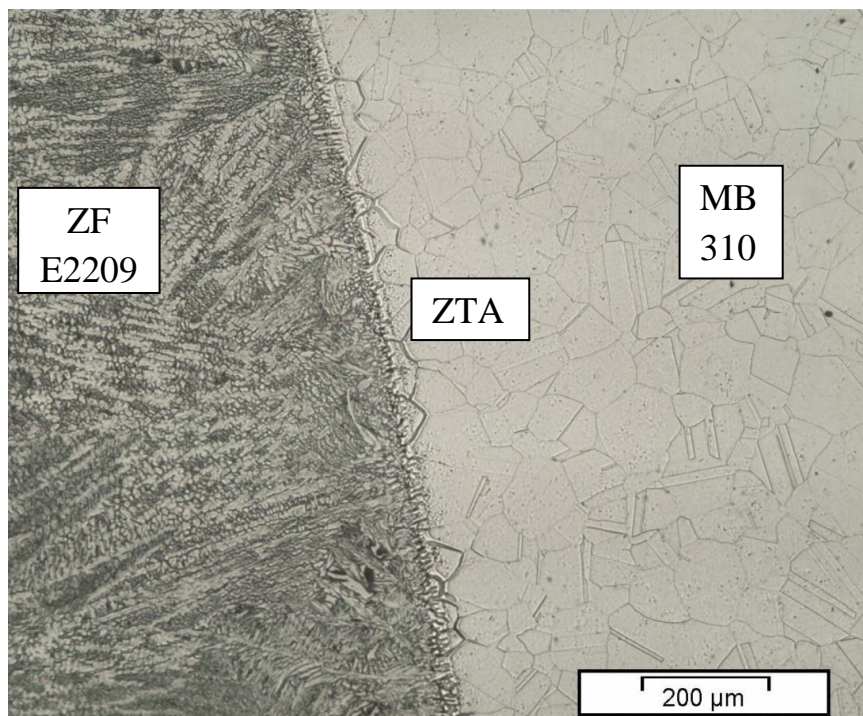


Figura 4.3 - Microestrutura da junta soldada com arame E2209. Ataque: Ácido Oxálico

A figura 4.3 mostra uma possível região de refinamento de grãos na ZTA do aço inoxidável austenítico 310. A literatura ressalva que, o refino de grãos tem influência direta no aumento da resistência mecânica. Na laminação à frio, o refino de grãos é possível aumentando-se os sítios para nucleação da ferrita recristalizada através de deformações elevadas e tratamentos térmicos.

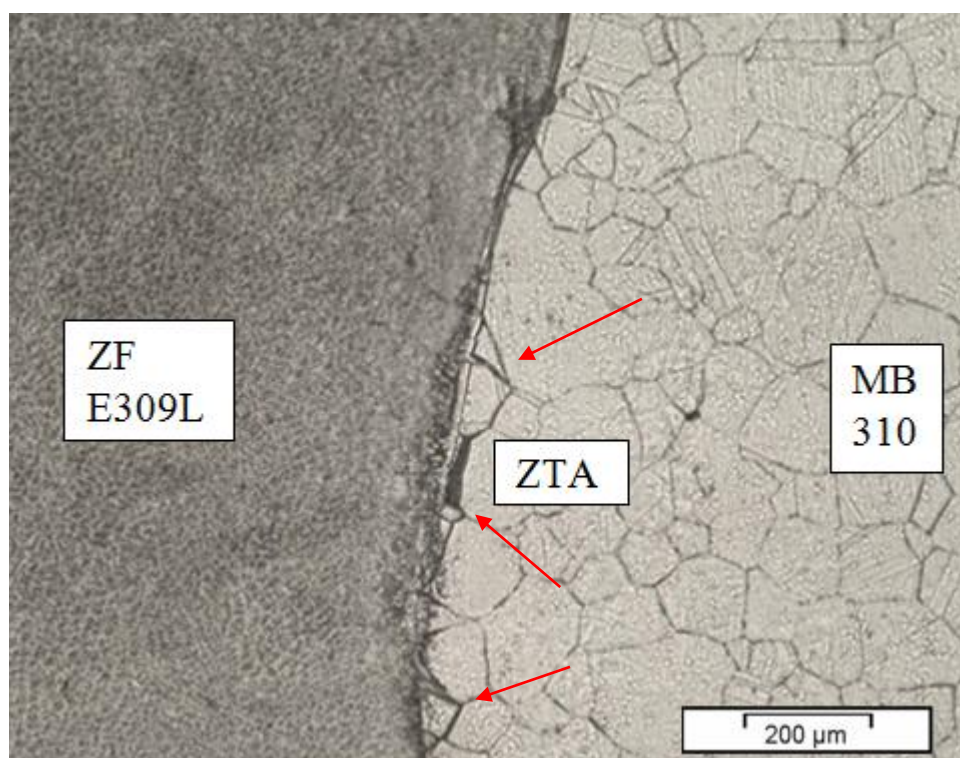


Figura 4.4 - Microestrutura da junta soldada com arame E309L. Ataque: Ácido Oxálico

A figura 4.4 mostra uma possível região de sensitização nos contornos de grão adjacentes ao metal de solda. De acordo com a literatura, a sensitização ocorre na soldagem quando normalmente está associada com a ZTA da solda e depende da composição química do material, das condições microestruturais da mesma, da deformação do material durante a soldagem e do histórico térmico da solda. Nos aços inoxidáveis austeníticos, a sensitização poderá ocorrer como o resultado da segregação de certos elementos nos contornos de grão.

A sensitização é bastante compreendida como sendo a precipitação de carbonetos de cromo, sendo essa precipitação responsável pelo empobrecimento de cromo nas vizinhanças dos precipitados dos carbonetos nos contornos de grão.

4.3-Ensaio de Dureza Vickers

As figuras 4.6 e 4.7 mostra os gráficos das durezas medidas dos metais base estudados aço inoxidável 310 e aço inoxidável duplex 2304 ao longo da chapa.

