



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
CAMPUS MOSSORÓ  
DEPARTAMENTO CENTRO DAS ENGENHARIAS  
ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO VINÍCIUS BEZERRA BARBOSA

**ANÁLISE DE CORROSÃO NA ZONA AFETADA PELO CALOR DO AÇO  
INOXIDÁVEL EM SOLUÇÃO CONCENTRADA DE ÁCIDO NÍTRICO**

Mossoró– RN

2017

BRUNO VINÍCIUS BEZERRA BARBOSA

**ANÁLISE DE CORROSÃO NA ZONA AFETADA PELO CALOR DO AÇO  
INOXIDÁVEL EM SOLUÇÃO CONCENTRADA DE ÁCIDO NÍTRICO**

Monografia apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador Profº. Dr. Manoel Quirino da Silva

Aprovado pelo Conselho de Curso em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

Assinatura do Coordenador de Curso

Mossoró – RN

2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

B238a Barbosa, Bruno Vinicius Bezerra.  
ANÁLISE DE CORROSÃO NA ZONA AFETADA PELO CALOR  
DO AÇO INOXIDÁVEL EM SOLUÇÃO CONCENTRADA DE ÁCIDO  
NÍTRICO / Bruno Vinicius Bezerra Barbosa. - 2017.  
41 f. : il.

Orientador: Manoel Quirino da Silva Junior.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia  
Mecânica, 2017.

1. Corrosão. 2. ZAC. 3. Aço inoxidável  
auxteníticos . I. Junior, Manoel Quirino da Silva  
, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

**BRUNO VINICIUS BEZERRA BARBOSA**

**ANÁLISE DE CORROSÃO NA ZONA AFETADA PELO CALOR DO AÇO  
INOXIDÁVEL EM SOLUÇÃO CONCENTRADA DE ÁCIDO NÍTRICO**

Monografia apresentado ao curso de  
Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,  
como requisito parcial para obtenção do  
título de Engenheiro Mecânico.

Orientador Prof<sup>o</sup>. Dr. Manoel Quirino da  
Silva

APROVADO EM: 25/05/2017

**BANCA EXAMINADORA**



Manuel Quirino da Silva Junior, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente



Francisco Edson Nogueira Fraga, Prof. Dr. (UFERSA)



José Pinheiro da Silva Filho, Prof. (UFERSA)

Aos meus avós **Antônio Barbosa Neto**, e **Ieda Barbosa Tavares e Ponciano Rodrigues Bezerra** e **Maria da Salete de Melo Bezerra** que são meus amados avós. A minha família, especialmente aos meus pais; **Netosalem Barbosa** e **Sandra Regina de melo Bezerra Barbosa** e ao meu irmão **Netosalem Barbosa Filho**, que nunca mediram esforços para minha felicidade e educação e sempre me apoiaram e contribuíram para minha formação educacional, pessoal, e social.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me permitiu está aqui para poder esta concluindo esse trabalho, dando força e determinação para não desistir e seguir em frente mesmo com muitas dificuldades, mesmo pensando que não seria capaz, e por ter colocado pessoas na minha vida que serviram como base de sustentação.

Aos meus pais Netosalem Barbosa e Sandra Regina de Melo Bezerra Barbosa por toda força e confiança que depositaram em mim, por seus esforços desde início da vida até o momento de hoje, podendo contar com eles para todo sempre.

Aos meus avós Antônio Barbosa Neto, e Ieda Barbosa Tavares e Ponciano Rodrigues Bezerra e Maria da Salete de Melo Bezerra, que sempre sonharam com um neto médico e um engenheiro e eu estou podendo realizar um desses desejos deles de ser o engenheiro.

A minha namorada Thuany Diane Tavares Carlos por me apoiar em todas as minhas decisões e por sempre aumentar minha autoestima e me encorajar a continuar.

A UFERSA e a todos os professores pelos ensinamentos dedicação e amizade tanto os do campos Mossoró como do Campos Angicos.

Ao meu orientador Profº. Dr. Manoel Quirino da Silva Júnior, por acreditar no meu potencial, pela imensa ajuda, paciência, prontidão e disponibilidade, e principalmente pela coragem e audácia de incentivar mesmo com todas as dificuldades do nosso trabalho. Obrigada pela compreensão e amizade durante esse tempo.

A todos funcionários e aos donos Paulo Roberto e Paulo di Lorenzo da MERCOSAL INDUSTRIA COMERCIO E REFINARIA DE SAL LTDA, que além de fornecer meu estagio, me forneceu todo material e equipamento necessário para realização desse trabalho.

Aos meus colegas de faculdade que não preciso citar, pois, eles sabem que fizeram parte dos momentos mais importantes e difíceis da minha vida, dos trabalhos em grupo, das noites em claro, das risadas e ajuda durante dificuldades.

## RESUMO

Em uma junta soldada é mais susceptível a ocorrer degradação por corrosão, onde são geradas tensões residuais e mudanças micro estruturais das regiões soldadas que acarretam em queda do desempenho do material. Soldas depositadas em uma peça devem possuir propriedades adequadas para aplicação pretendida. Essas propriedades são em geral especificadas em normas, especificações, projeto ou em contrato. São verificadas em testes de qualificação ou em amostras retiradas de um lote da produção. Então para que se tenha soldagens desejadas as indústrias tem que definir os processos de soldagem antes da obra começar avaliando seus parâmetros físicos e químicos e ao que essas soldas serão sujeitas (tensões, meio e etc.). Com isso esse trabalho apresenta um estudo sobre a ação da corrosão na ZAC (zona afetada pelo calor) em aços inoxidáveis austeníticos. O tipo de soldagem utilizada nesse trabalho foi a MIG/MAG, com isso foram realizados experimentos com o aço inoxidável 316L, onde o mesmo foi exposto à uma solução ácida de ácido nítrico para acelerar o processo de corrosão. Será verificado o quanto a corrosão ataca os aços pela análise taxa de penetração, perda de massa, análises microscópicas e eletroquímicas.

**Palavras Chave:** Corrosão, ZAC, Aços Inoxidáveis Austeníticos.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Ilustra a passividade dos aços-cromo.....                                                                                                         | 14 |
| Figura 2: A curva mostra a penetração da oxidação.....                                                                                                      | 14 |
| Figura 3: Corrosão Intergranular ou intercristalina. ....                                                                                                   | 23 |
| Figura 4: Micrografia da zona afetada pelo calor.....                                                                                                       | 24 |
| Figura 5: Região empobrecida em cromo. ....                                                                                                                 | 25 |
| Figura 6: Temperatura em função do tempo para que ocorra sensitização do aço inoxidável. ....                                                               | 26 |
| Figura 7: Corrosão por pite em tubo de aço inoxidável AISI 304.....                                                                                         | 27 |
| Figura 8: Corrosão sob tensão fraturante em tubo de aço inoxidável AISI 304.....                                                                            | 28 |
| Figura 9: Corrosão em torno do cordão de solda de um aço inoxidável .....                                                                                   | 29 |
| Figura 10: Efeito do teor de carbono sobre a corrosão de aço inoxidável 18-8 tratado termicamente de modo a produzir máxima precipitação de carbonetos..... | 30 |
| Figura 11: Fluxograma simplificado das etapas do experimento.....                                                                                           | 33 |
| Figura 12: Amostra 1 do aço inoxidável 316 submetido a tratamento térmico de 100h e a corroída em solução concentrada de ácido nítrico.....                 | 38 |
| Figura 13: Amostra 2 do aço inoxidável 316 submetido a tratamento térmico de 1h e a corroída em solução concentrada de ácido nítrico.....                   | 38 |
| Figura 14: Análise microscópica da ZAC na amostra 1 tratada do aço inoxidável AISI 316..                                                                    | 39 |
| Figura 15: Análise microscópica da ZAC na amostra 2 tratada do aço inoxidável AISI 316..                                                                    | 39 |



## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Faixa de corrente de curto-circuito.....                                                                   | 19 |
| Tabela 2: Condições de soldagem para aços inoxidáveis, transferência por curto-circuito e aerossol. ....             | 21 |
| Tabela 3: Classificação qualitativa dos aços-carbono quanto à taxa de corrosão uniforme e taxa máxima de pites. .... | 32 |
| Tabela 4: Composição química dos aços inoxidáveis austeníticos .....                                                 | 35 |
| Tabela 5: Medições das amostras do aço inoxidável 316.....                                                           | 36 |
| Tabela 6: Taxa de Penetração da Corrosão e Taxa de Perda de Massa do aço inoxidável AISI 316. ....                   | 37 |

## SUMÁRIO

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introdução.....</b>                         | <b>10</b> |
| <b>2. Objetivos do Trabalho .....</b>             | <b>12</b> |
| <b>2.1 Objetivo Geral.....</b>                    | <b>12</b> |
| <b>2.2 Objetivos Específicos .....</b>            | <b>12</b> |
| <b>3. Revisão Bibliográfica .....</b>             | <b>13</b> |
| <b>3.1 Aços inoxidáveis .....</b>                 | <b>13</b> |
| 3.1.1 Aços inoxidáveis austeníticos .....         | 16        |
| <b>3.2 Soldagem de aços inoxidáveis .....</b>     | <b>17</b> |
| <b>3.3 Corrosão em aços inoxidáveis .....</b>     | <b>22</b> |
| 3.3.1 Corrosão Intergranular.....                 | 23        |
| 3.3.2 Sensitização .....                          | 25        |
| 3.3.3 Corrosão Puntiforme (Pite).....             | 27        |
| 3.3.4 Corrosão sob Tensão .....                   | 28        |
| 3.3.5 Corrosão em aços inoxidáveis soldados ..... | 29        |
| <b>4. Materiais e Métodos .....</b>               | <b>33</b> |
| <b>5. Resultados e Discussão.....</b>             | <b>36</b> |
| <b>6. Conclusões.....</b>                         | <b>38</b> |
| <b>7. Referencias.....</b>                        | <b>41</b> |

## 1. Introdução

Nos últimos anos, tem-se investido cada vez mais no desenvolvimento de novos métodos, técnicas e materiais no que se refere à soldagem. Sendo que junto com esses métodos tem alguns problemas ocasionados pela corrosão que nela é induzida na zona afetada pelo calor (ZAC).

