

Evaluation of susceptibility to sensitization of austenitic stainless steel

¹Evandro Carlos da Silva, UNISAL – São José, Brasil, evandro.cps@hotmail.com

²Zaida Jova Aguila and Vanessa Davanço Peira de Lima UNISAL – São José, Brasil, zaida.aguila@sj.unisal.br,
vanessa.lima@sj.unisal.br

Abstract– *This study evaluated the variables that influence the sensitization phenomenon, which is a corrosive process, susceptible in austenitic stainless steels of the 300 series, with carbon contents equal to or greater than 0.03%. The materials studied are according to the American Iron and Steel Institute AISI (1),[1], standard, being the materials AISI 304, 304L, 316 and 316L the degree of intergranular corrosion of austenitic stainless steels*
Keywords- *Austenitic stainless steels, sensitization, intergranular corrosion.*

Digital Object Identifier (DOI):<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.193>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

Avaliação da suscetibilidade à sensitização dos aços inoxidáveis austeníticos

Silva, E.C¹, Aguila, Z.J², and Lima, V.D.P³

¹Evandro Carlos da Silva, UNISAL – São José, Brasil, evandro.cps@hotmail.com

²Zaida Jova Aguila and Vanessa Davanço Peira de Lima UNISAL – São José, Brasil, zaida.aguila@sj.unisal.br,
vanessa.lima@sj.unisal.br

Resumo – Neste estudo foram avaliadas as variáveis que influenciam o fenômeno de sensitização, que é um processo corrosivo, susceptível em aços inoxidáveis austeníticos da série 300, com teores de carbono igual ou superior a 0,03%. Os materiais estudados estão conforme especificação da norma American Iron and Steel Institute AISI(1), [1], sendo os materiais AISI 304, 304L, 316 e 316L.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis austeníticos, sensitização, corrosão intergranular.

Abstract - This study evaluated the variables that influence the sensitization phenomenon, which is a corrosive process, susceptible in austenitic stainless steels of the 300 series, with carbon contents equal to or greater than 0.03%. The materials studied are according to the American Iron and Steel Institute AISI (1), [1], standard, being the materials AISI 304, 304L, 316 and 316L the degree of intergranular corrosion of austenitic stainless steels.

Keywords: Austenitic stainless steels, sensitization, intergranular corrosion.

I. INTRODUÇÃO

A sensitização dos aços inoxidáveis austeníticos é também um dos tipos mais danosos de corrosão, a intergranular. Consiste na precipitação de carboneto de cromo na região de contorno dos grãos cristalinos, devido ao empobrecimento de cromo das regiões adjacentes aos grãos, após ser tratado termicamente, aquecido para trabalho a quente ou quando submetidos à soldagem. Este fenômeno ocorre em uma faixa de temperatura que varia de 400°C à 850°C, ainda que mantido nesta faixa por um período muito curto.

Este tipo de aço é largamente empregado na indústria devido à facilidade de trabalho nos processos de soldagem, estampagem, dobramento, curvamento, acabamentos superficiais e formas variadas. Também em função de suas duas principais características, que é excelente resistência à corrosão e propriedades mecânicas a altas temperaturas, as principais aplicações na indústria são na confecção tubulações, dutos e diversos equipamentos de processo tais como: reatores, permutadores de calor, vaso de pressão, etc.

Com este estudo foram identificados os mecanismos que influenciam a microestrutura no comportamento eletroquímico dos aços inoxidáveis. Para tanto, foram conduzidos ensaios visando relacionar os mecanismos de corrosão que podem ocorrer, bem como suas consequências em altas temperaturas.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Aço Carbono:

Aço carbono é uma liga ferrosa constituída de ferro e carbono, além de teores de elementos de liga que podem estar presentes que modificam suas propriedades mecânicas. A combinação de baixo custo, associada á boa resistência mecânica e a fácil manipulação, torna o aço carbono muito atrativo para a construção de estruturas e equipamentos. Essas características permitem ao aço carbono ser o material mais utilizado na engenharia e na indústria. As propriedades mecânicas do aço do carbono permitem o seu uso na maioria das aplicações práticas mesmo na ausência de qualquer tratamento térmico. [2].

Denominam-se, genericamente de aços inoxidáveis, os aços que não oxidam, mesmo pela exposição prolongada a uma atmosfera normal. Essa propriedade é conseguida pela adição de, pelo menos, 12% de Cr. O cromo é o elemento de liga básico dos aços inoxidáveis, cuja passivação é conseguida pela formação de uma película de óxidos e hidróxidos de cromo na superfície do metal. Os aços inoxidáveis são, portanto, aços de alta liga, contendo 12 a 26% de Cr, até 22% de Ni e frequentemente, pequenas quantidades de outros elementos de liga. São consideravelmente mais caros do que os aços-carbono e os aços de baixa liga. [3]

Desde sua descoberta até os dias atuais, esses materiais vêm evoluindo de forma muito rápida, sendo desenvolvidas muitas famílias de aços inoxidáveis, visando atender às necessidades específicas de cada usuário, como veremos a seguir:

Existem vários modos pelos quais os aços inoxidáveis podem ser classificados, porém a forma mais correta de classificação é pela estrutura metalográfica, pelo teor de carbono e composição química. De acordo com esta classificação, os aços inoxidáveis podem ser divididos em três grupos principais. [4]

- Aços martensíticos
- Aços ferríticos
- Aços austeníticos

B. Aços Inoxidáveis Martensíticos:

Estes aços caracterizam-se por serem ligas de Fe + Cr, contendo cromo entre 12-18%, podendo conter baixo, médio e alto teor de carbono, que podem ser considerados equivalentes aos aços para têmpera e revenimento, tendo

como diferença principal o alto teor de cromo. Neste tipo de aço, o carbono está numa concentração tal que permite a formação de austenita a altas temperaturas e que se transforma em martensita durante o resfriamento. A martensita é uma fase frágil e muito dura. Além de serem endurecíveis através de tratamento térmico, os aços martensíticos tem a característica comum de serem magnéticos [5].

C. Aços Inoxidáveis Ferríticos.

Neste grupo, o cromo é ainda o principal elemento de liga, podendo atingir valores muito elevados, 12 a 30%, com teor de carbono sempre inferior a 0,20%.

Assim como os martensíticos, os aços inoxidáveis ferríticos são magnéticos. Apesar da menor concentração de carbono, possuem a propriedade de se tornarem parcialmente austeníticos a altas temperaturas e, conseqüentemente, precipitam martensita quando sofrem resfriamento rápido ou mesmo ao ar. Pode-se dizer que são parcialmente endurecíveis por tratamento térmico [5].

Em geral, os ferríticos contém um teor de cromo maior que os martensíticos. A elevação do teor de cromo melhora a resistência à corrosão em diversos meios e sacrificam, em parte, outras propriedades como, por exemplo, a resistência ao impacto. A soldagem dos aços inoxidáveis ferríticos normalmente conduz ao crescimento de grão na Zona Afetada Termicamente (ZAT) e precipitação nos contornos de grão.

D. Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos se caracterizam por serem muito dúcteis e apresentarem excelente resistência à corrosão e soldabilidade. São ligas não-magnéticas e não podem ser endurecidas por tratamento térmico. Isto está relacionado com a mudança na estrutura promovida pela presença do níquel [3].

Dos grupos de aços inoxidáveis mais utilizados, os austeníticos são os que apresentam maior resistência à corrosão. Estes combinam baixo limite de escoamento com alta resistência à tração e bom alongamento, oferecendo assim as melhores propriedades para trabalho a frio. Embora não seja possível mudar suas propriedades mecânicas pelo tratamento térmico, sua resistência à tração e dureza pode ser aumentada pelo encruamento [3].

E. Elementos de Liga

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem como principais elementos de liga o cromo e o níquel, além do manganês. Esses elementos são responsáveis pela elevada resistência à corrosão em ambientes altamente agressivos.

Os elementos de liga adicionados têm como principal objetivo melhorar as propriedades específicas desses aços. A composição química de alguns aços inoxidáveis austeníticos está de acordo com a [6].