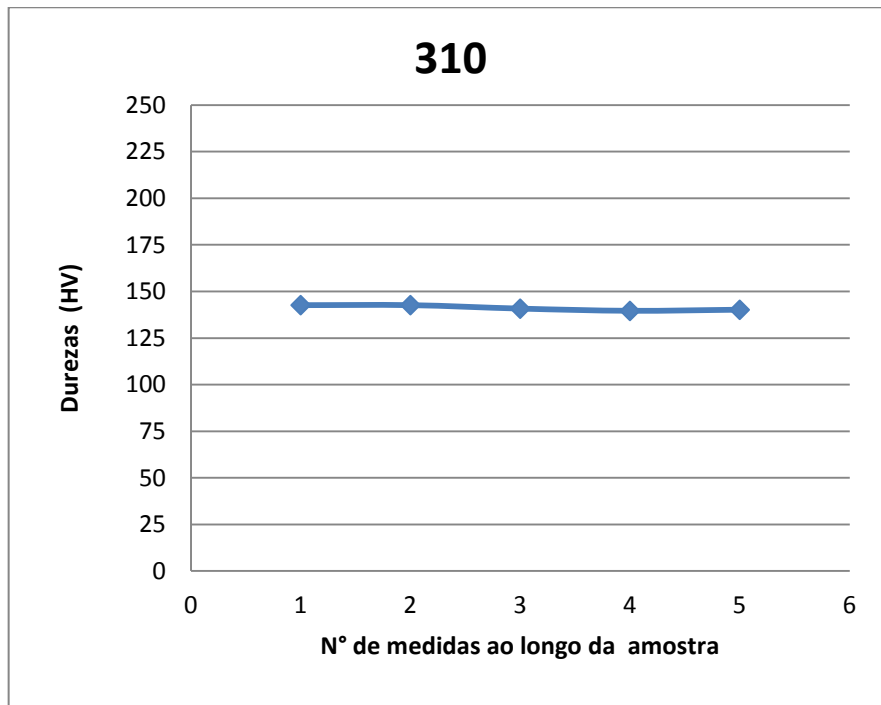


Figura 4.6 - Durezas obtidas ao longo da chapa de aço inoxidável 310

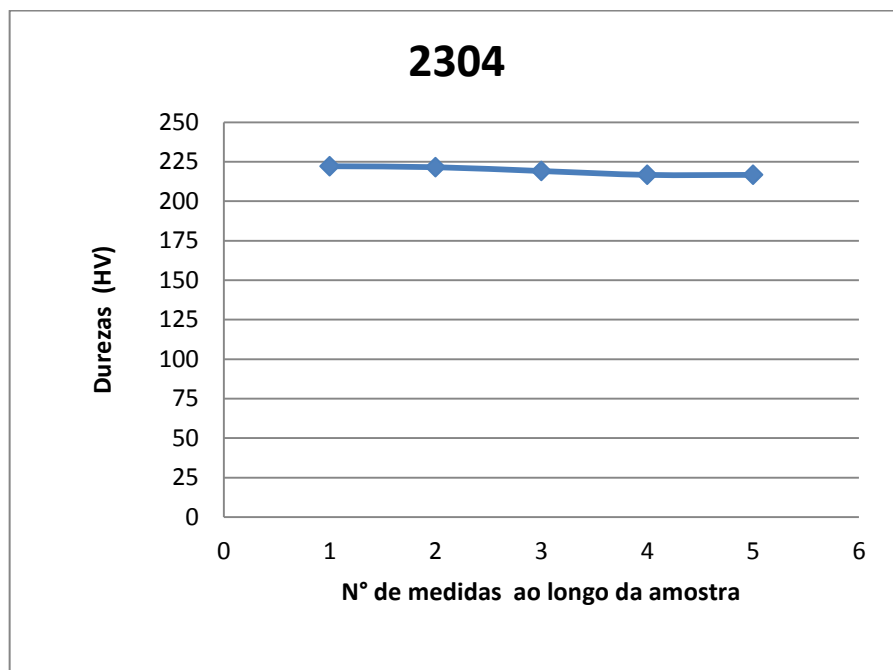


Figura 4.7 - Durezas obtidas ao longo da chapa de aço inoxidável 2304

Tabela 4.1 - Valores de dureza em (HV) dos aços estudados com metal de adição E309L

3ª Amostra					
Aço 310 + A-309 + Aço 2304 (Duplex)					
	Qtde de Identações	Lado de baixo à solda	Centro da Chapa	Lado de cima à solda	Média
Aço 310 ↓	1	145,60	145,90	140,20	143,90
	2	145,20	147,20	142,70	145,03
	3	143,90	149,20	143,30	145,47
	4	147,50	149,20	143,60	146,77
	5	146,20	153,30	145,50	148,33
Região afetada pela solda (ZTA)	6	152,60	155,40	148,50	152,17
	7	153,30	157,50	149,80	153,53
	8	154,30	158,30	174,00	162,20
	9	176,50	181,80	185,40	181,23
	10	174,40	168,60	182,20	175,07
	11	193,10	189,20	175,60	185,97
	12	203,70	189,20	173,10	188,67
	13	217,90	213,30	210,40	213,87
	14	211,00	213,30	216,70	213,67
	15	215,60	215,60	220,90	217,37
Aço 2304 (Duplex) ↑	16	216,70	215,60	216,70	216,33
	17	220,30	219,10	216,10	218,50
	18	219,10	214,40	220,30	217,93
	19	222,10	222,10	222,00	222,07
	20	221,30	223,50	223,30	222,70

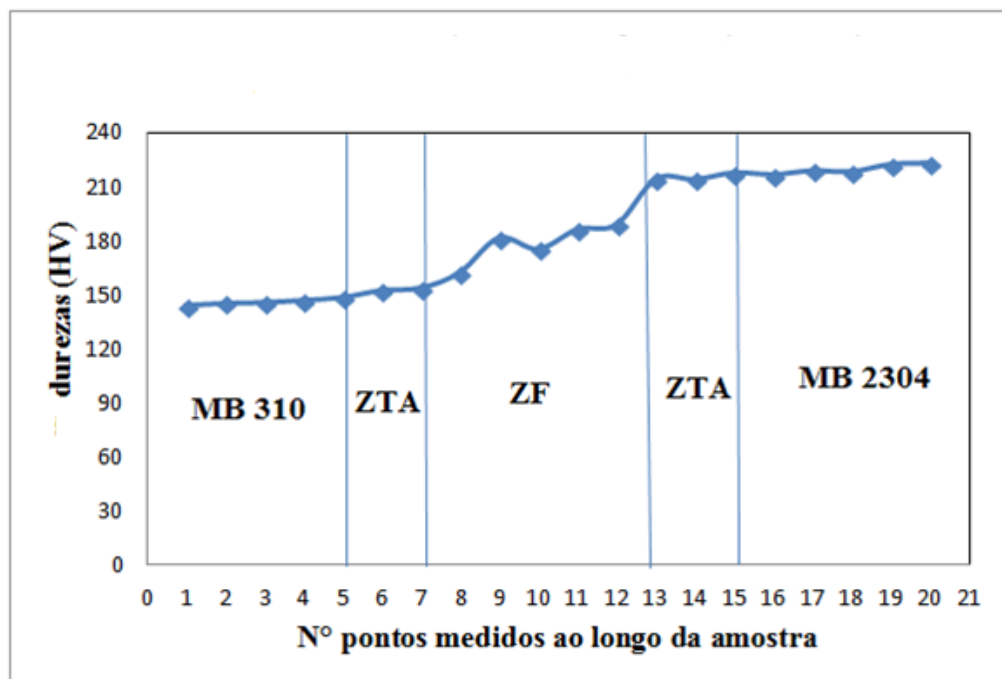


Figura 4.8- Gráfico da média das durezas soldadas com o metal de adição E309L

Tabela 4.2 - Valores de dureza em (HV) dos aços estudados com metal de adição E2209

2ª Amostra					
Aço 310 + A-Duplex + Aço 2304 (Duplex)					
	Qtde de Identificações	Lado de baixo à solda	Centro da Chapa	Lado de cima à solda	Média
Aço 310	1	145,80	145,80	140,50	144,03
	2	145,40	147,60	142,90	145,30
	3	144,00	149,40	143,30	145,57
	4	148,00	149,10	143,50	146,87
	5	146,40	153,30	145,40	148,37
Região afetada pela solda (ZTA)	6	152,30	155,40	148,50	152,07
	7	153,30	156,90	149,80	153,33
	8	154,40	158,30	174,30	162,33
	9	176,70	181,50	185,40	181,20
	10	174,60	168,80	182,20	175,20
	11	193,10	189,10	175,80	186,00
	12	203,70	189,20	173,10	188,67
	13	217,70	213,60	210,40	213,90
	14	211,00	213,30	216,80	213,70
	15	215,80	215,80	220,90	217,50
Aço 2304 (Duplex)	16	216,70	215,60	216,70	216,33
	17	220,50	219,40	216,30	218,73
	18	219,10	214,60	220,30	218,00
	19	222,20	222,10	222,10	222,13
	20	221,50	223,60	223,70	222,93

