

José de Matos Damasceno

**ESTUDO COMPARATIVO DE CORROSÃO POR
PITES EM JUNTAS SOLDADAS SEM E COM
REPARO EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS
S 31803(SAF2205)**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

10/2012

José de Matos Damasceno

(Especialista em Engenharia de Soldagem, Universidade de São

Paulo, 2012)

**ESTUDO COMPARATIVO DE CORROSÃO POR
PITES EM JUNTAS SOLDADAS SEM E COM
REPARO EM AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX UNS
S 31803(SAF2205)**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração:
Engenharia da Soldagem

Orientador:

Profª Drª Idalina Vieira Aoki

São Paulo 10/2012

...e ao próximo como a ti próprio.

Jesus Cristo.

Dedico a minha família em especial aos meus filhos Gustavo e Raphael.

Dedico a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Agradeço a sinceramente a Prof.Dr. Idalina Vieira Aoki pela grande dedicação, orientação e estímulos durante a realização deste trabalho.

Agradeço ao a empresa Praoqt e seus colaboradores Corradini e Sérgio pela colaboração na realização dos ensaios metalográficos.

CURRICULUM VITAE

1967	Nasceu, São Paulo - S.P. - Brasil
1987 – 1989	Técnico Metalurgista SENAI – Osasco – São Paulo
1989 – 1993	Tecnologia Mecânica Especialização Soldagem Faculdade de Tecnologia de São Paulo – São Paulo
2002 – 2004	Especialização em Administração Industrial. Universidade de São Paulo - São Paulo – São Paulo
2010 – 2012	Estudante Especialização em Engenharia de Soldagem Universidade de São Paulo - São Paulo – São Paulo

RESUMO

Os aços inoxidáveis Duplex (AID) são utilizados no Brasil em setores industriais tais

Como: petroquímico, naval e plataformas offshore, tendo vasta aplicação em vasos de pressão em processos críticos, trocadores de calor, reatores, tubulações, umbilicais, digestores, bombas e naqueles componentes onde a produtividade contínua é essencial e o custo não é a maior limitação. No entanto, durante processos de fabricação e montagem, assim como na vida em serviço destes componentes de processo pode existir a necessidade eventual de efetuar soldagens de reparo.

Deste modo, o presente trabalho, visa avaliar a resistência à corrosão por pites em juntas soldadas de aços inoxidáveis duplex sem e com reparo mediante a utilização do processo de soldagem por eletrodo revestido. Os resultados obtidos permitem estabelecer diretrizes para a realização de procedimentos de soldagem adequados e caso necessário um posterior reparo e que este seja realizado com conhecimento da possível degradação das propriedades de corrosão por pites.

ABSTRACT

Duplex stainless steels (AID) in Brazil are used in industries such as petrochemical, shipbuilding and offshore platforms, having wide application in pressure vessels in critical processes, heat exchangers, reactors, pipelines, umbilicals, digesters, pumps and components when productivity is essential and cost is not a major limitation. However, during fabrication and assembly processes or during operation process, components may need a welding repair. Thus, the present study main aim is to evaluate the resistance against pitting corrosion in welded joints of duplex stainless steels with and without welding repair by using the welding process SMAW. The results allow to establish guidelines for conducting adequate welding procedures and when needed a repair, it could be performed with knowledge about the possible degradation of the pitting corrosion process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.3.1 – Representação esquemática do processo autocatalítico que ocorre no interior do pite(16).....	8
Figura 4.1.1– Junta preparada para a soldagem	15
Figura 4.1.2 – Junta soldada antes do corte.....	16
Figura 4.1.3 – Juntas soldadas cortadas.....	16
Figura 4.1.4 –Esquema mostrando a junta usinada para realização do reparo	17
Figura 4.2.1 – Aspecto da amostra polida para análise de micro estrutura e contagem de fases conforme ASTM E562/E1245	18
Figura 4.2.2 – Padrões utilizados para medições de fases via ferritoscópio	19
Figura 4.2.3 – Corpo deprova marcado para medições de ferrita via ferritoscópio.....	20
Figura 4.2.1.2 – Corpo de prova utilizado para análises químicas nas diferentes regiões da solda e metal de base, via espectrofotometria	21
Figura 4.2.1.3 – Celula eletroquímica utilizada	23
Figura 4.2.1.4 – Amostra embutida para ensaio de corrosão	24
Figura 5.1.1 – Microestrutura da zona fundida sem reparo.....	25
Figura 5.1.1a – Microestrutura da ZAC sem reparo	26
Figura 5.1.2 – Microestrutura zona fundida com reparo	27
Figura 5.1.2a – Microestrutura ZAC com reparo.....	27
Figura 5.1.3 – Microestrutura do metal de base.....	28
Figura 5.4.1 – gráficos resultados de impedância (diagrama de Nyquist) para metal de base, junta sem e com reparo	34

Figura 5.4.1a – Gráficos resultados de impedância (diagrama de Bode)	34
Figura 5.4.3 – Curvas resultantes de polarização cíclica	38
Figura 5.5.1 – Fresta entre, metal de Base e a resina de embutimento	40
Figura 5.5.2 – Pite no metal de base	39
Figura 5.5.3 – Fresta na amostra soldada sem reparo e a resina de embutimento	41
Figura 5.5.4 – Pite na amostra soldada sem reparo	41
Figura 5.5.5 – Fresta entre a amostra com reparo e a resina de embutimento	42
Figura 5.5.6 – Pite na amostra com reparo	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Valores de resistências mecânicas de alguns aços inoxidáveis	4
Tabela 1.2 – Composição química típica dos AIDs e AISDs.....	5
Tabela 2.4.1 - Composição química do eletrodo E2209 conforme AWS A5.4...	10
Tabela 4.1.1 - Composição química do aço UNS 31803 (SAF 2205).....	14
Tabela 4.1.2 - Composição química do metal de solda conforme AWS A5.4....	14
Tabela 4.1.3 – Parâmetros de soldagem	17
Tabela 5.1 – Valores para contagem de fases conforme ASTM E562/E1245 ..	28
Tabela 5.2.1 – Valores para contagem de fases conforme medição via ferritoscópio.....	30
Tabela 5.3.1 – Resultados das análises químicas nas diferentes regiões da solda, metais de base e de adição.	31
Tabela 5.4.1 – Resultados de impedância eletroquímica.....	33
Tabela 5.4.1a – Resultados de modulos de impedância do diagrama de Bode Z 	34
Tabela 5.4.1b – Resultados de Theta Θ	34
Tabela 5.4.2 – Valores de RP e dos coeficientes de correção linear R^2 para metal de base, junta sem e com reparo	36
Tabela 5.4.3 – Resultados de quebra de camada passiva	38

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

A:	Amper
AID:	Aço Inoxidável Duplex
AIDs:	Aços Inoxidáveis Duplex
AISDs:	Aços Inoxidáveis Super Duplex
ASTM:	American Society For Testing And Materials
AWS:	American Welding Society
ECS:	Eletrodo de Calomelano Saturado
IP:	Indice de Pites
LE:	Limite de Escoamento
LR:	Limite de Resistência
MB:	Metal de Base
θ :	Theta
s:	Segundos
SAE:	Society American Engenering
UNS:	Unified Numbering System

V: Volts

Z: Impedância Eletroquímica

ZAC: Zona Afetada pelo Calor

ZACTB: Zona Afetada Pelo Calor em Temperaturas Baixas

ZACTE: Zona Afetada Pelo calor em Temperaturas Elevadas

ZF: Zona Fundida

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
CURRICULUM VITAE	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	x
SUMÁRIO	xii
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	3
2.1 Aços inoxidáveis Duplex.	3
2.2 Mirografia e propriedades mecânicas.	6
2.3 Corrosão por pites.....	7
2.3.1 Potencial de pites.	8
2.4 Soldabilidade dos aços inoxidáveis Duplex..	9
2.4.1 Metal de adição.....	9
2.4.2 Processo de soldagem por eletrodo revestido.....	10
2.4.2.1 Equipamentos..	11
2.4.2.1 Aplicações e procedimentos.	11
2.4.3 Procedimento de soldagem multipasse..	12
3. OBJETIVOS..	13
4. MATERIAIS E MÉTODOS.	13
4.1 Materiais.	14
4.1.1 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.	15
4.2 Análises e ensaios..	18
4.2.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	18
4.2.1.1 ENSAIOIS DE MEDIÇÃO DE FERRITA VIA FERRITOSCÓPIO.	19
4.2.1.2 ANÁLISE QUÍMICA DA JUNTA SOLDADA..	20
4.2.1.3 ENSAIOIS DE CORROSÃO..	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
5.1 Microestrutura e contagem de fases conforme ASTM E562/E1245.	25
5.1.1 MICROESTRUTURA E CONTAGEM DE FASES DA JUNTA SEM REPARO..	25
5.1.2 MICROESTRUTURA E CONTAGEM DE FASES DA JUNTA COM REPARO..	26

5.1.3 MICROESTRUTURA E CONTAGEM DE FASES DA JUNTA METAL DE BASE.	26
5.1.4 CONCLUSÃO DOS RESULTADOS DE FERRITA CONFORME ASTM E562/E1245.	26
5.2. ENSAIOS DE CONTAGEM DE FASE VIA FERRITOSCÓPIO.....	29
5.2.1 RESULTADOS DE FERRITA OBTIDOS VIA FERRITOSCÓPIO PARA O METAL DE BASE, JUNTA SEM E COM REPARO.....	29
5.2.2. CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS DE FERRITA VIA FERRITOSCÓPIO.	30
5.3 RESULTADOS DE ANÁLISES QUÍMICAS.	30
5.3.1 RESULTADOS DE ANÁLISES QUÍMICAS PARA O METAL DE BASE, METAL DE ADIÇÃO E JUNTAS SEM E COM REPARO.....	31
5.3.2 CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS DE ANALISES QUÍMICAS.	31
5.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORROSÃO	32
5.4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA.	32
5.4.1.1CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA.....	35
5.4.2 RESULTADOS DE ENSAIOS DE POLARIZAÇÃO LINEAR.	35
5.4.2.1 CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE POLARIZAÇÃO LINEAR.	36
5.4.3 RESULTADOS DE ENSAIOS DE POLARIZAÇÃO CÍCLICA.. ..	37
5.4.3.1 CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS DE ENSAIOS DE POLARIZAÇÃO CÍCLICA.....	39
5.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MICROSCOPIA.....	39
5.5.1 CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS ENSAIOS DE MICROSCOPIA.....	39
6. CONCLUSÕES.....	43
<i>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</i>	<i>44</i>
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	45

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

Os aços inoxidáveis duplex (AIDs) foram criados na década de 30 e a cada dia continuam ganhado mercado e se destacam por evoluírem em sua composição química e métodos de fabricação, os AIDs combinam excelente resistência à corrosão e ótimas propriedades mecânicas^(1,2)

Diversos equipamentos são produzidos para as indústrias, que envolvem operações de soldagem. Estas necessitam ser realizadas com os devidos cuidados, pois se não forem executadas de forma adequada as vantagens que os AIDs, possuem com relação aos aços inoxidáveis comum são perdidas, pois é importante ressaltar que estes aços sofrem fenômeno de fragilização e perda de resistência à corrosão provocada pelo aquecimento localizado, assim como acontecem nos diversos processos de soldagem, a maior parte dessas transformações estão relacionadas à ferrita pois a taxa de difusão nesta fase é aproximadamente 100 vezes mais rápida que na austenita⁽³⁾. A fase sigma é um dos compostos que se precipita e mais prejudica as propriedades dos AIDs ⁽⁴⁻⁵⁾. Esta fase prejudicial, rica em Cr, é fortemente fragilizante e pode se formar entre 650°C e 1000°C⁽³⁾, mas este intervalo é fortemente dependente da composição química da liga ⁽⁶⁾. Esta fase, é associada à forte redução de tenacidade ao impacto e perda da resistência à corrosão da liga. A precipitação de 4% em volume pode resultar em um decréscimo de aproximadamente 90% na tenacidade; fases como nitretos de cromo e outras fases intermetálicas

como X, t e R, também podem ser encontradas em zona afetada pelo calor em juntas soldadas se estas forem expostas a temperaturas muito elevadas ⁽⁶⁾.

Para se evitar a precipitação de intermetálicos, a principal medida é o controle do aporte de calor, para que não seja excessivamente alto. Recomenda-se aporte de calor entre 0,5 KJ/mm e 2,5 KJ/mm para a soldagem de AID e entre 0,2 KJ/mm e 1,5 KJ/mm para os AISDs(7).

Muitas são as situações na fabricação ou em serviço que podem levar à necessidade de se realizar reparos na soldagem dos AIDs, e as realizações dos procedimentos de reparos são poucos divulgadas. Neste trabalho sobre reparo em junta soldada pelo processo de soldagem por eletrodo revestido em aços inoxidáveis duplex, foram avaliadas juntas soldadas com os mesmos parâmetros e junta sem reparo e junta soldada com reparos e realizados ensaios a fim de comparar o desempenho da resistência à corrosão por pites.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.