F. Corrosão Intergranular.

A corrosão intergranular nos aços austeníticos é uma corrosão eletroquímica, que é causada pelo empobrecimento em cromo das regiões adjacentes aos contornos dos grãos devido à precipitação nestes locais de carbonetos. Para que a

corrosão intergranular se desenvolva é necessária à presença de um meio agressivo e de heterogeneidades metalúrgicas nas regiões de contornos dos grãos, como segregações, precipitados, fases intermetálicas [7].

As regiões com deficiência em cromo nos contornos de grão formam-se durante a precipitação de carbonetos ocasionadas pela grande diferença nas velocidades de difusão do cromo e carbono na austenita. Para que o aço não fique sujeito à corrosão intergranular a região adjacente ao contorno de grão não deverá apresentar teor de cromo inferior a 12%. A insuficiência de cromo nos contornos de grão produz a quebra localizada do filme passivo, rico em cromo, o qual protege os aços inoxidáveis, conferindo aos mesmos susceptibilidade à corrosão intergranular [8]. Conforme ilustração figura 1.

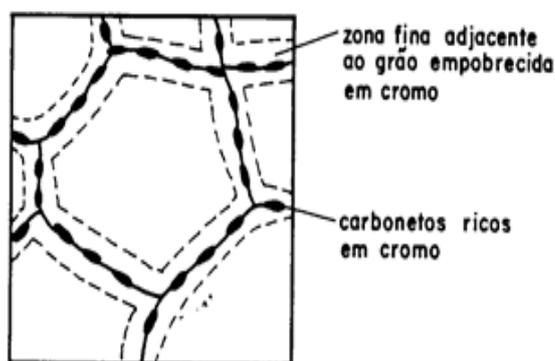


Fig. 1 Mostra zona fina adjacente aos contornos de grãos, com precipitação de carboneto rico em cromo em aços inoxidáveis austeníticos
Fonte: [3]

Este tipo de corrosão nos aços inoxidáveis austenítico é geralmente resultado da sensitização, termo usualmente empregado para descrever tratamentos térmicos que tornam, ou podem tornar, uma liga susceptível à corrosão intergranular. O mecanismo mais aceito para explicar a sensitização dos aços inoxidáveis se baseia na precipitação de carbonetos ricos em cromo ($Cr_{23}C_6$), nos contornos de grão. O crescimento destes carbonetos faz surgir nas suas adjacências uma zona empobrecida em cromo. Quando estes permanecem por um determinado tempo na faixa de 400°C a 850°C ficam susceptíveis ao ataque preferencial num meio corrosivo [3].

A sensitização pode ser resultado de tratamentos térmicos, soldagem, com resfriamento lento dentro da faixa de temperatura de sensitização ou de condições de trabalho nesta faixa. É uma prática comum a utilização de ensaios de laboratório para averiguar a integridade do material após a realização de processos de fabricação que envolve aquecimento do material para garantir a qualidade dos elementos de construção [3].

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 [9], 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 [3].

Os aços inoxidáveis austeníticos contendo carbono em teores superiores a 0,03% são susceptíveis à corrosão intergranular quando estão sensibilizados. Diante disso, o conhecimento do grau de sensibilização dos aços inoxidáveis austeníticos (precipitados nos contornos dos grãos cristalinos) se torna indispensável, como forma de se conhecer a performance do material num meio agressivo qualquer. Diz-se que um aço está sensibilizado quando ocorre a precipitação de carbonetos ricos em cromo nos contornos dos grãos. Essa região do aço perde as propriedades de resistência à corrosão do aço inoxidável. Isso faz com que a taxa de corrosão nos contornos de grãos seja muito superior à do restante do material [10].

G. Passivação

Uma das principais maneiras de proteção contra corrosão é a aplicação de uma película protetora que separe a superfície metálica do meio corrosivo. Essa película pode ser produzida artificialmente, através da deposição de um produto orgânico ou metálico sobre a superfície, ou naturalmente, pela produção espontânea de um filme sobre a superfície, através da formação de um composto químico, mantido sobre a superfície metálica por forças atômicas [5].

A película passivadora de óxidos e hidróxidos de cromo, que é resistente e uniforme, tem excelente aderência e plasticidade, baixa porosidade e volatilidade e solubilidade praticamente nulas. O grau de inoxidabilidade ao aço depende da estabilidade dessa película, que tem uma espessura média de cerca de 0,02 μm [10].

Pode-se ver o comportamento da camada passivadora através de ensaio laboratorial com metal mergulhado num meio, e ao se polarizar anodicamente, a reação de oxidação é favorecida, o metal corroerá com velocidade tanto maior quanto maior for a polarização [4].

A curva típica dos metais ou ligas metálicas que apresentam o fenômeno de passivação num determinado meio no início da polarização, a curva apresenta comportamento linear E em função de $\log I$ e a corrente cresce com aumento do potencial. No entanto, a partir de um valor de potencial característico para cada sistema metal/meio, denominado potencial de Flade, verifica-se uma diminuição brusca de corrente [11] conforme mostrado na figura 2.

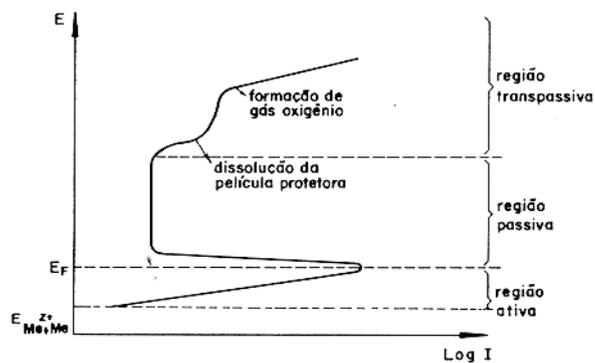


Fig. 2 Mostra curva típica de metais ou ligas metálicas passiváveis, quando o metal é introduzido no meio, com sua película protetora já formada, apresentará baixíssimas velocidades de corrosão.

Fonte: [3]

Este ponto indica que sobre a superfície do metal formou-se uma película protetora e que a corrente não mais variará com o aumento do potencial. A corrente correspondente ao potencial de Flade, a máxima corrente obtida antes da passivação é denominada de corrente crítica. Após a passivação, constante e muito baixa, esta recebe o nome de corrente de passivação. A região da curva em que a polarização é de ativação denomina-se região ativa e, a região em que o metal está passivado, região passiva [11].

H. Soldagem

A Soldagem é o processo de união de materiais (particularmente os metais) mais importante do ponto de vista industrial sendo extensivamente utilizada na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas. A sua aplicação atinge desde pequenos componentes eletrônicos até grandes estruturas e equipamentos (pontes, navios, vasos de pressão, etc.). Existe um grande número de processos de soldagem diferentes, sendo necessária a seleção do processo (ou processos) adequado para uma dada aplicação. [12]

Geralmente os aços inoxidáveis são comercializados por exigência de normas de fabricação na condição solubilizado, de modo que sua utilização não deveria implicar em problemas de corrosão intergranular. No entanto, na prática, muitos casos de falhas de equipamentos estão associados a processos de soldagem. Este fenômeno ocorre porque durante as operações de soldagem algumas regiões do metal podem ficar na faixa de temperatura de sensibilização, em intervalos de tempo suficientes para precipitação de carbonetos [5].

H.1. A ocorrência do fenômeno se deve:

- ao submeter os aços inoxidáveis a processos de soldagem, a região onde ocorre a fusão apresenta temperatura muito elevada;
- a uma certa distância dessa região, a temperatura é muito baixa, quase sempre igual a ambiente;
- entre essas duas regiões existirá um gradiente de temperatura, sendo evidente a presença de uma região com temperaturas dentro da faixa em que ocorre a sensibilização do material. Essa região é denominada zona de sensibilização ou ZAT e será aquela que sofrerá ataque intergranular. A figura

3 ilustram as condições das zonas afetadas termicamente ao redor da solda corrosão [3].

