

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Plano de Doutorado

**Estudo da microestrutura e do crescimento de trincas
por corrosão-fadiga em cordões de solda obtidos pelos
processos TIG e Laser no aço inoxidável austenítico
AISI 316L**

Aluna: Erica Marcelino Freitas de Souza Silva

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio R. P. Baptista

Lorena/SP, Junho de 2021.

RESUMO

Aços inoxidáveis austeníticos (AIA) representam o maior grupo de aços inoxidáveis (AI) em uso, perfazendo até 60-70% do total desta classe de aços, devido suas excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão. O AIA 316L normalmente é empregado em ambiente contendo cloreto, em razão de sua maior capacidade de resistir à corrosão da água do mar. Porém, a exposição do material a esse ambiente causa a formação de pites de corrosão, que agem como pontos concentradores de tensão, levando as juntas soldadas a sofrerem falhas por fadiga depois de certo tempo de operação. Soldas de AIA enfrentam problemas quando o assunto é propriedade de fadiga, fato que tem sido uma preocupação constante na engenharia. Assim, a realização de pesquisas visando o aprimoramento e avaliação comparativa das propriedades de fadiga de juntas soldadas se faz necessária. O presente plano de doutorado tem como objetivo avaliar comparativamente a taxa de propagação de trincas por corrosão-fadiga em cordões de solda do AIA 316L, soldados pelos processos TIG (*Tungsten-Inert Gas*) e LBW (*Laser Beam Welding*). Amostras nas condições como recebida e soldada serão avaliadas em ambiente neutro, bem como imersas em solução de NaCl a 3,5% e submetidas a ensaios de fadiga e tração. A caracterização será feita por teste de dureza Vickers, microscopias óptica e eletrônica de varredura, difração de raios-X e análises fractográficas. Tendo em vista o grande interesse em pesquisas que avaliem a influência da microestrutura na propagação de trincas por corrosão-fadiga em soldas da liga 316L, a presente proposta tem excelente potencial de impacto científico e tecnológico, contribuindo para a garantia da integridade de componentes estruturais.

I- Introdução e Justificativas

I.1 – Considerações gerais: Qualificação do problema e motivações

Os aços inoxidáveis (AI) se destacam e assumem uma importância estratégica ao atenderem às exigências requeridas pelo avanço industrial, especialmente os aços inoxidáveis austeníticos (AIA) que representam o maior grupo de aços inoxidáveis em uso, perfazendo até 60 a 70 % do total desses materiais. Devido às suas excelentes propriedades mecânicas, além de alto nível de conformabilidade, soldabilidade e resistência à corrosão (AL-HAIDARY; WAHAB; SALAM, 2006, p.) (XU et al., 2020), esses aços são extensivamente utilizados nas indústrias química, petroquímica, nuclear e em diversos ambientes corrosivos (PRASAD; RAO; RAO, 2014) como setores de petróleo e gás (onshore e offshore) (YAWAS; AKU; ALUKO, 2014), destacando-se o 316 e suas variações, como o 316L (ZATKALÍKOVÁ et al., 2010) conhecidos como AI de "grau marítimo" devido à sua maior capacidade de resistir à corrosão da água do mar (ZATKALÍKOVÁ ET AL., 2010) (SZKLARSKA-SMIALOWSKA, 2005).

A resistência à fadiga de materiais estruturais de engenharia, controlando a vida útil esperada de componentes, tem sido uma preocupação constante na engenharia moderna, particularmente para aços inoxidáveis austeníticos que, apesar de encontrarem extensa aplicabilidade devido à sua excelente resistência à corrosão (KRELLA; KRUPA, 2018); (BANSOD et al., 2019), sua utilização enfrenta problemas quando o assunto é propriedade de fadiga (HSU et al., 2013). A boa soldabilidade dos AIA é um importante critério de seleção para a aplicação em componentes soldados (XU et al., 2020), porém requer extenso conhecimento e compreensão do comportamento mecânico desses componentes, tendo em vista a ocorrência de falhas, sendo grande parte devido a fraturas causadas por fadiga (AL-HAIDARY; WAHAB; SALAM, 2006). Tais

falhas acontecem porque o processo de soldagem causa a formação de defeitos como heterogeneidades, microporosidade e precipitados, que agirão como pontos concentradores de tensões que afetam diretamente suas propriedades de fadiga (ZHU et al., 2017). Corroborando com essa afirmação, o trabalho de (AL-HAIDARY; WAHAB; SALAM, 2006) concluiu que a taxa de propagação de trincas por fadiga (TPTF) foi maior na zona termicamente afetada (ZTA) e Zona Fundida (ZF), comparado ao metal base (MB), por causa das modificações microestruturais causadas pelos processos de soldagem, assim como pelas distribuições e direções das tensões de tração residuais presentes nessas áreas.

Para além dos defeitos introduzidos pela soldagem, alterações provocadas pelo ambiente sob o qual o material soldado está exposto também precisam ser considerados conjuntamente, haja vista que as propriedades de corrosão e fadiga serão afetadas com mais severidade (MALHOTRA; SHAHI, 2020). Neste ponto, há de se dar atenção ao fato de que apesar dos AIA apresentarem elevada resistência à corrosão em muitos ambientes agressivos, para a operação em ambiente marinho, no qual há altas concentrações de cloretos como NaCl, MgCl₂ e CaCl₂, a corrosão por pites se torna particularmente um problema de fadiga (SZKLARSKA-SMIALOWSKA, 2005);(HASHIM et al., 2019). Logo, estando o material exposto a esse ambiente, a sinergia entre o efeito da corrosão e cargas cíclicas, favorece tanto a nucleação da trinca devido aos pites de corrosão, que se comportam como pontos concentradores de tensão (GUO et al., 2020), como também a propagação da trinca, resultando em uma taxa de crescimento mais alta, que levará à falha prematura da estrutura (MADDURI; PRAKASH, 2010).

