

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

Bruna Almeida Brito Fernandes

Junções 304/308L: Resistência à Corrosão por Pite

São Paulo  
2013

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

Bruna Almeida Brito Fernandes

Junções 304/308L: Resistência à Corrosão por Pite

Trabalho de Formatura  
apresentado à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo.

Departamento de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Neusa  
Alonso-Falleiros

São Paulo  
2013

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, namorado e amigos pelo apoio recebido.

Um agradecimento especial ao Cauê Pavoni, por ajudar a preparar os corpos de prova.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP.

Muito obrigada também ao Rafael Maia, Lívio da Silva Nunes e José Wilmar Calderón, por terem me ajudado com as inúmeras experiências.

Por fim, agradeço a professora Neusa Alonso-Falleiros pela orientação neste trabalho.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Equipamento para soldagem com arame tubular (Widgery, 1994) .....	13
Figura 2: Visualização e espessura da ZAC .....	15
Figura 3 - Esquema de um Pite (Alonso-Falleiros, 2012).....	17
Figura 4: Curva de polarização (Sedriks, 1996) .....	20
Figura 5: Representação esquemática do método potencioscópico para o levantamento de uma curva de polarização experimental (Wolyniec, 2003) .....	22
Figura 6 - Chapa de aço inoxidável 304 após a soldagem com consumível 308L.....	29
Figura 7 - Esquema de preparação do corpo de prova utilizado na Prática A da norma ASTM A262 .....	31
Figura 8: Corpo de prova para ataque metalográfico segundo a Prática A da norma ASTM A262 .....	32
Figura 9: Célula utilizada no ataque eletroquímico.....	33
Figura 10: Potenciómetro utilizado no ataque eletroquímico .....	33
Figura 11 - Esquema de preparação dos corpos de prova utilizados no ensaio de Imersão em Cloreto Férrico.....	34
Figura 12: Interior do recipiente e disposição dos corpos de prova para ensaio de Imersão em Cloreto Férrico.....	35
Figura 13 - Esquema de preparação dos corpos de prova utilizados para o levantamento das Curvas de Polarização Potenciodinâmica.....	36
Figura 14: Sistema para realização do ensaio de polarização potenciodinâmica .....	37
Figura 15: Micrografia do cordão de solda para realização da prática A sem ataque. Aumento 100x .....	38
Figura 16: Corpo de prova após ataque com ácido oxálico. Aumento 0,65x.....	39
Figura 17 - Definição das regiões estudadas .....	39
Figura 18: Região limpa. Aumento 200x .....	40
Figura 19: Região de precipitação de carbonetos distante 2-3mm do cordão de solda. Aumento 100x .....	40
Figura 20: Região de precipitação de carbonetos distante 2-3mm do cordão de solda. Aumento 200x .....	41
Figura 21: Região de precipitação de carbonetos distante 2-3mm do cordão de solda. Aumento 500x .....	41

Figura 22: Região de precipitação de carbonetos distante 4-5mm do cordão de solda. Aumento 100x .....	42
Figura 23: Região de precipitação de carbonetos distante 4-5mm do cordão de solda. Aumento 200x .....	42
Figura 24: Região não afetada. Aumento 100x .....	43
Figura 25: Região não afetada. Aumento 200x .....	43
Figura 26: Região não afetada. Aumento 500x .....	44
Figura 27: Comparação entre os resultados de taxa de corrosão.....	47
Figura 28: Pite formado em ensaio de imersão em cloreto férrico.....	48
Figura 29: Superfície do corpo de prova 1 após ensaio de imersão em cloreto férrico. Presença do filme que abriga o pite e após a remoção do filme .....	48
Figura 30: Superfície do corpo de prova 2 após ensaio de imersão em cloreto férrico. Presença do filme que abriga o pite e após a remoção do filme .....	49
Figura 31: Superficie do corpo de prova 3 após ensaio de imersão em cloreto férrico. Presença do filme que abriga o pite e após a remoção do filme .....	49
Figura 32: Curvas de polarização potenciodinâmica para o metal de base .....	50
Figura 33: Curvas de polarização potenciodinâmica para a ZAC .....	50
Figura 34 - Curvas de polarização potenciodinâmica para o cordão de solda .....	51
Figura 35: Pite formado em ensaio de polarização potenciodinâmica. Aumento 100x .....	52
Figura 36: Pite formado em ensaio de polarização potenciodinâmica. Aumento 200x .....	52

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Composição química do aço AISI 304, (Schweitzer, 2007).....	25
Tabela 2: Composição química do aço AISI 308L, (Schweitzer, 2007) .....	26
Tabela 3: Composição química das chapas de aço inoxidável austenítico.....	28
Tabela 4: Dimensões das chapas antes da soldagem .....	29
Tabela 5: Dimensão das amostras após soldagem.....	29
Tabela 6: Composição química do consumível.....	30
Tabela 7: Dimensões e massa para os corpos de prova do ensaio de imersão em cloreto férrico .....	34
Tabela 8: Perda de massa dos corpos de prova no ensaio de imersão em cloreto férrico .....	45
Tabela 9: Taxa de corrosão para os corpos de prova ensaiados .....	45
Tabela 10: Composição química da liga 1 (Kobayashi, 1985).....	46
Tabela 11: Comparação entre os resultados de taxa de corrosão obtidos neste trabalho com os resultados obtidos por (Kobayashi, 1985) e (Zanetic, 2001).....	46

## **RESUMO**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a resistência à corrosão de uma chapa de aço inoxidável austenítico, designado como aço AISI 304, soldada pelo processo de arco elétrico com arame tubular (“FCAW” – *Flux Cored Arc Welding*), utilizando um consumível de composição química idêntica ao aço inoxidável AISI 308L, cuja norma corresponde à *AWS A 5.22 E 308LT1-4/1*.

Para investigar as propriedades corrosivas deste material nas condições descritas, foram confeccionados corpos de prova para a realização de três ensaios, correspondentes ao ataque metalográfico segundo a *Prática A* da *norma ASTM A262*; levantamento de curvas de polarização potenciodinâmica e ensaio de imersão em cloreto férrego conforme *Método A* da *norma ASTM G48 - 03*.

Conclui-se, a partir dos resultados obtidos, que a operação de soldagem causou alteração na resistência à corrosão das chapas de aço inoxidável AISI 304, indo ao encontro do verificado na literatura.

**Palavras-chave:** Corrosão por pite. Precipitação de carbonetos. Aço inoxidável austenítico. Solubilização.

## **ABSTRACT**

This study aims to evaluate the corrosion resistance of austenitic stainless steel sheets, designated as AISI 304 steel, welded by FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), using a consumable of chemical composition similar to AISI 308L, which corresponds to the standard *AWS A 5.22 E 308LT1 - 4/1*.

To investigate the corrosive properties of this material under the described conditions, specimens were prepared to perform three tests, which corresponds to the metallographic etching according to *ASTM A262 – Practice A*; the method of obtaining potentiodynamic polarization curves and the ferric chloride immersion test according to *ASTM G48 – 03 Method A*.

It is concluded, from the obtained results, that the welding operation affected the corrosion resistance of AISI 304 stainless steel sheets, which is in accordance with the literature.

**Keywords:** Pitting corrosion. Carbides precipitation. Austenitic stainless steel. Solubility.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
2.1 Soldagem com Arame Tubular .....	12
2.2 Regiões formadas após o processo de soldagem .....	14
2.3 Corrosão .....	15
2.4 Corrosão por Pite .....	16
2.5 Corrosão intergranular .....	18
2.6 Passividade.....	19
2.7 Levantamento das Curvas de Polarização Experimentais .....	21
2.8 Aços Inoxidáveis.....	22
2.9 AISI 304 .....	25
2.10 AISI 308L .....	26
2.11 Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos .....	27
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
3.1 Confecção dos Corpos de Prova .....	28
3.2 Prática A da Norma ASTM A262.....	30
3.3 Ensaio de Imersão em Cloreto Férrico.....	34
3.4 Curvas de Polarização Potenciodinâmica .....	35
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>38</b>
4.1 Prática A da Norma ASTM A262.....	38
4.2 Ensaio de Imersão em Cloreto Férrico.....	45
4.3 Curvas de Polarização Potenciodinâmica .....	50
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No presente trabalho deseja-se estudar a resistência à corrosão de uma chapa de aço AISI 304 soldada com consumível de composição química idêntica ao aço AISI 308L, cuja norma corresponde à AWS A 5.22 E 308LT1-4/1. O processo de soldagem escolhido para tanto foi a soldagem com arame tubular (“FCAW” – *Flux Cored Arc Welding*). Confeccionamos duas chapas de aço soldadas por este método para produzir os corpos de prova necessários para os ensaios.

Para investigar as propriedades corrosivas deste material nas condições descritas, realizamos três ensaios com os corpos de prova, correspondentes ao ataque metalográfico segundo a prática A da norma ASTM A262, ao levantamento das curvas de polarização potenciodinâmica e ao ensaio de imersão em cloreto férreo. O ataque metalográfico segundo a prática A da ASTM A262 tem como objetivo indicar a existência de fases ricas em carboneto de cromo, verificando a possível sensitização deste material durante o processo de soldagem, bem como revelar detalhes da microestrutura do metal de base e do cordão de solda. As curvas de polarização potenciodinâmica, levantadas para regiões do cordão de solda, do metal de base e da região afetada pelo calor (“ZAC”) durante o processo de soldagem, nos indicarão o potencial de pite para estas regiões, revelando se há alguma parte mais suscetível a este tipo de corrosão. Por fim, o ensaio de imersão em cloreto férreo irá mostrar a taxa de corrosão deste material, que compararemos com outros valores da literatura para investigar se o processo de soldagem exerceu alguma influência nesta propriedade.

Ao final deste trabalho, deseja-se concluir se o processo de soldagem para este material prejudicou suas propriedades corrosivas, analisando os motivos e indicando medidas preventivas caso haja queda na qualidade do mesmo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Soldagem com Arame Tubular

A soldagem com arame tubular (“FCAW” – *Flux Cored Arc Welding*) é um processo em que a união entre metais é obtida através de arco elétrico entre o eletrodo e a peça a ser soldada. Segundo (Quites, 2002), a proteção do arco neste processo é feita pelo fluxo interno do arame, podendo ser complementada ou não por um gás de proteção. Além da função de proteger o arco elétrico da contaminação pela atmosfera, o fluxo interno do arame pode também atuar como desoxidante através da escória que se forma durante a soldagem, acrescentar elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco.

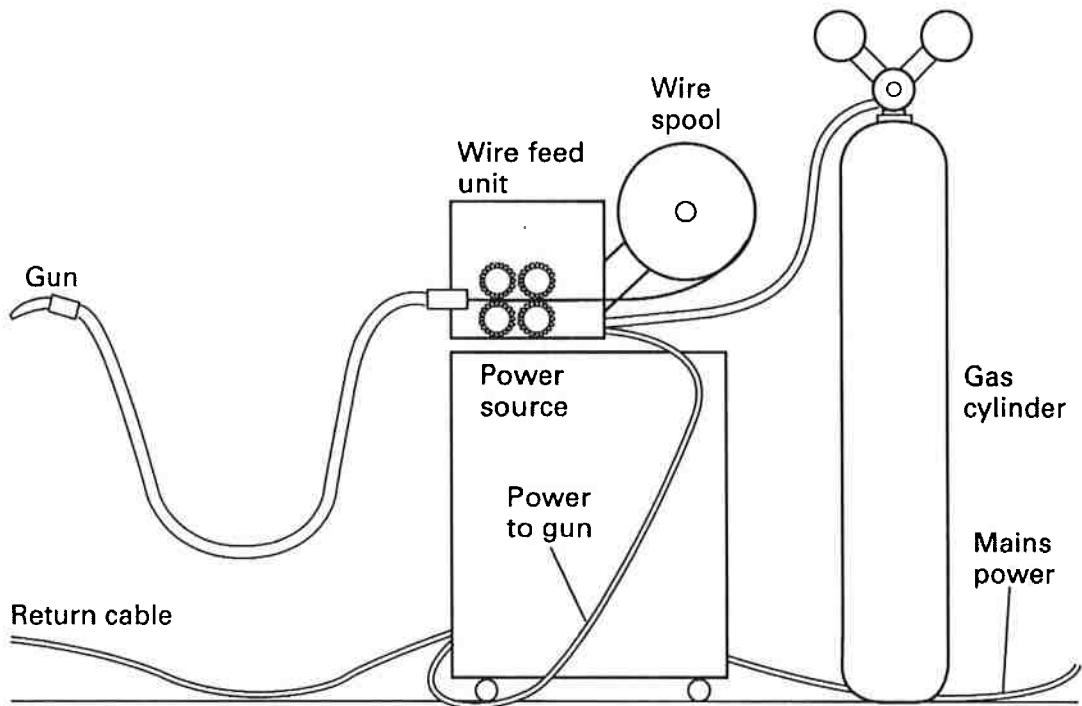
A escória resultante do processo de soldagem, além de atuar metalurgicamente (isto é, tem o mesmo princípio da escória siderúrgica), protege o cordão de solda da oxidação atmosférica durante a sua solidificação.

O fluxo interno ao arame gera uma grande versatilidade na operação de soldagem, permitindo ao soldador boa estabilidade elétrica do arco em posições de soldagem delicadas. Outra vantagem de se utilizar o fluxo é a possibilidade de ajustar a composição química do consumível para atender às especificações exigidas. É possível, por exemplo, fabricar consumíveis com composição química de aços inoxidáveis utilizando fita de aço carbono, apenas modificando a composição química do fluxo. Contudo, o fluxo possui a desvantagem de gerar escória durante a operação de soldagem, exigindo atenção extra do soldador para remover completamente a escória do cordão. Caso não haja este cuidado e o soldador efetue um passe de solda sobre alguma escória remanescente, ocorrerá um defeito conhecido como “inclusão de escória”, que é quando a escória formada durante o processo de soldagem fica retida no cordão, deixando um corpo estranho de composição química adversa, que comprometerá as propriedades mecânicas do cordão.