O trabalho em questão tem como principal foco a análise da corrosão na (ZAC) em aços inoxidáveis. Em uma análise rápida na área afetada pelo calor podemos constatar que é uma área mais sujeita a degradação por corrosão, pois é onde está concentrada o maior índice de tensões residuais. Com o vasto uso da soldagem em aços inoxidáveis em inúmeros setores da indústria, a corrosão é um problema que traz efeitos que podem acarretar em prejuízos enormes, provocando acidentes que afetaram a segurança das pessoas e do meio ambiente, além de perdas que levam a prejuízos financeiros enormes em manutenção e reposição desses componentes que são danificados pela corrosão caso ela não seja evitada, controlada ou sanada.

A corrosão é a deterioração dos materiais, especialmente metálicos, pela ação eletroquímica ou química do meio, estando ou não associada a esforços mecânicos. Por existir esse problema de corrosão na (ZAC) a literatura indica alguns materiais mais adequados que são mais resistentes à corrosão mesmo eles sendo colocados em ambientes muito corrosivos, entre eles existem os aços inoxidáveis, sendo o mais indicado o aço inoxidável austenítico, já que se trata da união deles por soldagem. Com isso a literatura também diz os meios para ser minimizada e evitar a corrosão utilizando variados tipos de procedimentos.

Desta forma, o trabalho tem como principal propósito a análise experimental acerca do processo corrosivo sofrido por aços inoxidáveis austeníticos, analisando a degradação do mesmo pela ação da corrosão quando expostos a solução ácida.

A solução ácida é utilizada como um catalizador para que se possa ocorrer a corrosão, para que possa ser analisado em um curto espaço tempo. O foco da análise é a zona afetada pelo calor (ZAC) e quais tipos de corrosão que nela ocorre.

A maioria dos testes de corrosão são acelerados, sendo assim o meio em que o teste é realizado tem pouca ou nenhuma relação com o meio efetivo que o equipamento deverá trabalhar, apesar disso os ensaios permitem detectar as causas de problemas com ataque intergranular. A forma mais usual de detectar a susceptibilidade à corrosão intergranular dos aços inoxidáveis austeníticos é com o uso dos ensaios de imersão especificados pela norma ASTM A 262 (prática C) pela observação da microestrutura devido ao ataque eletrolítico em

ácido nítrico, ou através da perda de massa. Que é o parâmetro indicador do grau de sensitização. Por ser simples e prático permite caracterizar a estrutura antes de ser comprovado através de outros testes, que devem decidir sobre a aceitação da peça (ZANETIC, FALLEIROS, 2001).

## **2. Objetivos do Trabalho**

### **2.1 Objetivo Geral**

Caracterização da corrosão dos aços inoxidáveis AISI 316L na zona afetada pelo calor (ZAC), em solução artificial ácida.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Realizar tratamento térmico para o aço inoxidável austenítico mudando o tempo de tratamento e mantendo a temperatura para uma possível sensitização;
2. Calcular a taxa de corrosão através da Taxa de Perda de Massa e Taxa de Penetração da Corrosão;
3. Analisar a possível corrosão na zona afetada pelo calor e especificar a corrosão;
4. Comparar o aço corroído através da taxa de corrosão e metalografia;

### **3. Revisão Bibliográfica**

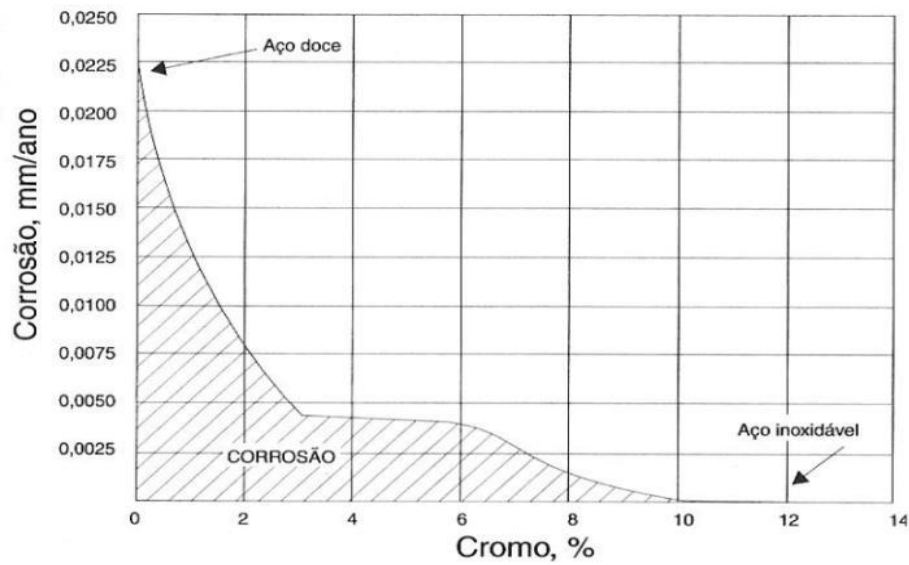
#### **3.1 Aços inoxidáveis**

Para SILVA e MEI (2010), são consideráveis aços inoxidáveis aqueles que apresentam teores de cromo superiores a 12% deixando esses aços com uma grande resistência a corrosão e à oxidação, propriedades mecânicas elevadas e tenacidade (dos aços inoxidáveis austeníticos). Entretanto nenhum material é totalmente inoxidável. O responsável pelo aço inoxidável ter uma elevada resistência a corrosão é o fenômeno da passivação, isto é, à formação de uma camada de óxidos mistos (de ferro, cromo e de outros elementos de liga) e a dissolução dessa camada no meio corrosivo. A formação ou não dessa camada, sua impermeabilidade e a sua taxa de dissolução no meio corrosivo controlaram a resistência a corrosão (medida em perda peso/área/unidade de tempo) do material no meio corrosivo em questão (SILVA e MEI 2010).

Onde a proteção do metal de base (aço inoxidável) é feita por uma película passivadora que na superfície do metal de base e a minimiza a ação do meio corrosivo. Essa película pode ser criada artificialmente pelo depósito de substâncias metálicas ou orgânicas sobre a superfície do metal chegando a proteger o metal de base, a camada ou película superficial de óxido é criada através da formação de um composto químico, mantido sobre a superfície metálica por forças atômicas, sendo esse composto resultado de reações químicas de certos elementos de liga introduzidos no metal com o meio circunvizinho. (CHIAVERINI, 1998).

O cromo é o elemento protetor à corrosão que se é usado em teores acima de 10% para que se possa atingir a passividade, e a passividade é completa com teores de 20% a 30% de cromo. Como ilustrado na figura 1 a passividade dos aços-cromo expostos durante 10 anos a uma atmosfera industrial, no tempo que se aumenta o teor de cromo, o metal sai de uma grande susceptibilidade à corrosão a um metal praticamente indestrutível pela corrosão e já quando se é usado abaixo de 1% não se consegue retardar a corrosão. (CHIAVERINI, 1998).

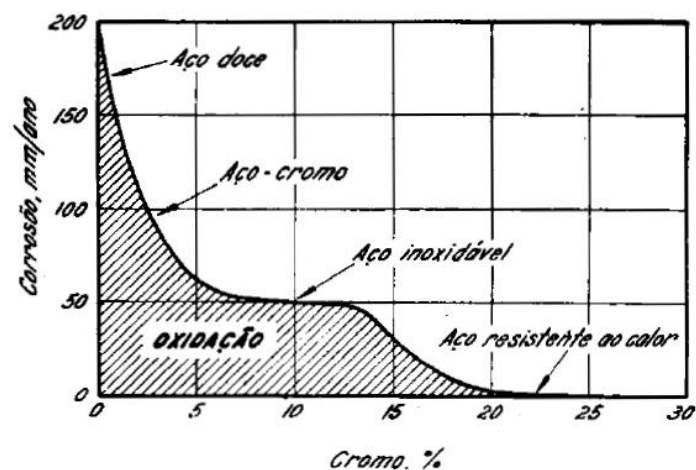
**Figura 1:** Ilustra a passividade dos aços-cromo.



Fonte: CHIAVERINI (1998)

As temperaturas elevadas o processo é o mesmo à medida que se aumenta o teor de cromo diminui a tendência à oxidação. Como ilustra a figura 2 apresenta um gráfico onde verifica-se o efeito do cromo na resistência do aço à oxidação a altas temperaturas, onde a curva mostra a penetração da oxidação em cubos de  $\frac{1}{2}$ '' aquecidos durante 48 horas a 1000°C no ar, no qual o efeito mais positivo do cromo é quando ultrapassa 20% (CHIAVERINI, 1998).

**Figura 2:** A curva mostra a penetração da oxidação.



Fonte: (CHIAVERINI, 1998).

Os aços inoxidáveis podem ser agrupados em cinco categorias, sendo elas os martensíticos, ferríticos, austeníticos, ferrítico-austeníticos (duplex) e os endurecidos por precipitação. (SILVA e MEI, 2010).

- Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas de ferro e cromo (11-18%) com teor de carbono, em geral, acima de cerca de 0,1%, e também existem os supermartensíticos que possuem carbono abaixo de 0,1% e baixíssimos teores de elementos residuais. Essas composições são endurecidas por tratamento térmico de têmpera. São magnéticos. (SILVA e MEI, 2010).
- Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas Fe + Cr, não são endurecidas por tratamento térmico de têmpera, sendo utilizada a solubilização ou recozimento ou para alívio de tensões. Possuem teores de cromo elevados que os martensíticos, superiores a 12%, empregados com estrutura essencialmente ferrítica (Ferrita + carbonetos). (SILVA e MEI, 2010).
- O aço inoxidável ferrítico-austenítico (duplex) oferecem diversas vantagens em relação aos aços inoxidáveis austeníticos comum, com o mesmo teor de carbono, pois, nele ocorre à precipitação de carbonetos mais aleatória na estrutura, em vez de ficar concentrada junto aos contornos de grão, e porque a fase ferrita é mais rica em cromo que a austenita, podendo perder cromo para os precipitados e manter ainda cromo em solução sólida suficiente para resistir à corrosão. Esses aços inoxidáveis duplex são altamente resistentes a corrosão sob tensão, têm excelente resistência a corrosão por pitting e frestas, apresentando cerca do dobro da resistência dos austeníticos comuns. Do aço inoxidável duplex surge também outras variações, por exemplo, o aço inoxidável Superduplex, Hyper-duplex e lean duplex, entre outras, cada uma delas desenvolvidas para aplicações bem específicas (DAVIDSON e REDMOND, 1990).
- Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são ligas de ferro, cromo (12-17%), níquel (4-8%), molibdênio (0-2%) que podem ser endurecidos por tratamento de envelhecimento e solubilização para dissolver os compostos intermetálicos, como alumínio, cobre, titânio e/ou nióbio. Podem ser austeníticos, semi-austeníticos ou martensíticos, sendo a microestrutura na condição recozida a sua classificação. Possui boa resistência mecânica, tenacidade, ductilidade e de moderada a boa resistência à corrosão (ALVAREZ-ARMAS, 2008).



