

ROBSON SCARMAGNANI

**ESTUDO DA CORROSÃO EM AÇOS INOXIDÁVEIS
AUSTENÍTICOS 316 E 316L, SOLDADOS POR ATRITO
E USINADOS**

JARAGUÁ DO SUL, 2015

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - GERALDO WERNINGHAUS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO
MECÂNICA**

ROBSON SCARMAGNANI

**ESTUDO DA CORROSÃO EM AÇOS INOXIDÁVEIS
AUSTENÍTICOS 316 E 316L, SOLDADOS POR ATRITO
E USINADOS**

Trabalho de conclusão de curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina como parte dos
requisitos de obtenção do título de
Tecnólogo em Fabricação
Mecânica.

Professor Orientador:
Alexandre Galiotto, Me.

JARAGUÁ DO SUL, 2015

CDD 671.35
S285e

Scarmagnani, Robson

Estudo da corrosão em aços inoxidáveis austeníticos 316 e 316L, soldados por atrito e usinados / Robson Scarmagnani; orientação de Alexandre Galiotto. – Jaraguá do Sul, 2015.

1 v. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso Superior (Tecnologia em Fabricação Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Aço inoxidável. 2. Soldagem por atrito. 3. Usinagem. I. Galiotto, Alexandre. II. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Jaraguá do Sul – Geraldo Werninghaus
Catalogado por: Khrisna Vivianne da Silva CRB 14/1229

ESTUDO DA CORROSÃO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS 316 E 316L, SOLDADOS POR ATRITO E USINADOS

ROBSON SCARMAGNANI

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Jaraguá do Sul, 11 de Fevereiro de 2015.

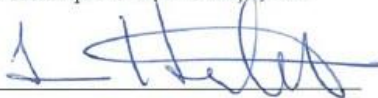
Banca Examinadora:



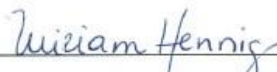
Alexandre Galiotto, Me.



Fernando Henrique Gruber Colaco, Me.



Ivan Luiz Hubert, Me.



Miriam Hennig, Me.

Este trabalho é dedicado aos meus familiares, colegas e amigos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares que me apoiaram na escolha deste curso.

Aos meus colegas de classe que contribuíram para minha formação, sendo com palavras amigas ou ajuda no aprendizado. Em especial à Cintia Fischer e Cleiton Fischer.

Aos meus orientadores Me. Alexandre Galiotto e Miriam Hennig, sempre incentivando e não me deixando desanimar nas dificuldades do presente trabalho.

À WEG equipamentos Elétricos S.A. por ter fornecido ajuda nos ensaios realizados neste trabalho.

À equipe do IFSC-GW, em especial ao Giovani Conrado Carlini, Aldo Zanella Junior e Gerson Ulbricht.

Muito obrigado a todos!

Um ladrão rouba um tesouro, mas não furta a inteligência. Uma crise destrói uma herança, mas não uma profissão. Não importa se você não tem dinheiro, você é uma pessoa rica, pois possui o maior de todos os capitais: a sua inteligência. Invista nela. Estude!

Augusto Cury

RESUMO

Aços inoxidáveis são basicamente ligas de Fe-Cr que apresentam elevada resistência à corrosão e ao calor. Adições de outros elementos de liga, além do processamento térmico, conferem propriedades para aplicações específicas, como no caso dos aços austeníticos. A seleção do material para determinado componente requer análise não só do ambiente em que este será aplicado, como também das etapas do processo de fabricação. Alguns eixos de motores elétricos são produzidos em duas partes: a interna ao motor em aço-carbono, para que ocorra magnetização e opere adequadamente, e a externa ao motor em aço inoxidável, a qual ficará exposta ao ambiente. As partes são unidas utilizando-se soldagem por atrito e posteriormente usinadas. O aço inoxidável austenítico 316 é muito utilizado em ambientes marinhos ou em altas temperaturas. Porém, quando exposto a temperaturas entre 400°C e 900°C pode sofrer sensitização de carbonetos de cromo. Para contornar esta situação, recomenda-se a substituição por aço inoxidável austenítico com baixo teor de C (classe L). O aço inoxidável pode ser contaminado por C, como por exemplo, durante a usinagem, formando carbonetos de cromo e diminuindo a passividade do aço inoxidável. Neste trabalho foram comparados e analisados o efeito da usinagem em dois tipos de juntas dissimilares: aço-carbono com aço inoxidável austenítico 316 e aço-carbono com aço inoxidável austenítico 316L. As juntas foram soldadas por atrito e, posteriormente, a parte de aço inoxidável foi usinada. Um grupo contendo os dois tipos de juntas foi usinado com ferramenta nova e outro com ferramenta já utilizada na usinagem de aço-carbono. Os testes realizados foram o ensaio de névoa salina por 504h, simulando ambientes marinhos e ensaio eletroquímico para a verificação da corrosão intergranular. Foi mensurada a dureza em pontos diferentes no material para verificação da difusão do C devido à soldagem. Os resultados indicam que não ocorreu corrosão intergranular, nem difusão de C no aço inoxidável e notou-se um aumento da quantidade de pites.

Palavras-chave: Aço inoxidável. Soldagem por atrito. Usinagem.

ABSTRACT

Stainless steels are basically alloys of Fe-Cr which shows high resistance to corrosion and heat. Additions of other alloying elements, besides to thermal processing, provide properties for specific applications, such as for austenitic steels. The material selection for a particular component analysis requires not only the environment in which it will be applied, but also the steps of the manufacturing process. Some shafts of electric motors are produced in two parts: The internal to occur rotate magnetization, in mild steel and the external to in stainless steel, in which it will be exposed to the environment. The parts are joined using friction welding and subsequently machined. The 316 austenitic stainless steel is widely used in marine environments or at high temperatures. However, when exposed to temperatures between 400°C and 900°C may undergo precipitation of chromium carbides. To circumvent this situation, the replacement by austenitic stainless steel with low carbon content (class L) is recommended. The stainless steel may be contaminated with carbon, such as, during machining, forming chromium carbides and reducing the passivity of stainless steel. This study compared and analyzed the effect of machining on two types of dissimilar joints, mild steel with 316 stainless and mild steel with stainless steel 316L. The joints were welded by friction and thereafter the part was machined stainless steel, a group containing both types of joints were machined to new tool with tool and other group of contaminated C. The tests were carried out by the salt spray attack for 504 horas, and marine environments simulating electrochemical attack for the verification of intergranular corrosion. Hardness at different points in the material for scanning the diffusion of carbon due to welding was measured. Under these conditions the joints were exposed, there was no significant difference in intergranular corrosion between them. The results shows that neither intergranular corrosion happen, nor decarburization in the stainless steel and it was noticed an increase in the amount of pitting corrosion.

Keywords: *Stainless steel, Friction welding, Machining.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Modificações das composições a partir do aço inoxidável austenítico 304	20
Figura 2 - Amostra com tratamento a 700°C com sensibilização	26
Figura 3 - Fases da soldagem por atrito	30
Figura 4 - Corte transversal do aço inoxidável austenítico 316	34
Figura 5 - Corte transversal do aço inoxidável austenítico 316L	34
Figura 6 - Corte longitudinal do aço inoxidável austenítico 316	35
Figura 7 - Corte longitudinal do aço inoxidável austenítico 316L	35
Figura 8 - Fluxograma dos procedimentos	36
Figura 9 - Barras após o primeiro processo de usinagem	37
Figura 10 - Juntas dissimilares de aço inoxidável e aço-carbono	38
Figura 11 - Quantidade de eixos após processo de usinagem	40
Figura 12 - Classificação das estruturas das amostras (500X)	42
Figura 13 - Cortes no eixo para ensaio de dureza	44
Figura 14 - Ensaio eletroquímico	45
Figura 15 - Pontos para ensaio de dureza na superfície	46
Figura 16 - Grupo A após ensaio de névoa salina	49
Figura 17 - Grupo B após ensaio de névoa salina	49
Figura 18 - Grupo C após ensaio de névoa salina	50
Figura 19 - Grupo D após ensaio de névoa salina	50
Figura 20 - Grupo A após ensaio eletroquímico	52
Figura 21 - Grupo B após ensaio eletroquímico	52
Figura 22 - Grupo C após ensaio eletroquímico	53
Figura 23 - Grupo D após ensaio eletroquímico	53
Figura 24 - Resultado da média da dureza do aço inoxidável austenítico 316L nas seções transversais de 15 mm, 50 mm e 85 mm	54
Figura 25 - Resultado da média da dureza do aço inoxidável austenítico 316L nos pontos radiais de 2 mm, 4 mm e 6 mm	55
Figura 26 - Resultado da média da dureza do aço inoxidável austenítico 316 nas seções transversais de 15 mm, 50 mm e 85 mm	55
Figura 27 - Resultado da média da dureza do aço inoxidável austenítico 316 nos pontos radiais de 2 mm, 4 mm e 6 mm	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de alguns aços inoxidáveis austeníticos	23
Tabela 2 - Barras brutas	32
Tabela 3 - Composição química dos aços inoxidáveis em porcentagem em massa	33
Tabela 4 - Valores dos parâmetros de soldagem utilizados na soldagem por atrito	38
Tabela 5 - Divisão dos grupos de eixos.....	39
Tabela 6 - Grau de oxidação	41
Tabela 7 - Parâmetro do ensaio eletroquímico	45
Tabela 8 - Resultado do ensaio de névoa salina	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>A</i>	- Ampere
<i>Al</i>	- Alumínio
<i>AISI</i>	- <i>American Iron and Steel Institute</i>
<i>ap</i>	- Profundidade de corte
<i>ASTM</i>	- <i>American Society For Testing And Materials</i>
<i>C</i>	- Carbono
<i>cm</i>	- Centímetro
<i>cm²</i>	- Centímetro ao quadrado
<i>cp</i>	- Corpo de prova
<i>Cr₄C</i>	- Carboneto de cromo
<i>Cr</i>	- Cromo
<i>Cu</i>	- Cobre
<i>Fe</i>	- Ferro
<i>Kg/mm²</i>	- Quilograma por milímetros ao quadrado
<i>Kgf</i>	- Quilograma força
<i>HRB</i>	- Rockwell B
<i>Ni</i>	- Níquel
<i>m/min</i>	- Metros por minuto
<i>mm</i>	- Milímetros
<i>mm²</i>	- Milímetros ao quadrado
<i>Mn</i>	- Manganês
<i>Mo</i>	- Molibdênio
<i>MP</i>	- Megapixel
<i>p</i>	- peso
<i>P</i>	- Fósforo
<i>ppm</i>	- Partes por milhão (unidade de concentração)
<i>rpm</i>	- Rotação por minuto
<i>s</i>	- Segundo
<i>S</i>	- Enxofre
<i>SAE</i>	- <i>Society of Automotive Engineers</i>
<i>Si</i>	- Silício

<i>Ti</i>	- Titânio
<i>TiN</i>	- Nitreto de titânio
<i>V</i>	- Volts
<i>W</i>	- Tungstênio
<i>ZAC</i>	- Zona afetada pelo calor
<i>ZTA</i>	- Zona termicamente afetada
μm	- Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	16
1.2	Definição do Problema	16
1.3	Objetivos	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	Aços inoxidáveis – um breve histórico de seu desenvolvimento	19
2.2	Aços inoxidáveis austeníticos	21
2.2.1	Aços inoxidáveis austeníticos 316 e 316L	23
2.3	Corrosão	24
2.3.1	Corrosão Intergranular	24
2.3.2	Corrosão por Pite	27
2.4	Usinagem	28
2.5	Soldagem por atrito	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Materiais	32
3.2	Métodos	36
3.2.1	Processo de usinagem e de soldagem por atrito	36
3.2.2	Névoa salina	40
3.2.3	Ensaio Eletroquímico	41
3.2.4	Ensaio de dureza	46
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	48
4.1	Névoa salina	48
4.2	Ensaio eletroquímico	51
4.3	Ensaio de dureza	54
5	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Aço é definido como uma liga de ferro-carbono (Fe-C) contendo entre 0,008% a 2,01% de C. Adicionando a ele outros elementos químicos, é possível alterar as suas propriedades. Por exemplo, a adição de cromo (Cr) aumenta a resistência à corrosão e à oxidação por criar um filme fino de óxidos, cujo efeito é denominado passivação. A quantidade de Cr é de, pelo menos, 4% p. No entanto, teores acima de 10% p acentuam esse efeito, podendo chegar até 30% p (SHACKELFORD, 2008). Aços que apresentam resistência à corrosão e à oxidação são denominados aços inoxidáveis. Há divergências, na literatura, quanto aos teores mínimos de Cr para considerá-lo aço inoxidável, variando de 10% p a 12% p (COSTA E SILVA; MEI, 2010; SHACKELFORD, 2008; SOUZA, 2001).

Dependendo da aplicação, são importantes outras propriedades além da resistência à corrosão como, por exemplo, propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e tenacidade. Outros elementos de ligas são adicionados, além do Cr, para atender à necessidade da aplicação. Esse é o caso do níquel (Ni) adicionado à liga quando ela necessita de resistência à corrosão em altas temperaturas.