Os aços inoxidáveis duplex (AIDs) são ligas com base no sistema Fe-Cr-Ni.

Apresenta composição química típica e o processo termomecânico de fabricação resulta em microestrutura com duas fases ferrita e austenita com porcentagens equivalentes. Os aços inoxidáveis duplex são ligas Fe-Cr-Ni⁽⁸⁾, com baixos teores de carbono e podem ter outros elementos de adição como nitrogênio, molibdênio, tungstênio e cobre⁽⁹⁾.

Os AIDs apresentam algumas vantagens sobre os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos . A elevada resistência ao trincamento por corrosão sob tensão em cloretos, resistência mecânica de aproximadamente o dobro dos aços inoxidáveis auteníticos, combinada com boa tenacidade, sua soldabilidade é melhor que dos aços inoxidáveis ferríticos⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ ; A tabela 1.1 apresenta valores de resistências mecânicas de alguns aços inoxidáveis.

Tabela 1.1 Valores de resistências mecânicas de alguns aços inoxidáveis.

Propriedades Mecânicas de alguns aços inoxidáveis				
UNS	Limite de Escoamento mínimo (MPa).	Limite de resistência mínimo (MPa).	Alongamento mínimo (%).	Energia absorvida no ensaio Charpy V(J)-nota (a).
Aços inoxidáveis austeníticos				
S 30400	205	515	40	>300
S 31603	170	485	40	-
S 08904	220	490	35	-
Aços inoxidáveis ferríticos				
S 43000	205	450	22	-
S 40900	295	380	20	-
Aços inoxidáveis duplex				
S 32304	400	600	25	300
S 31803	450	620	25	250
S 32550	450	760	15	
S 32750	550	795	15	
S 32760	550	750	25	

Classificação conforme UNS-Unified Numbering System, SAE/ASTM, setembro 1996.

Nota(a) Resultados de ensaios à temperatura ambiente.

A tabela 1.2 apresenta composição dos AIDs trabalhados ou laminados e fundidos e aços inoxidáveis superduplex (AIDS), que tem elevada resistência à corrosão e índice de corrosão por pites elevado >40 (PREN >40)

Tabela 1.2 Composição química típica dos AIDs e AIDS

AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX TRABALHADOS

UNS	Composição química (% em peso)				Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	W	N
	C	S	P									
Duplex de baixa liga												
S31600 (316L)	0,030	0,030	0,030	1,40-2,00	1,20-2,00	4,25-5,25	18,0-19,0	2,50-3,00	-	-	-	-
S32304 (2304)	0,030	0,040	0,040	1,00	2,50	3,00-5,50	21,5-24,5	-	-	0,05-0,60	-	0,05-0,20
S32404 (Uranus 50)	0,040	0,010	0,030	1,00	2,00	5,50-8,50	20,5-22,5	2,00-3,00	1,00-2,00	-	-	0,20
Duplex 22%Cr Convencionais												
S31603 (A903, N4462, 2205)	0,030	0,020	0,030	1,00	2,00	4,50-6,50	21,0-23,0	2,50-3,50	-	-	-	0,08-0,20
S32205	0,030	0,020	0,030	1,00	2,00	4,50-6,50	22,0-23,0	3,00-3,50	-	-	-	0,14-0,20
Duplex de alta liga												
S31200 (44LN)	0,030	0,030	0,045	1,00	2,00	5,50-6,50	24,0-26,0	1,20-2,00	-	-	-	0,14-0,20
S31250 (DP3)	0,030	0,030	0,030	0,75	1,00	5,50-7,50	24,0-26,0	2,50-3,50	0,20-0,80	0,10-0,50	-	0,10-0,30
S32550 (Ferralium)	0,040	0,030	0,040	1,00	1,50	4,50-6,50	24,0-27,0	2,90-3,90	1,50-2,50	-	-	0,10-0,25
S32900 (329)	0,080	0,030	0,040	0,75	1,00	2,50-5,00	23,0-28,0	1,00-2,00	-	-	-	0,15-0,35
S32950 (7 Mo Plus)	0,030	0,010	0,035	0,60	2,00	3,50-5,20	26,0-29,0	1,00-2,50	-	-	-	-
Superduplex												
S32520 (Uranus 52N+)	0,030	0,020	0,035	0,80	1,50	5,50-8,00	24,0-26,0	3,00-5,00	0,50-3,00	-	-	0,20-0,35
S32750 (A911 VF 53 2507)	0,030	0,020	0,035	0,80	1,20	6,00-8,00	24,0-26,0	3,00-5,00	0,50	-	-	0,24-0,32
S32760 (A911, N4501, Zeron100)	0,030	0,010	0,030	1,00	1,00	6,00-8,00	24,0-26,0	3,00-4,00	0,50-1,00	0,50-1,00	-	0,20-0,30
S39226	0,030	0,030	0,030	0,75	1,00	5,50-7,50	24,0-26,0	2,50-3,50	0,20-0,80	0,10-0,50	-	0,10-0,30
S39274 (DP3W)	0,030	0,020	0,030	0,80	1,00	6,00-8,00	24,0-26,0	2,50-3,50	0,20-0,80	1,50-2,50	-	0,24-0,32
S39277 (AF 918)	0,025	0,002	0,025	0,80	-	6,50-8,00	24,0-26,0	3,00-4,00	1,20-2,00	0,80-1,20	-	0,23-0,33

AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX FUNDIDOS

UNS	Composição química (% em peso)				Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	W	N
	C	S	P									
Duplex 22% Convencionais												
J92205 (A903, N4462, 2205)	0,030	0,020	0,040	1,00	1,50	4,50-6,50	21,0-23,0	2,50-3,50	1,00	-	-	0,10-0,30
J93183 (KCR-D183)	0,030	0,030	0,040	2,00	2,00	4,00-6,00	20,0-23,0	2,00-4,00	1,00	-	-	0,08-0,25
Duplex de Alta Liga												
J93345 (Ferralium)	0,080	0,025	0,040	-	1,00	8,00-11,0	20,0-27,0	3,00-4,50	-	-	-	0,10-0,30
J93370 (CD-4MCu)	0,040	0,040	0,040	1,00	1,00	4,75-6,00	24,5-26,5	1,75-2,25	2,75-3,25	-	-	0,15-0,25
J93371 (3A)	0,060	0,040	0,040	1,00	1,00	4,00-6,00	24,0-27,0	1,75-2,50	2,75-3,25	-	-	0,10-0,25
J93372 (CD-4MCuN)	0,040	0,040	0,040	1,00	1,00	4,70-6,00	24,5-26,5	1,70-2,30	2,70-3,3	-	-	0,10-0,25
J93550 (KCR D283)	0,030	0,030	0,040	2,00	2,00	-	23,0-26,0	5,00-8,00	1,00	-	-	0,08-0,25
Superduplex												
J93380 (A903, Zeron100)	0,030	0,025	0,030	1,00	1,00	6,50-8,50	24,0-26,0	3,00-4,00	0,50-1,00	0,50-1,00	-	0,20-0,30
J93404 (Alloy 958)	0,030	-	-	1,00	1,50	6,00-8,00	24,0-26,0	4,0-5,00	-	-	-	0,10-0,30

Composições químicas típicas para informação conforme UNS: United Numbering System: SAE/ASTM, Setembro de 1996.
Valores entre os limites máximos.

2.2 MICROGRAFIA E PROPRIEDADES MECÂNICAS.

Diversas são as referências que apresentam ligações entre as propriedades mecânicas e a microestrutura de diferentes ligas metálicas. Isto inclui o efeito de tratamento térmico, precipitação de fases e as propriedades mecânicas ⁽¹¹⁻¹²⁾. Está confirmado que para os AIDs 2205 e 2507, o percentual de fase sigma em torno de 1 a 2% reduz drasticamente a tenacidade dos aços e suas propriedades de tração são menos afetadas. Um tratamento térmico de solubilização com resfriamento brusco na faixa de 1000°C a 1200°C para o Aço Duplex 2205 é suficiente para restaurar a microestrutura com 55 a 60% de austenita e 40 a 45% de ferrita ⁽¹³⁾.

Porém, durante determinadas sequências de tratamentos térmicos, envelhecimentos isotérmicos, conformação a quente ou soldagem podem ocorrer precipitação de fases que causam tanto a redução das propriedades mecânicas quanto a redução das propriedades de resistência à corrosão.

A fase sigma particularmente pode ter sua formação entre 700°C e 900°C por alguns mecanismos distintos: produto da decomposição eutetóide de ferrita original que gera austenita secundária, por nucleação e crescimento a partir da ferrita original ^(13,14).

2.3 CORROSÃO POR PITES.

A corrosão por pites é muito temida nos aços inoxidáveis pois sua identificação é difícil de ser detectada por inspeções visuais e algumas vezes nem são detectadas por estas inspeção. Caracterizada por ataques corrosivos muito localizados, esta começa pela quebra da camada passiva em regiões que apresentam defeitos como: inclusões, discordâncias, contornos de grão ou interfaces⁽⁹⁾. O pite pode ocorrer apenas pela presença de ions cloretos que quebram localmente a camada passiva e levam à formação de ions metálicos complexos removendo esta camada. A presença principalmente de ions cloretos inibe a passivação do local afetado, desta forma tem-se grande taxa de dissolução através de reação anódica; para compensar a presença de cátions metálicos, os ânions cloretos migram para a região afetada, para balancear as cargas elétricas envolvidas. A concentração local de cloretos aumentada leva à hidrólise dos cloretos metálicos formados, resultando na formação de ácido clorídrico; diminuindo o pH local, a taxa de corrosão aumenta e desta forma tem-se o aumento da concentração de cloretos localizada, fazendo da corrosão por pites um processo autocatalítico⁽¹⁴⁾, conforme demonstrado na figura 2.3.1⁽¹⁵⁾. De forma geral a resistência por pites em AIDs solubilizados é claramente em função da sua composição química⁽¹⁵⁾ e resistência à corrosão por pites cresce com o aumento do índice de pite dado comumente por $IP = (\%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N)^{(16)}$. A formação de fases ricas em cromo (exemplo a fase sigma) e a presença de regiões pobres neste elemento proporcionam perdas na resistência à corrosão por pites.

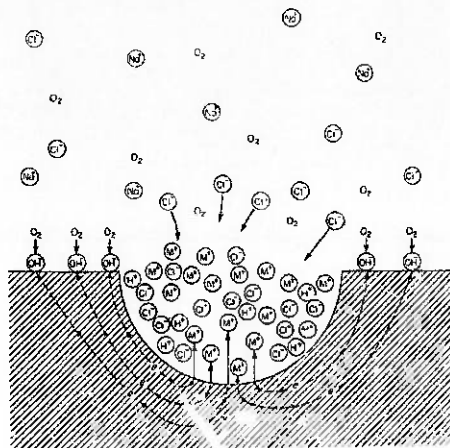


Figura 2.3.1 – Representação esquemática do processo autocatalítico que ocorre no interior do pite(16).

FIGURA 2.3.1 POTENCIAL DE PITE.

Se o potencial de pite estiver acima de 800 mV contra o eletrodo de calomelano saturado (ecs) em aços AIDs com ou sem adição de nitrogênio, o mecanismo de nucleação de pites é desenvolvido envolvendo a ação de íons cloretos bem como à presença de oxigênio⁽¹⁷⁻¹⁸⁾. Os pites formado nos AIDs, e apresentam morfologia "rendilhada" explicada através do processo de passivação e corrosão interna ao pite próxima da "boca dos mesmos ⁽¹⁸⁾". Os pites começam a nucleação na interface metal-solução-gás, e a polarização cíclica utilizando uma solução de NaCl 3,5% em AIDs levam a valores de potencial de pites entre 1000 mV_(ecs) e 1200 mV_(ecs)⁽¹⁸⁻¹⁹⁾ podendo haver evolução de oxigênio.

Conforme SRIRAM E TROMANS ⁽²⁰⁾ os AIDs que sofreram solubilização podem apresentar corrosão por pites tanto na fase austenita como na ferrita, porém se este aço contém nitrogênio que se apresenta na austenita, a resistência à corrosão será maior na austenita, se não contém nitrogênio, devido a ferrita apresentar os maiores teores de cromo e molibdênio esta é que apresenta a maior resistência à corrosão por pites.

2.4 SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.

Podemos dizer que para soldar os AIDs, quase todos os processos de soldagem a arco podem ser utilizados⁽²¹⁾. O uso de processos como feixe de elétrons ou laser, tem seu uso limitado, e a formação de austenita é impedida devido as altas velocidades de resfriamento⁽²²⁻²³⁾. Igualmente acontece para os processos de soldagem por resistência e por atrito.

Os processos por arco submerso utilizando eletrodo e fitas e eletro escória estão sendo utilizados para realizar revestimentos com os AIDs.