### 3.1.1 Aços inoxidáveis austeníticos

De acordo com SILVA e MEI (2010), os aços inoxidáveis austeníticos são caracterizados por uma alta resistência à corrosão, elevada tenacidade e boa soldabilidade. Sendo eles classificados na série 300 conforme a designação da AISI. São ligas à base de ferro, cromo (16 – 30%) e níquel (8-35%) e seu teor de carbono, em geral, inferior a 0,08%, sendo predominantemente austeníticos quando submetidos a tratamento térmico e não endurecem por tratamento térmico de têmpera, sendo predominantemente, estrutura austenítica após tratamento térmico comercial, tornando esse tipo de aço interessante tanto para aplicações criogênicas (por não sofrerem transição dúctil-frágil) como aplicações à temperatura elevada, em função da resistência ao amolecimento e resistência à deformação a quente. Os aços inoxidáveis austeníticos são normalmente solubilizados, aproximadamente, 1050 °C e resfriados rapidamente para evitar a precipitação de carbonetos, preservando estruturas metaestáveis. Aços com maiores teores de elementos de liga têm sido desenvolvidos, classificados como superausteníticos (SILVA e MEI, 2010).

De acordo com CHIAVERINI (1998), são aços que podem ser divididos em dois grupos, os aços ao cromo-níquel e os aços ao cromo-mangânês-níquel, onde os aços inoxidáveis austeníticos se enquadram mais nos aços ao cromo-níquel com teor de cromo 18% e o de níquel 8%. A introdução de níquel forma uma camada de óxido que protege o aço espontaneamente melhorando, a resistência à corrosão e a resistência à oxidação a altas temperaturas pelo fato do níquel ser mais nobre que o ferro. Onde é observado que a restauração da película inerte retirada de um aço inoxidável ao Cr-Ni é muito mais rápida que a de um aço inoxidável somente ao cromo. O grupo de aços ao cromo-mangânês-níquel ha uma substituição de parte do níquel (cerca de 4%), por outros elementos de tendências austenitizante, como mangânês (em torno de 7%) e o nitrogênio (em teores não superiores a 0,25%).

As principais características dos aços inoxidáveis austeníticos é que são não magnéticos; não endurecidos quando submetidos ao tratamento térmico, pelo fato de serem austeníticos; ao serem encruados tem um aumento de dureza relativamente alto, fazendo uma comparação com o encruamento de outros aços. À instabilidade da austenita retida sob o efeito das tensões do encruamento transforma-se parcialmente e paulatinamente em ferrita, essa estando supersaturada de carbono nas mesmas condições da martensita contribui para um endurecimento muito elevado, possibilitando um aumento a resistência a tração da ordem

2450 MPa com uma porcentagem que num aço comum não produziria em media cerca de 1370 MPa, esse exemplo foi para um estiramento a frio de um aço 18% Cromo -8% Níquel para um aço comum. Já com um aquecimento moderado do aço encruado ele restaura a austenita. (CHIAVERINI, 1998).

Nos aços inoxidáveis austeníticos o aumento do teor de níquel diminui o efeito do encruamento por ele ser um elemento com ação estabilizadora. Tanto que se costuma classificar os aços inoxidáveis austeníticos pela resistência ao encruamento, desde o tipo do aço recozido mole até o tipo inteiramente duro. (CHIAVERINI, 1998).

Algumas aplicações para soldagem e outras operações a quente, exigem uma composição mais nobre dos aços inoxidáveis austeníticos, onde apresentam teores de carbono máximo de 0,03 %, (classificadas como a classe L), com isso cria uma situação que deve ser compensada aumentando o níquel para que se consiga estabilizar a austenita ou ainda nióbio ou titânio formando precipitados mais estáveis que o carboneto de cromo (CARVALHO, 2006).

O aço inoxidável austenítico AISI 316 L contém molibdênio, cromo (16-18 %) e níquel (10-15 %) como elementos de liga (EL) principais. O teor de níquel presente provoca a estabilização da fase austenítica na temperatura ambiente. Os teores elevados de Ni e Cr aumentam de forma considerável a resistência à corrosão. No entanto, a resistência a corrosão ao longo do contorno de grão pode diminuir, em especial, quando está região for exposta a alta temperatura e facilitando a precipitação do Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. (TEDESCHI, SIGNORELLI, NEVES, 2010).

### 3.2. SOLDAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS

Um dos pontos principais antes de realizar a soldagem é a limpeza, para que se possam minimizar as contaminações que deterioreem a sua resistência à corrosão. Outro ponto importante é a forma do cordão, pois irregularidades superficiais podem ocasionar pontos de acúmulo de sujeira e início de corrosão. Adicionalmente, as diferenças de propriedades físicas entre os aços comuns e os inoxidáveis, implicam em diferenças nos procedimentos de soldagem. As principais diferenças de propriedades são: 1. Menor temperatura de fusão. 2. Menor condutividade térmica. 3. Maior coeficiente de expansão térmica. 4. Maior resistência elétrica. (MODINESI, 2011).

Na soldagem de aços inoxidáveis os processos de soldagem mais utilizados são eletrodo revestido (SMAW), arco de soldagem com gás e tungstênio (GTAW) mais conhecida como TIG e soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo metálico (GMAW), mais

conhecido como MIG/MAG, embora vários outros sejam também usados. O processo SMAW é utilizado em serviços em geral, particularmente no campo e em diferentes posições. O processo GTAW é amplamente utilizado na soldagem de peças de aço inoxidável de menor espessura. O processo GMAW é utilizado para juntas mais espessas, sendo um processo de maior produtividade. Transferências spray (com misturas Ar-2%O<sub>2</sub> ou 5%O<sub>2</sub>) e por curto circuito (com misturas Ar-CO<sub>2</sub> e Ar-He-CO<sub>2</sub>) podem ser usadas. Arames tubulares para a soldagem destes aços estão se tornando mais comuns nos últimos anos. (MODINESI, 2011).

Aços inoxidáveis austeníticos são relativamente simples de soldar, com exceção dos aços com adição de enxofre para usinagem fácil. Os aços austeníticos apresentam coeficiente de expansão térmica maior (cerca de 45%), maior resistência elétrica e menor condutividade térmica que os aços doces. O problema de corrosão que acontece nesses aços com teores de carbono acima de 0,06%, é a precipitação dos carbonetos nos contornos de grão da ZTA, durante o ciclo térmico de soldagem, prejudicando a resistência a corrosão. Uma maneira de minimizar esse problema é diminuindo a corrente e aumentando a velocidade de avanço, isso devido a menor temperatura de fusão desses aços e sua menor condução de calor. (MODINESI, 2011).

Na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos é usado algumas técnicas para minimizar a distorção. Em chapas finas, dispositivos de fixação e um ponteamto cuidadoso são, em geral, uma necessidade. (MODINESI, 2011).

### 3.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Após selecionar o arame e o gás para a soldagem, tem que escolher as condições de operação. Os quatro parâmetros mais importantes são a corrente de soldagem, a extensão do eletrodo, a tensão de soldagem e a velocidade de soldagem. Esses parâmetros ocasionaram mudanças na solda (ESAB, 2005).

#### 3.3.1 Modos de transferência do metal

No processo MIG/MAG existe três técnicas distintas de modo de transferência de metal: curto-circuito (short arc), globular (globular) e aerossol (spray arc). Essas técnicas caracterizam a maneira pela qual o metal é transferido do arame para a poça de fusão. Na transferência por curto-circuito a transferência ocorre quando um curto-circuito elétrico é

estabelecido. Isso acontece quando o metal fundido na ponta do arame toca a poça de fusão. (ESAB, 2005).

### 3.3.1.1 Transferência por curto-circuito

Na soldagem com transferência por curto-circuito são utilizados arames de diâmetro na faixa de 0,8 mm a 1,2 mm, e aplicados pequenos comprimentos de arco (baixas tensões) e baixas correntes de soldagem. É obtida uma pequena poça de fusão de rápida solidificação. Muito utilizado na união de materiais de pequena espessura em qualquer posição, materiais de grande espessura nas posições vertical e sobre cabeça, e no enchimento de largas aberturas. (ESAB, 2005).

O metal é transferido do arame à poça de fusão apenas quando há contato entre os dois, ou a cada curto-circuito. O arame entra em curto-circuito com a peça de 20 a 200 vezes por segundo. Quando o arame toca a poça de fusão, a corrente começa a aumentar para uma corrente de curto-circuito. Quando esse valor alto de corrente é atingido, o metal é transferido. O arco é então reaberto. Como o arame está sendo alimentado mais rapidamente que o arco consegue fundi-lo, o arco será eventualmente extinguido por outro curto. O ciclo recomeça. Não há metal transferido durante o período de arco aberto, somente nos curtos-circuitos (ESAB, 2005).

Para garantir uma boa estabilidade do arco na técnica de curto-circuito devem ser empregadas correntes baixas. A Tabela 1 ilustra a faixa de corrente ótima para a transferência de metal por curto-circuito para vários diâmetros de arame. Essas faixas podem ser ampliadas dependendo do gás de proteção selecionado (ESAB, 2005).

**Tabela 1:** Faixa de corrente de curto-circuito.

| Diâmetro do arame |      | Corrente de soldagem (A) |        |
|-------------------|------|--------------------------|--------|
| pol (")           | mm   | Mínima                   | Máxima |
| 0,030             | 0,76 | 50                       | 150    |
| 0,035             | 0,89 | 75                       | 175    |
| 0,045             | 1,10 | 100                      | 225    |

Fonte: ESAB (2005).

