



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ANA CAROLINE FERREIRA FORTE**

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO POR  
PITE DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX SAF 2507**

**FORTALEZA  
2011**

ANA CAROLINE FERREIRA FORTE

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO POR  
PITE DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX SAF 2507

Trabalho Final de Curso submetido à coordenação do curso de Engenharia Química, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau em bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araujo.

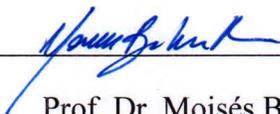
ANA CAROLINE FERREIRA FORTE

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO POR  
PITE DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX SAF 2507

Trabalho Final de Curso submetido à coordenação do curso de Engenharia Química, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau em bacharel em Engenharia Química.

Aprovada em 15 / 12 / 11

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Moisés Bastos Neto.



Prof. Dr. Walney Silva Araujo.



Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura.

A Deus ,  
Aos meus familiares,  
Aos meus amigos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por está sempre iluminando o meu caminho, não me deixando desanimar, me dando força e muita fé para superar todos os obstáculos da minha vida.

Ao meu orientador professor Walney Silva que com muita boa vontade me acolheu ainda neste ano em seu laboratório e me proporcionou o aprendizado em novas áreas, abrindo-me novos horizontes profissionais.

Ao meu co-orientador professor Cleiton Carvalho que junto ao meu orientador confiaram este trabalho a minha pessoa, e me passou um pouco do seu grande conhecimento.

A todos do Laboratório de Pesquisa em Corrosão, Úrsula, Brasil, Arquimedes, Amanda, Wilman, Hiulane, Lucas, Daniel e Jorge pelo companheirismo e apoio durante a pesquisa.

Ao colega de pesquisa Gilberto pela ajuda no início da pesquisa, e bela boa vontade de disponibilizar seu tempo para me ensinar.

Aos colegas do LACAM e da Metalografia, em especial aos amigos Nathanael, Flávio, Fernando, Yuri e Mirela pela ajuda nos momentos de desespero e pela amizade.

A todos do Laboratório de Engenharia em Soldagem, ENGESOLDA, com um imenso agradecimento aos colegas Igor, Rafaela, Felipe, Adroaldo, Thiago, Thatiane e Marcela pelo conhecimento compartilhado, pela disponibilidade, pela boa vontade de ajudar e por me deixarem tão à vontade junto a vocês.

Aos meus professores da Universidade Federal do Ceará: Auri, Fabiano, Hosiberto, Diana, Rodrigo, Mônica, Moisés, Samuel, Murilo, Luciana, Eurico, Rilvia. Responsáveis pelos ensinamentos obtidos durante a minha vida acadêmica.

A professora Andréia Ferreira por me integrar em seu grupo de pesquisa e despertar em mim o amor pela pesquisa.

Aos meus amigos de faculdade, João Felipe, Regiane, Julianne, Carol Bill e Diego que me acompanharam todos esses anos, sempre me incentivando e me ajudando a percorrer os caminhos tortuosos.

Aos meus amigos do grupo de estudo, Rafael, Jonathan, Patrícia, Priscila e Vinicius que compartilhando nossos conhecimentos, possibilitou a minha chegada ao final desta jornada.

As minhas amigas do coração e da vida, Ariane, Claudia, Edvannia, Emanuelle e Larissa que sempre estiveram ao meu lado, e tiveram bastante paciência comigo neste ultimo ano, compreendendo a minha falta de tempo e muitas vezes de paciência.

Ao meu namorado Ulisses que esteve comigo durante toda essa etapa da minha vida, com ou sem paciência, mas sempre me apoiando e acalentando nos momentos mais difíceis.

A minha mãe Sheyla, ao meu pai Itupaní e as minhas irmãs Juliany e Yohanna por nunca terem me deixado sozinha, por sempre demonstrarem o orgulho e o respeito que têm por mim e que acima de tudo por sempre me darem amor.

Aos meus familiares pelo suporte e apoio ao longo de todos os anos do curso.

“Bom mesmo é ir a luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve... E a vida é muito para ser insignificante.”(Charles Chaplin)

## RESUMO

Atualmente, vários estudos estão sendo realizados para se obter um material que resista às condições de alta agressividade apresentadas na região do pré-sal. Um aço inoxidável de grande interesse na indústria petroquímica é o superduplex, que possui alta resistência à corrosão e ótimas propriedades mecânicas, além de possuir excelente relação custo x propriedades. Um processo térmico que pode modificar a microestrutura desse material, influenciando nas suas propriedades e que se destaca devido a sua elevada utilização industrial é a soldagem. Logo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da energia de soldagem na resistência à corrosão do aço inoxidável superduplex SAF 2507. Foram utilizadas quatro amostras de aço inoxidável superduplex soldadas através do processo MIG/MAG com energias de soldagem variando de 0,6 a 3,0 kJ/mm, como eletrodo de trabalho. Uma amostra que não sofreu nenhum processo de soldagem foi utilizada como referência. A avaliação do processo corrosivo foi realizada segundo as seguintes técnicas: monitoramento do potencial de circuito aberto, polarização potenciodinâmica e impedância eletroquímica. O eletrodo de referência utilizado foi o Ag/AgCl e o contra-eletrodo uma placa de platina. Uma solução de NaCl 3,5% foi utilizada como eletrólito de trabalho.

Palavras-Chave: Corrosão, Aço Superduplex e Energia de Soldagem.

## ABSTRACT

Nowadays, several studies have been carried out in order to obtain materials that can resist the severe conditions of the pre-salt environment. A type of stainless steel quite interesting to petrochemical industry due to its properties is the superduplex steel. This material is corrosion resistant and presents attractive mechanicals properties besides its excelent price/properties ratio. Welding is a thermal process which permits to modify the microstructure of the steel. In addition, this process has influence on the steel properties and it is largely used in industry. Therefore, the aim of this paper is to evaluate the effect of welding energy on the corrosion resistance of stainless steel SAF 2507. Four SUPERDUPLEX steel samples were *welded* applying the MIG/MAG process employing a welding energy range from 0,6 to 3,0 kJ/mm. A sample that had not been welded was used as reference. The evaluation of corrosion was made by using different techniques: i) monitoring of open circuit voltage, ii) potential dynamics polarization, and iii) electrochemical impedance. The reference electrode was Ag/AgCl and a platinum counter electrode. NaCl 3,5 % was used as electrolytic solution.

Keywords: corrosion, superduplex steel, welding energy.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Desenho Esquemático da Camada do Pré-sal.....	13
FIGURA 2	Corrosão Localizada [2].....	15
FIGURA 3	Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex.....	18
FIGURA 4	Formação da camada de óxido de cromo em um aço inox.....	21
FIGURA 5	Esquema de um processo de soldagem por fusão.....	22
FIGURA 6	Amostras utilizadas nos experimentos.....	23
FIGURA 7	ZF e ZAC de um tubo de aço inoxidável superduplex SAF 250.....	24
FIGURA 8	Microestrutura da ZF e ZAC de um tubo de aço inoxidável superduplex SAF 2507.....	24
FIGURA 9	Amostras de tubos.....	26
FIGURA 10	Máquinas de corte.....	27
FIGURA 11	Eletrodos de trabalho.....	27
FIGURA 12	Politriz da marca Arotec utilizada para lixamentos.....	28
FIGURA 13	Ferritoscópio Ficher MP-23.....	29
FIGURA 14	Equipamento utilizado nos ensaios eletroquímicos.....	30
FIGURA 15	Célula Eletroquímica.....	30
FIGURA 16	Curva típica de material susceptível a corrosão.....	32
FIGURA 17	Representação Esquemática do Diagrama de Nyquist.....	33
FIGURA 18	Gráfico Obtido após os Ensaios de Monitoramento.....	35
FIGURA 19	Curvas Obtidas Através dos Ensaios de Polarização. ....	36
FIGURA 20	Gráfico comparativo das correntes de corrosão.....	37
FIGURA 21	Gráfico comparativo das correntes de passivação.....	38
FIGURA 22	Gráfico comparativo das correntes de quebra.....	38
FIGURA 23	Curvas Obtidas Através dos Ensaios de Impedância.....	39
FIGURA 24	Micrografia da Amostra Soldada com Energia de Soldagem 0,6 kJ/mm.....	40
FIGURA 25	Micrografia da Amostra Soldada com Energia de Soldagem 1 kJ/mm.....	41
FIGURA 26	Micrografia da Amostra Soldada com Energia de Soldagem 2 kJ/mm.....	42
FIGURA 27	Micrografia da Amostra Soldada com Energia de Soldagem 3 kJ/mm.....	43

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Indústrias do Petróleo e Petroquímicas.....</b>	<b>12</b>
2.1.1 Indústria Petroquímica.....	12
2.1.2 Indústria do Petróleo.....	12
<b>2.2 Corrosão.....</b>	<b>14</b>
2.2.1 Importância Econômica.....	14
2.2.2 Formas de Corrosão.....	15
<b>2.3 Aços Inoxidáveis Duplex.....</b>	<b>16</b>
2.3.1 Aços Inoxidáveis Superduplex.....	16
2.3.2 Propriedades dos Aços Inoxidáveis Duplex.....	17
Propriedades Físicas.....	17
Resistência Mecânica.....	17
Microestrutura.....	18
Resistência à Corrosão.....	19
Corrosão por Pite.....	20
Passivação dos Aços Inoxidáveis Duplex.....	20
<b>2.4 Soldagem.....</b>	<b>21</b>
2.4.1 Metal de Adição.....	21
2.4.2 Energia de Soldagem.....	22
2.4.3 Zona Fundida e Zona Afetada pelo Calor.....	23
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Materiais.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 Preparação das Amostras.....</b>	<b>26</b>
3.2.1 Extração das Amostras.....	26
3.2.2 Montagem e Identificação das Amostras.....	27
3.2.3 Preparação da Superfície de Análise das Amostras.....	28
<b>3.3 Quantificação da Fração de Ferrita.....</b>	<b>28</b>
<b>3.4 Análises Eletroquímicas.....</b>	<b>29</b>
3.4.1 Monitoramento do Potencial de Circuito Aberto.....	31
3.4.2 Polarização Potenciodinâmica.....	31
3.4.3 Impedância Eletroquímica .....	32
<b>3.5 Análise Microestrutural.....</b>	<b>33</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 Quantificação das Amostras.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2 Monitoramento do Potencial de Circuito Aberto.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3 Polarização Potenciodinâmica.....</b>	<b>35</b>
<b>4.4 Impedância Eletroquímica.....</b>	<b>39</b>
<b>4.5 Caracterização Microestrutural.....</b>	<b>39</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis superduplex possuem como principal característica ser uma liga bifásica composta por ferrita e austenita (formas alotrópicas do ferro). Estas ligas são baseadas no sistema Fe-Cr-Ni e possuem excelente resistência à corrosão e ótimas propriedades mecânicas. Tais características lhes colocam como um dos principais materiais de interesse para pesquisadores, fabricantes, produtores de aço e consumidores finais.

Com a descoberta do pré-sal no Brasil, o estudo desses aços vem crescendo devido ao ambiente de grande agressividade desta região. Grandes variações de temperatura e pressão, alta concentração de dióxido de carbono e ácido sulfídrico são fatores que influenciam na escolha do material a ser utilizado nessas regiões.

A corrosão é um problema que atinge todos os materiais metálicos, e por isso a análise do seu processo é de extrema importância para se evitar gastos desnecessários, acidentes e maiores transtornos. A soldagem também se apresenta no mercado como o processo mais utilizado para conectar equipamentos e tubulações, infelizmente esse processo modifica a microestrutura dos materiais, podendo modificar também as suas propriedades.

Por este motivo este trabalho foi elaborado para estudar a influência da energia de soldagem de um aço inoxidável que entrou no mercado industrial de maneira forte e precisa e que possui um valor custo x benefício acessível se comparado com ligas que possuem propriedades parecidas as suas.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Indústria do Petróleo e Petroquímicas**

O Brasil vive um momento de forte expansão no setor industrial. Dentre todos os setores industriais, dois merecem grandes destaques: a indústria do petróleo e a indústria petroquímica. A descoberta de novos campos de petróleo ao longo da costa brasileira e das reservas de pré-sal aumentou ainda mais os investimentos e as oportunidades de crescimento econômico para o Brasil.

#### **2.1.1 Indústria Petroquímica**

A indústria petroquímica é uma subdivisão da indústria química, ela é caracterizada por utilizar derivados de petróleo como matérias-primas básicas em seus processos. Ela surgiu na década de 1920, nos Estados Unidos, como resultados de pesquisas que visavam à transformação de produtos naturais. No Brasil, teve origem no governo militar, mais precisamente na década de 1970, quando foram construídos no país o Pólo Petroquímico de São Paulo em 1972, o Pólo de Camaçari na Bahia em 1978 e posteriormente, o Pólo de Triunfo no Rio Grande do Sul em 1982.