O gás de proteção usualmente utilizado com FCAW é o dióxido de carbono ou uma mistura deste com argônio. Os gases hélio e oxigênio podem também estar presentes em misturas a serem utilizadas com FCAW. O uso de mistura de gases no processo FCAW combina as

vantagens separadas de dois ou mais gases. Por exemplo: a maior quantidade de gás inerte aumenta a eficiência de transferência dos desoxidantes que estão no fluxo do arame. Por outro lado, a penetração do cordão é reduzida. Utilizando uma mistura com um gás que tenha a propriedade de aumentar a penetração, se obtém um gás de proteção que atende a todos os requisitos necessários. Um caso comum é o do Argônio, que é capaz de proteger a poça de fusão em todas as temperaturas de soldagem. Sua presença em quantidades suficientes resulta na diminuição da oxidação comparado à proteção com CO<sub>2</sub> puro (100%) (Quites, 2002).

A Figura 1 apresenta um esquema do equipamento utilizado para a soldagem com arame tubular. A energia é fornecida, geralmente, por um transformador-retificador, com a tensão variando entre 15 e 35 V. A bobina contendo o consumível de soldagem é conectada a uma unidade alimentadora, a qual controlará a velocidade com que o arame será alimentado. O cilindro de gás, acoplado ao equipamento, possui um regulador de vazão que controla a quantidade de gás fornecida ao processo.



**Figura 1: Equipamento para soldagem com arame tubular (Widgery, 1994)**

## 2.2 Regiões formadas após o processo de soldagem

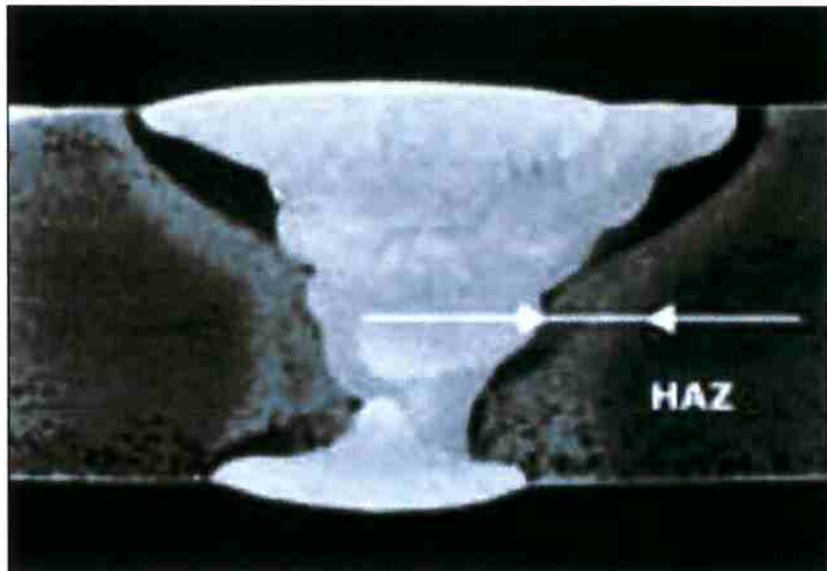
### Cordão de Solda

O cordão de solda corresponde à região de depósito do consumível de soldagem, após sua fusão devido ao calor gerado pelo arco elétrico. A microestrutura do cordão de solda é normalmente caracterizada por uma estrutura bruta de fusão, com grãos refinados, de pequeno tamanho quando comparados à microestrutura metálica de materiais que não sofreram intenso tratamento térmico. Observa-se também a presença de dendritas formadas durante o rápido resfriamento.

### Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

A zona afetada pelo calor (ZAC) corresponde à área, em torno do metal de solda, que sofrerá influências do calor induzido devido à operação de soldagem (Figura 2). A tenacidade e a resistência à corrosão podem ser afetadas pelo ciclo térmico durante a soldagem nesta região, resultando em propriedades diferentes se comparadas com o restante do material.

A determinação da extensão da ZAC pode ser feita através de microscopia ótica, possibilitando a identificação da região afetada. Em geral, o efeito do ciclo térmico é menos tolerado em aços inoxidáveis alta liga do que em outras classes de aços inoxidáveis. Desta forma, a soldagem de aços inoxidáveis alta liga requer um controle mais rígido para evitar uma ZAC de grandes proporções.



**Figura 2: Visualização e espessura da ZAC**

### Metal Base

A região denominada metal base corresponde à porção do material que não sofreu alteração microestrutural devido à intensa variação de temperatura durante a operação de soldagem. Esta região preserva as características da microestrutura original, bem como suas propriedades de resistência mecânica, resistência à corrosão e composição química.

### **2.3 Corrosão**

Existem três principais razões para se preocupar e estudar o fenômeno da corrosão, as quais são: segurança, economia e conservação. Uma vez que se consiga prever este fenômeno, é possível evitar acidentes, perdas financeiras ou ainda aumentar a expectativa de vida de materiais utilizados, qualquer que seja a sua aplicação.

A corrosão é a degradação das propriedades ou a perda de massa de um material ao longo do tempo devido aos efeitos ambientais. É natural a tendência dos elementos que compõem um

material retornarem ao seu estado termodinâmico mais estável. Para a maioria dos materiais metálicos, isso significa a formação de óxidos, sulfetos ou outros compostos metálicos básicos geralmente considerados como minérios. Felizmente, a taxa com que a maioria desses processos ocorre é devagar o suficiente para possibilitar a utilização dos diversos materiais em suas aplicações.

Os processos de corrosão seguem as leis básicas da termodinâmica; além disso, ela é uma reação eletroquímica. Em condições controladas é possível medi-la, repeti-la e prevê-la. Como é regida por reações no nível atômico, a corrosão pode agir em regiões isoladas, em regiões uniformes pela superfície ou resultar em danos microscópicos sub-superficiais (Schweitzer, 2007).

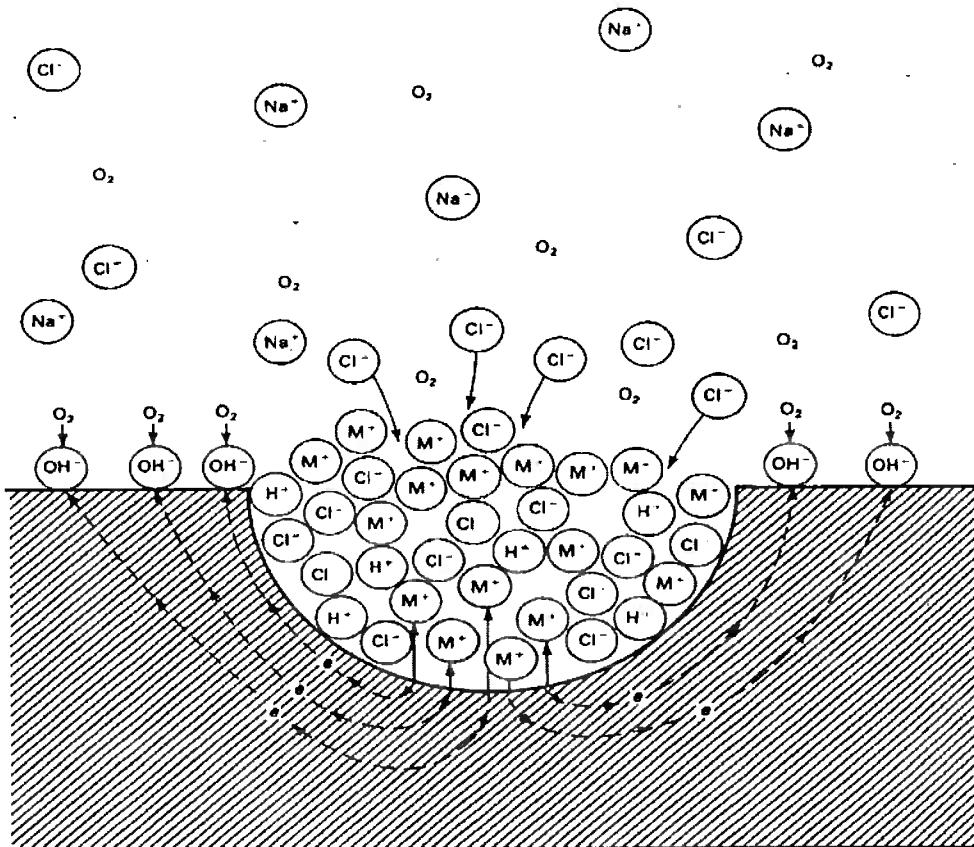
## 2.4 Corrosão por Pite

A corrosão por pite está relacionada com uma descontinuidade localizada da camada passiva, ocorrendo em regiões mais suscetíveis ao ataque quando em contato com ambientes corrosivos. A nucleação do pite ocorre quando o metal se encontra em contato com um meio agressivo, gerando potenciais capazes de quebrar a camada passiva (Schweitzer, 2007). O íon mais comum capaz de nuclear um pite é o cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), devido ele ser mais presente na atmosfera do que outros que possuem essa mesma característica. A concentração crítica de íons cloretos adsorvidos na superfície do material faz com que haja a ruptura das ligações da película passiva, gerando uma região anódica localizada (Alonso-Falleiros, 2012).

A corrosão por pite de fato se inicia após a quebra da camada passiva, chamada “etapa de crescimento”, pois forma-se uma pilha de corrosão entre a superfície externa e o interior da cavidade do pite. Essa pilha é formada devido à presença de oxigênio e de íons agressivos em diferentes concentrações, dentro e fora do pite (Schweitzer, 2007), gerando uma sequência de reações (Alonso-Falleiros, 2012):

- Dissolução:  $\text{Me} = \text{Me}^{+z} + z\text{e}^-$
- Reação catódica:  $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$
- Migração de íons  $\text{Cl}^-$
- Acidificação:  $\text{Me}^{+z}\text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O} = \text{MeOH} + \text{H}^+\text{Cl}^-$
- Mais dissolução – nova migração de  $\text{Cl}^-$  – mais acidificação.
- outro agente oxidante:  $\text{Fe}^{+3}$

A Figura 3 apresenta um desenho esquemático de um Pite (Alonso-Falleiros, 2012):



**Figura 3 - Esquema de um Pite (Alonso-Falleiros, 2012)**

A relação entre a superfície do ânodo e do cátodo é pequena. Logo, a velocidade de corrosão pode aumentar rapidamente, gerando pites bastante profundos (Sedriks, 1996).

A corrosão por pite é caracterizada pelas seguintes características (Schweitzer, 2007):

1. O ataque por pite se espalha por áreas pequenas e discretas. Pites podem aparecer tanto isolados como próximos de outros pites, fazendo com que a aparência da área de ataque seja rugosa;
2. Pites geralmente se iniciam nas superfícies dispostas horizontalmente dos equipamentos e crescem na direção da gravidade;
3. Pites demoram bastante tempo até se tornarem visíveis;
4. As condições presentes no interior do pite fazem com que a corrosão se auto-propague sem nenhum estímulo externo. Uma vez iniciado, o pite cresce e aumenta cada vez mais a taxa de corrosão;
5. Condições de solução estagnada levam à formação de pites;
6. Aços inoxidáveis e ligas de alumínio são particularmente suscetíveis à corrosão por pite; aços carbono são mais resistentes à corrosão por pite do que os aços inoxidáveis. A maior causa de falha em componentes de aço inoxidável ocorre em ambiente ácido contendo solução com cloretos. Pites em alumínio e aço carbono aparecem em soluções neutras e alcalinas contendo íons cloretos.

## 2.5 Corrosão intergranular

A corrosão intergranular ocorre entre os contornos de grãos da estrutura metálica. Os principais motivos para ocasionar este tipo de corrosão são:

- Concentração de impurezas nos contornos de grão: O acúmulo de impurezas no contorno de grão pode iniciar um processo de corrosão nesta região. Isto ocorre devido à formação de um filme contínuo de impurezas que tende a apresentar um comportamento anódico em relação aos grãos do material, podendo eventualmente ativar o mecanismo de corrosão galvânica (ARMIJO, 1968);

- Enriquecimento/empobrecimento de elementos de liga: A difusão de elementos de liga para o contorno de grão pode gerar corrosão intergranular devido ao gradiente de composição química, acarretando a formação de regiões enriquecidas e empobrecidas em elementos de liga, responsáveis por conferir maior resistência corrosiva, criando sítios preferenciais para o ataque eletroquímico;
- Precipitação de fases: Através de ciclos térmicos variados, pode ocorrer a precipitação de elementos de liga nos contornos de grãos, mais comumente na forma de carbonetos para aços inoxidáveis, gerando uma região empobrecida em elementos de liga, resultando na corrosão.

A corrosão intergranular possui a característica de envolver todo o grão, ocasionando a perda deste com a matriz metálica (Alonso-Falleiros, 2012). O processo corrosivo acaba por dissolver uma pequena área, porém a perda de massa é relativamente grande devido ao desprendimento dos grãos envolvidos pela corrosão (Alonso-Falleiros, 2012).

## 2.6 Passividade

De acordo com a Sociedade Americana de Materiais e Testes (ASTM G 15-83), passividade é definida como o estado da superfície do metal caracterizado por baixas taxas de corrosão em regiões fortemente oxidante para metais.

