

FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUIZA BARROS SILVEIRA MAYCON COMETTI SCOPEL

CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS COM AÇO 316L EM PROCESSO GTAW

> ARACRUZ 2019



FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUIZA BARROS SILVEIRA MAYCON COMETTI SCOPEL

CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS COM AÇO 316L EM PROCESSO GTAW

Trabalho de conclusão de curso submetido ao departamento de Engenharia Mecânica da FAACZ – Faculdades Integradas de Aracruz como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Bacherel em Engenharia Mecânica.

ARACRUZ 2019

LUIZA BARROS SILVEIRA MAYCON COMETTI SCOPEL

CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS COM AÇO 316L EM PROCESSO GTAW

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 11 de dezembro de 2019

COMISSÃO EXAMINADORA					
Prof. Me. deao Paulo Calixto da Silva Faculdados Integradas de Aracruz					
Orientador					
Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado					
Facuidades Integradas de Aracruz					
Examinador interno					
Baga					
Prof. Esp. Ernandes Marcos Scopel					
Instituto federal do Espírito Santo					
Examinador externo					

AGRADECIMENTOS

Gratidão a Deus pela força e perseverança nós dada durante as dificuldades de nossa caminhada.

Somos gratos a nossa instituição FAACZ, em especial nosso professor e orientador João Paulo Calixto.

Agradecemos aos representantes do laboratório Vagner e Fabio da FAACZ, junto ao IFES de Aracruz representado pelo Henrique, pessoas que tiveram grande contribuição na realização deste trabalho.

Aos nossos familiares um grande obrigado, pela importância deter acreditado em nossas capacidades de superar os obstáculos que a vida nos apresentou.

Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância.

(John F. Kennedy)

RESUMO

No presente trabalho chapas finas de aço 316L foram soldadas pelo processo GTAW sem adição de material, com um resfriamento ambiente. Cada amostra das três variações de energia passaram pelos ensaios de metalografia e corrosão. Resultando em uma microestrutura apresentando morfologia de ferrita, variando entre ferrita vermicular, acicular, globular e lacy. Os resultados dos ensaios de corrosão mostram que o aumento da energia de soldagem não influenciou na sensitização e precipitação de cromo, reduzindo os riscos de corrosão intergranular.

Palavras chaves: Aço inoxidável 316L. Energia de soldagem. Microestrutura e corrosão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Micrografias compostas tridimensionais de várias morfologias de
ferrita na solda multipasse de aço inoxidável Tipo 308: A - tipo I,
vermicular; B - tipo II, rendado; C - tipo III, acicular; e D - tipo IV,
globular
Figura 2 - Regiões empobrecidas em cromo 177
Figura 3 - Esquema da curva de polarização do ensaio DL-EPR em um material
sensitizado 19
Figura 4 - Ataque HNO ₃ a) Macrografia da seção transversal; b) Microestrutura
predominantemente vermicular; c) Microestruturas da ,
respectivamente; d) interface entre a zona fundida e a ZAC,
apresentando ferrita vermicular e ferrita ; e) Microestrutura
predominantemente acicular 211
Figura 5 - Micrografia Ótica da amostra solubilizada 1040°C (A0), mostrando os
carbonetos dissolvidos na matriz a) ampliação em 200X b)
ampliação em 500X23
Figura 6 - Curva de polarização do aço AISI 304 em solução 0,5 M H_2SO_4 + 0,01 M
KSCN, solubilizado de fábrica244
Figura 7 - Amostra serie A1, teste 1 266
Figura 8 - Amostra serie D2, teste 1 266
Figura 9 - Amostra serie 3, teste 1 27
Figura 10 - Amostra serie 5, teste 1 277
Figura 11 - Micrografia Ótica da amostra D2, comparação ZF e ZTA 288
Figura 12 - Desenho esquemático do chanfro da solda
Figura 13 - Arotec modelo PRE – 30S 311
Figura 14 - Politriz Arotec de modelo APL-2 311
Figura 15 - Microscópio Tension 311
Figura 16 - Potenciostato PGSTAT 302N Autolab
Figura 17 - Desenho esquemático enfatizando o ensaio eletroquímico 333
Figura 18 - Amostra de referência Erro! Indicador não definido.35
Figura 19 - Ferrita acicular presente na zona fundida das amostras similares do
aço inoxidável austenítico 316L36

Figura 22 - Amost	tra série D5	- a) Microestrutur	a apresentando	o morfologia	de
ferrita v	vermicular b) Microestrutura	apresentando	morfologia	de
ferrita a	icicular c) Mi	croestrutura apre	sentando morfo	ologia de fer	rita
lacy d) l	Microestrutura	a apresentando m	orfologia de fer	rita globular.	38
Figura 23 - Amostr	ra como recel	oido			39
Figura 24 - Amostr	ra série A1				40
Figura 25 - Amostr	ra série D3				41
Figura 26 - Amostr	ra série 3, tes	te 1			41
Figura 27 - Amostr	ra série D5				42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Composição química (% em peso) dos aços inoxidáveis AISI 31	6L.
		146
Tabela 2	- Composição química de acordo com o catalogo da Amperam (%	em
	peso)	29
Tabela 3	- Parâmetros de soldagem	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