Estas indústrias trabalham com diferentes variáveis de temperatura e pressão, além de produtos de diferentes composições químicas favorecendo, assim, a corrosão dos equipamentos e tubulações industriais. Os materiais para equipamentos de processo devem atender com segurança às condições de serviço de uma determinada aplicação, verificando sempre as propriedades dos materiais e o custo-benefício do processo. [1]

#### **2.1.2 Indústria do Petróleo**

A indústria do petróleo abrange desde a prospecção do poço até a distribuição dos derivados de petróleo aos consumidores, ou seja, do *upstream* ao *downstream*.

Muitas pesquisas são desenvolvidas com o intuito de se descobrir materiais que resista a ambientes quimicamente hostis, com variações bruscas de temperatura e pressão no caso da extração de petróleo e gás, e mecanicamente resistentes no caso das perfurações dos poços. Com a descoberta de petróleo de alta qualidade na camada do pré-sal, um dos maiores desafios tecnológicos já enfrentados pelo Brasil é a extração de petróleo dessa camada.

O nome pré-sal é devido ao fato do conjunto de rochas com potencial de acúmulo de petróleo estar localizada abaixo de uma extensa camada de sal, que pode atingir espessuras de até 2000 metros. Os materiais que serão utilizados para fabricação dos equipamentos e tubulações do processo de perfuração e extração do petróleo devem possuir uma alta resistência à corrosão devido à grande presença de gases corrosivos, como o dióxido de carbono e o ácido sulfídrico, e alta concentração de salmoura. Esses materiais devem possuir ótimas propriedades mecânicas como resistência à fadiga e ductilidade.

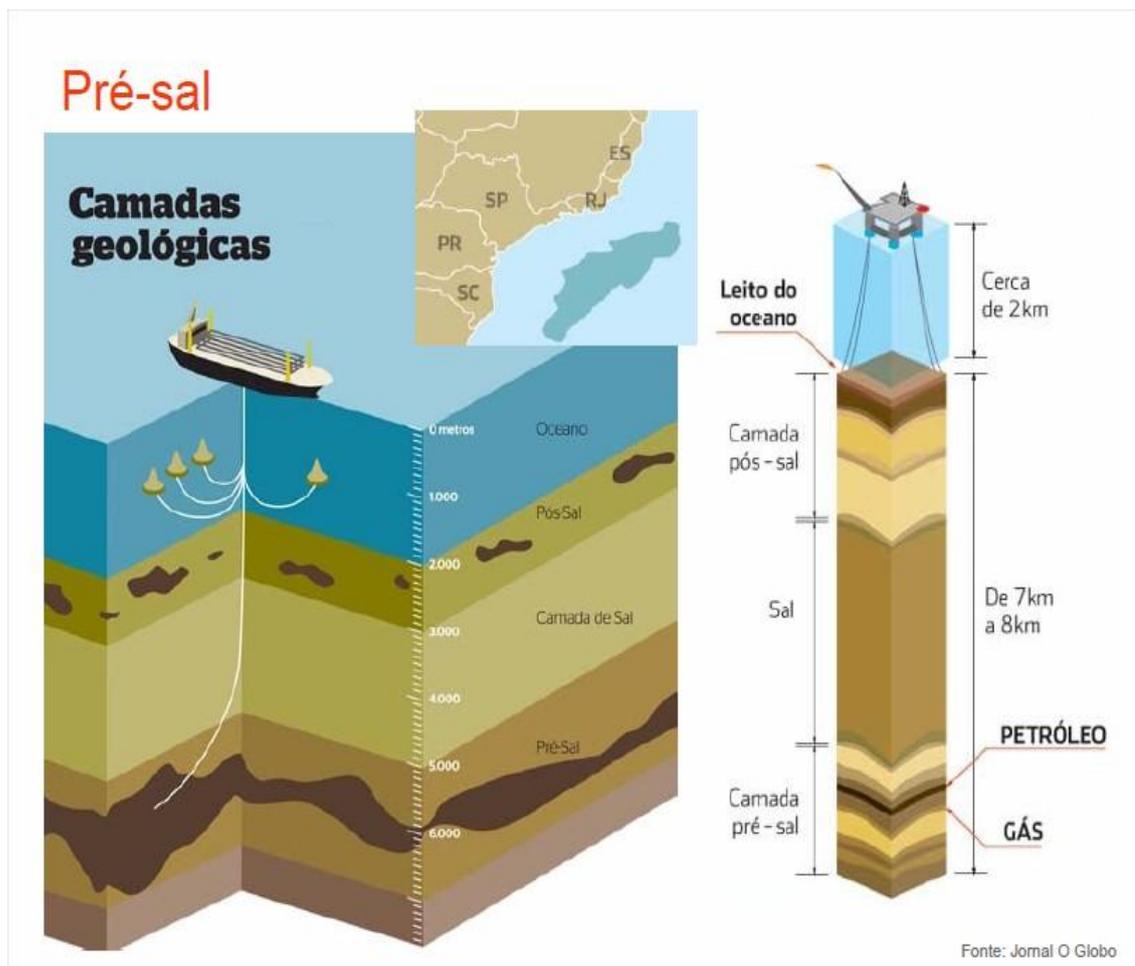


Figura 1- Desenho esquemático da camada do pré-sal.

## 2.2 Corrosão

Corrosão pode ser definida como a transformação de um material, metálico ou não, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pelas interações físico-químicas entre o material e o seu meio operacional resulta em alterações indesejáveis do material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso. [2]

Três fatores são bastante importantes para designar um processo corrosivo: o material sujeito à corrosão, o meio corrosivo e as variáveis operacionais do sistema. Esses fatores estabelecem o grau de agressividade da corrosão e podem ser modificados para estudos.

### 2.2.1 Importância Econômica

Como a corrosão é um processo espontâneo, sem a utilização de métodos de inibição e proteção, os materiais seriam rapidamente deteriorados. Mesmo com a utilização desses métodos, as perdas econômicas causadas pela corrosão correspondem, atualmente, a aproximadamente 3% a 4% do PIB de um país, seja este desenvolvido ou não.

Existem, basicamente, dois tipos de custos devido à corrosão: as perdas diretas, que englobam os custos de manutenção e inspeção do processo, os gastos com substituição de peças e equipamentos e os gastos com processos de proteção, e as perdas indiretas, que englobam perdas devido à contaminação de produtos, super dimensionamento de projetos, paralisações da planta seja para limpeza ou substituições de peças corroídas, entre outros, ou seja, qualquer perda que esteja associada a um processo de corrosão. [2]

Logo, vários estudos são promovidos com a intenção de se chegar a materiais com elevada resistência à corrosão e que possam, assim, minimizar esses imensos gastos promovidos devido aos processos corrosivos. Todo este investimento em novas tecnologias não serve apenas para minimizar os gastos com esse setor, serve também para evitar acidentes de trabalho e ambientais. Tais acidentes acontecem devido ao fato de não se perceber a tempo determinados tipos de corrosão, como é o caso da corrosão por pite, muito freqüente em

equipamentos industriais como trocadores de calor, caldeira, bombas, reatores, torres de destilação, entre outros.

### 2.2.2 Formas de Corrosão

A corrosão pode se apresentar sobre diferentes formas, dependendo da forma de ataque, do mecanismo de corrosão e de suas causas. Saber o tipo de corrosão é muito importante para o estudo dos processos corrosivos. Existem vários tipos de corrosão, por exemplo, uniforme, intergranular, intragranular, por esfoliação, gráfitica, entre outras. [2]

Uma das formas de corrosão mais estudada é a corrosão localizada, que ocorre em regiões localizadas do material. Sua visualização é difícil, sendo necessária a utilização de técnicas de monitoramento e inspeção mais avançadas. De acordo com a geometria da corrosão pode ser classificada como: corrosão por fresta, onde uma cavidade ou espaço retém uma pequena quantidade de líquido, corrosão alveolar, onde a profundidade do desgaste é menor que o diâmetro e corrosão por pite, onde a profundidade do desgaste é muito maior que o diâmetro. Esta última é de imensa preocupação no meio industrial, já que seu acompanhamento é mais difícil e com um valor de inspeção elevado. [2]

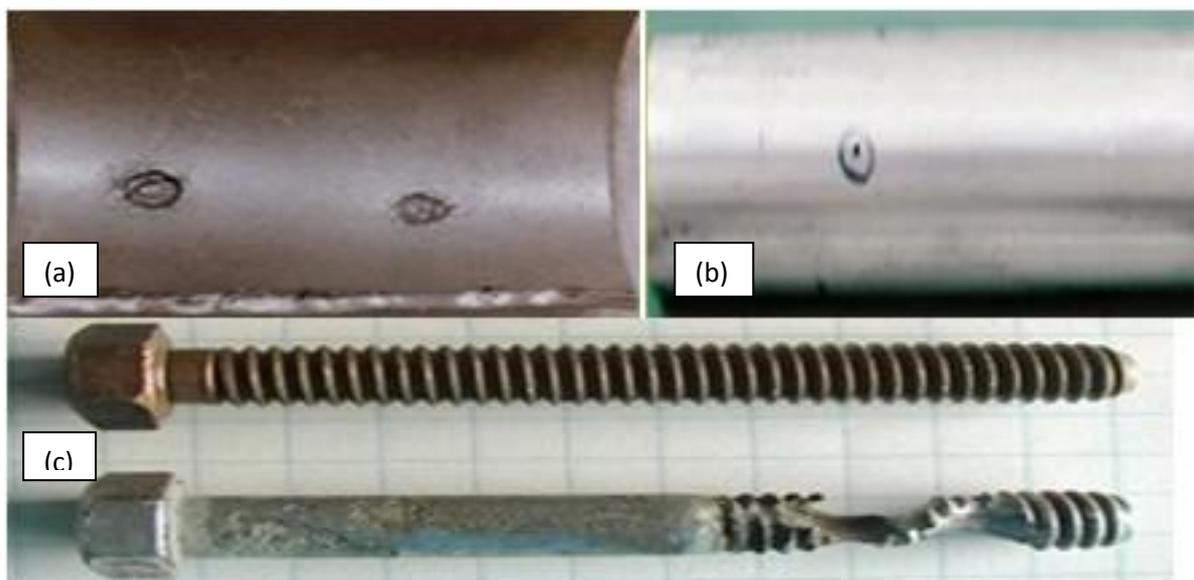


Figura 2- Corrosão localizada: (a) Alveolar, (b) Pite e (c) Frestas. [2]

## 2.3 Aços Inoxidáveis Duplex

Denomina-se aço inoxidável ligas de Fe-Cr com uma percentagem mínima de 12% de cromo. Os aços inoxidáveis denominados duplex são ligas bifásicas compostas por ferrita e austenita, que são formas alotrópicas do ferro, em proporções aproximadamente iguais. [3]

Os aços inoxidáveis duplex são, normalmente, subdivididos em três grupos de acordo com a composição química do aço. São eles:

- Aços inoxidáveis duplex de baixa liga: Sua composição química é composta por C, Si, Mn, Cr, Ni e N. São materiais mais econômicos que os outros, e com resistências menores.
- Aços inoxidáveis duplex de média liga: Sua composição química é composta por C, Si, Mn, Cr, Ni, Mo e N em proporções maiores que dos duplex de baixa liga. São os mais utilizados no mercado, apresentam resistência à corrosão intermediária em comparação com outros tipos de aços inoxidáveis.
- Aços inoxidáveis duplex de alta liga: Mais conhecidos como Superduplex, sua composição química é composta por C, Si, Mn, Cr, Ni, Mo e N em proporções de Cr, Ni, Mo e N bem maiores que as dos outros aços inoxidáveis. Apresenta elevada resistência à corrosão. [4]

### 2.3.1 Aços Inoxidáveis Superduplex

Os aços inoxidáveis superduplex (AISD) surgiram a partir da necessidade de se obter uma variação dos aços inoxidáveis duplex (AID) que possuísse uma maior resistência à corrosão. Uma diferença fundamental entre os aços inoxidáveis duplex e o superduplex é o chamado índice de resistência à corrosão por pite (PRE), que no caso dos superduplex está acima de 40. Na Tabela 1 encontram-se alguns exemplos de ligas de AID e AISD com a composição química e o PRE de cada um.