2.4.1 Metal de Adição

Durante a soldagem as velocidades de resfriamentos podem ser muito elevadas fazendo que a porcentagem de ferrita na zona fundida seja maior que a desejada. Como consequência, isto provocará a diminuição da tenacidade e da resistência à corrosão. Assim o uso de metais de adição com composição química igual ao do metal de base é limitado e as juntas precisarão ser submetidas a tratamento térmico pós-soldagem⁽²⁴⁻²⁷⁾.

Com a intenção de facilitar a formação de austenita na zona fundida normalmente são usados metais de adição com teor de níquel maior que o de metal de base, em torno de 2,5 a 3,5% a maior.

Para soldar aço do tipo UNS S31803 (SAF2205) (Fe-22%Cr-5,5%Ni- 3%Mo), é utilizado metal de adição com Fe-22%Cr-9%Ni- 3%Mo. Com a utilização deste metal de adição e o controle da soldagem, o teor de ferrita podem ser mantidos em torno de 50 %.

Se ocorrer um aumento muito grande de Ni no metal de adição, este aumento pode levar a formação de fases intermetálicas na zona fundida (ZF) ^(28,29-30).

A introdução de N na poça de fusão do metal de adição pode ser outra forma de controlar a porcentagem de austenita, a poça de fusão rica em N evita que o N da zona afetada pelo calor (ZAC) se difunda para a poça de fusão. Desta forma o N da ZAC pode continuar no seu teor original, facilitando a formação de austenita.

Tabela 2.4.1 Composição química do eletrodo E2209 conforme AWS A.5.4

Designação	%C máximo	%Si máximo	%Mn	%P máximo	%S máximo	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu máximo	%N
E2209	0,04	1,0	0,5	0,04	0,03	21,5	8,5	2,5	0,75	0,08
			A			a	a	a		a
			2,0			23,5	10,5	3,5		0,20

2.4.2 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO.

A soldagem por eletrodos revestidos é definida como um processo de soldagem com arco elétrico onde a união é produzida pelo calor do arco criado entre o eletrodo revestido e a peça a se realizar a soldagem ⁽³⁵⁾.

Este processo iniciou-se no início do século XX com a utilização de arames nus para cercas, ligados a rede elétrica, o resultado desta prática era muito pobre, com sérios problemas de instabilidade de arco e depósitos contaminados ⁽³⁶⁾.

A partir de seus estágios iniciais o desenvolvimento tem sido contínuo e podemos destacar o advento dos eletrodos rútilicos em meado dos anos 30 e do revestimento básico no início dos anos 40 e a adição do pó de ferro em meado dos anos 50.

No Brasil como na maioria dos países o processo de soldagem por eletrodos revestidos é o com a maior utilização, sendo um dos mais baratos e simples e continua sendo aplicado em grande variedade de aplicações, apesar de não ser necessariamente o mais eficiente ⁽³⁷⁾.

2.4.2.1 EQUIPAMENTOS.

O equipamento básico para realizar soldagem com eletrodos revestidos possui uma configuração muito simples, se comparado aos outros processos elétricos e consiste de:

Fonte de energia;

Alicate para fixação de eletrodos;

Cabos de interligação;

Pinça para ligação à peça;

Equipamentos de proteção individual;

Equipamentos de limpeza da solda.

2.4.2.2 APLICAÇÕES E PROCEDIMENTOS.

O campo de aplicação dos eletrodos revestidos atualmente é o mais vastos entre todos os processos de soldagem pela sua simplicidade, facilidade de acesso e baixo custo. A variedade de procedimentos aplicáveis é também muito ampla que podem ser desde um simples ponteamto até os mais rígidos controles de fabricação.

O critério para escolher um procedimento de soldagem deve estabelecer um balanço ótimo entre custo de realização, a qualidade do depósito, a segurança dos soldadores. A taxa de deposição deve ser maximizada compatível com os critérios de qualidade e segurança operacional.

2.4.3. PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM MULTIPASSE DOS AIDS .

Quando realizamos a soldagem multipasse, tanto a ZF como a ZAC são reaquecidas, levando à mudanças microestruturais nas duas regiões, que dependem da microestrutura de cada região e pelos ciclos térmicos precedentes. O aquecimento repetido da ZF e da ZAC, pode levar à precipitação de fases intermetálicas como os nitretos, a fase sigma e a fases R^(37,38,39,40).

Por outro lado o aumento da fração volumétrica de austenita na ZAC é notado quando a junta é reaquecida pelos passes sucessivos^(38, 34,40). O reaquecimento da zona afetada pelo calor em temperaturas elevadas (ZACTE) pode levar ao crescimento da austenita intergranular. Da mesma maneira os nitretos são dissolvidos parcial ou totalmente, gerando um aumento do teor de nitrogênio na matriz. Como resultado, a precipitação da austenita é favorecida. Já no reaquecimento em temperaturas mais baixas, ao redor de 900°C, pode ocorrer

a precipitação de nitretos de cromo tanto na ZACTE como na Zona afetada pelo calor em baixas temperaturas (ZACTB)^(42,43,44,45,46).

Os mecanismos de transformações em estado sólido na zona fundida são basicamente os mesmos da ZAC⁽⁴⁷⁾.

A zona fundida apresenta uma maior fração de austenita intergranular. Este fato pode ser explicado, pois a zona fundida apresenta uma maior quantidade de inclusões, facilitando a nucleação deste tipo de austenita⁽⁴²⁾.

3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo geral comparar a resistência a corrosão por pites em solução de NaCl 3,5% em juntas de AID UNS S31803(SAF 2205) soldadas com eletrodo revestido(AWS A5.4 E2209-17) uma sem reparo e outra com reparo. Pretende-se verificar o efeito da soldagem multipasse na corrosão por pites em juntas soldadas de aço inoxidável duplex sem reparo e com reparo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

Para realização deste trabalho foi proposto a verificação experimental da soldagem em chapas de AID UNS 31803 (SAF 2205) pelo processo de eletrodo

revestido, solda multipasse sem reparo e com reparos, realizados ensaios de resistência à corrosão, análise química, contagem de fase ferrita e avaliação por microscopia óptica e eletrônica de varredura.

4.1 MATERIAIS

As ligas usadas para confeccionar os corpos de prova foram:

- AIDs, o UNS 31803 (SAF 2205) em forma de chapa com espessura de 16mm cuja composição esta dada na tabela 4.1.1.

Tabela 4.1.1 Composição química do aço UNS 31803 (SAF 2205).

Designação	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%Ti	%Nb	%N
UNS 31803	0,028	0,610	1,19	0,024	0,007	22,75	5,82	3,17	0,22	0,002	0,004	0,15

-Metal de adição em forma de eletrodo revestido conforme AWS A5.4 /5.4M:2006 E 2209-17 cuja composição é dada na tabela 4.1.2.

Tabela 4.1.2 Composição química do metal de solda conforme AWS A5.4/5.4M:2006

Designação	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%N
E2209-17	0,028	0,836	1,01	0,025	0,006	23,46	8,89	2,803	0,09	0,16

4.1.1 PARÂMETROS DE SOLDAGEM:

Foram preparada juntas de topo com chanfro em V com ângulo de 60° com face da raiz de aproximadamente 2mm e abertura de raiz entre 2mm e 3mm, em chapas de 16mm de espessura conforme mostrado na figura 4.1.1 . A soldagem realizada em 13 passes e mais 1 passe de repasse da raiz sem que os parâmetros apresentado na tabela 4.1.3 tenham sofrido modificações, após a realização da soldagem conforme figura 4.1.2, a chapa fora cortada ao meio. De forma aleatória conforme figura 4.1.3 e foi removida parte do metal de adição a fim de realizarmos o reparo no metal fundido conforme pode ser visto na figura 4.1.4. A usinagem foi realizada até 8mm da espessura da chapa e deixando uma margem de 3mm de metal depositado de cada lado do antigo chanfro, após esta nova preparação de chanfro, a soldagem realizando o reparo foi realizada com os mesmos parâmetros de soldagem inicialmente utilizados.



Figura 4.1.1 Junta preparada para a soldagem

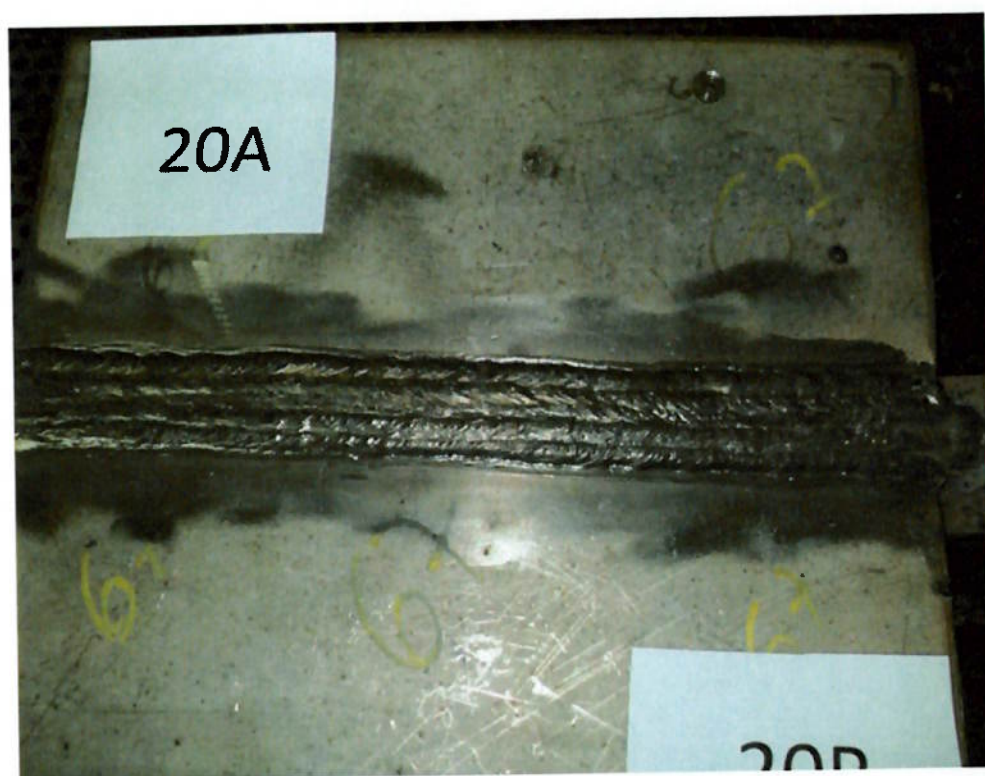


Figura 4.1.2 Junta soldada antes do corte

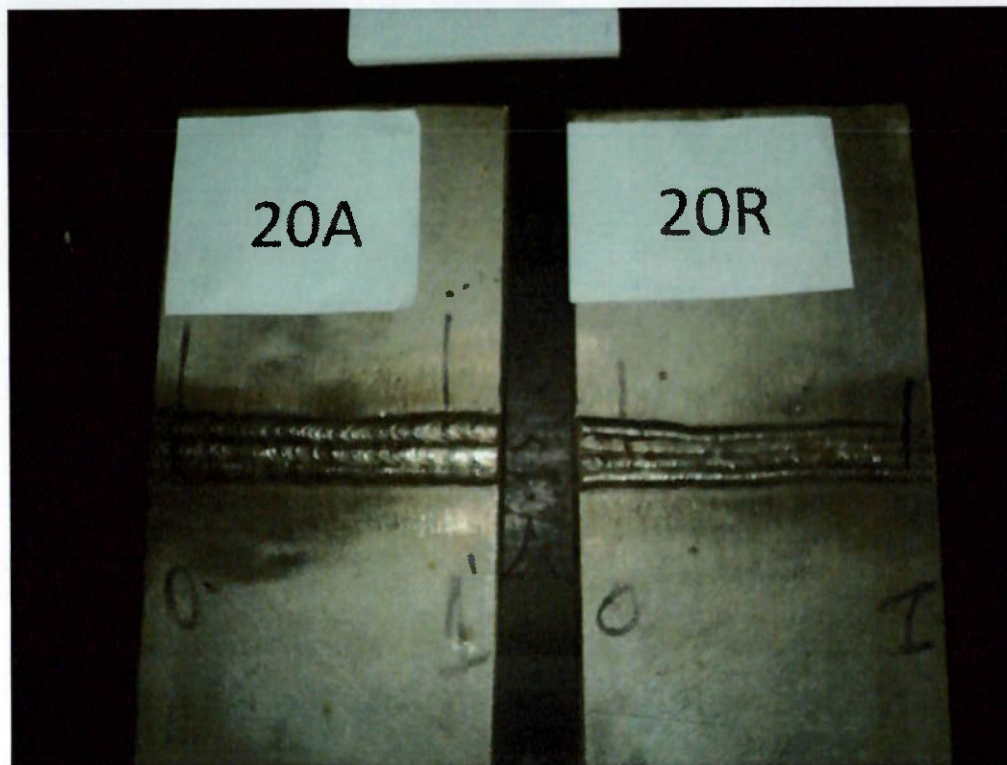


Figura 4.1.3 Juntas soldadas cortadas



Figura 4.1.4 Esquema mostrando a junta usinada para realização do reparo

Tabela 4.1.3 Parâmetros de soldagem

Processo	Eletrodo revestido
Tensão	28 V
Corrente	CCPI
Intensidade de corrente	100 A
Velocidade de soldagem	3,2mm/s
Preaquecimento	Ambiente 23°C
Temperatura de interpasse	< 150°C
Energia de Soldagem	0,875 KJ/mm

4.2 ANÁLISES E ENSAIOS

4.2.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.