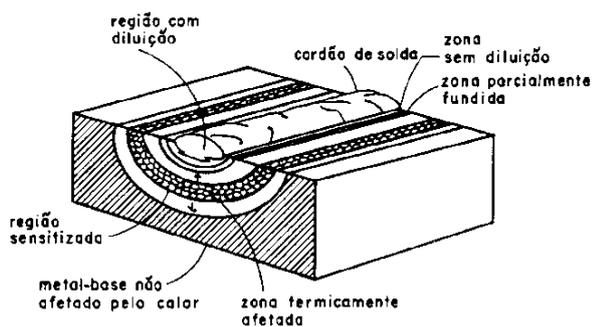


Fig. 3 Detalhe das diversas zonas formadas ao redor do cordão de solda de aços inoxidáveis austeníticos.

Fonte: [3].

III. MATERIAIS E MÉTODOS.

Para verificar a ocorrência de corrosão intergranular em aços inox sensibilizados, foram adquiridos chapas de aço inoxidáveis austeníticos, sendo:

ASTM A-240-TP304L

ASTM A-240-TP316L

ASTM A-240-TP304

ASTM A-240-TP316

O fluxograma da figura 4, apresenta as etapas seguidas na elaboração dos corpos de prova e a sequência de análise realizada.

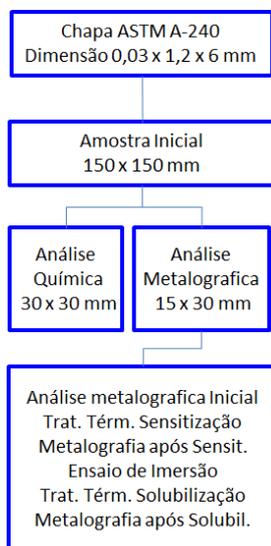


Fig. 4 Mostra as amostras retiradas para realização do estudo.

Fonte: Acervo do autor

A. Caracterização por análise química.

Para realizar caracterização dos materiais a serem ensaiados, foi retirada uma amostra de cada material, nas dimensões de 30x30 mm, para realização de análises químicas. As amostras foram encaminhadas para laboratório especializado para realização do ensaio de espectrometria

óptica. As amostras foram analisadas segundo as normas [13] e [14]. A tabela 1 mostra relação dos corpos de provas enviados para análise e a figura 5 o equipamento utilizado.

Tabela 1

Mostra as amostras retiradas para caracterização através da composição química.

Corpos de prova, para caracterização através da composição química		
Amostra Nº	Material	
1	ASTM A-240 - 304L	1 304L
2	ASTM A-240 - 316L	2 316L
3	ASTM A-240 - 304	3 304
4	ASTM A-240 - 316	4 316

Fonte: Acervo do autor



Fig. 5 Mostra equipamento de espectrometria óptica, da marca SPECTRO MAX, utilização para a realização do ensaio de metalográfica.

Fonte: Acervo do autor

B. Caracterização por análise Metalográfica.

O objetivo do ensaio é caracterizar os materiais em função da estrutura cristalina. Houve a necessidade de preparação de corpos de prova, retirados de cada material a ser estudado. Foram preparados para realização dos ensaios conforme a sequência dos passos listados a seguir.

B.1. Embutimento

Para facilitar o manuseio dos corpos de prova, foi realizado o embutimento dos corpos de prova para o ensaio metalográfico. Foram colocados um corpo de prova de cada material, em uma prensa de embutimento com uma resina. Onde as amostras ficaram em uma pressão de aproximadamente 20 KN e uma temperatura de 100 °C durante todo o processo de embutimento. A figura 6 mostra após corpo de prova embutido.

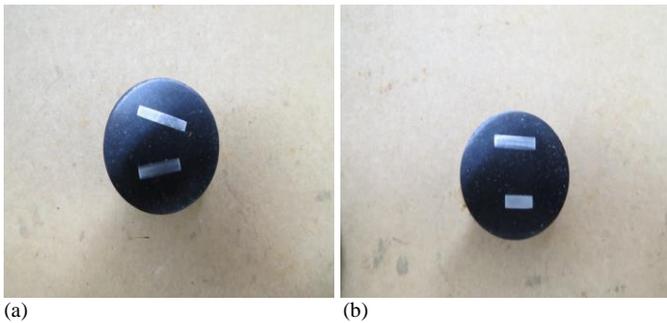


Fig. 6 (a) mostra corpos de prova, em material AISI 304I e AISI 316L, após serem preparadas para ensaio de metalográfica. (b) mostra amostra em material AISI 304 e AISI 316, após serem preparadas para ensaio de metalográfica.
Fonte: Acervo do autor

B.2. Lixamento

Devido ao grau de imperfeição encontrado na superfície das amostras ocasionado pelo corte inicial. O lixamento teve como objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento. Com os corpos de prova embutidos foram realizados os processos de lixamento utilizando lixas d'água de granulometria de 200, 300, 400, 600 e polimento em Politriz giratória, com alumina de 1 μ m de granulometria. Figuras 7 mostra processo de lixamento e polimento.

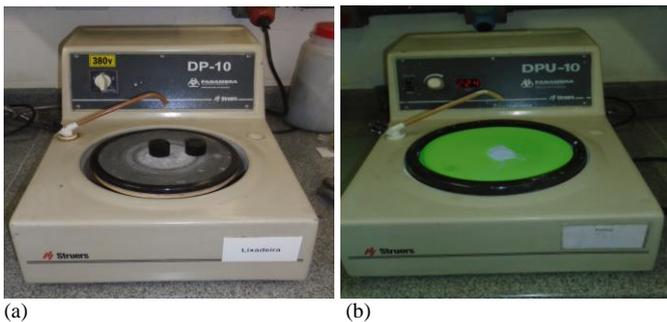


Fig.7 Corpos de prova durante preparação, para ensaio metalográfica, (a) mostra lixadeira de fabricação Panamba, modelo DP-10 (b) mostra Politriz de fabricação Panamba, modelo DPU-10.
Fonte: Acervo do autor

B.3. Ataque eletrolítico

O ataque eletrolítico permite obter por dissolução anódica de um metal em um eletrólito, uma superfície plana, polida, perfeitamente espelhada para a observação ao microscópio.

Uma vez que lixada e polida a superfície, os corpos de prova, sofreram ataques eletrolítico com ácido oxálico 10%, sendo utilizada uma tensão de 14V e 1A, durante 15s, com objetivo produzir uma área adequada para revelar as características da microestrutura do material, seguindo orientação da norma [9]. Na figura 8, o ataque eletrolítico é mostrado

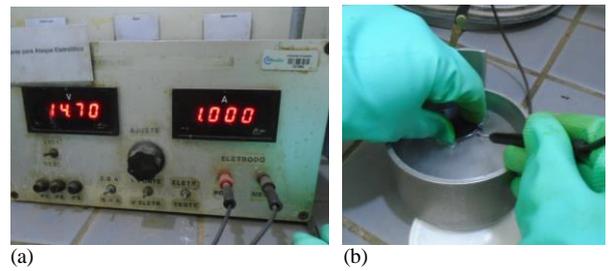


Fig. 8 Ataque eletrolítico, nos corpos de prova, (a) mostra equipamento utilizado para o ataque. (b) mostra amostra durante o ataque.
Fonte: Acervo do autor

B.4. Análise Metalográfica

Os corpos de prova foram analisados, através do ensaio metalográfico, que teve como objetivo verificar a estrutura cristalina dos materiais estudados. Sendo utilizado microscópio óptico: Olympus PMG 3. Figura 9 mostra equipamento utilizado para ensaio de metalográfica.



Fig. 9 Mostra equipamento de microscópio óptico, utilização para a realização do ensaio de metalográfica.
Fonte: Acervo do autor

C. Tratamento térmico de sensitização.

Foi realizado tratamento térmico de sensitização para ocorrer a precipitação máxima de carboneto de cromo no contorno de grão. Para a realização do tratamento térmico, foram retirados quatros corpos de prova, um de cada material estudado, nas dimensões de 30 x 150 mm, da chapa inicial. Sendo utilizado um forno da marca Formitec Ltda, com capacidade máxima de aquecimento 1200°C. Seguindo os parâmetros do tratamento térmico: Temperatura de tratamento: 650°C; Tempo de tratamento térmico: 1 Hora; Resfriamento: Lento ao ar.