Durante as três últimas décadas o estudo da fadiga associada à corrosão vem sendo abordado por muitos pesquisadores (ROKHLIN et al., 1999) ; (NOVÝ et al., 2013) ;(KLAPPER; MENENDEZ; JESSE, 2020) ; (MALHOTRA; SHAHI, 2020), assim como trabalhos avaliando o comportamento de crescimento de trincas por fadiga em ligas de aço inoxidável e suas soldas (MALHOTRA; SHAHI, 2019); (TANG et al., 2018). O uso do AIA 316 para aplicações críticas levaram a estudos no passado recente a avaliarem como a resistência à corrosão e propriedades de fadiga se tornaram a chave para a sua boa performance em serviço (MALHOTRA; SHAHI, (2020); (MAKHLOUF, 2015) (DAVIS, 2006). Porém, Ebara, (2010) relata que informações sobre o termo corrosão-fadiga e os mecanismos de iniciação de trinca ainda não são suficientes para aços inoxidáveis soldados, principalmente no que tange à iniciação e crescimento de trincas por corrosão-fadiga. Como a resistência à corrosão e fadiga do aço 316L se degrada em condições agressivas (HASHIM et al., 2019), trabalhos que visam avaliar conjuntamente esses fenômenos, ou seja, fadiga associada à corrosão, são de grande interesse científico e tecnológico. Pesquisas atuais de Hu et al., (2020); Zhang et al., (2020) Guizani; Tlill; Chafra, (2020) e Malhotra; Shahi, (2020), avaliaram a taxa de crescimento de trincas nas ligas 316 e 316L, porém esses estudos não analisaram a influência do meio na propagação de trinca por fadiga.

Com base nessas considerações, a motivação deste plano de doutorado está relacionada à obtenção de conhecimento científico a respeito do desempenho mecânico das microestruturas de cordões de solda resultantes de dois distintos métodos de soldagem e correlacioná-lo à taxa de propagação de trincas por corrosão-fadiga no AIA 316L. A presente aluna em seu trabalho de

mestrado, realizado na Universidade Federal Fluminense (UFF), trabalhou com solda TIG nesta mesma liga e realizou análise do comportamento mecânico e eletroquímico da microestrutura de solda e um dos objetivos do presente projeto é dar continuidade à análise mecânica, com enfoque nas propriedades de fadiga associada à corrosão.

Nessa investigação serão adotados métodos de soldagem: TIG (do inglês *Tungsten Inert Gas*), também conhecido como GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), e soldagem por feixe de laser, LBW (*Laser Beam Welding*). O primeiro método é perfeitamente adaptado e adequado para soldar seções finas de aços inoxidáveis e metais leves (SMITH, 2007). Devido à utilização de um gás inerte (argônio ou hélio) e um eletrodo de tungstênio não consumível é possível obter uma poça de fusão bem controlada, resultando em soldas de alta qualidade (BLONDEAU, 2008). O segundo processo de soldagem é um processo de alta densidade de potência que pode oferecer várias vantagens sobre outros processos convencionais, como a soldagem TIG. A LBW destaca-se por possuir controle preciso de energia, baixa distorção térmica, pequena zona termicamente afetada (ZTA), alta velocidade de soldagem, penetração profunda, além de conferir boas propriedades mecânicas (LI; EGHILIO; MARIMUTHU, 2011);(BUDDU et al., 2015) . A escolha dos dois processos de soldagem a serem utilizados nesse projeto, está embasada no fato de que ambos são adequados para a soldagem de aços inoxidáveis austeníticos ((YAN; GAO; ZENG, 2010) ; (LANDOWSKI et al., 2020) ; (SILVA, 2020) e sendo assim, considerando a eficiência e aplicabilidade dos citados processos à soldagem do aço AISI 316L, pretende-se avaliar qual das duas técnicas promoverá melhor balanço, distribuição e morfologia das fases presentes na microestrutura de solda, melhor

desempenho mecânico e por fim, qual das técnicas produzirá microestrutura mais resistente à propagação de trincas por corrosão-fadiga.

I.2. OBJETIVOS

A partir das considerações apresentadas no item I.1, o projeto em questão consiste nos seguintes objetivos:

I.2.1 Objetivos Gerais

A finalidade do presente projeto é realizar uma análise comparativa do comportamento em corrosão-fadiga das microestruturas de cordões de solda, gerados por duas diferentes técnicas de soldagem: TIG e LBW. Para tal análise pretende-se encontrar condições otimizadas (potência, distância focal, velocidade de avanço) visando promover condições favoráveis ao desenvolvimento dos processos de soldagem das chapas de 316L, a fim de assegurar o controle da entrada térmica para otimização de alterações metalúrgicas causadas pelos processos e assim, aplicar aportes térmicos favoráveis à obtenção de cordões de solda do tipo *bead-on-plate* com microestrutura sem alterações metalúrgicas deletérias.

I.2.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar os efeitos dos processos de soldagem TIG e LBW na microestrutura de cordões de solda *bead-on-plate*, empregando microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), microdureza Vickers e fração volumétrica de ferrita-delta, quantificada por análise de difração de raio X.