Os cortes a partir das chapas soldadas, foram realizados com serra mecânica usando óleo de refrigeração e em seguida foram lixadas em politriz com refrigeração a água até o polimento conforme figura 4.2.1. Foi realizada análise de micro estrutura e contagem de fases conforme norma ASTM E562 / E1245 e utilizado ataque eletrolítico com o reagente NaOH+H₂O.

Para os ensaios de corrosão as amostras foram preparadas apenas por lixamento até a lixa de SiC grana 600. Os ensaios foram realizados na zona fundida.



Figura 4.2.1 Aspecto da amostra polida para análise de microestrutura e contagem de fases. Conforme ASTM E562/E1245.

4.2.1.1 ENSAIO DE MEDIÇÃO DE FERRITA VIA FERRITOSCÓPIO.

Realizado ensaio de medição de ferrita por permeabilidade magnética com ferritoscópio marca Fischer modelo MP30ES e padrões de calibração de 34,4 FN 30,7 Fe e 92,6 FN e 64,1 Fe, conforme figura 4.2.2 as medições de ferrita foram realizadas obedecendo, uma distância de 6mm entre cada ponto para o metal de adição e a zona afetada pelo calor, afim de evitarmos interferência entre os pontos, conforme figura 4.2.3.



Figura 4.2.2 Padrões utilizados para medição de fase, via ferritoscópio.



Figura 4.2.3 Corpo de prova marcado para medição de ferrita via ferritoscópio.

4.2.1.2 ANÁLISE QUÍMICA DA JUNTA SOLDADA.

As análises químicas das juntas soldadas foram realizadas por espectrofotometria de emissão óptica no metal de base, na zona afetada pelo calor e na zona fundida, conforme figura 4.2.1.2. O equipamento de emissão óptica foi calibrado com padrões internacionais.



Figura 4.2.1.2 Corpo de prova utilizado para ensaios de análises químicas nas diferentes regiões das soldas e metal de base; via espectrofotometria.

4.2.1.3 ENSAIOS DE CORROSÃO

Os ensaios de corrosão foram realizados em solução de cloreto de sódio 3,5%(NaCl -3,5%), preparadas em reagente padrão analítico e água destilada e após cada ensaio de corrosão a solução era descartada.

Foram realizados em duas etapas. A primeira etapa foi realizada utilizando equipamento potenciostato PAR modelo 273 A conforme figura 4.2.1.3, as

amostras foram colocadas em uma célula de corrosão contendo 3 eletrodos, o eletrodo de trabalho (metal de solda), um eletrodo de Ag/AgCl, KCl saturado como referência e uma folha de platina como contra eletrodo, conforme figura 4.2.1.3 e exposta uma área de $0,25\text{cm}^2$ ao eletrólito. Foram determinados o potencial de circuito aberto durante 3600 segundos e este considerado o potencial de corrosão. As medições de espectroscopia de impedância eletroquímica foram realizadas em potencial de circuito aberto na faixa de frequência de 50000HZ a 0,005HZ e perturbação de potencial de 10 mV rms e 10 medidas por década de frequência. As medidas de polarização linear foram realizadas na faixa de potencial inicial de -0,02 V a 0,02 V e velocidade de varredura de 0,16mV/s.

Os ensaios de polarização cíclica foram iniciados em -0,1 V e velocidade de varredura de 0,2mV/s até atingir o potencial no sentido anódico, na corrente máxima de $1\text{mA}/\text{cm}^2$, quando o sentido da polarização era invertido no sentido catódico até o potencial de corrosão ou de circuito aberto.

Na segunda etapa foram repetidos todos os ensaios anteriormente citados, mas utilizando o potenciostato da marca Gamry referência 600. As amostras foram submetidas à passivação por imersão em ácido nítrico concentrado por 15 minutos. Esse tratamento foi realizado a fim de diminuir os possíveis efeitos de corrosão por frestas quando as amostras fossem embutidas em resina.

Em seguida as amostras foram coladas com cola prata a um fio de cobre encapado que estabeleceu contato com nosso eletrodo de trabalho conforme figura 4.2.1.4 e foram embutidas em resina specifix-40 kit marca Struers.



Figura 4.2.1.2 Potenciostato PAR modelo 273A



Figura 4.2.1.3 Célula eletroquímica utilizada.



Figura 4.2.1.4 Amostra embutida para ensaio de corrosão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

5.1 MICROESTRUTURA E CONTAGEM DE FASES CONFORME ASTM E562/E1245.

5.1.1 MICROESTRUTURA E CONTAGEM DE FASES DA JUNTA SEM REPARO.

Após contagem de fases via manual seguindo a norma ASTM E562/E1245, obtivemos uma microestrutura com 33% de ferrita e 67% de austenita na zona fundida e com 59% de ferrita e 41% de austenita na ZAC para a amostra sem reparo conforme pode ser visto na figura 5.1.1 e 5.1.1a.

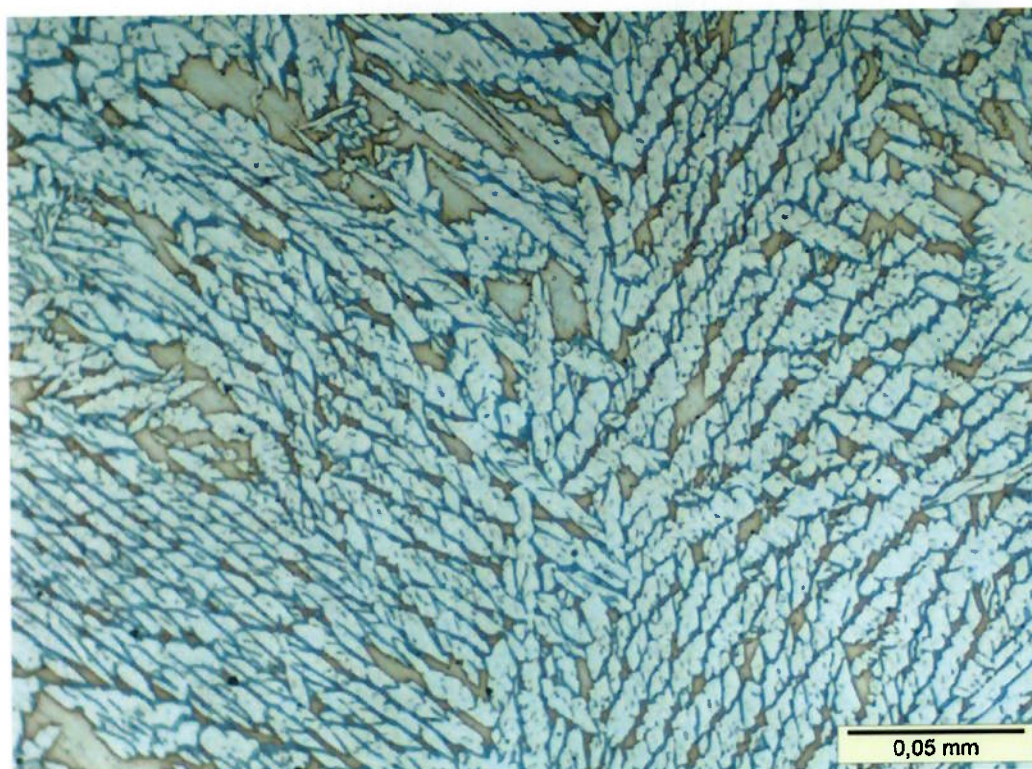


Figura 5.1.1 Microestrutura da zona fundida sem reparo com ataque de NaOH+H₂O.

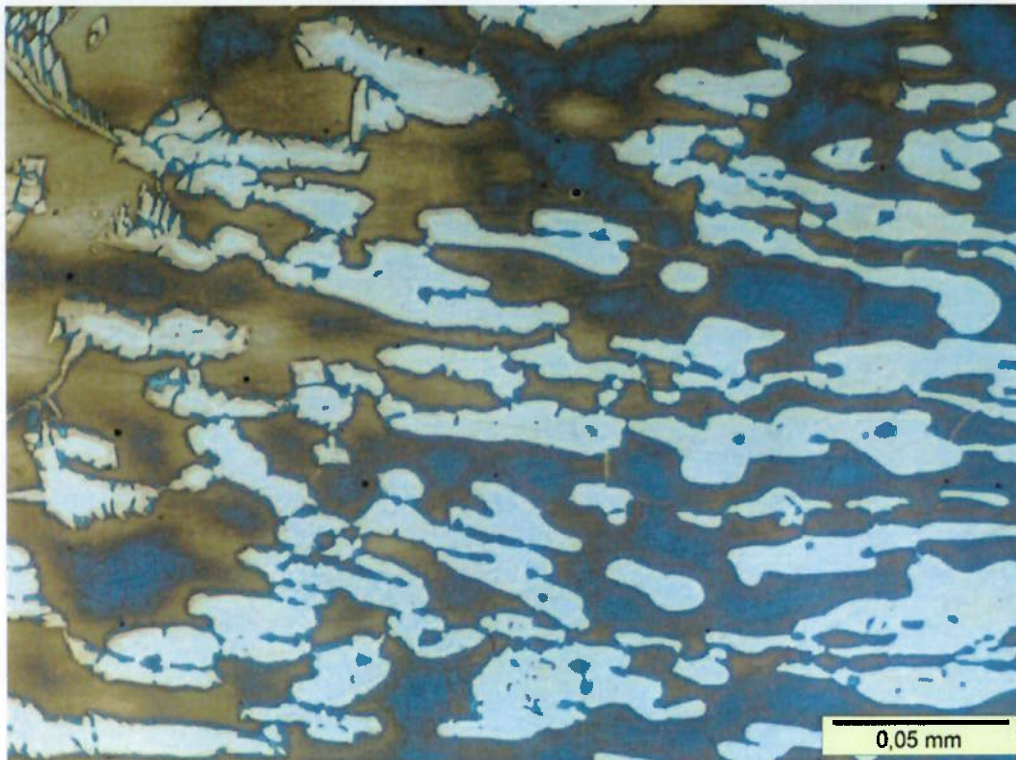


Figura 5.1.1a Microestrutura da ZAC sem reparo com ataque de NaOH+H₂O.

5.1.2 MICROESTRUTURA E CONTAGEM DE FASES DA JUNTA COM REPARO.

Resultado da contagem de fase via manual seguindo a norma ASTM E562/E1245, obtivemos uma microestrutura com 33% de ferrita e 67% de austenita na zona fundida e com 63% de ferrita e 37% de austenita na ZAC para a amostra com reparo visto na figura 5.1.2 e 5.1.2a.

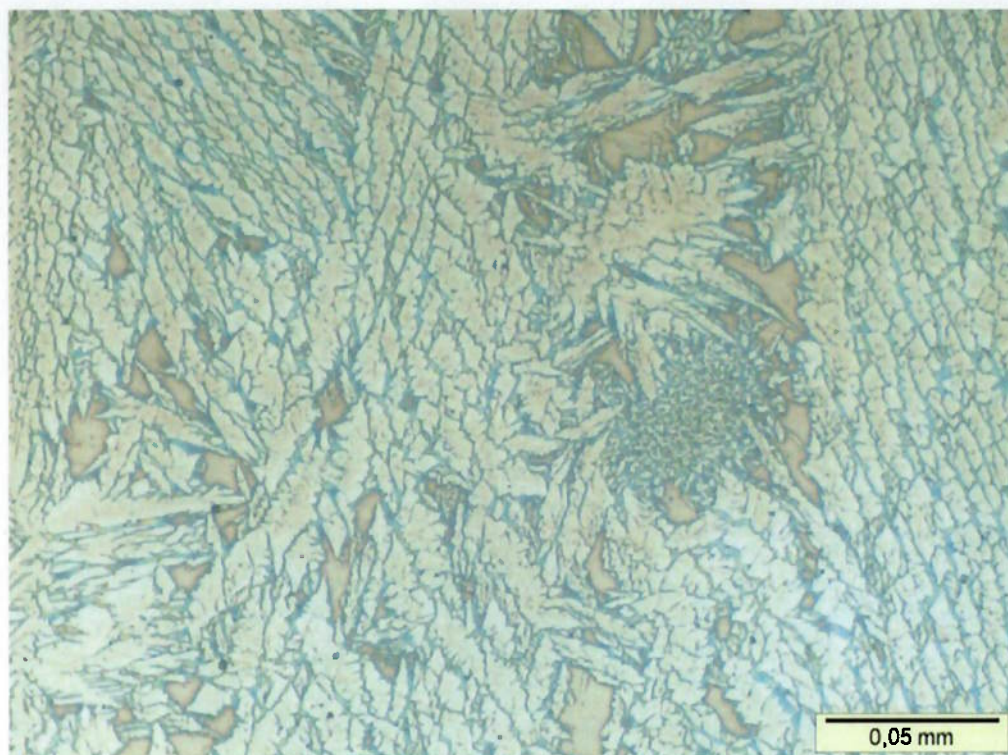


Figura 5.1.2 Microestrutura zona fundida com reparo com ataque de NaOH+H₂O.