Segundo (Sedriks, 1996), uma maneira interessante de compreender a passividade de aços inoxidáveis é através do diagrama potencial *versus* densidade de corrente, comumente conhecido como “curva de polarização”. Ao aplicarmos uma diferença de potencial no aço inoxidável, registrando os valores de densidade de corrente, encontraremos resultados que revelam um comportamento inesperado, como mostra a Figura 4:

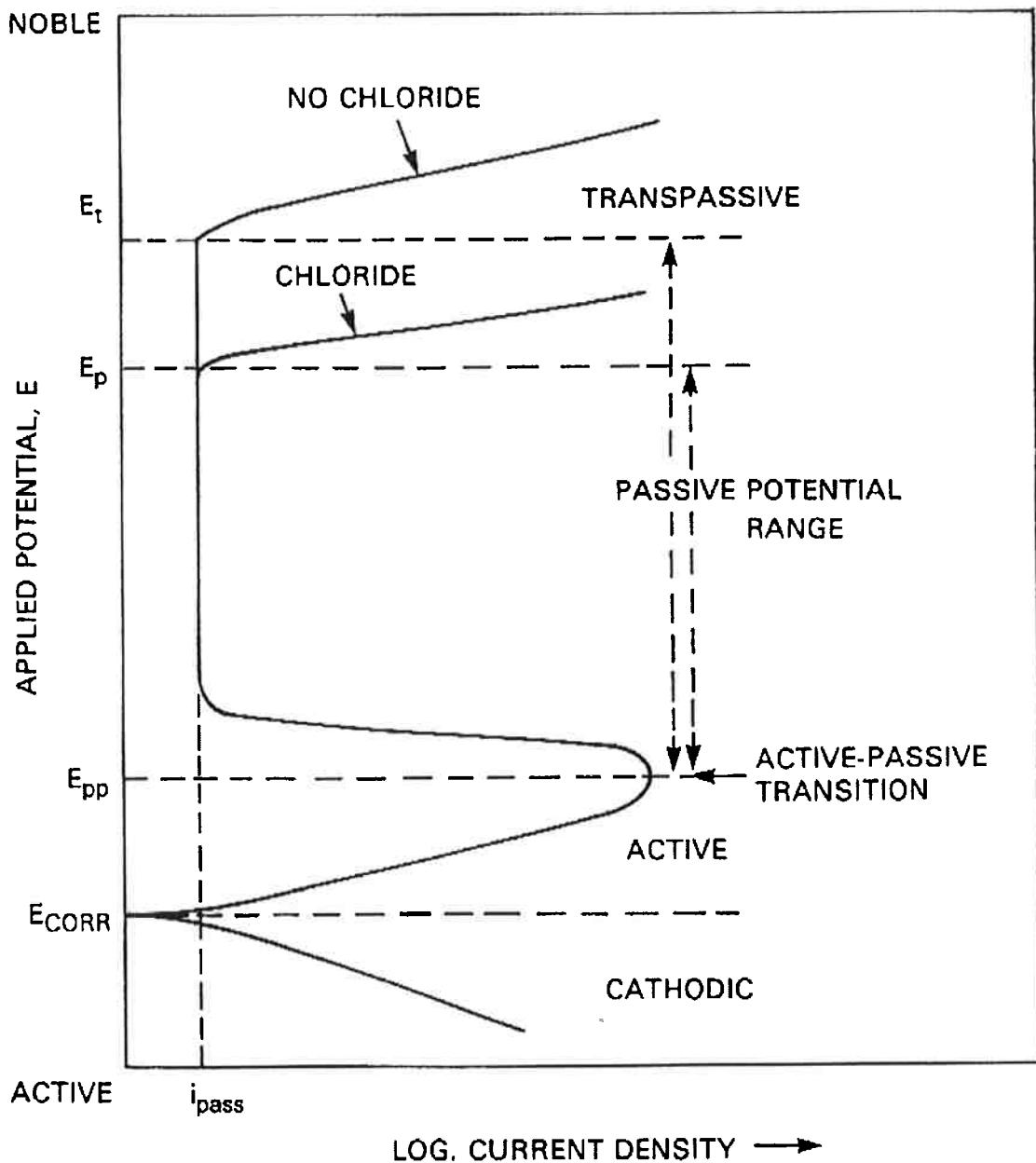


Figura 4: Curva de polarização (Sedriks, 1996)

Primeiro, a densidade de corrente deixa de aumentar linearmente com o potencial aplicado, até atingir o  $E_{pp}$  (primeiro potencial de passivação), onde a densidade de corrente começa a diminuir. O início deste declínio marca o começo da região chamada de “transição ativa-passiva”. Acima do  $E_{pp}$ , o valor de densidade de corrente diminui a um valor mínimo, conhecido como  $i_{pass}$  (densidade de corrente passiva), permanecendo neste valor para uma vasta gama de potenciais. A faixa de valores de potencial em que a corrente permanece com o

valor de  $i_{\text{pass}}$  é chamada de “região passiva” e sua extensão define a passividade para os aços inoxidáveis. A taxa de corrosão na região passiva costuma ser muito baixa.

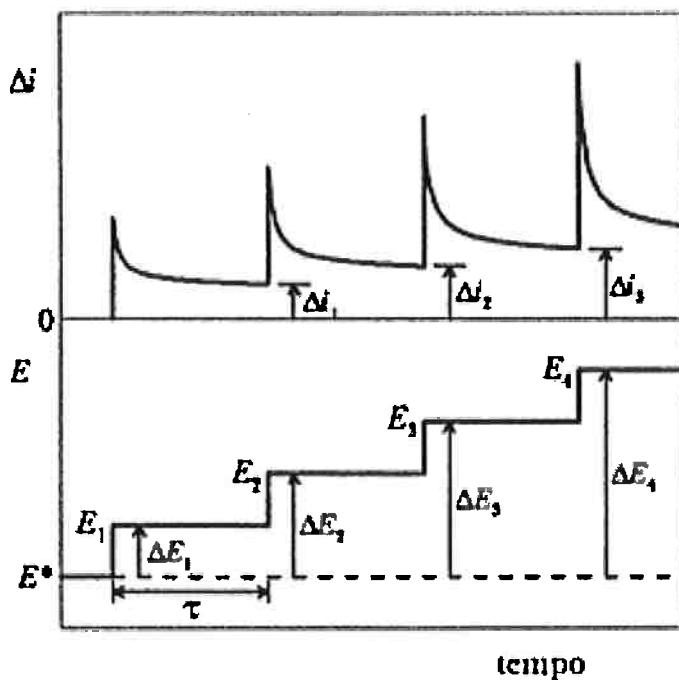
## 2.7 Levantamento das Curvas de Polarização Experimentais

Duas das técnicas convencionais para se levantar curvas de polarização para materiais metálicos são o Método Potencioscópico e o Método Potenciodinâmico.

(Wolyniec, 2003) descreve o Método Potencioscópico pela aplicação de valores discretos, crescentes ou decrescentes, ao potencial de eletrodo E, determinando a correspondente variação de corrente.

A Figura 5 apresenta um esquema do levantamento de uma curva de polarização pelo método potencioscópico a partir do potencial de corrosão  $E^*$ . Observamos que para o aumento de potencial  $E_1$ , temos uma leitura de variação de corrente  $\Delta i_1$ . O processo é repetido para diferentes valores até atingir o potencial desejado.

No Método Potenciodinâmico, a variação do potencial ocorre de forma contínua, bem como a leitura da variação de corrente. O declive da reta de variação do potencial de eletrodo com o tempo é chamada de velocidade de varriamento.



**Figura 5:** Representação esquemática do método potenciostático para o levantamento de uma curva de polarização experimental (Wolyniec, 2003)

## 2.8 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro que contém no mínimo cerca de 11% de cromo em sua composição. Essa quantidade de cromo previne a formação de ferrugem em atmosfera não poluída; sendo essa característica que fez surgir a expressão “aço inoxidável”. A resistência à corrosão ocorre devido à formação de uma película superficial muito fina, contínua e aderente, geralmente composta de óxidos, chamada de película passiva, que é capaz de se regenerar em uma grande variedade de ambientes.

Hoje em dia existem diversas ligas pertencentes ao grupo dos aços inoxidáveis, e a cada ano surgem novas ligas ou modificações das já existentes – em alguns aços inoxidáveis, a composição de cromo já chega a 30%. Além disso, muitos outros elementos são adicionados para fornecer propriedades específicas ou facilitar o seu processo fabricação, como por exemplo: níquel, nitrogênio e molibdênio são adicionados para garantir resistência à corrosão; carbono, molibdênio, nitrogênio, titânio, alumínio e cobre para dar resistência mecânica;

enxofre e selênio para conferir usinabilidade; e níquel para oferecer conformabilidade e resistência à fratura (Sedriks, 1996).

Os vários tipos de aços inoxidáveis podem ser divididos em cinco principais classes, a depender das principais fases presentes no material ou da propriedade de endurecer por precipitação. São elas (Schweitzer, 2007):

#### Aços Inoxidáveis ferríticos:

O nome deriva da análoga fase ferrita e possuem estrutura atômica cúbica de corpo centrado. Eles são ferro-magnéticos e possuem propriedades mecânicas similares aos aços-carbono, porém são menos dúcteis. A quantidade de cromo na liga ajuda a melhorar a resistência à corrosão em moderada e elevada temperatura e varia de 11% (suficiente para prevenir ferrugem em fraca atmosfera corrosiva) a 28% (ambientes oxidantes severos).

#### Aços inoxidáveis martensíticos:

São desenvolvidos a partir de um determinado intervalo de composição baseados nos aços inoxidáveis ferríticos (11% - 13% de cromo normalmente). A classe martensítica é assim chamada porque quando aquecida acima da temperatura crítica de 870°C e resfriada rapidamente, a estrutura metalúrgica martensita é obtida. Na condição endurecida, eles possuem altas dureza e resistência mecânica, mas para obterem boas ductilidade e resistências à corrosão e ao impacto, é dado um tratamento de alívio de tensão ou um revestimento, normalmente no intervalo de 149°C a 371°C. Eles são endurecíveis devido à transformação de fase de cúbico de corpo centrado para tetragonal de corpo centrado. Os aços inoxidáveis martensíticos são ferro-magnéticos e, comparando com as outras classes, são os que possuem maior resistência mecânica (porém, em altos níveis de resistência, há falta de ductilidade).

### Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação:

Essa classe de aço inoxidável utiliza um tratamento térmico para precipitar intencionalmente fases que causam o endurecimento da liga. O princípio do endurecimento por precipitação é uma solução sólida supersaturada que muda sua estrutura metalúrgica pelo processo de envelhecimento. A principal vantagem desses aços é poder fabricar produtos em um estado mais dúctil e depois passá-los por um ciclo térmico relativamente baixo ( $462^{\circ}\text{C} - 620^{\circ}\text{C}$ ) para aumentar a resistência mecânica. Portanto, os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação possuem relativamente boa resistência à corrosão e ductibilidade, além de alta resistência mecânica.

### Aços inoxidáveis duplex:

Os aços inoxidáveis duplex contêm aproximadamente 50% de austenita e 50% ferrita, que oferecem uma melhor resistência à corrosão. Essas ligas possuem quantidade relativamente alta de cromo, além de quantidades de níquel e outros austenitzantes suficientes para se chegar a 50% de fase austenita na estrutura.

Os aços inoxidáveis duplex contém molibdênio como elemento de liga, responsável por melhorar a resistência à corrosão em ambientes contendo cloreto. O molibdênio reduz a suscetibilidade de formação de pites por cloreto. As ligas de aço inoxidável duplex geralmente oferecem melhores valores de resistência mecânica do que os valores típicos encontrados nas ligas austeníticas.

Os aços inoxidáveis duplex não são tão dúcteis quanto à família dos aços austeníticos. A soldagem deste tipo de aço requer maiores cuidados do que a soldagem com ligas de aço inoxidável austenítico devido à maior tendência de gerar segregação e sensitização devido à variação térmica sofrida pelo material.

### Aços Inoxidáveis Austeníticos:

Os aços inoxidáveis austeníticos existem à temperatura ambiente devido à adição de elementos de liga estabilizantes de austenita, como o níquel e o manganês. Possuem estrutura cúbica de face centrada e valores de propriedade mecânica similar aos dos aços médio carbono.

Esta família de aços inoxidáveis é a mais utilizada atualmente. Esse material não é magnético e não é endurecível por tratamento térmico; entretanto, pode sofrer endurecimento a frio.

Após a adição de 18% de cromo, que promove a resistência à corrosão deste material, é adicionada uma quantidade de aproximadamente 8% de níquel para promover a transição de ferrita para austenita. Este elemento de liga é adicionado para formar a fase austenita, que possui uma boa tenacidade, conformabilidade e soldabilidade. A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos é bastante melhorada com a adição de molibdênio e titânio.

### 2.9 AISI 304

O aço tipo AISI 304 está entre os aços inoxidáveis mais utilizados nas aplicações em que são exigidas uma boa resistência à corrosão e uma boa conformabilidade (Sedriks, 1996). Apesar de possuir grande resistência à corrosão, esse aço não é o mais resistente entre os aços inoxidáveis austeníticos (Série 300). A composição química do 304 encontra-se na Tabela 1 (Schweitzer, 2007).

**Tabela 1: Composição química do aço AISI 304, (Schweitzer, 2007)**

Elemento	%
C (máx)	0,08
Mn (máx)	2,00
Si (máx)	1,00
Cr	18,00 - 20,00
Ni	8,00 - 12,00

O tipo 304 está sujeito à corrosão intergranular, resultante de precipitação de carbonetos – segundo (Schweitzer, 2007), a soldagem pode ocasionar este fenômeno. Porém, soldadores experientes podem utilizar técnicas de soldagem apropriadas para evitar este problema. Dependendo dos agentes corrosivos presentes no ambiente de aplicação do material, os efeitos dos carbonetos precipitados podem ou não representar problemas.

Se a quantidade de carbono da liga não exceder 0,03%, a precipitação de carbonetos pode ser controlada – para esta liga com baixa quantidade de carbono utiliza-se a classificação 304L, que pode ser usada para soldagem sem perigo de precipitar carbonetos. Os aços tipo 304 e 304L apresentam, em geral, boa resistência à corrosão.

## 2.10 AISI 308L

A composição química do aço inoxidável tipo 308L está apresentada na Tabela 2. Nota-se que esta liga possui maiores quantidades de cromo e níquel do que o tipo 304/304L. Segundo (Schweitzer, 2007), em condições de recozimento, o aço tipo 308L apresenta maior limite de escoamento do que o tipo 304.

A resistência à corrosão do tipo 308L é levemente melhor do que a do tipo 304/304L.

**Tabela 2: Composição química do aço AISI 308L, (Schweitzer, 2007)**

Elemento	%
C (máx)	0,03
Mn (máx)	2,00
Si (máx)	1,00
Cr	22,00 - 24,00
Ni	12,00 -15,00

## 2.11 Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos

As soldagens de aços inoxidáveis austeníticos geralmente resultam em um metal de solda com microestrutura dendrítica e não homogênea, contendo uma pequena quantidade de ferrita delta, carbonetos  $M_{23}C_6$ , fase sigma, entre outros, além de uma grande segregação de elementos de liga para a interface entre as fases (Mudali, 2002). A ferrita delta, rica em cromo e molibdênio, formada durante a soldagem de aços inoxidáveis austeníticos, é necessária em um limite de até 10 números de ferrita para evitar trinca à quente e a microfissura dos componentes soldados.