- b) Investigar, sob ambiente neutro, o comportamento dos cordões de solda quanto à propagação de trincas por fadiga, comparando-o ao do metal de base.
- c) Investigar sob ambiente agressivo (ensaio realizado sob imersão em solução de NaCl 3,5%) o comportamento dos cordões de solda, quanto à propagação de trincas por corrosão-fadiga.
- d) Realizar análises fractográficas dos corpos de prova ensaiados.

II- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1. Aço Inoxidável Austenítico 316L: microestrutura

Em 1909, Guillet publicou um estudo de um aço cromo-níquel que foi o precursor de classes de aços inoxidáveis austeníticos. E em 1913 a era dos aços inoxidáveis (AI) teve seu início efetivo, quando Englishman Brearly fundiu o primeiro lingote comercial tendo em composição 12,86% Cr, 0,24% de C, 0,2% Si , 0,44% Mn (LIPPOLD; KOTECKI, 2005a). Entre as classes de AI, a mais utilizada é a série 300, os aços inoxidáveis austeníticos (AIA). Normalmente contendo de 8 a 20% de Ni e 16-25% Cr, com ligeiras adições de Si; 0,02–0,08% C, 1,5% Mn e Mo, os austeníticos são bem-sucedidos em diversos ambientes corrosivos (PRASAD; RAO; RAO, 2014).

O AIA 316L, objeto deste projeto, apresenta em sua composição um teor máximo 0,03% de carbono, a fim de prevenir reações com o cromo que levam a sensitização e corrosão intergranular (CIG) (IORGA et al., 2014). Sua microestrutura é apresentada na Figura 1, na qual é possível observar os grãos poligonais de sua fase matriz, a austenita, assim como a presença de maclas de

recozimento, características típicas de uma estrutura cúbica de face centrada (CFC), bem como presença de pequenas bandas de ferrita- δ .

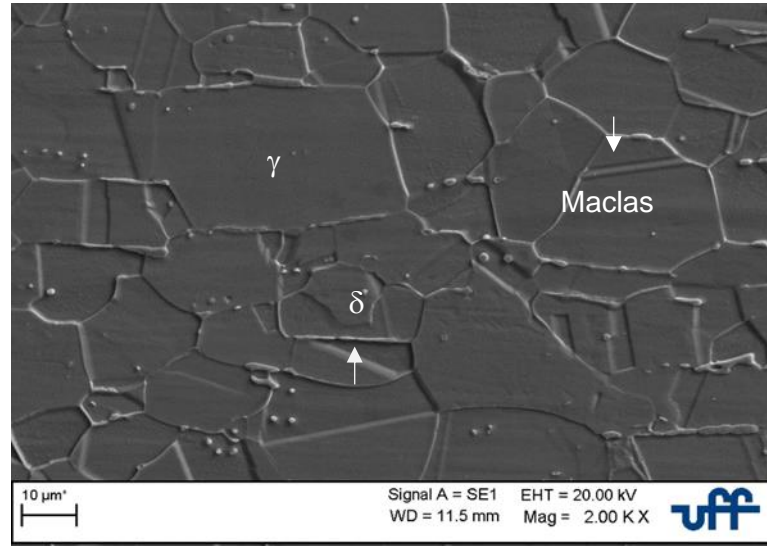


Figura 1: Microestrutura do MB do AIA 316L evidenciando grãos austeníticos, maclas e bandas de ferrita delta. (Silva, 2020)

Apesar de ter a fase austenita (γ) como estrutura estável, o 316L assim como o 304L, é representativo entre os AIA em apresentar a ferrita delta (δ) como fase primária (dependendo da composição química e taxa de resfriamento). A ferrita- δ é resultante da participação de elementos “promotores de ferrita”, especialmente o Cromo, durante a solidificação e processamento termomecânico (LIPPOLD; KOTECKI, 2005a). Em condições de equilíbrio de resfriamento, toda ferrita se transforma em austenita, porém sob condições de resfriamento rápido, ocorrido durante a soldagem, por exemplo, certa quantidade de ferrita- δ permanece retida no núcleo dos ramos dendríticos envolvida pela austenita (JANG et al., 2010), resultando em uma microestrutura final composta por duas fases ($\gamma + \delta$), sendo a austenita a estrutura estável (LIPPOLD; KOTECKI, 2005b);(TOPPO et al., 2018). Muitos trabalhos mostram essa

microestrutura austeno-ferrítica do 316L (JANG et al., 2010); (SILVA, 2020) (MALHOTRA; SHAHI, 2020). A Figura 2, extraída da dissertação de mestrado desta aluna (SILVA, 2020), apresenta a microestrutura da ZF do AIA 316L soldado por processo de soldagem TIG autógeno, mostrando estrutura dendrítica formada pela ferrita (fase preta) com morfologia *Lathy* e *Skeletal*, circundada pela matriz austenita ao fundo (fase clara). (OKAMOTO; KISHITAKE, 1975) afirmaram que o crescimento dendrítico é a forma mais comum encontrada em materiais fundidos.

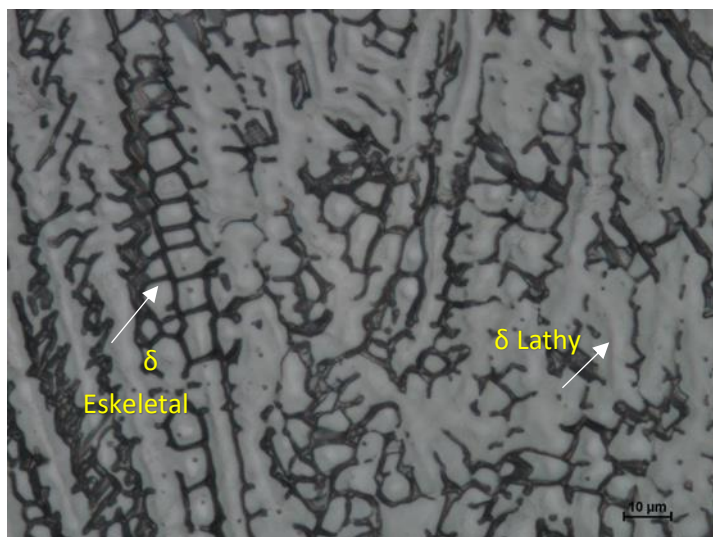


Figura 2: Microestrutura da ZF do AIA 316L evidenciando ferrita- δ na matriz austenítica.
Fonte: (Silva, 2020)

Embora a faixa de 5 a 10% de ferrita- δ seja desejável para prevenir trincas a quente (FANG; WU; ZHU, 1994), assim como para diminuir a taxa de crescimento de trincas na corrosão sob tensão (OGAWA; TSUNETOMI, 1979) (TIMOTHY R. L, 2008), (B RHO; HYUN UK HON; SOO WOO NAM, 2000) afirma que a referida fase, nos aços austeníticos, pode ser deletéria para as propriedades de fadiga, resultando em perda de tenacidade ao impacto e

ductilidade à tração devido a transformações ocorridas (diferentes morfologias) (TSENG et al., 1994). Por outro lado, Al-Haidary et al., (2006) mostrou que a presença de ferrita- δ no metal de solda e ZTA do 316L soldado por SAW reduziu a taxa de propagação de trincas por fadiga.

II.2. Propagação de Trincas por Fadiga.

A taxa de propagação de trincas por fadiga (TPTF) em metais e ligas sob condições de ensaio em amplitude constante é geralmente descrita pela relação entre a taxa de propagação de trincas (da/dN) e a variação do fator de intensidade de tensão no ciclo de carregamento, ΔK . O típico gráfico log-log $da/dN \times \Delta K$ é mostrado esquematicamente na Figura 3.

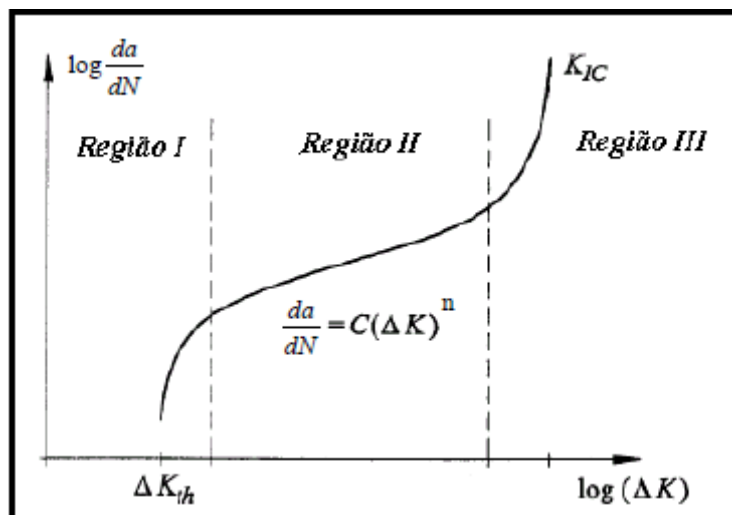


Figura 3 - Representação esquemática em escala logarítmica da relação entre a taxa de propagação da trinca de fadiga (da/dN) e amplitude do fator de intensidade de tensão (ΔK). Fonte: Stephens et al., (2000)

Para o projeto em questão, a região de maior interesse é a região II, que corresponde ao crescimento estável da trinca (STEPHENS et al., 2000); (JONES; MOLENT; PITT, 2008). Nesta, onde as taxas médias de propagação de trincas (10^{-8} - 10^{-6} m/ciclo) ocorrem, uma relação empírica proposta por Paris; Erdogan, (1963) é escrita na forma da Equação (1), na qual as constantes C e n

representam a resistência ao crescimento de trincas por fadiga de um determinado material (BAPTISTA et al., 2012).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (1)$$

A TPTF é influenciada por vários fatores, como microestrutura, ambiente, temperatura, relação de carga R, fechamento da trinca, sobrecargas, frequência de carregamento cíclico etc. (BABU; SASIKALA, 2020). Neste plano de doutorado serão avaliados os efeitos da microestrutura e do ambiente e a relação de carga R será mantida constante (0,1).

II.3. Influência da microestrutura de solda na Propagação de Trincas por Fadiga.

As variações ocorridas na microestrutura de solda como crescimento de grãos e formação de fases com diferentes morfologias e defeitos da solda (MARY et al., 2004);(CUI; LUNDIN; HARIHARAN, 2006) (BAI et al., 2015) podem alterar o desempenho em fadiga dos Al (JANG et al., 2010). O trabalho de Al-Haidary et al., (2006), utilizando as técnicas de soldagem arco submerso (SAW) e soldagem a arco manual (MAW), demonstrou um desvio de comportamento mecânico do aço 316L com relação à propagação da trinca na ZTA. A Figura 4 mostra a curva da/dN em função de ΔK para o MB e ZTA. O deslocamento da curva da/dN da ZTA para a esquerda, foi um indicativo de aumento da taxa de propagação de trinca por fadiga. Os autores atribuíram esse comportamento em parte à fragilização relativa nessa área, por causa do crescimento de grãos e em parte pela diminuição como um todo da eficácia dos contornos de grãos em impedir a propagação de trincas. Esse resultado demonstra que de fato a microestrutura de solda influencia na taxa de propagação de trincas por fadiga. Diversos trabalhos demonstraram a influência da microestrutura na taxa de

propagação de trincas por fadiga (BALASUBRAMANIAN; GUHA, 2004); (JANG et al., 2010); (HU et al., 2020).

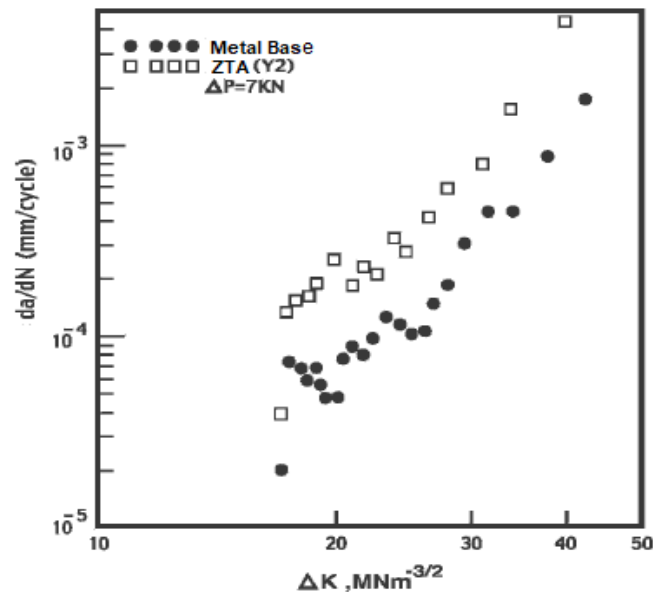


Figura 4: Curva da/dN vs ΔK do aço 316L. Fonte: Al-haidary et al., (2006)

Com base nas considerações apresentadas, esse plano de doutorado pretende realizar um estudo da microestrutura e propagação de trincas por corrosão- fadiga em cordões de solda do AIA 316L, soldado pelos processos TIG e LBW e expostos a ambiente agressivo (imersão em solução: NaCl a 3,5%).

III – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

III.1 Material e Métodos

Para a realização deste trabalho será utilizado o AIA 316L na forma de chapa com dimensão: 200mm x 3,00mm x 1000mm. A partir dessa chapa, serão retiradas amostras para a realização de soldas “*bead-on-plate*” (cordão de solda sobre a superfície da chapa) pelos processos TIG e LBW de forma autógena.

III.2 Preparação Metalográfica

A preparação das amostras do material como recebido seguirá os padrões usuais de metalografia. O polimento será realizado com pasta de diamante de granulometrias 3 μ m e 1 μ m. Para a análise da microestrutura via Microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, será feito ataque com reagente Behara e Água Régia, para melhor visualização das dendritas de ferrita presentes no metal de solda.

III.3 Soldagem

III.3.1. Soldagem a Laser

O laser a ser utilizado neste trabalho está instalado no Laboratório de Desenvolvimento de Aplicações de Laser e Ótica (DEDALO) da Divisão de Fotônica (EFO) do IEAv. Trata-se de um laser de 2 kW de potência média (IPG, Modelo YLR-2000) com comprimento de onda de 1,07 μ m. Este laser é dotado de uma fibra de saída com 50 μ m de diâmetro e 5 m de extensão. Uma unidade de acoplamento de fibras faz a conexão de uma segunda fibra com 100 μ m de 83 diâmetro e 10 m de comprimento que é utilizada nos processos de soldagem.

A proteção da poça de solda será feita utilizando como gás de proteção o argônio de alta pureza (99,999%), a um fluxo de 70 l/min, distribuído igualmente entre o bocal de proteção de topo e de raiz.

III.3.2. Soldagem TIG

O equipamento de soldagem a ser utilizado está instalado no Laboratório de Soldagem da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda (EEIMVR), da UFF. A soldagem das placas será realizada em um único passe de solda. A proteção da poça de solda será feita utilizando como gás de proteção o argônio puro com vazão de 16 L / min. O eletrodo utilizado será o Tungstênio

Toriádo (WTH-2) com 2,4 mm de diâmetro e ângulo de apontamento de 60° e seu ponto de fusão é de 3410°C.

III.4 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural das amostras será realizada no laboratório de Microscopia da Escola de Engenharia Industrial de Volta Redonda Universidade (EEIMVR), da UFF. As amostras como recebida e soldadas serão realizadas via Microscópio Óptico (MO) Nikon Eclipse LV150 (Nikon, Tóquio, Japão), Software NIS-Element D versão 3.2 e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) EVO MA10 (Carl Zeiss, Stuttgart, Alemanha). Após os testes de fadiga e tração, as mesmas, serão analisadas novamente via MO e MEV.

III.5 Ensaios de Tração

Ensaios de tração serão realizados conforme a norma ASTM E08m no Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL/USP e o equipamento empregado será o sistema servo-hidráulico MTS mod. 810.23M, com capacidade de 250 kN. Para cada condição analisada serão ensaiados quatro corpos de prova por condição (MB, solda sem corrosão e solda com corrosão). A condição padrão adotada será a centralização das soldas em relação à área útil a ser ensaiada. Pretende-se dessa forma atestar a qualidade das soldas quanto à resistência mecânica.

III.6 Ensaios de Propagação de Trinca

Serão usinados 24 corpos de prova para os ensaios de propagação da trinca por fadiga, 8 para cada condição de material (MB e soldas TIG e LBW), sendo que metade destes será reservada para ensaios em ambiente agressivo. O modelo dos corpos de prova será o de flexão a três pontos, determinado conforme a norma ASTM E647, com dimensões 62,5x62,0mm. Todos os ensaios

serão realizados à temperatura ambiente. Os ensaios em ambiente neutro e agressivo (imersão em solução: NaCl 3,5%) serão realizados na máquina MTS modelo 810.23M, no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) da Escola de Engenharia de Lorena (EEL). Um recipiente de contenção será adaptado especialmente para a realização dos ensaios em ambiente agressivo.

III.7 Análise das Superfícies de Fratura

As análises das superfícies de fratura dos corpos-de-prova ensaiados serão realizadas na EEIMVR da UFF no aparelho (MEV) EVO MA10 (Carl Zeiss, Stuttgart, Alemanha). Serão realizadas também, microanálises por meio de Espectrometria de Energia Dispersiva de raios-X, EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) para a determinação dos elementos presentes nos filmes de óxidos e de sua presença ou não.

IV – INFORMAÇÕES ADICIONAIS:

A realização deste projeto será apoiada pela EEIMVR/UFF (Volta Redonda/RJ) e pelo IEAv/DCTA (São José dos Campos/SP) conforme as cartas de apoio emitidas, respectivamente, pelos Professores Dr. José Adilson de Castro e Dr. Milton Sérgio Fernandes de Lima, e anexadas a este projeto. A restauração da operacionalidade do equipamento de ensaios MTS 810.23m pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL está sendo finalizada por meio de Auxílio à Pesquisa em andamento financiado pela FAPESP e coordenado pelo orientador do presente projeto. Recursos adicionais necessários ao desenvolvimento do plano de doutorado da Erica M. F. S. Silva serão solicitados à FAPESP por meio de pedido de bolsa a ser enviado em 2021. No caso de indeferimento, serão utilizados recursos próprios.

V – CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

	1ºAno		2ºAno		3ºAno		4ºAno	
ATIVIDADE	1ºsem	2ºsem	3ºsem	4ºsem	5ºsem	6ºsem	7ºsem	8ºsem
Disciplinas								
Revisão Bibliográfica								
Soldagem Laser e TIG								
Confecção dos corpos de prova								
Preparação Metalográfica								
Análise microestrutural MEV, MO; EDS e DRX								
Ensaio de Tração e Fadiga (com e sem corrosão)								
Análise microestrutural: MEV, MO; EDS e DRX e Fractografia (pós ensaio de fadiga e tração)								
Análise das propriedades mecânicas								
Discussão e análise dos resultados								
Análise comparativa com literatura								
Produção de artigos								
Escrita da tese								

VI- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-HAIDARY, J. T.; WAHAB, A. A.; SALAM, E. H. A. Fatigue crack propagation in austenitic stainless steel weldments. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 37, n. 11, p. 3205–3214, 1 nov. 2006.

B RHO; HYUN UK HON; SOO WOO NAM. The effect of δ -ferrite on fatigue cracks in 304L steels. *International Journal of Fatigue*, v. 22, n. 8, p. 683–690, set. 2000.

BABU, M. N.; SASIKALA, G. Effect of temperature on the fatigue crack growth behaviour of SS316L(N). *International Journal of Fatigue*, v. 140, p. 105815, nov. 2020.

BAI, G. et al. Intergranular corrosion behavior associated with delta-ferrite transformation of Ti-modified Super304H austenitic stainless steel. *Corrosion Science*, v. 90, p. 347–358, jan. 2015.

BALASUBRAMANIAN, V.; GUHA, B. Effect of welding processes on toe cracking behaviour of pressure vessel grade steel. *Engineering Failure Analysis*, v. 11, n. 4, p. 575–587, ago. 2004.

BANSOD, A. V. et al. Microstructure, Mechanical and Electrochemical Evaluation of Dissimilar low Ni SS and 304 SS using Different Filler Materials. *Materials Research*, v. 22, n. 1, p. e20170203, 2019.

BAPTISTA, C. A. R. P. et al. Describing fatigue crack growth and load ratio effects in Al 2524 T3 alloy with an enhanced exponential model. *Mechanics of Materials*, v. 51, p. 66–73, ago. 2012.

BLONDEAU, R. (ED.). *Metallurgy and mechanics of welding: processes and industrial applications*. London : Hoboken, NJ: ISTE ; John Wiley & Sons, 2008.

BUDDU, R. K. et al. Studies on mechanical properties, microstructure and fracture morphology details of laser beam welded thick SS304L plates for fusion reactor applications. *Fusion Engineering and Design*, v. 95, p. 34–43, jun. 2015.

CUI, Y.; LUNDIN, C. D.; HARIHARAN, V. Mechanical behavior of austenitic stainless steel weld metals with microfissures. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 171, n. 1, p. 150–155, jan. 2006.

DAVIS, J. R. (ED.). *Corrosion of weldments*. Materials Park, OH: ASM International, 2006.

EBARA, R. Corrosion fatigue crack initiation behavior of stainless steels. *Procedia Engineering*, v. 2, n. 1, p. 1297–1306, abr. 2010.