### **3.3.2 Fonte de soldagem**

No processo MIG/MAG a maioria das soldas são executadas com polaridade reversa (CC+). O polo positivo é conectado à tocha, enquanto o negativo é conectado à peça. Enquanto que a velocidade de alimentação do arame e a corrente, é regulada pelo controle de soldagem, o ajuste básico feito pela fonte de soldagem é no comprimento do arco, que é ajustado pela tensão de soldagem. A fonte de soldagem também pode ter um ou dois ajustes adicionais para uso com outras aplicações de soldagem (ESAB, 2005).

Uma fonte MIG/MAG proporciona uma tensão do arco relativamente constante durante a soldagem. Essa tensão determina o comprimento do arco. Quando ocorre uma variação brusca da velocidade de alimentação do arame, ou uma mudança momentânea da tensão do arco, a fonte aumenta ou diminui abruptamente a corrente (e, portanto, a taxa de fusão do arame) dependendo da mudança no comprimento do arco. A taxa de fusão do arame muda automaticamente para restaurar o comprimento original do arco. Como resultado, alterações permanentes no comprimento do arco são efetuadas ajustando-se a tensão de saída da fonte. A velocidade de alimentação do arame que o operador seleciona antes da soldagem determina a corrente de soldagem. Esse parâmetro pode ser alterado sobre uma faixa considerável antes que o comprimento do arco mude o suficiente para fazer o arame tocar na peça ou queimar o bico de contato (ESAB, 2005).

### **3.3.3 Gás de proteção**

Para o manual da ESAB (2005), o gás de proteção tem o objetivo de expulsar o ar atmosférico da região de soldagem por um com o objetivo de evitar a contaminação da poça de fusão. A contaminação é causada principalmente pelo nitrogênio, oxigênio e vapor d'água presentes na atmosfera. Como exemplo, o nitrogênio no aço solidificado reduz a ductilidade e a tenacidade da solda e pode causar fissuração. Em grandes quantidades o nitrogênio pode causar também porosidade. O oxigênio em excesso no aço combina-se com o carbono e forma o monóxido de carbono (CO), que pode ser aprisionado no metal, causando porosidade. Além disso, o oxigênio em excesso pode se combinar com outros elementos no aço e formar compostos que produzem inclusões no metal de solda — o manganês (Mn) e o silício (Si), por exemplo. Quando o hidrogênio (H), presente no vapor d'água e no óleo, combina-se com o

ferro (Fe) ou com o alumínio (Al), resultará em porosidade e pode ocorrer fissuração sob cordão no metal de solda (ESAB, 2005).

O argônio é um gás inerte que é usado tanto puro quanto em misturas com outros gases para alcançar as características de arco desejadas na soldagem de metais ferrosos e não ferrosos. Quase todos os processos de soldagem podem utilizar o argônio ou misturas de argônio para alcançar boa soldabilidade, propriedades mecânicas, características do arco e produtividade. O argônio é empregado puro em materiais não ferrosos como o alumínio, ligas de níquel, ligas de cobre e materiais reativos que incluem o zircônio, titânio e tântalo. O argônio proporciona excelente estabilidade ao arco no modo de transferência por aerossol, boa penetração e ótimo perfil do cordão na soldagem desses metais. Algumas soldas em curto-circuito de materiais de pequena espessura são também viáveis. Quando usado na soldagem de metais ferrosos, o argônio é normalmente misturado com outros gases como o oxigênio, hélio, hidrogênio, dióxido de carbono e/ou nitrogênio (ESAB, 2005).

### 3.3.4 Condições de soldagem para soldagem de aço inoxidável

A transferência por curto-circuito deve ser utilizada na soldagem de materiais de pequena espessura na posição plana, no fechamento de aberturas largas e em toda a soldagem fora de posição. O melhor gás de proteção para se usar na soldagem por curto-circuito de aços inoxidáveis é 90% He / 7,5% Ar / 2,5% O<sub>2</sub>. Essa mistura proporciona boa penetração, boa estabilidade do arco e boas propriedades da solda. A mistura Ar / 25% CO<sub>2</sub> pode ser usada, mas apenas para soldas monopasse onde a resistência à corrosão não seja essencial ao uso final. (ESAB,2005).

**Tabela 2:** Condições de soldagem para aços inoxidáveis, transferência por curto-circuito e aerossol.

| Espessura (mm) | Arame Ø (mm) | Corrente CC+ (A) | Tensão (V) | Velocidade alimentação arame (mm/s) | Vazão gás prot. (L/min) | Velocidade soldagem (mm/s) | Número passes |
|----------------|--------------|------------------|------------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------|
| 1,6            | 0,8          | 80-100           | 15-18      | 65-80                               | 12-14                   | 6-13                       | 1             |
|                | 0,9          |                  |            | 40-80                               |                         |                            |               |
| 2,4            | 0,9          | 125-150          | 17-21      | 95-120                              | 12-14                   | 8-13                       | 1             |
| 3,2            | 0,9          | 130-160          | 18-24      | 105-120                             | 12-14                   | 8-10                       | 1             |
| 4,0            | 1,2          | 190-250          | 22-28      | 85-120                              | 12-14                   | 10-13                      | 1             |
|                | 1,2          |                  |            | 110-155                             |                         |                            |               |
| 6,5            | 1,6          | 225-300          | 22-30      | 45-65                               | 14-21                   | 10-13                      | 1             |
| 10,0           | 1,6          | 275-325          | 22-30      | 95-105                              | 14-21                   | 6-8                        | 2             |
| 12,5           | 2,4          | 300-350          | 22-30      | 30-35                               | 14-21                   | 2                          | 3-4           |
| 19,0           | 2,4          | 350-375          | 22-30      | 35-40                               | 14-21                   | 2                          | 5-6           |
| 25,0           | 2,4          | 350-375          | 22-30      | 35-40                               | 14-21                   | 1                          | 7-8           |

Fonte: ESAB (2005).

A Tabela 2 de condições de soldagem deve servir apenas como um ponto de partida quando se iniciarem novas aplicações. Elas não representam o único bom caminho pelo qual as soldas podem ser feitas. Modificações nas condições de soldagem serão provavelmente causadas pelas diferentes experiências dos soldadores, pela configuração exata da junta de solda e pelo equipamento em uso. Para obter as condições ótimas de soldagem que melhor satisfazem aos requisitos particulares de uma nova aplicação é sempre aconselhável conduzir os testes de qualificação antes do início da produção. Entretanto, esse é o ponto básico — escolher uma boa e estável condição de soldagem, e então ela provavelmente poderá ser empregada em muitas aplicações (ESAB, 2005).

### 3.4. CORROSÃO EM AÇOS INOXIDÁVEIS

Segundo GENTIL (2011), corrosão é a deterioração do material, por ação química ou eletroquímica, do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos. A corrosão é uma deterioração do material e seu meio operacional, que com essas deteriorações o material se torna inviável para o uso, pois irá apresentar alterações como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais.

A corrosão é um processo espontâneo, que modificam a durabilidade e desempenho dos materiais metálicos, esses que são usados frequentemente em vários tipos de obras e instalações, podendo acarretar em altos custos, como de manutenção, substituição de peças, onde essas peças podem sofrer fraturas repentinas podendo causar acidentes. (GENTIL, 2011).

Assim a corrosão pode ocorrer de diversas formas (ou tipos), se prolongando através da superfície do metal, podem ser apresentados considerando-se a aparência ou forma de ataque e as diferentes causas de corrosão e seus mecanismos. Com isso temos a importância do seu estudo, pois os conhecendo, podem-se obter algumas maneiras para sua prevenção. (GENTIL, 2011).

A corrosão intergranular ocorre principalmente nos meios ácidos (ácidos sulfúrico, nítrico, fosfórico, crômico, cianídrico, acético, oxálico, cloreto de ferro, etc.) (ZANETIC, FALLEIROS, 2001).

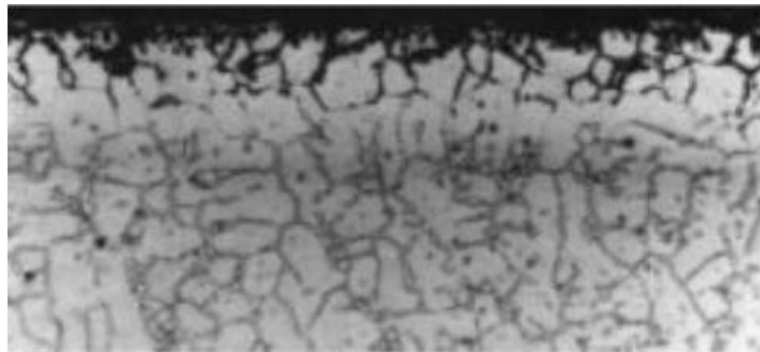
A caracterização microestrutura, por microscopia ótica, conduzida em amostras polidas e atacadas eletroliticamente com ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) a 60%. Contem partículas em forma de

precipitados, caracterizadas, aplicando-se a técnica de extração de precipitados por dissolução preferencial de fase, utilizando ataque eletrolítico em solução 10% HCl em metanol. Após a dissolução, o eletrólito foi filtrado em membrana de PVDF (tamanho médio de poro de 0,22  $\mu$ m) e o resíduo extraído analisado por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e por difração de raios X (GIORDANI, FERREIRA, BALANCIN, 2007).

### 3.4.1 Corrosão Intergranular

Essa corrosão se processa entre os grãos que são regiões de mais alta energia que possibilitam surgimentos de sítios preferenciais de precipitação de segundas fases, e com o tempo a corrosão aumenta até o ponto dos grãos serem destacados, da rede cristalina do material metálico como mostrado na figura 3, onde o material perde suas propriedades mecânicas, suportando até sua fratura uma menor solicitação mecânica, e tendo-se também corrosão sob tensão fraturante. (GENTIL, 2011).