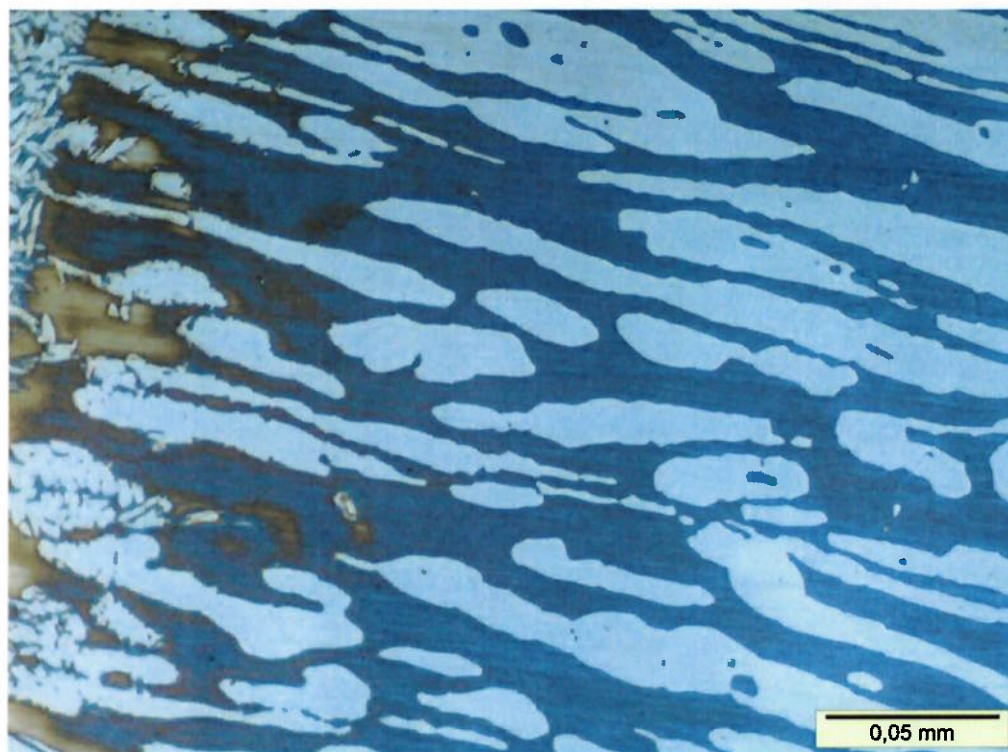


Figura 5.1.2a Microestrutura ZAC com reparo com ataque de NaOH+H₂O.

5.1.3 MICROESTRUTURA E CONTAGEM DE FASES PARA O METAL DE BASE.

Os resultados obtidos na contagem de fases via manual seguindo a norma ASTM A562/A1245 para o metal de base apresentam valores de ferrita de 49% considerado estável para o mesmo conforme apresentado na tabela 5.1.

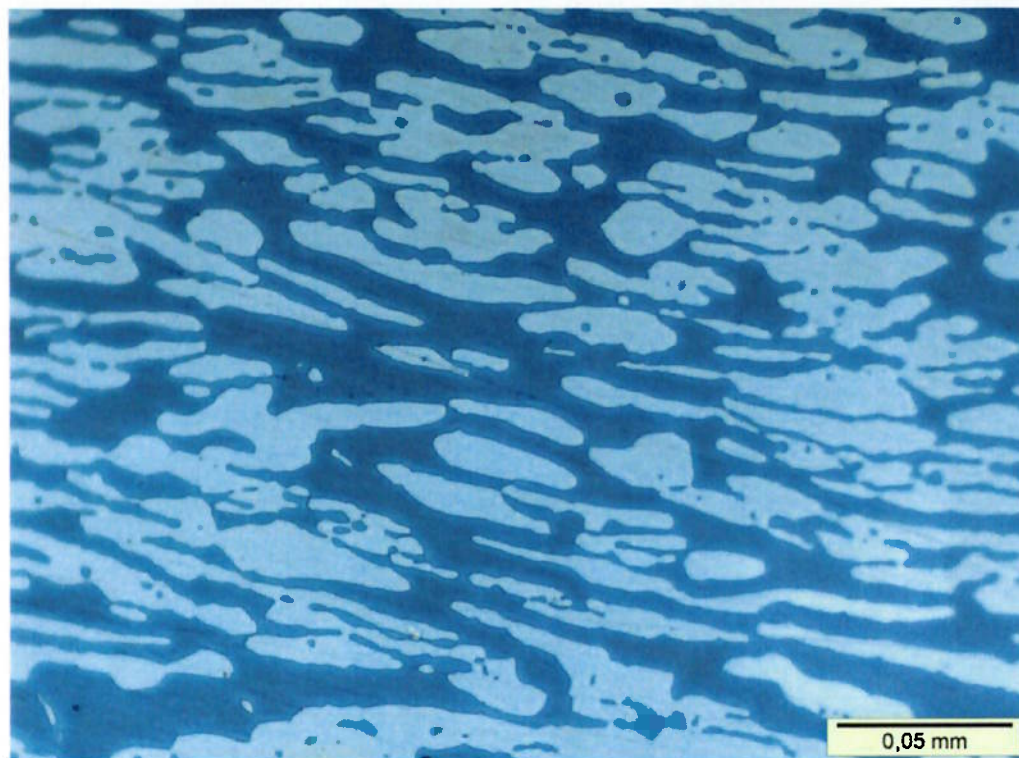


Figura 5.1.3 Microestrutura do metal de base com ataque de NaOH+H2O.

Tabela 5.1 Valores para a contagem de fases conforme ASTM E562/E1245.

<i>Amostra</i>	Ferrita(%)
<i>Metal de base</i>	49
<i>Zona fundida sem reparo</i>	33
<i>Zona fundida com reparo</i>	33

5.1.4 CONCLUSÃO DOS RESULTADOS DE FERRITA CONFORME ASTM E562/E1245.

Os resultados obtidos através do método de ensaio de contagem de fases

conforme ASTM E562 /E1245, nos indica que é necessária uma grande experiência e sensibilidade do técnico.

Os resultados obtidos nas contagem de fase ferrita na zona fundida, para a junta sem reparo e para o com reparo apresentam valores iguais porém inferiores as ZACs devido a zona fundida apresentar maior quantidade de austenita intergranular.

Este método parece ser o melhor para fazer a quantificação de ferrita em área restrita caso da área da zona fundida.

5.2. ENSAIOS DE CONTAGEM DE FASE VIA FERRITOSCÓPIO.

5.2.1 RESULTADOS DE FERRITA OBTIDOS VIA FERRITOSCÓPIO PARA O METAL DE BASE E JUNTA SEM E COM REPARO.

Os resultados encontrados para o metal de base e para as amostras sem e com reparo apresentam pequena variação com reação ao método de contagem manual, no entanto maior sensibilidade nos valores quanto a zona fundida que, apresenta uma pequena redução de valores para a junta com reparo em comparação com a junta sem reparo, conforme pode ser visto na tabela 5.2.1.

Tabela 5.2.1 Valores da contagem de fases conforme medição via ferritoscópio.

Amostra	Ferrita média (%)	Desvio padrão
Metal de base	49	2,3
Zona Fundida sem reparo	32,9	4,1
Zona Fundida com reparo	30,9	1,7

5.2.2 CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS DE FERRITA OBTIDOS VIA FERRITOSCÓPIO

Conclui-se que os resultados obtidos por este método apresentam valores com menor precisão e não permitem fazer distinção entre os teores de ferrita no caso de junta soldadas sem e com reparo que possam apresentar valores próximos.

5.3 RESULTADOS DE ANÁLISES QUÍMICAS.

5.3.1 RESULTADOS DE ENSAIOS DE ANÁLISES QUÍMICAS PARA METAL DE BASE, METAL DE ADIÇÃO E JUNTAS SEM E COM REPARO.

Os resultados dos ensaios das análises químicas para o metal de base, o metal de adição e as juntas sem e com reparo; indicam que para o elemento Mo houve um ganho nas zonas fundidas sem e com reparo; em comparação com o metal de adição, para o elemento Ni, resultados obtidos apresentam um ganho nas juntas soldadas e para a junta com reparo um ganho maior, comparando

com o resultado do metal de adição, para o elemento Cr, as zonas fundidas sem e com reparos apresentaram perdas, a zona fundida com reparo apresentou mais perda que a junta sem reparo. As concentrações para os elementos são apresentados conforme tabela 5.3.1, e nos indicam que pode ter havido difusão de alguns elementos metálicos para outra região da junta ou possível formação de fases intermetálicas.

TABELA 5.3.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS NAS DIFERENTES REGIÕES DE SOLDA, METAIS DE BASE E ADIÇÃO.

Designação	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%Ti	%Nb	%N
Metal de Base	0,028	0,83	1,19	0,024	0,007	22,75	5,82	3,17	0,220	0,002	0,004	0,15
Metal de adição	0,028	0,84	1,01	0,025	0,006	23,05	8,89	2,80	0,09	0,001	0,002	0,16
ZF sem reparo	0,028	0,82	1,05	0,024	0,009	22,18	9,12	3,08	0,041	0,009	0,027	0,12
ZF com reparo	0,026	0,81	1,04	0,021	0,010	21,68	9,33	3,08	0,032	0,010	0,027	0,12

5.3.2 CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS DE ANÁLISES QUÍMICAS

Conclui-se que as juntas soldadas sem e com reparo apresentam modificações em suas análises químicas comparando se com o metal de adição e para a junta com reparo a perda no elemento Cr e pequeno ganho no elemento Ni são maiores comparado com o metal de adição. Isto poderá influir negativamente na sua resistência a corrosão por pites.

5.4. RESULTOS DOS ENSAIOS DE CORROSÃO.

5.4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA

Os resultados obtidos através dos ensaios de impedância indicam valores de impedância a frequência de $5,0 \times 10^{-2}$ Hz, altos para a junta sem reparo e mais abaixo para a junta com reparo e com uma tendência descendente formando um arco, com menor diâmetro. O resultado do metal de base apresenta um arco com diâmetro intermediário, e os valores podem ser observados na tabela 5.4.1 e a reunião dos diagramas de Nyquist, e podem ser observados na figura 5.4.1.

Podemos observar na figura 5.4.1a nos diagrama de Bode $|Z| \times \log f$, os valores para o modulo de impedância $|Z|$ nas mais baixas frequências, para a junta com reparo mantem-se menor que os valores encontrados para o metal de base, e a junta sem reparo mostrou valores superiores a todas as outras situações estudadas, indicando sua maior resistência à corrosão, enquanto a junta com reparo mostra menor resistência à corrosão.

Os resultados de θ na figura 5.4.1b, diagrama de Bode $\theta \times \log f$, confirma que os valores de θ para a junta com reparo são elevados por uma menor faixa de frequência indicando sua menor resistência à corrosão.

TABELA 5.4.1 RESULTADOS DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA

AMOSTRA	$Z''/\text{ohm.cm}^2$	Hz
METAL DE BASE	$6,8615 \times 10^4$	$5,0 \times 10^{-2}$
SEM REPARO	$1,4882 \times 10^5$	$5,0 \times 10^{-2}$
COM REPARO	$5,6329 \times 10^4$	$5,0 \times 10^{-2}$

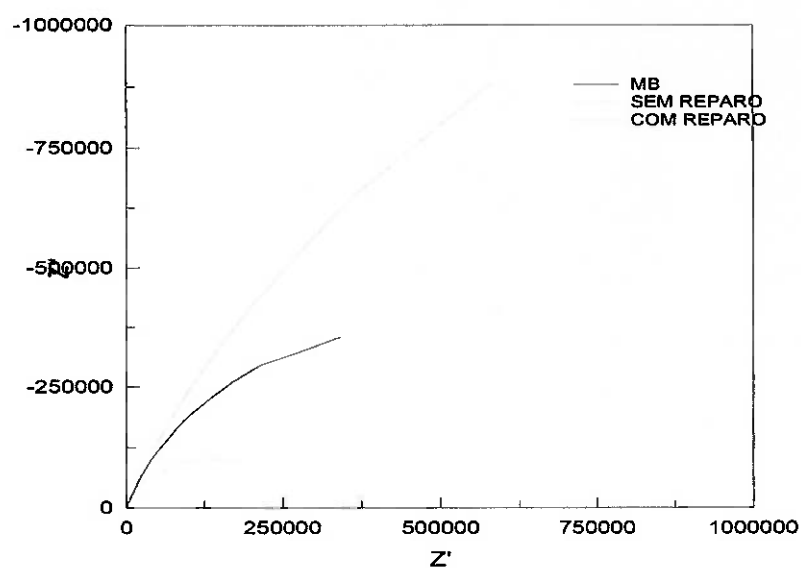


Figura 5.4.1 gráficos resultados de impedância (diagrama de Nyquist) para metal de base, junta sem e com reparo.