А	Ámpere
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
С	Carbono
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DL-EPR	Simple Loop Electrochemical Potenteciodynamic Reactivation
EPR	Electrochemical Potenteciodynamic Reactivation
GDS	Grau de sensitização
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
la	Corrente de ativação
Ir	Corrente de reativação
J	Joule
I	Litros
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
mm	Milímetros
Mn	Manganês
Мо	Molibdênio
Ν	Newton
Ν	Nitrogênio
Ni	Níquel
Р	Fósforo
PIB	Produto Interno Bruto
S	Segundos
SCE	Eletrodo de calomelano saturado
Si	Silício
TIG	Tungsten inert gas
V	Volt
ZAC	Zona afetada pelo calor
ZTA	Zona termicamente afetada
δ	Delta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	. 122
2 OBJETIVOS	. 133
2.1 Objetivo geral	. 133
2.2 Objetivos específicos	. 133
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	. 144
3.1 Resistência mecânica	. 155
3.2 Corrosão	. 166
3.2.1 Corrosão por pite	. 166
3.2.2 Corrosão intergranular	. 177
3.3 Técnicas eletroquímicas	. 188
3.3.1 Ensaio decicloduplo (DL-EPR)	19
3.4 Caracterização de Juntas soldadas com aço 316L em processo GTA	N 20
4 METODOLOGIA	29
4.1 Material	29
4.2 Soldagem	29
4.2.1 Parâmetros de Soldagem	. 300
4.3 Metalografia	. 300
4.4 Ensaio de corrosão	31
4.4.1 Preparação da amostra	. 322
4.4.2 Levantamento das curvas de polarização potenciodinâmicas	pelo
método duplo ciclo EPR (DL-EPR)	. 322
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	. 355
5.1 Microscopia Óptica	. 355
5.1.1 Caracterização da amostra série A1	. 366
5.1.2 Caracterização da amostra série D3	. 377
5.1.3 Caracterização da amostra série D5	. 388
5.2 Ensaio de corrosão pelo método DL-EPR	38
5.2.1 Amostra série A1	39
5.2.2 Amostra série D3	. 400
5.2.3 Amostra série D5	. 422
6 CONCLUSÃO	. 433
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	. 444
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	. 455

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas enfrentados pela indústria é a corrosão, pois a perda de materiais causa por ela consume cerca de 1% a 5% do PIB dos países, onde grande parte desta perda ocorre na indústria petrolífera (GENTIL, 2011).

No Brasil, a perda por corrosão chega a 4% e considerando que o PIB em 2017 totalizou R\$ 6.6 trilhões, pode-se estimar que as perdas por corrosão chegam a cerca de 264 bilhões (INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION, 2017; IBGE, 2017).

Setores da indústria de petróleo e gás estão utilizando os aços inoxidáveis austenítico, pois possuir elevada resistência à corrosão, excelentes propriedades mecânica e boa soldabilidade (FERREIRA, 2008).

As aplicações do aço inoxidável nesses setores, muitas vezes requerem procedimentos de soldagem, porém, a resistência à corrosão desses materiais é influenciada pelos parâmetros utilizados na soldagem, o que podem ocasionar susceptibilidade à precipitação de carbonetos de cromo ($Cr_{23}C_6$) nos contornos de grão, chamada de sensitização (FERREIRA, 2008).

Dentre os aços inoxidáveis, o austenitico AISI 316L se destaca, pois possui um teor de carbono reduzido, e essa redução tem como objetivo minimizar o efeito da sensitização quando exposto a temperaturas entre 425 e 870°C (JUNIOR, 2002).

Entretanto DEVINE (1979), descobriu que a quantidade e morfologia da ferrita, gerada por variações na taxa de resfriamento após a soldagem e pela composição do material, influenciam o comportamento de sensibilização.

O presente trabalho, diante do problema da precipitação de ferrita, propõe analisar a influência da energia de soldagem no processo GTAW, simulando um reparo em uma chapa de aço inoxidável austenítico AISI 316L.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o efeito da energia de soldagem na microestrutura e corrosão no aço inoxidável austenítico AISI 316L.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar a microestrutura dos cordões de solda das amostras soldadas.
- Analisar a resistência de corrosão por polarização das amostras.
- Estudar a correlação entre a microestrutura e a resistência à corrosão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O aço AISI 316L dentre os diversos tipos de aços da classe austenítica, se destaca por ser o mais resistente a corrosão e apresenta boas propriedades mecânicas tanto em baixa quanto em alta temperatura e apresenta a seguinte composição química, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química (% em peso) dos aços inoxidáveis AISI 316L.

С	Mn	Si	Р	S	Cr	Ni	Мо	Cu	Ν
0.0126	1.37	0.443	0.0343	0.0016	16.67	9.91	1.96	0.931	0.0467

Fonte: Tecnol. Metal. Mater. Miner, 2018.

A exposição do aço AISI 316L a altas temperaturas por extensos períodos pode resultar na formação de muitas fases deletérias, entre elas a fase sigma, é encontrada nesses aços após aproximadamente 100 horas a 800°C, onde se nucleia nos contornos de grãos (SOUZA, 2017).

Os elementos químicos como o manganês, aumentam a solubilidade do nitrogênio na matriz em altas temperaturas, diminuindo a probabilidade de formação de nitretos durante o processo de soldagem e tratamentos térmicos. A iniciação de corrosão localizada é influenciada pela formação de sulfeto de manganês (FREDRIKSSON et al., 2010).

O molibdênio aumenta a resistência mecânica, reduz a sensibilidade ao trincamento durante a soldagem e aumenta a qualidade da camada passivada, a resistência em meios ácidos e a corrosão localizada e profunda, além de melhorar a ductilidade do material (HALAMOVÁ et al., 2014).

David em 1981 realizou a solda multipasse no aço austenítico 308 e obteve quatro tipos de ferrita na microestrutura como mostrado da Figura 1.