**Figura 3:** Corrosão Intergranular ou intercristalina.



**Fonte:** GENTIL, 2011.

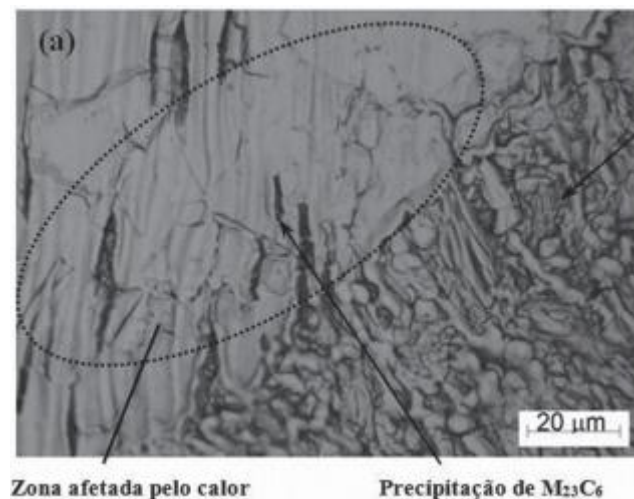
Nos aços inoxidáveis esse fenômeno ocorre pelo empobrecimento de cromo no contorno de grãos. Esse empobrecimento é causado pela precipitação do carboneto de cromo  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , ou em associação com o ferro, na forma  $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ , deixando a região deficiente de cromo. Com isso acaba-se com a passivação do aço nessa região, pela formação de uma pilha ativa-passiva, em que os grãos constituem áreas catódicas relativamente grandes em relação às pequenas áreas anódicas que são os contornos de grão. (GENTIL, 2011).



Aços inoxidáveis austeníticos apresentam um fenômeno indesejável que é a corrosão intergranular, devido a precipitação de carboneto de cromo. Mas existe meio de evita-las, como o adicionamento de titânio e de nióbio. (CHIAVERINE, 1998).

A susceptibilidade à corrosão intergranular de acordo com o padrão visual definido pelas normas ASTM A-262 / ASTM A-763 *Apud* (Oliveira, 2014), em seu artigo, observou-se a formação de valas intergranulares na zona afetada pelo calor (ZAC) da chapa AISI 316L, especificamente nos grãos localizados à margem da linha de fusão do metal de solda, demonstrando que houve a precipitação de carbonetos de cromo ( $M_{23}C_6$ ) nessa região como mostra a figura 4, a micrografia resultante do ensaio de sensitização da junta tubo espelho soldada, onde a zona afetada pelo calor referente à chapa AISI 316L e ao metal de solda, com indícios de precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grãos localizados à linha de fusão da solda. (OLIVEIRA, 2014).

**Figura 4:** Micrografia da zona afetada pelo calor.



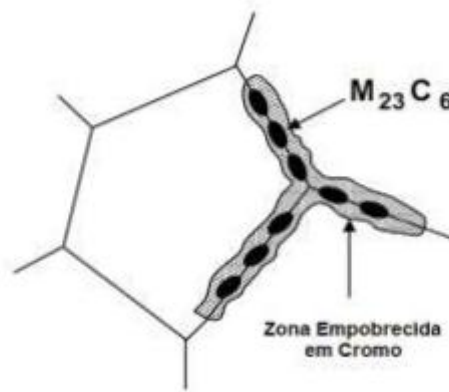
Fonte: OLIVEIRA (2014).

De acordo com a literatura, o ciclo térmico de soldagem atingiria a faixa de temperatura de sensitização na ZAC da junta soldada, contudo, observou-se que as valas formaram-se especificamente nos contornos de grãos localizados à margem da linha de fusão do metal de solda (OLIVEIRA, 2014).

### 3.4.2 Sensitização

O fenômeno da sensitização pode ocorrer nos aços inoxidáveis austeníticos, caracterizado pela precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, sendo os mais comum para esses aços o  $M_{23}C_6$  ( $M = Cr, Ni, Fe$ ;  $Cr=65\%$ ,  $Ni=10\%$ ,  $Fe=5\%$ ), e é um fenômeno indesejado ocorrendo quando os aços são aquecidos na faixa de temperatura entre  $450^{\circ}C$  a  $800^{\circ}C$ , por um determinado intervalo entre 1 hora a 100 horas. Essa precipitação promove a redução do teor cromo nas proximidades dos contornos de grão para valores inferiores a 12%, tornando essas regiões susceptíveis à corrosão intergranular, a Figura 5 é um desenho esquemático mostrando a região empobrecida em cromo próxima aos contornos de grão com presença dos carbonetos  $M_{23}C_6$ . (SABARA, 2013).

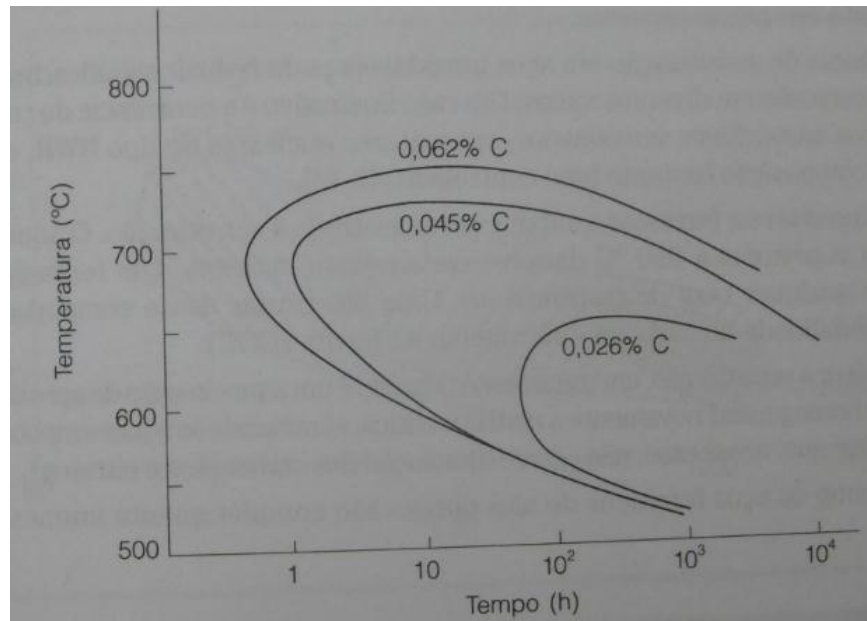
**Figura 5:** Região empobrecida em cromo.



**Fonte:** TOO, 2002.

A precipitação é um fenômeno em que os carbonetos nos contornos de grão variam em função da temperatura, do tempo e da quantidade de carbono presente nos aços inoxidáveis, como pode ser visto na figura 6, o tempo de tratamento, na temperatura indicada, necessário para que ocorra sensitização e o material seja rejeitado pelo ensaio “E” da norma ASTM A262 para avaliação de corrosão intercrystalina, onde mostra resultados obtidos para AISI 304 com diferentes teores de carbono, solubilizado a  $1050^{\circ}C$ , seguido de resfriamento em água.

**Figura 6: Temperatura em função do tempo para que ocorra sensitização do aço inoxidável.**



**Fonte:** SILVA e MEI (2010).

### 3.3.2.1 Sensitização na ZAC

A análise microestrutural na região da ZAC revelou a presença de precipitados finamente dispersos tanto na matriz quanto nos contornos de grão da ferrita. Em muitos casos, observou-se a presença destas partículas precipitadas nos contornos de sub-grão no interior da ferrita. Nesta região as temperaturas atingidas são superiores a 900°C, a qual confere condições favoráveis para uma possível precipitação de carbonetos de cromo (FOLKHARD, 1988).

Utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível observar os precipitados na ZAC. Onde precipitam tanto nos contornos de sub-grão quanto no interior da ferrita. Verifica-se que o tamanho dos precipitados é bastante pequeno, inviabilizando a análise de EDX para determinar se as partículas são carbonetos, nitretos ou carbonitretos de cromo. Nos contornos de grão da ferrita também foram observados precipitados. A ocorrência de valas é característica da precipitação de carbonetos de cromo. A ocorrência de carbonetos, nitretos e carbonitretos de cromo pode acarretar no empobrecimento de cromo da matriz, tornando o material susceptível à corrosão (SILVA, MACHADO, FARIAS, 2005).

Quantificar estes precipitados por microscopia ótica é bastante complicado, principalmente por que em muitos casos os precipitados ocorrem em grande quantidade nos contornos de sub-grãos e também nos seus interiores. Outra alteração metalúrgica que não foi avaliada neste trabalho, mas que pode conduzir a problemas de corrosão é a formação de fase

$\alpha'$ , que é formada através da decomposição spinoidal da ferrita em duas fases, uma rica em cromo (fase  $\alpha'$ ), e outra pobre em cromo. Enquanto a fase rica em cromo causa o fenômeno da fragilização nos 475°C, a fase pobre em cromo pode ser atacada mais facilmente, sofrendo um processo de corrosão (SILVA, MACHADO, FARIAS, 2005).

### 3.4.3 Corrosão Puntiforme (Pite)

É uma corrosão localizada, onde são formados pequenos pites ou buracos. Ordinariamente eles penetram a partir do topo de uma superfície horizontal para o interior do material, em uma direção vertical. É uma corrosão que não é muito detectada e acarreta em perda de material muito pequena até ocorrer a falha. Como ilustra a figura 7. (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

**Figura 7:** Corrosão por pite em tubo de aço inoxidável AISI 304.



**Fonte:** GENTIL, 2011.

Supõe-se que a força da gravidade faça com que os pites cresçam para baixo, com uma solução na extremidade do pite tornando-se mais concentrada e densa conforme progride o crescimento do pite, tendo uma oxidação no interior do pite, com uma redução na superfície. Polir os aços seria o ideal para evitar a formação de pites, pois eles podem ser iniciados por um defeito superficial localizado, como um arranhão ou uma pequena variação na composição. São muito frequentes em aços inoxidáveis, mais podendo ter uma diminuição desse tipo de corrosão ao adicionar 2% de molibdênio. (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Segundo SILVA e MEI (2010), os fatos que podem promover a corrosão por pites são:

- Soluções de cloreto e sais oxidantes;
- Soluções neutras, aeradas, de cloreto;
- Aumento da temperatura.