Segundo (Mudali, 2002), a presença de ferrita delta acarreta na corrosão preferencial do metal de solda em determinados ambientes. Foi observada a nucleação preferencial de pites na interface austenita/ferrita delta ou no interior das dendritas formadas na fase austenita.

As propriedades corrosivas e mecânicas inferiores dos componentes soldados, quando comparados com o metal base, se dão devido ao ataque corrosivo preferencial à região com menos elementos de liga, interfaces segregadas, núcleo de dendritas e precipitados na interface do metal de solda.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os detalhes de como os ensaios foram conduzidos durante o trabalho, bem como apresentar os métodos de confecção dos corpos de prova para cada ensaio.

#### 3.1 Confecção dos Corpos de Prova

Para a realização dos ensaios neste trabalho, foram confeccionadas duas chapas de aço inoxidável 304 soldadas com consumível 308L. As chapas de aço foram doadas pela empresa Böhler Welding Group. A composição química deste material foi fornecida junto com a doação do material e se apresenta na Tabela 3:

**Tabela 3: Composição química das chapas de aço inoxidável austenítico**

Composição Química (%)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,048	0,328	1,36	0,023	0,012	18,47	7,99

Em princípio, dispunha-se de quatro chapas de aço inoxidável 304 provenientes de uma mesma corrida de dimensões especificadas na Tabela 4, denominadas chapas 1, 2, 3, 4 para melhor diferenciação. Estas chapas foram soldadas duas a duas aleatoriamente utilizando um consumível de composição química similar ao aço 308L, resultando em duas novas amostras. A Tabela 5 mostra as dimensões destas amostras após a soldagem, já a Figura 6 mostra uma das chapas após a sua confecção.

**Tabela 4: Dimensões das chapas antes da soldagem**

<b>Chapa</b>	<b>Altura</b> <b>(cm)</b>	<b>Largura</b> <b>(cm)</b>	<b>Espessura</b> <b>(cm)</b>
<b>1</b>	12,1	14,6	2
<b>2</b>	12,4	15,1	2
<b>3</b>	11,8	14,9	2
<b>4</b>	12,2	14,7	2

**Tabela 5: Dimensão das amostras após soldagem**

<b>Chapa</b>	<b>Altura</b> <b>(cm)</b>	<b>Largura</b> <b>(cm)</b>	<b>Espessura</b> <b>(cm)</b>
<b>Soldada</b>			
<b>1 com 2</b>	24,8	14,8	2
<b>3 com 4</b>	24,5	14,8	2

**Figura 6 - Chapa de aço inoxidável 304 após a soldagem com consumível 308L**

A soldagem foi realizada com consumível de diâmetro 1,2mm, utilizando como gás de proteção CO<sub>2</sub> apenas. A corrente utilizada nesse processo foi de 180A e a velocidade de saída do arame do equipamento foi de 9,5cm/s. O consumível utilizado na soldagem também foi fornecido pela Böhler Welding Group e sua composição química encontra-se na Tabela 6.

**Tabela 6: Composição química do consumível**

<b>Composição Química (%)</b>				
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
0,03	0,7	1,5	19,8	10,5

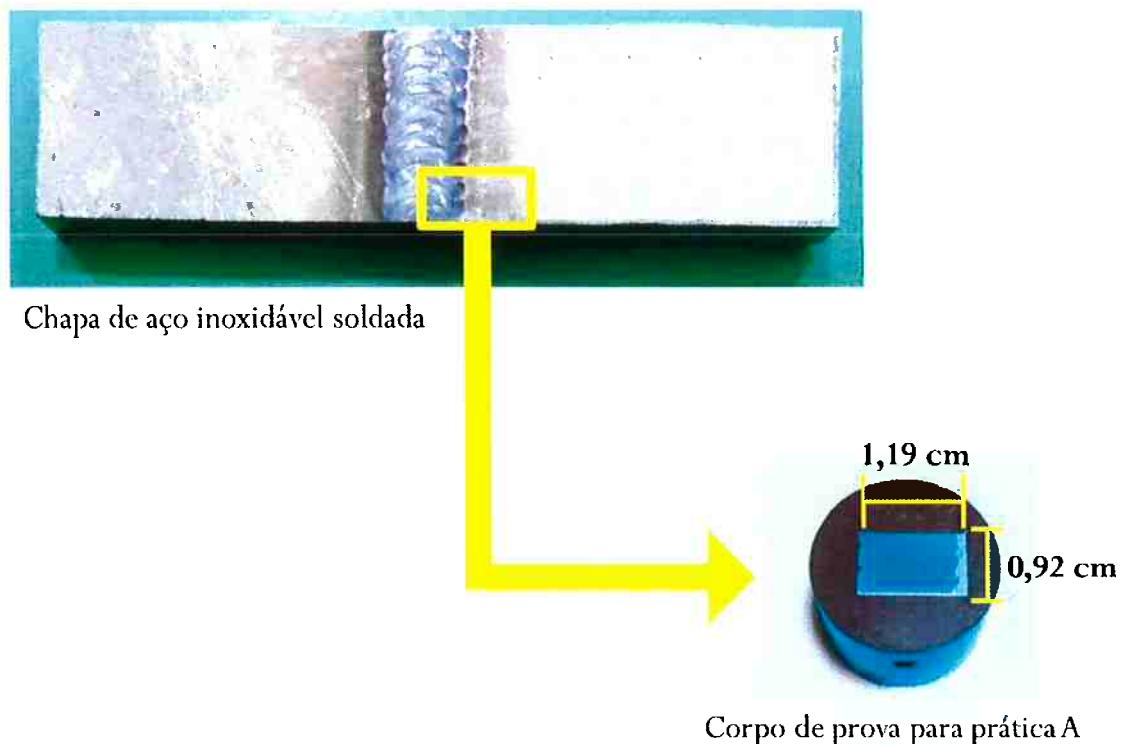
Após a soldagem, observamos que as duas amostras confeccionadas empenaram, o que atrapalharia a realização dos ensaios, pois necessitávamos que as superfícies dos corpos de prova estivessem planas para conduzir as experiências corretamente. A maneira encontrada para contornar este problema foi submeter todas as amostras a uma operação de desbastagem. Importante observar que a desbastagem é um processo de remoção de material da superfície sem elevar significativamente a temperatura dos materiais, não acarretando em mudanças nas propriedades das amostras devido a efeitos térmicos. Esta operação diminuiu a espessura das amostras.

A partir destas duas novas amostras foram confeccionados os corpos de prova necessários para a realização dos ensaios deste trabalho. Os ensaios são a Prática A da Norma ASTM A262, levantamento de Curvas de Polarização Potenciodinâmica e de Imersão em Cloreto Férrico conforme o Método A da norma *ASTM G 48 – 03*. A confecção dos corpos de prova para cada ensaio será detalhada nos próximos capítulos.

### **3.2 Prática A da Norma ASTM A262**

Para realizar este ataque metalográfico, foi preparado um corpo de prova a partir de uma das chapas de aço soldadas. Utilizando um disco de corte abrasivo, cortamos um pedaço de uma das chapas, resultando em uma peça de dimensões 0,92cm por 1,19cm. Este pedaço foi obtido a partir do meio do cordão de solda, a uma distância transversal de 1,19cm, resultando em

0,25cm de cordão e 0,94cm de metal base. Um esquema de onde foi obtido o corte pode ser visualizado na Figura 7. Esta peça foi então embutida em baquelite para prosseguir com o ataque. A amostra foi lixada com lixas #100, #240, #360 e #600 e polida em pasta de diamante 6 $\mu$ m, 3 $\mu$ m e 1 $\mu$ m. A Figura 8 mostra o corpo de prova preparado:



**Figura 7 - Esquema de preparação do corpo de prova utilizado na Prática A da norma ASTM A262**

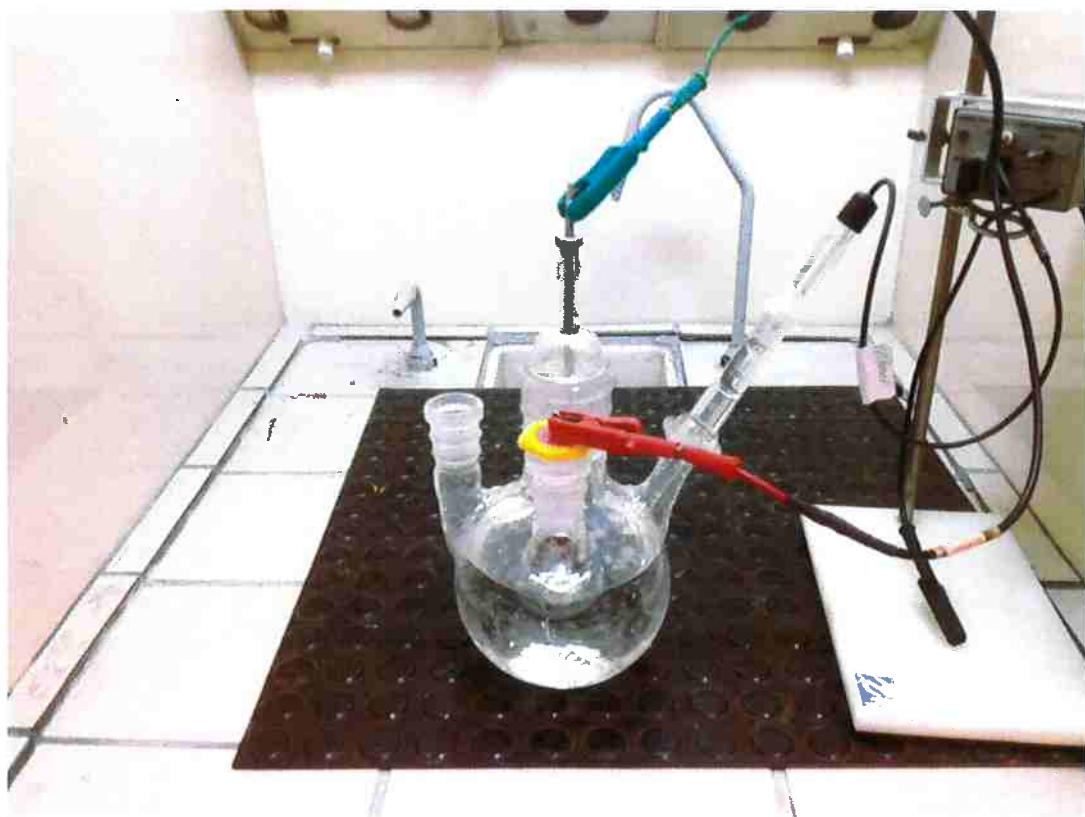


**Figura 8: Corpo de prova para ataque metalográfico segundo a Prática A da norma ASTM A262**

Para que fosse possível realizar este ataque, foi preciso fazer um furo rosqueado na baquelite para expor a lateral da peça cortada, com a finalidade de fecharmos um circuito elétrico para a passagem de corrente.

O ataque foi realizado imergindo o corpo de prova em uma solução aquosa de 10% de ácido oxálico, aplicando-se uma corrente de  $1\text{A}/\text{cm}^2$  durante 90 segundos. O equipamento utilizado para o controle dos parâmetros elétricos foi um potenciómetro modelo PAR 273-A. Utilizamos como eletrodo de referência um eletrodo de calomelano saturado e como contra-eletrodo um fio de platina, imerso na solução.

As figuras a seguir apresentam o equipamento utilizado para a realização deste ensaio, disponíveis no Laboratório de Processos Eletroquímicos (LPE) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de São Paulo.



**Figura 9:** Célula utilizada no ataque eletroquímico



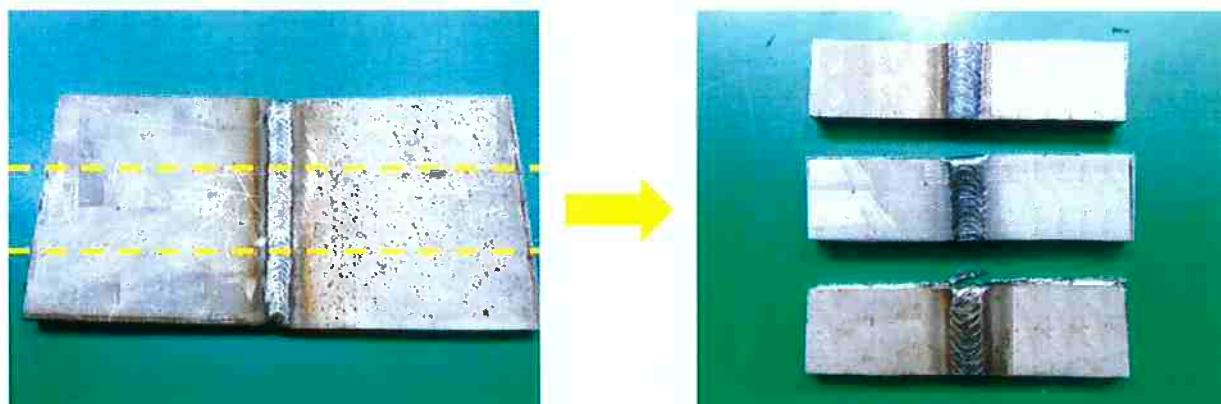
**Figura 10:** Potenciómetro utilizado no ataque eletroquímico

### 3.3 Ensaio de Imersão em Cloreto Férrico

O ensaio de imersão em cloreto férrico foi conduzido conforme o “método A” da norma ASTM G 48 – 03. Para isto, foram preparados três corpos de prova cujas dimensões e massa estão indicadas na Tabela 7. Estes corpos de prova foram preparados cortando a chapa de aço em um disco de corte abrasivo no sentido transversal ao cordão de solda, mantendo o mesmo no centro do corpo de prova, como é mostrado na Figura 11. As amostras foram lixadas com lixas #100, #240, #360 e #600.