FANG, Z.; WU, Y.; ZHU, R. Stress Corrosion Cracking of Type 304 Stainless Steel Weldments in the Active State. *CORROSION*, v. 50, n. 3, p. 171–175, mar. 1994.

FORMAN, R. G.; KEARNEY, V. E.; ENGLE, R. M. Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures. *Journal of Basic Engineering*, v. 89, n. 3, p. 459–463, 1 set. 1967.

GUIZANI, H.; TLILI, B.; CHAFRA, M. Experimental characterization and fatigue behavior of thermally and mechanically treated 316L stainless steel MIG-welded joints. *Welding in the World*, 2 out. 2020.

GUO, Z. et al. Crack Propagation-Based Fatigue Life Prediction of Corroded RC Beams Considering Bond Degradation. *Journal of Bridge Engineering*, v. 25, n. 8, p. 04020048, ago. 2020.

HASHIM, M. et al. Behavior of 316L stainless steel containing corrosion pits under cyclic loading. *Materials and Corrosion*, v. 70, n. 11, p. 2009–2019, nov. 2019.

HSU, J.-P. et al. Fatigue crack growth in interstitially hardened AISI 316L stainless steel. *International Journal of Fatigue*, v. 47, p. 100–105, fev. 2013.

HU, Y. et al. Bending Fatigue Behavior of 316L Stainless Steel up to Very High Cycle Fatigue Regime. *Materials*, v. 13, n. 21, p. 4820, 28 out. 2020.

IORGA, S. et al. Influence of the Carbo-Chromization Process on the Microstructural, Hardness, and Corrosion Properties of 316L Sintered Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 45, n. 7, p. 3088–3096, jun. 2014.

JANG, C. et al. Effects of microstructure and residual stress on fatigue crack growth of stainless steel narrow gap welds. *Materials & Design*, v. 31, n. 4, p. 1862–1870, abr. 2010.

JONES, R.; MOLENT, L.; PITT, S. Similitude and the Paris crack growth law. *International Journal of Fatigue*, v. 30, n. 10–11, p. 1873–1880, out. 2008.

KLAPPER, H. S.; MENENDEZ, C.; JESSE, S. Pitting Corrosion Resistance Influencing Corrosion Fatigue Behavior of an Austenitic Stainless Steel in Chloride-Containing Environments. *CORROSION*, v. 76, n. 4, p. 398–410, 1 abr. 2020.

KRELLA, A. K.; KRUPA, A. Effect of cavitation intensity on degradation of X6CrNiTi18-10 stainless steel. *Wear*, v. 408–409, p. 180–189, ago. 2018.

LANDOWSKI, M. et al. Autogenous Fiber Laser Welding of 316L Austenitic and 2304 Lean Duplex Stainless Steels. *Materials*, v. 13, n. 13, p. 2930, 30 jun. 2020.

LI, L.; EGHILIO, R.; MARIMUTHU, S. Laser net shape welding. *CIRP Annals*, v. 60, n. 1, p. 223–226, 2011.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2005a.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2005b.

MADDURI, C.; PRAKASH, R. V. Corrosion Fatigue Crack Growth Studies in Ni-Cr-Mn Steel. v. 4, n. 12, p. 7, 2010.

MAKHLOUF, A. S. H. Handbook of materials failure analysis: with case studies from the aerospace and automotive industries. 1st edition ed. Waltham, MA: Elsevier, 2015.

MALHOTRA, D.; SHAHI, A. S. Weld metal composition and aging influence on metallurgical, corrosion and fatigue crack growth behavior of austenitic stainless steel welds. Materials Research Express, v. 6, n. 10, p. 106555, 21 ago. 2019.

MALHOTRA, D.; SHAHI, A. S. Metallurgical, Fatigue and Pitting Corrosion Behavior of AISI 316 Joints Welded with Nb-Based Stabilized Steel Filler. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 51, n. 4, p. 1647–1664, abr. 2020.

MARY, N. et al. Advances in local mechano-electrochemistry for detecting pitting corrosion in duplex steels. Journal of Materials Research, v. 19, n. 12, p. 3688–3694, 1 dez. 2004.

MCMURTREY, M. D.; MILLS, D. E.; BURNS, J. T. The effect of pit size and density on the fatigue behaviour of a pre-corroded martensitic stainless steel. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, v. 42, n. 1, p. 3–18, jan. 2019.

NOVÝ, F. et al. Gigacycle Fatigue Endurance of Marine Grade Stainless Steels with Corrosion Pits. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, v. 41, n. 2, p. 99, 2013.

OGAWA, T.; TSUNETOMI, E. Hot Cracking Susceptibility of Austenitic Stainless Steels. p. 12, jan. 1979.

OKAMOTO, T.; KISHITAKE, K. Dendritic structure in unidirectionally solidified aluminum, tin, and zinc base binary alloys. Journal of Crystal Growth, v. 29, n. 2, p. 137–146, jun. 1975.

PARIS, P.; ERDOGAN, F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. Journal of Basic Engineering, v. 85, n. 4, p. 528–533, 1 dez. 1963.

PRASAD, K. S.; RAO, C. S.; RAO, D. N. A Review on Welding of AISI 304L Austenitic Stainless Steel. Journal for Manufacturing Science and Production, v. 14, n. 1, p. 1–11, 30 abr. 2014.

ROKHLIN, S. I. et al. Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life. Engineering Fracture Mechanics, v. 62, n. 4–5, p. 425–444, mar. 1999.

SILVA, E. M. F. S. Análise microestrutural, mecânica e eletroquímica do aço inoxidável austenítico 316L nas formas de chapa e tubo soldado por tig Autógeno. Volta Redonda - Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, mar. 2020.

SMITH, P. Process piping design handbook. Houston, Tex: Gulf Pub, 2007.

STEPHENS, R. et al. Metal Fatigue in Engineering. New York: John Wiley & Sons, 472p., 2001.

SZKLARSKA-SMIALOWSKA, Z. Pitting and crevice corrosion. Houston, Tex: NACE International, the Corrosion Society, 2005.

TANG, L. et al. Fatigue Crack Growth Behavior of the MIG Welded Joint of 06Cr19Ni10 Stainless Steel. p. 17, 2018.

TIMOTHY R. L. The Effect of Thermal Aging and Boiling Water Reactor Environment on Type 316L Stainless Steel Welds. [s.l: s.n.].

TOPPO, A. et al. Pitting and stress corrosion cracking studies on AISI type 316N stainless steel weldments. Defence Technology, v. 14, n. 3, p. 226–237, jun. 2018.

TSENG, C. C. et al. Fracture and the formation of sigma phase, M₂₃C₆, and austenite from delta-ferrite in an AISI 304L stainless steel. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 25, n. 6, p. 1147–1158, jun. 1994.

XU, J.-J. et al. Comparison of the Stress Corrosion Cracking Behaviour of AISI 304 Pipes Welded by TIG and LBW. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 1 set. 2020.

YAMAGUCHI, K.; KANAZAWA, K. Crack propagation rates of austenitic stainless steels under high-temperature low-cycle fatigue conditions. Metallurgical Transactions A, v. 10, n. 10, p. 1445–1451, out. 1979.

YAN, J.; GAO, M.; ZENG, X. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding. Optics and Lasers in Engineering, v. 48, n. 4, p. 512–517, abr. 2010.

YAWAS, D. S.; AKU, S. Y.; ALUKO, S. O. Fatigue behavior of welded austenitic stainless steel in different environments. Results in Physics, v. 4, p. 127–134, 2014.

ZATKALÍKOVÁ, V. et al. PITTING CORROSION OF AISI 316Ti STAINLESS STEEL WITH POLISHED SURFACE. Materials Engineering, v. 17, n. 2, p. 5, 2010.

ZHANG, Y. et al. Atmospheric stress corrosion crack growth rates of 316 L stainless steel for nuclear waste containment. Corrosion Science, v. 177, p. 109008, dez. 2020.

ZHU, P. et al. An investigation on microstructure and pitting corrosion behavior of 316L stainless steel weld joint. Journal of Materials Research, v. 32, n. 20, p. 3904–3911, 27 out. 2017.

ANEXO – Cartas de Apoio ao Projeto

À Escola de Engenharia de Lorena (EEL) da Universidade de São Paulo
Lorena-SP

Ref.: Carta de apoio para Projeto de Pesquisa.

Prezados Senhores,

Venho por meio desta expressar o apoio da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda (EEIMVR), da Universidade Federal Fluminense-UFF, à aluna Erica Marcelino Freitas de Souza Silva, cujo tema do projeto é “Estudo da microestrutura e do crescimento de trincas por corrosão-fadiga em cordões de solda obtidos pelos processos TIG e Laser no aço inoxidável austenítico AISI 316L”, sob a orientação do professor Dr. Carlos Antônio Reis Pereira Baptista do Departamento de Engenharia de Materiais. Colocamos à disposição nossos laboratórios de Microscopia e Preparação de Amostras e Soldagem.

Cordialmente,



Prof. Jose Adilson de Castro

Coordenador Laboratório Sistemas Multifásicos Multicomponentes

Vice Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica (PPGEM)

Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda (EEIMVR)

Universidade Federal Fluminense (UFF)



**MINISTÉRIO DA DEFESA
COMANDO DA AERONÁUTICA
INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS**

Exmo. Sr. Professor Dr.
CARLOS ANTONIO REIS PEREIRA BAPTISTA
Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo

REF.: Carta de apoio ao projeto de pesquisa.

Professor:

O Laboratório Multiusuário de Aplicações de Lasers e Óptica (Lab. DEDALO) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) vem por meio desta manifestar o seu apoio ao projeto *Estudo da microestrutura e do crescimento de trincas por corrosão-fadiga em cordões de solda obtidos pelos processos TIG e Laser no aço inoxidável austenítico*, realizado pela discente **Erica Marcelino Freitas de Souza Silva** sob vossa orientação.

Faz-se notar a nossa profícua e frutífera colaboração ao longo dos últimos dez anos, durante os quais agregamos valor aos trabalhos de pesquisas de ambas as instituições tanto na área de aplicações de lasers quanto na área de mecânica dos sólidos.

Espero que esta tese de doutoramento na PPGEM/USP tenha o mesmo sucesso que os nossos trabalhos anteriores.

Fico à disposição para quaisquer esclarecimentos que se façam necessários.

Atenciosamente.

Assinatura manuscrita em azul de Milton Sérgio Fernandes de Lima.

Milton Sérgio Fernandes de Lima
Chefe da Subdivisão de Lasers e Aplicações
Divisão de Fotônica
Instituto de Estudos Avançados
IEAv, C.P. 6044, CEP 12.228-970 São José dos Campos
E-mail: msflima@gmail.com - Tel. (55.12) 3947 5464

São José dos Campos, 27 de junho de 2021.