Os métodos de se evitar esse tipo de corrosão segundo o mesmo autor são:

- Evitar concentração de íons halogênios;
- Manter as soluções agitadas para evitar desuniformidade no potencial de oxigênio;
- Manter a concentração de oxigênio alta, ou eliminar o oxigênio;
- Aumentar o pH, pois, o íon (OH-) age como inibidor da corrosão por pites;
- Trabalhar à temperatura mais baixa possível;
- Empregar passivadores ou proteção catódica.

A presença de elementos de liga como Cr, Mo e N favorecem a resistência à corrosão por pite desses tipos de aços.

#### 3.4.4 Corrosão sob Tensão

Essa denominada algumas vezes de trincamento por corrosão sob tensão, que é o resultado de uma combinação de tensão de tração e de um ambiente corrosivo. Então quando se coloca um material em um meio corrosivo e que esse material está sobre o efeito de alguma tensão ele pode vir a forma pequenas trincas em que essas vão se propagar em uma direção perpendicular à da tensão, podendo ocorrer uma falha. A falha tem uma característica de um material frágil. As tensões que podem gerar essas trincas não são maiores ou iguais as do limite de resistência a tração, podem ser muito inferiores. A figura 8 ilustra uma corrosão sob tensão no aço inoxidável AISI 304 que chegou a fraturar. (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

**Figura 8:** Corrosão sob tensão fraturante em tubo de aço inoxidável AISI 304.



**Fonte:** GENTIL, 2011.

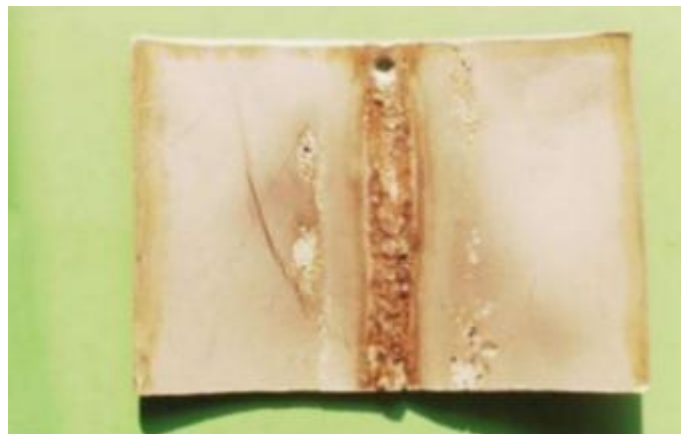
As tensões que ocasionam essas trincas não são necessariamente tensões externas, no caso pode ser também tensões residuais onde são o resultado de uma variação rápida de temperatura e de uma contração desigual, ou, no caso das ligas bifásicas, nas quais cada fase possui um coeficiente de expansão diferente. Além dessas causas já citadas, também pode ocorrer tensões internas por causa dos produtos de corrosão sólidos e gasosos que ficam presos internamente. (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Então uma maneira de reduzir ou eliminar esse tipo de corrosão, é diminuir a magnitude da tensão, que pode ser obtido pela redução da carga externa ou pelo aumento da área da seção transversal perpendicular à tensão aplicada. Além disso, pode-se fazer um tratamento térmico para alívio de tensões, no caso recozer o material, assim eliminando as tensões térmicas residuais. (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

### 3.4.5 Corrosão em aços inoxidáveis soldados

Uma das formas de corrosão nos aços inoxidáveis soldados, é a corrosão em torno do cordão de solda, que ocorre nos aços inoxidáveis não estabilizados ou com teores de carbono maiores que 0,03% e a corrosão se processa intergranularmente. A figura 9 mostra um a corrosão de um aço inoxidável. (GENTIL, 2011).

**Figura 9:** Corrosão em torno do cordão de solda de um aço inoxidável



**Fonte:** CEFET (2012)

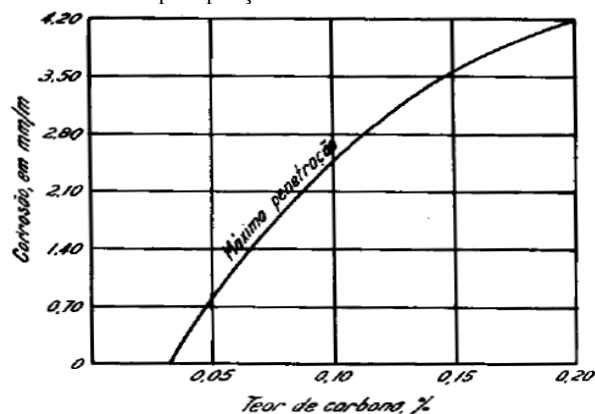
Os aços inoxidáveis cromo-níquel (tipos austeníticos), quando sujeitos a tratamentos a altas temperaturas como aquecidos para trabalho a quente, sujeitos a tratamentos térmicos, ou para soldagem numa certa faixa de temperaturas, a uma precipitação de um constituinte de contorno de grão que pode provocar a corrosão intergranular. No qual essa faixa de

temperatura está entre 400 a 900°C, onde se sujeito a algum tempo a essas temperaturas pode ser que venha a sofrer uma desintegração após algumas horas exposto a uma solução corrosiva. (CHIAVERINI, 1998).

Para CHIAVERINI (1998), a corrosão intergranular nos aços inoxidáveis austeníticos depende de uma série de fatores entre eles: o tempo de permanência dentro de uma faixa de temperaturas consideradas críticas; teor de carbono; granulação do aço; deformação a frio; presença de determinados elementos de liga. Baseando-se, nesses fatores, uma das formas de combater esse tipo de corrosão, são entre outros:

- Reaquecimento do aço, que avia sido aquecido anteriormente a uma faixa perigosa entre 400-800°C, a temperaturas entre 950°C e 1150°C, de modo a ter uma redissolução dos carbonetos existentes nos contornos de grão. Em seguida resfria rápido para evitar a precipitação. O reaquecimento é sempre conveniente pois pode ocorrer oxidação e empenamento ou mesmo deformações das peças a essas temperaturas. Com isso ao se realizar uma soldagem onde as peças serão sujeitas a essas faixas de temperaturas, pode ocorrer uma nova precipitação de carbonetos. (CHIAVERINI, 1998).
- Redução do teor de carbono do aço de uma maneira que esse teor se torne ineficaz na formação de carbonetos ou na remoção do cromo nos grãos. O efeito do carbono na resistência a corrosão do aço inoxidável austenítico tipo 18% cromo e 8% níquel pode ser ilustrado na figura 10, onde a curva traçada no gráfico, foi tirado de amostras desse tipo de aço com carbono crescente e propositamente aquecidas a temperaturas que provocaram, no maior grau possível, a precipitação de carboneto. (CHIAVERINI, 1998).

**Figura 10:** Efeito do teor de carbono sobre a corrosão de aço inoxidável 18-8 tratado termicamente de modo a produzir máxima precipitação de carbonetos.



Fonte: CHIAVERINI, 1998.

Percebe-se que a medida que o carbono decresce, diminui o ataque corrosivo, o mínimo verificado foi ao atingir 0,03%. Até 0,03% de carbono, para qualquer tratamento térmico que tenha sido usado, o carbono ou permanece dissolvido sem qualquer efeito nocivo, ou precipita-se nos contornos dos grãos na forma de carboneto de cromo, em quantidades insuficientes para formar um invólucro contínuo em torno dos grãos. E acima de 0,03 o carboneto de cromo formado começa a envolver de modo contínuo os grãos, ocorrendo então o empobrecimento do metal adjacente a tal ponto que sua inoxidabilidade fica prejudicada. (CHIAVERINI, 1998).

- Manter o tamanho de grão pequeno, pois a granulação grosseira torna o aço mais susceptível à corrosão intergranular que a granulação fina. (CHIAVERINI, 1998).
- Promover deformação a frio após a solubilização; é admitido, que a precipitação de carbonetos responsáveis aparente pela corrosão intergranular, se dará previamente ao longo dos planos de escorregamento originados na deformação a frio no interior dos grãos e não nos seus contornos, resultando numa dispersão dos carbonetos dentro dos grãos o que diminuirá a susceptibilidade à corrosão intergranular. É necessário, após a deformação a frio, aquecer o aço dentro da faixa crítica para forçar a precipitação de carbonetos ao longo dos planos de escorregamento. (CHIAVERINI, 1998).
- E o método mais comum é adicionar elementos de liga que tenha maior afinidade ao carbono do que o cromo, evitando, pois que este precipite como carboneto e deixando-o em condições de agir como elemento realmente promotor da passividade. Elementos de liga mais usuais para esse fim são titânio, nióbio e o tântalo. Por outro lado a presença de 1% a 3% molibdênio torna o aço inoxidável menos susceptível a corrosão intergranular. (CHIAVERINI, 1998).

### 3.6 TAXA DE CORROSÃO

Para uma análise mais detalhada, foram elaboradas técnicas para o estudo de corrosão em aços, criando índices que medem de forma mais precisa como esses materiais e sistemas são susceptíveis a corrosão, onde esses índices fazem parte do monitoramento da corrosão e são amplamente utilizados na avaliação dos processos de deterioração de acordo com a ASTM uma forma de acelerar a corrosão de aços é colocando os aços em uma solução ácida como, por exemplo, o ácido nítrico para testes de detecção da susceptibilidade e ataque intergranular em aços inoxidáveis austeníticos.



Um resumo desse ensaio é quando pega-se um espécime do material a ser avaliado e é imerso numa solução em ebulição de ácido nítrico para tempo especificado. A perda de massa resultante é convertida em taxa de corrosão, que é comparada com um valor máximo para determinar se o material tem a resistência ataque esperado da qualidade do material a ser testado (ASTM).

Esse cálculo consiste basicamente na avaliação da taxa de corrosão determinada através da taxa de penetração e taxa de perda de massa, que são expressas pelas equações 1 e 2, respectivamente:

$$TCP = \frac{KW}{\rho At} \quad (1)$$

Onde K é uma constante que vale 87,6 mm/ano, W é a perda de massa em g, A é a área exposta em cm<sup>2</sup>, t é o tempo de exposição em horas, e  $\rho$  é a massa específica do material em g/cm<sup>3</sup>.

$$TPM = \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde  $\Delta M$  é expressa a variação de massa e  $\Delta t$  é a variação de tempo.