Tabela 5.4.1a resultados de modulo de impedância do diagrama Bode $|Z|$

AMOSTRA	$ Z /\text{ohm.cm}^2$	Hz
METAL DE BASE	$7,3068 \times 10^4$	$5,0 \times 10^{-2}$
SEM REPARO	$1,5885 \times 10^5$	$5,0 \times 10^{-2}$
COM REPARO	$6,2607 \times 10^4$	$5,0 \times 10^{-2}$

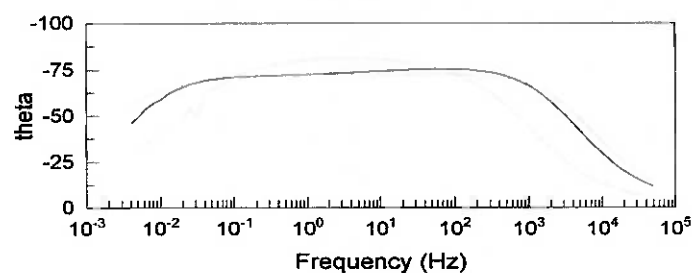
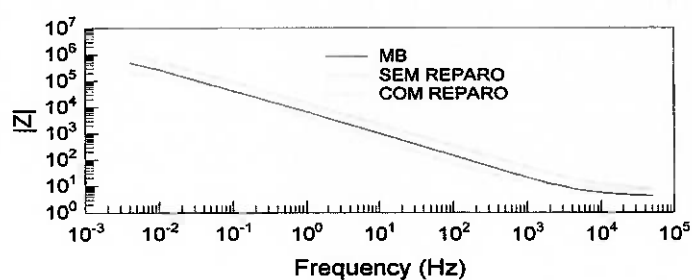


Figura 5.4.1a Gráficos resultados de impedância (diagrama de Bode)

Tabela 5.4.1b Resultados de θ

AMOSTRA	θ	Hz
METAL DE BASE	-69,894	$5,0 \times 10^{-2}$
SEM REPARO	-69,526	$5,0 \times 10^{-2}$
COM REPARO	-64,121	$5,0 \times 10^{-2}$

5.4.1.1 CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS DO ENSAIO DE IMPEDÂNCIA

Os resultados nos indicam que temos melhores valores de resistência à corrosão, para a junta sem reparo, comparando-se com a junta com reparo.

O metal de base, apresenta valor de resistência intermediário entre as duas juntas.

Isso justifica-se pelo fato de que o material depositado é mais rico em elementos como Cr e Mo o que lhe confere maior resistência à corrosão.

5.4.2 RESULTADOS DE ENSAIOS DE POLARIZAÇÃO LINEAR

Nos ensaios de polarização linear os resultados encontrados mostram valores muito superiores de R_p , para a amostra da junta sem reparo em comparação com os valores encontrados, para a junta com reparo, e o metal de base fica com valores intermediários, estes valores podem ser observado na figura 5.4.2.

Os resultados de valores de R_p , obtidos através da curva confirmam a diferença de valores entre a junta sem reparo e a com reparo, esta diferença para os valores de R_p apresenta-se, uma ordem de grandeza maior entre a sem e a com reparo conforme pode ser visto na tabela 5.4.2.

Tabela 5.4.2 Valores de RP e dos coeficientes de correção linear R^2 para metal de base, junta sem e com reparo.

AMOSTRA	RP/Ohm/cm ²	R ²
METAL DE BASE	7,33X10 ⁵	0,99
SEM REPARO	1,38X10 ⁵	0,97
COM REPARO	2,32X10 ⁵	0,99

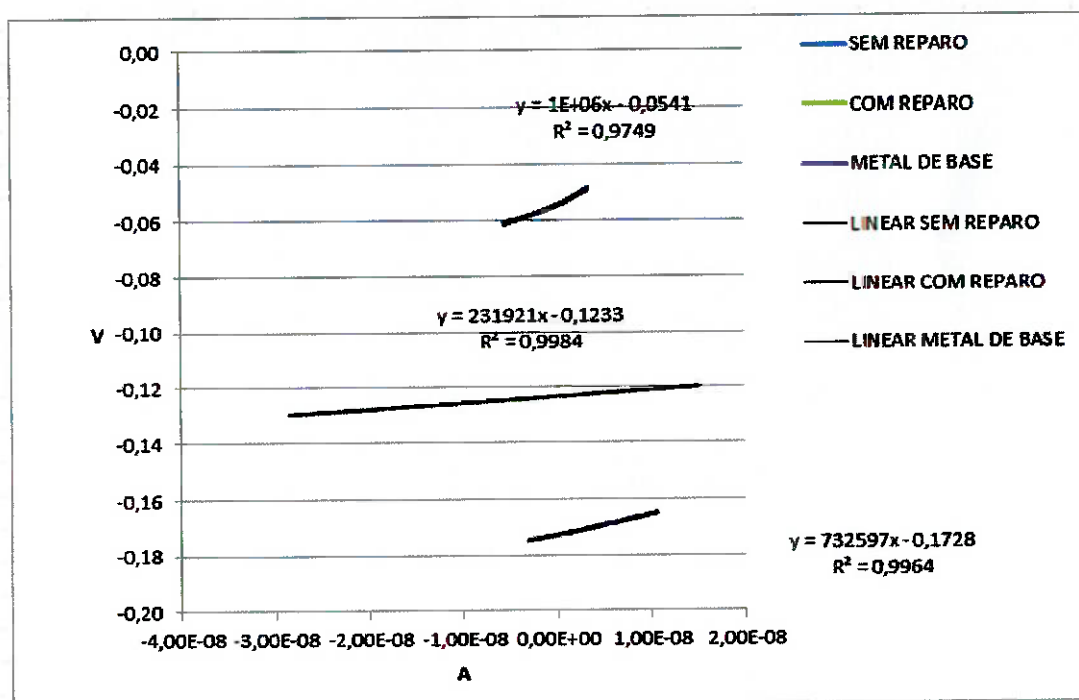


Figura 5.4.2 Gráficos com os dados de polarização linear usados para determinar a R_p .

5.4.2.1 CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS ENSAIO DE POLARIZAÇÃO LINEAR

Os resultados obtidos através dos ensaios indicam que a amostra com reparo terá maior susceptibilidade a corrosão em comparação com as outras amostras.

5.4.3 RESULTADOS DE ENSAIOS DE POLARIZAÇÃO CÍCLICA

Nos ensaios de polarização cíclica conforme pode ser observado na figura 5.4.3, os resultados obtidos para densidades de correntes passivas indicam que a amostra da junta soldada sem reparo, é a que apresentou o menor valor, indicando uma camada passiva melhor formada, mas com muitas oscilações ou ruído. O metal de base apresentou o valor imediatamente superior e mais estável, sem oscilações; a junta com reparo apresentou o maior valor, de densidade de corrente passiva e com maior número de oscilações e ruído, sendo portanto menos estável e mais propensa a sofrer quebra por pites metaestáveis. Com relação ao potencial de quebra da camada passiva (ver tabela 5.4.3), o metal de base apresenta valor levemente, superior e a amostra da junta com reparo apresenta valor menor, que a junta sem reparo, indicando a maior propensão e facilidade à corrosão por pites da junta soldada com reparo. Isso pode estar associado ao menor teor de cromo obtido nessa junta reparada e que é fundamental para a resistência da camada passiva à quebra localizada provocada por íons cloreto. Conforme pode ser observado na figura 5.4.3, no retorno da curva, após a quebra da camada passiva não foi observada a repassivação para as amostras o que demonstrou uma possível ocorrência de corrosão por frestas. Os valores da densidade de corrente de retorno indicam que há propensão à corrosão. A amostra do metal de base apresentou valores de densidade de corrente de retorno menores que as outras das juntas soldadas, mostrando que se houve a formação de fresta foram em menor quantidade ou que essa amostra apresenta menor tendência ao aumento de

pites já previamente formado. As duas juntas soldadas apresentam densidades de correntes de retorno maiores que o metal de base e similares entre si.

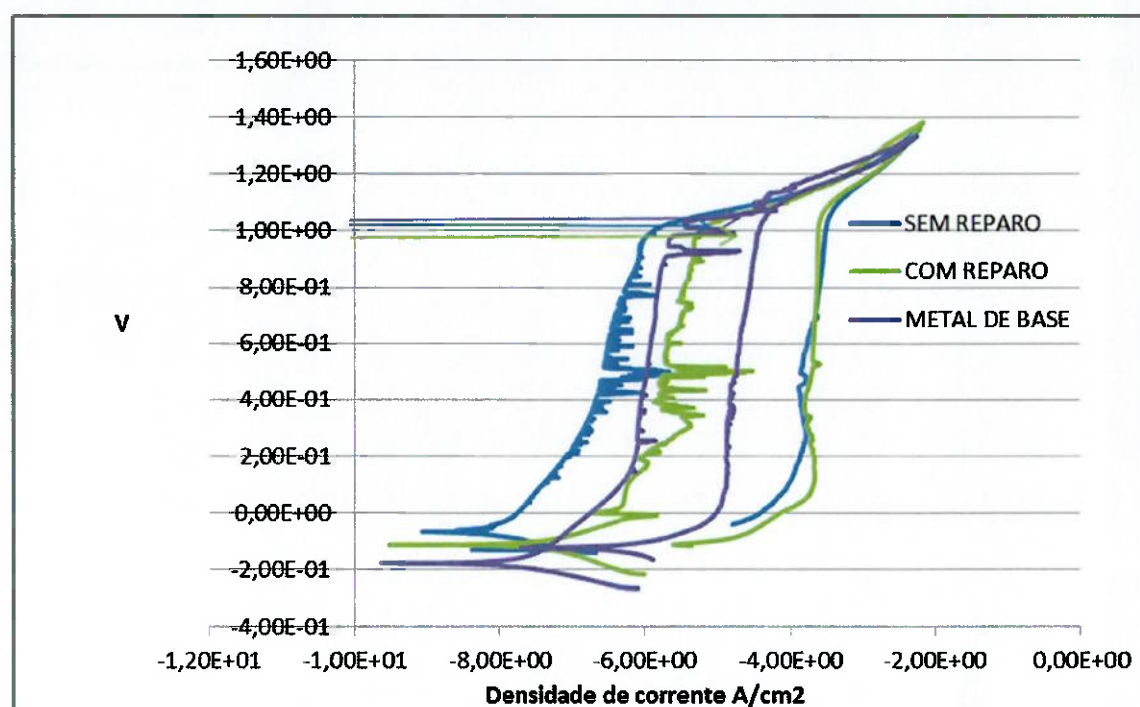


Figura 5.4.3 Curvas resultantes de polarização cíclica.

Tabela 5.4.3 Resultados de potencial de quebra da camada passiva.

AMOSTRA	VALORES DE POTENCIAL DE QUEBRA DA CAMADA PASSIVA (V)	VALORES DE CORRENTE PASSIVA (A/cm ²)
METAL DE BASE	1,01	$1 \times 10^{-5,94}$
SEM REPARO	0,992	$1 \times 10^{-6,53}$
COM REPARO	0,987	$1 \times 10^{-5,68}$

5.4.3.1 CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS ENSAIO DE POLARIZAÇÃO CÍCLICA

Os resultados dos ensaios de corrosão por polarização cíclica, nos mostram que a junta com reparo, obteve um desempenho contra a corrosão por pites inferior a junta sem reparo pois, apresenta valores de densidade de corrente passiva maiores, e menores valores de quebra da camada passiva.

5.5. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MICROSCOPIA.

Realizados ensaios de microscopia após os ensaios de resistência à corrosão nas amostras, verificou-se que todas as amostras apresentaram corrosão por fresta conforme pode ser observado nas figuras 5.5.1, 5.5.3 e 5.5.5.

A amostra de metal de base apresentou uma menor quantidade de pites comparando-se com as juntas soldadas sem reparo e com reparo. Foi identificada a formação de pites em todas as amostras conforme pode ser observado nas figuras 5.5.2, 5.5.4 e 5.5.6.

Para a amostra metal de base os pites eram menores comparados aos das amostras das juntas soldadas.

A amostra da junta com reparo apresentou pites maiores comparados com a amostra da junta sem reparo.

5.5.1 CONCLUSÃO PARA OS RESULTADOS ENSAIO DE MICROSCOPIA

A amostra de junta com reparo apresenta pites maiores em comparação com a amostra sem reparo.