**Tabela 7: Dimensões e massa para os corpos de prova do ensaio de imersão em cloreto férrico**

Amostra	Altura (cm)	Largura (cm)	Espessura (cm)	Área Total (cm <sup>2</sup> )	Massa (g)
CP 1	4,12	10,87	0,29	98,26	200,4346
CP 2	3,95	10,54	0,48	97,18	212,0642
CP 3	3,56	10,78	0,45	89,66	212,3845



**Figura 11 - Esquema de preparação dos corpos de prova utilizados no ensaio de Imersão em Cloreto Férrico**

Foi preparada uma solução eletrolítica dissolvendo-se 100g de cloreto férrico em 900ml de água deionizada. Preparamos um recipiente de vidro para comportar os corpos de prova e a solução eletrolítica, de maneira que os três corpos de prova permanecessem totalmente imersos durante o ensaio. O interior deste recipiente pode ser observado na Figura 12.



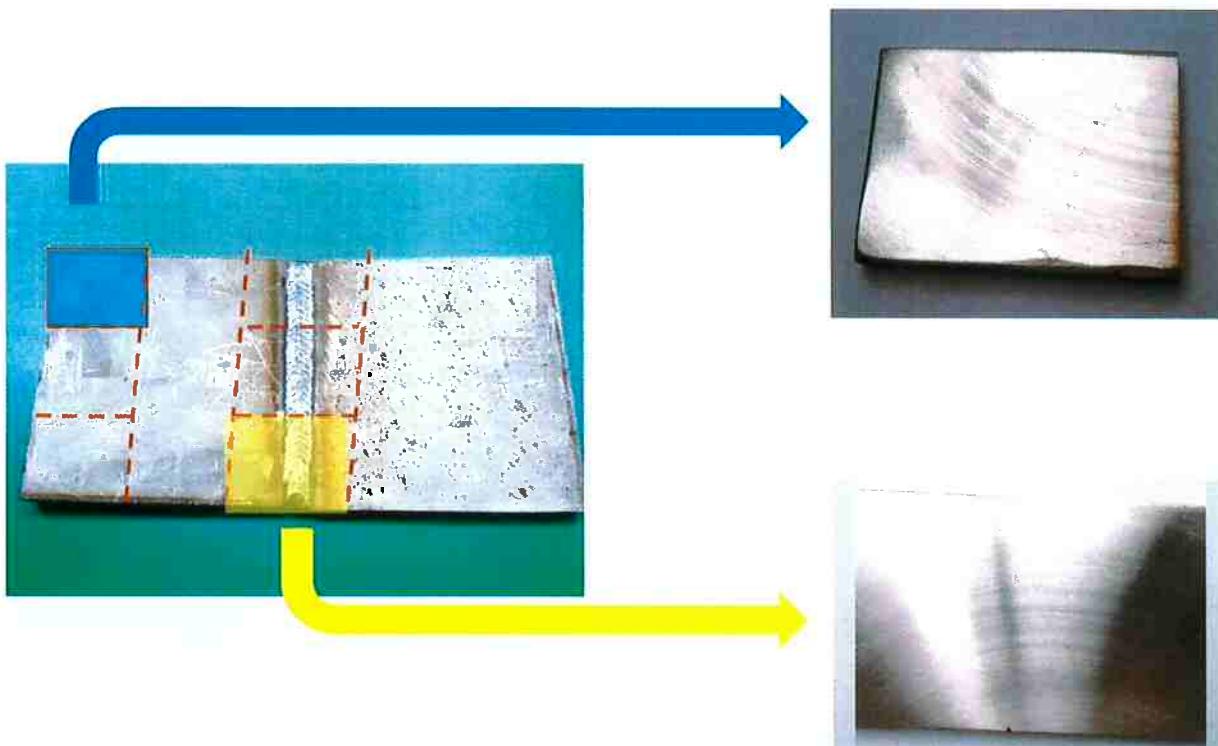
**Figura 12: Interior do recipiente e disposição dos corpos de prova para ensaio de Imersão em Cloreto Férrico**

Após cobrir os corpos de prova com a solução deixamos o ensaio prosseguir durante 72 horas. Ao término do tempo, retiramos os corpos de prova da solução, lavamos com água, sabão e álcool etílico para a total remoção dos resíduos da solução, removemos a película de metal que escondia o Pite e pesamos as amostras, para verificar a perda de massa deste ensaio.

### **3.4 Curvas de Polarização Potenciodinâmica**

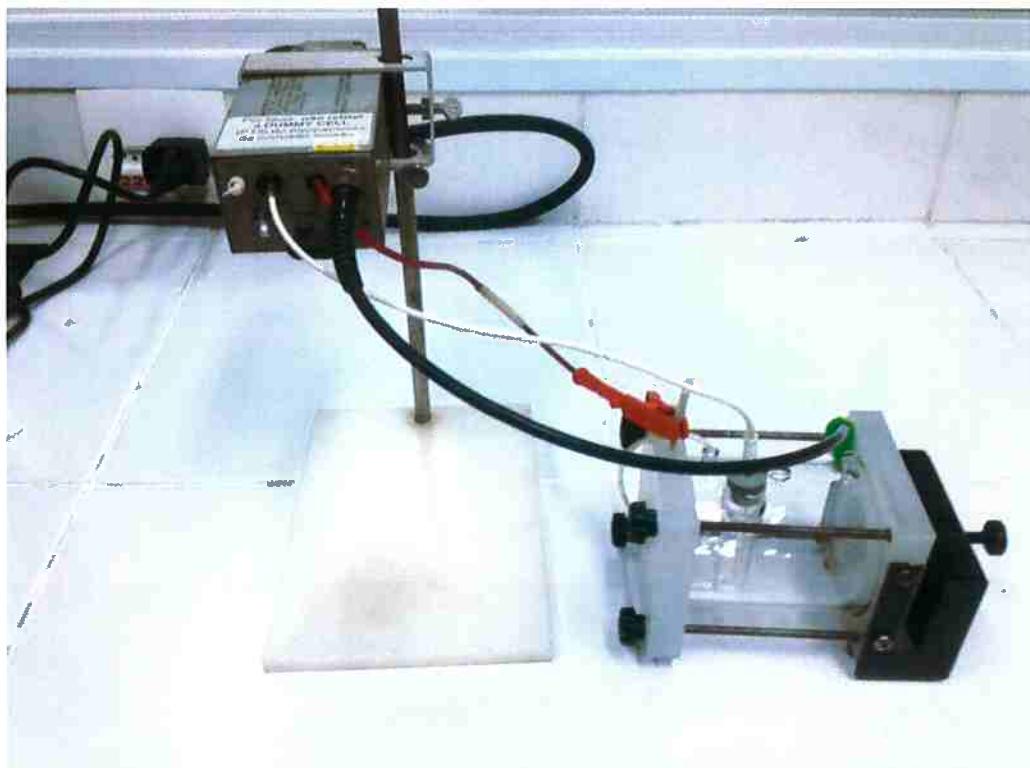
Para o levantamento das curvas de polarização potenciodinâmica foram preparados seis corpos de provas, dos quais três possuem o cordão de solda em seu centro e os outros três são compostos apenas pelo metal de base (aço inoxidável AISI 304). Um esquema da confecção

desses corpos de prova pode ser visualizado na Figura 13 - Esquema de preparação dos corpos de prova utilizados para o levantamento das Curvas de Polarização Potenciodinâmica. Nomearemos os corpos de prova que possuem o cordão de solda como CP-CS1, CP-CS2 e CP-CS3; enquanto os corpos de prova que contém apenas o metal de base serão chamados de CP-MB1, CP-MB2 e CP-MB3. Os acabamentos superficiais dos corpos de prova foram feitos com lixa #600.



**Figura 13 - Esquema de preparação dos corpos de prova utilizados para o levantamento das Curvas de Polarização Potenciodinâmica**

Para a realização do ensaio foi utilizada uma célula plana com eletrodo de referência de Ag-AgCl e como contra-eletrodo uma rede de platina. A área de exposição dos corpos de prova nesta célula foi de  $1\text{cm}^2$ , imersa em 350ml de solução 3,5% NaCl. O corpo de prova era inicialmente exposto à solução durante 300s. Após este intervalo de tempo, tinha início a polarização do corpo de prova, que representa o eletrodo de trabalho nesta configuração. Os valores de tensão e corrente coletados foram registrados em tempo real através do *software* 352 SoftCORR III. O potenciómetro utilizado foi o potenciómetro/galvanômetro PAR-273A conectado a um computador para controle das configurações do equipamento. A Figura 14 apresenta um esquema do sistema descrito.



**Figura 14:** Sistema para realização do ensaio de polarização potenciodinâmica

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Prática A da Norma ASTM A262

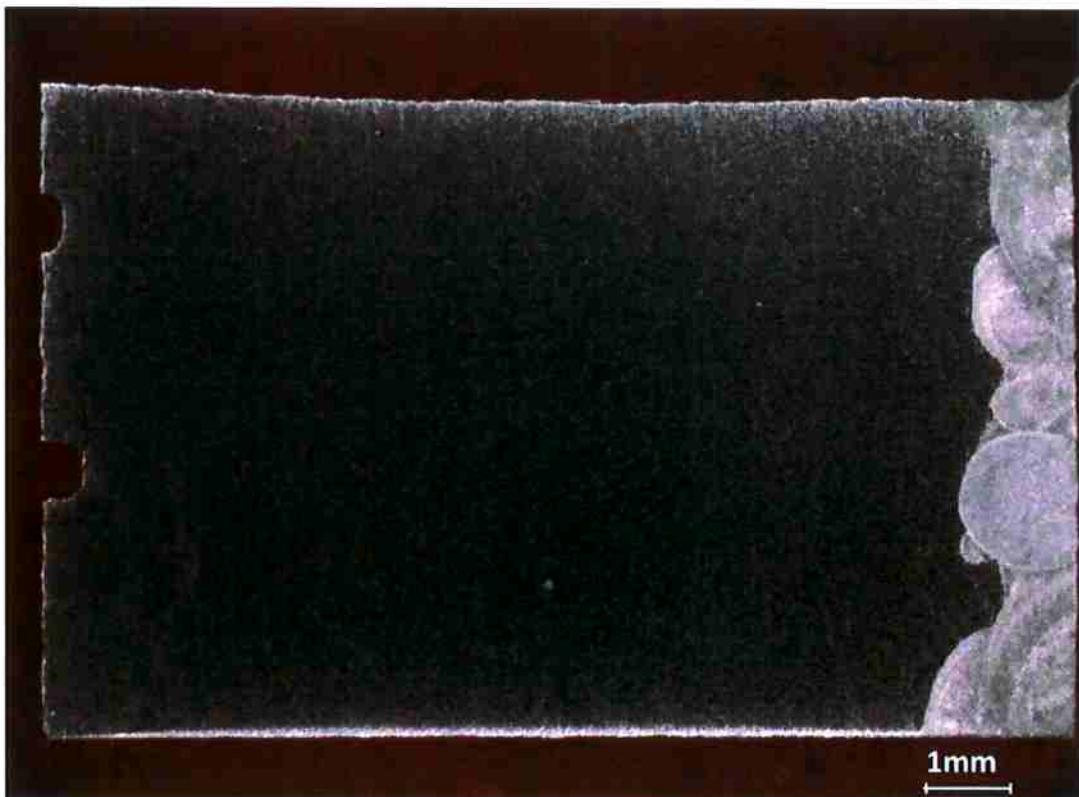
Foi realizado o registro micrográfico dos corpos de prova antes do ataque, como mostra a Figura 15. Podemos perceber a presença de diversas inclusões na superfície do metal.



**Figura 15: Micrografia do cordão de solda para realização da prática A sem ataque.**

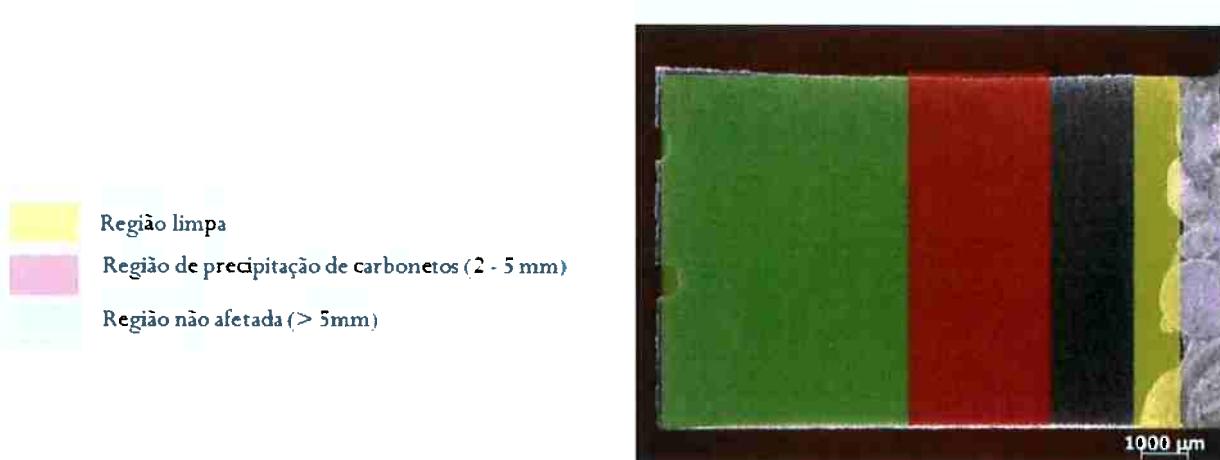
**Aumento 100x**

Após o corpo de prova ter sido atacado conforme descrito no capítulo 3.2, observamos que o cordão de solda se revelou na superfície da amostra. A Figura 16 mostra uma fotografia obtida com o auxílio de uma lupa estereoscópica com aumento de 0,65 vezes. Nesta imagem, podemos ver claramente os contornos do cordão de solda.