A perda de massa é convertida em perda de espessura total, ou taxa de corrosão generalizada. De acordo com o valor, o processo corrosivo pode ser classificado como baixo, moderado ou alto. Para análise qualitativa da extensão corroída, utiliza-se a classificação apresentada na tabela 3.

**Tabela 3:** Classificação qualitativa dos aços-carbono quanto à taxa de corrosão uniforme e taxa máxima de pites.

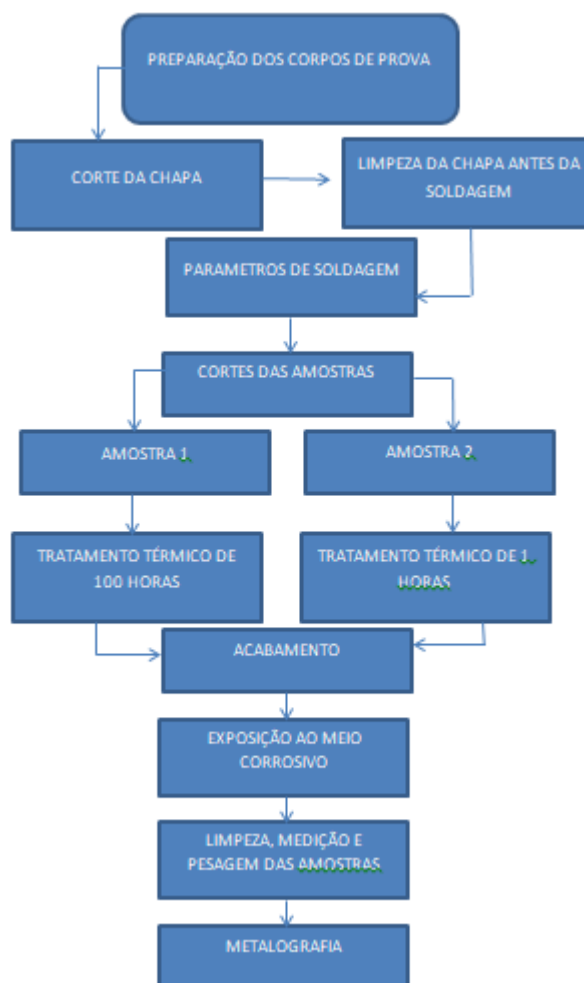
|          | Taxa Corrosão Uniforme | Taxa Máxima Pites |
|----------|------------------------|-------------------|
|          | <i>mm/ano</i>          | <i>mm/ano</i>     |
| Baixo    | <0.025                 | <0.13             |
| Moderado | 0.025-0.12             | 0.13-0.20         |
| Alto     | 0.13-0.25              | 0.21-0.38         |
| Severo   | >0.25                  | >0.38             |

Fonte: NACE, 2005

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização desse experimento, foram elaborados procedimentos, seguindo o fluxograma figura 11 que descreve simplificadaamente, os passos realizados durante o desenvolvimento do experimento, desde corte das amostras até o momento da análise microscópica:

**Figura 11:** Fluxograma simplificado das etapas do experimento.



**Fonte:** Autoria Própria (2017).

O corte da chapa de aço inoxidável austenítico 316, com dimensões 300x300 milímetros e 4 milímetros de espessura, para a formação dos corpos de prova com 150x150mm e 4 mm de espessura, foi utilizada uma serra fita da Starret modelo S1101. Dividindo assim o corpo de prova em duas amostras. Em seguida utilizou trapos úmidos para limpar os corpos de prova e

esperou secar, para que pudesse ser ponteadado, com os parâmetros de soldagem embasados em obras literárias ver tabela 2 para chapas de espessura de 4 milímetros. A corrente inversa (CC+) igual a 200 A, o arame disponível era o ER70S-7 de 0,9 mm, tensão de 20 V e o gás de proteção disponível foi Argônio puro, velocidade de alimentação do arame 120 mm/s, vazão do gás 14L/min (por ter sido feita em campo teve interferência do vento), velocidade de soldagem foi estabelecida pelo soldador porque varia de habilidade de um soldador para outro e foi uma solda monopasse. E assim realizado a soldagem das duas amostras, com os mesmos parâmetros. Logo em seguida as amostras foram submetidas a um tratamento térmico no forno tipo mufla modelo GP-2000 pertencente à UFRSA, aquecidas a uma temperatura de 700°C a amostra 1 durante 100 horas e a amostra 2 durante 1 hora, seguido de um resfriamento lento com o intuito de promover a possível sensitização desses materiais.

Ao passe seguinte foi realizado o lixamento das amostras dessa vez com lixas d'água com granulometria de 180, 220, 320, 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200 numa Máquina/Politriz, para retirada de óxidos que se formaram na superfície durante o tratamento térmico e limpeza das superfícies com a retirada de riscos e marcas mais profundas na superfície, preparando-as para o polimento. Logo após o tratamento térmico foram pesadas as amostras como mostrado na tabela 5.

No polimento foi utilizado solução abrasiva de alumina para retirada de marcas na superfície de ataque numa Lixadeira/Politriz modelo Aropol 2V da Arotec.

Em seguida as duas amostras foram expostas ao meio corrosivo de ácido nítrico de acordo com a norma ASTM A262 (2015), com o intuito de acelerar a corrosão. A solução consta de 133,8 ml de ácido nítrico e 16,2 ml de água, deixando assim as amostras completamente submersas no fluido, cada amostra em um recipiente separado e com a mesma solução. O experimento teve um tempo decorrido de 2 dias num total de 48 horas para cada amostra. (ASTM A262, 2015).

Posteriormente, após a retirada das amostras da solução, foram enxaguadas com água corrida e esfregadas por uma escova de nylon por ser uma recomendação da norma ASTM A262 (2015) para remover qualquer corrosão superficial. Logo após a limpeza e secagem das amostras, elas foram pesadas novamente em balança eletrônica de precisão, para o cálculo da Taxa por Perda de Massa (TPM), fundamentais para análise constatando seu peso final na tabela 5, e será de grande valia para os resultados que irão ser apresentados no final do trabalho.

Em seguida foi realizada análise de microscopia para verificação detalhada do quanto à corrosão atacou cada amostra do aço inoxidável 316 que tem sua composição química descrita na tabela 4, ou seja, foi verificada a susceptibilidade ou não à corrosão do aço. Antes disso, todas as amostras foram submetidas a um processo de polimento e ataque químico para só então passarem pela análise microscópica.

O ataque químico com solução com 2 ml de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), 2 ml de ácido acético, 2 ml de ácido clorídrico (HCl) e uma gota de glicerina, desta maneira a superfície a ser observada revelará nitidamente o efeito da corrosão na superfície do aço.

As amostras lixadas e polidas prontas para o exame microscópico desde que os elementos estruturais possam ser distinguidos uns dos outros, através da diferença de cor, relevo, falhas estruturais como trincas, poros, etc. Finalmente, foi realizado a análise de microscopia no microscópio óptico Olympus Gx51 acoplado com câmara digital Olympus SC30 com o software AnalySISgetIT, sendo observadas todas as superfícies de ataque das duas amostras, tirando fotos em aumentos diferentes que revelaram o que a corrosão causou.

**Tabela 4:** Composição química dos aços inoxidáveis austeníticos

| Tipo | Composição Química (%) |                    |                    |                   |                   |               |               |             |                     |
|------|------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------|---------------------|
|      | C <sub>máx.</sub>      | Mn <sub>máx.</sub> | Si <sub>máx.</sub> | P <sub>máx.</sub> | S <sub>máx.</sub> | Cr            | Ni            | Mo          | N <sub>2 máx.</sub> |
| 301  | 0,15                   | 2,00               | 1,00               | 0,045             | 0,030             | 16,00 a 18,00 | 6,00 a 8,00   |             | 0,10                |
| 304  | 0,08                   | 2,00               | 1,00               | 0,045             | 0,030             | 18,00 a 20,00 | 8,00 a 10,50  |             | 0,10                |
| 304L | 0,03                   | 2,00               | 1,00               | 0,045             | 0,030             | 18,00 a 20,00 | 8,00 a 12,00  |             | 0,10                |
| 316  | 0,08                   | 2,00               | 1,00               | 0,045             | 0,030             | 16,00 a 18,00 | 10,00 a 14,00 | 2,00 a 3,00 | 0,10                |
| 316L | 0,03                   | 2,00               | 1,00               | 0,045             | 0,030             | 16,00 a 18,00 | 10,00 a 14,00 | 2,00 a 3,00 | 0,10                |

**Fonte:** Manual Técnico do Aço Inoxidável (2011).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados todos os resultados obtidos durante todo o processo de realização do trabalho. Será discutida a susceptibilidade da corrosão nos aços inoxidáveis tratados termicamente e expostos ao meio corrosivo de ácido nítrico.

### 5.1 ANÁLISE DA DETERIORAÇÃO CORROSIVA

As amostras do aço inoxidável AISI 316 foram exposta ao meio corrosivo de ácido nítrico por um período de 2 dias.

Retiradas da exposição e limpas, as mesma foram pesadas e seus dados foram apresentados na tabela 5:

**Tabela 5:** Medições das amostras do aço inoxidável 316.

| AMOSTRA  | PESO INICIAL(g) | PESO FINAL(g) | REDUÇÃO(%) |
|----------|-----------------|---------------|------------|
| <b>1</b> | 15,9568         | 15,9532       | 0,022561   |
| <b>2</b> | 11,3319         | 11,3308       | 0,01       |

Fonte: Autoria Própria (2017)

Essa perda de massa das amostras é uma consequência da corrosão, induzida pela soldagem e o tratamento térmico que foi realizado, quebrando a película passivadora, deixando as superfícies dessas amostras mais susceptíveis a corrosão.

### 5.2 TAXAS DE CORROSÃO

Como as amostras sofreram corrosão, foram desenvolvidos os cálculos para a análise da taxa de corrosão nas amostras dos aços trabalhados utilizando a equação (2), que trata da Taxa de Perda de Massa (TPM). Onde a taxa de perda de massa (TPM) possui as seguintes variáveis:  $\Delta M$  é expressa a variação de massa e  $\Delta t$  é a variação de tempo.