Figura 1 - Micrografias compostas tridimensionais de várias morfologias de ferrita na solda multipasse de aço inoxidável Tipo 308: A - tipo I, vermicular; B - tipo II, rendado; C - tipo III, acicular; e D - tipo IV, globular.



Fonte: David 1981.

3.1 Resistência mecânica

A redução do teor de carbono do aço AISI 316L quando comparado com o AISI 316, implica na redução das propriedades mecânicas, aumenta a soldabilidade, reduz a tensão limite de escoamento e a tensão limite de resistência mecânica (SOUZA, 2017).

Tipo	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento mínimo na direção longitudinal (%)	Alongamento mínimo na direção transversal (%)
316	205	515	35	25
316L	170	485	35	25

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos aços 316 e 316L.

Fonte: ASTM A 312/A 312M - 17.

As propriedades mecânicas mais elevadas destes aços são reveladas na zona afetada pelo calor, identificadas por meios de medições das propriedades mecânicas (MOLAK et al, 2009; AMUDARASAN et al, 2013).

3.2 Corrosão

3.2.1 Corrosão por pite

A corrosão por pite é uma dissolução localizada acelerada de metais onde ocorre em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica, formando cavidades na superfície da peça. Geralmente ocorre em meios com elevada concentração de cloretos e atmosferas marinhas. Nos aços inoxidáveis austeníticos, as inserções de sulfetos e a ferrita apresentam-se como locais favoráveis à nucleação dos pites. As zonas ao redor dos precipitados, empobrecidas de molibdênio e cromo são locais propícios para a corrosão por pites também (HIGA, 2011).

A corrosão por pite se inicia pela quebra da película passiva em regiões onde apresenta defeitos com inclusões, discordâncias, contornos de grãos ou interfaces (SOLOMON,1982). Um fator que afeta esta corrosão é a relação entre pequena área do ânodo e grande área do cátodo. Quanto maior o número de pites ou quanto maior os pites sobre a superfície, menor será a velocidade de penetração. Isto ocorre porque pites adjacente têm que partilhar o mesmo cátodo disponível, reduzindo, portanto, a corrente disponível para o crescimento de cada pite (DEVINE, 1979).

O potencial por pite pode ser determinado através de técnicas de polarização eletroquímica, sendo as mais utilizadas às técnicas potenciodinâmica (polarização anódica) e a técnica potenciostática (HIGA, 2011).

3.2.2 Corrosão intergranular

Os aços inoxidáveis austeníticos, devidos a sua alta resistência a corrosão, são expostos a meios altamente agressivos e condições de trabalho em temperaturas elevadas. Quando estes aços são expostos em temperaturas entre 400 e 900°C por um determinado tempo em meios contendo cloretos, estão sujeitos a sensitização, onde há imigração do cromo na matriz para os contornos dos grãos formando os carbonetos de cromo Cr23C6, causando regiões empobrecidas em cromo em regiões adjacentes aos contornos do grão, conforme Figura 2. Portanto estas regiões ficam com a resistência a corrosão extremamente deterioradas tornando o material disposto á corrosão intergranular em certos meios (PALÁCIO, 2008).





Fonte: SEDRIKS, 1996.

No processo de soldagem as zonas termicamente afetadas (ZTA) estão susceptíveis a este tipo de corrosão, o material fica na faixa de temperatura crítica de sensitização (400 a 900°C). Possui, então, a destruição da passividade do aço nessa região próximo ao contorno de grão, com resultante formação de uma pilha ativa-passiva, onde os grãos resultam áreas catódicas

relativamente grandes em relação às pequenas áreas anódicas que são os contornos dos grãos (GENTIL, 1996).

Para se evitar a corrosão intergranular, podem-se adotar algumas medidas como: reduzir o teor de carbono para valores inferiores a 0.03%, fazendo com que o a formação de carboneto seja minimizada, submeter o material a um tratamento térmico de solubilização, onde todas as partículas de carboneto de cromo são dissolvidas em altas temperaturas (CALLISTER, 2008).

Devido ao baixo teor de carbono do AISI 316L, reduz o risco de corrosão intergranular em processo de soldagem, pois haverá menos carbono para se juntar com o cromo e precipitar (INTERLLOY, 2011).

3.3 Técnicas eletroquímicas

Para os aços inoxidáveis austeníticos estão especificados os ensaios para caracterizar a sensitetização e a corrosão intergranular na norma ASTM A262 (American Society for Testingand Materials), na sua maioria se baseiam na imersão de pequenos corpos de prova em soluções ácidas aquecidas. Seguidamente é feita a determinação o grau de sensitização (GDS) por perda de peso por unidade de área ou por dobramento do corpo de prova e verificação de fissuras (PALÁCIO, 2008).

Os métodos eletroquímicos foram desenvolvidos e ou adaptados para a determinação da susceptibilidade dos aços inoxidáveis à corrosão intergranular, entre elas são: levantamento de curvas de polarização anódica e técnica de reativação eletroquímica potenciodinâmica. (ZANETIC e FALLEIROS, 2001).

A técnica de reativação eletroquímica EPR (potenciodinâmica Electrochemical Potentiokinetic Reactivation). Tem-se duas variações mais utilizadas, a de ciclo simples (single loop) e a de ciclo duplo (double loop) (DL-EPR) (PALACIO, 2011)

O método Electrochemical Potentiokinetic Reactivation Method (EPR), é um método quantitativo para medir o grau de sensitização em componentes

soldados, podendo se fazer teste rápido em campo, sendo eles, não destrutivos (CÍHAL, 2000).

3.3.1 Ensaio de ciclo duplo (DL-EPR)

O teste de duplo ciclo é uma curva cíclica composta por uma curva anódica seguida de uma verificação reversa (PALÁCIO, 2011).