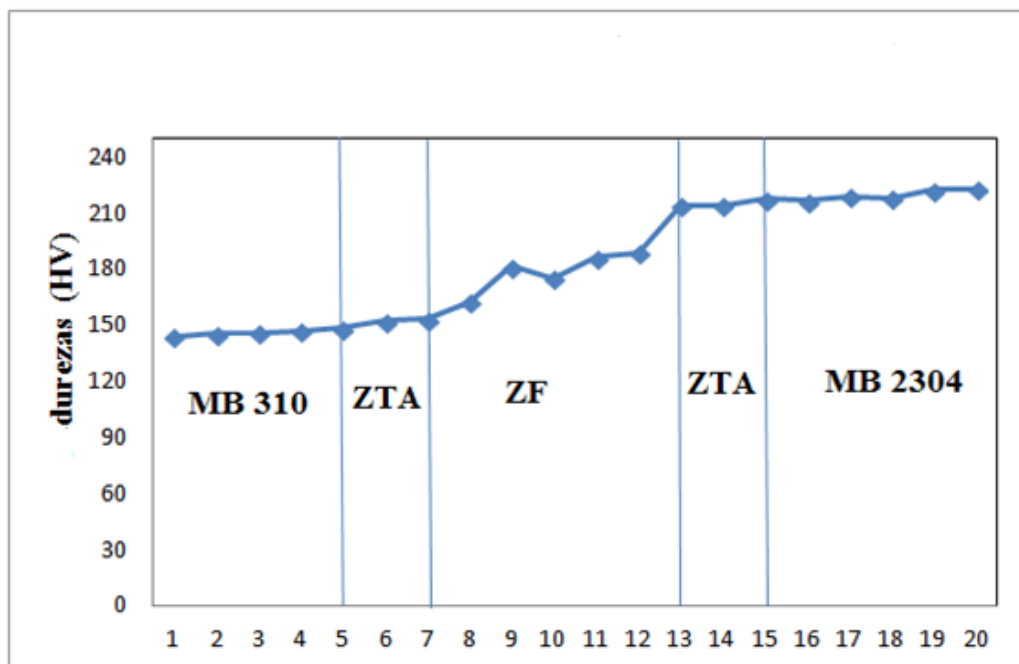


Figura 4.9 - Gráfico da média das durezas soldadas com o metal de adição E2209

As Tabelas 4.1 e 4.2 mostra os valores de dureza dos aços inoxidáveis 310 e 2304 com os metais de adição E309L e E2209. Observa-se que o valor máximo de dureza encontrado foi de aproximadamente 223HV, o que classifica os materiais como aceitáveis de acordo com o critério adotado pela norma NACE MR015-2001, a qual estabelece um limite máximo de dureza de 250HV para materiais metálicos a serem utilizados em equipamentos petrolíferos de forma a evitar o trincamento por corrosão sob tensão em meios contendo H₂S.

4.4-Resultados dos ensaios de CST

Os ensaios de CST foram realizados utilizando-se uma tensão de escoamento média de 80% e uma temperatura de 140°C. A tensão de escoamento média foi obtido a partir do ensaio de tração mecânica, utilizando a média aritmética destes valores.

O tempo necessário para ocorrência da fratura foi o parâmetro adotado para avaliar a susceptibilidade ao trincamento por corrosão sob tensão dos corpos de prova soldados. A tabela 4.3 mostra os resultados obtidos nos ensaios de CST.

Tabela 4.3 -Resultado do ensaio de CST

Metal de adição	T (°C)	pH solução	Tensão (% σ_{es})	Tempo médio de fratura (min)
309L	140	≈ 4,0	80	73,13
2209	140	≈ 4,0	80	212,90

De acordo com os resultados dos ensaios de CST, a junta soldada com o metal de adição 309L se mostrou bem menos resistente a CST em relação ao metal de adição 2209. Isto pode ser atribuído, aos seguintes fatores:

a) A trinca nucleia na ZF através da rede de ferrita delta e se propaga para a ZTA do aço duplex 2304. Na ZTA esta trinca se propaga mais rapidamente devido a presença de fase σ .

b) Nucleação e propagação de trincas na ZTA do aço duplex 2304 devido à presença de fase σ nesta região. A fase σ é uma fase dura e frágil, que diminui a tenacidade e a resistência à corrosão desta região o que a torna mais susceptível a trincas por CST.

Por outro lado, a maior resistência da junta soldada com o metal de adição de aço duplex 2209, se deve ao fato de que, provavelmente, a fração de fase sigma na ZTA do metal base duplex 2304 (onde ocorreu a ruptura) foi menor, o que dificulta a nucleação e propagação de trincas de CST.

Esta fração volumétrica de fase σ menor, pode ser devido a pouca ou nenhuma migração de cromo (Cr) para a ZTA do metal base duplex 2304 e uma possível migração de níquel (Ni) para esta região. Sendo que, a quantidade de níquel (Ni) no metal de adição é consideravelmente maior que no metal base 2304 e como se sabe, o níquel atua como estabilizador de austenita o que diminui a possibilidade de formação de fase σ .

Além disso, a zona fundida do metal de adição duplex 2209 não apresenta redes de ferrita delta, o que é característico somente de zona fundida com metal de adição de aço inoxidável austenítico.

Também deve considerar que a junta soldada com o metal de adição duplex 2209 possui uma maior porcentagem de Mo em relação ao metal de adição austenítico E309L, e como se sabe, este elemento aumenta a resistência à altas temperaturas e também aumenta a resistência à corrosão em meios redutores.

As fraturas nos corpos de prova ocorreram na ZTA e na zona de ligação (ZTA/ZF) no lado do metal base duplex 2304, o que pode ser atribuído a fragilização desta região devido ao fenômeno do crescimento de grão e a possível presença da fase σ .

4.5- Análise microestrutural após o ensaio de CST

4.5.1- Junta soldada com o metal de adição E2209

A avaliação microestrutural juntamente com os resultados dos ensaios de CST indicam que a ZTA e a zona de ligação (ZTA/ZF) é a região mais susceptível ao trincamento por CST. De maneira geral, a maioria das amostras apresentaram trincas nessa região, o que levou a fratura dos corpos de prova conforme figura 4.8

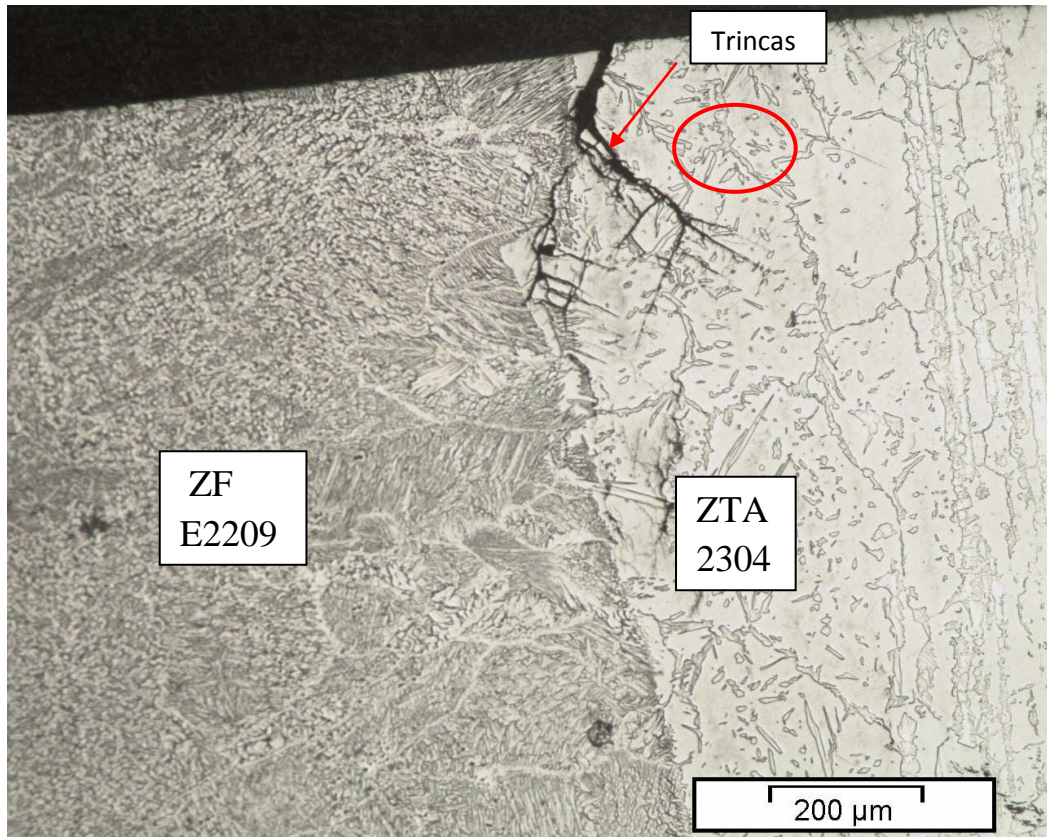


Figura 4.8 - Trincas de corrosão sob tensão na zona de ligação da junta soldada com o metal de adição E2209. Ataque eletrolítico: Ácido Oxálico

A possível presença da fase sigma σ na ZTA do metal base duplex 2304, a ser confirmada pela análise de MEV, provavelmente ocasionou a fragilização desta região apresentando trincas e conseqüentemente a sua ruptura.