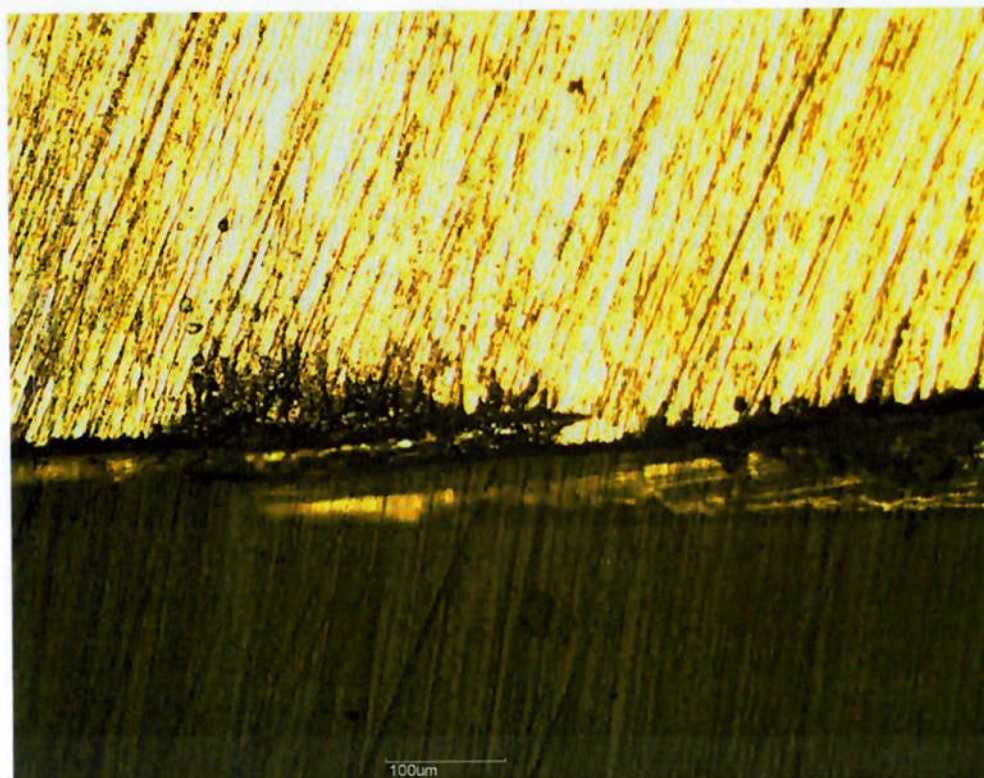


Figura 5.5.1 Fresta entre metal de Base e a resina de embutimento.

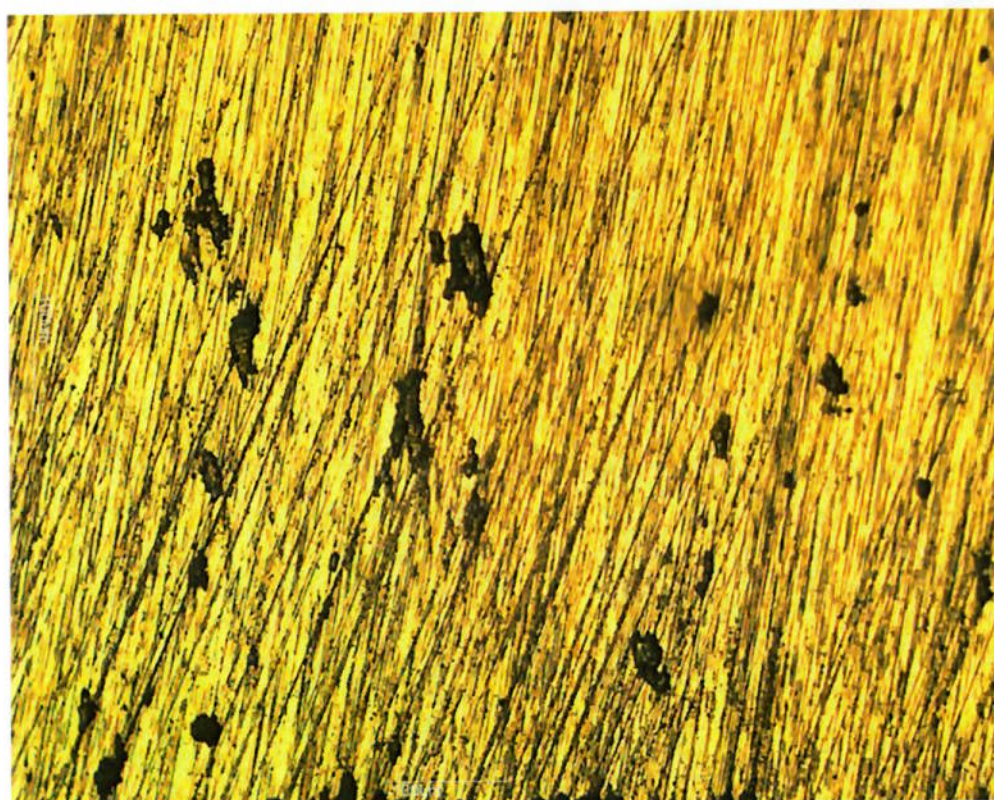


Figura 5.5.2 Pite no metal de base

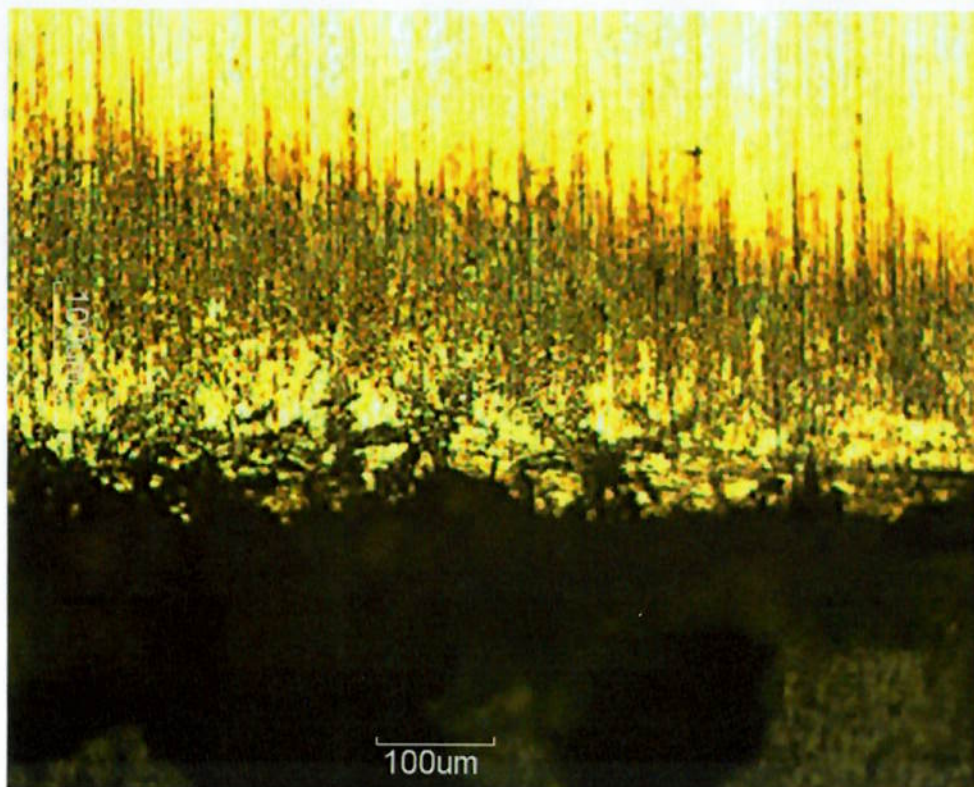


Figura 5.5.3 Fresta na amostra soldada sem reparo e a resina de embutimento.

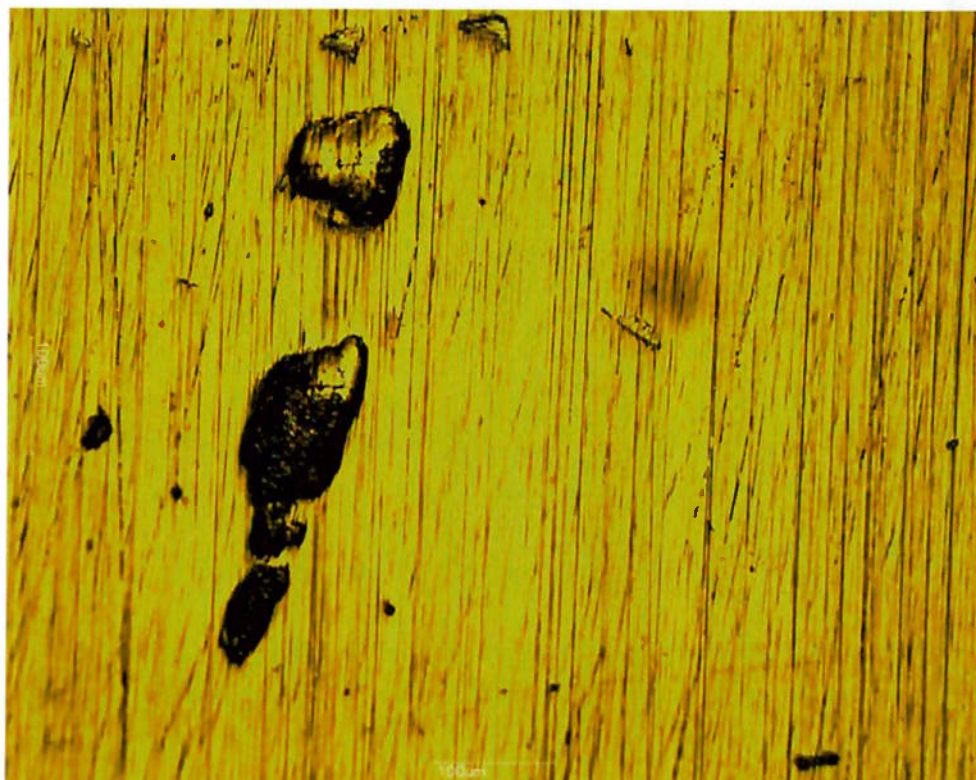


Figura 5.5.4 Pite na amostra soldada sem reparo

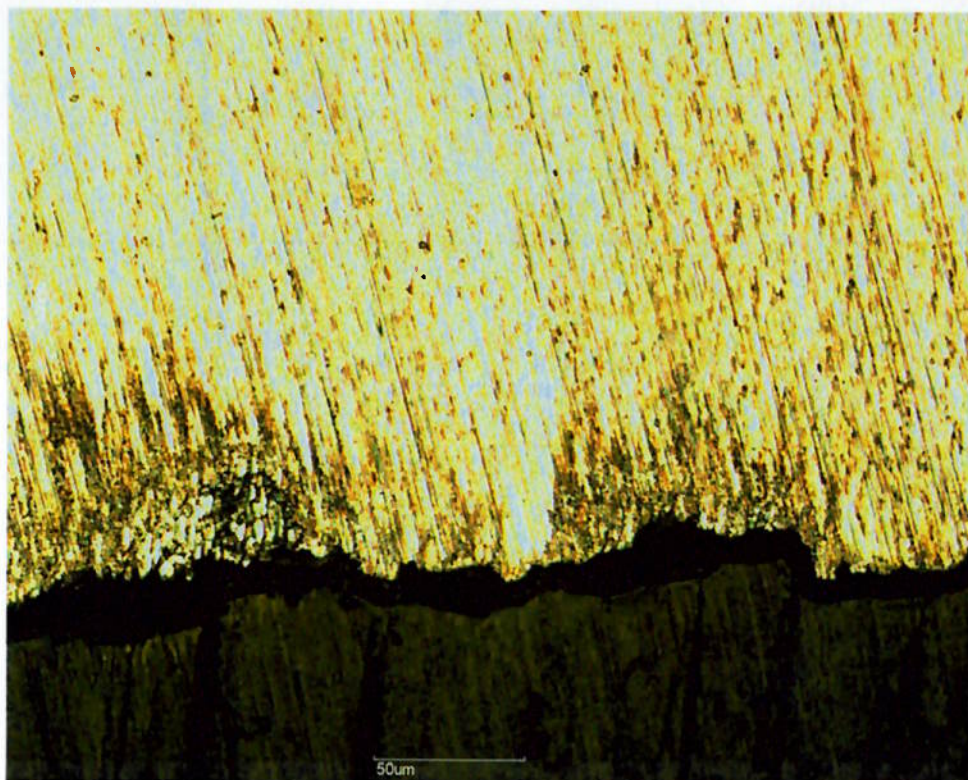


Figura 5.5.5 Fresta entre a amostra soldada com reparo e a resina de embutimento.