A partir do potencial de corrosão o ensaio de DL-EPR consiste em polarizar a amostra anodicamente, até um potencial onde o material encontra-se passivo. Só então este potencial começa-se a varredura reversa até que o potencial de corrosão seja novamente atingido (PALÁCIO, 2011).

A Figura 3 apresenta um desenho esquemático do ensaio. O grau de sensitização (GDS) é medido pela determinação da razão da máxima corrente gerada pela varredura de reativação e a máxima corrente anódica, Ir/Ia. A composição da solução, temperatura de teste e a taxa de varredura são iguais ao do teste Ciclo Simples EPR (PALÁCIO, 2008).

Figura 3 - Esquema da curva de polarização do ensaio DL-EPR em um material sensitizado.



Fonte: adaptado de AYDOĞDU E AYDINOL, 2006.

Tem-se utilizado nos ensaios a solução 0,50 M H_2SO_4 +0,001M KSCN a 30°C como eletrólito e o valor de 1,67 mV.s-1 como velocidade de varredura. (ZANETTIC E FALLEIROS, 2001).

O grau de sensitização conforme estudos de MAJIDI E STREICHER (1984) é calculado pela razão entre os dois picos de corrente através da Equação 1:

$$GDS = \frac{Ir}{Ia}$$
(1)

Onde:

Ir = *pico de corrente reversa*;

Ia = *pico de corrente anódica*.

3.4 Caracterização de Juntas soldadas com aço 316L em processo GTAW

TSENG E SUNG (2011) estudaram os efeitos dos parâmetros da corrente pulsada na soldagem com processo GTAW de aço inoxidável 316L.

Uma soldagem TIG autógena com um sistema de controle mecânico foi conduzida nos espécimes para produzir uma solda de cordão na chapa. A amostra de teste estava livre de restrições durante a soldagem para evitar a influência do estresse da reação.

A tensão foi determinada usando o método de strain gag e de perfuração indicado na norma ASTM E837.

Os resultados indicaram que a soldagem TIG de corrente contínua tem uma maior zona de tensão residual do que com a soldagem TIG com corrente pulsada. De acordo com os estudos de MASUBUCHI (1980), a quantidade de calor de entrada é o fator mais significativo que afeta a zona de tensão residual detração da soldagem, que pode ser estendido com aumento de entrada de calor por unidade de comprimento de soldas. Como resultado, o menor residual de tração.

TSENG E SUNG (2011) constataram que o aumento da frequência de pulso, a diminuição do espaçamento do pulso, o aumento da razão entre as correntes de base e de pico e o aumento da razão entre a duração das correntes de base

e de pico podem reduzir a distorção angular e a tensão residual, além de aumentar a razão entre profundidade e largura do cordão de solda e reduzir a zona termicamente afetada (SOUZA, 2017).

BARROS (2014), estudou a união de aços inoxidáveis ferrítico AISI 444 e o aço austenítico AISI 316L à soldagem TIG autógeno com corrente pulsada. Avaliou os parâmetros operacionais, como pulsação da corrente de energia de soldagem sobre a microestrutura obtida, bem como as propriedades mecânicas.

Realizou os ensaios de microdureza a fim de obter valores de microdureza das amostras, foi realizada uma varredura que percorreu uma linha única em toda seção transversal, com espaçamento entre as medições de 0,2 mm e carga de 100 gf durante 15 segundos, também como os ensaios de tração e o ensaio de dobramento.

Figura 4 – Ataque HNO₃ - a) Macrografia da seção transversal; b) Microestrutura predominantemente vermicular; c) Microestruturas da interface entre a zona fundida e a ZAC, apresentando ferrita vermicular e ferrita δ, respectivamente; d) Microestrutura da ZAC apresentando ferrita δ; e) Microestrutura predominantemente acicular.



Fonte: BARROS, 2014.

BARROS (2014) obteve como um dos resultados, com soldagem dissimilar utilizando o seu parâmetro 1, a presença de três morfologias distintas, ferrita tipo acicular, vermicular e lathy, sendo esta última em menor proporção.

A zona fundida, bem como as demais regiões, pode ser observada na Figura 4. A solidificação da referida amostra resultou numa microestrutura com estrutura vermicular, inicialmente, evoluindo para uma microestrutura com morfologia acicular na parte central, conforme apresentado na Figura 4 (a). Através das Figuras 4 (b) e 4 (e) é possível observar a presença das morfologias vermicular e acicular, respectivamente.

A utilização de frequências de pulsação mais elevadas, por sua vez, dificultou a obtenção de cordões de solda com acabamento superficial sem defeitos.

A soldagem utilizando corrente pulsada possibilitou obter uma diminuição do tamanho dos grãos da zona fundida e na ZAC das amostras similares do aço inoxidável ferrítico AISI 444 e dissimilares, igualmente a transformação da ferrita em austenita. A escolha dos parâmetros utilizados possibilitou também igualar a microestrutura da zona fundida descendente da união de materiais diferentes, influenciando diretamente no aumento das propriedades mecânicas.

SOUZA (2017) verificou a caracterização das propriedades mecânicas e o estudo das tensões residuais de juntas de aço inoxidável austenítico AISI 316L soldadas pelo processo GTAW, com corrente contínua pulsada. As juntas soldadas foram analisadas em três condições: como soldada, com tratamento mecânico de *shot peening* e com tratamento térmico de solubilização a 1050 °C. Os resultados mostraram o tratamento térmico de solubilização do material provocou uma redução de 80 % do teor de ferrita-δ, além do aumento de 20 % na microdureza do metal de solda e redução de 5 % no limite de resistência mecânica da junta soldada tratados termicamente em comparação à condição como soldada. A diminuição da velocidade de soldagem aumentou a magnitude das tensões residuais transversais no metal de solda, tanto na face quanto na raiz das juntas.