A figura 10 e tabela 2 mostram relação dos corpos de prova, para tratamento e equipamento utilizado para tratamento térmico.

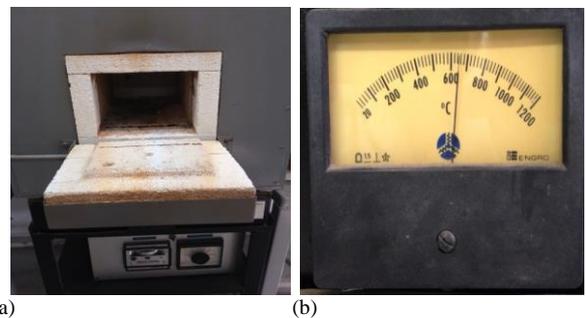
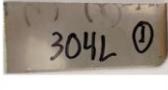
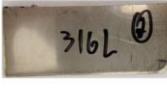


Fig. 10 (a) mostra amostra para Tratamento Térmico. (b) mostra temperatura durante Tratamento Térmico
Fonte: Acervo do autor

Tabela 2
Mostra relação dos corpos de prova para ensaio de tratamento térmico de Sensitização.

Amostra para Tratamento térmico de Sensitização	
Amostra 01: ASTM A-240 304L	Amostra 02: ASTM A-240 316L
	
Amostra 03: ASTM A-240 304	Amostra 04: ASTM A-240 316
	

Fonte: Acervo do autor

Após o término do tratamento térmico de sensitização, foram cortadas em corpos de prova menores, seguindo orientação da norma [15], resultando um total 7 corpos de prova de cada material a ser estudado, com dimensões 30 x 15 mm. A tabela 3 mostra a relação dos corpos de prova utilizados.

Tabela 3
Mostra a quantidade de corpo de prova, utilizado em cada etapa após tratamento térmico de sensitização.

Relação dos corpos de prova - Dimensão 30 x 15 mm				
Material	A 240-304L	A 240-316L	A 240-304	A 240-316
Ensaio metalográfico	1	1	1	1
Ensaio de Imersão	3	3	3	3
Tratamento Térm. Solubilização	3	3	3	3

Fonte: Acervo do autor

Foram utilizados corpos de prova para realização do ensaio de metalográfica. Para verificar o grau de precipitação, com relação ao carboneto de cromo, nos diferentes materiais.

D. Ensaio de Imersão.

Para verificar a ocorrência de corrosão intergranular, foi realizado o ensaio de imersão, onde foi realizado a limpeza inicial dos corpos de provas, através de decapagem utilizando uma solução composta de 100 mL ácido nítrico (HNO₃), 20 mL ácido fluorídrico (HF) e 150 mL de água (H₂O), conforme orientação da norma [16]. Esta decapagem teve como objetivo eliminar todos óxidos formados, após a conclusão da limpeza, foi executado dimensional dos corpos de prova, com medição do comprimento, largura, espessura e massa. Para ser realizado o cálculo de taxa de corrosão após a conclusão do ensaio, seguindo orientação da norma [9].

Tabela 4 mostra os corpos de prova após decapagem, os respectivos valores dimensionais.

Para o ensaio de imersão, os corpos de prova foram fixados através de teflon, o ensaio realizado foi com imersão total dos mesmos, na solução contendo 65% de NHO₃, tendo suas condições controladas de aeração, velocidade e temperatura. Conforme orientação da norma [9]. Figura 12 mostra a configuração do ensaio.

Parâmetros do ensaio de Imersão: Temperatura ebulição: 125°C; Tempo de ensaio: 240 Horas.

Após a conclusão do ensaio de imersão, os corpos de prova foram analisados, através de microscópio eletrônico de varredura (MEV), que teve como principal objetivo verificar a estrutura cristalina dos materiais, quanto à corrosão intergranular, devido à severidade do ensaio. Figura 13 mostra o equipamento utilizado.

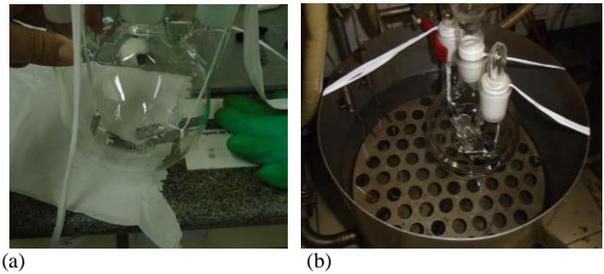


Fig. 12 Mostra ensaio imersão (a) mostra corpo de prova pontos para banho. (b) mostra durante o ensaio de imersão.

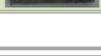
Fonte: Acervo do autor



Fig. 13 Mostra microscópio de varredura, utilizado no estudo, fabricado pela JEOL, modelo JSM- 6610LV.

Fonte: Acervo do autor

Tabela 4
Mostra dimensional dos corpos de prova, antes do ensaio de imersão.

Dimensional dos corpos de provas						
CP	Nº Cp	Material	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)
	1.1	AISI - 304 L	13,1	28,3	2,15	5,7212
	1.2	AISI - 304 L	12,4	27,5	2,1	5,2993
	1.3	AISI - 304 L	11,8	28,8	2,2	4,8188
	2.1	AISI - 316 L	10,1	29,6	2,3	4,6187
	2.2	AISI - 316 L	12,4	29,2	2,2	5,7026
	2.3	AISI - 316 L	11,6	29,3	2,15	5,0528
	3.1	AISI - 304	12,6	30,4	2,1	5,8046
	3.2	AISI - 304	13,5	29,5	2,2	6,0065
	3.3	AISI - 304	13,9	30,2	2,15	6,3082
	4.1	AISI - 316	10,3	27,5	2,5	4,5421
	4.2	AISI - 316	12,3	27,4	2,6	5,681
	4.3	AISI - 316	11,5	27,4	2,4	5,3439
Obs: Os valores são a média entre 3 pontos medidos						

Fonte: Acervo do autor

E. Tratamento térmico de Solubilização.

O objetivo do ensaio de tratamento térmico de solubilização é garantir que não tenha a presença na estrutura de carboneto de cromo, que é o principal motivo de corrosão intergranular.

Para a realização do tratamento foram utilizados os corpos de prova já sensibilizados e tratados térmico, conforme especificado na norma [9].

Parâmetros do tratamento térmico:

1º conjunto de corpo de prova: Temperatura de tratamento: 1140°C; Tempo de tratamento térmico: 30 minutos; Resfriamento: Lento ao ar.

2º conjunto de corpo de prova: Temperatura de tratamento: 1140°C; Tempo de tratamento térmico: 1 hora; Resfriamento: Lento ao ar.

3º conjunto de corpo de prova: Temperatura de tratamento: 1140°C; Tempo de tratamento térmico: 1h e 30 minutos; Resfriamento: Lento ao ar.

Após o tratamento térmico de solubilização, foi realizado novamente ensaio de metalográfica, para verificar o grau de precipitação residual, com relação ao carboneto de cromo, nos diferentes materiais. Figura 14 corpos de prova embutidos.

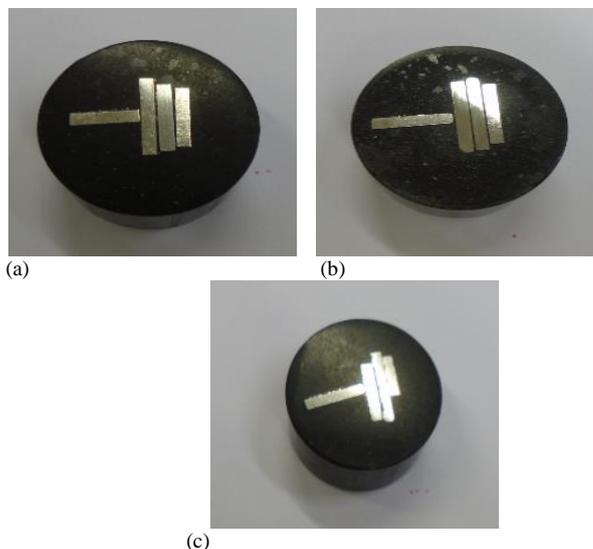


Fig. 14 Mostra amostras após embutimento para ensaio metalográfico
(a) amostra em material AISI 304L e AISI 316L, após tratado por 30 minutos.
(b) amostra em material AISI 304 e AISI 316 após tratado por 1 hora.
(c) amostra em material AISI 304 e AISI 316 após tratado por 1 hora e 30 minutos.

Fonte: Acervo do autor

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados, dos materiais de estudos, após serem ensaiados através da norma [9], prática C, e também após ensaios de caracterização através da composição química, caracterização da microestrutura através de ensaio metalográfico, após os ensaios de tratamento térmico de sensibilização e solubilização.

A. Caracterização por análise química.

Após remoção de corpos de provas, de um trecho de chapa nova, cada amostra foi encaminhada para laboratório especializado para realização do ensaio de análise química via espectrometria óptica. Os resultados de cada amostra são apresentados nas tabelas 5, 6, 7 e 8 que se seguem.

Tabela 5
Mostra composição química similar a de um aço inoxidável AISI 304L.

Tipo de Ensaio:		Análise Química via Espectrometria					
Elementos		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %
Resultados Obtidos		0,029	0,42	1,20	0,021	0,002	18,35
Elementos		Ni %	Mo %	Cu %	Al %	V %	Nb %
Resultados Obtidos		7,55	0,06	0,06	0,004	0,05	0,008
Elementos		Ti %	W %	Co %	Sn %	Pb %	Zr %
Resultados Obtidos		0,002	ND	0,16	0,003	0,024	0,01
Elementos		B %	N %	Fe %			
Resultados Obtidos		ND	0,0687	BASE			

NA = Não analisado ND = Não detectado

Normas de Referência: ASTM A 751:2014a
ASTM E 1086:2014

Condições Ambientais: Temperatura 21°C Umidade 63%

Fonte: [17]

Tabela 6
Mostra composição química similar a de um aço inoxidável AISI 316L.

Tipo de Ensaio:		Análise Química via Espectrometria					
Elementos		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %
Resultados Obtidos		0,025	0,48	1,30	0,027	0,0022	16,83
Elementos		Ni %	Mo %	Cu %	Al %	V %	Nb %
Resultados Obtidos		9,55	2,05	0,17	0,004	0,05	0,010
Elementos		Ti %	W %	Co %	Sn %	Pb %	Zr %
Resultados Obtidos		0,003	ND	0,21	0,003	0,030	0,01
Elementos		B %	N %	Fe %			
Resultados Obtidos		0,0006	0,040	BASE			

NA = Não analisado ND = Não detectado

Normas de Referência: ASTM A 751:2014a
ASTM E 1086:2014

Condições Ambientais: Temperatura 21°C Umidade 63%

Fonte: [17]

Tabela 7
Mostra composição química similar a de um aço inoxidável AISI 304.

Tipo de Ensaio: Análise Química via Espectrometria						
Elementos	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %
Resultados Obtidos	0,031	0,43	1,21	0,021	0,002	18,17
Elementos	Ni %	Mo %	Cu %	Al %	V %	Nb %
Resultados Obtidos	7,64	0,04	0,11	0,003	0,05	0,008
Elementos	Ti %	W %	Co %	Sn %	Pb %	Zr %
Resultados Obtidos	0,003	ND	0,17	0,004	0,023	0,01
Elementos	B %	N %	Fe %			
Resultados Obtidos	0,0001	0,061	BASE			

NA = Não analisado ND = Não detectado

Normas de Referência: ASTM A 751:2014a
ASTM E 1086:2014

Condições Ambientais: Temperatura 22°C Umidade 62%

Fonte: [17]

Tabela 8
Mostra composição química similar a de um aço inoxidável AISI 316.

Tipo de Ensaio: Análise Química via Espectrometria						
Elementos	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %
Resultados Obtidos	0,031	0,33	1,46	0,018	0,022	16,70
Elementos	Ni %	Mo %	Cu %	Al %	V %	Nb %
Resultados Obtidos	9,68	2,11	0,41	0,007	0,08	0,059
Elementos	Ti %	W %	Co %	Sn %	Pb %	Zr %
Resultados Obtidos	0,002	0,03	0,11	0,004	0,032	0,01
Elementos	B %	N %	Fe %			
Resultados Obtidos	0,0021	0,064	BASE			

NA = Não analisado ND = Não detectado

Normas de Referência: ASTM A 751:2014a
ASTM E 1086:2014

Condições Ambientais: Temperatura 21°C Umidade 62%

Fonte: [17]

Foi observado que todas as amostras ensaiadas, estão com o teor de níquel, fora da faixa estipulada pela norma [9], desta forma não promovendo a plena estabilidade da fase austenítica, conseqüentemente diminuindo consideravelmente a resistência quanto corrosão e à oxidação a altas temperaturas.

Também foi observado que as amostra AISI 304 e AISI 316, o teor do carbono encontra-se fora da faixa estipulada pela norma, o que favorece a formação de austenita, mas é prejudicial com relação à sensitização, e quanto a ocorrência da corrosão intergranular

B. Caracterização das Amostras por Metalográfica.

Esta análise inicial do material fez-se necessária para se comprovar à inexistência de precipitados de carbonetos de cromo, os quais podem influenciar nos ensaios realizados. Também se verificou que as amostra não apresenta nenhuma forma de precipitação de carbonetos de cromo no contorno

dos grãos. Segundo a norma [9], com a microestrutura é típica de um material livre de carbonetos.

Ainda com relação à caracterização em função da microestrutura, as figuras 15 e 16 apresentaram estrutura metalográfica similar a de um aço inoxidável AISI 304 e AISI 304L, enquanto que as figuras 17 e 18 apresentaram composição química similar a de um aço inoxidável AISI 316L e AISI 316.

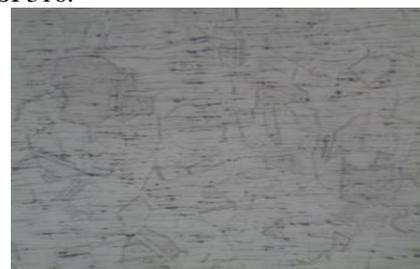


Fig. 15 Microestrutura similar a AISI 304, com um aumento de 500 vezes.
Fonte: Acervo do autor



Fig. 16 Microestrutura similar a AISI 304L, com um aumento de 500 vezes.
Fonte: Acervo do autor



Fig. 17: Microestrutura similar a AISI 316L, com um aumento de 500 vezes.
Fonte: Acervo do autor



Fig. 18 Microestrutura similar a AISI 316, com um aumento de 500 vezes.
Fonte: Acervo do autor

C. Análise microestrutura após tratamento térmico de Sensitização.

A amostra foi analisada após o tratamento térmico de sensitização, quanto a estrutural dos materiais estudados através de ensaio metalográfico, para verificar o grau de precipitação, com relação ao carboneto de cromo nos diferentes materiais.

Por meio da metalografia, estrutura do AISI-304L, houve precipitação de carbonetos de cromo, porém pode-se observar que não houve precipitação em toda região de contorno de grãos, sendo assim consideramos que o mesmo não está sensitizado, mesmo havendo precipitação. Pois segundo a norma, para o material ser considerado sensitizado, deve haver precipitação em todo contorno de Grão. Figura 20 mostra microestrutura através do microscópio óptico.



Fig. 19 Microestrutura similar a AISI 304L, com um aumento de 500 vezes. Onde há precipitação no contorno de grão, porém não ao redor de todo contorno de grão. Desta forma não considerado sensitizado.
Fonte: Acervo do autor

Como resultado observa-se estrutura do AISI- 304, onde houve precipitação de carbonetos de cromo, e podemos observar, que houve precipitação em toda região de contorno de grãos, sendo assim consideramos que o mesmo está sensitizado, pois houve precipitação em todo contorno de Grão. Figura 20, mostra microestrutura através do microscópio óptico.