A presença da fase σ é indesejável nos aços inoxidáveis duplex por comprometer tanto a resistência a corrosão quanto a tenacidade. Esta fase fragiliza o material, causando o empobrecimento de cromo e molibdênio na vizinhança do aço duplex e diminuindo a resistência à corrosão dos mesmos.

A fase σ forma-se principalmente pela decomposição eutetóide, nucleando preferencialmente nos contornos de grãos ferríticos e interfaces austenita/ferrita e crescendo subsequentemente em direção ao interior da ferrita. Os elementos cromo (Cr) e molibdênio (Mo) aceleram a formação dessa fase nesses aços ocasionando à sua susceptibilidade ao trincamento por CST como mostra a figura 4.9.

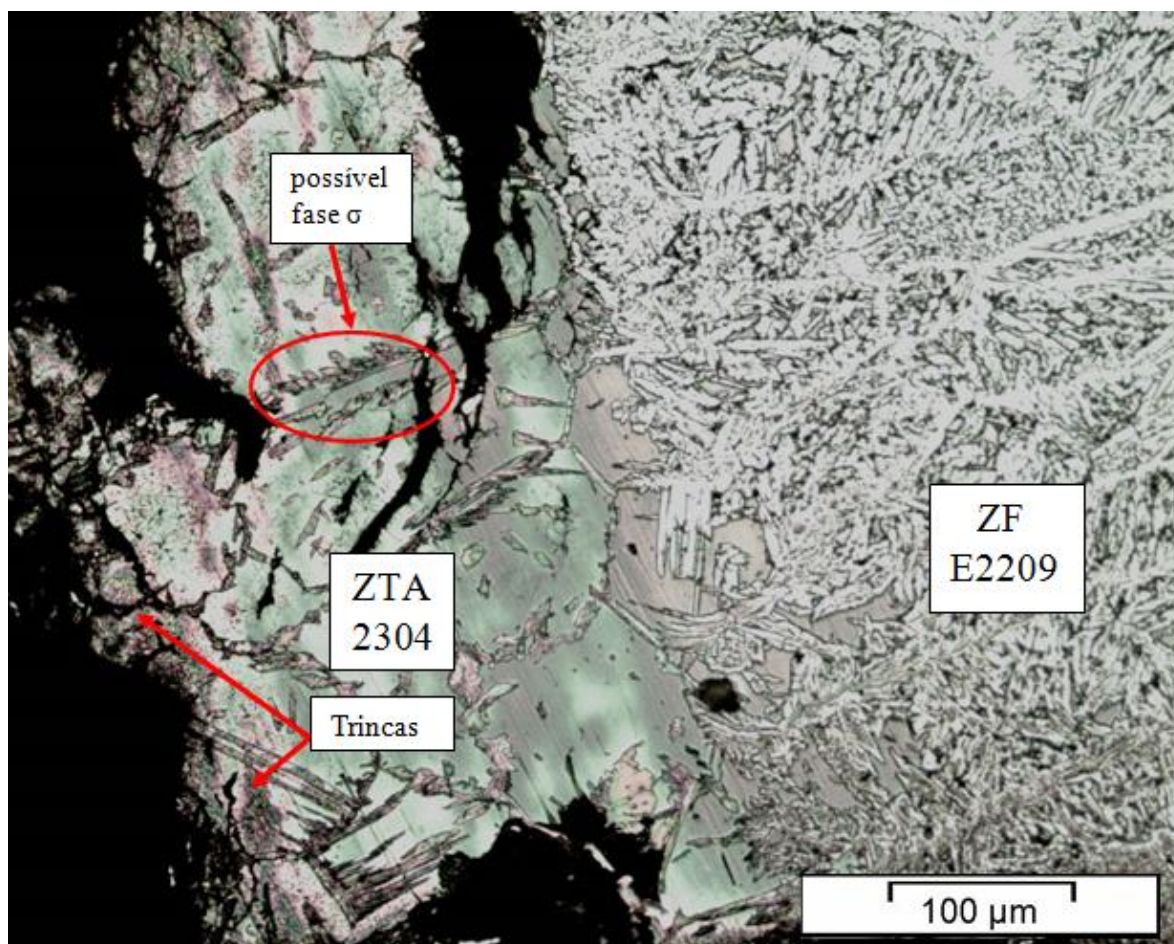


Figura 4.9 - Trincas de CST e fratura da amostra na ZTA/ZF no lado do aço duplex 2304 com o metal de adição E2209. Ataque eletrolítico: KOH

Para que se evite a formação da fase σ no aço inoxidável duplex, deve-se atentar não apenas ao tempo de exposição do material em faixa crítica (tratamentos térmicos ou processo de soldagem), mas também ao tempo de resfriamento após a realização da solda. O tempo de soldagem da fabricação original e/ou qualquer subsequente reparo deve ser considerado como cumulativo no desenvolvimento de fases intermetálicas.

Segundo Łabanowski [9], em seus estudos sobre CST de juntas soldadas dissimilares de aços inoxidáveis duplex e austenítico, observou que a maioria das trincas surgiam na ZTA e zona de ligação (ZTA/ZF), e se propagam na direção do metal de adição. Em seus testes de CST em $Mg Cl_2$ as amostras tiveram fratura no lado do aço duplex. Exames microscópicos detalhados de seções transversais tomadas de áreas da fratura, mostrou que as trincas se propagam ao longo da zona termicamente afetada do aço duplex e se iniciam nas fronteiras de fase austenita - ferrita exatamente onde ocorre a transformação eutetóide da ferrita em fase σ .

Os caminhos de propagação dessas trincas, geralmente prosseguem ao longo dos limites de fase ou entre os grãos da ferrita.

De acordo com Barbosa [35], os ciclos térmicos produzidos durante a soldagem produzem modificações em sua microestrutura, além do crescimento de grão conforme figura 4.10. Oliveira e Faria [45] ressalva que uma possibilidade para o controle do crescimento de grão é através da energia de soldagem. Quanto menor o valor dessa energia, menor é o tamanho do grão resultante. Por isso é necessário soldar com um valor menor possível para essa energia de soldagem, afim de obter grãos menores e uma ZTA com tamanho de grão próxima ao do metal base.

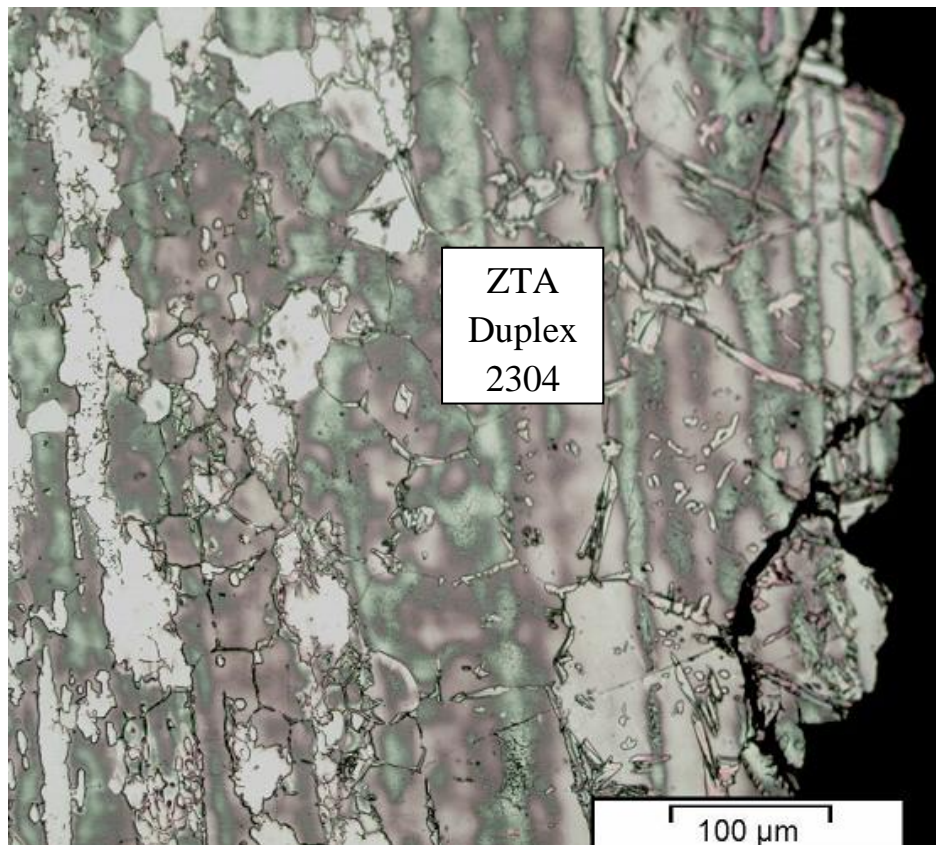


Figura 4.10 - Micrografia do aço duplex 2304 mostrando o crescimento de grão e fratura na ZTA. Ataque eletrolítico: KOH