As ligas contendo Fe-Cr-Ni são denominadas de aços inoxidáveis austeníticos, pois não endurecem por tratamento térmico de têmpera e são paramagnéticas (ABNT NBR NM 172:2000). A norma da ABNT NBR 5601:2011 -Aços inoxidáveis — Classificação por composição química especifica essa liga como série 300. Nela o 316 é uma liga contendo molibdênio (Mo), cuja adição melhora a resistência à corrosão por pite (corrosão altamente localizada de metais que se apresentam passivados, como por exemplo, o aço inoxidável) (WOLYNEC, 2003). Esse aço é recomendado para utilização em ambientes marinhos e usinas nucleares (SVOBODA, 1992).

Motores elétricos utilizados em plataformas de petróleo e motores de navios necessitam que seu eixo resista ao ambiente marinho. O aço inoxidável austenítico 316, por ser paramagnético, tem restrições de uso como nessa aplicação. Pois quando o motor possui dupla polaridade, os cálculos de funcionamento do motor é considerando com a massa do eixo, e para isso é necessário que ele seja magnético. Para contornar esse problema, ele pode ser fabricado a partir da união de dois eixos. A parte do eixo interna do motor deve ser fabricada de um aço com propriedade magnética; a parte externa de aço inoxidável austenítico 316. Normalmente, a união desses dois eixos é realizada pelo processo de soldagem por atrito.

Além disso, os aços inoxidáveis austeníticos são suscetíveis à contaminação por carbono (C) e sofrem sensitização às altas temperaturas. Geralmente, essa temperatura varia entre 400°C a 900°C. Higa (2011) descreve que a sensitização é maior em temperaturas próximas de 700°C para o aço inoxidável austenítico 316L. A alta temperatura propicia a ligação entre o C e o Cr formando os carbonetos de cromo, diminuindo a passividade do aço devido à remoção das partículas de Cr livres. Existem muitas delas no contorno de grão. O C liga-se a essas partículas e acumula-se ao redor do grão - esse processo caracteriza uma corrosão intergranular (JAMBO; FÓFANO, 2009). Recomenda-se, nessa situação, a utilização de um aço com menor teor de C e, especificamente para esse aço, o seu correspondente: o aço inoxidável austenítico 316L.

Em um processo em que existe a soldagem por atrito e posterior usinagem, surgem dois problemas. O primeiro é a temperatura elevada durante a soldagem e usinagem pelo atrito, podendo chegar à temperatura de sensitização. O segundo é a contaminação por C na usinagem, pois a remoção da rebarba da soldagem contamina a ferramenta com C e essa pode contaminar o aço inoxidável.

O processo de soldagem por atrito, por sua vez, possui parâmetros que são definidos pela capacidade do equipamento e por recomendações bibliográficas ou empíricas. Isso também ocorre no processo de usinagem. A aplicação desses parâmetros resulta em consequências para o material utilizado, tal como a temperatura máxima durante a realização do processo e a qualidade do acabamento superficial.

Observou-se, nesse sentido, a necessidade de conhecer em um processo no qual existe soldagem por atrito e usinagem, de que forma ocorre a corrosão intergranular dos aços inoxidáveis austeníticos 316 e 316L.

Uma vez que a corrosão pode ocorrer rapidamente ou lentamente, dependendo das condições expostas, são utilizados ensaios em laboratórios que simulam um determinado ambiente e aceleram o processo de corrosão. Como exemplo, temos o ensaio de névoa salina, o qual simula um ambiente marinho (GENTIL, 2011).

Existem inúmeros testes para verificação da corrosão, muitos padronizados por diversas normas. A American Society For Testing And Materials elaborou a norma ASTM A262 para verificação da corrosão intergranular nos aços inoxidáveis. Testes também são realizados para verificar a contaminação por carbono numa liga. Através da medição de

dureza, pois o aumento de carbono endurece o aço, conforme descreve Cunha e Cravenco (2007).

1.1 Justificativa

Algumas vezes, os projetistas necessitam buscar materiais não usuais ou processos de fabricação alternativos, na concepção de equipamentos e componentes mecânicos sujeitos à ambientes corrosivos. O termo inoxidável significa “que não se oxida” (FERREIRA, 1988) e quando se remete a aços inoxidáveis, pressupõe-se que esse não oxide. Porém, dependendo do processo de fabricação, da aplicação a que está sendo submetido ou outros fatores que possam alterar sua microestrutura, o aço inoxidável pode ficar suscetível à corrosão.

Devem-se considerar as alternativas de processos de fabricação de um componente, porém elas não podem comprometer o desempenho do material. Esse é o caso da união de juntas dissimilares de aço-carbono e aço inoxidável austenítico 316 pelo processo de soldagem por atrito. O carbono afeta o desempenho dos aços inoxidáveis. Desse modo, na prática evita-se utilizar esse par. Porém não foram encontrados estudos que comprovassem a influência do carbono nesse tipo de junta dissimilar. Logo, tem-se a necessidade de uma pesquisa experimental para analisar a hipótese de que usinagem do aço inoxidável austenítico 316 com ferramenta já utilizada na usinagem de aço-carbono comprometa o desempenho desse par, devido à contaminação por C.

1.2 Definição do Problema

Na indústria de fabricação de motores elétricos e/ou seus componentes, existe a necessidade de produzi-los de forma que resistam à aplicação a qual o motor estará exposto. Quando ela possui ação corrosiva, como a exposição à névoa marinha, necessita-se de plano de pintura específico e componentes de materiais resistentes à corrosão.

Os aços resistentes à névoa salina são os aços inoxidáveis, que resistem à corrosão, mais especificamente para esse ambiente o aço inoxidável austenítico 316, por exemplo. Os aços inoxidáveis austeníticos são paramagnéticos e não podem ser utilizados como eixo de um motor elétrico, pois para motores com dupla polaridade o eixo precisa ser fabricado a partir de um material magnético para operar adequadamente. Desse modo, unir um material magnético ao aço inoxidável é uma maneira de solucionar esse problema.

A união de aços é um processo que apresenta muitas restrições, podendo haver alteração das características do material soldado e comprometimento do seu uso dependendo do método utilizado. Um método muito comum na união de aço-carbono ao aço inoxidável é o processo de soldagem por atrito, devido a esse processo poder unir grande parte dos materiais e apresentar a vantagem de unir materiais sem elevar a temperatura até seus respectivos pontos de fusão.

O processo de soldagem por atrito consiste na rotação de uma das partes a serem soldadas, mantendo sob pressão a parte que está fixa. Esse processo deforma as extremidades em contato, gera uma rebarba e a necessidade de usinagem para retirá-la.

Ao usar essa rebarba, a ferramenta atrita com o aço inoxidável e o aço-carbono, e ao mesmo tempo ocorre contaminação dos aços nela. Em seguida, a ferramenta contaminada usina o aço inoxidável.

Ao usar o aço inoxidável com a ferramenta contaminada, há probabilidade de ocorrer transferência desses contaminantes ao aço. Entre os elementos que contaminam a ferramenta na usinagem com o aço-carbono está o C. Ao transferir-se ao aço inoxidável, o C liga-se às partículas de cromos livres, responsáveis pela resistência à corrosão, criando carboneto de cromo. A retirada das partículas de cromos livres diminui a passividade do aço inoxidável, tornando-o suscetível à corrosão.

Surge nesse contexto, a pergunta de pesquisa: juntas dissimilares de aço-carbono/aço inoxidável austenítico 316 e aço-carbono/aço inoxidável austenítico 316L usinadas com ferramentas já utilizadas na usinagem de aço-carbono podem ser contaminadas por essa e como podem alterar sua suscetibilidade à corrosão?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a suscetibilidade à corrosão após a usinagem em duas juntas dissimilares soldadas por atrito, sendo uma delas de aço-carbono e aço inoxidável austenítico 316 e a outra de aço-carbono e aço inoxidável austenítico 316L.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar a contaminação por C no processo de usinagem das juntas dissimilares: aço-carbono e aço

inoxidável austenítico 316; aço-carbono e aço inoxidável austenítico 316L;

- Identificar a contaminação por C devido à união de pares de juntas dissimilares pelo processo de soldagem por atrito: junta de aço inoxidável austenítico 316 e aço-carbono e aço inoxidável austenítico 316L;
- Verificar quais os mecanismos de corrosão que atuam nos aços inoxidáveis austeníticos 316 e 316L, após o processo de soldagem por atrito e de usinagem.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para alcançar os objetivos deste trabalho, é necessário compreender melhor os materiais e os processos que serão utilizados.

Os materiais a serem utilizados são os aços inoxidáveis austeníticos 316 e 316L, por isso faz-se necessário compreender melhor suas aplicações, suas propriedades e suas limitações.

A usinagem e a soldagem são processos que possuem inúmeras variáveis, resultando em diferentes propriedades finais quando se altera algum parâmetro durante a execução do processo. Desse modo, estudos já realizados nos apresentam resultados que são úteis para definições mais acertadas desses parâmetros.

Em relação à corrosão e à contaminação, os estudos apresentam métodos de verificação que serão utilizados no presente trabalho.

2.1 Aços inoxidáveis – um breve histórico de seu desenvolvimento

A maioria dos materiais já descobertos, e os que ainda serão, tem sua origem em fontes diferentes. Alguns materiais são naturais, outros projetados e outros são desenvolvidos com o auxílio de conhecimentos científicos como, por exemplo, os aços inoxidáveis austeníticos. Esses foram descobertos nos trabalhos de Straussem, 1908, e Maurer em 1910 (PADILHA; GUEDES, 2004).

Segundo Padilha e Guedes (2004), muitos aços inoxidáveis são variações a partir do aço inoxidável austenítico 304, conforme apresentado na Figura 1. Se adicionar Mo a esse aço, com o objetivo de evitar a corrosão por pite, surge o aço inoxidável austenítico 316. Se diminuir a porcentagem de C, surge a classe “L”. Sua principal característica é reduzir a sensitização dos aços, assim como afirmado por Carbó (2008) e Fedele (2000).

Atualmente, existem composições de aços diferentes que foram desenvolvidos para aplicações específicas, e esses desenvolvimentos são constantes (PADILHA; GUEDES, 2004).

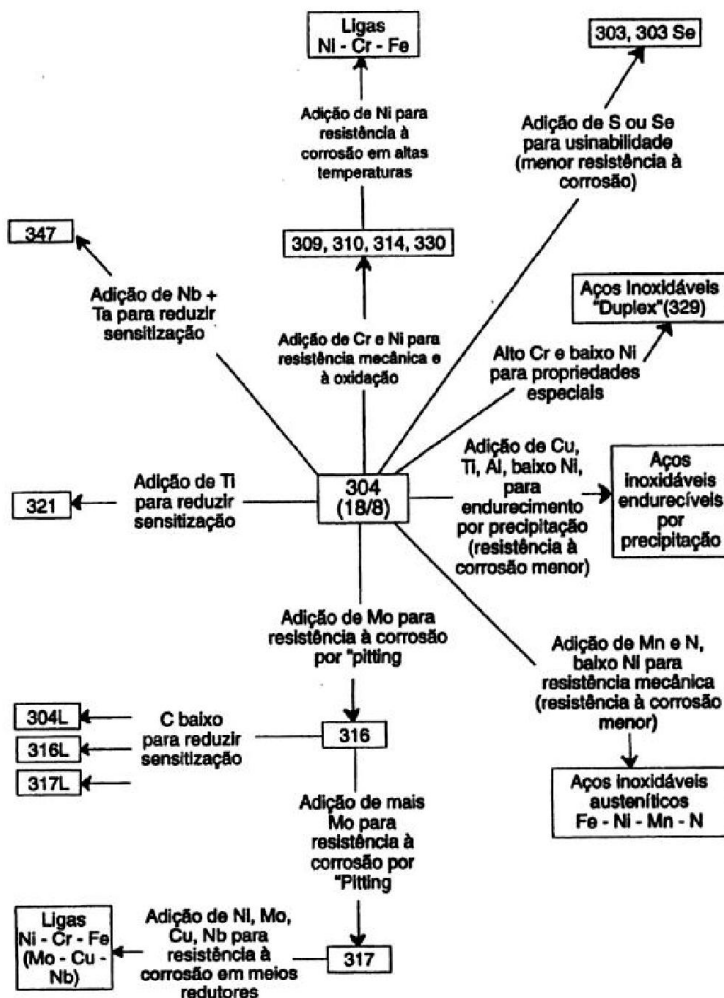


Figura 1 - Modificações das composições a partir do aço inoxidável austenítico 304

Fonte: Adaptado de Padilha e Guedes (2004)

Devido aos desenvolvimentos, são criados muitos tipos de aços, necessitando-se assim de uma padronização para classificá-los. Segundo Souza (2001) os aços-carbono e os aços-liga foram classificados pela *Society of Automotive Engineers* (SAE) conforme a sua composição química, tendo como objetivo dessa classificação a padronização e

limitação da grande variedade de composições dos aços fabricados. A classificação do aço pela SAE é praticamente a mesma que a classificação do *American Iron and Steel Intitute* (AISI), existindo algumas variações entre si.

A norma ABNT 5601 classifica os tipos de aços inoxidáveis em função da composição química em 5 classes.

- a) classe A: aços inoxidáveis austeníticos (não temperáveis por tratamento térmico);
- b) classe B: aços inoxidáveis martensíticos (temperáveis por tratamento térmico);
- c) classe C: aços inoxidáveis ferríticos (não temperáveis por tratamento térmico);
- d) classe D: aços inoxidáveis duplex e superduplex;
- e) classe E: aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação. (ABNT 5601, p.2).

O 316 é um aço da série 300. Essa série pertence à classe A, conforme relata Carbó (2008). Por esse motivo, o tópico abaixo apresenta as características dos aços inoxidáveis austeníticos (classe A).

2.2 Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis são principalmente utilizados em ambientes propensos à corrosão e oxidação. Eles são mais adequados para substituir os aços-carbono nesses ambientes, porque possuem alta resistência à corrosão e oxidação (SOUZA, 2001)

É importante lembrar que nenhum material é totalmente inoxidável, mesmo entre os aços inoxidáveis. Quando um aço inoxidável for selecionado inadequadamente, pode apresentar resultados inferiores aos aços-carbono (COSTA E SILVA; MEI, 2010). Sendo assim, o material selecionado deve possuir uma composição química adequada à sua aplicação, ou seja, suas propriedades devem garantir um bom funcionamento, desempenhando corretamente as funções desejadas (SOUZA, 2001).

No caso dos aços inoxidáveis austeníticos as propriedades que se destacam das demais são a maior resistência à corrosão às temperaturas elevadas em vários ambientes e sua boa soldabilidade (NORTON, 2013).

Os aços inoxidáveis são protegidos da corrosão devido à formação de um filme fino de óxido ou hidretos, em sua superfície. Esse filme é estabilizado pelo Cr (SOUZA, 2001).

O teor de 1% a 11% de Cr na liga representa um aumento da resistência ao enferrujamento e à corrosão a temperaturas ambientes elevadas. Porém, é necessário um teor acima de 11% para que o aço tenha uma resistência adequada à corrosão em ambientes químicos mais agressivos (NORTON, 2013; SOUZA, 2001)

Alguns elementos são utilizados para melhorar as propriedades mecânicas ou a resistência à corrosão, principalmente em ambientes particulares, sendo o mais utilizado o molibdênio (Mo) (SMITH; HASHEMI, 2012).

Esse elemento pode estar presente nos aços inoxidáveis austeníticos (de 2% a 4%). O efeito da adição do Mo é melhorar a resistência à corrosão de materiais como sulfatos, sulfitos, água do mar, acetatos e ácido acético. O Mo torna o filme de proteção mais resistente, porém diminui a resistência à ambientes fortemente oxidantes. Nos aços inoxidáveis austeníticos, ele melhora a resistência à corrosão por pite (SOUZA, 2001).

Outro elemento adicionado para melhorar as propriedades dos aços inoxidáveis é o Níquel (Ni). Souza (2001) e Costa e Silva e Mei (2010) também afirmam que o Ni aumenta a resistência mecânica, sem reduzir a ductilidade e tenacidade. Junto ao cobre (Cu), tem a finalidade de tornar os aços estruturais com menor tendência à corrosão. Ele estabiliza a austenita e aumenta a faixa de temperatura na qual ela está estável, podendo estar em temperatura ambiente. Essa é a principal característica dos aços inoxidáveis austeníticos.

Segundo Souza (2001), nos aços inoxidáveis austeníticos o elemento C tem seu teor aumentado para que ocorra o endurecimento deles, por ser um elemento intersticial. Esse aumento de C pode formar o carboneto de cromo, causando efeitos prejudiciais, pois diminui o teor de Cr na liga e sua passividade. Pode-se, no entanto, adicionar nitrogênio (elemento também intersticial) como substituto ao C para obter esse endurecimento.

A composição dos principais aços inoxidáveis austeníticos pode ser visualizada na Tabela 1. Em geral, eles contêm de 16% a 25% de cromo mais níquel, nitrogênio ou manganês, de modo que seja suficiente para que se tornem austeníticos à temperatura ambiente. As propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos são a tenacidade a baixas temperaturas, boa soldabilidade e baixo limite de escoamento. Os aços inoxidáveis austeníticos também são suscetíveis à corrosão sob tensão e possuem custo elevado (SOUZA, 2001).

Tabela 1 - Composição química de alguns aços inoxidáveis austeníticos

Tipos de aço ABNT	Composição química % ^a							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros
316	0,080	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 a 18,00	10,00 a 14,00	Mo: 2,00/3,00
316 L	0,030	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00 a 18,00	10,00 a 14,00	Mo: 2,00/3,00

^a valores máximos, exceto quando a faixa ou o valor mínimo for especificado

Fonte: Adaptado de ABNT 5601

2.2.1 Aços inoxidáveis austeníticos 316 e 316L

Os aços inoxidáveis austeníticos 316 e 316L pertencem ao mesmo grupo, diferenciando-se entre si pela porcentagem de elementos de liga. A forma mais simples de diferenciá-los, o aço inoxidável austenítico 316L é a versão de baixo C do aço inoxidável austenítico 316 (CARBÓ, 2008; GOMES, 2013).

O aço inoxidável austenítico 316 contém entre seus principais elementos de liga o Cr, o Ni e o Mo. Sua microestrutura bruta de fusão, quase totalmente austenítica, possui frações volumétricas de ferrita delta. As fases na microestrutura são proporcionais em função da composição química e dos balanços dos elementos de liga, considerando que as fases podem variar de acordo com os parâmetros de fabricação do aço. Como exemplo temos os parâmetros de velocidade de resfriamento, temperatura de vazamento e tratamentos térmicos posteriores (SVOBODA, 1992).

Segundo Svoboda (1992), o aço inoxidável austenítico 316 é utilizado nas indústrias químicas e nucleares, no processamento de papel e celulose e nos ambientes marinhos, devido à sua característica que combina soldabilidade e alta resistência à corrosão. Ele também é utilizado em componentes, tais como, válvulas, anéis, adaptadores etc.

O aço inoxidável austenítico 316L também é comumente utilizado em aplicações ortopédicas por ser um aço com baixo custo e facilmente trabalhado com as técnicas de conformações atuais. Sua desvantagem nessa aplicação é não ser adequado para uso em um

período longo comparado a seus substitutos, por possuir resistência à corrosão limitada no organismo humano, liberando o Ni no corpo humano (elemento tóxico) (SMITH; HASHEMI, 2012).

Devido à existência de Mo em sua estrutura, o aço inoxidável austenítico 316 é mais resistente à corrosão por pite. Sendo mais resistente à corrosão por tensão que o aço inoxidável 304, e é resistente ao cloreto em condições de água com no máximo 800 ppm de cloreto (CARBÓ, 2008).

2.3 Corrosão

O conceito da corrosão é a deterioração de um material, normalmente um metal, por ação química ou eletroquímica do ambiente ao qual está exposto, podendo estar associada ou não a esforços mecânicos. A deterioração representa características no material que em sua maioria são prejudiciais e indesejadas, tornando-o impróprio para sua aplicação (GENTIL, 2011).

Segundo Jambo e Fófano (2009) as formas de corrosão são classificadas de acordo com sua aparência ou forma de ataque. Desse modo, a corrosão pode ocorrer segundo: a morfologia, as causas ou mecanismos, os fatores mecânicos, o meio corrosivo e a localização do ataque.

Na localização do ataque encontram-se a corrosão por pite, uniforme, intergranular, transgranular, entre outros (GENTIL, 2011). A corrosão intergranular e a corrosão por pite são apresentadas nos tópicos abaixo, por serem as mais prováveis de ocorrer na pesquisa experimental do presente trabalho.

Existem técnicas que permitem a monitoração da corrosão. Elas são “[...] classificadas em métodos baseados em: massa de referência e métodos eletroquímicos.” (JAMBO; FÓFANO, 2009, p.195).

2.3.1 Corrosão Intergranular

A corrosão intergranular é considerada quando a corrosão localiza-se ao longo dos contornos de grão. “Um bom exemplo de corrosão intergranular é o caso do aço inoxidável austenítico em meios contendo haletos [...]” (JAMBO; FÓFANO, 2009, p.24), por exemplo, na água do mar.

Desconsiderando os casos em que há tensões, a corrosão intergranular é considerada basicamente uma corrosão galvânica, a qual

ocorre na sensitização dos aços inoxidáveis. Isso ocorre porque a região ao redor do contorno de grão fica empobrecida de Cr e, conseqüentemente, menos nobre que a região interna do grão (JAMBO; FÓFANO, 2009).

A temperatura a que o aço está exposto influencia na corrosão intergranular. Soares (1992) diz que o aço inoxidável austenítico 316, durante o processo de dissolução de carbonetos de cromo (hipertêmpera), deve possuir uma rápida passagem durante a zona 600°C-450°C, de modo a evitar a corrosão intergranular.

Já Fedele (2000) diz que uma junta soldada que estiver operando em temperatura entre 500°C a 800°C, sensitizará carbonetos de Cr em sua microestrutura.

Segundo Souza (2001), quando aços inoxidáveis estão submetidos a temperaturas entre 430°C a 870°C podem sofrer corrosão intergranular, exceto quando a estrutura encontra-se “estabilizada”. Essa “estabilização” evita a presença de carbonetos de cromo nos contornos de grão ou próximo deles. O efeito desses carbonetos é que muitas vezes eles crescem retirando C das regiões vizinhas. Desse modo, nessas regiões evita-se a sensitização de carboneto. (quando o aço estiver mantido muito tempo no intervalo de temperatura citado acima).

Carbó (2008) descreve que nos aços inoxidáveis sujeitos à temperatura entre 425 e 850°C ocorre a ligação de Cr com o C, precipitando como carboneto de Cr. Esse processo de precipitar denomina-se sensitização e ocorre preferencialmente no contorno do grão. Os aços sensitizados estão sujeitos à corrosão, em particular em meio ácido, devido ao processo empobrecer a quantidade de Cr. Esse empobrecimento ocorre adjacente ao contorno de grão, por conseguinte, destacando o grão do material.

Em seu estudo, Higa (2011) solubilizou o aço inoxidável austenítico 316L a 1100°C por uma hora e o resfriou na água. Em seguida realizou tratamentos de sensitização com diferentes temperaturas (400°C, 500°C, 600°C e 700°C) em amostras diferentes por 2 horas e os resfriou na água. Ela encontrou na amostra sensitizada a 700°C a ocorrência de sensitização em partes do contorno de grão. Porém, o contorno de grão não estava todo sensitizado, não sendo o suficiente para reprová-lo conforme a norma ASTM A 262. A Figura 2 apresenta a sensitização da amostra com tratamento a 700°C.

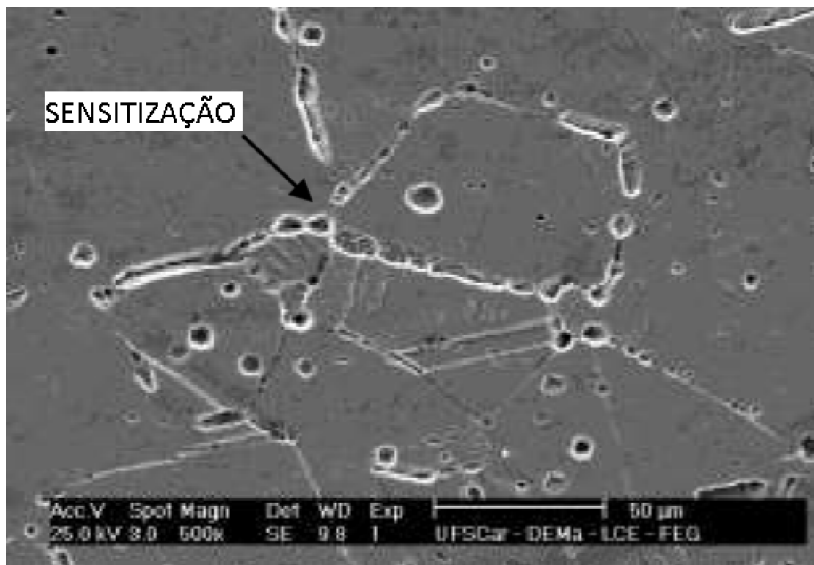


Figura 2 - Amostra com tratamento a 700°C com sensitização
Fonte: Adaptado de Higa (2011)

Ishida (2009) realizou o tratamento de solubilização no aço inoxidável austenítico 316L, aquecendo-o até a temperatura de 1050°C. O resfriamento foi feito na água com temperatura ambiente. Em seguida, ele realizou o ensaio de névoa salina por 24 horas. Nessas condições, o autor não detectou nenhum grão totalmente envolto por carbonetos de cromo que reprovasse o aço segundo a norma ASTM A 262.

A temperatura não é a única que influencia na corrosão intergranular. Quando uma liga é aquecida em uma atmosfera contendo hidrocarbonetos ou monóxido de carbono, pode ocorrer o processo de carbonetação. A superfície do material assimila o C sob a forma de Fe₃C (cementita). “Se a temperatura for muito alta, o carbono vai-se difundindo para o interior de ligas como os aços inoxidáveis, provocando precipitação de carbetos (ou carbonetos) de cromo, titânio ou nióbio.” (GENTIL, 2011, p.132).

Marquezi, Bagetti e Prior (2013) elaboraram um estudo para verificar a influência da atmosfera na corrosão intergranular no aço inoxidável ASTM A743 CA6MN. Eles realizaram um tratamento térmico de alívio de tensões a temperatura de 620°C no aço inoxidável junto a um aço-carbono em condições diferentes: amostra afastada do corpo de aço-carbono, amostra encostada ao corpo de aço-carbono e

amostra presa ao corpo de aço carbono. Eles constataram através de ensaio de dureza, análise da microestrutura e espectrometria que, se ocorreu contaminação, essa não foi significativa para afetar a funcionalidade do aço inoxidável.

Quando um aço inoxidável for utilizado em aplicações a altas temperaturas ou em uma atmosfera contendo hidrocarbonetos ou monóxido de carbono, isso pode comprometer seu desempenho por estar suscetível à corrosão intergranular. Uma forma de tornar o aço menos suscetível à ela, é reduzir a quantidade de C, evitando a formação de carbonetos de cromo:

Os aços inoxidáveis austeníticos da série “L” (AISI 304L/316L...) apresentam teores bastante reduzidos de carbono (<0,03%) quando comparados aos aços inoxidáveis austeníticos convencionais (<0,08%). A redução da quantidade deste elemento tem o objetivo de minimizar a precipitação de carbonetos de cromo na microestrutura do material, evitando a sensitização e, conseqüentemente, a corrosão intergranular (FEDELE, 2000, p.3).

Padilha e Guedes (2004) e Carbó (2008) também afirmam que a redução do C é uma solução para diminuir a ocorrência de sensitização.

Alguns métodos podem ser utilizados para evitar esta corrosão intergranular, como reduzir o teor de carbono para 0,02%, evitar a utilização do aço inoxidável na temperatura a qual está vulnerável a corrosão intergranular e adicionar elementos de liga que formam carbonetos, assim, deixando o Cr somente para conferir resistência à corrosão (SOUZA, 2001).

2.3.2 Corrosão por Pite

A corrosão por pite caracteriza-se por apresentar aspecto alveolar ou puntiforme. No aspecto alveolar, o diâmetro médio da região em que ocorreu corrosão é maior comparado com a profundidade; já no puntiforme ocorre o contrário, normalmente, considera-se em torno de 1/3 entre a relação diâmetro/profundidade. Um exemplo de ocorrência desse tipo de corrosão é o caso do aço austenítico em água salgada (JAMBO; FÓFANO, 2009).

Os aços inoxidáveis austeníticos são mais resistentes à corrosão por pite comparado ao aço inoxidável ferrítico. Isso ocorre “[...] (devido à ação do níquel, que favorece a repassivação do material nas regiões

onde o filme passivo foi quebrado por estas formas de corrosão).” (CARBÓ, 2008, p.18).

Higa (2011) descreve que o aço inoxidável austenítico 316L sofreu influência no potencial por pite após o tratamento térmico de sensibilização de 2 horas às temperaturas de 400°C, 500°C, 600°C e 700°C.

Ishida (2009) percebeu um aumento na corrosão por pite do aço inoxidável austenítico 316L após o tratamento térmico de solubilização à temperatura de 1050°C.

2.4 Usinagem

No processo de usinagem são utilizados diferentes tipos de ferramentas para cada aço, havendo a necessidade de serem produzidas com material e cobertura adequadas. Na usinagem de um aço inoxidável recomenda-se o uso de ferramentas de metal duro (MIKA, 2013).

Segundo Marcondes (2008, apud PEREIRA et al., 2011, p.2) as pastilhas de metal duro são utilizadas em operações a altas temperaturas, por serem de um material que resiste a essas temperaturas, podendo chegar a 1000°C. A temperatura pode ser reduzida utilizando refrigerantes, de modo que se prolongue a vida útil da ferramenta.

Durante a usinagem de um aço inoxidável austenítico 316L com uma ferramenta de metal duro, sem o uso de lubrificação, a temperatura pode chegar a 700°C na interface da ferramenta e da peça, e 600°C no cavaco. Outeiro et al. (2008) constataram essa temperatura no cavaco, porém não conseguiram medi-la na superfície usinada, devido à limitação do equipamento utilizado.

Em seu estudo, Talib et al. (2013) analisaram os cavacos gerados na usinagem com ferramenta de metal duro. Os cavacos apresentaram uma coloração marrom a azul escuro, característico de cavacos que atingiram altas temperaturas. Ela variou entre 960°C a 1000°C após 32 minutos de usinagem. Nessas temperaturas há difusão de C no substrato de carboneto de tungstênio.

Pode-se perceber o aumento de temperatura durante a usinagem a partir do desgaste da ferramenta. Pereira et al. (2011) analisaram o desgaste das ferramentas variando o número de paradas. Quando se interrompe a usinagem, espera-se que o calor se dissipe para o meio externo. Caso a ferramenta usine continuamente, o calor gerado tende a se acumular. Percebeu-se que as ferramentas com menor número de paradas apresentaram maior desgaste, constatando que há maior temperatura ao se usinar continuamente com a ferramenta.

A usinagem causa desgaste da ferramenta, gerando riscos e crateras. Muitas vezes, o cavaco adere à ferramenta de forma breve (AGRAWAL; CHAKRABARTI; CHATTOPADHYAY, 1995).

Em altas temperaturas verifica-se o processo de descarbonetação de uma pastilha de metal duro, por exemplo. O carboneto é transferido da ferramenta de corte devido à decomposição térmica ou oxidação (LI; OHMORI; HARADA, 1996).

Agrawal, Chakrabarti e Chattopadhyay (1995) verificaram, em seu estudo, a ocorrência de difusão de elementos como o C, Ti e W da pastilha para o aço, devido às altas temperaturas, durante a usinagem de aço inoxidável austenítico 316 com pastilha de metal duro. Eles constataram a difusão de C e descrevem que ela ocorre de forma rápida.

2.5 Soldagem por atrito

Existem dois tipos de soldagem por atrito. A primeira foi desenvolvida na antiga União Soviética, em 1956, e é denominada de soldagem por atrito convencional. A segunda foi desenvolvida nos EUA, em 1966, e é denominada de soldagem por atrito inercial (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

O processo de soldagem por atrito consiste na rotação de uma das partes a serem soldadas, mantendo sob pressão a parte que está fixa. Esse processo está apresentado esquematicamente na Figura 3. A rotação gera um aquecimento que une as duas partes. O processo é realizado no estado sólido e ocorre em poucos segundos (GEARY; MILLER, 2013).

Caracteriza-se uma solda de alta resistência e uma pequena zona termicamente afetada (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

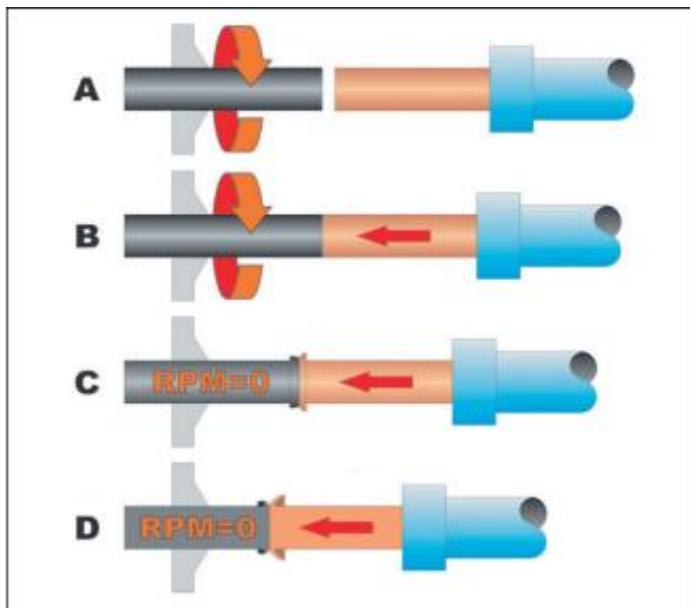


Figura 3 - Fases da soldagem por atrito
Fonte: Adaptado de Alves (2010)

Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992), existem variáveis do processo de soldagem por atrito para cada material a ser soldado. Os valores delas mudam e podem ser calculados, muitos deles recomendados por literaturas.

Os materiais a serem soldados podem reagir de diferentes formas. No caso de juntas dissimilares, a deformação ocorre de forma assimilar. Fatores como a condutividade térmica, capacidade de calor e a relação entre dureza e temperatura influenciam no resultado da deformação dos materiais. Satyanarayana, Reddy e Mohandas (2004) observaram que numa união de aço inoxidável ferrítico AISI 430 com aço inoxidável austenítico AISI 304, o aço inoxidável ferrítico sofreu maior deformação por possuir maior condutividade térmica e menor dureza que o aço inoxidável austenítico.

Meshram, Mohandas e Reddy (2006) verificaram essa diferença de deformação em seus estudos de juntas dissimilares de Ti-Fe, Cu-Ti, Fe-Cu, Fe-Ni e Cu-Ni. Alves (2010) também a verificou em seu estudo com junta dissimilar de alumínio (Al) AA 1050 e aço inoxidável austenítico AISI 304. Ele afirma que a dureza da liga de Al é inferior à dureza do aço inoxidável, contribuindo para sua maior deformação.

Alves (2010) comparou a dureza em pontos diferentes dessa junta dissimilar. Ele constatou que a dureza é maior próxima da interface de ligação, devido à deformação plástica e à elevação da temperatura. A variação de dureza é menor no aço inoxidável 304 comparada ao Al, cerca de 3,2 mm de distância da interface, devido à deformação ter sido maior do lado do Al.

A elevação de temperatura varia quando utilizados valores diferentes nos parâmetros e no tempo da soldagem por atrito. Para Alves (2010), o tempo de soldagem de 32 segundos de uma junta de Al AA 1050 e aço inoxidável 304 apresentou a temperatura máxima de 376°C. Quando o tempo de soldagem foi de 62 segundos, a temperatura máxima chegou a 410°C. Essas temperaturas estão abaixo do ponto de fusão dos materiais e não são suficientes para alterar a microestrutura. Elas geraram uma pequena ZTA nas juntas dissimilares.

A temperatura de soldagem pode ser maior dependendo do material a ser soldado. Khany, Krishnan e Wahed (2012) constataram que na soldagem de uma junta de aço inoxidável AISI 304 e um aço eutetóide a temperatura máxima atingiu 600°C e ela atingiu o máximo de 7 mm de distância da interface de ligação.

A temperatura da soldagem pode influenciar na corrosão dos aços soldados. “[...] os mecanismos de corrosão intergranular de sensitização e de dissolução de precipitados são ativados pela formação de fases secundárias na microestrutura das juntas soldadas.” (FEDELE, 2000, p.1). Esse processo é influenciado principalmente pelas temperaturas máximas na zona afetada pelo calor (ZAC), pelo resfriamento da ZAC após a soldagem, e pela composição química do metal-base (FEDELE, 2000).

A soldagem influencia vários tipos de corrosão. No estudo de Satyanarayana, Reddy e Mohandas (2004) a junta dissimilar de aço inoxidável ferrítico AISI 430 com aço inoxidável austenítico AISI 304 apresentou uma melhora na resistência à corrosão por pite, devido à microestrutura recristalizada e uma possível uniformidade na composição.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, os procedimentos e os parâmetros utilizados para a realização do presente trabalho.

O processo de usinagem, a microscopia, o ensaio eletroquímico e medição de dureza foram realizados no câmpus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – Geraldo Werninghaus. A soldagem, espectrometria e ensaio de névoa salina foram realizados em uma empresa privada.

3.1 Materiais

Foram utilizados três tipos de aço: aço inoxidável austenítico 316L, aço inoxidável austenítico 316 e aço-carbono SAE 1020. As dimensões e quantidades estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Barras brutas

Aço	Diâmetro	Comprimento	Quantidade
Aço inoxidável austenítico 316L	25,4 mm	105 mm	11
Aço inoxidável austenítico 316	25,4 mm	105 mm	11
Aço-carbono SAE 1020	20 mm	55 mm	20

Fonte: o autor (2014)

Foi extraída uma amostra de cada aço inoxidável austenítico para a análise química quantitativa, sendo realizada por espectrometria de emissão óptica. Foram feitas três medições em cada amostra. O resultado dessa análise encontra-se na Tabela 3, a qual apresenta as composições químicas das amostras dos aços inoxidáveis austeníticos 316 e 316L. Nota-se que as composições estão de acordo com a norma ABNT 5601. A diferença da composição entre os dois aços é a porcentagem de C, a redução do C dificulta a ocorrência de sensitização do material.

Tabela 3 - Composição química dos aços inoxidáveis em porcentagem em massa

Elemento	316	316L
C	0,04	0,01
Si	0,36	0,36
Mn	1,543	1,535
P	0,0347	0,0343
S	0,03	0,03
Cr	16,710	16,710
Ni	10,630	10,023
Mo	2,015	2,015

Fonte: o autor (2014)

Para análise metalográfica, preliminar, dos aços inoxidáveis foram extraídas de cada um deles uma amostra no sentido transversal e uma amostra no sentido longitudinal de uma barra. Nessas amostras foram analisados os grãos e os carbonetos existentes na microestrutura, para comparação posterior aos processos de soldagem e de usinagem e aos ensaios.

As amostras foram preparadas utilizando material novo para evitar contaminação. A sequência de lixas foi 220, 320, 400, 600, 800 e 1200, e o polimento com alumina com 0,3 μm . O ataque químico para revelação da microestrutura foi realizado utilizando o reativo água régia.

Na microestrutura, apresentada nas figuras 4 a 7, há uma diferença no tamanho dos grãos entre os dois aços, assim como na quantidade de carbonetos. Essa diferença de carbonetos é devido ao aço inoxidável austenítico 316L possuir menor teor de C.

Nas figuras 6 e 7, os carbonetos apresentaram-se compridos e pontiagudos, característicos de uma corrosão por pite.

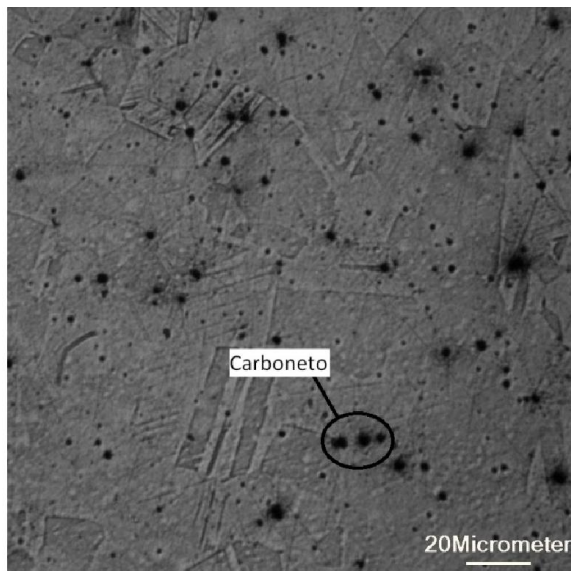


Figura 4 - Corte transversal do aço inoxidável austenítico 316
Fonte: o autor(2014)

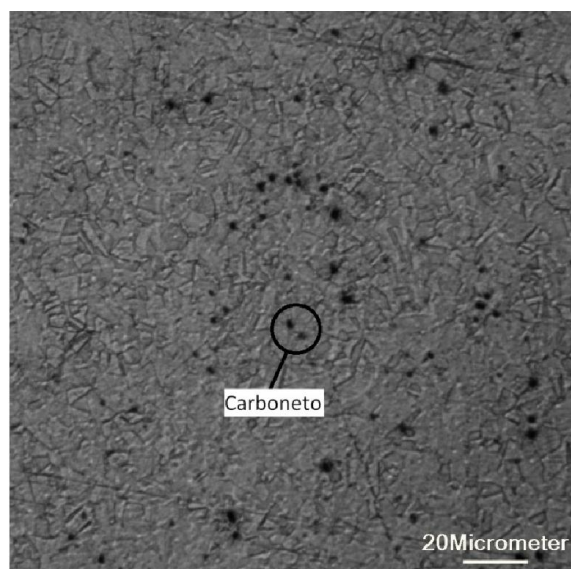


Figura 5 - Corte transversal do aço inoxidável austenítico 316L
Fonte: o autor(2014)

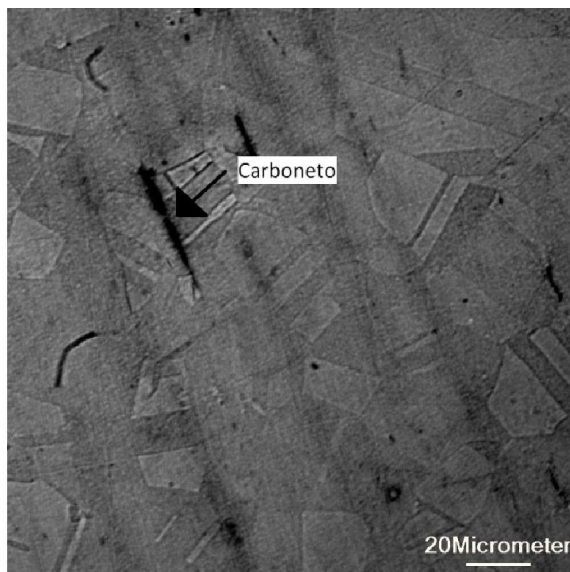


Figura 6 - Corte longitudinal do aço inoxidável austenítico 316
Fonte: o autor(2014)

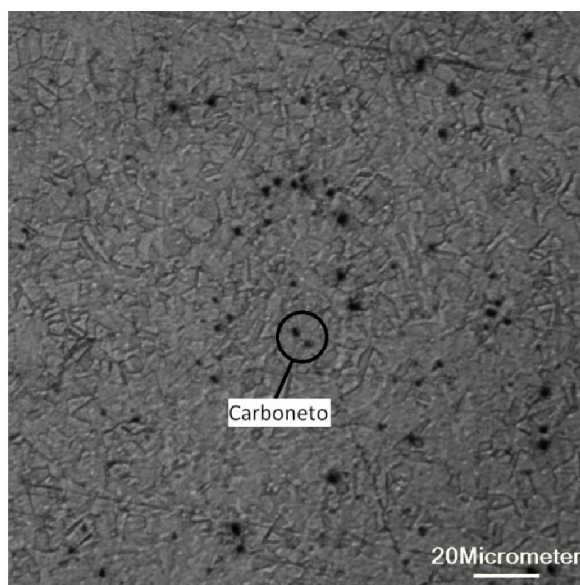


Figura 7 - Corte longitudinal do aço inoxidável austenítico 316L
Fonte: o autor(2014)

3.2 Métodos

O método de análise realizado neste trabalho está apresentado no fluxograma da Figura 8. Nele está apresentada a sequência dos processos de usinagem e de soldagem por atrito, e também os ensaios de caracterização.

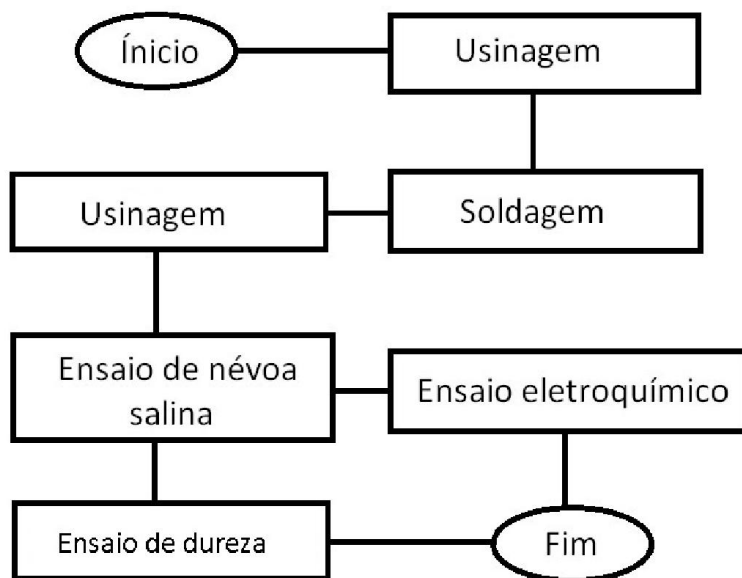


Figura 8 - Fluxograma dos procedimentos
Fonte: o autor (2014)

3.2.1 Processo de usinagem e de soldagem por atrito

As barras de aço (carbono SAE 1020, 316 e 316L) foram usinadas antes do processo de soldagem até o diâmetro de 18,7 mm. A Figura 9 apresenta as dimensões das barras antes e após o processo de usinagem. Foram realizados acabamentos por usinagem nas faces das barras para limpar, uniformizar e aumentar a área de contato possibilitando a soldagem.

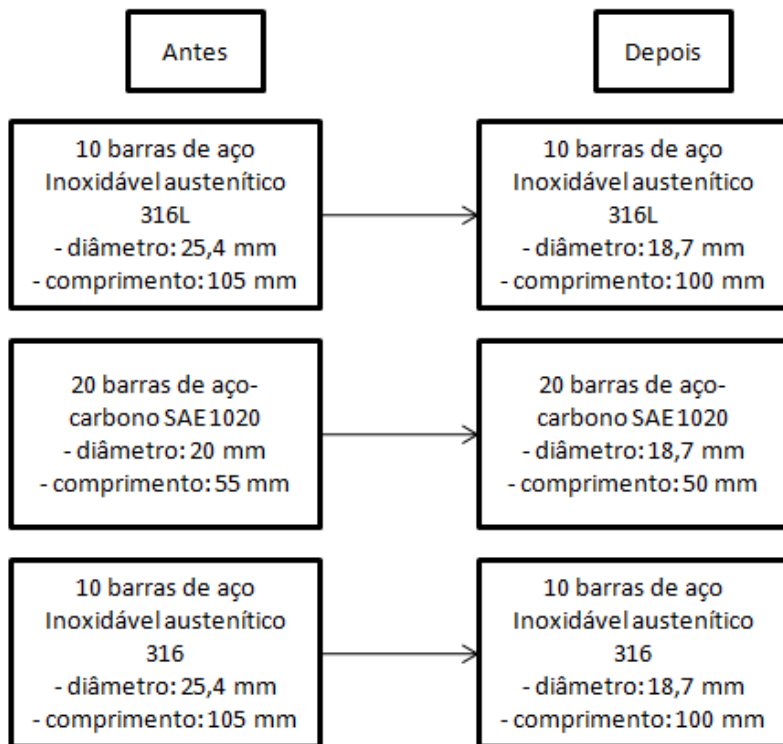


Figura 9 - Barras após o primeiro processo de usinagem
Fonte: o autor(2014)

Foram utilizadas pastilhas de corte de metal duro com revestimento com TiN, conforme recomendado por Mika (2013) com usinagem a seco (sem fluido de corte), conforme recomendação da literatura (GOMES, 2013) e velocidade de corte de 55m/min.

Após o processo de usinagem, os pares dissimilares de aço-carbono e aço inoxidável foram soldados por atrito. Os parâmetros utilizados na soldagem por atrito estão apresentados na Tabela 4. Os valores utilizados devem-se à capacidade do equipamento e são os aplicados na prática.

Tabela 4 - Valores dos parâmetros de soldagem utilizados na soldagem por atrito

Diâmetro (mm)	Rotação (rpm)	Pressão (bar)		Tempo total (s)
		Fase de aquecimento	Fase de forjamento	
18,7	3000	15	75	8

Fonte: o autor (2014)

A Figura 10 apresenta o aspecto das juntas dissimilares de barras de aço-carbono e aço inoxidável austenítico 316, após o processo de soldagem por atrito. No total foram soldadas 10 juntas dissimilares de aço-carbono e aço inoxidável austenítico 316 e 10 de aço-carbono e aço inoxidável austenítico 316L.



Figura 10 - Juntas dissimilares de aço inoxidável e aço-carbono
Fonte: o autor(2014)

Klingspor (2014) descreve que deve ser evitado qualquer contato do aço inoxidável com o aço-carbono. Porém, para o processo de

soldagem por atrito, a barra de aço inoxidável deve ser presa à morsa, e sendo inevitável o contato com o aço-carbono e, conseqüentemente, contaminação por C. Dessa forma, foi necessário realizar a limpeza para descontaminação e restaurar a camada passivadora. Essa limpeza foi realizada pelo processo de lixamento (granulometria 220) conforme as recomendações de Klingspor (2014).

Após a limpeza, foi realizada a usinagem nas barras de aço inoxidável das juntas dissimilares. As juntas foram fixadas no torno pela parte de aço-carbono, evitando-se o contato das castanhas com o aço inoxidável. Utilizou-se a velocidade de corte de 55 m/min e usinagem a seco, reduzindo-se o diâmetro da parte de aço inoxidável à 16mm.

Nessa etapa de usinagem, metade do lote das juntas foi usinado com ferramenta nova e a outra metade com ferramenta já utilizada em usinagem de aço-carbono. Os eixos foram divididos em grupos nominados conforme Tabela 5, seguindo essa designação ao longo do presente trabalho.

Tabela 5 - Divisão dos grupos de eixos

Grupo A	Aço inoxidável austenítico 316L usinado com ferramenta nova
Grupo B	Aço inoxidável austenítico 316L usinado com ferramenta já utilizada em usinagem com aço-carbono
Grupo C	Aço inoxidável austenítico 316 usinado com ferramenta nova
Grupo D	Aço inoxidável austenítico 316 usinado com ferramenta já utilizada em usinagem com aço-carbono

Fonte: o autor (2014)

Após essa etapa, a parte de aço-carbono foi removida da parte de aço inoxidável usinando-se a 2 mm de distância da interface de ligação. Essa distância foi considerada como medida de prevenção contra a contaminação da ferramenta pelo aço-carbono e possível zona de difusão de C devido à soldagem por atrito. A remoção da parte de aço-carbono foi necessária, pois durante o ensaio de névoa salina haveria contato de materiais diferentes podendo ocorrer corrosão galvânica. A Figura 11 apresenta esquematicamente a quantidade de juntas antes da usinagem e a quantidade de eixos após a usinagem.

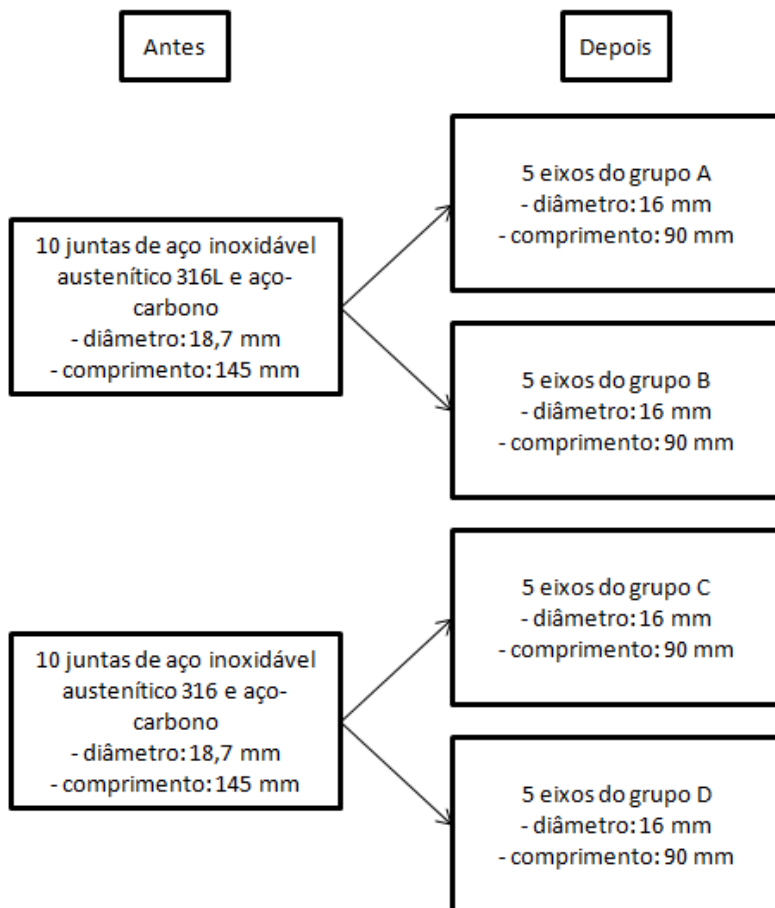


Figura 11 - Quantidade de eixos após processo de usinagem
Fonte: o autor(2014)

3.2.2 Névoa salina

As condições de exposição de trabalho podem ser simuladas através de um ensaio para oxidação, sendo o de névoa salina o ensaio que possibilita analisar a corrosão dos materiais sob atmosfera marinha (GENTIL, 2011).

Dessa forma, foi realizado ensaio de névoa salina conforme a norma ISO 9227 e ASTM B 117. Os eixos ficaram apoiados em uma

placa de plástico inclinados à 20° em relação à vertical e expostos por 504 horas a um ambiente a 35°C em câmara fechada, contendo névoa de saturado com 5% de cloreto de sódio (sem iodo), espirrado a 1 bar de pressão.

O resultado do ensaio foi verificado de acordo com a norma ISO 4628-3, a qual define o grau de oxidação, conforme apresentado na Tabela 6. Os graus variam entre Ri 0 e Ri 5 e representam a porcentagem da área oxidada. Ri 1, por exemplo, significa que ocorreu oxidação abrangendo até 0,05% da superfície.

Tabela 6 - Grau de oxidação

Grau de oxidação	Área oxidada %
Ri 0	0
Ri 1	0,05
Ri 2	0,5
Ri 3	1
Ri 4	8
Ri 5	40 a 50

Fonte: Adaptado de ISO 4628-3 (2003)

3.2.3 Ensaio Eletroquímico

Para verificar a ocorrência da corrosão dos eixos, foi utilizado o ensaio eletroquímico conforme a prática A da norma ASTM A262. Esse ensaio consiste em validar o aço inoxidável em relação à corrosão intergranular. A reprovação da amostra ocorre quando houver um grão totalmente envolto por vala (*ditch*), conforme apresentado na Figura 12.3.

A Figura 12 apresenta as 5 classificações de corrosão referente aos aços inoxidáveis. Essa classificação está baseada em aspectos da microestrutura da amostra, tais como, degraus (*steps* – figura 12.1), valas (*ditches* – figura 12.3), simultaneamente, degraus e valas (figura 12.2) e quantidades de pites (figuras 12.4 e 12.5). Quando a amostra apresentar uma quantidade semelhante à figura 12.5 ou mais, essa deve, conforme a norma ASTM A262, ser atacada com ácido nítrico, para revelar melhor a corrosão por pite.

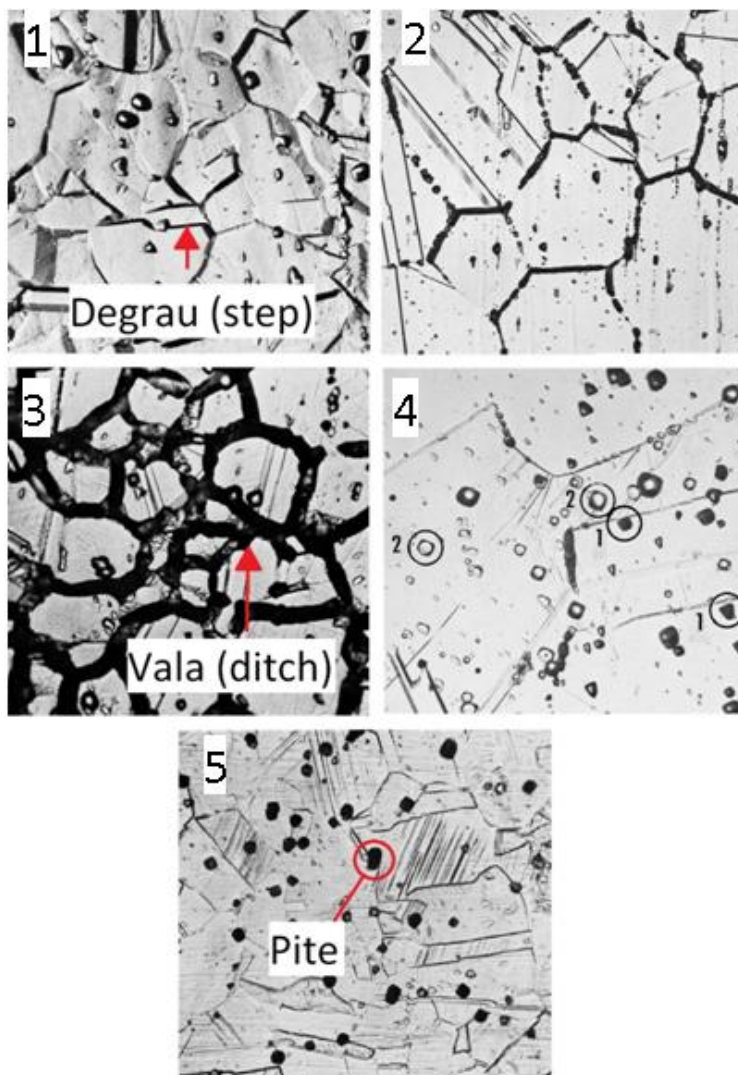


Figura 12 - Classificação das estruturas das amostras (500X)
Fonte: Adaptado de ASTM A262 (2008)

A corrosão intergranular dos aços com baixo teor de C é difícil de ser revelada, necessitando de um tratamento de sensibilização. Dessa forma, os eixos de aço inoxidável austenítico 316L foram sensibilizados, de acordo com a norma ASTM A262, à temperatura 675°C por 1 hora e resfriado ao ar, conforme apresentado no gráfico 1.

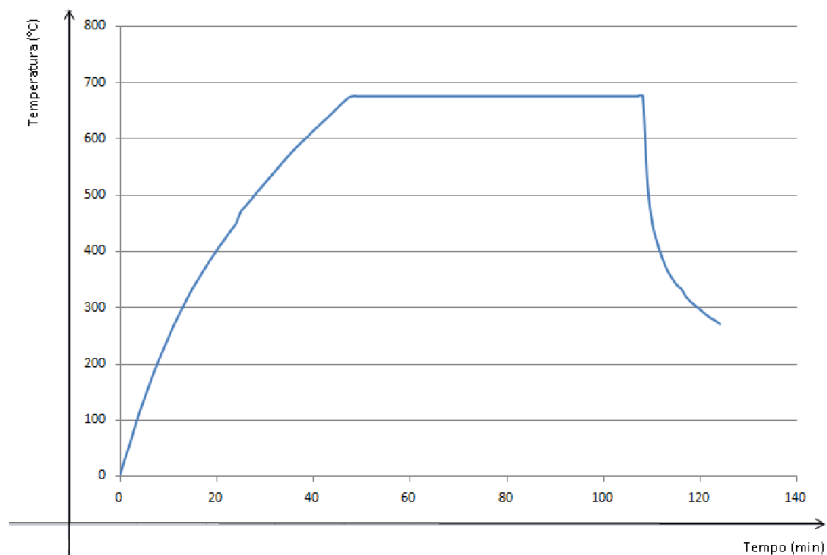


Gráfico1 - Curva de tempo X temperatura

Fonte: o autor (2014)

Para o ensaio eletroquímico foi retirada de cada eixo uma amostra a 15 mm de distância da extremidade da interface de ligação, conforme apresentada na Figura 13. A norma ASTM A262 recomenda que o corte das amostras seja realizado por um processo que não provoque aquecimento para evitar a sensitização de carbonetos de cromo. Desse modo, as amostras foram cortadas por serramento manual.

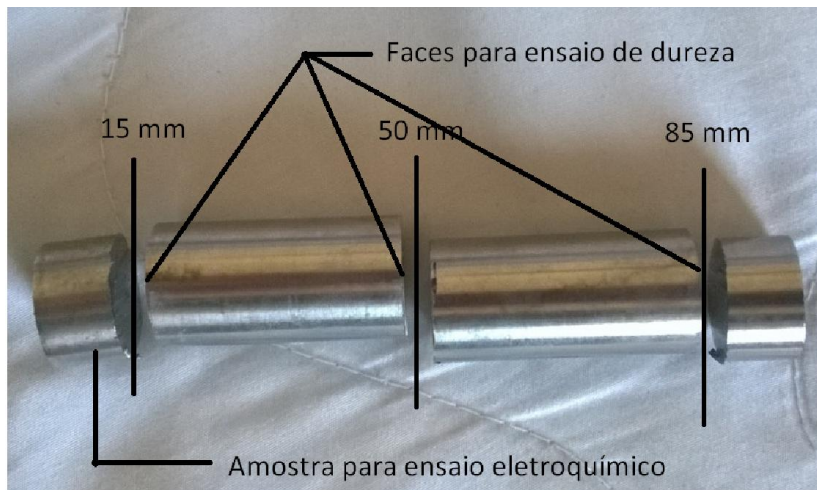


Figura 13 - Cortes no eixo para ensaio de dureza
Fonte: o autor (2014)

Para o ensaio eletroquímico deve haver passagem de corrente elétrica pelas amostras para que essas atuem como ânodo. A norma ASTM A262 recomenda que, como cátodo, utilize-se o mesmo material da amostra. Assim, uma das barras de cada aço austenítico foi utilizada como cátodo. Foram soldados fios de cobre às amostras, para depois conectá-los à fonte de corrente. A soldagem foi realizada pelo processo de soldagem branda com estanho. Para evitar contato do cobre e do estanho com a solução eletrolítica, as amostras foram embutidas a frio com resina epóxi e posteriormente lixadas na sequência: 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 e polidas com alumina com $0,3 \mu\text{m}$. A Figura 14 apresenta a montagem do aparato experimental para a realização do ensaio eletroquímico e os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 7.

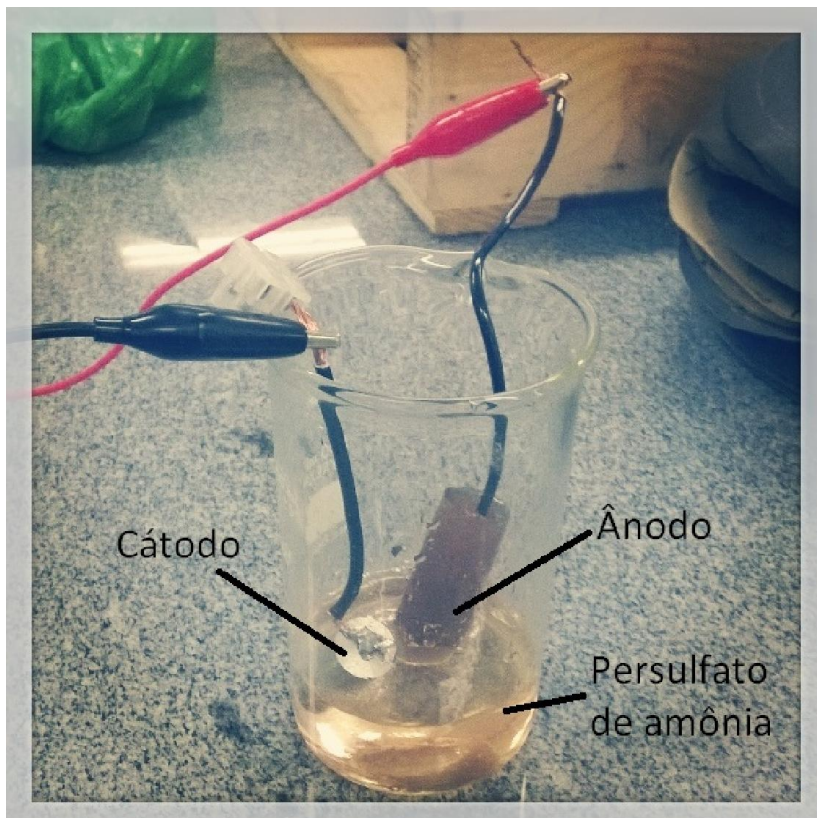


Figura 14 - Ensaio eletroquímico
Fonte: o autor(2014)

Tabela 7 - Parâmetro do ensaio eletroquímico

Solução	Persulfato de amônia
Tensão	15V
Corrente	2 A
Tempo	90 segundos

Fonte: o autor (2014)

Para o ensaio eletroquímico normalmente é utilizada solução de ácido oxálico, porém como o aço inoxidável austenítico 316 contém Mo, a norma ASTM A262 recomenda que se utilize persulfato de amônia como solução eletrolítica, corrente elétrica de 1 A por cm^2 e tensão máxima de 20 V por 90 segundos.

Utilizou-se tempos maiores, no ensaio, em algumas amostras, para verificar se modificaria a revelação da corrosão intergranular devido ao tempo do ensaio.

As micrografias foram obtidas por microscopia ótica através de câmera digital de 1.3 MP acoplada ao equipamento.

3.2.4 Ensaio de dureza

Para verificar possível contaminação de C no eixo de aço inoxidável durante o processo de soldagem por atrito foi realizado ensaio de dureza. Foram comparadas as durezas dos aços inoxidáveis antes e após o processo de soldagem por atrito. As amostras antes do processo de soldagem por atrito foram retiradas de barras a serem soldadas posteriormente. As amostras das barras soldadas foram retiradas em 3 seções transversais distintas, a 15 mm, a 50 mm e a 85 mm de distância da interface de ligação, conforme Figura 13.

Em cada seção foram realizadas 3 indentações a 2, 4 e 6 mm do centro e 120° entre elas, conforme Figura 15.

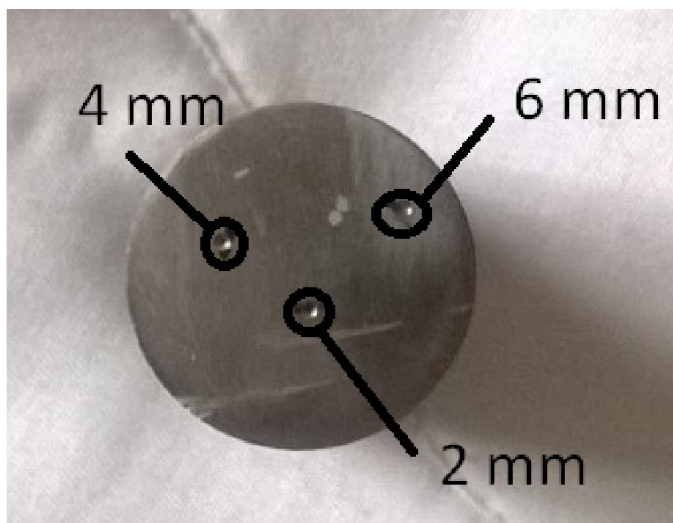


Figura 15 - Pontos para ensaio de dureza na superfície
Fonte: o autor(2014)

Para o ensaio de dureza as seções das amostras foram preparadas utilizando-se a sequência de lixas: 220, 320, 400 e 600. Foi utilizado

penetrador de esfera 1/16", pré-carga de 10 kgf e carga de 100 kgf (dureza Rockwell B).

As médias dos valores medidos foram comparadas utilizando a análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%, o qual garante um nível de confiança de 95%, com auxílio do programa Minitab[®]. Através dessa análise foi possível comparar simultaneamente as médias entre as distâncias da interface de ligação (15 mm, 50 mm e 85 mm) e entre as distâncias ao centro (2 mm, 4 mm e 6 mm).

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos, comparando-os com a literatura existente.

4.1 Névoa salina

Normalmente esse ensaio é realizado em períodos padronizados com intervalos de 500 horas. Em função do tempo previsto de realização deste trabalho só foi realizado o ensaio de névoa salina para o primeiro período (504 horas). A maioria dos corpos de provas (cp) dos aços inoxidáveis austeníticos 316 e 316L apresentaram, nesse primeiro período, as superfícies oxidadas. Conforme a classificação da ISO 4628-3, esses apresentaram graus de oxidação variando entre 0 e 3, sendo que a maior parte deles apresentou grau Ri 1, ou seja, 0,05 % da superfície oxidada. Os resultados do ensaio de névoa salina estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultado do ensaio de névoa salina

Grupo A	1cp Ri 0; 1cp Ri 2; 3cp Ri 3
Grupo B	2cp Ri 0; 1cp Ri 1; 1cp Ri 2; 1cp Ri 3
Grupo C	5cp Ri 1
Grupo D	1cp Ri 0; 3cp Ri 1; 1cp Ri 2

Fonte: o autor (2014)

Os eixos de aço inoxidável austenítico 316L apresentam em média maior grau de oxidação que o aço inoxidável austenítico 316, tendo corpos de prova variando entre Ri 0 e Ri 3. Isso ocorreu por apresentarem, aparentemente, um pior acabamento superficial que o aço inoxidável austenítico 316, pois, em superfícies irregulares ocorre acúmulo de material externo. Por exemplo, a água do ensaio de névoa salina contribuiu para aumentar o processo de oxidação do eixo, conforme afirmado por Jambo e Fófano (2009).

Comparando o grau de oxidação entre os eixos da mesma classe (grupo A com o grupo B) e (grupo C com o grupo D), não se pode concluir que o efeito da contaminação por C devido à ferramenta já utilizada na usinagem de aço-carbono apresentou interferência na oxidação. O aspecto das superfícies ensaiadas após 504 horas é apresentado nas figuras 16 a 19. Os eixos foram fotografados de maneira que a área superficial mais oxidada está exposta.



Figura 16 - Grupo A após ensaio de névoa salina
Fonte: o autor(2014)

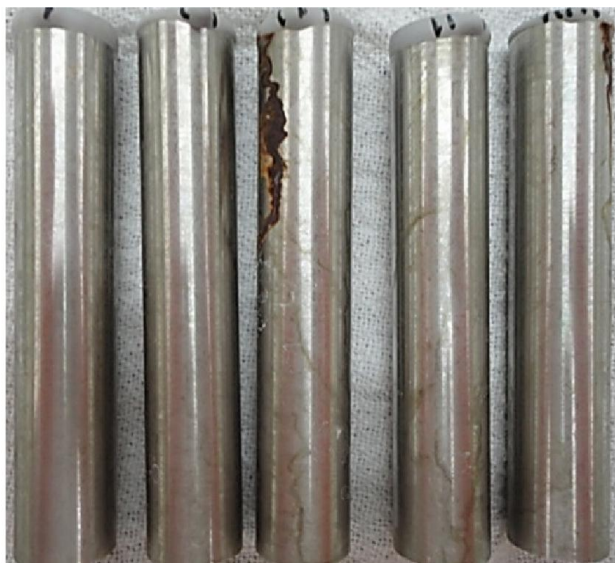


Figura 17 - Grupo B após ensaio de névoa salina
Fonte: o autor(2014)



Figura 18 - Grupo C após ensaio de névoa salina
Fonte: o autor(2014)



Figura 19 - Grupo D após ensaio de névoa salina
Fonte: o autor(2014)

4.2 Ensaio eletroquímico

Após o ensaio eletroquímico as superfícies das amostras foram analisadas com o auxílio do microscópio ótico. As figuras 20 a 23 apresentam as microestruturas das amostras dos quatro grupos de aços inoxidáveis. Comparando com as microestruturas antes do processo, figuras 4 e 5, de maneira geral, não houve alteração da microestrutura dos eixos após todo o processo. Consta-se que não houve aumento do tamanho de grão e tanto antes quanto depois da soldagem e usinagem encontram-se carbonetos dispersos de maneira irregular em forma de pites. No aço inoxidável austenítico 316 esses carbonetos estão em maior quantidade devido ao maior teor de C. Não foi detectado, em nenhuma amostra, grãos totalmente sensitizados, apenas degraus conforme apresentado na Figura 12.1. Esse mesmo resultado ocorreu nos estudos de Higa (2011) e Ishida (2009). Higa (2011) encontrou, na amostra sensitizada a 700°C, a ocorrência parcial de sensitização nos contornos de grãos, não sendo o suficiente para reprovar conforme a norma ASTM A 262.

Nos resultados obtidos também não foram detectadas valas (*ditches*), apenas degraus (*steps*), mesmo aumentando o tempo de ensaio eletroquímico, conforme apresentada na Figura 21. Essa figura apresenta a microestrutura revelada sem que haja a queima, não houve a revelação de valas, apenas um aumento da quantidade de pites.

Nas amostras ensaiadas de ambos os aços, percebe-se um aumento da quantidade de pites. Esse aumento também foi verificado por Higa (2011). Já Ishida (2009) constatou isso após um ensaio eletroquímico de polarização potenciodinâmico. Essa quantidade de pites aproxima-se da classificação Figura 12.5. Segundo a norma ASTM A262, nessa classificação as amostras necessitam ser testadas através de ácido nítrico, pois, esse aumento da quantidade representa uma susceptibilidade dos aços à corrosão por pite.

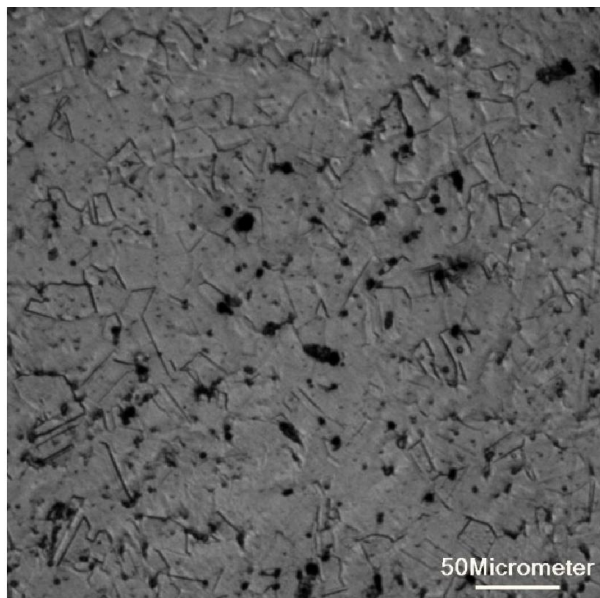


Figura 20 - Grupo A após ensaio eletroquímico
Fonte: o autor(2014)

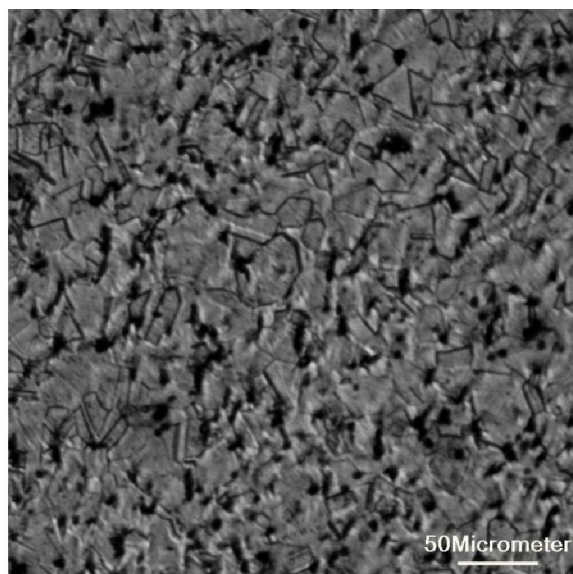


Figura 21 - Grupo B após ensaio eletroquímico
Fonte: o autor(2014)

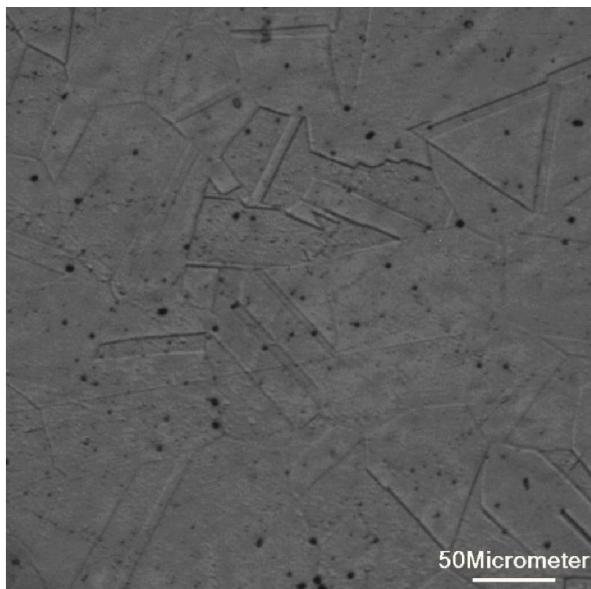


Figura 22 - Grupo C após ensaio eletroquímico
Fonte: o autor(2014)

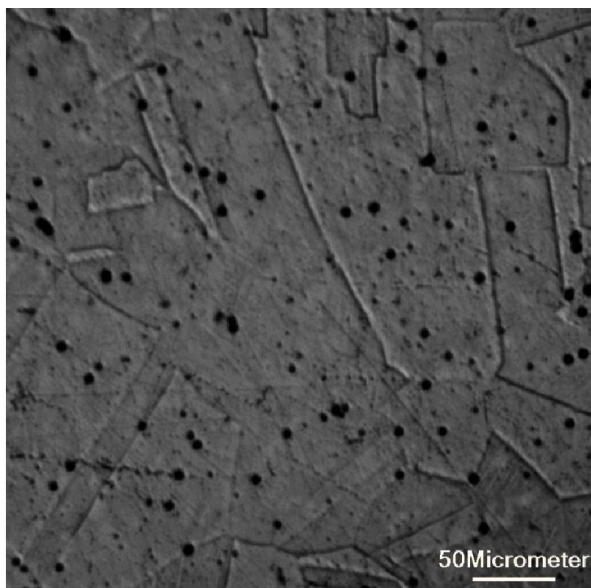


Figura 23 - Grupo D após ensaio eletroquímico
Fonte: o autor(2014)

Esses resultados, de acordo com a norma ASTM A262, são suficientes para não reprovar as amostras, ou seja, por não ter sido detectado nenhum grão totalmente envolto por carboneto de cromo, não houve corrosão intergranular.