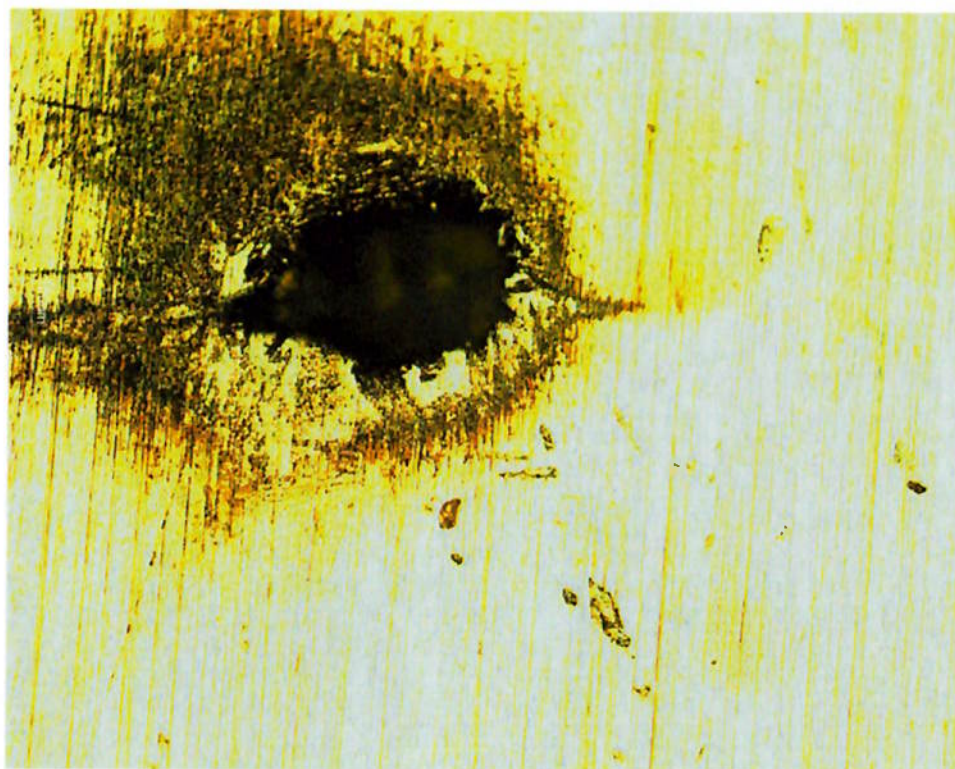


Figura 5.5.6 Pite na amostra soldada com reparo.

6. CONCLUSÕES.

1) A fração volumétrica de ferrita para o metal de solda sem e com reparo ficou muito abaixo em comparação com a do metal de base. A junta com reparo apresentou uma perda ainda maior.

2) As análises química das zonas fundidas das juntas soldadas, apresentam perdas do elemento Cr que é um elemento que contribui com a formação da camada passiva que protege contra a corrosão.

3) A junta com reparo apresentou menor resistência a corrosão por pites em comparação com a junta sem reparo e com o metal de base.

4) O metal de base AID UNS S 31803(SAF 2205) e as juntas soldadas com o metal de adição AWS A5.4 E2209-17, apresentam grande susceptibilidade à corrosão por frestas.

5) A realização de juntas soldadas metal de base AID UNS S 31803(SAF 2205) e metal de adição AWS A5.4 E2209-17 necessita ser realizada com muito cuidado e atenção pelo soldador a fim evitar-se a realização de reparo, pois este gerará área mais propensa a sofrer ataque localizado por pites.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

1) Estudo da zona afetada termicamente em juntas sem e com reparo em aços duplex.

2) Estudo da ocorrência de precipitação de fases intermetálicas na zona fundida em juntas sem e com reparo em aços duplex.

3) Estudo do efeito da energia de soldagem em reparo realizado com eletrodo revestido.

4) Estudo comparativo de corrosão em juntas com descontinuidades em aços duplex.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. D.C. Agarwal, Key Eng. Mater. 20-28(1988): p.1.677.
2. A.J. Sedriks, Corrosion of stainless Steels (New York,NY: John Wiley and Sons,1996).p.1.
3. GUNN,RN. Duplex stainless steels .Microstructure, properties and application .Cambridge- England: Abington Publishing, 2003.204p.
4. LOPEZ, N.; CID, M.; PUIGGALI, , M. Influence of s-Phase on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steels Corrosion Science. Vol.41(1999).165-1631,1999.
5. TAVARES, S.S.M.; DA SILVA, M.R.; NETO, J.M. Magnetic Property Changes During Embrittlement of a Duplex Stainless Steel. Journal of Alloys and Compounds. Vol. 313 (2000). 168-173, 2000.
6. RAMIREZ LONDONO, A.J. Estudo da precipitação de nitreto de cromo e fase sigma por simulação térmica da zona afetada pelo calor na soldagem multipasse de aços inoxidáveis duplex. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.
7. PARDAL, J.M.; TAVARES, S.S.M.; FARIA, R.A. Aços inoxidáveis Duplex (austeno-ferríticos) microestrutura propriedades. Metalurgia & Materiais. 2008; 64: 624-626.

8. NOBLE, D.L. selection of wrought duplex stainless steels .In: Welding Brazing and Soldering. ASM Handbook,10^a ed., ASM International, USA, 7-18, 1993.
9. SOLOMON, H.D.;DEVINE, T.M. Atale of two phases. In \conference Duplex Stainless Steels 82, St,Louis-USA, 1982. Proceedings. Ohio, American Society of Metals,1983, p.693-756.
10. WOOLLIN, P. Developments in fusion weding of stainless steels. Welding and Metal Fabrication. January, p. 18-26 ,1994.
11. CHARLES, J. structure and mechanical properties of duplex stainless steels. In Conference Duplex Stainless Steels' 94, Glagow-Scotland,1994. Proceedings.England, TWI, 1994 paper K1.
12. L.MAINES,A.MOLINARI,F.COLOMBARI,P.BURLANDO, The effect of solution annealing temperature on toughness and microstructure of a329A duplex SS Duplex'07, Grado, Italy
13. NISSON J. O Super duplex stainless steels Materials and Technology ago 1992 v8 p 685-700.
14. MAGNABOSCO, R. Formação de fase sigma em aços inoxidáveis duplex UNS S31803 durante envelhecimento térmico 700°C e 900°C In : 60º Congresso Internacional Anual da ABM, 2005, Belo Horizonte .60º Congresso anual da ABM- anais . São Paulo : ABM, 2005.
15. Fontana, M.G. ;Greene, N.D. – "Corrosion Engineering", McGraw Hill, USA, 2^a.edição, pg 39-58, 1967.

16. SENDIKS. A. J. Effects of alloy composition and microstructure on the passivity of stainless steels. *Corrosion* n.7 v.42 jul.1986 p 376-89.
17. AFONSO-FALLEIROS, N HAKIM, A WOLINEC, S Comparison between potentiodynamic and potentiostatic test for pitting potential measurement of duplex stainless steels. *Corrosion* v. 55 n.5 mai. 1999 pp. 443-48.
18. NEWMAN R.C Understanding the corrosion of stainless Steels. *Corrosion*, v.57, n. 12 dez. 2001 p.1030-1041.
19. POTGIETER, J. H. Influence of σ phase on general and pitting corrosion resistance of SAF 2205 duplex stainless steels. *British corrosion journal* v. 27 n.3 1992 p. 219-23.
20. SRIRAM , R. TROMANS . D. Pitting corrosion of duplex stainless steels *Corrosion* v45 n. 10 out 1989 p 804-10.
21. STILL, J.R. the used of duplex stainless steel in the offshore oil and gas industry - part 2. Welding and metal fabrication. Aug-Sep., p.331-339,1994.
22. BRANDI, S. Estudo da soldabilidade do aço inoxidável Duplex DIN Nr 1.4462 (UNS S31803). São Paulo, 1992, 265p. tese (Doutorado)- Departamento de Eng. Metalúrgica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
23. VARO, I.; LIPPOLD, J.C. BAESLACK III, W.A. Welding of duplex stainless steel. *Key Engineering Materials* v.69-70, p. 217-252, 1992.
24. NOBLE, D. L. Selection of wrought duplex stainless steels. In: *Welding, Brazing and Soldering. ASM Handbook*, 10ª Ed., v. 6, ASM International, USA, p.471-481, 1983.
25. OLSSON, K. Weld surfacing with duplex stainless steel strip electrodes. In: *Conference Duplex Stainless Steels`86*, The Hauge-The Netherlands, 1986.

- Proceedings. The Netherlands, Netherlands Institute Voor Lastechniek, 1986,p. 331-339.
26. BEMST, A.V.; MAAT, P.V.; NISSET, M. Submerged arc and electroslag strip cladding whit duplex stainless steel. In Conference Duplex stainless steel,86, The Hauge-The Netherlands, 1986. Proceedings. The Netherlands, Netherlands Institute Voor Lastechniek, 1986,p. 340-345.
27. VILPAS, M.; RUUSILA, R. Welding of duplex stainless steels. Stainless Today. March,p. 14-18, 1994.
28. MIURA, M.et al.Effect of chemical composition on microstructure, mechanical and corrosion properties of duplex stainless steel weldment. In: Conference Duplex Stainless Steels' 86, The Hauge-The Netherlands, 1986. Proceedings. The Netherlands, Netherlands Institut Voor Lastechniek, 1986, p 319-325.
29. KOTECKI, D.J. Ferrite control in duplex stainless steel weld metal. Welding Journal. V65, n. 10, p. 273s-278s, 1986.
30. KARLSSON, L.; PAK, S. Welding of duplex stainless steel-properties of SMA, FCAW and SAW welded joints. In: Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune Bourcogne-France,1991. Proceedings. France, 1991, p.413-420.
31. CIESLAK, M.J.; RITTER, A.M.; SAVAGE, W.F. Chi-phase formation during solidification and cooling of CF-8M weld metal. Welding Journal. V 63, n4, p.133s-140s, 1984.
32. RADEMAKERS, P.L.F.; VUIK, J. Factors influencing microstructure and properties of weldments in duplex stainless steels In: Conference

- Joining/Welding 2000. The Hague-the Netherlands, 1991. Proceedings. London, IIW, 1991,p. 253-270.
33. ATAMERT, S.; STEKLY, J.J.K.; PEASE, C. Development of flux-cored super duplex stainless steel consumables. In: Conference Duplex Stainless Steels'94, Glasgow-Scotland, 1994. Proceedings. England, TWI, 1994, paper 81.
34. GOOCH, T.G. Corrosion resistance of welds in duplex stainless steels. In: Conference Duplex Stainless steels'91, Beaune Bourcogne-France, 1991. Proceedings. France, 1991, p. 325-346.
35. AWS- Welding Handbook, Section 2, Welding Processes, 5th, ed.
36. CRANFIELD INSTITUTE OF TECHNOLOGY Manual Metal Arc Welding. Mat. N°. 153, MSC Course.
37. TECCO, D.G.- Soldagem Processos e Metalurgia; p. 31-32- 4^a reimpressão 2004.
38. CAO, H.L.;HERTZMAN, S. The relationship between impact properties and welding simulated microstructures. In three duplex stainless steel. In: Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune Bourcogne-France,1991. Proceedings. France, 1991, p. 363-372.
39. WEGRZZYN. J.;KLIMPEL,A. The effect of alloying elements on the sigma phase formation in 18-8 weld. Welding Journal. V60, n.8 p, 146s-154s.1981.
40. GOOCH, T.G. Weldability of duplex ferritic-asthenitic stainless steels. In: Conference stainless steels'82, St.Louis-USA,1982. Proceedings. Ohio, American Society of Metals. 1983, p.573-602.

41. ROBERTI, R.et al. Effetto di cicli termici in zone termicamente alterate sulla tenacità alla frattura di acciai inossidabili bifasici. L' acciaio Inossidabile. N; 3,p.4-9,1991.
42. ATAMERT, S.;KING, J.E. Intragranular nucleation of austenite. Z. Metallkde. V. 82,n. 3,p 230-239, 1991.
43. UME, K.et al. Influence of thermal history on the corrosion resistance of duplex stainless steel linepipe. Materials Performance. V.26, n.8p.25-31, 1987.
44. ATARMERT, S.; KING,J.E. Super duplex stainless steels- part 1 heat affected zone microstructure. Materials Science and Technology. V. 8, n.10, p.896-911, 1992.
45. LINDBLOM, B.E.S.; LUNDQVIST, V.;HANNERZ, N.E. Grain growth in HAZ of duplex In: Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune Bourgogne-France,1991. Proceedings. France, 1991, p. 373-381.
46. ATARMERT, S.; KING,J.E. Modeling of multipass duplex stainless steel weld deposit microstructure. In Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune Bourgogne-France,1991. Proceedings. France, 1991, p. 393-402.
47. VAROL,; I ; LIPPOLD, J.C BAESLACK III, W.A. Welding of duplex stainless steels. **Key Engineering Materials** v.69-70, p. 331-339.