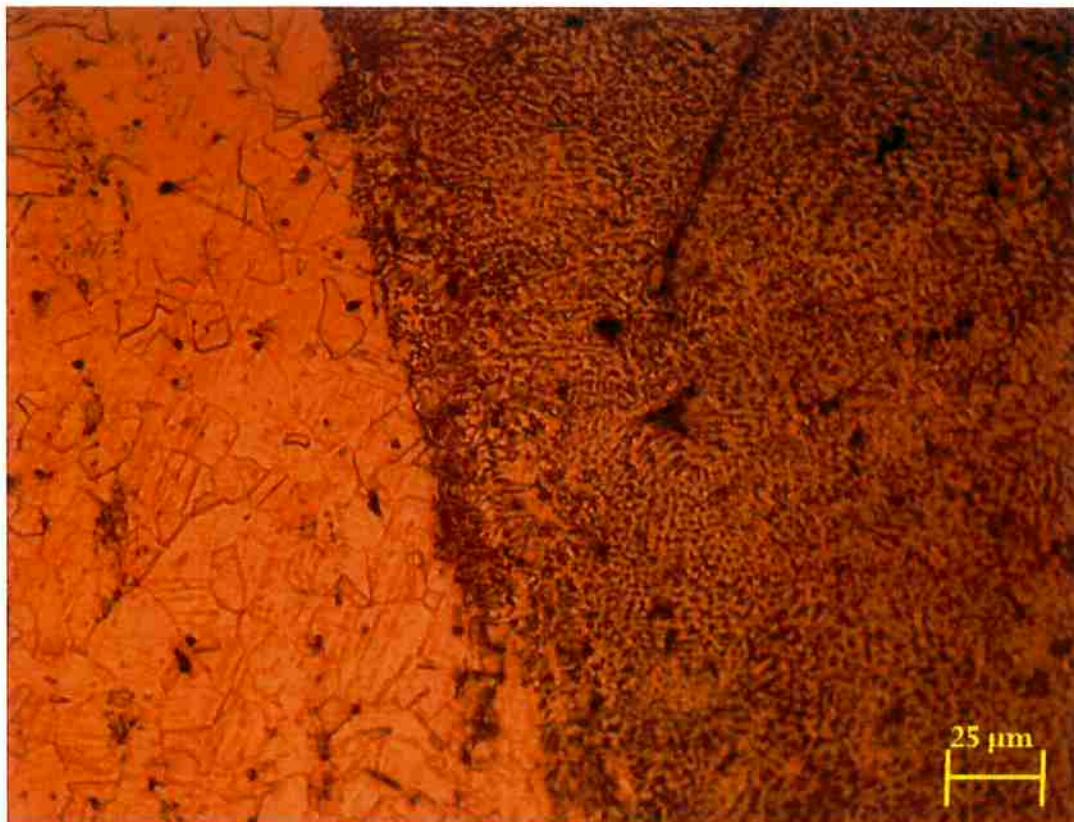
**Figura 16: Corpo de prova após ataque com ácido oxálico. Aumento 0,65x**

Foi realizado o registro micrográfico de diferentes regiões do corpo de prova após o ataque metalográfico. As regiões analisadas em microscópio óptico foram nomeadas como *região limpa* (interface entre o cordão de solda e o metal base), *região de precipitação de carbonetos* (região à distância de 2-5mm do cordão) e *região não-afetada* (distância do cordão de solda acima de 5mm). A Figura 17 ilustra as regiões definidas.



**Figura 17 - Definição das regiões estudadas**

As imagens, obtidas por microscopia óptica, revelam as microestruturas das regiões citadas:



**Figura 18:** Região limpa. Aumento 200x



**Figura 19:** Região de precipitação de carbonetos distante 2-3mm do cordão de solda.

Aumento 100x

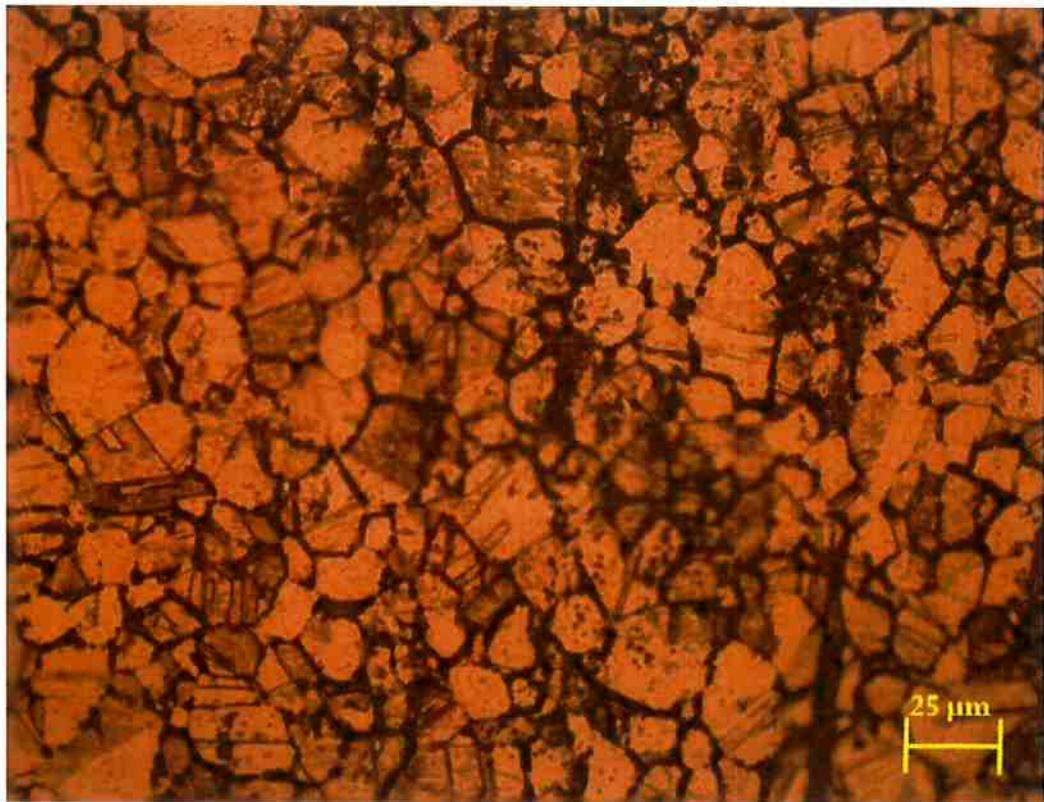


Figura 20: Região de precipitação de carbonetos distante 2-3mm do cordão de solda.

Aumento 200x

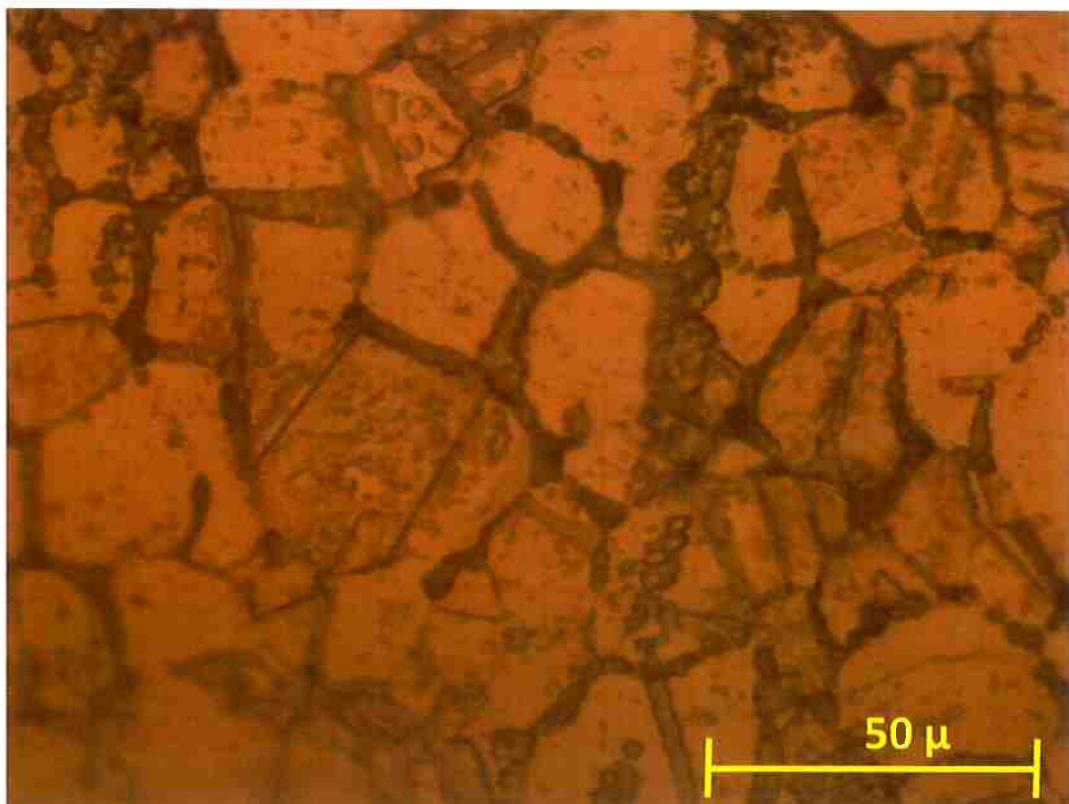
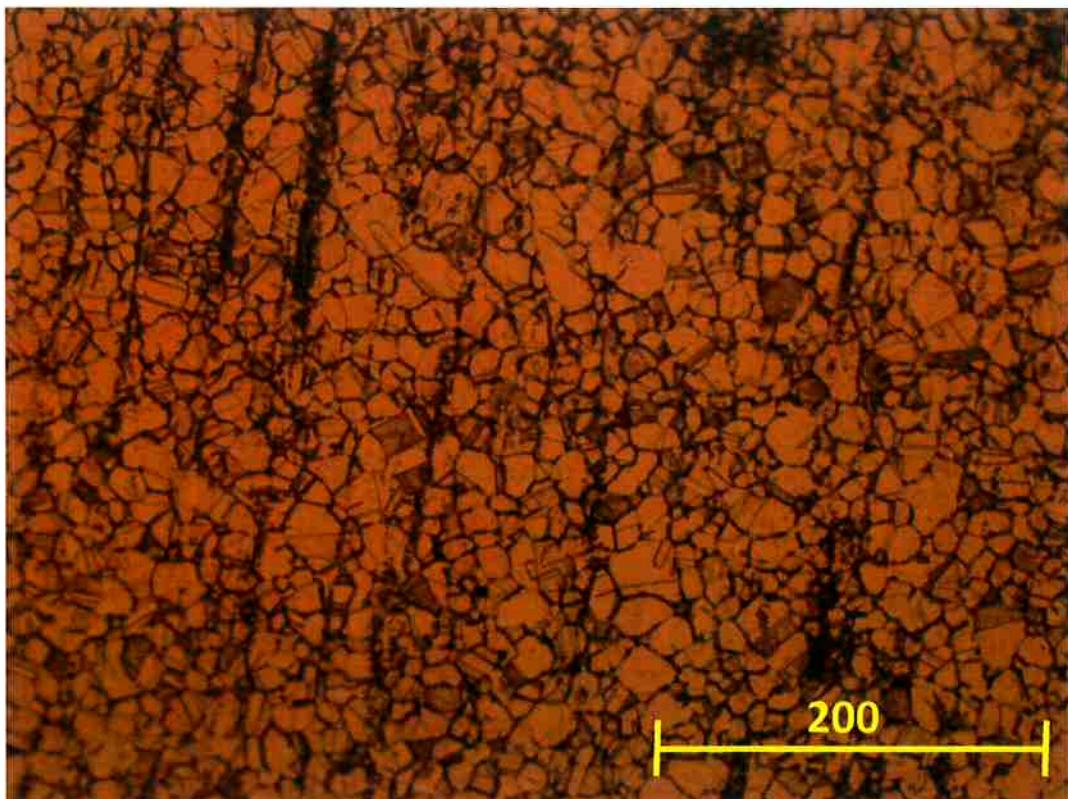


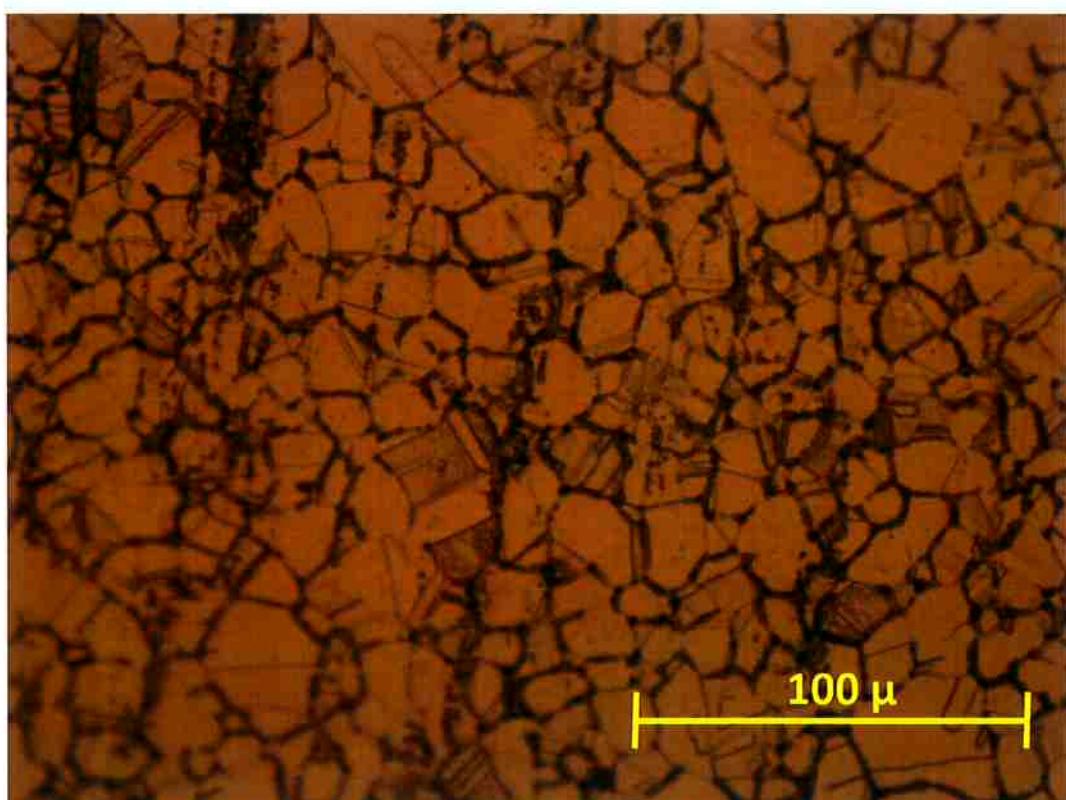
Figura 21: Região de precipitação de carbonetos distante 2-3mm do cordão de solda.