PALÁCIO em 2008, determinou o Grau de Sensitização do aço inoxidável austenítico após tratamento isotérmico a 650°C durante diferentes tempos de

tratamento, utilizando a técnica eletroquímica de reativação potenciodinâmica pelo método Ciclo Duplo EPR (DL-EPR)). Foi feito três tratamentos térmicos no aço inoxidável AISI 304 com o intuito de provocar o fenômeno do Grau de Sensitização. Utilizou-se uma amostra como recebida para referenciar.

Para se avaliar a corrosão intergranular do aço AISI 304 foi seguido os seguintes procedimentos experimentais:

- Tratamentos Térmicos;
- Preparação dos corpos-de-prova;
- Prática da norma ASTM G108;
- Levantamento das curvas de polarização potenciodinâmicas pelo método DL-EPR;
- Análises em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

PALÁCIO (2008) obteve como resultado a presença de carbonetos dissolvidos por toda matriz em umas das suas amostras. Pode ser observado na Figura 5 a) e b) os carbonetos de cromos estão em formas de pontos pretos.

Figura 5 - Micrografia Ótica da amostra solubilizada 1040°C (A0), mostrando os carbonetos dissolvidos na matriz: **a)** ampliação em 200X e **b)** ampliação em 500X





Fonte: PALACIO, 2008.

PALACIO (2008) observou através do ensaio de polarização como apresentado na Figura 6 em uma das suas amostras, que não apresentou nenhuma corrente de reativação Ir, sendo assim não apresentou nenhum sinal de sensitização. O que era esperado, esta amostra apresentar GDS muito baixo e pôde ser desconsiderado.





Fonte: PALÁCIO, 2008.

A amostra tratada termicamente às 3h foi a que apresentou o maior grau de sensitização. Outra amostra que foi submetida a um tratamento em um tempo de 5h, não foi possível se determinar o grau de sensitização, pois esta apresentou uma maior degradação.

COMETTI (2012), avaliou o efeito na variação de frequência de soldagem por TIG pulsado no grau de sensitização no aço austenítico AISI 316L através do método de reativação eletroquímica potenciodinâmica na versão ciclo duplo -DL-EPR.

Para avaliar a corrosão intergranular do aço AISI 316L foi feito o seguinte procedimento experimental.

1- Soldagem por TIG pulsada;

2- Preparação dos corpos de prova;

 Levantamento das curvas de polarização potenciodinâmicas pelo método DL-EPR;

4- Análise da microestrutura ótica das amostras após os testes;

COMETTI (2012), observou o material soldado nos seus devidos parâmetros determinados, pelo ensaio de DL- EPR como representados nas Figuras 7, 8, 9 e 10, que o grau de sensitização foi zero. Esperava-se que o material apresentasse sensitização devido à soldagem. Contudo, uma possível justificativa para tal fato é o baixo teor de carbono do material estudado. A precipitação de carbonetos de cromo foi irrisória e consequentemente o material não sofreu sensitização.



Figura 7 - Amostra serie A1, teste 1.

Fonte: COMETTI, 2012.

Figura 8 - Amostra serie D2, teste 1.



Fonte: COMETTI, 2012.



Figura 9 - Amostra serie 3, teste 1.

Fonte: COMETTI, 2012.



Figura 10 - Amostra serie 5, teste 1.

Fonte: COMETTI, 2012.

COMETTI (2012) observou na Figura 11 a região da zona fundida (ZF) acima e a zona termicamente afetada (ZTA) abaixo. Na ZTA obteve os grãos mais definidos já na ZF uma estrutura mais homogênea devido ao maior aporte térmico da soldagem. Os grãos diminuíram de tamanho. Pela imagem concluiu que não há indícios de precipitação de carbonetos de cromo.



Figura 11 - Micrografia Ótica da amostra D2, comparação ZF e ZTA.

Fonte: COMETTI, 2012.

COMETTI (2012) concluiu pelos resultados que nenhuma das séries estudadas apresentou grau de sensitização.

4 METODOLOGIA

4.1 Material

O material utilizado foi o aço inoxidável Austenítico 316L, adquirido através do fornecedor da Aperam, com composição química (% em peso) descrita na Tabela 2, de acordo com o catalogo:

Tabela 2 - Composição química de acordo com o catalogo da Amperam (% em peso)

С	Mn	Si	Р	S	Cr	Ni	Мо	Ν
0,03	2,00	0,75	0,045	0,015	16,00	10,00	2,00	0,10

Fonte: Amperam, 2016.

4.2 Soldagem

Na forma de chapas laminada com 72 mm comprimento, largura 48 mm e espessura de 0,8 mm. Foram 9 corpos de prova formados, fundidos através do processo GTAW, com cordão de solda sem metal de adição e Argônio como gás inerte, com uma vazão de aproximadamente 15 l/min. A distância entre o eletrodo de Tungstênio e a chapa soldada foi de 3 mm. Devido à espessura das amostras, a solda foi feita sem chanfro, de acordo com o desenho esquemático mostrado na Figura 12.



Fonte: AUTORES, 2019.

4.2.1 Parâmetros de Soldagem

A soldagem foi realizada com o equipamento Eutectic Castolin, pelo profissional que possui suas devidas qualificações, conforme a AWS D1.1/D1.1M:2010, 4.16. Três níveis de energia de soldagem (J/mm) foram utilizados para produção dos cordões, como é apresentado na Tabela 3.