As análises metalográficas mostraram também que a morfologia das trincas se revelou predominantemente transgranulares (as trincas atravessam os grãos) e as mesmas ocorreram sempre na direção perpendicular à tensão aplicada, o que também as caracterizam como trincas de CST. Devido a diversidade de mecanismos propostos para explicar a propagação de trincas de CST e a dificuldade em associá-los em torno de um processo único que melhor

represente os resultados obtidos, tem levado a descrever o trincamento por CST em termos do meio que o causa.

De acordo com a literatura, as trincas de CST envolvendo meio contendo cloretos normalmente adotam um caminho transgranular com alguns segmentos de trinca seguindo os planos escorregamento da rede austenítica. O degrau de escorregamento criado pela deformação rompe o filme passivo e expõe a superfície metálica ao meio corrosivo. Esta teoria de ruptura do filme passivo, envolve uma competição entre a tendência do material passivar pela formação do filme de proteção e a interrupção do desenvolvimento de tal filme pela formação de bandas de escorregamento que o rompe, e portanto, esta interação leva ao trincamento transgranular conforme figuras 4.11 e 4.12.

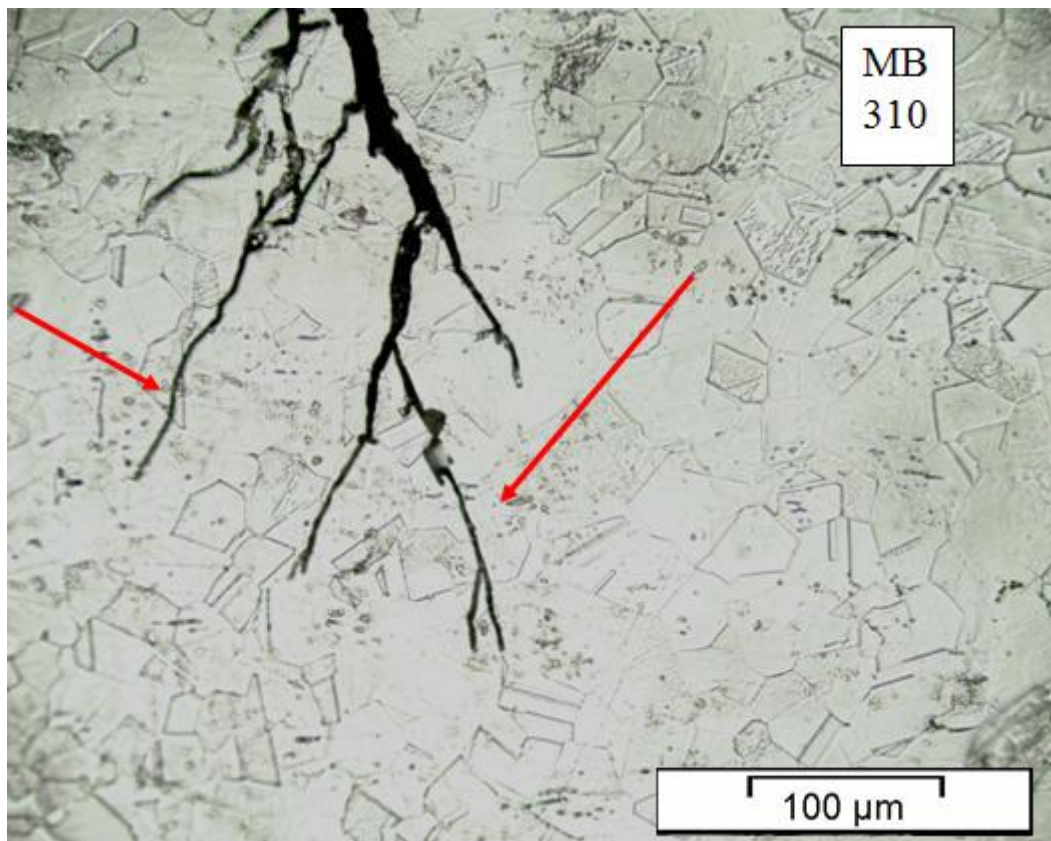


Figura 4.11 - Trincas transgranulares de CST no metal base aço AISI 310. Ataque eletrolítico: Ácido Oxálico

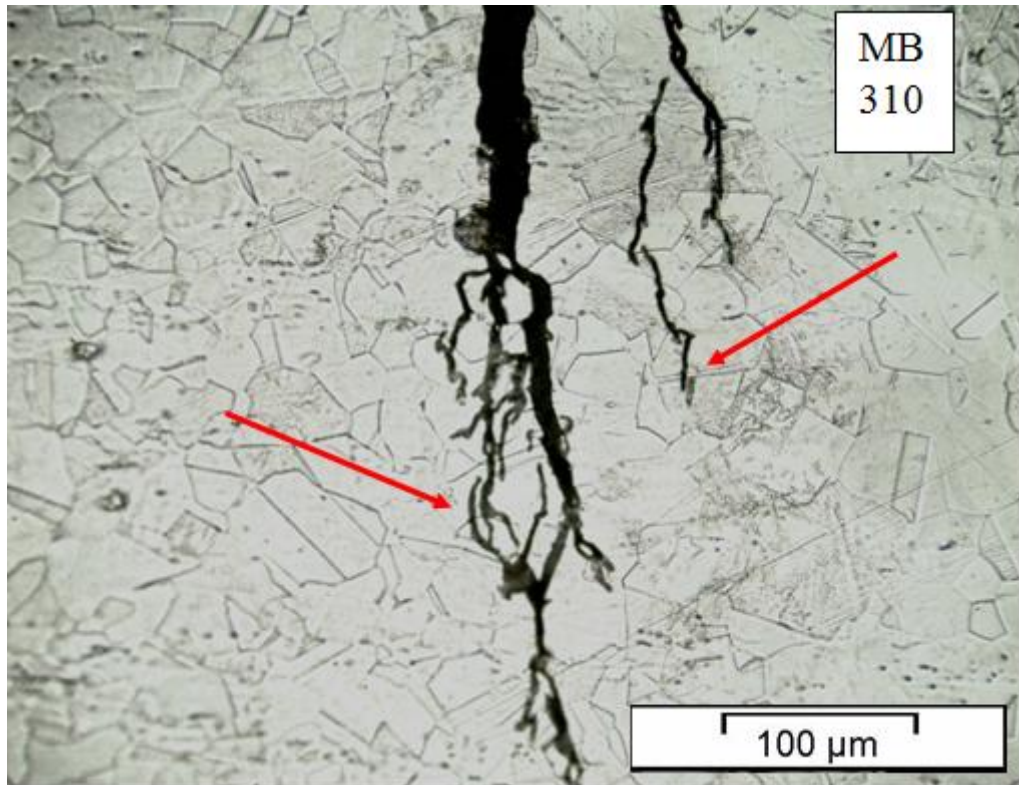


Figura 4.12 - Trincas transgranulares de CST no metal base AISI 310. Ataque eletrolítico: Ácido Oxálico

4.5.2 - Junta soldada com o metal de adição E309L

A avaliação microestrutural da junta soldada com o metal de adição E309L, indicam que a ZTA do aço inoxidável duplex 2304 é a região mais susceptível a corrosão sob tensão. De maneira geral, a maioria das amostras soldadas com o metal de adição E309L apresentaram fraturas na ZTA no lado do metal base 2304 e trincas na ZF do metal de solda.