4.3 Ensaio de dureza

A medição das amostras antes da realização dos processos de soldagem por atrito e de usinagem apresentou o resultado de 83 HRB para o aço inoxidável austenítico 316L e 92,5 HRB para o aço inoxidável austenítico 316. Conforme esperado, a dureza do aço inoxidável austenítico 316L foi inferior ao aço inoxidável austenítico 316, pois esse tem maior teor de C em sua composição, conforme descrevem Cunha e Cravenco (2007).

As medidas de dureza das amostras após os processos de usinagem e de soldagem por atrito, apresentaram uma grande dispersão. Essa dispersão pode ter ocorrido devido às pequenas irregularidades nas superfícies das amostras.

Com o auxílio da ANOVA (nível descritivo do teste, valor- p), é possível indicar a existência de uma ou mais médias diferentes das demais quando seu valor for inferior a um valor predeterminado (LEVINE et al., 2008).

Os resultados da análise de variância (ANOVA) das medições de dureza estão apresentados nas figuras 24 a 27. Nesses resultados, os valores de p foram maiores que 0,05. Dessa forma, pode-se afirmar com 95 % de certeza que as médias não diferem entre si. Esse fato ocorreu entre os valores medidos nas seções transversais (15 mm, 50 mm e 85 mm) e entre as distâncias radiais (2 mm, 4 mm e 6 mm), e também quando comparados o grupo A com o grupo B e o grupo C com o grupo D.

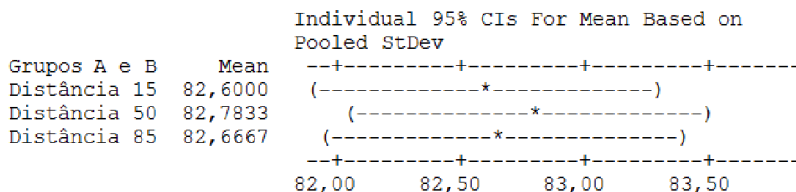


Figura 24 - Resultado da média da dureza do aço inoxidável austenítico 316L nas seções transversais de 15 mm, 50 mm e 85 mm

Fonte: o autor(2014)

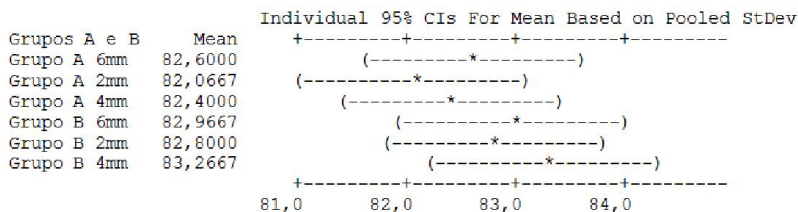


Figura 25 - Resultado da média da dureza do aço inoxidável austenítico 316L nos pontos radiais de 2 mm, 4 mm e 6 mm
Fonte: o autor(2014)

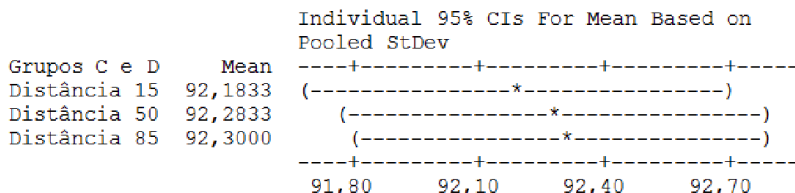


Figura 26 - Resultado da média da dureza do aço inoxidável austenítico 316 nas seções transversais de 15 mm, 50 mm e 85 mm
Fonte: o autor(2014)

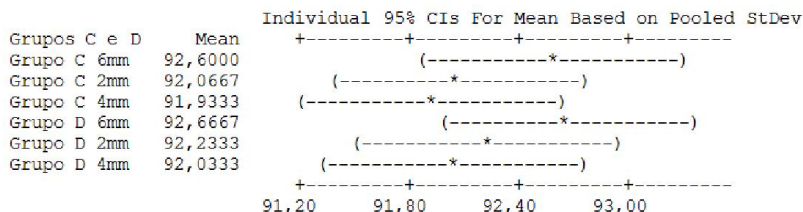


Figura 27 - Resultado da média da dureza do aço inoxidável austenítico 316 nos pontos radiais de 2 mm, 4 mm e 6 mm
Fonte: o autor(2014)

Mesmo sendo grande a dispersão dos valores medidos de dureza, a análise desses resultados indica que não houve contaminação de C tanto no aço inoxidável austenítico 316 quanto no aço inoxidável austenítico 316L.

5 CONCLUSÃO

Os resultados indicam que de maneira geral não houve contaminação por C durante os processos de soldagem por atrito e de usinagem. Isso pode ser constatado pela não alteração da dureza nas distintas seções, bem como não ter havido variação a dureza da extremidade ao centro (dureza radial).

Foram utilizados parâmetros usuais para os processos de soldagem por atrito e de usinagem. A alteração desses parâmetros pode influenciar nos resultados obtidos, por exemplo, a mudança dos parâmetros de usinagem influencia na temperatura de contato peça/ferramenta e acabamento superficial. Esse processamento pode alterar as características do aço inoxidável, tornando o mais suscetível à corrosão.

Os resultados de névoa salina indicam que superfícies com aspectos aparentemente diferentes, tem desempenho distintos. Quanto melhor o acabamento superficial melhor será a resistência a corrosão.

A precipitação dos carbonetos ocorre, preferencialmente, nos contornos de grãos, tornando o aço inoxidável suscetível a corrosão intergranular. Apesar desse fato, após os resultados de névoa salina, não foi constatado nenhum grão totalmente envolto por carbonetos de cromo, somente verificou-se aumento da quantidade de pites. Baseado nesses resultados e na norma ASTM A262 não há restrição quanto ao seu uso nessas condições. Sugerem-se em futuros trabalhos de pesquisa, que sejam realizados ensaios de névoa salina com períodos maiores para verificar o desempenho da passividade desse material.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5601:2011: **Aços inoxidáveis — Classificação por composição química**. Segunda edição ed. Rio de Janeiro, 2011. 7 p.
- ABNT -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 172: **Critérios de classificação dos aços**. Rio de Janeiro, 2000. 8 p.
- AGRAWAL, S.; CHAKRABARTI, A.k.; CHATTOPADHYAY, A.b.. **A study of the machining of cast austenitic stainless-steels with carbide tools**. Elsevier Science S.a.: Journal of Materials Processing Technology, Kharagpur - India, n. 52, p.610-620, 1995.
- ALVES, Eder Paduan. **Junções de materiais dissimilares utilizando o processo de soldagem por fricção rotativa**. 2010. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais/ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A262: **Standard practices fordetecting susceptibility to intergranular attack in austeniticstainless steels**. West Conshohocken, 2008. 17 p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B117 - 11: **Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus**. West Conshohocken, 2013. 12 p.
- CARBÓ, Héctor Mario. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. 2008. Disponível em: <http://www.aperam.com/brazil/port/produtos_servicos/sucroalcooleiro/pdfs/apostila_tecnica.pdf>. Acesso em: 25 maio 2014.
- COSTA E SILVA, André Luiz V. da; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 646 p.
- CUNHA, Lauro Salles; CRAVENCO, Marcelo Padovani. **Manual prático do mecânico**. [S.l.]: Hemus, 2007. 584 p
- FEDELE, R. A. **Noções de corrosão intergranular em juntas soldadas - parte III: Técnicas de prevenção da corrosão intergranular**. Soldagem e inspeção (Impresso), v. Maio, p. 01, 2000.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário Aurélio básico da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1988, p. 214.
- GEARY, Don; MILLER, Rex. **Soldagem**. 2. ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda, 2013. 258 p.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 360 p.

HIGA, Silvia Midori. **Avaliação da corrosão intergranular de aços inoxidáveis por meio de normas e ensaios eletroquímicos em altos potenciais**. 2011. 72 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciência e Engenharia dos Materiais, Departamento de Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

ISHIDA, Marco Aurélio. **Avaliação comparativa de barras laminadas do aço AISI 316L com e sem tratamento térmico de solubilização**. 2009. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgicas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9227: **Corrosion tests in artificial atmospheres — Salt spray tests**. Geneva, 2012. 26 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4628-3: **Paints and varnishes -- Evaluation of degradation of coatings -- Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance -- Part 3: Assessment of degree of rusting**. Geneva, 2003. 20 p.

JAMBO, Hermano Cezar Medaber; FÓFANO, Sócrates. **Corrosão: fundamentos, monitoração e controle**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009. 342 p., il.

KHANY, Sirajuddin Elyas; KRISHNAN, K. N.; WAHED, Moh Abdul. **Study of transient temperature distribution in a friction welding process and its effects on its joints**. International Journal Of Computational Engineering Research. Hyderabad, p. 1645-1655. set. 2012

KLINGSPOR . **Lixamento do aço inoxidável**
<http://www.klingspor.com.br/html/index.php?site=3_21_63&lng=por>.
Acesso em: 30 abril 2014.

LI, Chang Jiu; OHMORI, A.; HARADA, Y. **Effect of powder structure on the structure of thermally sprayed WC-Co coatings**. Journal Of Materials Science. 1996. p. 785-794.

LEVINE, D. M. et al. **Estatísticas Teoria e Aplicações**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MARQUEZI, Sérgio Luís; BAGETTI, João Henrique; PRIOR, Monica. **Análise do grau de contaminação com carbono do aço inoxidável ASTM A743 CA6MN em razão do tratamento térmico de alívio de tensões em conjunto com aço carbono**. Unoesc & Ciência - Acet, Joaçaba, v. 2, n. 4, p.121-138, dez. 2013.

- MESHAM, S. D.; MOHANDAS, T.; REDDY, G. Madhusudhan. **Friction welding of dissimilar pure metals**. Journal Of Materials Processing Technology. Andhra Pradesh, p. 330-337. 28 nov. 2006
- MIKA, Seitovirta (Suécia). Chief Executive Officer (Org.). **Handbook of Stainless Steel**. Avesta: Sandvikens Trycken Ab, 2013. 89 p
- NORTON, Robert L.. **Projeto de máquinas**. 4. ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda, 2013. 1055 p.
- OUTEIRO, J. C. et al. **Analysis of residual stresses induced by dry turning of difficult-to-machine materials**. Elsevier Science S.A.: CIRP Annals - Manufacturing Technology, n. 57, p.77-80, 2008.
- PADILHA, Angelo Fernando; GUEDES, Luis Carlos. **Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades**. Curitiba: Hemus, 2004. 170 p., il.
- PEREIRA, Janaína Aparecida et al. **Efeito do número de interrupções para medir desgaste na vida da ferramenta no torneamento**. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, Caxias do Sul, abr. 2011.
- SATYANARAYANA, V. V.; REDDY, G. Madhusudhan; MOHANDAS, T.. **Dissimilar metal friction welding of austenitic–ferritic stainless steels**. Journal Of Materials Processing Technology. Índia, p. 128-137. 20 maio 2004.
- SHACKELFORD, James F. **Ciência dos materiais**. Tradução de Daniel Vieira. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 556 p., il.
- SOARES, P. **Aços – características e tratamentos**, Livraria Livro luz – Porto, 1992
- WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **SOLDAGEM: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.
- SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 707 p.
- SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição química dos aços**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.
- SVOBODA, JOHN M. **Cast High-alloy steels**, Casting: Ferrous casting alloys, vol. 15, ASM Handbook, ASM International, 9ª. Edição. Ohio, USA, p. 1583-1615, 1992.
- TALIB, R. J. et al. **Friction and Wear characteristics of WC and TiCN-coated Insert in Turning Carbon Steel Workpiece**. Procedia Engineering, Kuala Lu, n. 68, p.716-722, 2013.
- WOLYNEC, Stephan. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 166 p.