Amostras		Corrente média	Velocidade de	Energia de Soldagem
		(A)	soldagem (mm/s)	Experimental (J/mm)
	A1	52	1,8 ± 0,1	323,66
	D3	52	$1,8 \pm 0,1$	328,4
	D5	64,05	$1,8 \pm 0,1$	390

Fonte: AUTORES, 2019.

4.3 Metalografia

As amostras foram cortadas com 2 cm x 2 cm de dimensão, posteriormente colocadas em uma prensa térmica da marca Arotec de modelo PRE–30S, mostrado na Figura 13. Envolvendo-as com um termoplástico para melhor manuseio, as amostras foram lixadas e polidas utilizando uma politriz também da Arotec de modelo APL-2, mostrado na Figura 14.

A análise da microestrutura foi realizada através do microscópio Tension, como é apresentado na Figura 15, e todos os equipamentos utilizados localizados na instituição FAACZ.

Figura 13 - Arotec modelo PRE - 30S



Fonte: AUTORES, 2019.

Figura 14 - Politriz Arotec de modelo APL-2



Fonte: AUTORES, 2019.

Figura 15 - Microscópio Tension



Fonte: AUTORES, 2019.

4.4 Ensaios de corrosão

4.4.1 Preparação da amostra

As amostras foram furadas no lado oposto da face fixada para análise da microestrutura, para ter contato das duas faces da chapa, com isso foi colocada fio de cobre e fixada com resina epóxi, para não ter influência nos resultados. Com isso foram lixadas com lixas de granulometria N°600.

4.4.2 Levantamento das curvas de polarização potenciodinâmicas pelo método duplo ciclo EPR (DL-EPR)

Os ensaios eletroquímicos DL-EPR foram realizados em um Potenciostato / Galvanostato Digital Autolab, modelo PGSTAT 302N, conforme Figura 16. O software utilizado foi Nova 1.8.



Figura 16 - Potenciostato PGSTAT 302N Autolab.

Fonte: AUTORES, 2019.

Para avaliar o grau de sensitização e consequentemente a corrosão intergranular, foi realizado 0 ensaio de reativação eletroquímica potenciodinâmica, na versão ciclo duplo (DL-EPR). Utilizou-se um Potenciostato Digital Autolab do modelo PGSTAT 302N do Laboratório de química, do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) de Aracruz, representado na Figura 16. O sistema opera com três eletrodos, o eletrodo de trabalho (corpo-de-prova), um eletrodo de referência (eletrodo de calomelano saturado, SCE) e um contra eletrodo (eletrodo de platina). A corrente imposta pelo Potenciostato circula entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de platina. A Figura 17 enfatiza o funcionamento do conjunto Potenciostato, célula e computador.





Fonte: ZANETIC e FALLEIROS, 2001.

De acordo com Palácio, 2011, o ensaio tem ao menos duas repetições em cada amostra. Foram utilizados 300 ml de solução aerada de forma natural de 2 M H2SO4 + 0,01 M KSCN, em temperatura ambiente (25±2°C). Após o linchamento utilizarão esmalte para delimitar a área do ensaio em aproximadamente de 0,2 cm², onde a área ensaiada foi apenas a do cordão de solda. Foi determinado o potencial de corrosão no tempo de trinta minutos (que

é a determinação do OCP do software Nova 1.8). A partir do potencial de corrosão o corpo-de-prova foi polarizado anodicamente, até o potencial de 0,2 V onde o material se encontra passivado. Tal processo é chamado de ativação. Depois de chegado ao potencial de 0,2 V o potencial foi diminuído até o potencial de corrosão novamente completando o ciclo. Esta diminuição do potencial até o potencial de corrosão é chamada de reativação. Tanto na ativação quanto na reativação a taxa de varredura utilizada de 1 mV.s-1. Depois foi gerado um gráfico da corrente (A) X potencial (V) feito pelo próprio software (Nova 1.8). Posteriormente foi medido o grau de sensitização (GDS) de cada amostra dado pela razão entre a corrente de reativação máxima Ir e a corrente de ativação (anódica) máxima la equação a seguir:

$$GDS = \frac{Ir}{Ia}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Microscopia Óptica

A microestrutura do aço inoxidável 316L é constituída por grãos de austenita, como pode ser observado na Figura 18. Isento de transformações significativas em sua microestrutura, o metal de base mantém as características originais.

Figura 18 - Amostra de referência

Fonte: AUTORES, 2019.

Com a análise, revelou que a soldagem do aço inoxidável austenitico 316L resultou em uma solidificação de ferrita, variando entre ferrita vermicular, acicular, globular e lacy.

De acordo com BARROS (2014), quando ocorre a completa solidificação do material, outras transformações ocorrem devido ao resfriamento à temperatura ambiente, formando um microestrutura composta de ferrita e austenita, está manifestação também pode ocorrer devido à pequenas variações na

composição química do material, como mostrado na Figura 19, uma morfologia semelhante aos resultados obtidos neste trabalho, apesar das semelhanças, os parâmetros de variações e dimensionamento das amostras são diferentes, contudo essas características se aplica ao material de estudo, aço inoxidável austenitico 316L.

Figura 19 - Ferrita acicular presente na zona fundida das amostras similares do aço inoxidável austenítico 316L.



Fonte: BARROS, 2014.