Embora tenha ocorrido trincas de CST no metal de solda austenítico E309L mais susceptível a CST conforme mostra a figura 4.13, a fratura ocorreu sempre na ZTA do aço inoxidável duplex 2304 (figura 4.14). Isto pode ser atribuído a formação de uma fração volumétrica de fase σ nessa região, o que tornou a mesma menos resistente a CST do que o metal de solda.

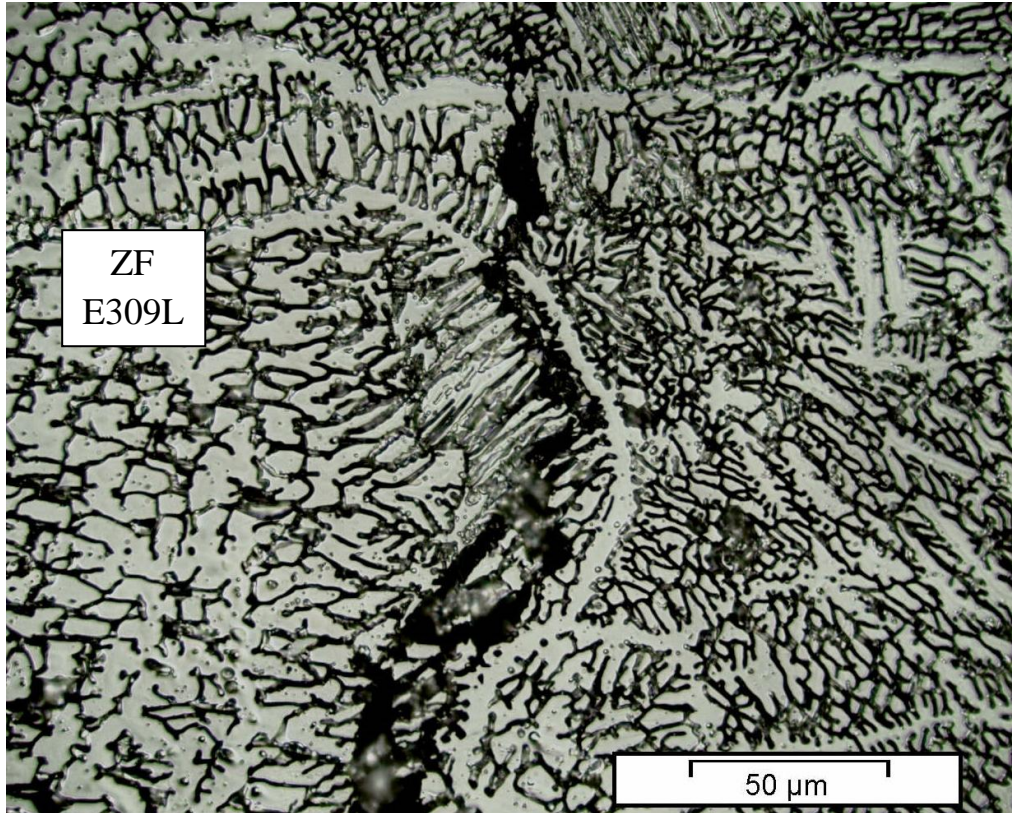


Figura 4.13 - Trinca na zona fundida do metal de adição E309L. Ataque eletrolítico : Ácido Oxálico

Um dos fatores que podem levar a formação de uma fração volumétrica de fase σ na ZTA do aço inoxidável duplex, provavelmente é devido a difusão de Cr e Mo proveniente do metal de solda para a ZTA do aço duplex. De acordo com a literatura, estes elementos tendem a facilitar a formação desta fase.

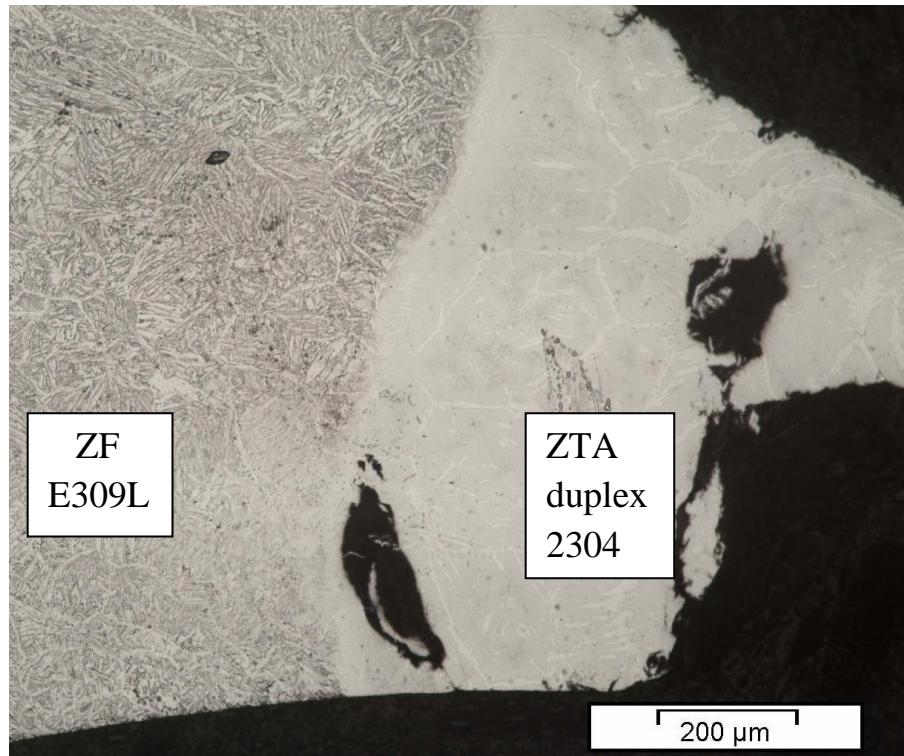


Figura 4.14 - Fratura na ZTA no lado do aço inoxidável duplex 2304 soldado com o arame de adição E309L. Ataque eletrolítico: Ácido Oxálico

As figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram a junta soldada dissimilar do lado do metal base AISI 310.

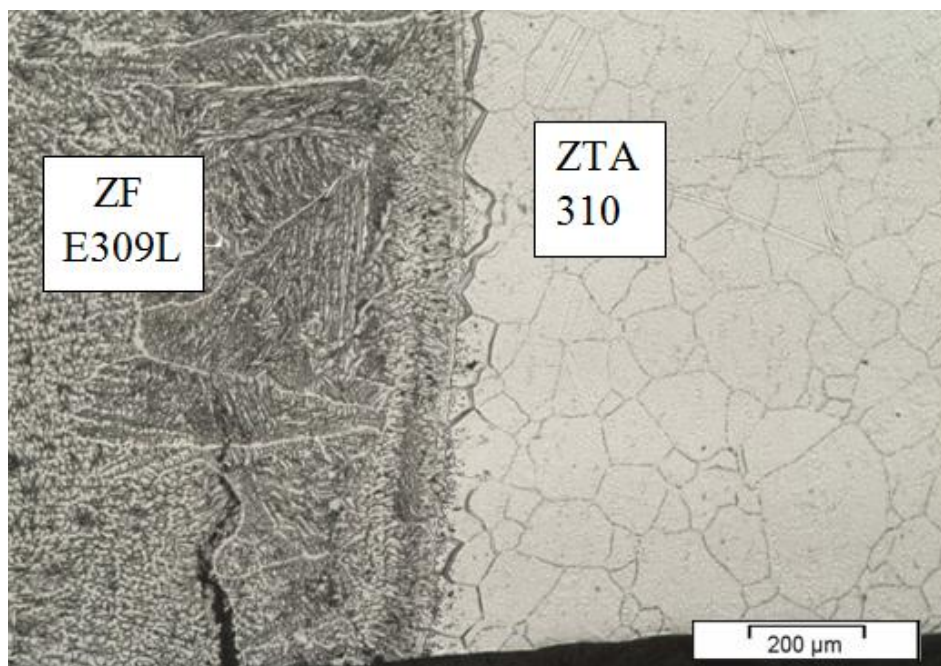


Figura 4.15 - Trinca na zona fundida do metal de adição E309L soldada com o metal base 310. Ataque eletrolítico: Ácido Oxálico