Tabela 1- Composição química de alguns aços inoxidáveis duplex. [5]

Designação			Composição química típica em peso(%)						PRE
UNS	DIN	Comercial	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W	
S32304	1.4362	SAF 2304, UR 35N	23	4	0,1	0,1	-	-	24
S31803	1.4462	SAF 2205, UR 45N	22	5	2,8	0,15	-	-	32/33
S32205	1.4462	SAF 2205, UR 45N+	22,8	6	3,3	0,18	-	-	35/36
S32550	1.4507	UR 52N, Ferralium 255	25	6,5	3	0,22	1,5	-	38/39
S31200	-	UR 47N	25	6,5	3	0,22	-	-	38/39
S31260	-	DP3	27	7	3	0,16	0,5	0,3	37
S32520	1.4507	UR 52N+	25	7	3,5	0,25	1,5	-	41
S32750	1.4410	SAF2507, UR 47N+	25	7	3,8	0,28	-	-	41
S32974	-	DP3W	25	7	3	0,27	-	2	39
S32760	1.4501	Zeron 100, UR 76N	25	7	3,5	0,24	0,7	0,7	40
-	-	DTS 25.7 NW	27	7,5	3,8	0,27	0,7	0,7	44
-	-	DTS 25.7 NW Cu	25	7,5	4	0,27	1,7	1	42,5

### 2.3.2 Propriedades dos Aços Inoxidáveis Duplex

#### - Propriedades Físicas

Os AIDs são ferromagnéticos, possuem boa condutividade térmica, mas baixo coeficiente de expansão térmico devido à fase ferrítica do metal. Este fato lhes aproximam dos aços carbonicos, podendo ser aplicados em situações como, vasos de pressão, onde devem ser utilizados juntamente com os aços carbonicos. [6]

#### - Resistência Mecânica

Os principais parâmetros estudados para a verificação da resistência mecânica dos aços inoxidáveis são: ductilidade, dureza, tenacidade, resistência à fadiga, resistência à tração e resistência à fluência. Essas propriedades variam com a temperatura do meio e são bastante importantes para a escolha do material a ser utilizado para a fabricação de equipamentos de processo, estruturas e tubulações. [1]

Nos AIDs uma proporção aproximada entre as fases ferrita e austenita proporciona uma maximização das propriedades mecânicas desse aço. Isso se deve ao fato da fase austenita ser responsável pelos elevados valores de alongamento, e a fase ferrita ser responsável pelo elevado limite de escoamento.

#### - Microestrutura

Os AIDs são caracterizados por possuírem uma microestrutura bem balanceada, composta por ferrita e austenita, que são fases alotrópicas do ferro. Esta microestrutura pode ser obtida através dos tratamentos termomecânicos e do balanceamento dos elementos de liga. A figura 3 apresenta uma micrografia obtida por um microscópio óptico mostrando as duas fases que formam a microestrutura dos aços inoxidáveis duplex, a matriz ferrítica ( $\alpha$ ) e ilhas de austenita ( $\gamma$ ). [4]

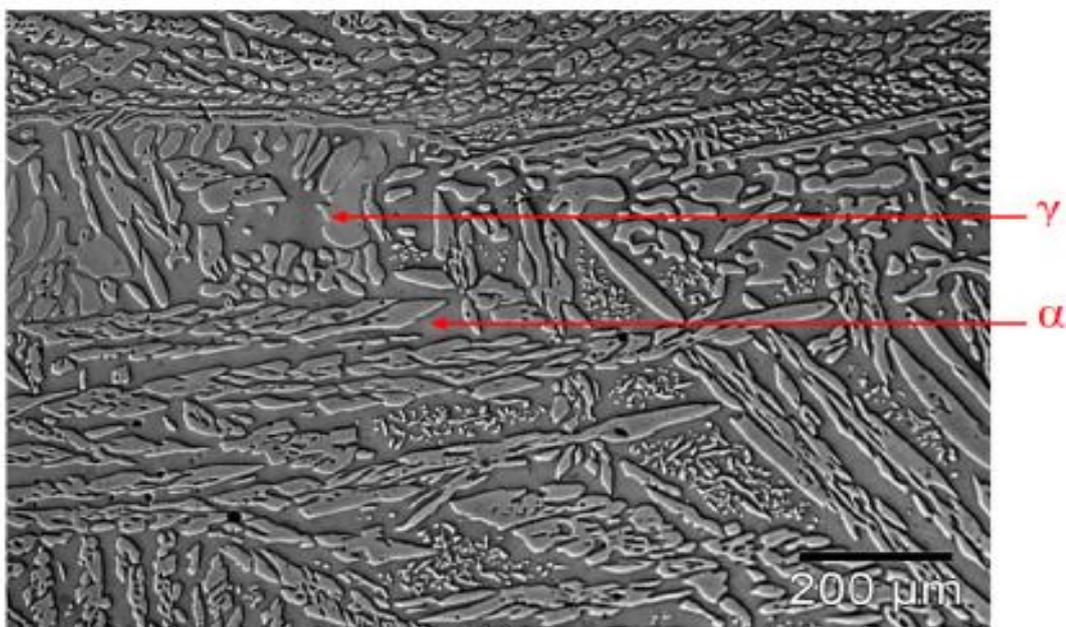


Figura 3- Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex. [7]

A variação de temperatura pode acarretar na formação e precipitação de fases secundárias indesejadas, tais fases alteram as propriedades dos AIDs e podem ser formadas, por exemplo, durante uma operação de soldagem ou algum tratamento térmico. A principal preocupação relacionada a este fato é a perda de tenacidade e de resistência à corrosão por pites, principalmente nos AISDs, que são utilizados em condições mais críticas. [5]

A tabela 2 mostra algumas fases secundárias e suas respectivas faixas de precipitação, junto com a sua formulação química. Note que a faixa de temperatura em que há possível precipitação de fases secundária varia de 300-1100°C e que em determinada temperatura do processo pode haver a precipitação de várias fases diferentes, tendo cada uma delas um efeito adverso na propriedade do AID.

Tabela 2- Faixa de precipitação de fases secundárias em AID. Adaptado de Karlsson et al (1999) [5].

Fase secundária	Fórmula química nominal	Faixa de temperatura (°C)
$\alpha'$	-	300-550
$\sigma$	Fe-Cr-Mo	600-1000
Nitreto de cromo	Cr <sub>2</sub> N	700-900
Nitreto de cromo	CrN	? – 1100
X	Fe <sub>36</sub> Cr <sub>12</sub> Mo <sub>10</sub>	700-900
R	Fe-Cr-Mo	550-800
$\pi$	Fe <sub>7</sub> Mo <sub>13</sub> N <sub>4</sub>	550-600
$\tau$	-	55-650
M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	-	950-1050
M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	-	700 - 950

#### - Resistência à Corrosão

A composição química dos AIDs, o tamanho de grão e a qualidade da superfície são alguns dos fatores que influenciam na resistência à corrosão desses aços. Um fator que caracteriza a resistência dessa corrosão é capacidade do material formar uma película

passivadora de óxido de cromo e permanecer neste estado passivo pelo maior tempo possível. [7]

#### - Corrosão por Pite

A resistência à corrosão por pites dos AIDs depende fortemente da composição química da liga, principalmente dos teores de Cr, Mo e N. Tal corrosão localizada é caracterizada pela ruptura da camada passiva da superfície do metal, dando a oportunidade da corrosão ocorrer de maneira acelerada e imperceptível.

Foram desenvolvidas diversas relações empíricas para determinar o grau de resistência à corrosão por pite devido a composição química das ligas. Tais relações são denominadas como PRE (*Pitting Resistance Equivalent*) ou simplesmente índice de pite.

A equação abaixo é a equação mais utilizada industrialmente para a verificação do índice de pite.

$$\text{PRE} = \% \text{Cr} + 3,3\% \text{Mo} + 16\% \text{N} \quad \text{Equação 1}$$

A precipitação de fases intermetálicas afetam a resistência à corrosão por pites dos AIDs devido ao empobrecimento dos elementos Cr e Mo nas regiões vizinhas as precipitações favorecendo, assim, a formação de pites nestas regiões. [5]

#### - Passivação dos Aços Inoxidáveis Duplex

Na primeira etapa do processo de corrosão há a formação de um óxido superficial que se adere à superfície do metal. Este óxido tem função protetora, diminuindo a velocidade de corrosão. O desempenho do metal contra a corrosão vai depender da qualidade, natureza e composição do óxido formado na superfície do mesmo. [8]

Para ligas de Fe-Cr-Ni, a formação de filmes de óxidos passivos são espontâneos e de rápida formação, sendo favorecidos pelas transferências de cargas na interface metal/filme e filme/ambiente e pela reatividade do cromo com o oxigênio. [8]

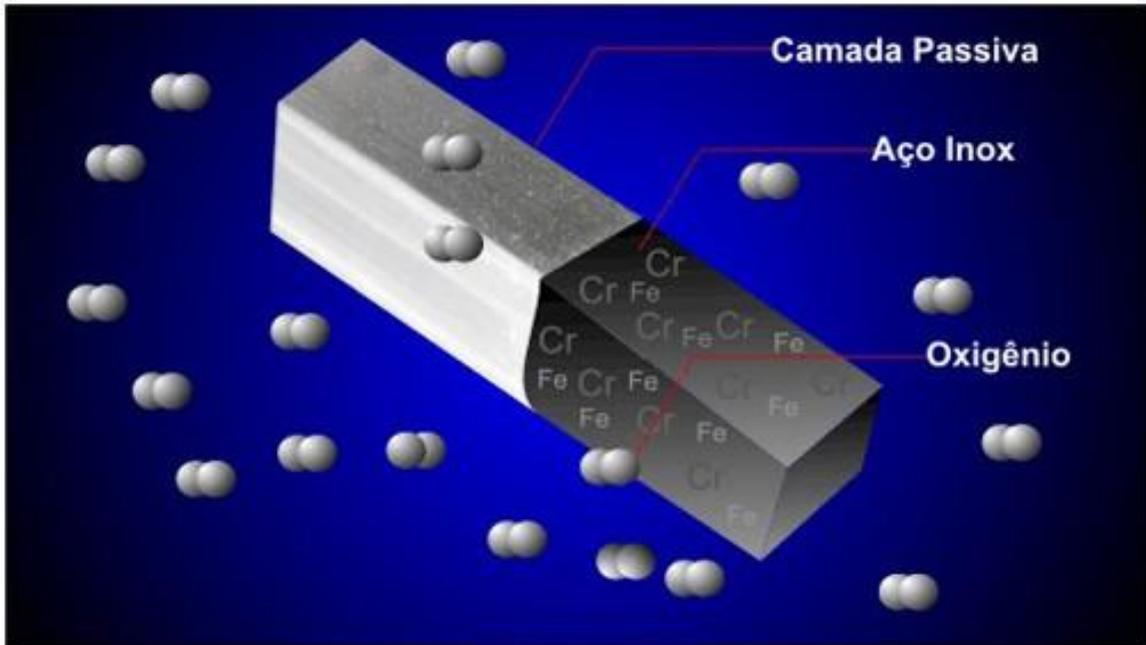


Figura 4- Formação da camada de óxido de cromo em um aço inox. [9]

## 2.4 Soldagem

A soldagem é um processo de união entre dois ou mais materiais (normalmente metais) assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades químicas, físicas e metalúrgicas. Este é um processo de grande importância industrial, sendo extensivamente utilizado na recuperação e fabricação de equipamentos, estruturas e peças em geral.

A soldagem dos AIDs é essencial, devido a sua grande utilização na indústria. Um grande problema enfrentado com a soldagem dos AIDs é a possível alteração das propriedades do aço devido a variação extrema de temperatura durante o processo. Por isso, vários são os processos de soldagem utilizados com o intuito de manter a microestrutura da junta soldada balanceada e conseqüentemente, sem modificar as propriedades mecânicas e a de resistência à corrosão. [10]

### 2.4.1 Metal de Adição

O metal de adição é utilizado para promover a junção entre as duas peças base. Este metal tem que possuir uma microestrutura muito semelhante ao metal de base, para que não haja alterações muito significativas da microestrutura da peça fundida. A figura 5 representa de maneira bastante simplificada a soldagem de uma peça metálica.

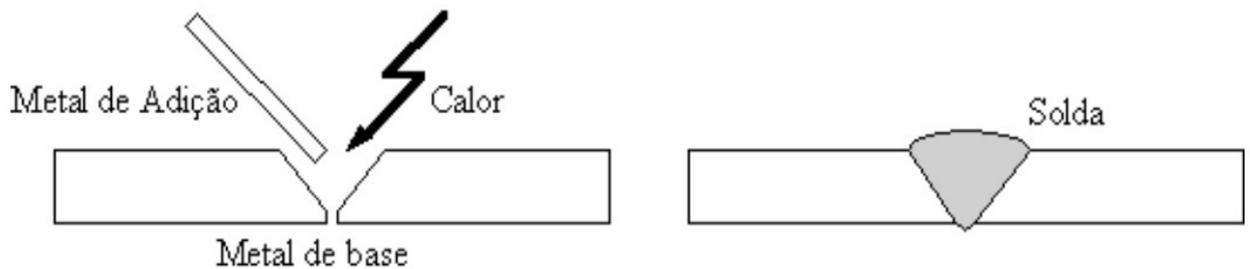


Figura 5- Esquema de um processo de soldagem por fusão.

#### 2.4.2 Energia de Soldagem

A energia de soldagem é a quantidade de calor que se é empregada em um passe de soldagem, ou seja, a energia empregada no cordão de solda durante a soldagem de uma determinada peça. Essa energia pode variar de acordo com a velocidade de soldagem, a tensão e a corrente empregada no arco de solda.