**Tabela 6:** Taxa de Penetração da Corrosão e Taxa de Perda de Massa do aço inoxidável AISI 316.

| <b>AMOSTRA</b> | <b>TPM (kg/ano)</b> |
|----------------|---------------------|
| <b>1</b>       | 0,000657            |
| <b>2</b>       | 0,00020075          |

**Fonte:** Autoria própria

Obtido os dados da Taxa de Perda de Massa, apresentados nas tabelas 6. Com esses dados podemos dizer que o aço inoxidável teve uma quebra da sua película apassivadora gerando corrosão, evidenciada pela perda de massa.

### 5.3 . FOTOGRAFIA E MICROSCOPIA

Após limpeza e cálculo da Taxa de Perda de Massa do aço foi feito a análise metalográfica e microscópica de cada amostra. Foi possível observar como ficou a superfície das amostras do aço inoxidável AISI 316.

Visualmente não observa corrosão das amostras do aço inoxidável AISI 316. Porém o ataque químico ajudou a ter uma boa visibilidade da ZAC. As figuras 12 e 13 ilustram as amostras. Mostrando apenas uma demarcação da ZAC e a área que foi analisada.

**Figura 12:** Amostra 1 do aço inoxidável 316 submetido a tratamento térmico de 100h e a corroída em solução concentrada de ácido nítrico.



**Fonte:** Autoria própria (2017).

**Figura 13:** Amostra 2 do aço inoxidável 316 submetido a tratamento térmico de 1h e a corroída em solução concentrada de ácido nítrico.

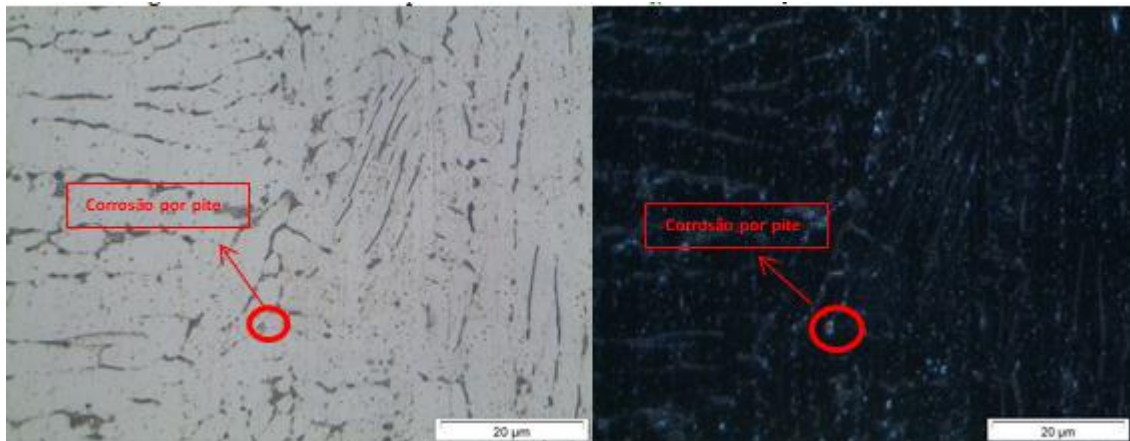


**Fonte:** Autoria própria (2017).

Na análise microscópica das amostras do aço inoxidável AISI 316 tem uma comprovação diferente da visual, onde pode ser observado que nas amostras 1 e 2, respectivamente, o aparecimento de corrosão, um pouco mais localizada na ZAC, tendo a presença de corrosão por pite e uma possível corrosão intergranular tirando como base os experimentos de (OLIVEIRA, 2014), onde no artigo dele observou-se a formação de valas intergranulares na zona afetada pelo calor, especificamente nos grãos localizados à margem da linha de fusão do metal de solda. O calor da soldagem é um dos fatores que favorece diversas transformações microestruturais na ZAC, envolvendo precipitações e formação de fases indesejáveis (TEDESCHI, SIGNORELLI, NEVES, 2010). Sendo impossível quantificar estes precipitados por microscopia ótica (SILVA, MACHADO, FARIAS, 2005).

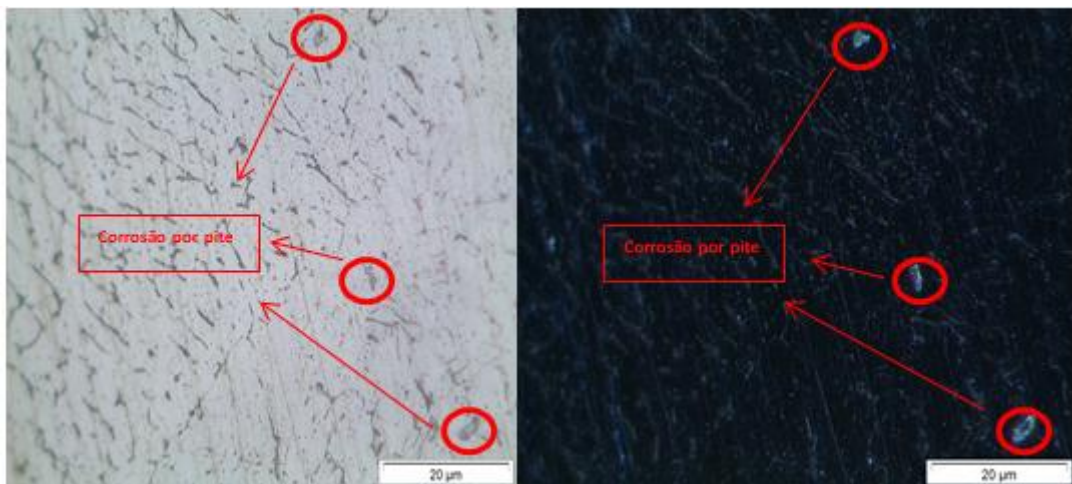
A Figura 14 e 15 estão mostradas as fotomicrografias das amostras 1 e 2 na ZAC.

**Figura 14:** Análise microscópica da ZAC na amostra 1 tratada do aço inoxidável AISI 316.



**Fonte:** Autoria própria (2017)

**Figura 15:** Análise microscópica da ZAC na amostra 2 tratada do aço inoxidável AISI 316.



**Fonte:** Autoria própria (2017)

Analisando as imagens 14 e a 15 que foram as peças tratadas a 700°C por 100 horas e 1 hora, podemos ver a evidência de corrosão, pela perda de massa e pontos que evidenciam a corrosão por pites. Não conseguimos quantificar pelas imagens microscópicas, qual teve uma corrosão mais severa.



## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal fazer uma análise da deterioração corrosiva da zona afetada pelo calor (ZAC), dos aços inoxidáveis 316 tratados termicamente, sendo expostos a uma solução concentrada de ácido nítrico, observando os parâmetros físicos e visuais, identificando o tipo de corrosão e os parâmetros associados à mesma. Partindo dos conhecimentos adquiridos, procedimento, condições de exposição e análise dos resultados obtidos com os testes de exposição realizados em laboratório, conclui-se:

- Foi constatado que o aço inoxidável tratado termicamente por 100 horas teve uma corrosão mais severa que o tratado termicamente por 1 hora isso calculado pela Taxa de Perda de Massa (TPM). Podendo ser observado alguns pites nas análises microscópicas.

.

## 7. REFERÊNCIAS

ALVAREZ-ARMAS, I. **Duplex Stainless Steels: Brief History and Some Recent Alloys, Recent Patents on Mechanical Engineering**. Vol. 1, 2008.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e engenharia de Materiais um Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013.

CARVALHO, J. A. N. **Critério para Seleção de Aços Inoxidáveis** Gerência do Centro de Pesquisas-ACESITA. Disciplina Aços Especiais - Apostila. Universidade Federal de Ouro Preto; Escola de Minas, 2006.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª Ed. 2ª Reimpressão. São Paulo: abm, 1998.

DAVIDSON, R. M., REDMOND, J. D. **Practical guide to using duplex stainless steel**, NIDI Technical Series N° 10044, Nickel Development Institute, 1990.

ESAB. Apostila de soldagem MIG/MAG. Janeiro. 2005.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GIORDANI, E. J; FERREIRA, I; BALANCIN, O. **Propriedades mecânicas e de corrosão de dois aços inoxidáveis austeníticos utilizados na fabricação de implantes ortopédicos**. Março. 2007.

MODENESI, J. PAULO. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Janeiro. 2011.

NACE RP 0775/87 - **Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations**. 2005.

NORMA ASTM. **Standards practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels**. ASTM A262-15. Setembro. 2015

OLIVEIRA, Marcelo. GUILHERME, Luiz. RAVERE, Carlos. KURI, Sebastião. **Resistência à corrosão de junta dissimilar soldada pelo processo TIG composta pelos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 444**. Departamento de Engenharia de Materiais - Dema, São Carlos, SP. Janeiro. 2014

RAMÍREZ, A. J. L. **Precipitação de Fases Intermetálicas e Austenita Secundária na ZAC de Soldagens Multipasse de Aços Inoxidáveis Duplex**. Universidade de São Paulo. 2001.

SABARÁ, Ely Wagner Ferreira. **Caracterização Microestrutural e Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Austeníticos utilizados em aplicações como Biomateriais**. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-rei, São João del Re, 2013.

SILVA, A. L., MEI, P. R., **Aços e Ligas Especiais**, 3ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

SILVA. G. B. da S., **Caracterização de cupons de corrosão através de diferentes técnicas comparativas**. Campos dos Goytacazes. RJ. Janeiro. 2016.

SILVA. C. C; MACHADO, J. P. S. E; ANA. H. B. de. S; FARIAS. J. P; **Estudo Da Sensitização Causada Pelo Ciclo Térmico De Soldagem No Aço Inoxidável Superferrítico Aisi 444**. Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici. 2005.

TEDESCHI. Pedro. A. de. L, SIGNORELLI. Rodrigo, NEVES, M. D. M. das. **Comparação da Junta Soldada pelo Processo GTAW dos Aços Inoxidáveis AISI 316 L e SuperDuplex UNS S32750 para Trocadores de Calor Usados em Refinarias de Petróleo**. Congresso nacional de soldagem. Outubro. 2010.

ZANETIC. S. T; FALLEIROS. N. A; **Determinação do Grau de Sensitização de Aços Inoxidáveis Autênticos pelo Método DL-EPR**. São Paulo. 2001.