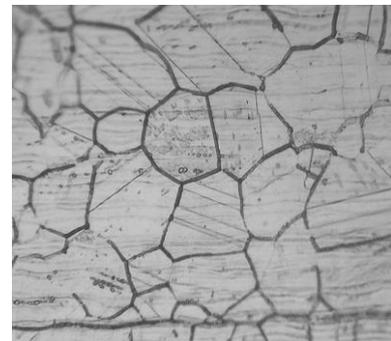


Fig. 20 Microestrutura similar a AISI 304, com um aumento de 500 vezes. Onde há precipitação no contorno de grão, ao redor de todo contorno de grão. Desta forma considerada sensitizado.
Fonte: Acervo do autor

Durante metalografia, observar-se que a estrutura do AISI-316, onde não houve precipitação de carbonetos de cromo sendo assim consideramos através do comparativo com a norma A-262, que o mesmo não está sensitizado. Figura 21, mostra microestrutura através do microscópio óptico.

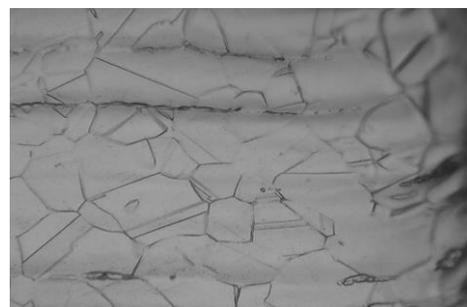


Fig. 21 Mostra a microestrutura similar a AISI 316, com um aumento de 500 vezes. Onde não a precipitação no contorno de grão.
Fonte: Acervo do autor

Durante metalográfica, observar-se que á estrutura do AISI-316L, onde não houve precipitação de carbonetos de

romo sendo assim consideramos através do comparativo com a norma A-262, que o mesmo não está sensibilizado. Porém observou lamelas de Ferrita Delta, proveniente de linhas de conformação. Figura 22 mostra microestrutura através do microscópio óptico.



Fig. 22 Mostra a microestrutura similar a AISI 316L, com um aumento de 500 vezes. Onde não a precipitação no contorno de grão.
Fonte: Acervo do autor

D. Análise do ensaio de Imersão.

Após o ensaio de imersão, foi executado novamente o dimensional dos corpos de prova, com medição da massa final, para realização do cálculo de taxa de corrosão, para quantificar o nível de corrosão intergranular. Tabela 9 mostra os corpos de prova com os respectivos valores de massa final.

Tabela 9

Mostra dimensional final dos corpos de prova, após o ensaio de imersão.

Dimensional dos corpos de provas							
CP	Nº Cp	Material	Largura (mm)	Comprim. (mm)	Espess. (mm)	Massa (g) Inicial	Massa (g) Final
	1.1	AISI - 304 L	13,1	28,3	2,15	5,7212	4,5801
	1.2	AISI - 304 L	12,4	27,5	2,1	5,2993	4,242
	1.3	AISI - 304 L	11,8	28,8	2,2	4,8188	3,8056
	2.1	AISI - 316 L	10,1	29,6	2,3	4,6187	2,9085
	2.2	AISI - 316 L	12,4	29,2	2,2	5,7026	3,6199
	2.3	AISI - 316 L	11,6	29,3	2,15	5,0528	2,9465
	3.1	AISI - 304	12,6	30,4	2,1	5,8046	4,001
	3.2	AISI - 304	13,5	29,5	2,2	6,0065	4,1542
	3.3	AISI - 304	13,9	30,2	2,15	6,3082	4,4158
	4.1	AISI - 316	10,3	27,5	2,5	4,5421	-
	4.2	AISI - 316	12,3	27,4	2,6	5,681	-
	4.3	AISI - 316	11,5	27,4	2,4	5,3439	-

Obs: Os valores são a média entre 3 pontos medidos

Fonte: Acervo do autor

O cálculo da taxa de corrosão, foi realizado em cada corpo de prova individualmente, a taxa de corrosão foi em função da perda de massa, de cada amostra após o período de teste. A taxa de corrosão é expressa milímetro por mês. Seguindo orientação da norma [9], utilizando a seguinte equação. Tabela 10 mostra a fórmula de cálculo.

Tabela 10

Mostra a formula para cálculo da taxa de corrosão, sendo a mesma expressa em milímetros por mês.

$$\text{Milímetros por mês} = 7290 \times W / (A \times D \times T)$$

Sendo:

W = Massa (g)

T = Tempo de exposição (horas)

A = Área total de superfície (cm²)

D = Densidade (g/cm³)

Fonte: ASTM A-262 Pratica C

Os resultados dos parâmetros que influenciam podem ser observados na tabela 11. Em função de cada material ensaiado.

Tabela 11
Mostra o resultado dimensional de cada corpo de prova individualmente, e a taxa de corrosão.

Indent. CP's	Amostra	Comprim. (mm)	Larg. (mm)	Espes. (mm)	Furo (mm)	Área (cm ²)	Massa (g)	Massa (g)	Tempo (h)	Densi. (g/cm ³)	Taxa corrosão (mm/mês)	Taxa corrosão (média) (mm/mês)
1.1	AISI 304L	28,3	13,1	2,15	2,35	9,27	5,7212	4,5801	240	7,90	0,474	0,462
1.2	AISI 304L	27,5	12,4	2,1	2,35	8,56	5,2993	4,2420	240	7,90	0,475	
1.3	AISI 304L	28,8	11,8	2,2	2,35	8,66	4,8188	3,8056	240	7,90	0,451	
2.1	AISI 316L	29,6	10,1	2,3	2,35	7,89	4,6187	2,9085	240	7,90	0,835	0,887
2.2	AISI 316L	29,2	12,4	2,2	2,35	9,15	5,7026	3,6199	240	7,90	0,877	
2.3	AISI 316L	29,3	11,6	2,15	2,35	8,63	5,0528	2,9465	240	7,90	0,940	
3.1	AISI 304	30,4	12,6	2,1	2,35	9,54	5,8046	4,001	240	7,90	0,728	0,716
3.2	AISI 304	29,5	13,5	2,2	2,35	9,93	6,0065	4,1542	240	7,90	0,718	
3.3	AISI 304	30,2	13,9	2,15	2,35	10,36	6,3082	4,4158	240	7,90	0,703	
4.1	AISI 316	27,5	10,3	2,5	2,35	7,65	4,5421	-	240	7,90	-	-
4.2	AISI 316	27,4	12,3	2,6	2,35	8,91	5,681	-	240	7,90	-	-
4.3	AISI 316	27,4	11,5	2,4	2,35	8,26	5,3439	-	240	7,90	-	-

Fonte: Acervo do autor

Durante o ensaio de imersão, o material em AISI-316, foi totalmente consumido durante o ensaio, devido a altíssima taxa de corrosão provocada pela fluído de ensaio. Alguns fatores que levaram a favorecer este fenômeno, foi que o material estava com os elementos de liga (Níquel e Carbono), fora do recomendado pela norma [6].

Outro fato que influenciou a taxa de corrosão, no AISI-316 como no AISI-316L, foi que os dois materiais possuem com elemento de liga Mo. Os aços inoxidáveis que possuem este elemento de liga, em contato com ácido nítrico concentrado e com temperaturas altas, sofrem como principal do tipo de corrosão a intergranular.

Por estar em um meio altamente oxidante, a corrosão intergranular é causada por uma corrosão preferencialmente nos contornos de grão que, com a passagem de íons de cromo para a solução, torna o meio ainda mais oxidante, tendendo a acelerar o fenômeno.

Devido estes materiais ter com elemento de liga Mo, em quantidades maiores que 1%, induz à corrosão na presença de ácido nítrico (NHO₃). O molibdênio diminui a solubilidade do carbono na fase austenita e acelera a corrosão.

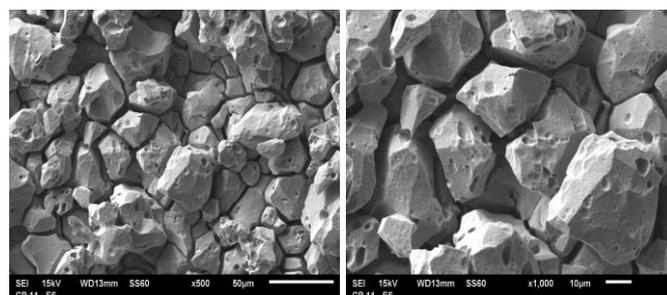
Por isso a taxa de corrosão do material AISI-316L, foi a mais elevado, com uma média de 0,887 mm/mês.

Também como resultado do cálculo da taxa de corrosão, o material que menos sofreu corrosão, foi o AISI-304L, devido o mesmo não ter apresentado sensitização, mesmo que ocorrendo a precipitação de carboneto de cromo. Tendo uma corrosão média de 0,46 mm/mês.

O material AISI-304, que apresentou sensitização, com a precipitação em todo o contorno de grão, teve uma alta taxa de corrosão, com uma média de 0,716 mm/mês, e uma taxa aproximadamente 62,3% a mais do que o AISI-304L. Pois a corrosão intergranular está diretamente relacionada ao nível de sensitização do material.

Os resultados obtidos durante o cálculo de taxa de corrosão de cada material podem ser confirmados quando os mesmos foram analisados através do microscópio de varredura (MEV), suas estruturas cristalinas.

A estrutura cristalina do material AISI-304L, onde algumas regiões com vales, característica típica do material quando ocorre a remoção dos grãos cristalinos através de processo de corrosão intergranular. A corrosão nas regiões de precipitação de carboneto de cromo (Cr₂₃Cr₆) ao redor dos grãos. Figura 23 mostra microestrutura através do microscópio de varredura.



(a) Aumento de 500 vezes

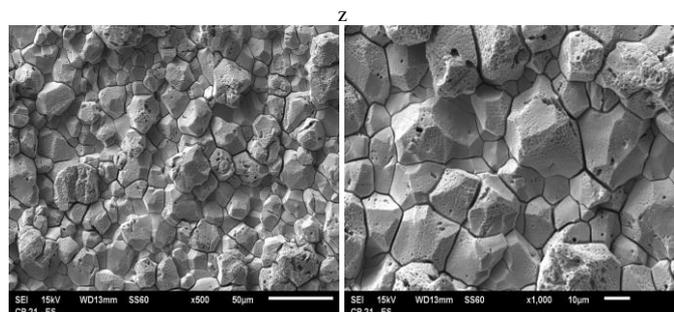
(b) Aumento de 1000 vezes

Fig. 23: (a): Mostra a microestrutura similar a AISI 304L, com um aumento de 500 vezes, onde observa o espaçamento entre os grãos, proveniente da corrosão intergranular. (b) mostra a microestrutura similar a AISI 304L, com um aumento de 1000 vezes, onde observa o espaçamento entre os grãos, proveniente da corrosão intergranular.

Fonte: Acervo do autor

Na estrutura cristalina do material AISI-316L podemos observar, que algumas regiões se apresentaram com vales, que é característica típica do material quando ocorre a remoção dos grãos cristalinos através de processo de corrosão. Porém neste caso o ataque corrosivo, não foi em função carboneto de cromo, ao redor dos grãos, mas devido o material apresentar teores de níquel e carbono fora do

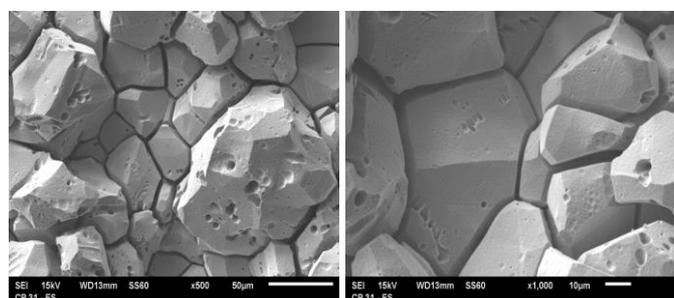
especificado, que ajudou no processo corrosivo. Mas o elemento de liga que propiciou a taxa de corrosão foi o Molibdênio, onde podemos ver a ataque no centro dos grãos. Figura 24 mostra microestrutura através do microscópio de varredura.



(a) Aumento de 500 vezes (b) Aumento de 1000 vezes
 Fig. 24 (a) mostra a microestrutura similar a AISI 316L, com um aumento de 500 vezes, onde observa o espaçamento normal entre os contornos grãos. (b) mostra a microestrutura similar a AISI 316L, com um aumento de 1000 vezes, onde o processo corrosivo nos grãos, proveniente do dos elementos de liga fora do especificado, e principalmente por causa da presença do molibdênio na liga.

Fonte: Acervo do autor

Na estrutura cristalina do material AISI-304, podemos observar também algumas regiões com vales, que é característica típica do material quando ocorre a remoção dos grãos cristalinos através de processo de corrosão intergranular. Há corrosão nas regiões de precipitação de carboneto de cromo ao redor dos grãos. Em comparação a estrutura cristalina do AISI-304L, que o processo corrosivo é mais acentuado, devido a grau de sensitização do material. Figura 25, mostra microestrutura através do microscópio de varredura.



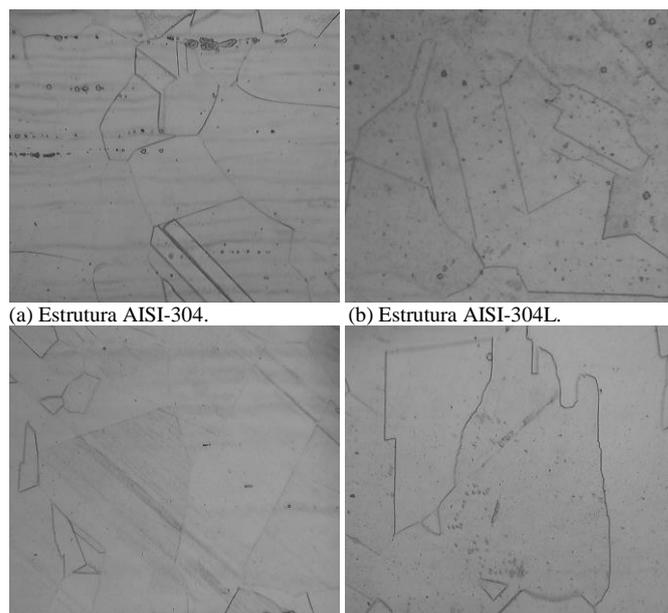
(a) Aumento de 500 vezes (b) Aumento de 1000 vezes
 Fig. 25 (a) microestrutura similar a AISI 304, com um aumento de 500 vezes, onde observar o espaçamento entre os grãos, proveniente da corrosão intergranular. (b) microestrutura similar a AISI 304, com um aumento de 1000 vezes, onde o espaçamento entre os grãos, proveniente da corrosão intergranular. Em comparação a estrutura cristalina do AISI-304L, podemos ver que o processo corrosivo é mais acentuado, devido a grau de sensitização do material.

Fonte: Acervo do autor

E. Análise microestrutura após tratamento térmico de Solubilização.

Como resultado da estrutura cristalina dos AISI-304L, AISI316L, AISI 304 e AISI 316, houve a solubilização, de grande parte dos carbonetos de cromo precipitados no contorno de grãos. Quando o mesmo foi submetido a um tratamento térmico, por um período de 30 minutos. Figura 26

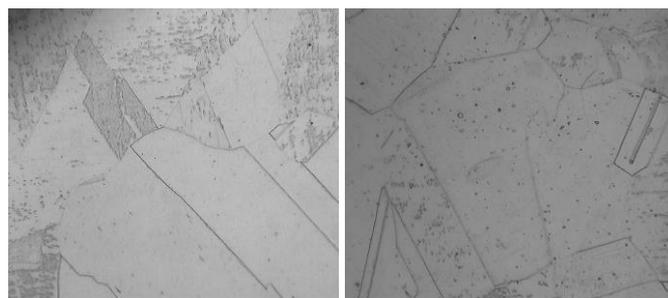
mostra análise da microestrutura após tratamento de solubilização.



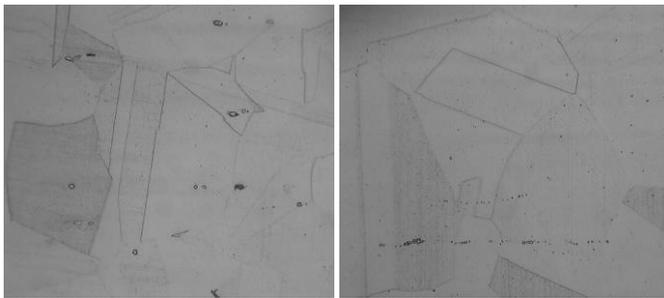
(a) Estrutura AISI-304. (b) Estrutura AISI-304L.
 (c) Estrutura AISI-316 (d) Estrutura AISI-316L
 Fig. 26 (a) microestrutura do AISI 304, com um aumento de 500 vezes. Onde houve uma solubilização, porém ainda possui carboneto de cromo residual. (b) microestrutura do AISI 304 L, com um aumento de 500 vezes. Onde houve uma solubilização, porém ainda possui carboneto de cromo residual. (c) microestrutura do AISI 316, com um aumento de 500 vezes. Onde houve uma solubilização. (d) microestrutura do AISI 316 L, com um aumento de 500 vezes. Onde houve uma solubilização.

Fonte: Acervo do autor

Como resultado da estrutura cristalina dos AISI-304L, AISI316L, AISI 304 e AISI 316, houve a solubilização, completa do material. Quando o mesmo foi submetido a um tratamento térmico, por um período de 1 hora. Figura 27 mostra análise da microestrutura após tratamento de solubilização.



(a) Estrutura AISI-304. (b) Estrutura AISI-304L.



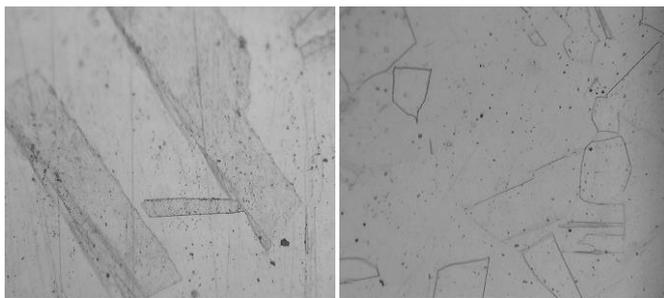
(c) Estrutura AISI-316

(d) Estrutura AISI-316L

Fig. 27 (a) microestrutura do AISI 304, com um aumento de 500 vezes. Onde observamos que houve uma solubilização completa da estrutura. (b) microestrutura do AISI 304 L, com um aumento de 500 vezes. Onde observamos que houve uma solubilização completa da estrutura. (c) microestrutura do AISI 316, com um aumento de 500 vezes. Onde observamos que houve uma solubilização completa da estrutura. (d) microestrutura do AISI 316 L, com um aumento de 500 vezes. Onde observamos que houve uma solubilização completa da estrutura.

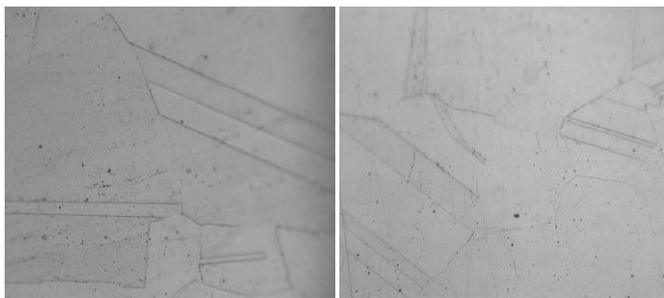
Fonte: Acervo do autor

Como resultado da estrutura cristalina dos AISI-304L, AISI316L, AISI 304 e AISI 316, onde houve a solubilização, completa do material. Quando o mesmo foi submetido a um tratamento térmico, por um período de 1 hora e 30 minutos. Figura 28 mostra análise da microestrutura após tratamento de solubilização.



(a) Estrutura AISI-304.

(b) Estrutura AISI-304L.



(c) Estrutura AISI-316

(d) Estrutura AISI-316L

Fig. 28 (a) microestrutura do AISI 304, com um aumento de 500 vezes. Onde observamos que houve uma solubilização completa da estrutura. (b) microestrutura do AISI 304 L, com um aumento de 500 vezes. Onde observamos que houve uma solubilização completa da estrutura. (c) microestrutura do AISI 316, com um aumento de 500 vezes. Onde observamos que houve uma solubilização completa da estrutura. (d) microestrutura do AISI 316 L, com um aumento de 500 vezes. Onde observamos que houve uma solubilização completa da estrutura.

Fonte: Acervo do autor

V. CONCLUSÕES

A partir dos materiais e das técnicas empregadas neste trabalho, é possível concluir que, com a realização deste

estudo, verificou-se o grau de sensitização dos aços inoxidáveis austeníticos.

O estudo permitiu maior conhecimento no que se refere ao mecanismo de corrosão intergranular nos aços inoxidáveis austeníticos.

Quando os aços inoxidáveis apresentam teores de carbono maior ou igual 0,03%, ficam susceptíveis a sensitização, que é a precipitação do carboneto de cromo $Cr_{23}C_6$, no contorno de grão.

O ensaio de imersão permitiu verificar o grau de corrosão intergranular, nos diferentes materiais estudados.

Aço inoxidável, que possui em sua composição elemento de liga o Molibdênio, com teores superiores a 1%, não é recomendado a sua utilização em meio com ácido nítrico, devido o ataque ao elemento de liga, e conseqüentemente à alta taxa de corrosão.

Com a realização deste estudo verificou-se que os aços inoxidáveis, utilizados em processo de soldagem, que possuem teores igual ou maior 0,03%, não se recomenda a utilização em meios ácidos, devido o mesmo estar susceptível a sensitização, e conseqüentemente ao ataque de corrosão intergranular em meio corrosivo.

É necessária a realização de tratamento térmico de solubilização, com duração de no mínimo 1 hora, para que seja revertida por completo a sensitização.

Como a realização deste estudo possível uma maior interação com equipamentos laboratoriais de análise e caracterização de materiais.

Este estudo foi de caráter multidisciplinar e permitiu aplicar conhecimentos teóricos de forma prática.

REFERÊNCIAS

- [1] AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. AISI (1). ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. Ciência e Engenharia dos Materiais. [S.l.]: Cengage Learning, 2008. 594p. ISBN:8522105984.
- [2] CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas, Vol. 1 PEARS 2013.
- [3] IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. PANOSSIAN, Z. Corrosão e Proteção Contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas., São Paulo, 1 ed, 1993.
- [4] CALLISTER, Jr, W.D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 7a Ed., 2013.
- [5] GENTIL, V. Corrosão. Rio de Janeiro, LTC, 4 ed, 2003.
- [6] ASTM A240 / A240M - Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. ASTM International.
- [7] LAZARINI, J. C. Apostila Materiais e Corrosão. Curso de Materiais e Corrosão, Rhodia Paulínia, 2012.
- [8] PECKNER, D., BERNSTEIN, I. M. Handbook of Stainless Steels. McGraw – Hill Inc., 1997
- [9] ASTM - American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM standards 2005. ASTM International, 2005. ASTM A262 - Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels. ASTM International.
- [10] TELLES, P. S. Materiais para equipamento de processo. Rio de Janeiro, 6 ed, 2003.
- [11] GARCIA, A.; SPIM, J.; SANTOS, C. Ensaio dos materiais. [S.l.]: LTC, 2000. 247p. ISBN:8521 612214.
- [12] FBTS - Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem. Curso de inspetor de soldagem – CIS, Vol.1. Rio de Janeiro: Publit, 2012.
- [13] ASTM A751 – 2014 - Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products. ASTM International.
- [14] ASTM E1086 - 2014 - Standard Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry. ASTM International.

- [15] ASTM G31 - 2012- Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. ASTM International.
- [16] ASTM G1 – 03-2011 -Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM International.
- [17] SGS BRASIL LABMAT. Relatório de ensaio/análise n° PII708368_QUI. Piracicaba, 19 de Maio, 2017.