5.1.1 Caracterização da amostra série A1

Após realizado a soldagem do aço inoxidável 316L, de acordo com os parâmetros da Tabela 3, possibilitou verificar a manifestação de quatro morfologias distintas, sendo elas, ferrita globular, ferrita acicular, lacy e vermicular, que podem ser observadas na Figura 20, de acordo com os resultados obtidos por BARROS (2014). A região da zona fundida representada na Figura 20, mostra a distribuição morfológica, onde a concentração de ferrita vermicular mais acentuada.

Figura 20 - Amostra A1: a) Microestrutura apresentando morfologia de ferrita globular
 b) Microestrutura apresentando morfologia de ferrita acicular c) Microestrutura apresentando morfologia de ferrita lacy d) Microestrutura apresentando morfologia de ferrita vermicular



Fonte: AUTORES, 2019.

5.1.2 Caracterização da amostra série D3

De modo semelhante a amostra A1, a zona fundida, cuja os parâmetros representados na Tabela 3, possibilitou verificar a manifestação das quatro morfologias, ferrita globular, ferrita acicular, lacy e vermicular. A região da zona fundida representada na Figura 21, mostra a distribuição morfológica, onde a ferrita vermicular é mais concentrada em relação a amostra A1.

Figura 21 - Amostra série D3 - **a**) Microestrutura apresentando morfologia de ferrita lacy **b**) Microestrutura apresentando morfologia de ferrita globular **c**) Microestrutura apresentando morfologia de ferrita acicular **d**) Microestrutura apresentando morfologia de ferrita vermicular.

Fonte: AUTORES, 2019.

5.1.3 Caracterização da amostra série D5

Conforme anteriormente, a zona fundida, cuja os parâmetros representados na Tabela 3, possibilitou verificar a manifestação das quatro morfologias, ferrita globular, ferrita acicular, lacy e vermicular. A região da zona fundida representada na Figura 22 mostra a distribuição morfológica, onde a ferrita vermicular é mais concentrada em relação as amostras A1 e D2.

Figura 22 - Amostra série D5 - a) Microestrutura apresentando morfologia de ferrita vermicular b) Microestrutura apresentando morfologia de ferrita acicular c)
 Microestrutura apresentando morfologia de ferrita lacy d) Microestrutura apresentando



Fonte: AUTORES, 2019.

A semelhança microestrutural das amostras D2 e D3 ocorrem devido à baixa diferença do aporte térmico aplicado no processo de soldagem.

Na amostra D5 apesar do surgimento das 4 morfologias, a quantidade de ferrita vermicular precipitada é maior devido ao seu aporte térmico ser mais elevado do que as amostras D2 e D3.

5.2 Ensaios de corrosão pelo método DL-EPR

A Figura 23 ilustra o ensaio DL-EPR do material como recebido (CR) em solução 2 M H2SO4 + 0,01 M KSCN. De acordo com COMETTI (2012), o material não apresentou sensitização, pois não sofreu nenhum tipo de aporte térmico como a soldagem.



Figura 23 - Amostra como recebido.

5.2.1 Amostra série A1

A Figura 24 apresenta o ensaio da amostra da série A1 pelo método DL- EPR em solução 2 M H2SO4 + 0,01 M KSCN com taxa de 1mV. s-1. De acordo com Majidi e Streicher, aonde taxas de corrente (Ir/Ia) com valores menores que 0,001 indicam uma estrutura "step" isenta de precipitados nos contornos de grãos. Taxas entre 0,001 e 0,05 indicam uma estrutura do tipo "dual", na qual alguns precipitados são observados, mas não circundam completamente o grão. Para taxas maiores que 0,05 correspondem a uma estrutura "ditches", com grãos completamente circundados por carbonetos de cromo, relação está aplicada para aços inoxidáveis austeníticos. Como é possível notar na Figura 24, o grau de sensitização GDS=0,00097 corresponde a estrutura step.

Fonte: AUTORES, 2019.



Figura 24 - Amostra série A1

5.2.2 Amostra série D3

De acordo com o gráfico da Figura 25, observa-se um grau de sensitização GDS=0,0102, soldados com os parâmetros da Tabela 3. Apresenta estrutura dual de acordo com as taxas de correntes (Ir/Ia) apresentada por MAJIDI E STREICHER (1984) na justificativa da série A1. A Figura 26 foi estudado por COMETTI (2012), quão tal apresentou o grau de sensitização zero, com justificativa baseada por INTERLLOY (2011), ou seja, o baixo teor de carbono reduz o risco de corrosão intergranular em processo de soldagem, pois, haverá menos carbono para acumular com o cromo e precipitar. Deste modo, a precipitação de cromo foi irrisória e como resultado o material não sofreu sensitização.

Fonte: AUTORES, 2019.



Figura 25 - Amostra série D3

Figura 26 - Amostra serie 3, teste 1.



Fonte: COMETTI, 2012.

Fonte: AUTORES, 2019.

5.2.3 Amostra série D5

De acordo com o gráfico da Figura 27, observa-se um grau de sensitização GDS= 0,000421, soldados, de acordo com a Tabela 3, apresenta estrutura step de acordo com as taxas de correntes (Ir/Ia) apresentada por MAJIDI E STREICHER (1984) na justificativa da séria A1.

Mesmo com o aumento da energia de soldagem a amostra da série D5 não sofreu sensitização.





Fonte: AUTORES, 2019.

6 CONCLUSÃO

Com a análise das curvas de polarização e microestrutura das amostras, conclui-se que, apesar da precipitação de várias morfologias de ferrita após o resfriamento das amostras, não houve precipitação de carbonetos de cromo.

Notou-se que a amostra D5, por possuir maior aporte térmico, fez com que houvesse mais precipitação de ferrita, porém não ouve influencia na sensitização da amostra.

Contudo, o aumento da energia de soldagem e a precipitação de ferrita, não influenciou na resistência a corrosão das amostras, tal resultado, ocorreu decorrente das características do material estudado (aço 316L), por possuir um baixo teor de carbono e um alto teor de cromo, formando uma camada protetora, no qual haverá menos carbono para se juntar ao cromo, evitando a precipitação e reduzindo os riscos de corrosão intergranular.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Alterar a energia de soldagem para verificar se irá influenciar nos resultados ou serão os mesmos.
- Realizar uma análise de corrosão por pite no aço 316L.
- Realizar o ensaio de tração.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMPERAM, 2016. Disponível em < www.brasil.aperam.com/produtos/acoinox/inox-na-industria/tubos>.

ASTM A312 / A3120M-17. Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes. ASTM International, 2017.

BARROS, I.F. Soldagem dissimilar do aço inoxidável ferrítico AISI 444 e do aço inoxidável austenítico AISI 316L por meio do processo TIG autógena utilizando corrente pulsada. Dissertação(Mestrado). Universidade federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

CALLISTER, W. D. Jr. - Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução, Rio de Janeiro, 2008.

CÍHAL, V. On the development of the electrochemical potentiokinetic method, Electrochemical Acta, 2000.

COMETTI, V. F. Efeito na variação de frequência de soldagem por TIG pulsado no grau de sensitização no aço austenítico 316L. Trabalho de conclusão de curso. Universidade federal do Espirito Santo, Vitória, 2012.

DAVID, S. A. Ferrite morphology and variations in ferrite content in austenitic stainless steel welds. Welding Journal, v. 60, pp. 63 – 71, 1981.

DEMARQUE, R., SANTOS, E. P., SILVA, L. M., QUEIROZ, A. V., CASTRO,
J. A., SILVA, R.S. Avaliação do efeito do ciclo térmico sobre as características de juntas soldadas através da variação do aporte térmico em juntas soldadas dos aços autenísticos aisi 316l pelo processo GMAW.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica – PPGEM,
Universidade Federal Fluminense – UFF, Volta Redonda/ RJ, 2018

DEVINE, T. M. Mechanism of Intergranular Corrosion and Pitting Corrosion of Austenitic and Duplex 308 Stainlees Steel. Journalofthe Electrochemical Society, 1979.

FERREIRA, W. E. I. Influência dos parâmetros de soldagem na sensitização de juntas soldadas em aço inoxidável austenítico AISI 316 soldadas pelo processo TIG. São Luís, 2008.

FREDRIKSON, W.; EDSTROM, K.; OLSSON, C.O.A. "XPS analysis of manganese in stainless steel passive films on 1.4432 and the lean duplex 1.4162", Corrosion science, vol. 52, 2010.

GENTIL, V.; **Corrosão,** Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 3^a Ed., UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.

GENTIL, V.; **Corrosão,** Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 6^a Ed., UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

HALAMOVÁ, M.; ALASKARI, A.; LIPTÁKOVA, T. Corrosion resistance of the welded AISI 316L after various surface treatments, Materials Engineering, vol. 21, 2014.

HIGA. S.M. Avaliação da corrosão intergranular de aços inoxidáveis por meio de normas e de ensaios eletroquímicos em altos potenciais. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de são Carlos, Programa de Pós Graduação, São Carlos, 2011.

INTERLLOY Pty Ltd. 316L austenitic stainless steel bar. Austrália, 2011.

INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION, 2017. Disponível em: <www.grandesconstrucoes.com.br/Materias/Exibir/brasil-perde-4-do-pib-com-corrosao>

JÚNIOR, M. W. Nitretação a plasma do aço ABNT 316L em baixas temperaturas. Porto Alegre, 2002.

MAJIDI, A. Z; STREICHER, M. A. The Double Loop Reactivation Method, 1984.

MASUBUCHI. **Análise de Estruturas Soldadas** (Pergamon Press, Oxford 1980).

MOLAK, R. M.; PARADOWSKI, K.; BRYNK, T.; CIUPINSKI, L. PAKIELA, Z.; KURZYDLOWSKI, K. J. **Measurement of mechanical properties in a 316L stainless steel welded joints**. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 86, 2009.

PALÁCIO F. O. Efeito do tratamento térmico no Grau de Sensitização do aço Inoxidável Austenítico AISI 304, avaliado por método de reativação eletroquímica potenciodinâmica na versão ciclo duplo (DL-EPR). Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

PALACIO, F. O. Estudo do efeito de parâmetros do processo GTAW pulsado na resistência à corrosão intergranular e por pite do aço inoxidável duplex UNS S32304. Vitória, 2011.

SEDRIKS, A. J., Corrosion of Stainless Steels, 1996.

SOLOMON, H. D. DEVINE Jr. T. M. **Duplex stainlees steels – a tale of two phases**. In: Duplex stainlees steels- conference proceeding. ASM Metals Park: Ohio 1982 p.693-756.

SOUZA, F.T. Estudo das propriedades mecânicas e tensões residuais de juntas soldadas de aço AISI 316L.Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós Graduação, Niterói, 2017. SOUZA, M. F. Estudo das propriedades mecânicas e tensões residuais de juntas soldadas de aço AISI 316L. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

TSENG, K.H.; SUNG, H.L. Evaluation study on angular distortion and residual stress of stainless steel pulsed TIG weldment, Advanced Materials Research, 2011.

ZANETIC, S. T. FALLEIROS-ALONSO, N. Determinação do Grau de Sensitização de Aços Inoxidáveis Austeníticos pelo método DL-EPR. FATEC-SP, 2001.