A figura 6 apresenta quatro metais com diferentes energias de soldagem: a amostra (a) possui energia de soldagem de 0,6 kJ/mm; a amostra (b) possui energia de soldagem de 1 kJ/mm; a amostra (c) possui energia de soldagem de 2 kJ/mm e a amostra (d) possui energia de soldagem de 3 kJ/mm. As amostras possuem uma quantidade de cordões de solda diferentes para cada energia de soldagem e espessuras também. Quanto menor é a energia de soldagem maior é a quantidade de cordões de solda necessários para unir os metais de base.

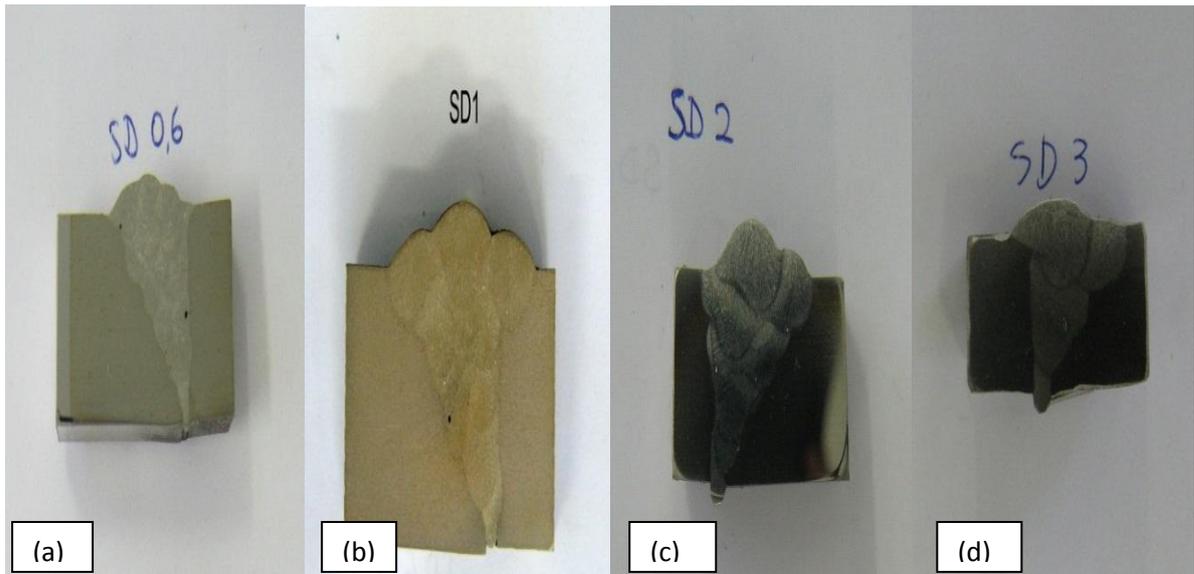


Figura 6- Amostras utilizadas nos experimentos.

#### 2.4.3 Zona Fundida e Zona Afetada pelo Calor

A zona fundida (ZF) é a região onde houve a fusão entre os metais. Esta região é de extrema importância, pois como sua microestrutura é uma região de maior suscetibilidade à corrosão. Como o resfriamento nessa região acontece a velocidades altas, o balanceamento da microestrutura austenita/ferrita deve ser analisado. A energia de soldagem e a composição química do metal de adição são os principais fatores que determinam o balanço microestrutural da zona fundida.

A zona afetada pelo calor (ZAC) é a região subsequente à zona fundida. Nela ocorrem transformações no estado sólido, podendo haver precipitação de fases e crescimento do grão ferrítico. Esta zona também é bastante crítica em relação a sua resistência à corrosão.

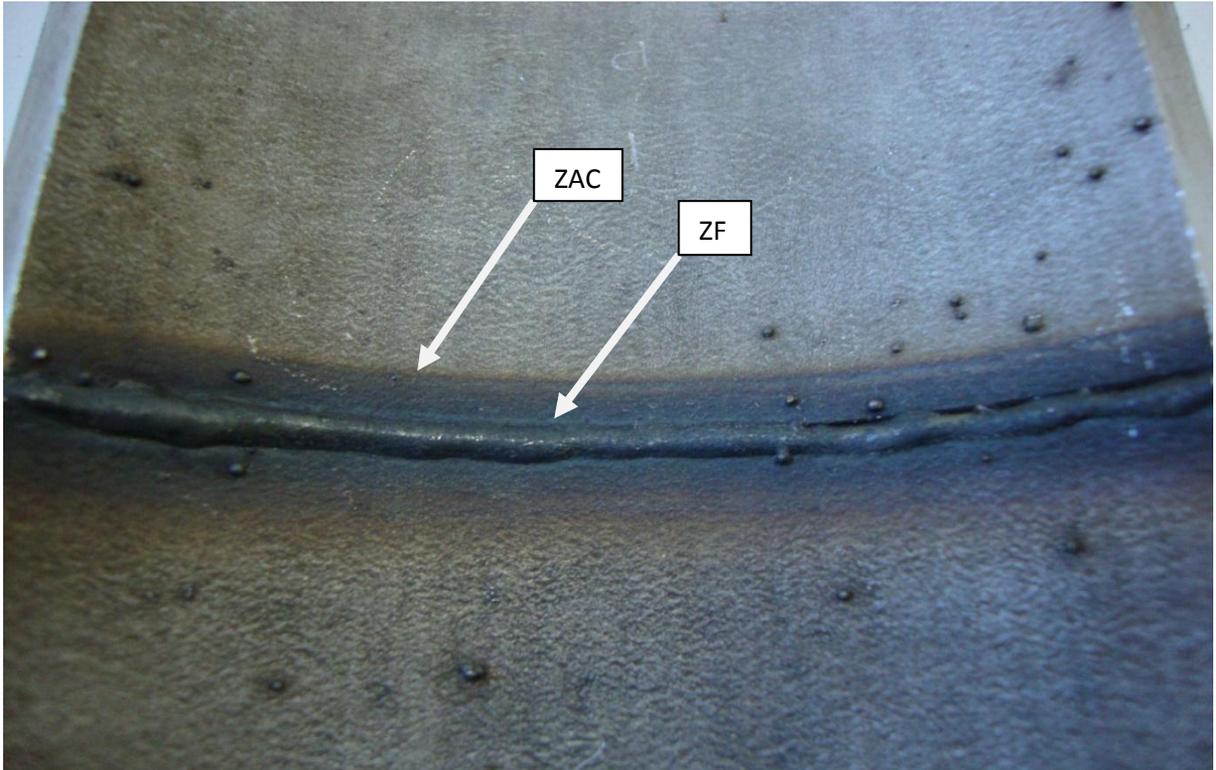


Figura 7- ZF e ZAC de um tubo de aço inoxidável superduplex SAF 2507.

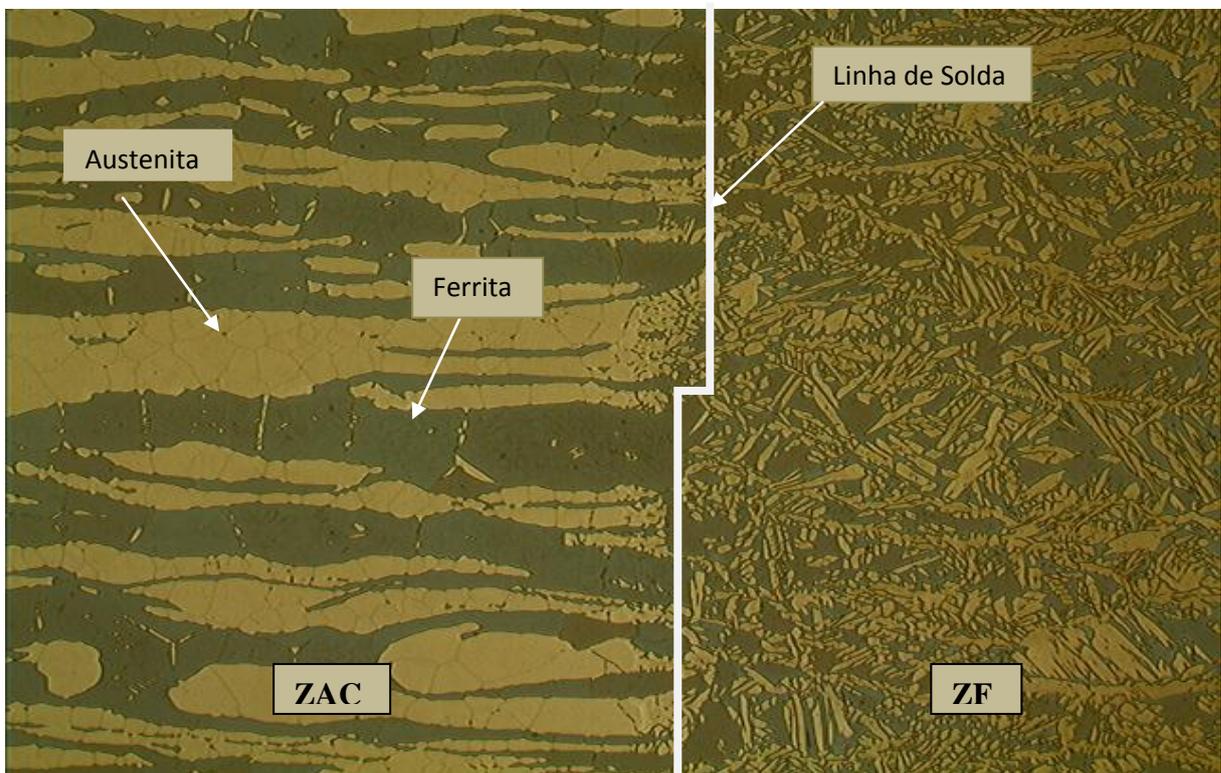


Figura 8- Microestrutura da ZF e ZAC de um tubo de aço inoxidável superduplex SAF 2507.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

As amostras de aço inoxidável foram fornecidas pelo CENPES (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobrás) para análises eletroquímicas e microestruturais. O mesmo foi soldado no Laboratório de Engenharia em Soldagem da Universidade Federal do Ceará, sendo utilizado o processo de soldagem denominado MIG/MAG e variando a energia de soldagem de 0,6 kJ/mm até 3,0 kJ/mm.

A composição química especificada pelo fabricante, do metal de base e do metal de adição utilizados no processo de soldagem encontram-se nas tabelas 3 e 4, respectivamente. Foi utilizado ferro no balanço de massa dessas ligas.

Tabela 3: Composição química do aço inoxidável superduplex SAF 2507. (Metal de base)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0,03%	0,80%	1,20%	25,00%	7,00%	4,00%	0,50%	Balanço

Tabela 4: Composição química do aço inoxidável SAF 2574. (Metal de Adição)

C	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0,01%	25,00%	9,00%	4,00%	0,30%	Balanço

A solução utilizada como eletrólito foi NaCl 3,5 % com pH 7,0. Tal escolha se deve ao fato do íon cloreto ser um íon de tamanho pequeno tendo uma maior facilidade para romper o filme passivo do metal, provocando assim, uma área ativa, que em comparação com a área passivada ao redor é mínima, causando uma corrosão intensa e localizada. Outro fator para a escolha desta solução é a reprodução do ambiente marinho de plataformas, já que nestes locais se concentra a maior utilização dos aços inoxidáveis superduplex.

## 3.2 Preparação das Amostras

### 3.2.1 Extração das Amostras

Foram fornecidos pelo Laboratório de Pesquisa em Soldagem- ENGESOLDA, da Universidade Federal do Ceará, quatro pedaços de tubulações soldadas com energias de soldagem diferentes. Foram feitos cortes transversais e longitudinais utilizando-se máquina de corte por serramento mecânico, que possibilitou a diminuição das peças e máquina de corte com disco abrasivo, que possibilitou a obtenção de secções com boa qualidade e englobando uma área contendo a zona fundida e a zona afetada pelo calor. Nas figuras 9 e 10 estão ilustradas as peças e máquinas utilizadas para o preparo das amostras.



Figura 9- Amostras de tubos.



Figura 10- Máquinas de Corte. (a) Corte com disco abrasivo. (b) Corte por serramento mecânico.

### 3.2.2 Montagem e Identificação das Amostras

Depois do corte, as amostras foram embutidas a frio, utilizando como resina o epóxi com um catalisador para acelerar a sua secagem e como suporte um pedaço de cano flexível, um fio de cobre foi conectado a peça antes do seu embutimento para fins de contato elétrico.

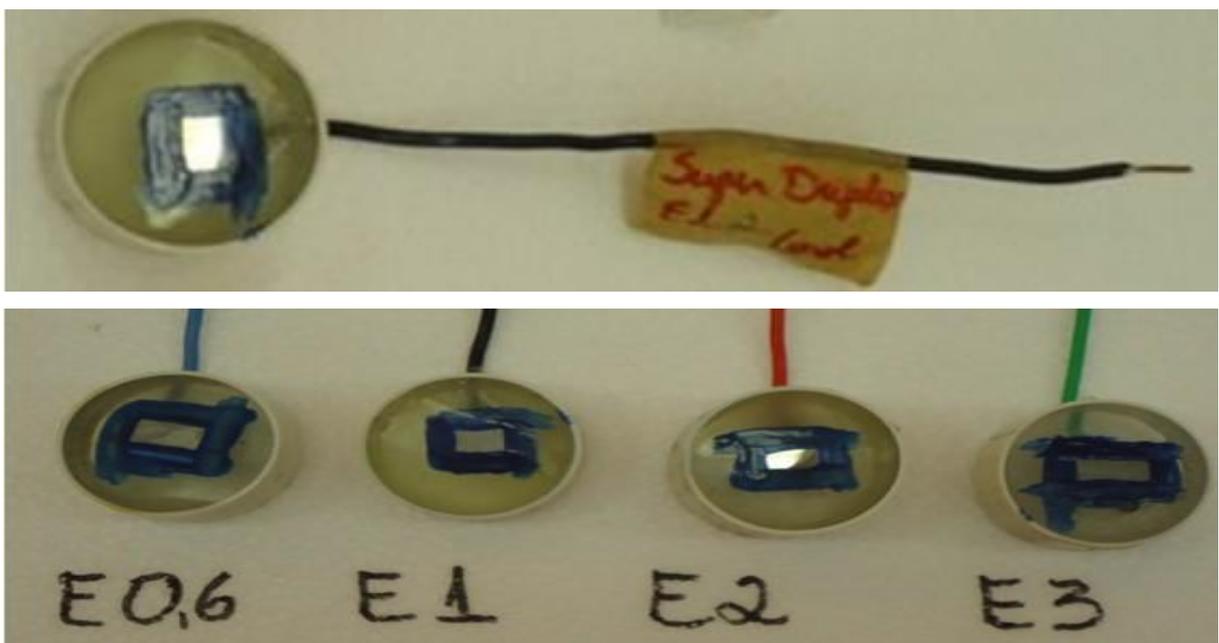


Figura 11- Eletrodos de trabalho.

### 3.2.3 Preparação da Superfície de Análise das Amostras

Com o corte, a amostra fica completamente irregular e com sua estrutura alterada. Por este motivo, há necessidade de se preparar a superfície da amostra, para que nas análises não haja zonas preferenciais. Para este fim é feito o lixamento da amostra.

Foi utilizada uma politriz com rotação aproximada de 300 rpm e lixas d'água variando a sua granulometria de 100 mesh até 1200 mesh, sempre mudando a direção da peça em um ângulo de 90 graus para cada mudança de lixa, também verificando o desaparecimento dos traços da lixa anterior.



Figura 12- Politriz utilizada para lixamentos.

### 3.3 Quantificação da Fração de Ferrita

Antes das análises eletroquímicas, uma amostra do aço inoxidável superduplex SAF 2507 foi lixada até uma granulometria de 400 mesh, e foi analisada através de um equipamento chamado ferritoscópio, que quantifica a ferrita em materiais metálicos por indução magnética. O ferritoscópio utilizado foi Fisher MP-23 equipado com o cabeçote EGAB1.3-Fe. (Figura 13)



Figura 13- Ferritoscópio Fisher MP-23.

### 3.4 Análises Eletroquímicas

Em todos os ensaios foi utilizado o potenciostato PGSTAT 32 (Autolab). Na figura 14 tem-se a imagem do potenciostato utilizado nas análises eletroquímicas. A figura 15 representa uma célula eletroquímica constituída por três eletrodos: eletrodo de trabalho, eletrodo de referência e o contra-eletrodo. O eletrodo de referência utilizado nas análises foi o Ag/AgCl e o contra-eletrodo uma placa de platina.



Figura 14- Equipamento utilizado nos ensaios eletroquímicos.

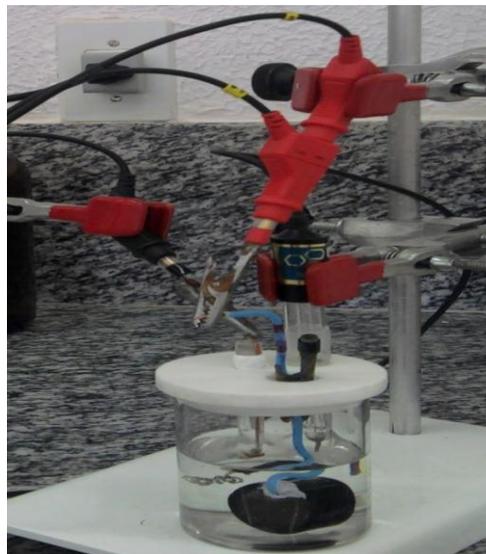


Figura 15- Célula Eletroquímica.

Todos os ensaios foram feitos em duplicata, para se obter uma maior segurança em relação aos resultados obtidos. Os dados plotados foram obtidos das primeiras amostras, pois os valores obtidos nos ensaios para a mesma amostra apresentaram valores muito próximos.

### 3.4.1 Monitoramento do Potencial de Circuito Aberto

A corrosão pode ser tratada como uma reação de oxirredução. No início do processo, ou seja, a velocidade de oxidação é muito maior que a velocidade de redução. Para um tempo tendendo ao infinito, a velocidade de oxidação tende a se igualar a velocidade de redução, neste ponto tem-se o potencial estacionário, ou potencial de equilíbrio. [11]

A análise de monitoramento do potencial de circuito aberto indica o tempo necessário para que as velocidades de redução e oxidação sejam as mesmas, indicando assim, a estabilidade do sistema.

### 3.4.2 Polarização Potenciodinâmica

O potencial de equilíbrio é uma variável bastante importante para o estudo da corrosão, mas ainda mais importante é o conhecimento do comportamento eletroquímico de um metal em um potencial diferente do potencial de equilíbrio (ou de corrosão). Um potenciostato é utilizado para impor experimentalmente a um eletrodo, um potencial diferente ao de corrosão. Através dele é possível impor o potencial desejado em relação ao eletrodo de referência, em meios com boa condutividade e medir a corrente de polarização, além de registrá-la em função do potencial. Logo, é obtido as curvas de polarização experimental que representa o efeito global de todas as reações que ocorrem simultaneamente sobre o eletrodo. [12]

A figura 16 representa uma curva de polarização típica de materiais susceptíveis à corrosão. Nela encontram-se as regiões catódica e anódica e todos os potenciais importantes para o estudo da corrosão. Esses potenciais estão definidos abaixo:

- $E_{corr}$ : potencial de corrosão. Potencial no qual as correntes provenientes das reações anódica e catódicas são iguais, estabelecendo um estado estacionário.
- $E_{pass}$ : potencial de passivação. Potencial no qual o metal passa do estado ativo para o estado passivo. Neste potencial a curva de polarização atinge um máximo (pico ativo), onde se situa a densidade de corrente de passivação.

- Equebra: potencial de quebra ou potencial de pite. Potencial no qual passa a existir a possibilidade de ocorrência de ataques localizados ao longo da superfície. Neste ponto há a dissolução do filme passivo, onde a densidade de corrente anódica aumenta. [13]

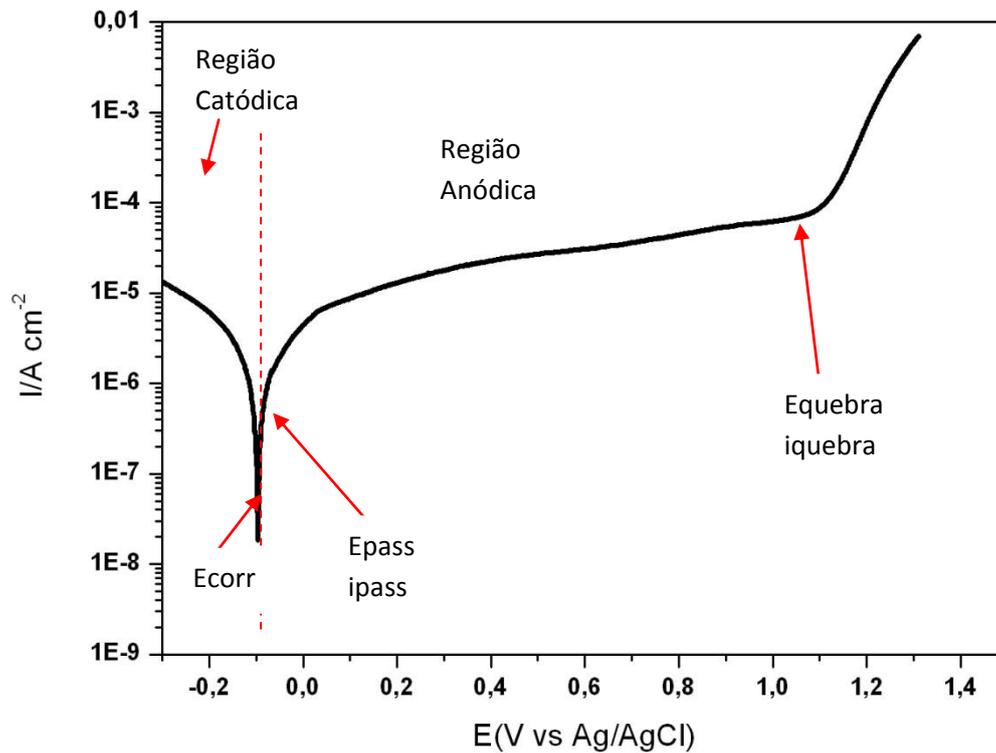


Figura 16- Curva típica de material suscetível a corrosão.

Para as análises de polarização foi utilizado o software GPES.

### 3.4.3 Impedância Eletroquímica

A principal característica do ensaio de impedância é que no lugar de se aplicar um potencial de eletrodo de corrente contínua, se aplica um potencial de corrente alternada com diferentes valores de frequência. Assim a medida da habilidade de um circuito de resistir a corrente elétrica, é a impedância, onde a expressão análoga a Lei de Ohm, é dada por:

$$E(t) = Z.I(t)$$

Equação 2

A representação gráfica dos resultados pela curva de Nyquist (figura 17) permite uma melhor visualização e análise dos resultados, onde são plotados para cada excitação os valores dos componentes imaginários e reais da curva de impedância.

A impedância é sempre representada na forma de um semicírculo de raio  $0,5 R_p$  e centro  $R_e + 0,5R_p$ , onde  $R_p$  e  $R_e$  são as resistências de polarização e resistência do eletrodo respectivamente. No ponto  $\omega = 0$  (frequência) está sobre a curva  $Z_r$  e é igual a  $R_e + R_p$ . Quanto maior o arco que o metal forma, maior é a resistência desse metal à corrosão. [14]

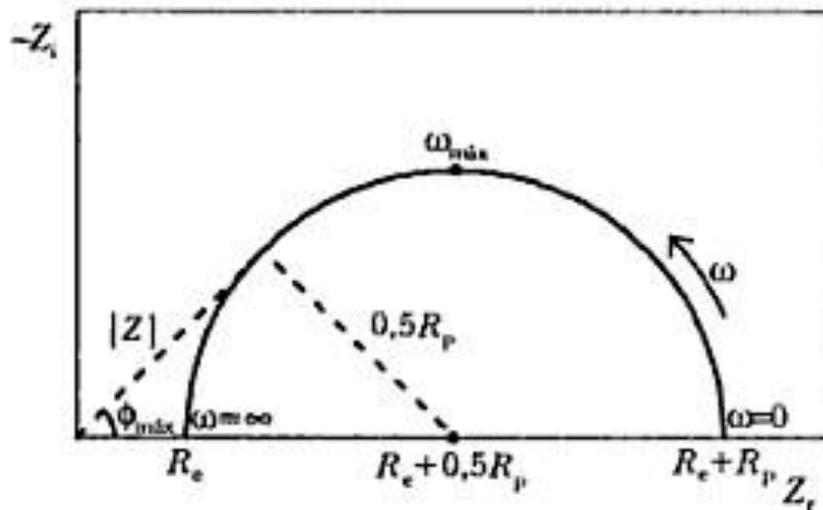


Figura 17- Representação esquemática do Diagrama de Nyquist. [13]

### 3.5 Análise Microestrutural

Após as análises de polarização potenciodinâmica, as amostras sofreram ataque químico por imersão para que a sua microestrutura fosse revelada através da visualização em microscópio óptico. O ataque foi realizado com a solução Behara, composta por 100 mL de água deionizada, 40 mL de ácido clorídrico e 1,25 g de metabissulfeto de potássio. O microscópio óptico utilizado foi o Olympus BX-51M.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Quantificação das Amostras**

A análise quantitativa do aço inoxidável superduplex SAF 2507, no qual foi utilizado o ferritoscópio, apresentou como resultado um quantidade de 51,28% de ferrita presente na amostra, conseqüentemente 48,72% de austenita, significando que essa amostra possui um excelente balanceamento entre as fases ferrita e austenita.

### **4.2 Monitoramento do Potencial de Circuito Aberto**

Na figura 18 é apresentado o monitoramento do potencial de circuito aberto com o tempo de imersão. O período do ensaio foi de 30 minutos para cada amostra, visualizando-se uma estabilidade dos materiais após um período aproximado de 500 segundos de ensaio. Este resultado já era esperado devido este material apresentar excelentes propriedades de resistência à corrosão e mecânicas. Dentre as amostras analisadas, as de energia de soldagem 1 e 2 apresentaram os valores de potencial mais positivos, indicando uma superfície menos ativa ao processo de corrosão.

Com a realização destes ensaios foi estabelecido um tempo de espera para a estabilização do material de 15 minutos, antes da realização dos demais ensaios eletroquímicos.

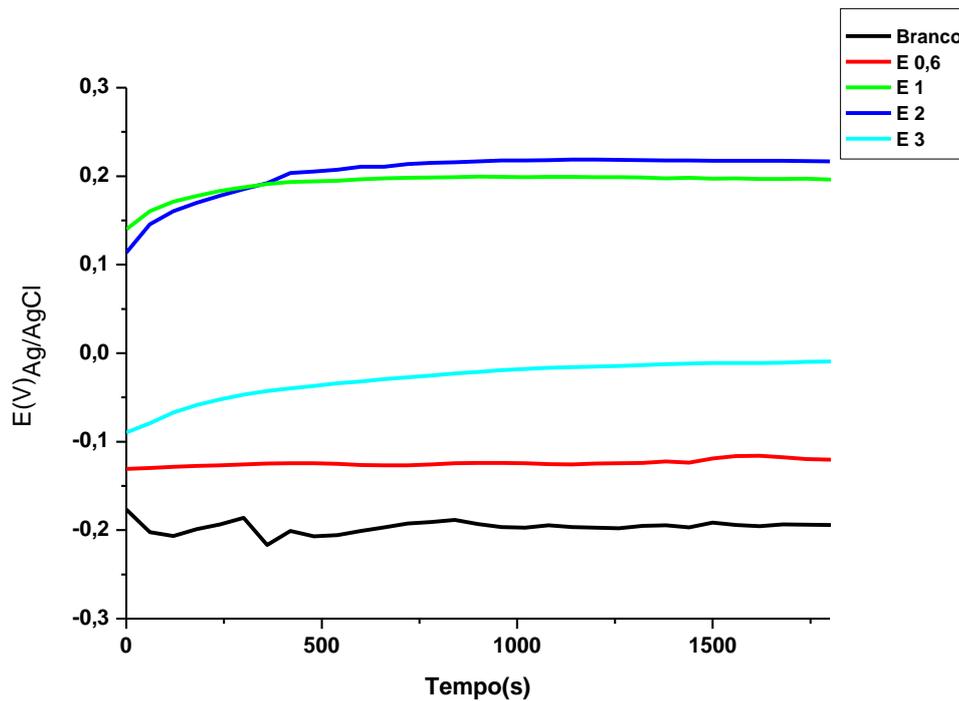


Figura 18- Gráfico obtido após os ensaios de monitoramento.

### 4.3 Polarização Potenciodinâmica

Na figura 19 são mostradas as curvas de polarização potenciodinâmica das amostras investigadas. Pode ser observado que todas as amostras apresentam um comportamento semelhante. Observa-se uma longa faixa de estabilidade indicando a formação de um filme passivo e uma quebra deste filme em um potencial de aproximadamente 1 V, onde ocorre um aumento brusco da densidade de corrente, indicando esta quebra.

É importante ressaltar que todas as amostras apresentaram praticamente o mesmo valor para o potencial de corrosão indicado pela seta amarela, para o potencial de passivação indicado pela seta cinza e para o potencial de quebra indicado no gráfico pela seta roxa.

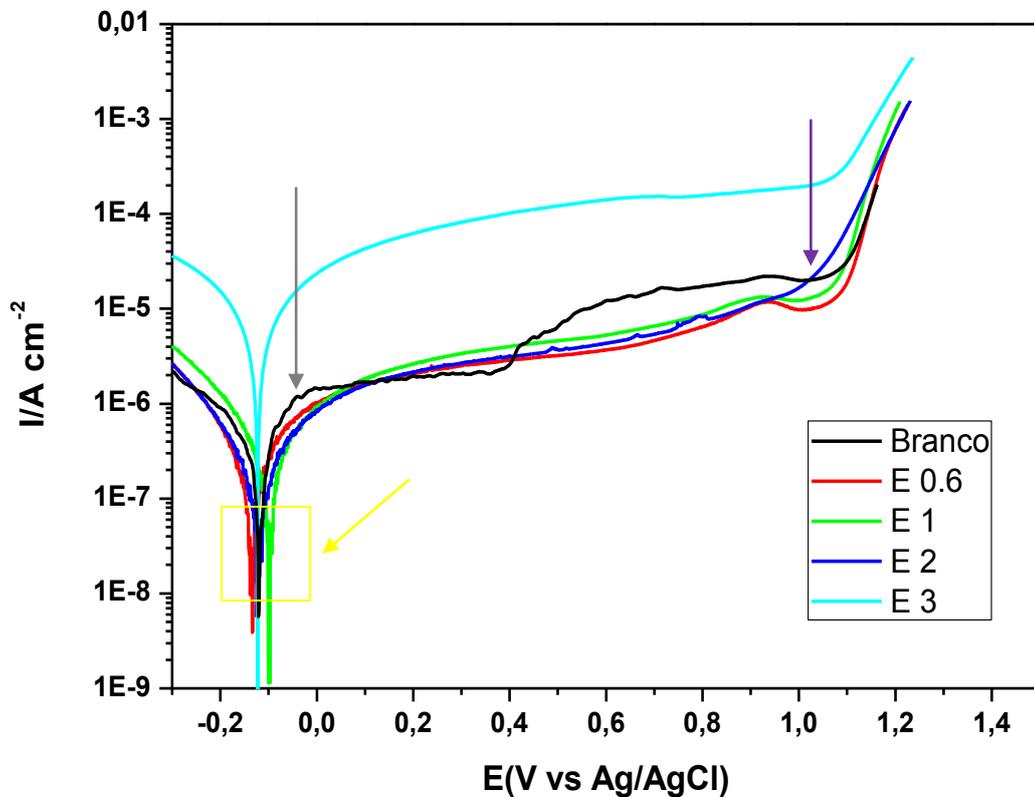


Figura 19- Curvas obtidas através dos ensaios de polarização.

A partir da figura 19, foram obtidos os parâmetros da tabela 5. Pela tabela pode ser confirmado que não houve variação significativa nos potenciais. Já para os valores de densidade de corrente foram observados variações razoáveis, principalmente para a amostra de energia de soldagem 3 kJ/mm que apresentou uma grande diferença na densidade de corrente em comparação com as outras amostras. Para uma melhor visualização dos resultados de corrente foram plotados os gráficos das correntes de corrosão, passivação e da quebra de passivação versus amostras.

A figura 20 representa o gráfico comparativo entre as densidades de correntes de corrosão, nota-se uma diferença da amostra de referencia e da amostra de energia 3 kJ/mm, essa diferença não é tão significativa já que esses valores estão na casa dos microamperes. O mesmo ocorre para as correntes de passivação, mostradas na figura 21.

Tabela 5- Parâmetros obtidos a partir das curvas de polarização potenciodinâmica.

<b>Energia de Soldagem</b>	<b>icorr</b>	<b>ipass</b>	<b>iquebra</b>	<b>Ecorr</b>	<b>Epass</b>	<b>Equebra</b>
(kJ/mm)	( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	( $\text{kA}/\text{cm}^2$ )	(V)	(V)	(V)
<b>Sem solda</b>	0,759	1,31	0,180	-0,10	-0,05	1,09
<b>0,6</b>	0,136	1,08	0,011	-0,13	-0,05	1,05
<b>1</b>	0,03	1,37	0,014	-0,10	- 0,05	1,04
<b>2</b>	0,03	1,18	0,015	-0,12	-0,05	1,00
<b>3</b>	3,32	31,2	0,277	-0,13	-0,05	1,08

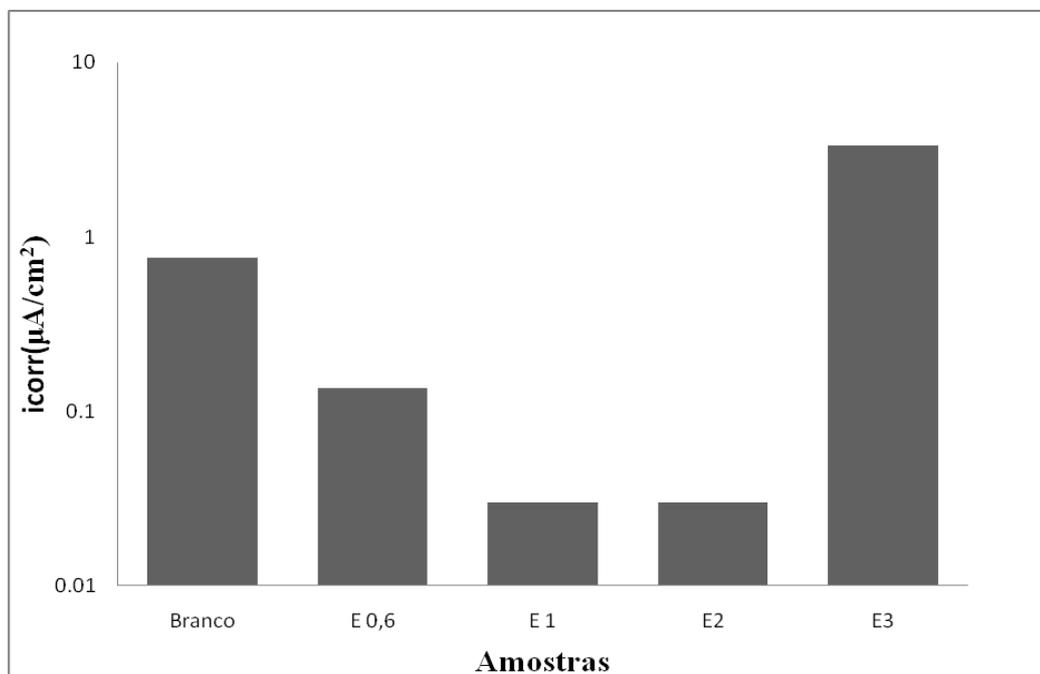


Figura 20- Gráfico comparativo das correntes de corrosão.

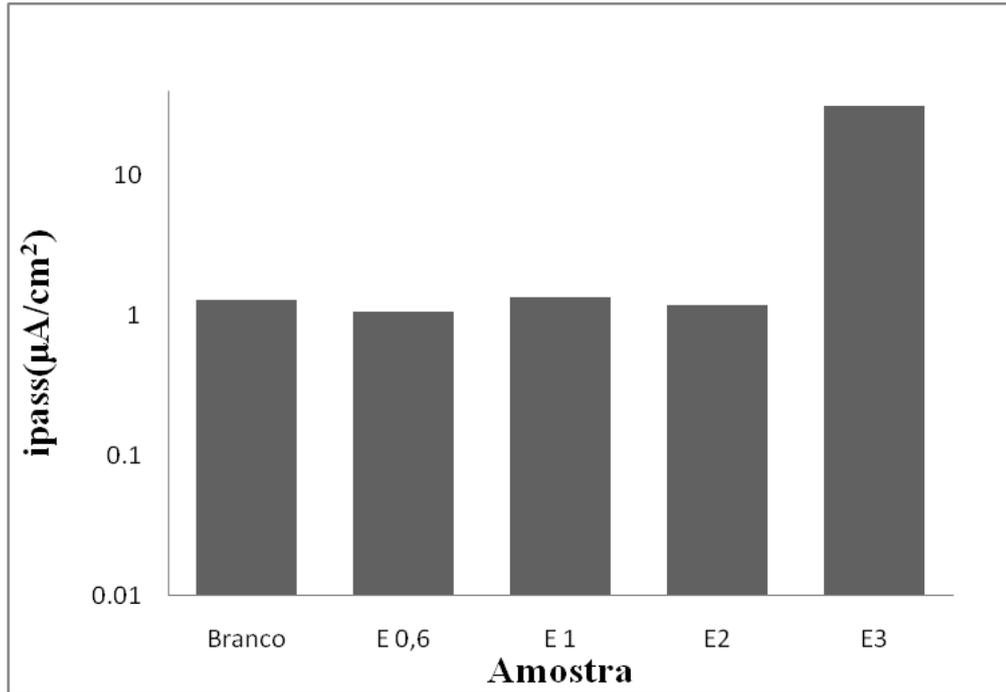


Figura 21- Gráfico comparativo das correntes de passivação.

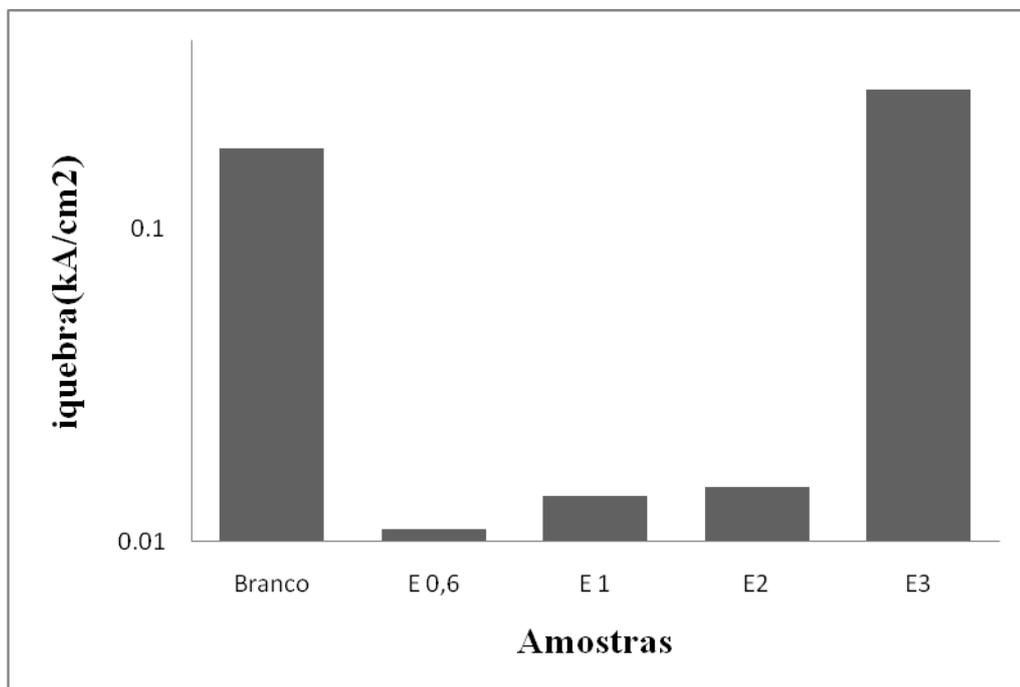


Figura 22- Gráfico comparativo das correntes de quebra.

No caso da figura 22, a diferença entre a densidade de corrente de quebra do filme passivo entre as amostras é razoável, já que as unidades estão na casa do kiloampères. Logo quanto maior a densidade de corrente menor é a resistência à corrosão desse material.

#### 4.4 Impedância Eletroquímica

Na figura 23 é apresentado o gráfico da impedância eletroquímica das amostras investigadas.

Os resultados obtidos com os ensaios de impedância eletroquímica colaboraram para a confirmação dos ensaios anteriores. De acordo com a figura 23 as amostras com energia de soldagem 0,6 kJ/mm e 3 kJ/mm apresentaram um menor arco capacitivo caracterizando assim uma baixa resistência à corrosão.

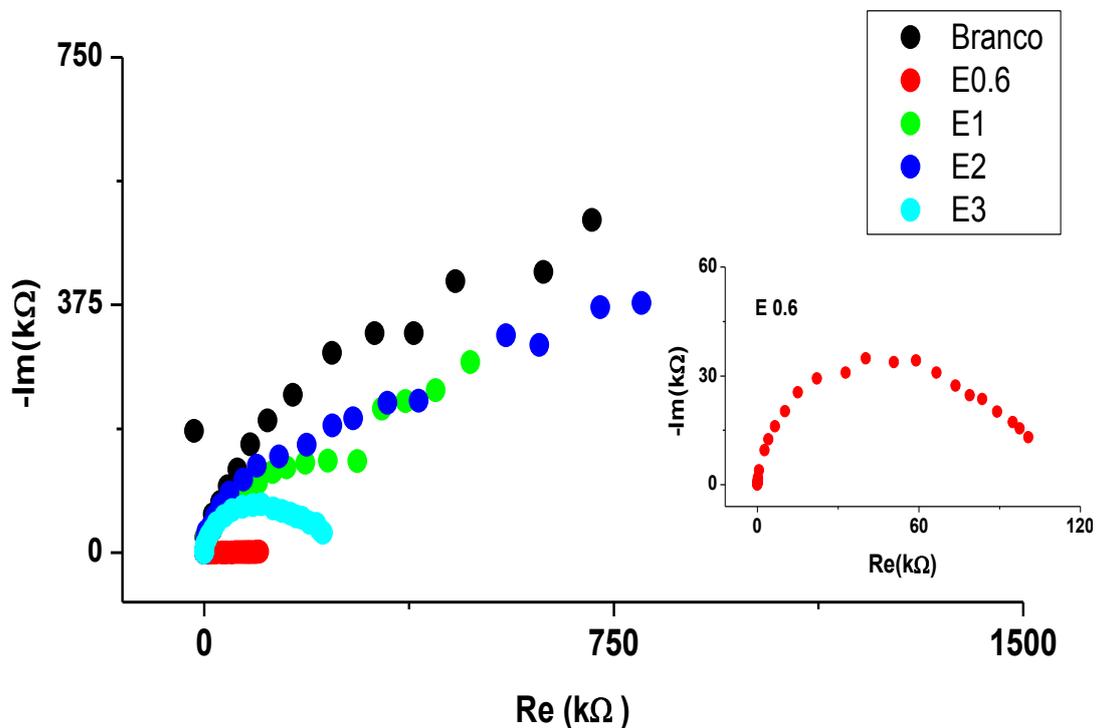


Figura 23- Curvas obtidas através do ensaio de impedância.

#### 4.5 Caracterização Microestrutural

Após o ataque químico das amostras foi utilizado o microscópio óptico Olympus BX- 51M para a visualização da microestrutura do metal de solda.

A figura 24 apresenta a micrografia do metal superduplex com energia de soldagem de 0,6 kJ/mm antes do ensaio de polarização (a) e após o ensaio de polarização (b).

Ambas as amostras sofreram ataque químico de imersão para revelarem as suas microestruturas. Note que na região afetada pelo calor houve uma maior concentração de corrosão por pite, isso está ligado ao fato de que quanto menor a energia de soldagem maior é o tempo que o metal soldado leva para resfriar, e esse tempo pode causar a precipitação de fases indesejadas no metal soldado. As setas indicam pontos de formação de pite, veja que a sua maioria está concentrada na fase ferrita.

Não foi verificada a presença de fases secundárias nas micrografias feitas através do microscópio óptico Olympus BX-51M. Para tal faz-se necessário uma análise quantitativa das fases que precipitaram para se ter com precisão das fases secundárias formadas, sua quantidade, sua localização e sua influência sobre os resultados obtidos.

As micrografias de todas as amostras foram realizadas com um aumento de 200 vezes.

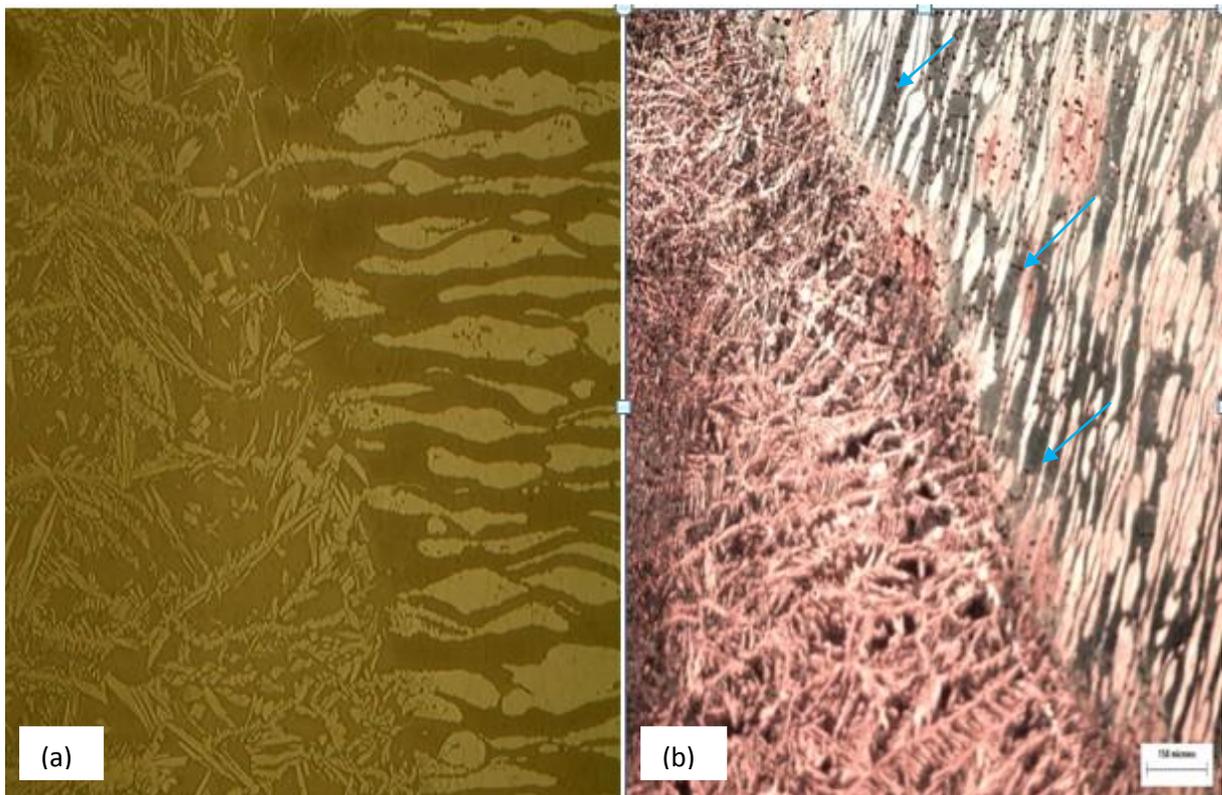


Figura 24- Micrografia da amostra soldada com energia de soldagem 0,6 kJ/mm.

As figuras 25 e 26 apresentam as micrografias das amostras com energia de soldagem 1 kJ/mm e 2 kJ/mm respectivamente, onde (c) e (e) são as micrografias antes dos

ensaios de polarização e após ataque químico com Beraha, solução composta por 100 mL de água deionizada, 40 mL de ácido clorídrico e 1,25 g de metabissulfeto de potássio, e (d) e (f) são as micrografias após análises de polarização seguido por ataque químico também com Behara. Verifica-se que não houve formação de pite e nem vestígios de corrosão, comprovando os resultados anteriores, já que essas amostras foram as que apresentaram melhores resistências à corrosão de acordo com as análises eletroquímicas realizadas anteriormente ao ataque químico.

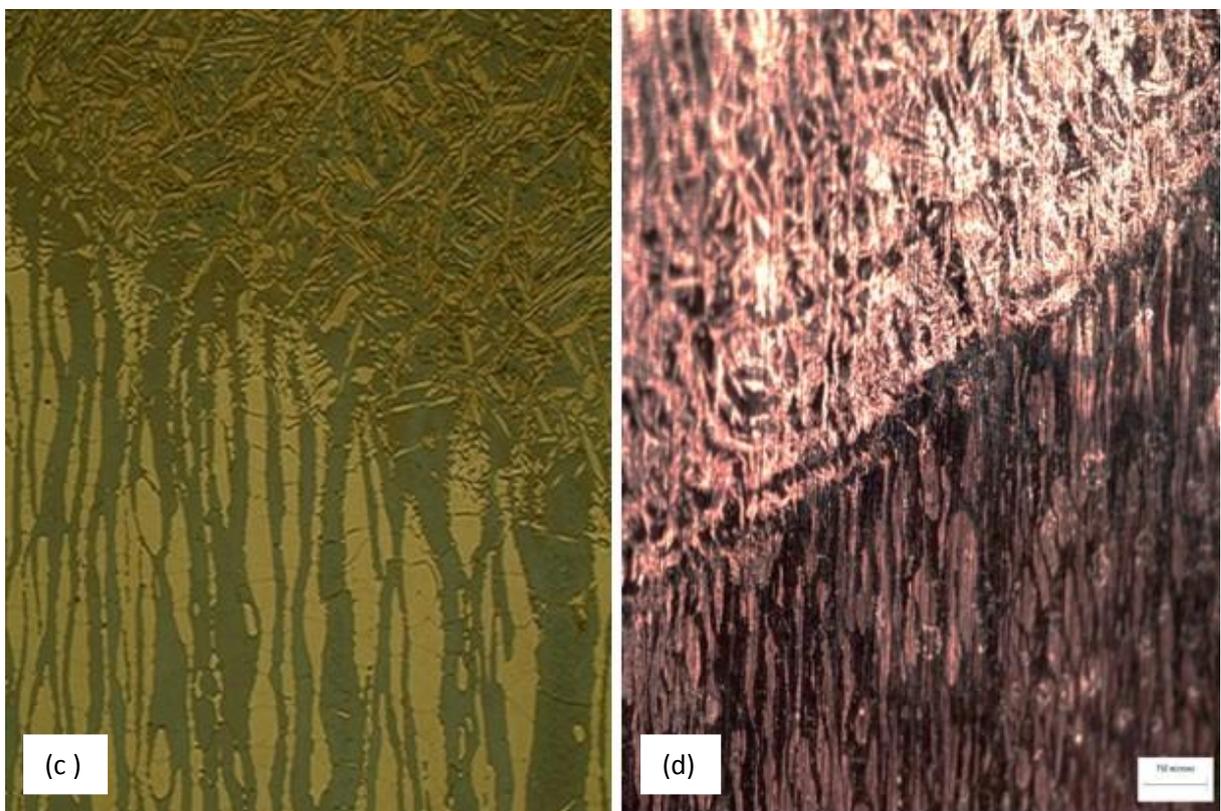


Figura 25- Micrografia da amostra soldada com energia de soldagem 1 kJ/mm.

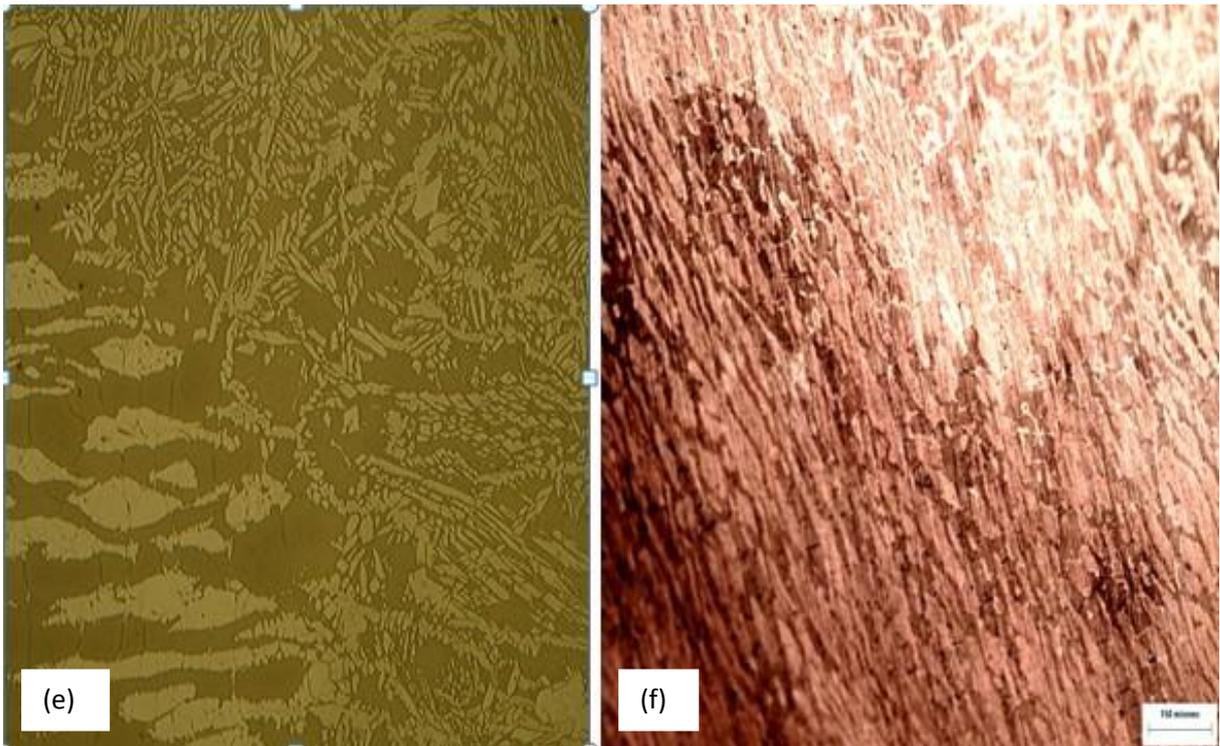


Figura 26- Micrografia da amostra soldada com energia de soldagem 2 kJ/mm.

A figura 27 mostra a micrografia da amostra com energia de soldagem 3 kJ/mm, nela pode-se verificar a formação de pite, indicado pela seta, a incidência desse tipo de corrosão foi menor nesta amostra em comparação a amostra de energia 0,6 kJ/mm. Este fato pode ter acontecido porque a soldagem com energias muito altas tendem a precipitar fases menos agressivas que as que precipitam em soldagens que utilizam energias de soldagem mais baixas.

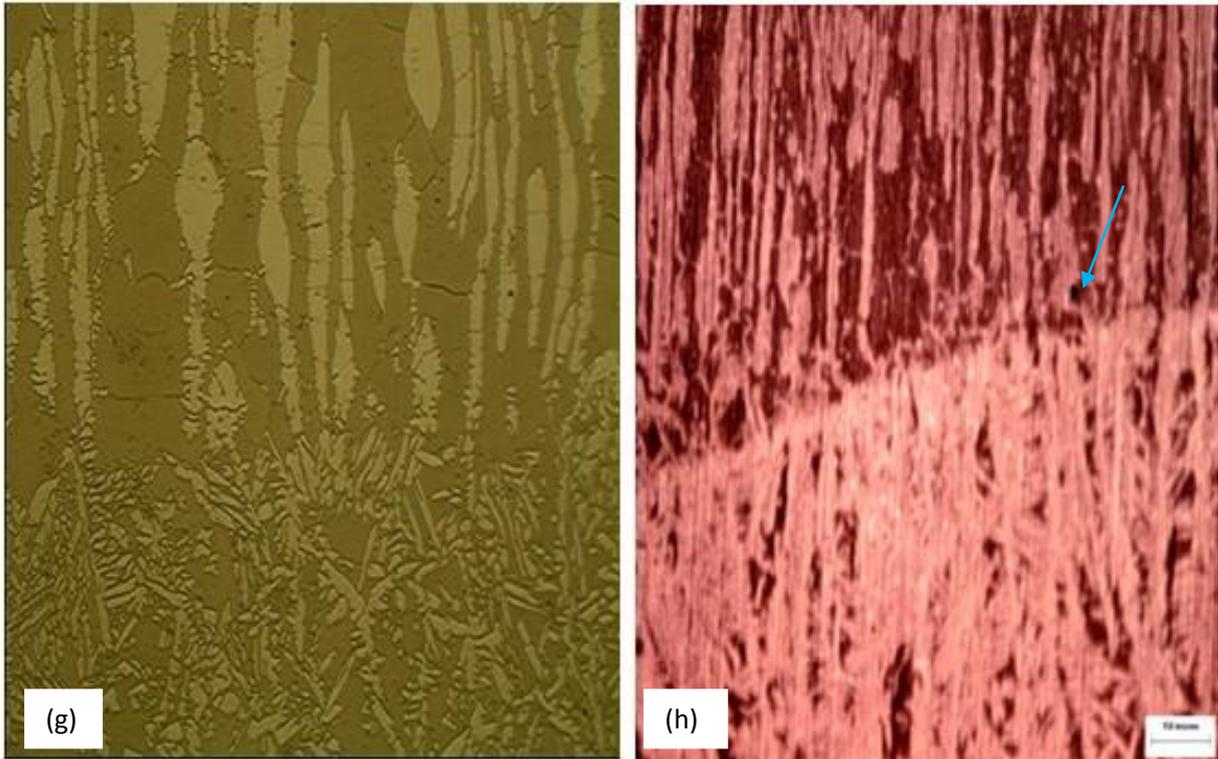


Figura 27- Micrografia da amostra soldada com energia de soldagem 3 kJ/mm.

As micrografias mostraram a formação de corrosão localizado por pite nas amostras de menor energia de soldagem e de maior energia de soldagem, mostrando assim, que os ensaios eletroquímicos foram coerentes com o observado.

## 5 CONCLUSÃO

A energia de soldagem afetou negativamente o comportamento anticorrosivo das amostras de aço superduplex investigadas, deixando-as mais susceptíveis à corrosão. Verificou-se que não houve uma variação significativa entre os potenciais das amostras analisadas, e que a variação se deu na densidade de corrente das amostras.

As amostras com energia de soldagem de 0,6 kJ/mm e 3 kJ/mm, ou seja, a menor e a maior energia de soldagem aplicada no processo apresentaram as piores resistências à corrosão, este fato pode se dar devido a rápida e a lenta etapa de resfriamento nessas energias de soldagem, favorecendo assim a precipitação de fases secundárias, que empobrece a região onde essas fases precipitaram, deixando-as com maior probabilidade de quebra do filme passivo nessa região, favorecendo então a corrosão. A análise microestrutural mostrou corrosão por pite nestas amostras com uma concentração na fase ferrita, o que pode indicar precipitação de fases intermetálicas nesta região.

Ensaio complementares para a análise microestrutural e a utilização de um Microscópio de Varredura (MEV) para a observação de fases secundárias se fazem necessários para a verificação das fases intermetálicas que precipitaram e como elas agiram sobre o metal para favorecer a corrosão, principalmente, nas amostras de energia 0,6 kJ/mm e 3 kJ/mm. Essas análises são apenas para enriquecer o estudo, já que a comparação entre as diferentes energias de soldagem já obtiveram resultados satisfatórios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TELLES, Pedro Carlos da Silva. Materiais para Equipamentos de Processo. 6.ed. Rio de Janeiro; Interciência, 2003, 3-7p.
- [2] GENTIL, V. Corrosão, 5.ed. Rio de Janeiro, LTC, 2008.
- [3] DAVIS, J.R. Stainless Steel-ASH Specialty Handbook. ASH International. EUA. 2ª Edição, pp.iii, 1996.
- [4] REVISTA ESCOLA DE MINAS. Ouro Preto, V.60, n.1, Jan/Mar. 2007.
- [5] KARLSSON, L. Intermetallic Phase Precipitation in Duplex Stainless Steels and Weld Metals: metallurgy, Influence on Properties, Welding and Testing Aspects. WRC Bulletin. # 438, 1999.
- [6] LIPPOLD, J.C.; KOTECKI, D.J.; Welding Metallurgy of Stainless Steels. John Wiley & Sons. Hoboken, 2005.
- [7] NASCIMENTO, A.M. Obtenção por Tratamento a Laser e Caracterização de Compósito Superficial em Aços Inoxidáveis Duplex Fundidos. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Departamento de Engenharia de Materiais- Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- [8] MORENO. J.R.S. Degradação da Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Duplex, Devido ao Envelhecimento em Baixas Temperaturas por Tempos Prolongados. 2004.35f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- [9] <http://www.aczinox.com.br/curiosidades/ler/3/corrosao.html> Acesso: 29 de setembro de 2011 às 15h.
- [10] RAMÍREZ, A.J.L. 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. 1997.38f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade da São Paulo, São Paulo, 1997.

- [11] Wolyneć, S. Técnicas Eletroquímicas em Corrosão. 1.ed, São Paulo; Edusp, 2003, 119p.
- [12] GOMES, A.C.T. Análise de Corrosão e da Erosão- Corrosão do Aço Carbono em Meio com  $\text{NaHCO}_3$  e  $\text{CO}_2$ . 2005. 21p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Departamento em Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- [13] GEMELLI, E. Corrosão de Materiais Metálicos e Sua Caracterização. Rio de Janeiro, LTC, 2001, 42p.
- [14] MARQUES, G.C; OLIVEIRA, C.A.; SILVA, P.J.R; CARDOSO, J.C.F. Utilização de Técnica Eletroquímica na Caracterização do Biodiesel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2009, Curitiba, Minas Gerais.
- [15] WAJNER, E; BRANDI, S.D; MELLO, F.D.H. Soldagem, Processos e Metalurgia. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA. 1992.
- [16] CHIAVERINI, V. Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas. São Paulo, ABM, 2003.
- [17] MARCELINO, M.A.; SOBRAL, A.V.C. Caracterização Microestrutural e de Corrosão do Aço Inoxidável Duplex. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 2002, Salvador – Bahia.
- [18] MARTINS, M.; CASTELETTI, L.C.; HAR, P.L.T. Caracterização Microestrutural e Comportamento à Corrosão do Aço Inox Superduplex ASTH A890 GRGA. In: CONGRESSO ANUAL DA ABH, 2004, São Paulo.
- [19] BOTTON, T. Estudo Comparativo da Resistência à Corrosão em Meio Ácido e em Meio Contendo Cloreto dos Aços Inoxidáveis UNS S44400, UNS S30403 e UNS S31603, Obtidos por laminação a Quente. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [20] REVISTA SOLDAGEM & INSPEÇÃO. Ano 6 n.3. Boehler Thyssen Técnica de Soldagem LTDA. Corrosão Intergranular em Juntas Soldadas - Parte 1.
- [21] NILSSON, J-O, Super Duplex Stainless Steels. Materials Science and Technology, vol.8, pp.685-700, Agosto 1992.