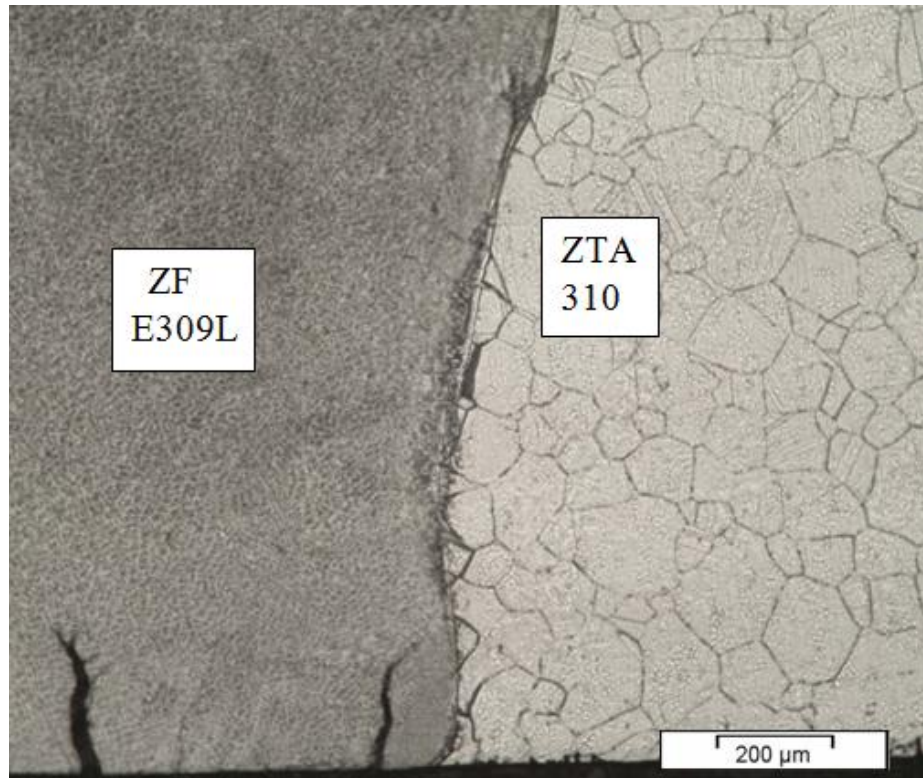


Figura 4.16 - Trincas de CST na zona fundida do metal de adição E309L soldada com o metal AISI 310. Ataque Eletrolítico: Ácido Oxálico

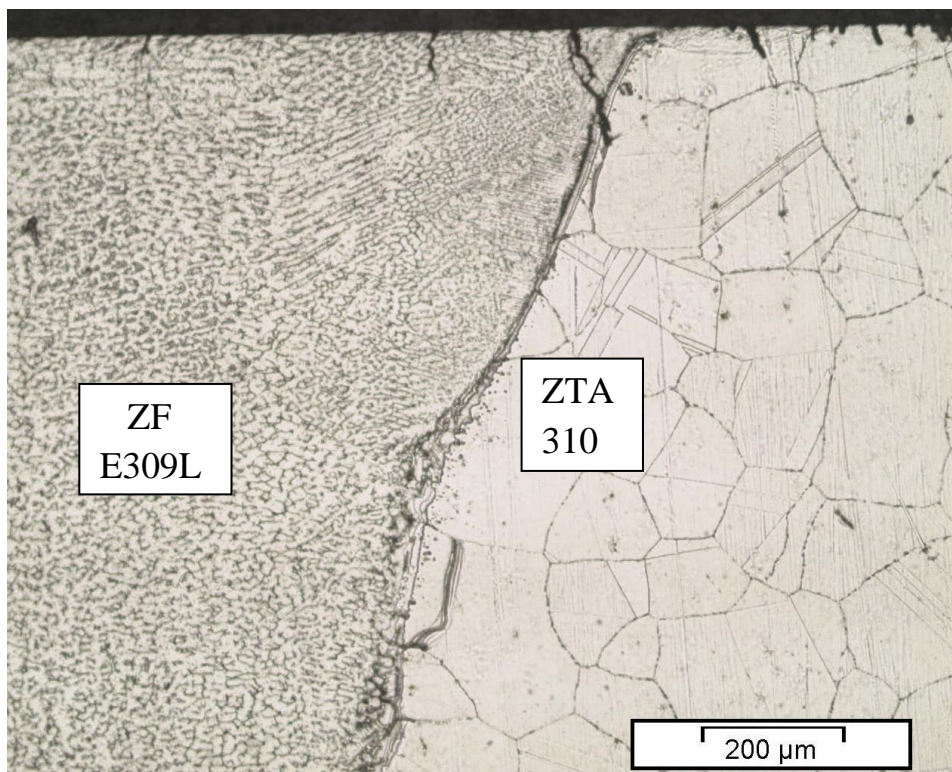


Figura 4.17 - Trincas de CST no metal de adição E309L e na ZTA do metal base AISI 310. Ataque Eletrolítico: Ácido Oxálico

Como pode ser visto, há pouca ou nenhuma formação de trincas por CST na ZTA do aço 310. Isto pode ser atribuído a ausência de redes de ferrita delta nessa região, o que dificulta a nucleação e propagação de trincas de CST.

Outro fator que contribui para a ausência de ferrita delta na ZTA do aço 310 é o fato de que este aço apresenta uma relação de Cr_{eq} / Ni_{eq} relativamente baixa (≈ 9 FN). Além disso, por este aço 310 ter sido laminado à frio até pequenas espessuras era esperado uma presença menor de ferrita delta. Uma vez que durante o processo de laminação à frio, a ferrita delta metaestável formada após a solidificação é transformada em austenita induzida por deformação à frio.

5 - CONCLUSÕES

A partir das análises e observações feitas sobre a influência do metal de adição na susceptibilidade à corrosão sob tensão de juntas soldadas dissimilares de aço inoxidável 310 e aço inoxidável duplex e pode-se concluir que:

- A partir dos ensaios de CST em soluções aquosas de cloreto de magnésio ficou evidenciado que todos os corpos de prova trincaram por CST, principalmente para níveis de carregamento próximos do limite de escoamento da junta.
- As trincas predominantes obtidas nos ensaios de CST foram transgranulares onde as mesmas ocorrem na direção perpendicular a tensão aplicada.
- A maioria dos corpos de prova teve fratura na ZTA e (ZTA/ZF) no lado do metal base do aço duplex 2304, provavelmente devido a formação de uma fração volumétrica de fase σ nesse aço fragilizando o mesmo, sendo que o metal de adição E309L apresentou trincas de CST na ZF e o eletrodo E2209 o metal de adição mais indicado a ser utilizado devido ao seu maior tempo de fratura obtidos nos ensaios.
- Os valores de dureza encontrados nas juntas soldadas apresentaram uma boa correlação com os ensaios de tração e CST. Todos os valores de dureza encontrados ficaram abaixo do limite proposto pela norma NACE MR015-2001, na qual estabelece uma limite de dureza máximo de 250HV.

6- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da influência da susceptibilidade à CST de juntas soldadas dissimilares de aço inoxidável austenítico AISI 310 e aço inoxidável duplex UNS S32304 soldado com outros tipos de metais de adição austenítico e duplex
- Avaliação do efeito da temperatura na susceptibilidade à CST de juntas soldadas dissimilares de aço inoxidável austenítico AISI 310 e aço inoxidável duplex UNS S32304 em meios contendo $Mg Cl_2$.
- Avaliação da susceptibilidade à CST de juntas soldadas dissimilares de aço inoxidável austenítico AISI 310 e aço inoxidável duplex UNS S32304 com outros processos de soldagem tais como TIG, para efeito de comparação com o processo de soldagem MIG/MAG.
- Avaliação do efeito da energia de soldagem na susceptibilidade à CST de juntas dissimilares de aço inoxidável AISI 310 e aço inoxidável duplex UNS S32304 em meios contendo $Mg Cl_2$.

7-BIBLIOGRAFIA

- [1] NUNES, L. P. Fundamentos de Resistência a Corrosão. Rio de Janeiro: Interciência: IBP. ABRACO, 2007. 1-7 p.
- [2] GENTIL, V. Corrosão. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A, 1996. 236 p.
- [3] MODENESI, P. J. Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis. São Paulo: SENAI-SP, 2001.
- [4] GEMELLI, E. “Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização.”. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001. 65-79 p.
- [5] FONTANA, M. G. Corrosion Engineering. 4ª. ed. USA: McGraw-Hill: Series in, 1986.
- [6] JONES, R. H. Stress corrosion Cracking - Material Performance and Evolution. Ohio: AWS International, 1993. 66 p.
- [7] FERNANDES, J. C. Desenvolvimento de um dispositivo tipo carga constante para avaliação da susceptibilidade a corrosão sob tensão em aço inoxidável austenítico. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) - Instituto de Ciências- Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 94. 2010.
- [8] CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos. 7ª. ed. São Paulo: ABM, 2005.
- [9] ŁABANOWSKI, J. Stress corrosion cracking susceptibility of dissimilar stainless steels welded joints. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Gdansk, Poland, v. 20, p. 1-2, January-February 2007.
- [10] J. C. FERNANDES, E. O. C. . M. L. N. M. M. R. P. B. Influence of corrosive solution temperature on the SCC behavior of the AISI 310 and AISI 316 stainless steels rolled plated. Kovové Materiály, v. 50, p. 69-73, 2012.
- [11] SILVA, A. Efeito da Temperatura de Solubilização na Precipitação de Fase Sigma de um Aço Inoxidável Superdúplex. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) - Instituto de Ciências Exatas- Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 69. 2011.

- [12] KUMAR, A. . D. D. L. Oxid. Met. 1976. 10 p.
- [13] RAWERS, J. C. Oxid. Met. 1988. 371 p.
- [14] KOFSTAD, P. Hight Temperature Corrosion, Elsevier Applied Science. London: 1988. 211 p.
- [15] FORMHOLD, A. T. Theory of Metal Oxidation. North Holland,Amsterdam: 1976. 290 p.
- [16] NEWKIRK, J. B. High Temperature Materials Coatings and Surface Interaction. Freund, Tel-Aviv, Israel: 1980. p. 1.
- [17] FONTANA, M. . G. N. D. Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill, 1967. 358 p.
- [18] BARIN, I. Thermochemical Data of Pure Substance: Verlag Chemie, v. I e II, 1989. 1737 p.
- [19] ASM. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. In: HANDBOOK, I. M. The Materials Information Society. 9ª. ed. USA: ASM International, v. 13, 2003. p. 1135.
- [20] ASTM G49-76 Standard Recommended Practice for Preparation and Use of Direct Tension Stress Corrosion Test Specimens. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
- [21] ASTM G36-73 Standard Recommended Practice for Performing Stress Corrosion Cracking Tests in a Boiling Magnesium Chloride Solution. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
- [22] ASTM G1-72 Standard Recommended Practice for Preparing, Cleaning and Evaluation Corrosion Test Specimens. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
- [23] ASTM E8 Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials. Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing and Materials.
- [24] CASTOLIN, E. LINHA MUNDIAL EUTECTIC CASTOLIN PARA SOLDAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS. 2006. p. 48.
- [25] PANOSSIAN, Z. Corrosão e Proteção Contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas. 1ª. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisa Tecnológicas - IPT, 1993. 6 p.

- [26] JONES, D. A. Principles and Prevention of Corrosion. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall do, 1996. 211 p.
- [27] B.BAROUX, P. L. B. Les Aciers Inoxidables. Les Lis: Les Éditions de physique, 1993.
- [28] A240M-08, A. A. 2. American Society for testing and materials- Standard Specification for Chromium - Nickel stainless steel plate. Sheet and strip for Pressure Vessels and for General Applications. 2008.
- [29] ASM. “Corrosion” In: Metals Handbook. 9^a. ed. USA: ASM International, Metals Park, v. 13, 1989. 1978-1989 p.
- [30] PINTO, D. F. Comportamento em Corrosão Sob Tensão de um Aço Inoxidável Ferrítico AISI 444 Soldado com Aço Inoxidável Austenítico AISI 316LSi, em Meios Contendo Cloretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática de Engenharia de Materiais- Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 130. 2006.
- [31] SPEIDEL, M. O. Metals, Trans. 12 A. p. 779. 1981.
- [32] BRASIL, F. Estudo de Corrosão Sob Tensão em Tubos de Aço Inoxidável AISI 304L, Aspergidos Termicamente Com Alumínio Por Arco Elétrico. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia (PIPE), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 125. 2003.
- [33] GARZÓN, C. M. Nitretação Gasosa em alta Temperatura. Matéria, v. 10, p. 500-525, 2005. ISSN 4.
- [34] CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5^a. ed. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos S.A, 2002. 589 p.
- [35] BARBOSA, R. P. Efeito do Tipo de Metal de Adição e do aporte Térmico na Corrosão Sob Tensão de Juntas Soldadas de Aço Inoxidável Austenítico AISI 304. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 102. 1995.
- [36] S/A, A. Características básicas e Cuidados dos Aços Inoxidáveis. Timóteo, MG: Apostila. Acesita (Associada ao grupo Arcelor), 2001. 9 p.

- [37] PAULA, L. W. Susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão de um Aço Inoxidável do Tipo ABNT 304 em Soluções Aquosas, Neutras e Acidificadas, Contendo Cloretos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, REDEMAT/UFOP. Ouro Preto, p. 84. 2000.
- [38] BOTTON, T. Estudo Comparativo da Resistência à Corrosão em Meio Ácido e em Meio Contendo Cloretos dos Aços Inoxidáveis UNS S44400, UNS S30403 UNS S31603, Obtidos por Laminação a Quente. Dissertação-(Mestrado em Engenharia e Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 137. 2008.
- [39] DIWAKAR, V.; ABHAY, K. J.; SREEKUMAR, K. Stress Corrosion Cracking of Stainless Steel Bellows of Satellite Launch Vehicle Propellant Tank Assembly. *Engineering Failure Analysis*, v. 10, p. 700-705, Dezembro 2003. ISSN 6.
- [40] CHEN, Y. Y.; LIOU, Y. M.; SHIH, H. C. Stress corrosion cracking of type 321 stainless steel in simulated petrochemical process environments containing hydrogen sulfide and chloride. *Materials Science and Engineering*, Taiwan, v. 407, p. 114-126, Julho 2005.
- [41] SOUZA, C.S. Avaliação da Resistência à Corrosão Localizada do aço Inoxidável Lean Duplex UNS S32304 Soldado Pelos Processos SMAW, GMAW E FCAW. Dissertação de mestrado UFMG, Belo Horizonte, p.100. 2012.
- [42] DIAS, A. O. Análise da Influência dos Parâmetros de Pulsção na Soldagem do Aço Inoxidável AISI 304 através do arame tubular AWS E316LT1- 4, Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p.138. 2010 .
- [43] LUZ, T. S. Influência das variáveis do processo de soldagem na sensitização dos aços inoxidáveis austeníticos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Ceará , p.125. 2002.
- [44] E. B. NUNES, M. F. M, H. F. G. A, J. P. F, H. C. M, F. N. A. Study of Restriction Effects on Microstructure, Microhardness and Toughness in Welded Joints of Duplex Stainless Steel. Vol.16, p.156-164, 2011.
- [45] OLIVEIRA, T. R.; FARIA, R. A. Metalurgia da Soldagem dos Aços Inoxidáveis Ferríticos. In: Seminário Inox 2000. 4º, 2000, São Paulo. p.85-92.