Aumento 500x



**Figura 22:** Região de precipitação de carbonetos distante 4-5mm do cordão de solda.

Aumento 100x



**Figura 23:** Região de precipitação de carbonetos distante 4-5mm do cordão de solda.

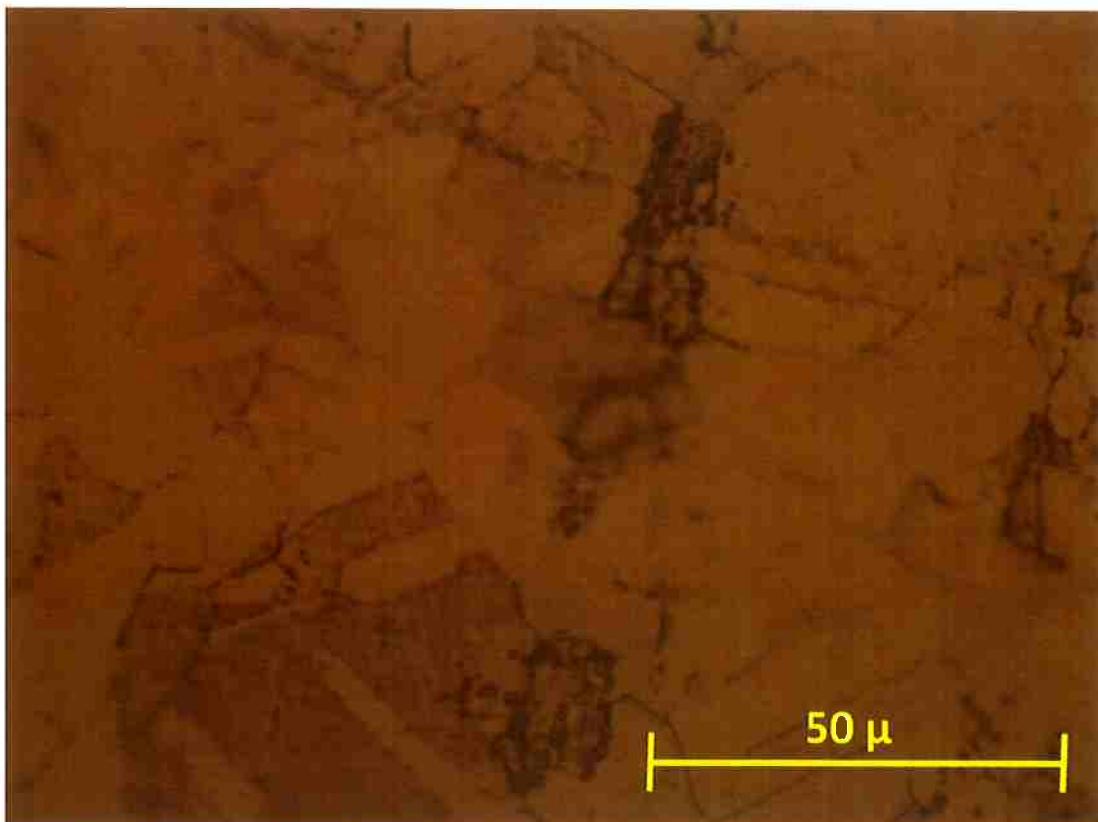
Aumento 200x



**Figura 24:** Região não afetada. Aumento 100x



**Figura 25:** Região não afetada. Aumento 200x



**Figura 26: Região não afetada. Aumento 500x**

Observamos que a microestrutura da Região de Precipitação de carbonetos, ao compararmos com as estruturas presentes na Prática A da norma ASTM A262, apresentou diversas regiões corroídas, representando fases ricas em carbonetos que foram atacadas e deixaram a superfície do metal. Podemos observar nas Figuras 19, 20, 21, 22 e 23 que as regiões corroídas entre os contornos de grão sugerem a formação de valas, indicando o destacamento das supracitadas fases ricas em carbonetos de cromo.

A micrografia da Região Não Afetada não revelou precipitação de fases que contêm carbonetos nos contornos de grão. A Região Limpa apresenta a micrografia do cordão de solda e da região adjacente ao mesmo. Percebemos que o cordão é composto por uma estrutura de menor tamanho de grão. Notamos também que a região adjacente ao cordão de solda não apresenta precipitação de fases ricas em carbonetos. Concluímos, então, que nas Regiões Limpa e Não Afetada não houve precipitação de carboneto pela análise das micrografias mostradas nas Figuras 18, 24, 25 e 26, que apresentam a presença de degraus entre os grãos de austenita.

Dessa forma, podemos afirmar que o processo de soldagem afetou a microestrutura, causando a precipitação de carbonetos de cromo na região adjacente ao cordão de solda. A existência dessa alteração microestrutural, aliada ao fato de que a composição química do consumível é mais rica em cromo e níquel (Tabela 6), sugere a ocorrência de um efeito galvânico, resultando em um ataque mais intenso na região adjacente ao cordão de solda.

#### 4.2 Ensaio de Imersão em Cloreto Férrico

Após o término do ensaio de imersão em cloreto férrico, pesamos as amostras para verificar a perda de massa deste material. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos:

**Tabela 8: Perda de massa dos corpos de prova no ensaio de imersão em cloreto férrico**

Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de massa (g)
CP 1	200,4346	197,0685	3,3661
CP 2	212,0642	208,9897	3,0745
CP 3	212,3845	209,6797	2,7048

Para melhor tratamento destes dados, dividimos a perda de massa de cada corpo de prova pela área total dos mesmos e pelo tempo de ensaio transcorrido (72 horas). Assim, obtivemos uma medida da taxa de corrosão para este material com o cordão de solda. A Tabela 9 apresenta estes resultados.

**Tabela 9: Taxa de corrosão para os corpos de prova ensaiados**

Amostra	Área Total (cm <sup>2</sup> )	Massa (g)	Taxa de Corrosão (g/cm <sup>2</sup> .h)
CP 1	86,77	3,3661	3,9E-4
CP 2	78,88	3,0745	3,9E-4
CP 3	75,63	2,7048	3,57E-4

(Zanetic, 2001), em sua tese de doutorado, realizou o mesmo ensaio para o aço 304 na condição solubilizado (ST-S). Comparando com os resultados obtidos neste trabalho, percebemos que os valores são relativamente próximos, indicando que a presença do cordão de solda não teve nenhuma influência na taxa de corrosão do material.

(Kobayashi, 1985) ensaiou uma liga de composição química similar ao aço 304, de composição química especificada na Tabela 10, denominada Liga 1. Obtivemos também valores muito próximos ao encontrado neste trabalho

**Tabela 10: Composição química da liga 1 (Kobayashi, 1985)**

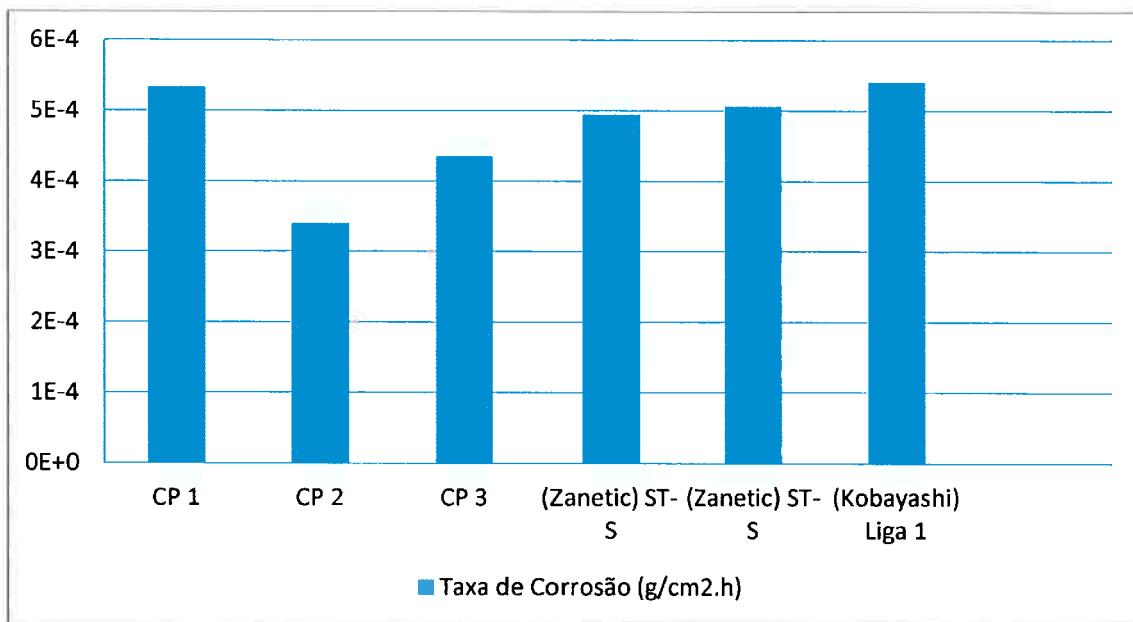
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,03	0,04	1,14	0,01	0,02	19,1	9,74

A Tabela 11 apresenta uma comparação entre os valores obtidos por (Zanetic, 2001) e (Kobayashi, 1985) com os valores encontrados neste trabalho:

**Tabela 11: Comparaçao entre os resultados de taxa de corrosão obtidos neste trabalho com os resultados obtidos por (Kobayashi, 1985) e (Zanetic, 2001)**

Amostra	Taxa de Corrosão (g/cm <sup>2</sup> .h)
CP 1	5,39E-4
CP 2	3,41E-4
CP 3	4,97E-4
(Zanetic) 1 <sup>a</sup> amostra ST-S	4,95E-4
(Zanetic) 2 <sup>a</sup> amostra ST-S	5,06E-4
(Kobayashi) Liga 1	5,40E-4

A Figura 27 apresenta um gráfico de barras comparando os resultados obtidos:

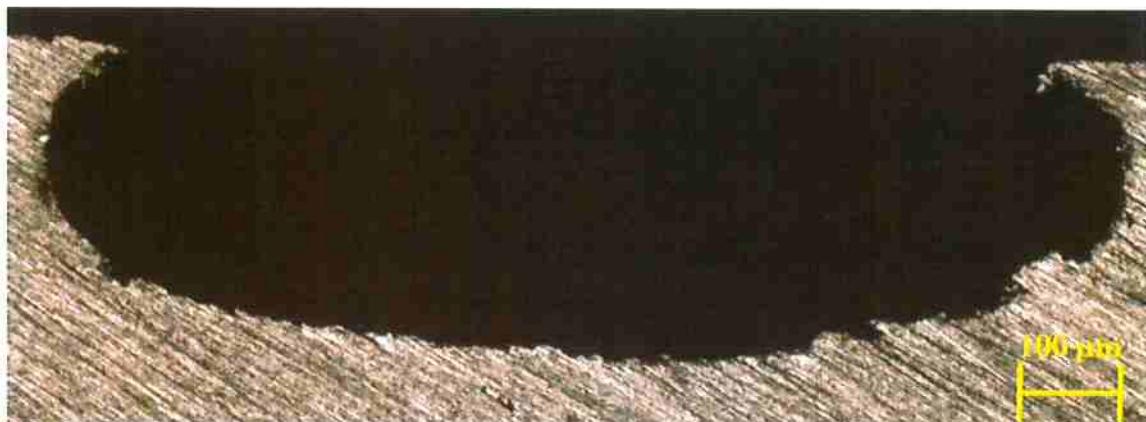


**Figura 27: Comparação entre os resultados de taxa de corrosão**

Nota-se que os resultados de (Zanetic, 2001) e (Kobayashi, 1985) apresentam-se muito próximos, mostrando que apesar de serem aços com décadas de diferença, o comportamento se mantém. Por sua vez, as amostras do presente trabalho apresentaram valores próximos a esses dois autores, mas com uma significativa dispersão.

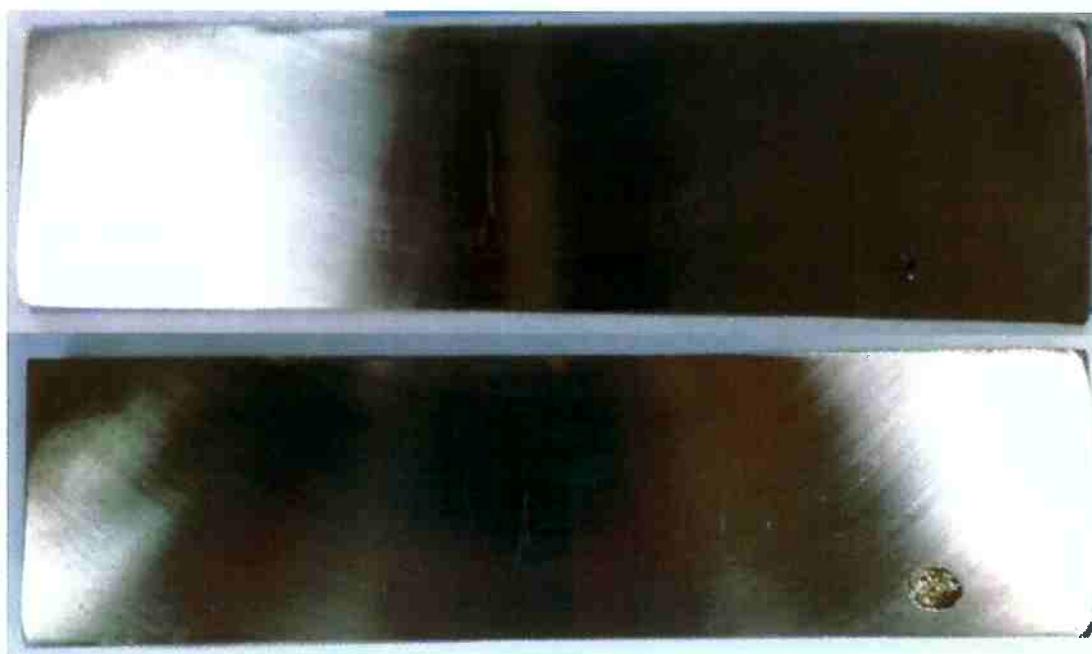
É necessário lembrar que os trabalhos de (Zanetic, 2001) e (Kobayashi, 1985) são para aços UNS S30400 e UNS S30403 na condição solubilizada, enquanto no presente trabalho as amostras eram constituídas por chapas de aço UNS S30400 solubilizadas e soldadas (com consumível de composição química equivalente ao aço UNS S30803). Além disso, a dispersão deve-se ao fato que a operação de soldagem não gera uma solubilização uniforme dos elementos de liga ao longo de todo o material, o que pode causar diferentes concentrações de elementos químicos alterando as propriedades de resistência à corrosão ao longo de uma mesma seção longitudinal do material.

Depois de realizada as medições da perda de massa, embutimos a seção transversal de um pite formado para analisar a sua morfologia, como mostra a Figura 28. O pite possui grande profundidade e diâmetro.



**Figura 28:** Pite formado em ensaio de imersão em cloreto férrico

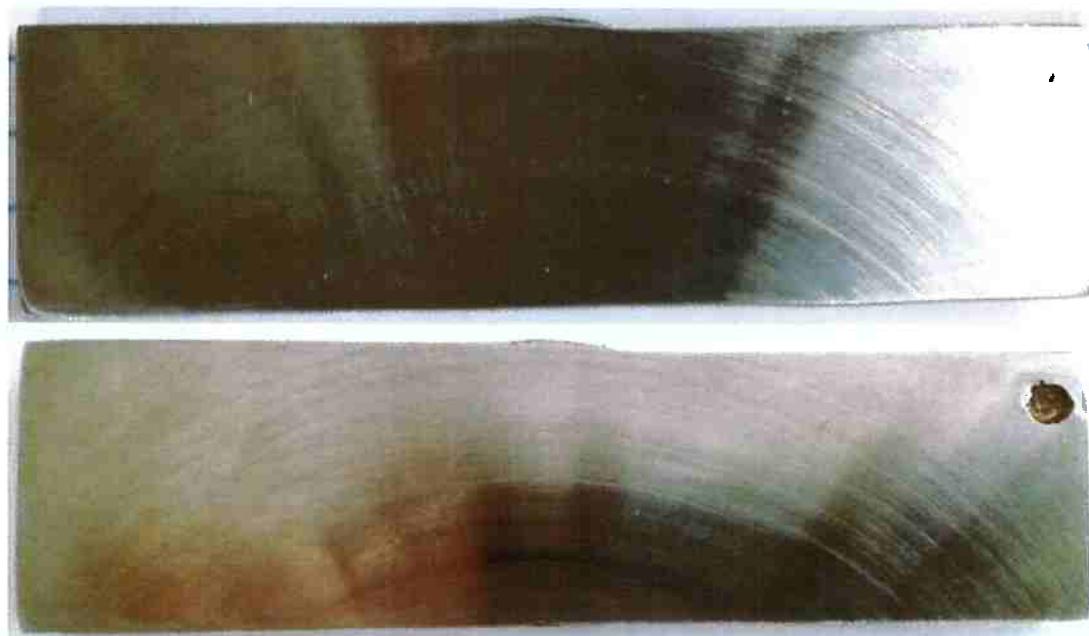
As próximas imagens mostram a morfologia dos corpos de prova ensaiados após a imersão em cloreto férrico. Os pites têm formato esférico e são numerosos, mostrando a suscetibilidade desse material (AISI 304) para esse tipo de corrosão.



**Figura 29:** Superfície do corpo de prova 1 após ensaio de imersão em cloreto férrico.  
Presença do filme que abriga o pite e após a remoção do filme



**Figura 30: Superfície do corpo de prova 2 após ensaio de imersão em cloreto férrego.**  
**Presença do filme que abriga o pite e após a remoção do filme**



**Figura 31: Superfície do corpo de prova 3 após ensaio de imersão em cloreto férrego.**  
**Presença do filme que abriga o pite e após a remoção do filme**

#### 4.3 Curvas de Polarização Potenciodinâmica

Estão demonstradas nas figuras seguintes as curvas de polarização obtidas para as regiões do metal de base, zona afetada pelo calor (ZAC) e cordão de solda.

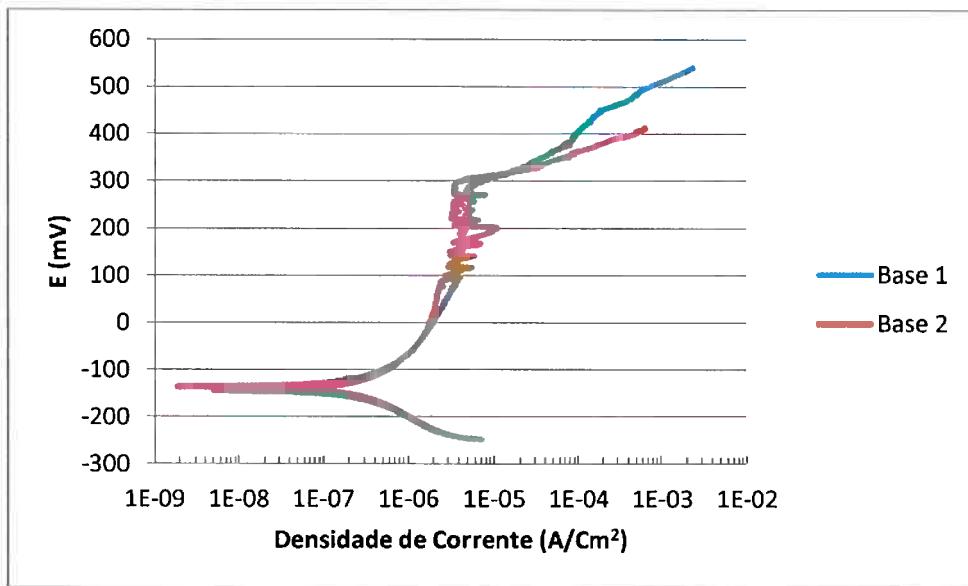


Figura 32: Curvas de polarização potenciodinâmica para o metal de base

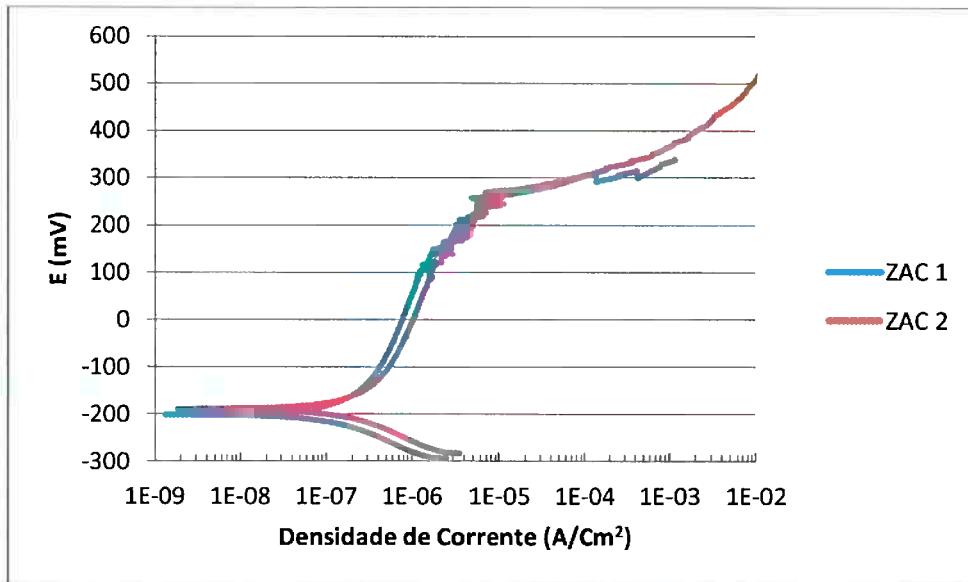
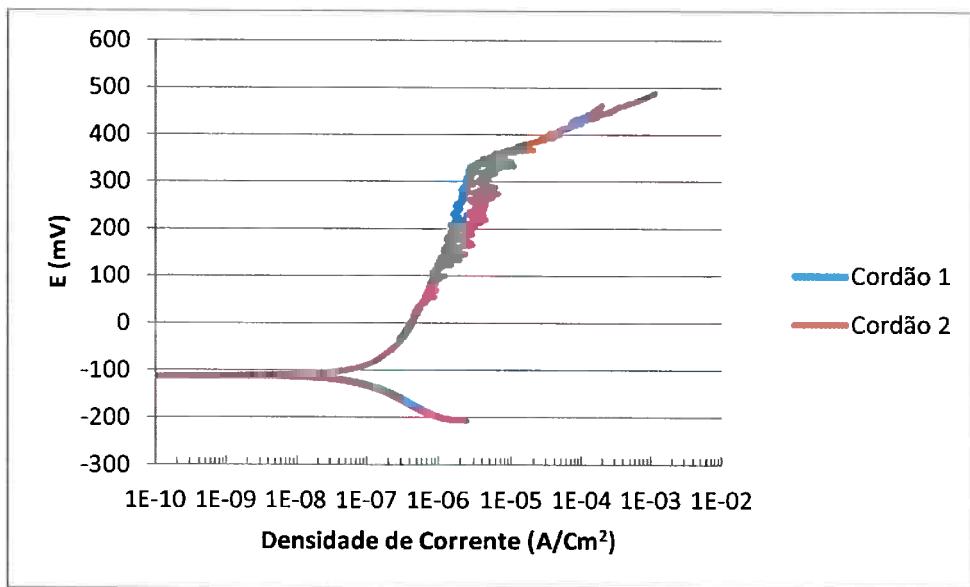


Figura 33: Curvas de polarização potenciodinâmica para a ZAC



**Figura 34 - Curvas de polarização potenciodinâmica para o cordão de solda**

Percebemos que o potencial de pite para o cordão de solda apresentou resultados superiores aos do metal de base e da ZAC, provavelmente devido ao caráter mais nobre da liga utilizada para realizar esta solda. Observamos também que a região da ZAC foi a que apresentou o menor valor para o potencial de pite, e isso se deve ao fato do espaço analisado englobar, além da fina zona afetada pelo calor, uma região adjacente do metal base, que coincide com a região de precipitação de carbonetos estudada no ensaio da Prática A, que é uma região de composição química mais empobrecida, ocasionando a nucleação de um pite em um potencial mais baixo do que das outras regiões. E, por fim, a região do metal de base apresentou um valor intermediário para o potencial de pite, pelo mesmo fato de possuir a composição química com elementos de liga em quantidade intermediária em comparação com as outras regiões.

A seguir analisaremos a morfologia dos pites formados durante a polarização potenciodinâmica. A Figura 35 revela um pite de formato esférico, de grande tamanho, com a presença de numerosos micropites, obtendo as mesmas características do ensaio de imersão em cloreto férrico, confirmando a suscetibilidade desse material (AISI 304) para esse tipo de corrosão.



Figura 35: Pite formado em ensaio de polarização potenciodinâmica. Aumento 100x



Figura 36: Pite formado em ensaio de polarização potenciodinâmica. Aumento 200x

## 5 CONCLUSÃO

A análise dos resultados coletados nos permite afirmar que a operação de soldagem causou alteração na resistência à corrosão das chapas de aço inoxidável 304.

Foi observado no levantamento das curvas de polarização potenciodinâmica que a região da ZAC registrou menor potencial de pite. Ao compararmos este resultado com a micrografia realizada no ensaio da Prática A do corpo de prova na “Região de Precipitação de Carbonetos”, vemos que é a mesma região em que foram levantadas as curvas de polarização para a ZAC, e assim podemos concluir que a formação das valas influenciou no menor desempenho de resistência à corrosão por pite desta região, dado que ocorreu precipitação de carbonetos de cromo entre os contornos de grãos austeníticos do aço inoxidável AISI 304.

A precipitação de cromo na forma de carboneto resulta em uma região em volta dos contornos de grão com menor resistência à corrosão, sendo mais suscetível ao ataque eletroquímico do que o restante do material, caracterizando o fenômeno de sensitização. Os resultados obtidos nos ensaios realizados sugerem a ocorrência deste fenômeno nas chapas de aço inoxidável estudadas. Entretanto, para a total confirmação deste efeito, seria necessária a realização da análise química dos carbonetos por EDS em um microscópio eletrônico de varredura.

Um maior potencial de pite foi registrado na região ensaiada sobre o cordão de solda. Este resultado era teoricamente esperado, uma vez que o material do cordão de solda possui maiores quantidades de cromo, resultando em maior resistência à corrosão.

O ensaio de imersão em cloreto férrico apresentou resultados compatíveis com os pesquisados na literatura para chapas de aço solubilizadas. Isto sugere que a operação de soldagem não ocasionou perdas adicionais de resistência à corrosão do que a esperada para a solubilização de chapas de aço inoxidável AISI 304. O desvio entre os resultados se deve ao efeito anteriormente mencionado da solubilização não uniforme dos elementos de liga pela soldagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO-FALLEIROS, N. (2012). *Notas de Aula PMT2507 - Corrosão e Proteção dos Materiais.*

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Corrosion Attack in Austenitic Stainless Steels;* A 262-86, Philadelphia.

ARMIJO, J.S. (1968). *Intergranular corrosion of nonsensitized austenitic stainless steels;* Houston.

BRANDI, S. D. & WAINER, E. (2010). *Soldagem. Processos e Metalurgia.* São Paulo : Edgar Blücher.

KOBAYASHI, D. Y. (1985). *Efeito do nióbio na resistência à corrosão de aços inoxidáveis austeníticos.* Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MUDALI, U. K. & PUJAR, M. G. (2002). *Pitting Corrosion of Austenitic Stainless Steels and Their Weldments* Parte do livro: *Corrosion of Austenitic Stainless Steels* de KHATAK H. S. New Delhi: Narosa Publishing House.

QUITES, A.M. (2002). *Introdução à Soldagem a Arco Voltaico.* Florianópolis : Soldasoft.

SCHWEITZER, P. A. (2007). *Fundamentals of Metallic Corrosion.* CRC Press.

SEDRIKS, A. J. (1996). *Corrosion of Stainless Steels.*

WIDGERY, D. (1994). *Tubular Wire Welding.* Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

WOLYNCEC, S. (2003). *Técnicas Eletroquímicas em Corrosão.* São Paulo : EDUSP - Vol. 49.

ZANETIC, S. T. (2001). *Determinação do grau de sensitização de aços inoxidáveis austeníticos pelo método DL-EPR.* Tese de doutorado - Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo.