



Felipe de Sá Marsiglia

**Super longa vida em fadiga do aço inoxidável
316L após processamento a laser**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento
de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Coorientador: Matheus Fernandes de Andrade

Rio de Janeiro

Junho de 2022

“Se pensar em termos de um ano, plante uma semente; em termos de dez anos, plante árvores, e se pensar em termos de cem anos, eduque as pessoas.”

Confúcio

AGRADECIMENTOS

Entre tantos ensinamentos, momentos e desafios, que permearam a minha jornada de graduação na PUC-Rio, expresso a minha total gratidão àqueles que estiveram ao meu lado e que contribuíram na minha formação acadêmica e no meu contínuo desenvolvimento como pessoa, como ser humano.

Agradeço a Deus por me proporcionar saúde física e mental ao longo dos anos na faculdade, e a todo o suporte e apoio dos meus colegas de curso, em especial, Alexandre da Matta, Leonardo Leite e Rafael Dias, pela amizade que criamos e que levarei para a vida, pelo companheirismo, pelo convívio e por juntos termos compartilhado grandes aventuras durante esta etapa acadêmica.

Agradeço à minha namorada Marie, por todo o amor, carinho e incentivo.

Agradeço à minha família, em especial, meus primos, meus tios e meus avós; e principalmente: meus pais Ana Paula e Antonio, e meu irmão Thiago, que estiveram, estão e sempre estarão ao meu lado; e por tê-los como as minhas maiores inspirações e referências na vida.

Agradeço ao meu professor orientador Marcos Venicius Soares Pereira por todos os ensinamentos, contribuições e solicitude ao me orientar tanto em meu Projeto de Iniciação Científica quanto em meu Projeto de Graduação ao final do curso de Engenharia Mecânica.

Agradeço ao meu coorientador Matheus Fernandes de Andrade por me assistir na evolução de cada fase do projeto e por me auxiliar nas tomadas de decisão, mantendo um acompanhamento próximo e apoio nas atividades realizadas em laboratório.

Agradeço ao Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser de Santa Catarina pela fundamental colaboração no fornecimento de material para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, presto uma homenagem em memória dos meus avôs Albano Sá e Antonio Marsiglia, falecidos em 2021, dedicando este trabalho a eles. Sempre estiveram próximos de mim e suas histórias de vida foram os pilares balizadores da formação do meu caráter e dos meus ideais. Minha eterna gratidão.

RESUMO

Super longa vida em fadiga do aço inoxidável 316L após processamento a laser

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento do aço inoxidável 316L, manufaturado pela técnica de *Laser Directed Energy Deposition (L-DED)*, isto é, manufatura aditiva, no SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser, em Santa Catarina e enviado para a PUC-Rio em duas condições diferentes: como fabricado (*as built*) e após tratamento térmico (*as built + H.T.*). Em sequência, corpos de prova destas duas condições microestruturais foram usinados e ensaiados sob regime de carregamento cíclico super longo (*VHCF*), no equipamento ultrassônico disponível no Laboratório de Fadiga de Altíssimo Ciclo da Universidade. Os ensaios foram realizados com frequências de 20 kHz, adotando duas amplitudes distintas de tensão, 201 MPa (σ_1) e 230 MPa (σ_2), previamente definidas. Posteriormente, alguns corpos de prova foram selecionados para análise fractográfica de suas superfícies de fratura por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Quanto aos resultados, se considera que a vida-fadiga da condição *as built* foi superior àquele da condição *as built + H.T.*, uma vez que os corpos de prova dessa condição alcançaram o regime de *VHCF*, mesmo sem ter atingido um *run-out* (condição de não falha) em todos os casos. Por sua vez, as análises por MEV indicaram a presença de descontinuidades microestruturais nos corpos de prova associadas com defeitos (poros) de fabricação dos materiais. Se observou que as trincas nuclearam nas superfícies dos corpos de prova, não se registrando formação de *fish-eye*, característica fractográfica típica de carregamentos no regime de *VHCF*.

Palavras-chave: manufatura aditiva; fadiga de altíssimo ciclo; ensaios ultrassônicos de fadiga; mecanismos de iniciação de trinca.

ABSTRACT

Super long life in fatigue of 316L stainless steel after laser processing

The purpose of this work is to evaluate the behavior of 316L stainless steel, manufactured by Laser Directed Energy Deposition (L-DED) technique, that is, additive manufacturing, at SENAI Innovation in Manufacturing Systems and Laser Processing in Santa Catarina and sent to PUC-Rio in two different conditions: as manufactured (as built) and after heat treatment (as built + H.T.). Then, specimens of these two microstructural conditions were machined and tested under super long cyclic loading (VHCF) in the ultrasonic equipment located at the University's Very High Cycle Fatigue Laboratory. The tests were performed with frequencies of 20 kHz, using two distinct stress amplitudes, 201 MPa (σ_1) and 230 MPa (σ_2), previously defined. Subsequently, some specimens were selected for fractographic analysis of their fracture surfaces by scanning electron microscopy.

As for the results, it is considered that the fatigue-life of the as built condition was superior to that of the as built + H.T. condition, since its specimens reached the VHCF regime, even without having reached a run-out in all cases. In turn, the fractographic analysis indicated the presence of microstructural discontinuities in the specimens associated with defects (pores) in the fabrication of the materials. It was observed that the cracks nucleated on the surfaces of the specimens, not registering fish-eye formation, typical fractographic characteristic of loads in the VHCF regime.

Keywords: additive manufacturing; very high cycle fatigue; ultrasonic fatigue tests; crack initiation mechanisms.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivos	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1. Manufatura Aditiva	12
2.1.1. Técnica L-DED	17
2.2. Fadiga de Altíssimo Ciclo	21
2.2.1. Conceito de Fadiga	21
2.2.3. Regimes de Fadiga	26
2.2.4. Equipamento Ultrassônico	28
2.2.5. Fish-eye	31
3 METODOLOGIA	33
3.1. Materiais	33
3.1.1. Aço Inoxidável 316L	33
3.1.2. Condições de Elaboração	34
3.2. Processo de Fabricação	35
3.3. Corpo de Prova	40
3.4. Ensaios de Fadiga de Altíssimo Ciclo	42
3.5. Análise da Superfície de Fratura	45
4 RESULTADOS	46
4.1. Ensaios de Fadiga de Altíssimo Ciclo	46
4.2. Análise da Superfície de Fratura	47
5 CONCLUSÃO	51
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do Processo da Manufatura Aditiva (Fonte: Fine MetalWorking, 2021).	13
Figura 2 - Modelagem geométrica entre arquivos de formato CAD e STL (Fonte: 3DLAB, 2019).	14
Figura 3 - Diferentes materiais utilizados na manufatura aditiva (Fonte: Adaptada de 3DLAB, 2022 e 3D Powder Hub, 2022).	16
Figura 4 - Diagrama esquemática do processamento pela técnica L-DED (Fonte: Miedzinski, M. 2017).	17
Figura 5 - Intervalo operacional entre os parâmetros de potência do laser [W] e velocidade de varredura [mm/s] (Fonte: Adaptada de Mukherjee, T. e DebRoy, T., 2019).	19
Figura 6 - Intervalo operacional entre os parâmetros de taxa de deposição do material [g/s] e espessura da camada [µm] (Fonte: Adaptada Mukherjee, T. e DebRoy, T., 2019).	19
Figura 7 - Detalhe do acabamento superficial de uma peça produzida pela técnica L-DED (Fonte: Springer Link, Pei-Yi Lin, 2020).	20
Figura 8 - Fadiga de um componente mecânico (Fonte: Metalografia, 2020).	21
Figura 9 - Identificação das regiões do processo de trincamento em (i) Esquema ilustrativo e em (ii) CP fraturado (Fonte: Adaptada de Budynas, R. e Nisbett, J., 2011).	23
Figura 10 - Curva S-N típica (Fonte: CEFET-MG, Luiz Botelho, 2009).	24
Figura 11 - (a) Curva S-N de um material que apresenta um limite de fadiga e, portanto, "vida-infinita" em fadiga; (b) Curva S-N de um material que não apresenta um limite de fadiga (Fonte: EESC - USP, Marcelo Paes, 2021).	25
Figura 12 - (i) Curva S-N; (ii) Distribuição das tensões atuantes em um ciclo de carregamento (Fonte: Adaptada de UNIFEI, Ronnie Shibata, 2022).	26
Figura 13 - Curva S-N com a representação dos regimes de fadiga: LCF, HCF e VHCF (Fonte: Adaptada de NICHOLAS, 2006).	27
Figura 14 - Gráfico comparativo entre o tempo de ensaio e o número de ciclos, de acordo com diferentes equipamentos de fadiga (Fonte: Shimadzu, 2021).	28
Figura 15 - Componentes do equipamento ultrassônico (Fonte: Shimadzu, 2021).	29

Figura 16 - Detalhe do sistema de resfriamento do CP (Fonte: Autoria própria, 2022).	30
Figura 17 - Esquema da formação de fish-eye na falha por fadiga de material em regime VHCF. (Fonte: Adaptada de KAZYMYROVYCH, 2009).	31
Figura 18 - Superfície de fratura de CP com registro de formação de fish-eye (Fonte: Adaptada de KAZYMYROVYCH, 2009).	32
Figura 19 - (a) Superfície de fratura de CP com formação de fish-eye; (b) Vista ampliada do fish-eye com visualização da região de propagação da trinca (Fonte: Fulin Liu, 2019).	32
Figura 20 - Equipamento RPM Innovations 535XR Standard System (Fonte: Thiesen Jr., A., 2021).	35
Figura 21 - Deposição do pó metálico em camadas singulares no substrato (Fonte: Thiesen Jr., A., 2021).	36
Figura 22 - Substrato posicionado e fixado por placas auxiliares (Fonte: Adaptada de Thiesen Jr., A., 2021).	38
Figura 23 - Cortes de barra de aço 316L produzido via L-DED. (Fonte: Autoria própria, 2022).	38
Figura 24 - (a) Amostra do aço inox 316L após fabricação por L-DED e (b) Corpo de prova da amostra do material após usinagem, em estado final de corpo de prova (Fonte: Autoria própria, 2022).	39
Figura 25 - Dados utilizados no programa Ultrasonic Fatigue Software do equipamento SHIMADZU USF-2000A (Fonte: Autoria própria, 2022).	40
Figura 26 - Desenho técnico 2D da geometria do corpo de prova (Fonte: Autoria própria, 2022).	41
Figura 27 - Equipamento SHIMADZU USF-2000A (Fonte: Autoria própria, 2022).	42
Figura 28 - Equipamento HITACHI TM3000 (Fonte: Autoria Própria, 2022).	45
Figura 29 - Superfície de Fratura do CP 1 com ampliação de 100x (Fonte: Autoria própria, 2022).	48
Figura 30 - Superfície de Fratura do CP 1 com ampliação de 30x (Fonte: Autoria própria, 2022).	49
Figura 31 - Superfície de Fratura do CP 3 com ampliação de 30x (Fonte: Autoria própria, 2022).	50
Figura 32 - Superfície de Fratura do CP 4 com ampliação de 30x (Fonte: Autoria própria, 2022).	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da Manufatura Aditiva por Processos Tecnológicos	15
Tabela 2 - Composição química do pó de aço inoxidável 316L	34
Tabela 3 - Composição química do substrato sólido de aço inoxidável 316L	34
Tabela 4 - Propriedades mecânicas das condições de aço inoxidável 316L	34
Tabela 5 - Estudo inicial dos parâmetros de processamento	36
Tabela 6 - Reajuste dos parâmetros de processamento	37
Tabela 7 - Definição das condições de ensaio	44
Tabela 8 - Resultados dos ensaios ultrassônicos	46

LISTA DE ABREVIATURAS

MA	Manufatura Aditiva
LCF	<i>Low Cycle Fatigue</i>
HCF	<i>High Cycle Fatigue</i>
VHCF	<i>Very High Cycle Fatigue</i>
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
L-DED	<i>Laser Directed Energy Deposition</i>
CP	Corpo de Prova
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>
LABFADAC	Laboratório de Fadiga de Altíssimo Ciclo
LRM	Limite de Resistência Mecânica
LE	Limite de Escoamento
LR	Limite de Ruptura
LF	Limite de Fadiga
HT	<i>Heat Treated</i>
AB	<i>As Built</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão
σ_m	Tensão média
σ_{max}	Tensão máxima
σ_{min}	Tensão mínima
σ_a	Amplitude de tensão
$\Delta\sigma$	Variação de tensão
a	Comprimento da trinca
L_2	Comprimento de ressonância
ΔK	Variação do fator de intensidade de tensões
N	Número de ciclos
Y	Fator adimensional de parâmetros geométricos da trinca
ε	Deformação
$\Delta\varepsilon$	Variação de deformação
ν	Coeficiente de Poisson
ρ	Massa específica
E	Módulo de Elasticidade
f	Frequência de ensaio

1 INTRODUÇÃO

O progressivo desenvolvimento tecnológico decorrente das últimas décadas, estabeleceu uma necessidade e demanda por equipamentos cada vez mais eficientes, com maior produtividade e elevada vida em serviço. De tal modo, a implementação de processos de fabricação inovadores, como a manufatura aditiva (MA), tem despertado crescente interesse no ambiente industrial, especialmente nos setores aeronáutico, automotivo e biomédico (GOMES e WILTGEN, 2019).

Considerando a aplicação desta técnica produtiva e tendo em vista que peças estruturais e componentes mecânicos são projetados para uma vida em fadiga que exceda 10^7 ciclos de carregamento – regime de fadiga de altíssimo ciclo (*VHCF*) – a vida-fadiga das ligas metálicas após diferentes processos de MA, têm se mostrado adequada para muitas aplicações. Existem questões em aberto, quanto ao desempenho e integridade, de materiais produzidos por MA, em longa ou super longa vida em fadiga (10^7 – 10^{12} ciclos de carregamento), que estão associadas aos parâmetros de processamento e à influência de aspectos das microestruturas cristalinas sobre os mecanismos de iniciação de trincas. (DOWLING, 2013).

Até recentemente, o maior obstáculo na avaliação do desempenho de materiais em regime de super longa vida em fadiga era a necessidade de extensos intervalos de tempo para a realização dos ensaios laboratoriais, que envolviam meses ou até anos de duração. Esta dependência ocorria devido às limitações das máquinas e dispositivos de testes, que por trabalharem com valores de frequência bem abaixo do que já se é possível hoje em dia, exigiam uma vasta disposição temporal para o alcance da elevada ordem de carregamentos característicos do regime *VHCF*.

Devido aos avanços tecnológicos, os equipamentos utilizados nos ensaios apresentaram uma grande evolução ao passarem a operar em frequências bem mais elevadas. A introdução de dispositivos ultrassônicos – capazes de trabalhar com frequências da ordem de $20 \pm 0,5$ kHz – em ensaios de fadiga, viabilizou uma drástica redução do tempo de ensaios e do custo experimental de testes, cujas novas durações passaram a abranger dias a semanas (SHIMADZU, 2021).

1.1. Objetivos

O presente trabalho de graduação tem como objetivo comparar o desempenho de duas condições de elaboração do aço inoxidável 316L, manufaturado pela técnica da deposição de energia direcionada a laser, para duas amplitudes de tensões distintas em regime de fadiga de altíssimo ciclo. Também foi verificado o mecanismo de iniciação de trinca – formação de trincas superficiais ou internas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Manufatura Aditiva

O processo de manufatura aditiva pode ser entendido como um conjunto de tecnologias de fabricação capazes de criar objetos físicos partindo de um modelo digital. Por meio da adição de sucessivas camadas de material, é possível produzir componentes resistentes e duráveis, tornando a MA um método de confecção cada vez mais importante, acessível e inserido no ambiente industrial (GIBSON et al., 2021).

Frente aos processos produtivos que caracterizam a manufatura subtrativa – fabricação de um componente por diferentes técnicas de usinagem de um bloco inicial de material (torneamento, fresamento, retificação, eletroerosão, ...) –, a aplicação da manufatura aditiva apresenta enormes vantagens quando comparada às tradicionais técnicas produtivas (VOLPATO, 2017).

Devido aos avanços significativos na indústria, a MA está revolucionando os processos produtivos ao garantir a liberdade geométrica na fabricação e permitir as reduções nos custos de produção e de desperdício de material. A economia de matéria-prima é obtida pela inserção apenas da quantidade necessária de material para se confeccionar uma peça, em que há uma geração mínima de resíduos (GOMES e WILTGEN, 2019). O componente pode ser fabricado de modo contínuo, por meio de um único equipamento, viabilizando a automação de processos produtivos de baixa complexidade, uma vez que a produção por meio de certas técnicas de MA envolve pouco ferramental: um computador, um software de desenho e um equipamento de manufatura aditiva (VOLPATO, 2017).

De um modo geral, o processo produtivo da MA se inicia pelo processamento de um modelo geométrico 3D do componente a ser fabricado, via uso de um software de desenho técnico. Um arquivo em formato *CAD* (*Computer Aided Design*) da peça, é gerado e então, convertido para um modelo de arquivo do tipo *STL* (*Standard Tessellation Language*), que faz uma remodelagem geométrica da superfície do objeto (GIBSON et al., 2021).

Os arquivos *STL* são utilizados na leitura de impressão – principalmente de materiais poliméricos – pelas máquinas 3D. Após a manipulação deste arquivo, o material é impresso pela sua deposição em camadas, de acordo com o processamento da técnica de MA implementada na fabricação da peça pretendida (GIBSON et al., 2021). A Figura 1, a seguir, ilustra as fases que compõem as etapas de produção por MA.

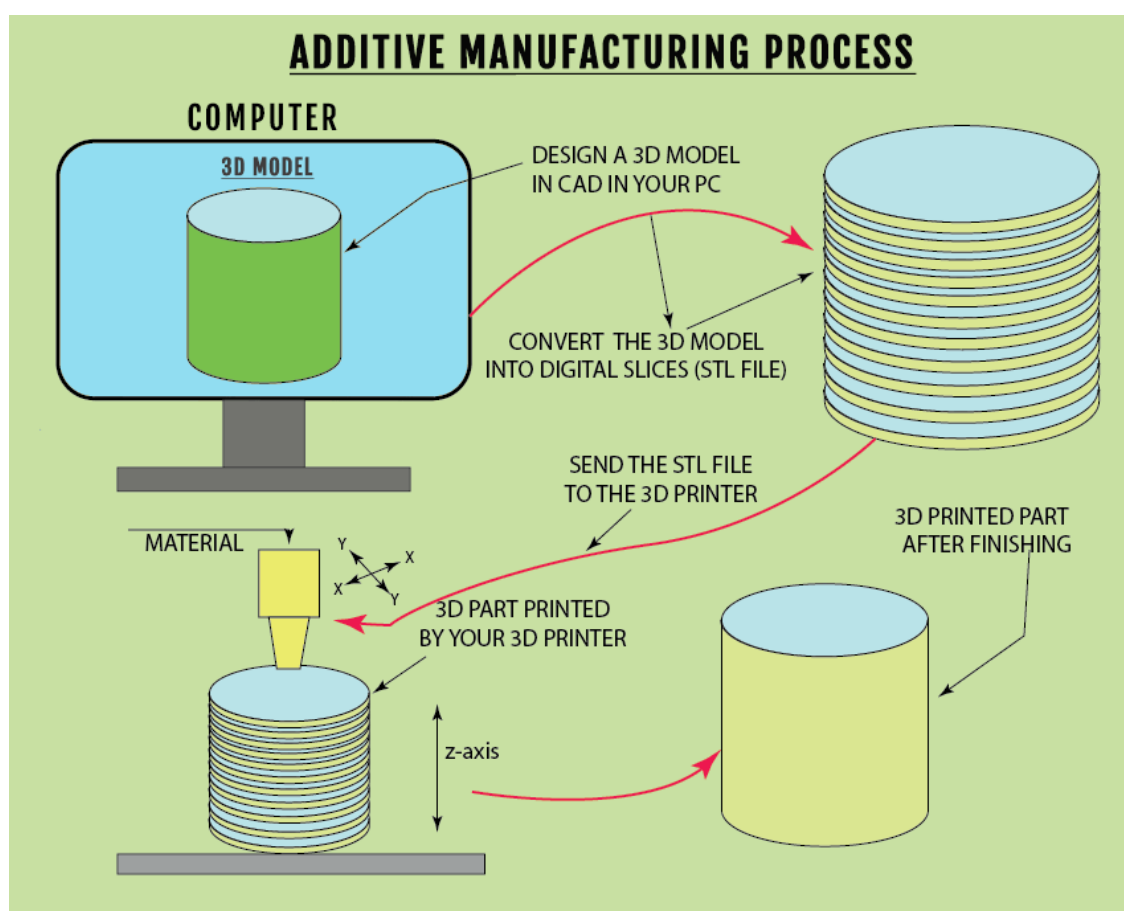


Figura 1 - Etapas do Processo da Manufatura Aditiva (Fonte: Fine MetalWorking, 2021).

A conversão de arquivos do formato *CAD* para o formato *STL* é necessária, pois a tecnologia por trás dos arquivos *STL* envolve a modelagem numérica da geometria da peça em elementos finitos, pelo seu fatiamento em camadas triangulares ainda menores. A segmentação de seções de área transversal em malhas reduzidas de formato triangular, tornam possíveis a leitura e a impressão do arquivo em um modelo físico 3D (VOLPATO, 2017).

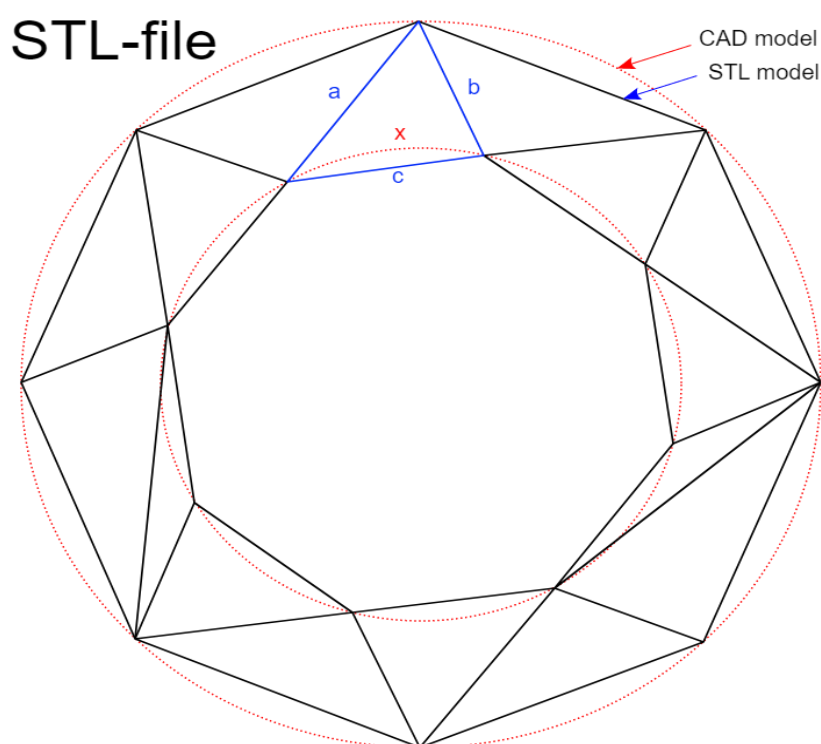


Figura 2 - Modelagem geométrica entre arquivos de formato CAD e STL (Fonte: 3DLAB, 2019).

A manipulação dos arquivos *STL* permite ajustes de certos aspectos da impressão 3D, como posicionamento, condições da modelagem da superfície geométrica da peça e orientação de deposição do material. O uso deste tipo de arquivo é muito difundido e aplicável no uso de máquinas de impressão 3D, se caracterizando por serem o formato padrão de processamento da manufatura aditiva (VOLPATO, 2017).

Seguindo as recomendações internacionais, a norma técnica ISO/ASTM 52900:2021, define os princípios gerais e fundamentos da MA. A norma estabelece que este modelo produtivo pode ser classificado em sete categorias, conforme os processos tecnológicos envolvidos e descritos na Tabela 1: Jateamento de Aglutinantes, Jateamento de Material, Extrusão de Material, Fusão em Leito de Pó, Laminação em Folhas, Fotopolimerização em Cuba e Deposição Direcionada por Aplicação de Energia.

Tabela 1 - Classificação da Manufatura Aditiva por Processos Tecnológicos

Manufatura Aditiva	
Tecnologia	Descrição do Processo
Jateamento de Aglutinantes	Um agente de ligação líquido é seletivamente depositado por um jato para unir materiais em pó
Jateamento de Material	O material é depositado em forma de gotículas por um jato, e se une pela incidência de uma forma de calor (geralmente, luz ultravioleta)
Extrusão de Material	O material é seletivamente depositado ao ser extrudado de um bocal ou orifício
Fusão em Leito de Pó	O material em pó é seletivamente processado de um recipiente e se funde ao ser depositado por uma fonte de energia térmica (geralmente, laser ou feixe de elétrons)
Laminação em Folhas	O material em formato de folhas é seletivamente depositado
Fotopolimerização em Cuba	O material fotopolimérico líquido é seletivamente curado por polimerização ativada por luz (geralmente, feixe direcionado de luz ultravioleta) em uma cuba
Deposição Direcionada por Aplicação de Energia	O material (em pó ou filamento) é seletivamente depositado ao ser fundido pela atuação de uma energia térmica concentrada (laser, feixe de elétrons ou arco de plasma)

Fonte: Adaptada de ISO/ASTM 52900, 2021 & Gibson, I. et. al, 2021.

Os processos de fabricação da MA foram originalmente concebidos para a utilização de materiais disponíveis no mercado, como resinas poliméricas, certos tipos de cera e materiais oriundos de laminados de papel. Posteriormente, com os desenvolvimentos tecnológicos e avanços da engenharia de materiais, houve a otimização destes substratos, que passaram a ser aprimorados especificamente para os processos da manufatura aditiva (GIBSON et al., 2021).

Este salto científico foi responsável também pela introdução de elementos cerâmicos, compósitos e metálicos no processamento das técnicas de MA. Os ajustes de adequação dos materiais aos parâmetros operacionais dos diferentes processos dispostos, proporcionou a obtenção de peças mais precisas, mais rígidas e de maior qualidade e durabilidade (GIBSON et al., 2021). Na Figura 3, ilustram-se diferentes tipos de materiais e que são utilizados para impressão em formatos variados, como filamentos poliméricos, pós metálicos e resinas fotopolimerizáveis.



Figura 3 - Diferentes materiais utilizados na manufatura aditiva (Fonte: Adaptada de 3DLAB, 2022 e 3D Powder Hub, 2022).

Entre os processos tecnológicos da MA descritos anteriormente, há quatro categorias aplicáveis à produção de materiais metálicos: Fusão em Leito de Pó, Jateamento de Aglutinantes, Laminação em Folhas e Deposição Direta por aplicação de Energia (GOMES e WILTGEN, 2019).

Destes processos, uma certa técnica da categoria Deposição Direcionada por Aplicação de Energia (*Directed Energy Deposition* - DED) foi implementada como método de fabricação no presente trabalho.

2.1.1. Técnica L-DED

A técnica Deposição de Energia Direcionada por Laser (*Laser Directed Energy Deposition – L-DED*) – pertencente à categoria *DED* – da manufatura aditiva, é definida pelo uso de um laser como elemento de energia térmica responsável pela fundição do material à medida que o mesmo é depositado (MIEDZINSKI, 2017).

Definido o sentido de deposição do material, um alimentador de pó estabelece um fluxo de pó metálico que é direcionado diretamente a uma poça de fusão, gerada pela incidência de uma fonte de laser sobre um substrato sólido. O pó metálico é depositado sobre o substrato e simultaneamente fundido no local pela atuação do laser de alta energia, constituindo uma camada de material. Neste processo de formação de camadas, um gás de proteção é continuamente emitido em direção à região da poça de fusão, com o objetivo de proteger o material fundido da contaminação por impurezas, de diminuir as chances de surgimento de porosidades no material e de preservar as propriedades finais, podendo ter efeitos positivos de melhoria da resistência à corrosão da peça final (MIEDZINSKI, 2017).

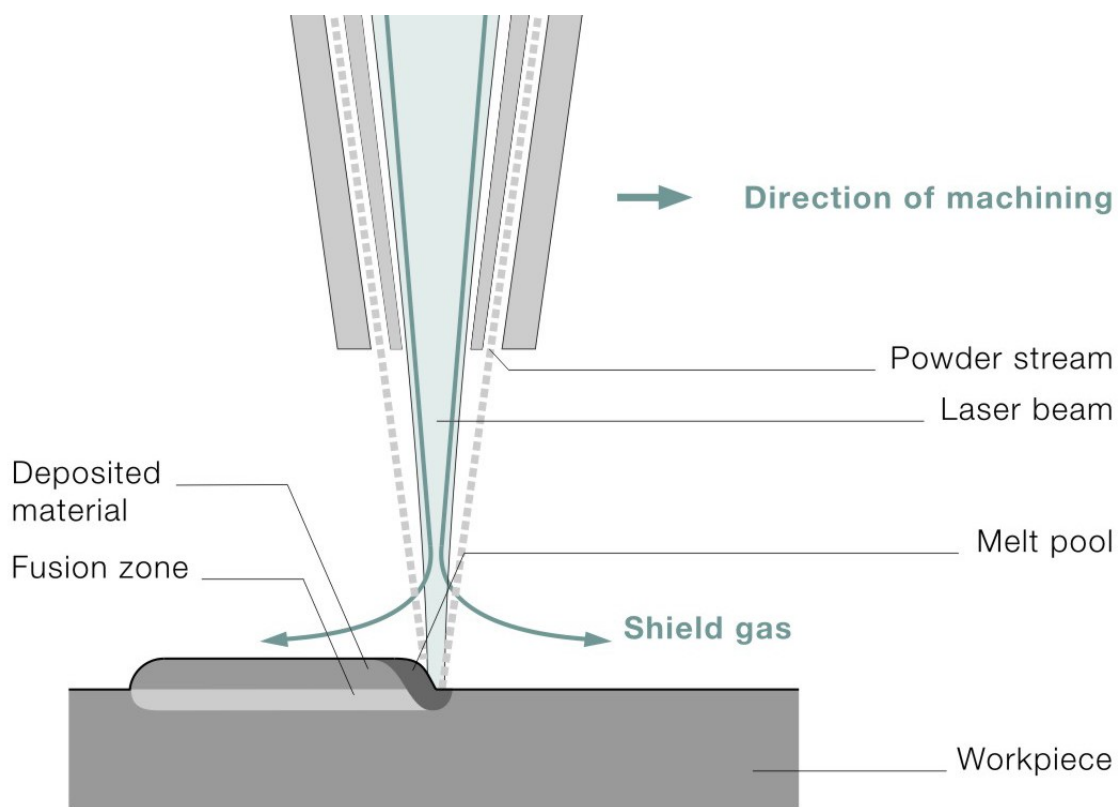


Figura 4 - Diagrama esquemática do processamento pela técnica L-DED (Fonte: Miedzinski, M. 2017).

Trata-se de uma tecnologia extremamente promissora, cuja aplicação se dá na reparação de componentes de alto valor agregado e na fabricação de objetos estruturais 3D. Certas questões permanecem em aberto no tocante à rigidez e durabilidade do material, existindo lacunas de incertezas quanto à confiabilidade da vida útil das peças. De tal modo, é essencial que os parâmetros de processo estejam ajustados para a modelagem do processo produtivo mais aprimorado possível (MONTUORI et al., 2020).

A técnica é relatada na literatura pela sua extrema sensibilidade à definição dos parâmetros, como: potência do laser, distância entre o laser e a superfície de deposição, padrão de deposição, velocidade de varredura e taxa de deposição do pó metálico; sendo necessário um fino monitoramento dos mesmos. Entre estes, pode-se abordar especialmente a potência do laser, a velocidade de varredura e a taxa de alimentação do pó metálico como os parâmetros que se destacam por causarem o maior impacto ao produto final concebido (MIEDZINSKI, 2017).

Tendo em vista a ampla variedade de combinações possíveis dos parâmetros aos equipamentos e matérias-primas, um estudo inicial de otimização é extremamente relevante com o intuito de obter peças com alta densidade e boas propriedades mecânicas (MUKHERJEE e DEBROY, 2019). Este estudo é fundamental, pois um leque de diferentes tipos de materiais está associado a variações de propriedades finais, tais quais: Módulo de Elasticidade (E), Limite de Resistência Mecânica (LRM), Limite de Escoamento (LE), Limite de Ruptura (LR), Limite de Fadiga (LF), Coeficiente de Poisson (ν), Massa Específica (ρ), ...

Portanto, de acordo com a literatura, é possível definir uma janela operacional de trabalho dos parâmetros de processo. É estabelecida uma faixa de valores de processamento que otimizem a produção pela técnica *L-DED* da manufatura aditiva, especificamente para o uso do aço inoxidável AISI 316L (MUKHERJEE e DEBROY, 2019).

Nas Figuras 5 e 6, observam-se estes envelopes de operação dos principais parâmetros da técnica, tendo em vista o material de trabalho.

Na Figura 5, vê-se o intervalo de operação entre a potência do laser, em W , e a velocidade de varredura, em mm/s .

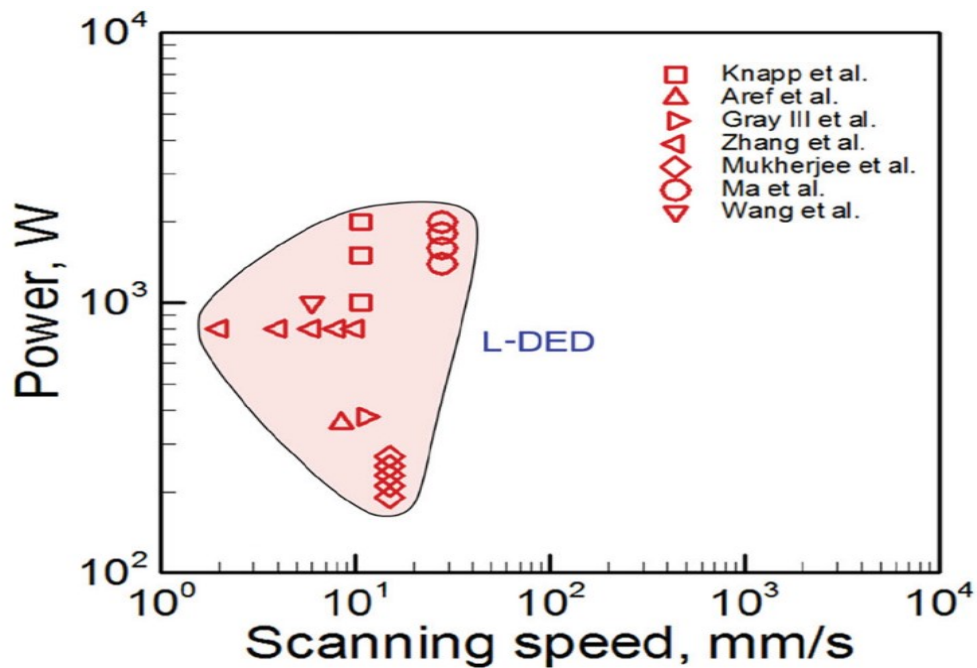


Figura 5 - Intervalo operacional entre os parâmetros de potência do laser [W] e velocidade de varredura [mm/s] (Fonte: Adaptada de Mukherjee, T. e DebRoy, T., 2019).

Na Figura 6, vê-se o intervalo de operação entre a taxa de deposição do material, em g/s , e a espessura da camada formada, em μm .

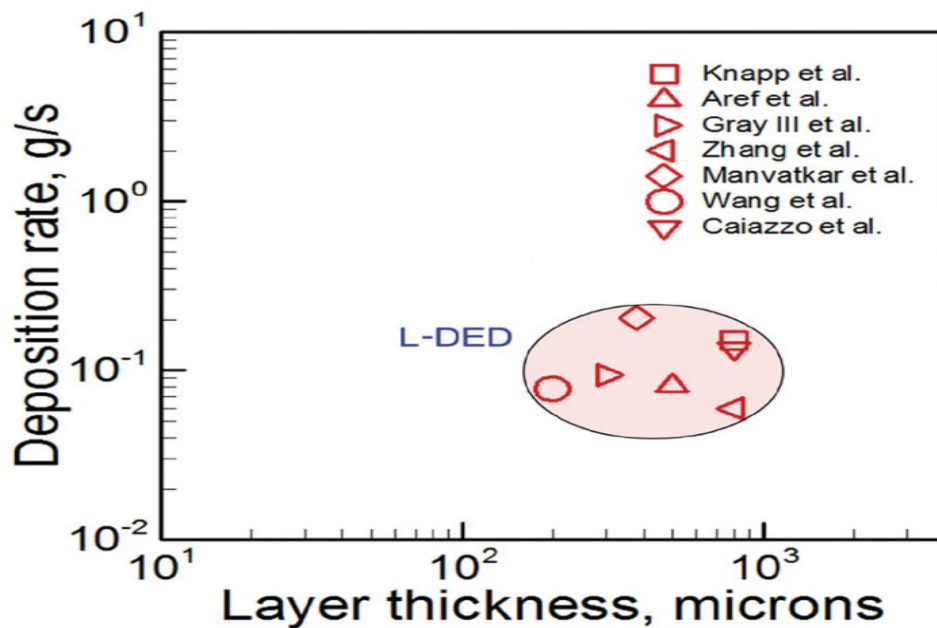


Figura 6 - Intervalo operacional entre os parâmetros de taxa de deposição do material [g/s] e espessura da camada [μm] (Fonte: Adaptada Mukherjee, T. e DebRoy, T., 2019).

A técnica *L-DED* possibilita o uso de diferentes materiais e a combinação de pós metálicos com o objetivo de obter uma peça de maior qualidade, tanto em termos de acabamento final quanto na manutenção de suas propriedades (MIEDZINSKI, 2017).

Após a construção da peça, é indispensável que a peça seja usinada ao seu formato final e que as superfícies externas recebam um acabamento, viabilizando o uso do componente à sua finalidade produtiva (VOLPATO, 2017).

Devido às rugosidades, desníveis e rebarbas de materiais – cujo surgimento são inerentes ao processamento por *L-DED* – a tecnologia ainda é incapaz de, por conta própria, produzir um objeto de uso imediato e com alto grau de acabamento. É necessário que seja feita uma usinagem de acabamento no material, além de um possível processo de polimento da superfície metálica (VOLPATO, 2017). Estas medidas garantem a confecção de um produto final de maior homogeneidade, e com menores chances de apresentarem danos estruturais quando estiverem submetidas a desempenho.

Na Figura 7, é possível visualizar a composição das camadas de material que formam a geometria de uma peça produzida por *L-DED* e o seu grau de acabamento logo após processamento.



Figura 7 - Detalhe do acabamento superficial de uma peça produzida pela técnica *L-DED* (Fonte: Springer Link, Pei-Yi Lin, 2020).

2.2. Fadiga de Altíssimo Ciclo

O estudo do comportamento em regime *VHCF* envolve a devida fundamentação do conceito de fadiga e de seus regimes de operação.

Uma vez que a falha por fadiga é um assunto de ampla relevância no ambiente industrial e tendo em vista que os avanços tecnológicos estão continuamente proporcionando o aumento da vida útil de peças mecânicas, é de extrema importância que projetos de peças estruturais sejam modelados por processos, respeitando a avaliação de integridade do material e os seus mecanismos de degradação e fratura (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

Portanto, é fundamental abordar os detalhes teóricos indispensáveis à definição da fadiga e as características do processo de trincamento.

2.2.1. Conceito de Fadiga

Uma vez que componentes mecânicos são projetados para fins estruturais e são designados de acordo com diferentes princípios de funcionamento – no setor naval, agrônômico, aeroespacial, automobilístico, ... –, os mesmos estão sujeitos a falhar em serviço, configurando condições de fadiga.

Na Figura 8, a seguir, observa-se uma peça estrutural que fadigou e que apresenta acúmulo de dano no material, sendo um caso de falha mecânica.



Figura 8 - Fadiga de um componente mecânico (Fonte: Metalografia, 2020).

Em termos de definição, a fadiga pode ser entendida como um tipo de falha mecânica causada primariamente pela aplicação repetida de cargas variáveis, caracterizando o surgimento de uma trinca e a sua gradativa propagação, até a eventual fratura da peça. As falhas estruturais – chamadas de “mecânicas” – são causadas primariamente pelas tensões ($\Delta\sigma$) induzidas das cargas de serviço atuantes no componente ao longo de sua vida operacional (CASTRO e MEGGIOLARO, 2009).

As falhas por fadiga se dão de forma local, apresentando aspectos cumulativos e de progressividade. A sua modelagem envolve o devido entendimento das fases do processo de trincamento: iniciação, propagação e fratura do material (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

Inicialmente, as trincas são nucleadas, especificamente em algum ponto de maior concentração de tensão, que pode ser definido como o ponto crítico da peça. Na região deste ponto crítico, existem pequenos defeitos, capazes de amplificar em sua vizinhança uma tensão de tração aplicada, viabilizando a formação de uma trinca (CALLISTER e RETHWISCH, 2016). A nucleação da trinca tem relação direta com aspectos da geometria da peça, com o seu material, com o seu acabamento e com o histórico cíclico de tensões ($\Delta\sigma$) e deformações ($\Delta\varepsilon$) atuantes (CASTRO e MEGGIOLARO, 2009).

Posteriormente, na etapa de propagação, a trinca cresce lentamente e de uma maneira estável, não tendo influência significativa na alteração de parâmetros globais e da maioria das propriedades mecânicas da peça (CASTRO e MEGGIOLARO, 2009).

Nesta fase, o crescimento da trinca é controlado pela variação do fator de intensidade de tensões, ΔK – parâmetro que caracteriza o campo de tensões na ponta da trinca, de acordo com dados da geometria e dimensão da trinca e tensões aplicadas – conforme a equação I.

$$\Delta K = Y * \Delta\sigma * \sqrt{\pi * a} \quad (I)$$

“Y” é um fator adimensional que quantifica o efeito de todos os parâmetros geométricos da trinca e do corpo de prova, que afetam o campo de tensões nas estruturas trincadas, “ $\Delta\sigma$ ” define a variação de tensões de carregamento aplicadas e “a” é o comprimento da trinca.

A partir de um certo momento, verifica-se uma alteração no modo de deslocamento da trinca. Figura-se um novo regime de propagação da mesma, que passa a ser instável e que determina uma condição de estado crítico, onde o material está iminência de atingir a falha final. (CASTRO e MEGGIOLARO, 2009).

Nesta mudança do limiar de propagação da trinca, que delimita a etapa de dano absoluto da peça, a trinca resultará em uma falha terminal. Nesta fase, as deformações plásticas presentes não são mais suportáveis pela seção transversal do material, e, a trinca se propaga instantaneamente e de modo brusco, culminando na fratura da peça (CASTRO e MEGGIOLARO, 2009).

Na Figura 9, é possível observar a geometria da região de falha do corpo de prova, com as identificações das 3 regiões do processo de trincamento, onde vê-se as suas fases em um esquema ilustrativo – item (i) – e em uma imagem real da seção transversal de um CP que fraturou – item (ii).

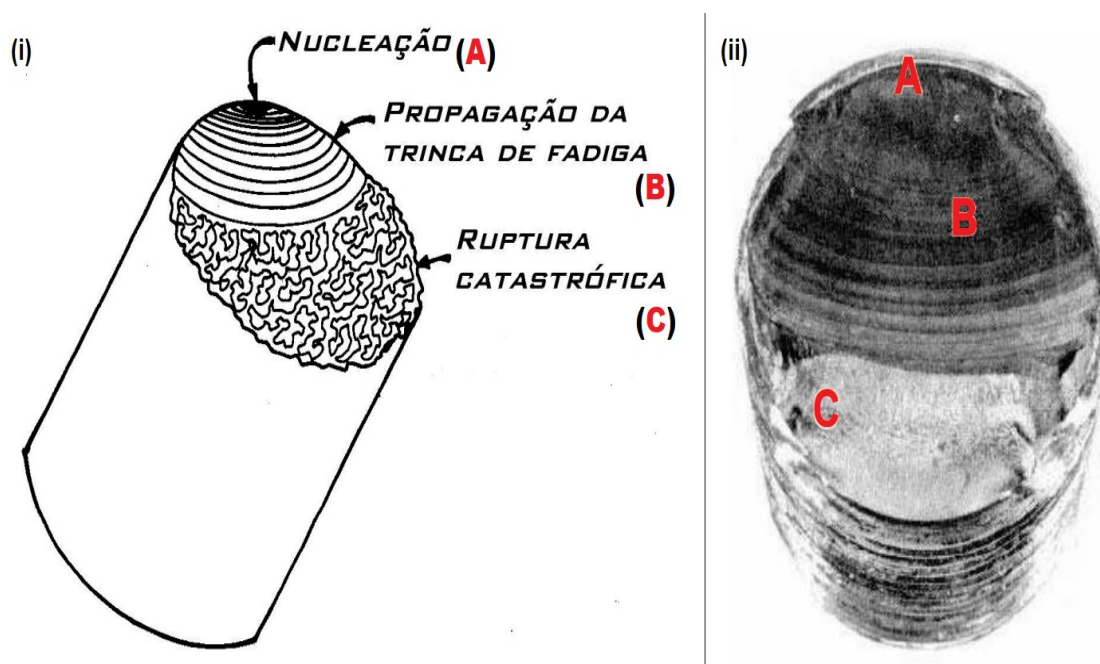


Figura 9 - Identificação das regiões do processo de trincamento em (i) Esquema ilustrativo e em (ii) CP fraturado (Fonte: Adaptada de Budynas, R. e Nisbett, J., 2011).

2.2.2. Método S-N

De acordo com as metodologias mais tradicionais e consolidadas na literatura, tendo em vista que máquinas e estruturas são projetadas à fadiga, operando sob tensões elásticas, o Método *S-N*, é uma ferramenta muito apropriada no objetivo de evitar ou prever a iniciação de trincas por fadiga para vidas longas.

Também conhecido como Método de Wöhler – renomado cientista alemão que desenvolveu este trabalho em meados do século XIX –, o modelo correlaciona o leque de tensões ($\Delta\sigma$) elásticas cíclicas atuantes nos pontos críticos de amostragens constituídas por corpos de prova, com o número de ciclos (*N*) que o material resiste até a falha (CASTRO e MEGGIOLARO, 2009).

A curva *S-N* é traçada para variados níveis de tensão, a partir do conjunto de dados obtidos empiricamente, em que há o empilhamento de pares ordenados de tensão e número de ciclos nesta formulação de curva (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

Na Figura 10, observa-se uma curva *S-N* típica, segundo a literatura.

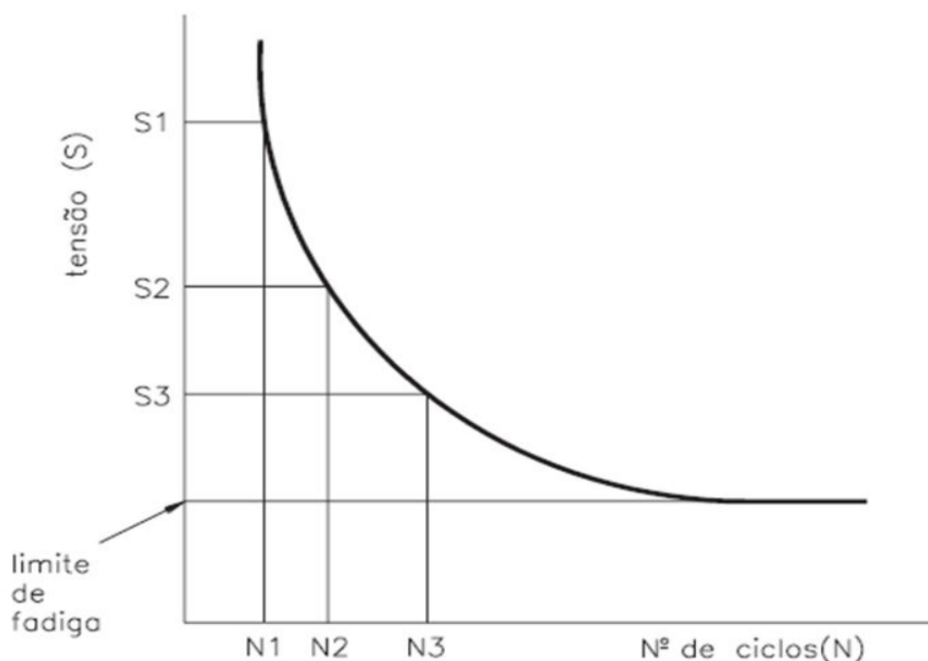


Figura 10 - Curva *S-N* típica (Fonte: CEFET-MG, Luiz Botelho, 2009).

Vê-se na figura anterior, a abordagem do conceito de limite de fadiga (LF), que é compreendido como a tensão máxima admissível que não provoca a falha por fadiga do material. Uma vez que este fenômeno pode estar associado a qualquer amplitude de tensão (σ_a), é usual assumir para LF, um valor que garanta um elevado número de ciclos, da ordem de 10^7 , por exemplo (FONTES, 2008).

No entanto, determinadas classes de materiais – ao exemplo de materiais metálicos ferrosos e não-ferrosos – apresentam comportamentos distintos quando submetidos à fadiga (CALLISTER e RETHWISCH, 2016). Na Figura 11, é possível verificar que pela curva *S-N*, não necessariamente, um material possui um limite de fadiga, e consequentemente, uma “vida infinita” em fadiga – como antigamente se imaginava (DOWLING, 2013). Em (a), observa-se uma curva *S-N* com a identificação do limite de fadiga do material e a linearização horizontal da curva; e em (b), observa-se o decaimento da curva *S-N* pela não existência de um limite de fadiga do material.

O comportamento assintótico de estabilização da curva, portanto, está sujeito a mudanças de acordo com o material estudado e, quando não há um limite de fadiga, a curva *S-N* apresenta um decaimento a partir de 10^6 - 10^7 ciclos (DOWLING, 2013).

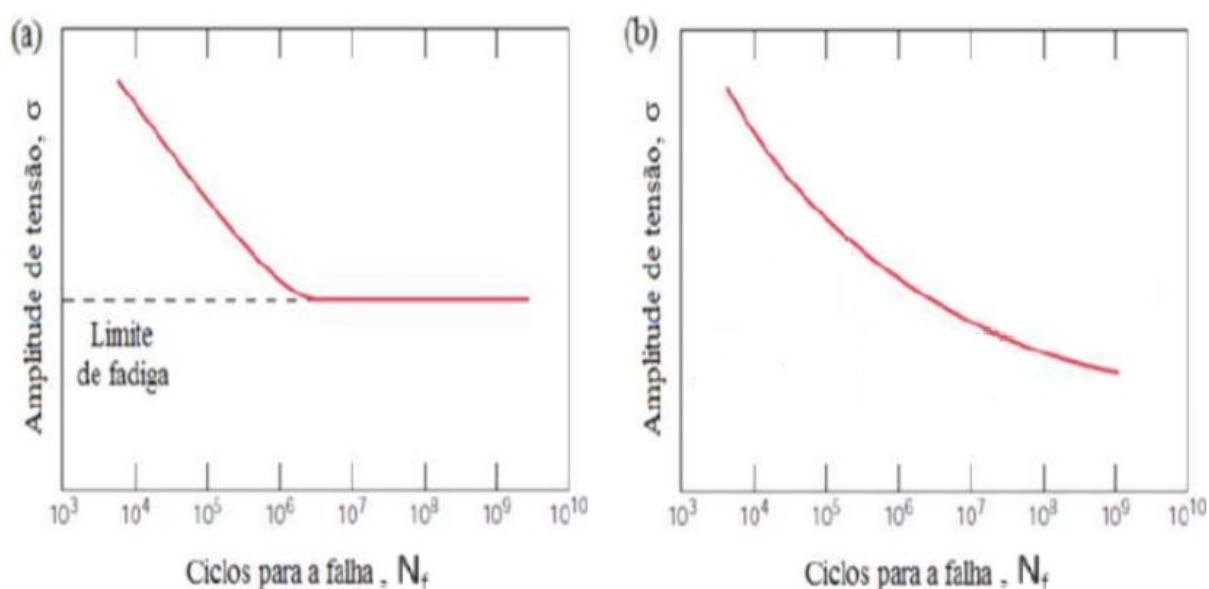


Figura 11 - (a) Curva *S-N* de um material que apresenta um limite de fadiga e, portanto, "vida-infinita" em fadiga; (b) Curva *S-N* de um material que não apresenta um limite de fadiga (Fonte: EESC - USP, Marcelo Paes, 2021).

Na Figura 12, é possível visualizar uma curva $S-N$ e um gráfico ilustrando o comportamento oscilatório de acordo com diferentes amplitudes de tensões. Observa-se que para um nível de tensão de ensaio, tratando-se de um parâmetro variável, têm-se tensão: máxima (σ_{max}), média (σ_m) e mínima (σ_{min}), ao longo de cada ciclo de carregamento (CALLISTER e RETHWISCH, 2016).

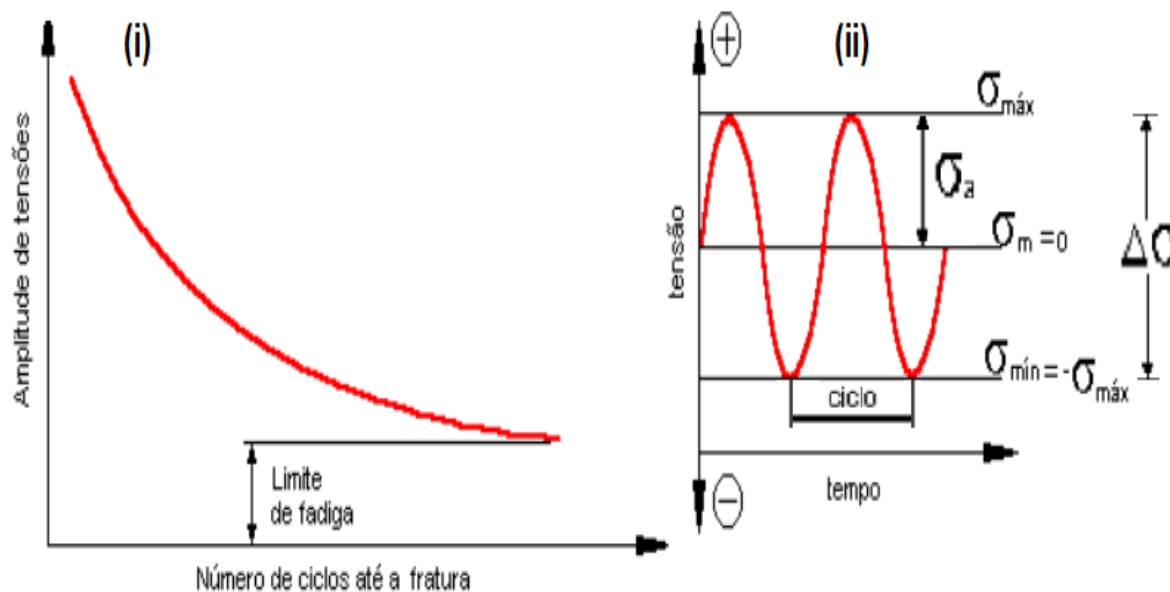


Figura 12 - (i) Curva $S-N$; (ii) Distribuição das tensões atuantes em um ciclo de carregamento (Fonte: Adaptada de UNIFEI, Ronnie Shibata, 2022).

2.2.3. Regimes de Fadiga

O contínuo desenvolvimento das metodologias e dos estudos experimentais, permitiu a atribuição de regimes de fadiga, que se relacionam com o número de ciclos de carregamento atingidos pelos materiais.

É possível descrever a fadiga em três regimes: fadiga de baixo ciclo (*Low Cycle Fatigue – LCF*), fadiga de alto ciclo (*High Cycle Fatigue – HCF*) e fadiga de altíssimo ciclo (*Very High Cycle Fatigue – VHCF*).

No regime *LCF*, o controle da falha se dá pela deformação, em que se submete o material a elevadas amplitudes de tensão, acima do seu limite de escoamento, e devido às deformações plásticas sofridas pelo material, a falha ocorre em um número reduzido de ciclos em comparação com a falha em regime *HCF* (DOWLING, 2013).

No regime *HCF*, o controle da falha se dá pelas amplitudes de tensão atuantes. As faixas de tensões aplicadas são menores do que no regime *LCF*, justamente com o objetivo de que as deformações plásticas sofridas pelo material, levem o mesmo à falha sob um maior número de ciclos de carregamento (DOWLING, 2013).

A fronteira entre o regime *LCF* e o regime *HCF* é definida pela transição entre as zonas elásticas e plásticas de deformação do material, que dependem da ductilidade do mesmo. A separação dessas regiões é de caráter específico para cada material, no entanto, costuma-se adotar o número de 10^4 ciclos de carregamento como o divisor de regimes (DOWLING, 2013).

Cabe também a definição do regime de fadiga de altíssimo ciclo (*Very High Cycle Fatigue – VHCF*), que é delimitado por 10^7 – 10^{12} ciclos de carregamento. Trata-se de um regime que apresenta muito espaço para estudos e desenvolvimento de ensaios, uma vez que máquinas e equipamentos são projetados, visando desempenho com maior vida em serviço e resistência à fadiga (CASTRO e MEGGIOLARO, 2009).

Na Figura 13, os 3 regimes de fadiga podem ser identificados: *LCF*, *HCF* e *VHCF*. Trata-se da curva do comportamento em fadiga do aço SUJ2 – aço de alto carbono com elevada presença de cromo, e que é muito utilizado na indústria na produção de rolamentos por apresentar boa resistência ao desgaste.

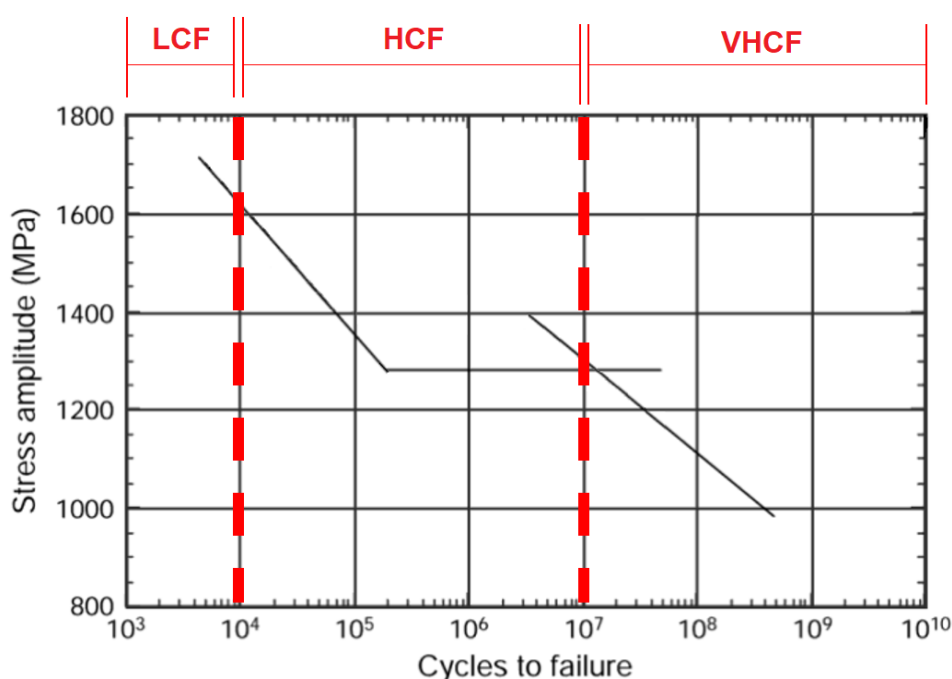


Figura 13 - Curva S-N com a representação dos regimes de fadiga: *LCF*, *HCF* e *VHCF* (Fonte: Adaptada de NICHOLAS, 2006).

2.2.4. Equipamento Ultrassônico

O salto tecnológico decorrente do aprimoramento dos equipamentos envolvidos nos ensaios de fadiga, se tornou responsável pelo encurtamento de tempo dos experimentos e pela diminuição de custos associados à análise do comportamento *VHCF* de materiais. Neste âmbito, a introdução de máquinas capazes de atuar com frequências ultrassônicas – da ordem de $20 \pm 0,5$ kHz – tornou dispensável a necessidade de uma vasta disposição temporal para se alcançar o regime de fadiga de altíssimo ciclo (SHIMADZU, 2021).

Hoje em dia, vê-se como esta nova configuração das máquinas de ensaio permite que, por exemplo, se atinja 10^7 ciclos em 10 minutos, ou então, 10^8 ciclos ao redor de 1 hora e 30 minutos. O alcance do número de ciclos que caracterizam o regime *VHCF* – 10^7 - 10^{12} ciclos – é muito mais acessível em reduzidos intervalos temporais ao se adotar equipamentos ultrassônicos, quando comparado à atuação de equipamentos com frequências de 20 Hz a 300 Hz, cujos ensaios envolvem semanas a meses (SHIMADZU, 2021). Na Figura 14, a seguir, observa-se o gráfico entre o tempo de ensaio de fadiga, em horas, e o número N de ciclos atingidos, para maquinários de diferentes frequências de operação.

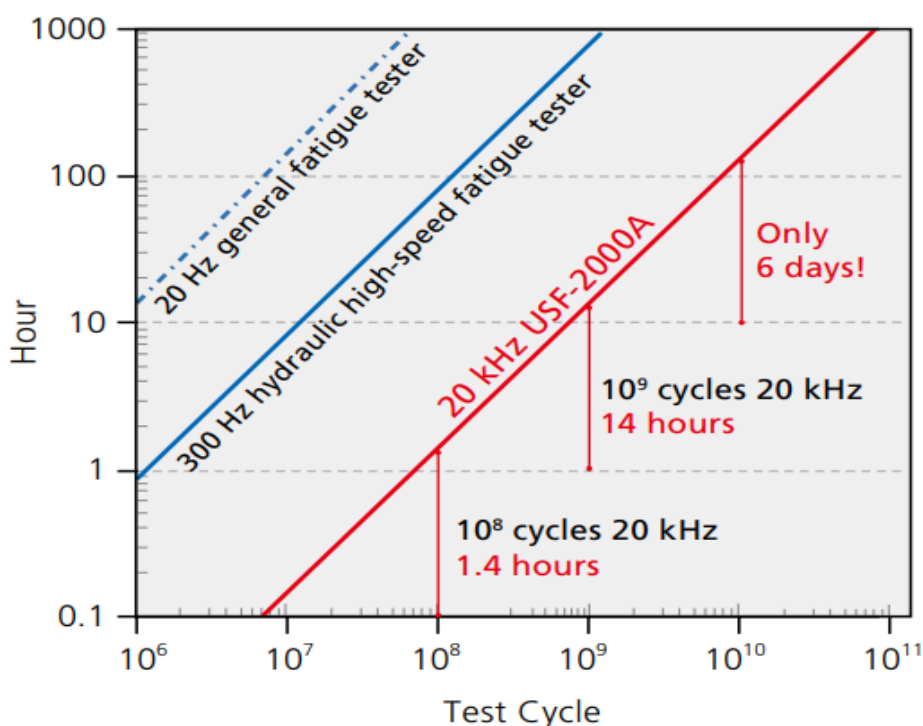


Figura 14 - Gráfico comparativo entre o tempo de ensaio e o número de ciclos, de acordo com diferentes equipamentos de fadiga (Fonte: Shimadzu, 2021).

Como visto anteriormente, o uso de dispositivos ultrassônicos se destaca pela vantagem na obtenção de resultados em um curtíssimo intervalo de tempo. De tal modo, o equipamento ultrassônico SHIMADZU USF-2000A, que se encontra no Laboratório de Fadiga de Altíssimo Ciclo – LABFADAC – da PUC-Rio, foi utilizado neste trabalho. Trata-se de um maquinário extremamente moderno que trabalha em condições de ressonância, estabelecendo carregamentos cíclicos de tensão para a realização de ensaios *VHCF* (SHIMADZU, 2021).

Os equipamentos ultrassônicos podem possuir uma configuração distinta em cada laboratório que estão presentes, porém certos componentes são comuns entre si. Inicialmente, um gerador ultrassônico atua na transformação de um sinal elétrico de 50 ou 60 Hz em um sinal elétrico ultrassônico senoidal, cuja frequência é de $20 \pm 0,5$ kHz. Posteriormente, um conversor piezoelétrico recebe a emissão deste sinal e o converte em uma onda ultrassônica longitudinal e em vibrações mecânicas de mesma frequência.

Em uma etapa seguinte, um amplificador ultrassônico aumenta a amplitude da vibração recebida, em que o intervalo de tensão atuante no corpo de prova se relaciona com a geometria do amplificador e com o sinal elétrico recebido pelo conversor. Por fim, faz-se a menção do uso de um computador como meio de aquisição de dados e que permite o controle contínuo dos valores de tensão aplicados, além de certos parâmetros operacionais (SHIMADZU, 2021).

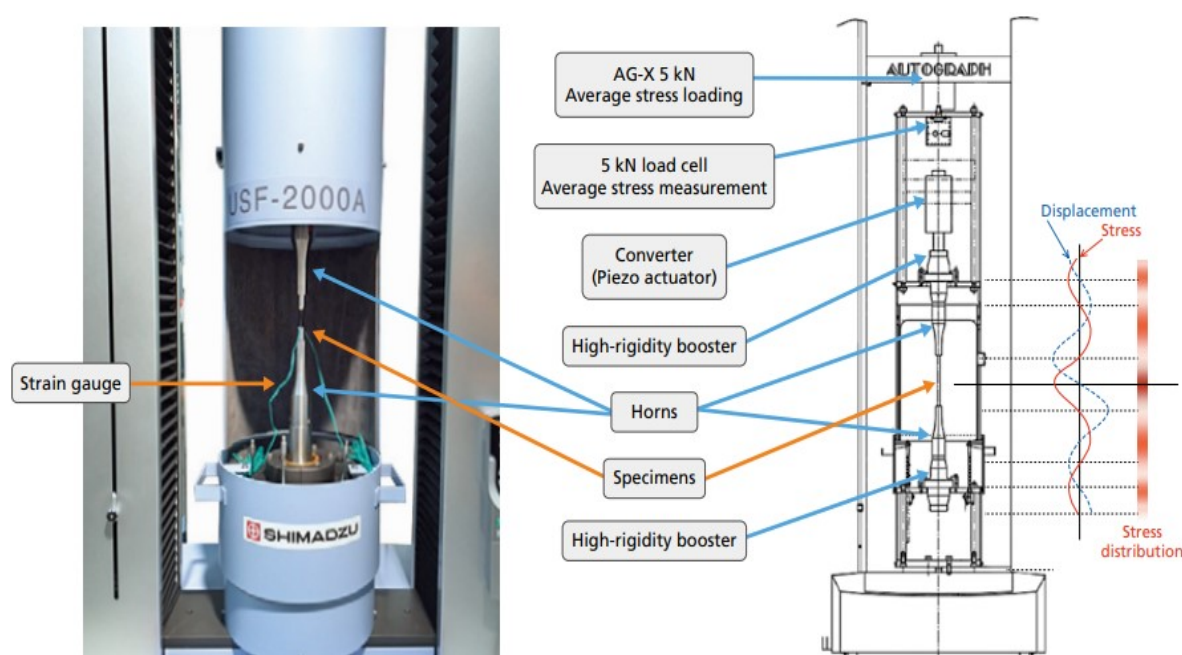


Figura 15 - Componentes do equipamento ultrassônico (Fonte: Shimadzu, 2021).

Na Figura 15, ilustrada anteriormente, observa-se os componentes do equipamento ultrassônico assim como, a distribuição da amplitude de tensão na disposição no corpo de prova.

Uma vez que os ensaios ocorrem em frequências altíssimas, o CP se aquece e atinge elevadas temperaturas, o que pode ser danoso aos ensaios em regime *VHCF*, caso não haja um sistema de resfriamento atuando no dispositivo. O equipamento ultrassônico utilizado no LABFADAC possui um arranjo de compressor e dutos de um fluido de refrigeração, que resfriam o corpo de prova e auxiliam na manutenção das temperaturas mais adequadas para ensaio dos CPs. (SHIMADZU, 2021). De acordo com dados do fabricante, o dispositivo USF-2000A utiliza como fluido de trabalho, ar comprimido em uma vazão que pode ser maior ou igual a 140 L/min e a uma pressão maior ou igual a 0,2 MPa.

Abaixo, na Figura 16, encontra-se ilustrado um detalhe deste sistema de resfriamento do corpo de prova. Observa-se os dutos de ar comprimido instalados no dispositivo ultrassônico e o direcionamento do fluido à região central do corpo de prova, que registra a maior temperatura dentre todas as áreas do CP, uma vez que é a região em que a amplitude de tensão é máxima.

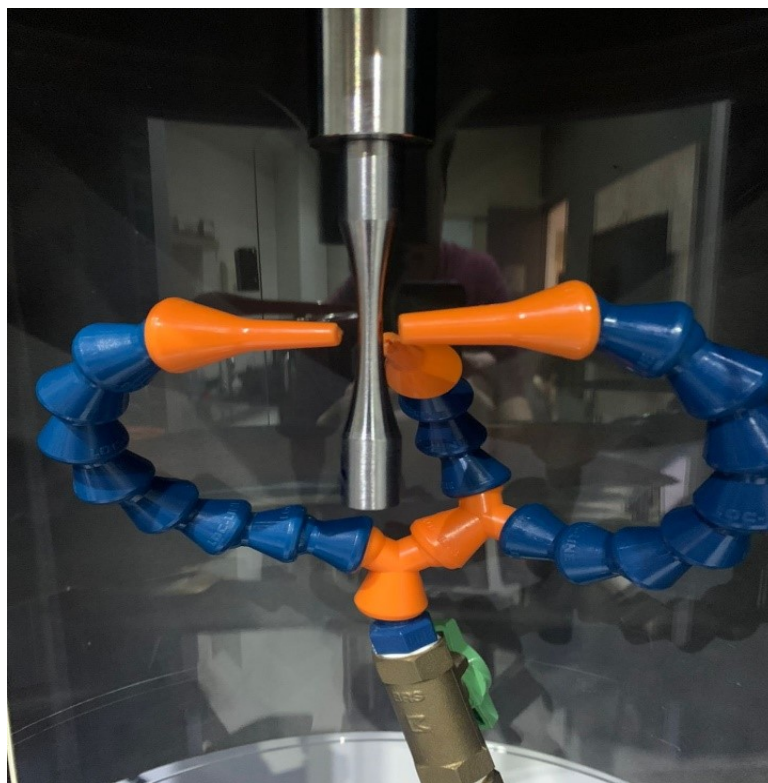


Figura 16 - Detalhe do sistema de resfriamento do CP (Fonte: Autoria própria, 2022).

2.2.5. Fish-eye

No regime de fadiga de altíssimo ciclo, ao se analisar a superfície de fratura de corpos de prova que falharam em um intervalo de 10^7 - 10^{12} ciclos, é possível observar o fenômeno do *fish-eye*.

Trata-se da formação de um aspecto visual característico da falha por fadiga em regime *VHCF*, em que a nucleação e propagação de trincas, se dão de forma circular interna no material. Registra-se como *fish-eye*, o surgimento de uma região circular – cujo diâmetro pode variar entre 0,5 - 1mm de extensão – que envolve uma região microestrutural, aonde uma trinca interna é nucleada no material, geralmente, em um local em que há presença de uma inclusão (KAZYMYROVYCH, 2009).

No regime *VHCF*, em questão, as trincas se iniciam a partir de defeitos internos do material – como poros ou inclusões –, e, ocorre um deslocamento da caracterização do mecanismo de iniciação de trinca para nucleações internas e não mais superficiais, em que se registra o surgimento de *fish-eye* (NICHOLAS, 2006).

Na Figura 17, é possível visualizar a formação de *fish-eye* e as fases A, B, C e D; características do desenvolvimento da trinca em falha por fadiga no regime *VHCF*.

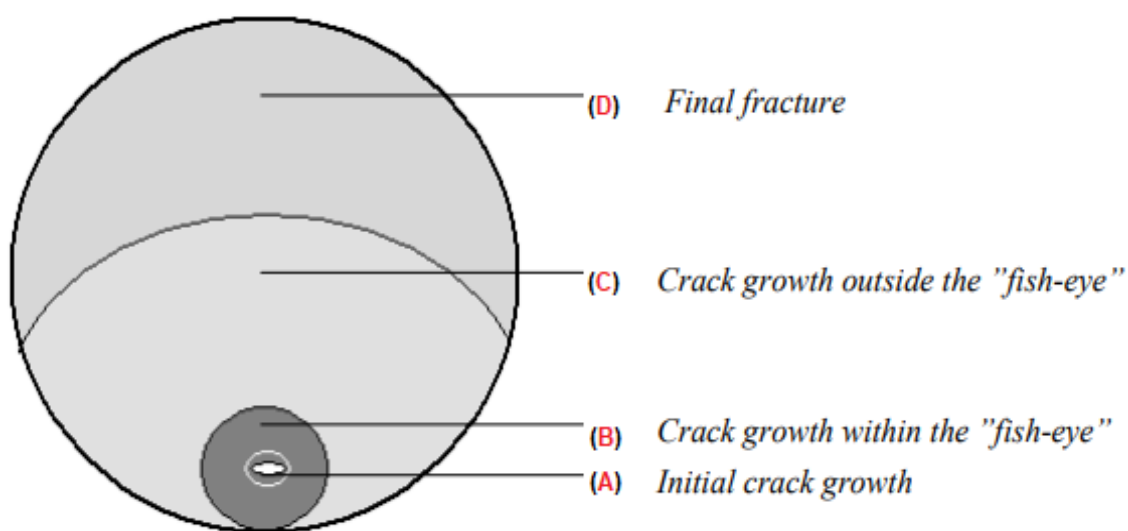


Figura 17 - Esquema da formação de *fish-eye* na falha por fadiga de material em regime *VHCF*. (Fonte: Adaptada de KAZYMYROVYCH, 2009).

Neste processo, é possível descrever as 4 etapas mencionadas anteriormente.

Inicialmente pela fase (A), ocorre a nucleação da trinca, geralmente, pela presença de um defeito interno do material – poros ou inclusões –, que atua como um concentrador de tensão.

Em um momento seguinte, na fase (B), ocorre o crescimento da trinca e a sua propagação dentro da região do *fish-eye*. Na fase (C), a trinca se propaga fora do *fish-eye*, em que se chega à fase (D), que caracteriza a ruptura do material.

Na Figura 18 abaixo, identifica-se tais etapas por meio da visualização da superfície de fratura de um corpo de prova do aço AISI H13 ensaiado em regime VHCF.

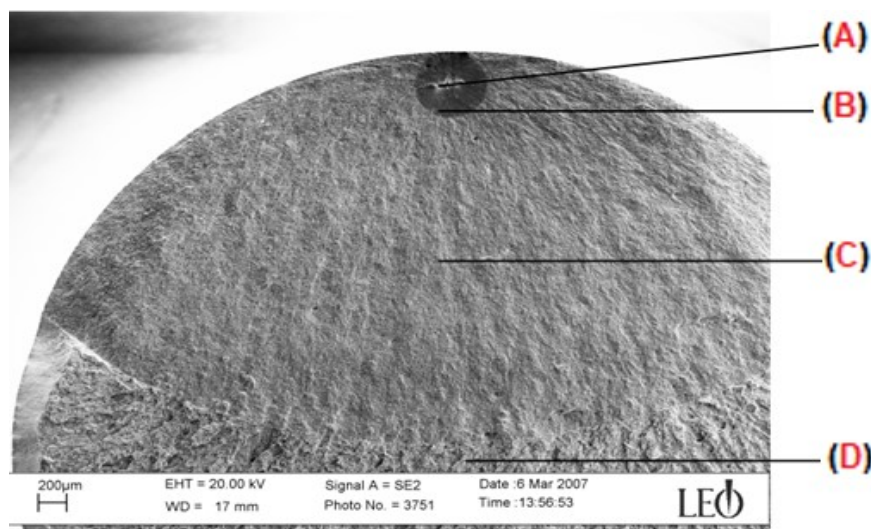


Figura 18 - Superfície de fratura de CP com registro de formação de *fish-eye* (Fonte: Adaptada de KAZYMYROVYCH, 2009).

Na Figura 19, observa-se a formação de *fish-eye* e a propagação da trinca nucleada internamente em um poro, de um CP composto pela liga de titânio TC17.

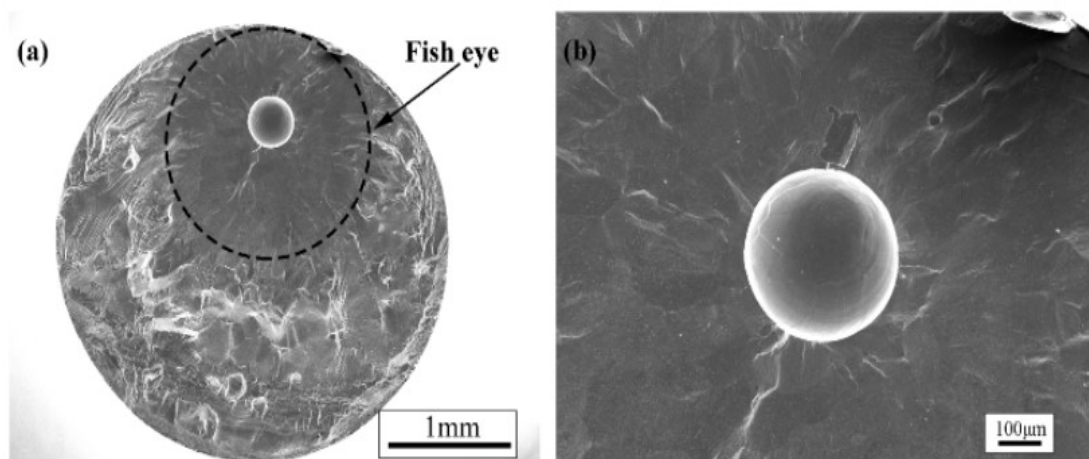


Figura 19 - (a) Superfície de fratura de CP com formação de *fish-eye*; (b) Vista ampliada do *fish-eye* com visualização da região de propagação da trinca (Fonte: Fulin Liu, 2019).

3 METODOLOGIA

3.1. Materiais

O material para produção via técnica *L-DED* da manufatura aditiva e posterior análise de comportamento em regime *VHCF*, foi uma liga metálica de ampla aplicação na indústria e na fabricação de componentes de engenharia.

Foi levada em consideração, a adoção de um material que apresentasse boas propriedades mecânicas e de corrosão e que já tivesse um uso consolidado nas técnicas de manufatura aditiva (SABOORI et al., 2020).

3.1.1. Aço Inoxidável 316L

O aço inoxidável 316L foi utilizado como o material deste trabalho. Trata-se de um aço austenítico, que se caracteriza pela alta presença de cromo e níquel em sua liga. É amplamente utilizado na indústria brasileira e no cenário internacional, com finalidades estruturais, especialmente nos setores aeroespacial, ferroviário, naval, automotivo, petroquímico e médico (GOMES e WILTGEN, 2019).

Este material é muito utilizado para processamento pela excelente capacidade de preservação de suas propriedades mecânicas. O aço 316L apresenta ótimas propriedades de tração, elevada resistência à corrosão e é um material de ótima soldabilidade – capacidade de se unir partes metálicas gerando o menor impacto possível nas propriedades mecânicas e características microestruturais do material resultante (GOMES e WILTGEN, 2019).

O pó metálico do aço inoxidável 316L atomizado a gás da marca Höganäs AB – uma das principais fabricantes mundiais de metais em pó – atende os pontos levantados anteriormente e foi implementado como material no presente estudo (THIESEN, 2021). Foi utilizado o pó metálico do aço de distribuição granulométrica entre 50 e 150 μm .

Na Tabela 2, a composição química do material em formato de pó é descrita de acordo com os dados do fabricante.

Tabela 2 - Composição química do pó de aço inoxidável 316L

Material	% Cr	% Ni	% Mo	% Mn	% Si	% P	% S	% C
Pó de Aço AISI 316L	17	12,5	2,5	1,5	0,8	0,03	0,01	0,02

Fonte: Höganäs AB, 2016.

Na Tabela 3, a composição química do substrato sólido que integra o processo produtivo por *L-DED* é disposta.

Tabela 3 - Composição química do substrato sólido de aço inoxidável 316L

Material	% Cr	% Ni	% Mo	% Mn	% Si	% P	% S	% C
Substrato Sólido Aço AISI 316L	16,5	12	2	1,25	0,5	0,03	0,01	0,02

Fonte: Thiesen Jr., A., 2021.

3.1.2. Condições de Elaboração

Foram definidos dois grupos do aço 316L para a realização dos ensaios ultrassônicos. Uma amostragem de material foi elaborada segundo um modelo de fabricação *As Built* e a outra amostragem recebeu tratamentos térmicos após sua fabricação, configurando uma condição *As Built + H.T. (Heat Treated)*. Este último grupo do material foi submetido aos processos de recozimento e solubilização (THIESEN, 2021). As propriedades mecânicas dos dois arranjos do material de trabalho são exibidas na Tabela 4, a seguir.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas das condições de aço inoxidável 316L

Condição	Limite de Resistência Mecânica [MPa]	Limite de Escoamento [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Massa Específica [g/cm³]
<i>As Built</i>	605	401	200	7,91
<i>As Built + H.T.</i>	575	298	200	7,91

Fonte: Thiesen Jr., A., 2021.

3.2. Processo de Fabricação

No processo de fabricação por manufatura aditiva, toda a metodologia, seleção de parâmetros e escolha do fabricante do pó metálico do aço 316L, foram determinados no Instituto Senai de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser, em Santa Catarina (THIESEN, 2021).

O equipamento *RPM Innovations 535XR Standard System* foi utilizado no processo produtivo pela técnica estudada, e pode ser visualizado na Figura 20, a seguir.

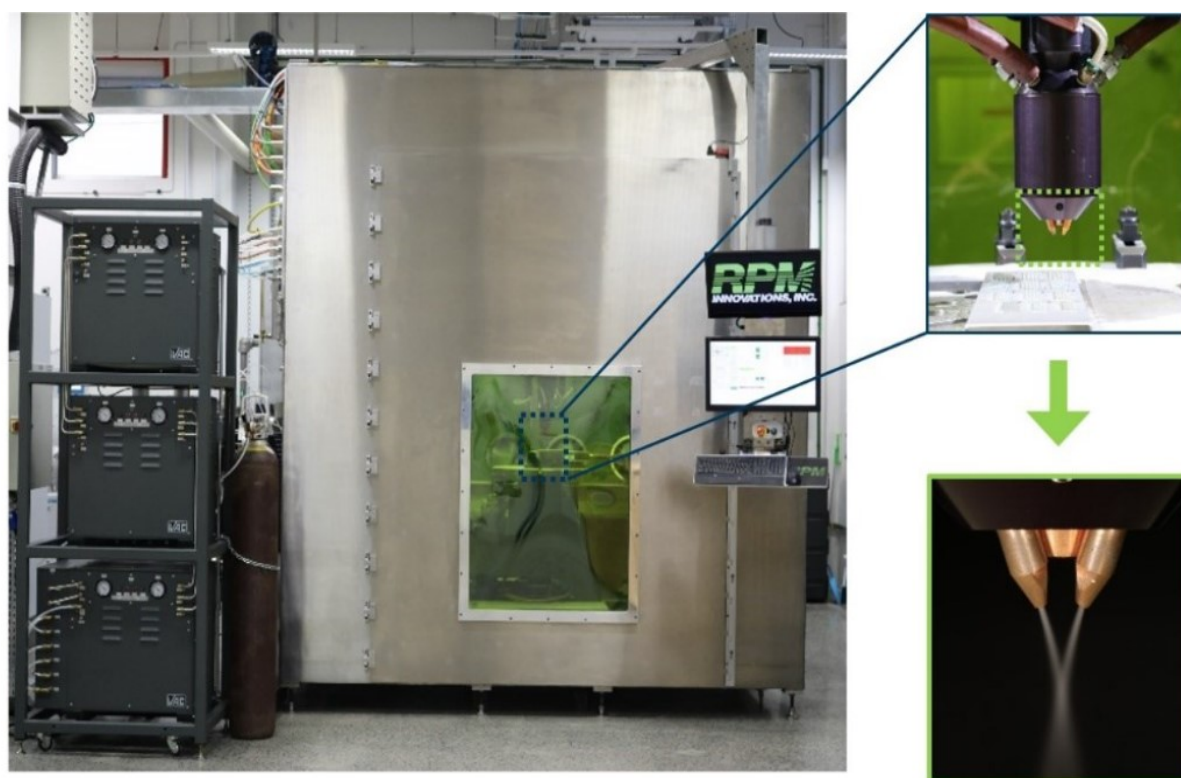


Figura 20 - Equipamento *RPM Innovations 535XR Standard System* (Fonte: Thiesen Jr., A., 2021).

Quanto aos aspectos da técnica L-DED, foram definidos os parâmetros de processo para a fabricação das barras de aço inoxidável 316L e os detalhes da formação e disposição do substrato metálico (THIESEN, 2021).

Baseando-se nas informações técnicas do equipamento, um estudo inicial foi elaborado com o objetivo de verificar o efeito da variação de alguns parâmetros na deposição de camadas singulares de material no substrato (THIESEN, 2021).

Foram estabelecidas janelas de processamento de determinados parâmetros: diâmetro de ponto do laser [*mm*], potência do laser [*W*], velocidade de varredura [*mm/min*] e taxa de deposição do pó metálico [*g/min*]. No *setup* proposto, o diâmetro de ponto do laser foi fixado em um valor e os demais parâmetros foram definidos em faixas distintas (THIESEN, 2021). Na Tabela 5, abaixo, os parâmetros são exibidos.

Tabela 5 - Estudo inicial dos parâmetros de processamento

Parâmetro	Valor
Diâmetro de ponto do laser [mm]	1,78
Potência do Laser [W]	1000 / 1400 / 1800 / 2200
Velocidade de varredura [mm/min]	500 / 1000 / 1500 / 2000
Taxa de deposição de pó metálico [g/min]	20 / 30 / 35

Fonte: Thiesen Jr., A., 2021.

Esta análise prévia foi utilizada para o estudo da deposição de 48 camadas singulares de material. Foram usados 3 blocos de substrato e depositadas 16 camadas únicas em cada, de acordo com as definições de parâmetros estabelecidas anteriormente. O pó metálico do aço 316L foi depositado em camadas de 38,1 mm de comprimento e 12,7 mm de espaçamento entre si, conforme a Figura 21 (THIESEN, 2021).

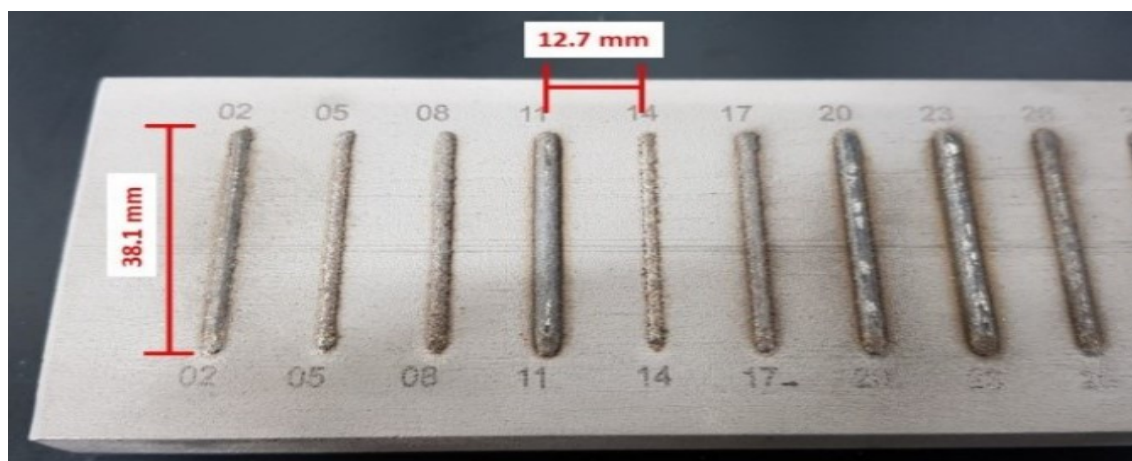


Figura 21 - Deposição do pó metálico em camadas singulares no substrato (Fonte: Thiesen Jr., A., 2021).

Após avaliações das espessuras e da integridade de cada camada, foi possível ajustar a janela de processamento – Tabela 5 – em busca do melhor acerto para a etapa de produção (THIESEN, 2021). Uma nova abordagem permite redefinir os parâmetros conforme o seguinte remanejamento apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Reajuste dos parâmetros de processamento

Parâmetro	Valor
Diâmetro de ponto do laser [mm]	1,78
Potência do Laser [W]	900 - 1900
Velocidade de varredura [mm/min]	762 - 1778
Taxa de deposição de pó metálico [g/min]	30

Fonte: Thiesen Jr., A., 2021.

O substrato sólido foi provido em barras de dimensões: 76 mm x 16 mm x 6000 mm. As barras foram cortadas em seções de 250 mm de altura com tolerâncias máximas admissíveis de ± 3 mm (THIESEN, 2021).

Além desta padronização dimensional do material, visando homogeneizar a dissipação de calor das placas, foram feitos tratamentos de micro jateamento nas paredes do substrato, para elevar o grau de opacidade de suas superfícies metálicas. Uma vez que a superfície do substrato não esteja opaca o suficiente, uma parte da energia emitida pelo feixe de laser pode ser refletida, afetando a absorção de energia do substrato e o processo produtivo (THIESEN, 2021).

Após os devidos ajustes do substrato, o material sólido foi finalmente posto no equipamento. Na Figura 22, vê-se o posicionamento do substrato, que é fixado na mesa de deposição de pó metálico pelo uso de duas placas auxiliares.

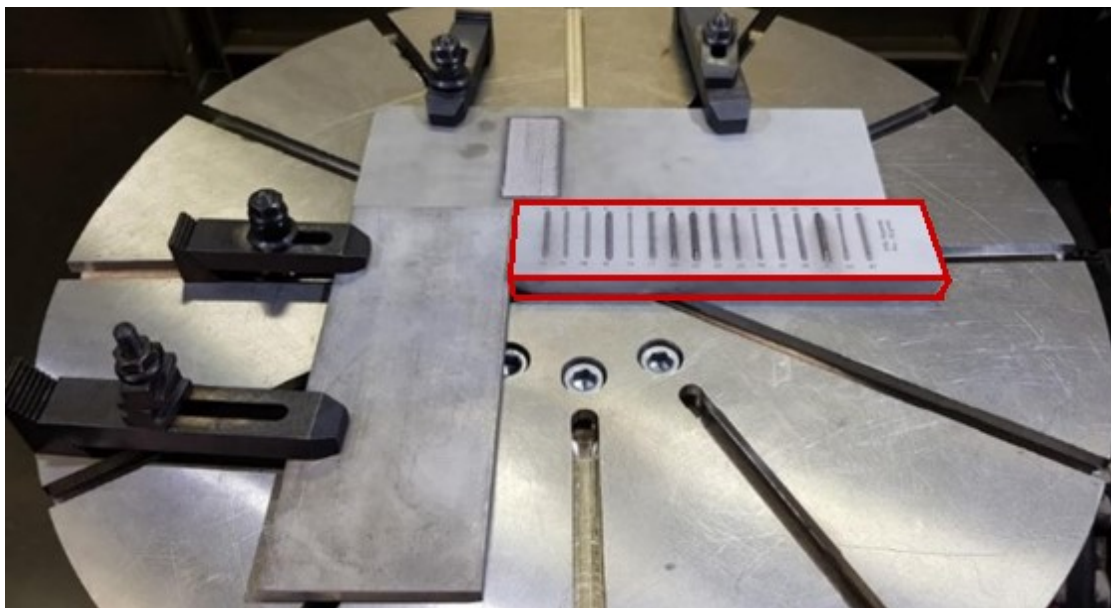


Figura 22 - Substrato posicionado e fixado por placas auxiliares (Fonte: Adaptada de Thiesen Jr., A., 2021).

Posteriormente à etapa de determinação dos parâmetros de trabalho e da definição dos critérios e condições pertinentes ao procedimento produtivo – abordados anteriormente –, pôde-se finalmente produzir barras inteiriças de aço 316L pelo processamento da técnica. As barras podem ser visualizadas detalhadamente ao serem dispostas por seções de corte transversal e longitudinal, conforme a Figura 23.

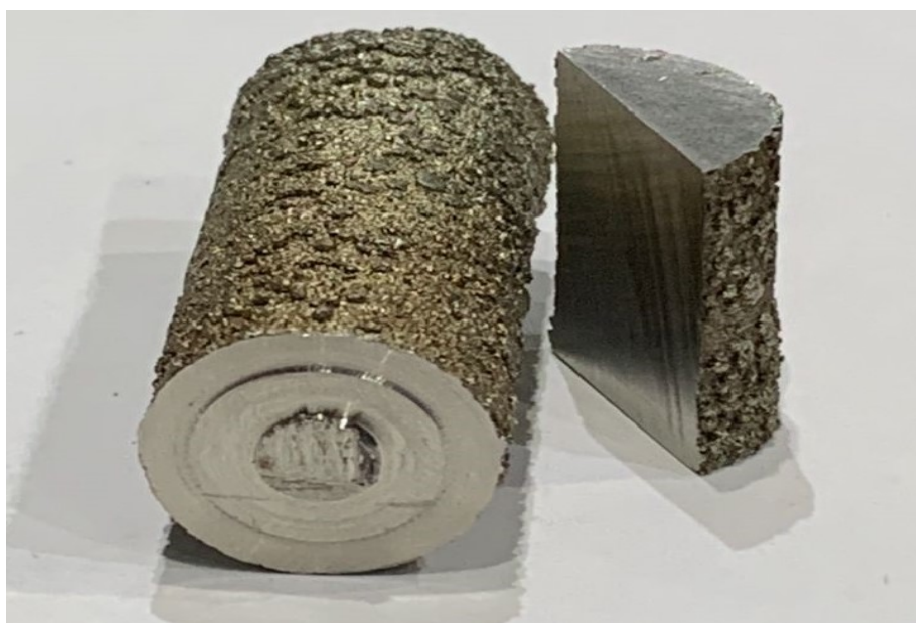


Figura 23 - Cortes de barra de aço 316L produzido via L-DED. (Fonte: Autoria própria, 2022).

O material foi produzido em formato de barras maciças e após a sua confecção por *L-DED* no Instituto Senai de Santa Catarina, foi enviado às instalações da PUC-Rio. Nos laboratórios da Universidade, foi usinado no formato de corpos de prova, recebendo os acabamentos finais para a realização dos ensaios ultrassônicos. Na Figura 24, a seguir, é possível comparar visualmente, a amostra em um estado bruto de pós-fabricação, e o seu estado final de pós-usinagem, com a geometria de corpo de prova apropriada para ser submetida aos ensaios em regime *VHCF*.



Figura 24 - (a) Amostra do aço inox 316L após fabricação por L-DED e (b) Corpo de prova da amostra do material após usinagem, em estado final de corpo de prova (Fonte: Autoria própria, 2022).

3.3. Corpo de Prova

A geometria necessária para que os corpos de prova pudessem ser submetidos aos ensaios de fadiga, foi calculada no programa *Ultrasonic Fatigue Software* de controle de ensaio do equipamento ultrassônico SHIMADZU.

Pela definição do módulo de elasticidade do material (E), de sua massa específica (ρ) e das dimensões L_1 , D_1 e D_2 da geometria do corpo de prova, os cálculos internos no software forneceram o valor do parâmetro L_2 – comprimento de ressonância – do CP. A obtenção de L_2 permitiu que a amostra pudesse atuar em ressonância nos ensaios ultrassônicos, na faixa de $f = 20 \pm 0,5$ kHz.

Na Figura 25, é possível visualizar o painel de controle do software do equipamento ultrassônico, com as definições de certas propriedades do material, da tensão de ensaio e das dimensões L_1 , L_2 , D_1 e D_2 do CP. Além disso, observa-se o número alvo de ciclos estipulado (*run-out*), entre outras informações pertinentes aos ensaios.

UltraSonic Fatigue Software Ver1.02 - C:\Users\USF2000\Desktop\MESTRADO\Matheus\200GPa\316L - MA - HT\HT-D=10 mm\316L HT 04-01-22.cnd

File System Help

Test Condition | Test Execution

☐ Fluctuating Stress Test

TP Material

Material Name: 316 L - MA

E :Young's modulus(MPa): 200000

ρ :Density(g/cm³): 7.91

Comment

Stress conversion factor(MPa/um)

☐ Use input value: 16.349

Amplifier output correction factor

0.997 Adjust correction factor

TP Type

Sarcuratapa Type(Chord)

D1 :Max diameter(mm): 10.00 [4.51 - 20.00]

D2 :Min diameter(mm): 4.00 [1.00 - 8.87]

L1 :Chord Length(mm): 40.00 [1.00 - 100.00]

L2 :TP Shoulder Length(mm): 15.89

Test Condition

Nominal Test Amplitude(MPa): 230 [152(202) - 819]

TP Side Amplitude(um): 12.29

☒ Intermittent driving

Oscillation time(msec): 110 Stop time(msec): 300

100.0

Test End Condition

Max Cycle (cycle): 1.0000E+09 Estimate test time: 2days 08:56:40

Fluctuation band of test frequency (Hz): 500

Figura 25 - Dados utilizados no programa *Ultrasonic Fatigue Software* do equipamento SHIMADZU USF-2000A (Fonte: Autoria própria, 2022).

Os CPs ensaiados foram do tipo ampulheta e uma vez que se tinham os dados geométricos dos corpos de prova – L_1 , L_2 , D_1 , D_2 –, elaborou-se o seu desenho técnico 2D no programa *SolidWorks*. Foram feitas também as especificações da rosca do CP, que foi fabricada para a fixação do mesmo na máquina de ensaio, conforme o detalhamento da Figura 26.

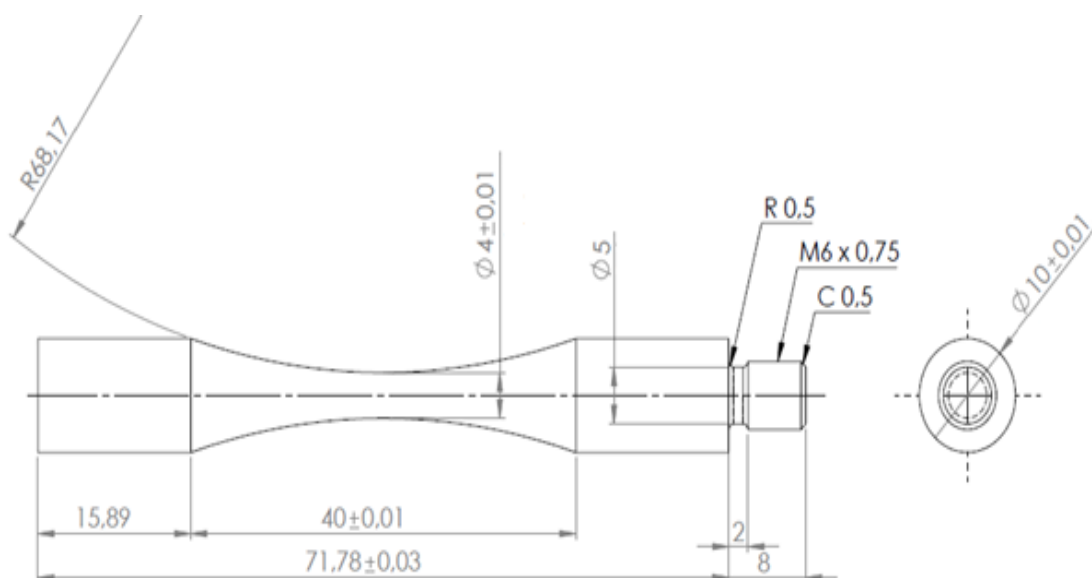


Figura 26 - Desenho técnico 2D da geometria do corpo de prova (Fonte: Autoria própria, 2022).

De tal modo, a obtenção do desenho técnico permitiu a usinagem das amostragens em formato de corpo de prova, respeitando a geometria apropriada para a realização dos ensaios ultrassônicos.

Uma vez que o processo produtivo do material foi finalizado, foram fabricados os corpos de provas cujas designações de ensaio serão abordadas no tópico seguinte.

3.4. Ensaios de Fadiga de Altíssimo Ciclo

O equipamento SHIMADZU USF-2000A presente no LABFADAC da PUC-Rio, e previamente detalhado em seu respectivo tópico na fundamentação teórica deste trabalho, foi utilizado para a realização dos ensaios. Na Figura 27, a seguir, observa-se o sistema da máquina ultrassônica e seus elementos componentes, junto com o computador utilizado como mecanismo de aquisição de dados.

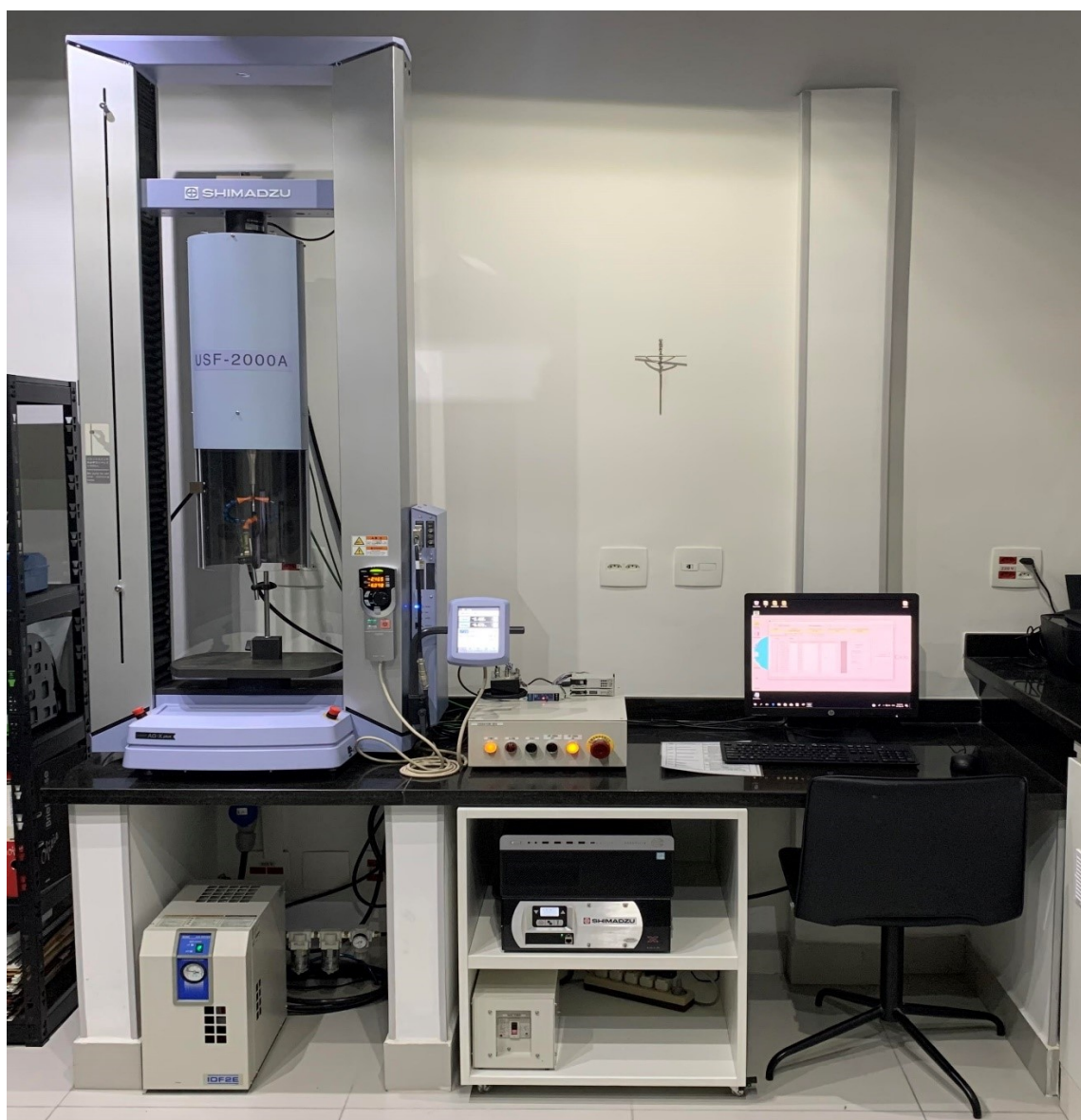


Figura 27 - Equipamento SHIMADZU USF-2000A (Fonte: Autoria própria, 2022).

Após as definições do material de trabalho em condições de estado de elaboração – *As Built* e *As Built + H.T.* – e da geometria dos corpos de prova, foram determinadas as tensões para a realização dos ensaios *VHCF*.

Estabelecendo amplitudes de tensões distintas, respectivamente de $\sigma_1 = 201$ MPa e $\sigma_2 = 230$ MPa, após estudos preliminares em ensaios com diferentes amplitudes de tensão, o comportamento *VHCF* das duas condições de material foi analisado. Definiu-se um número-alvo de 10^9 ciclos para que o ensaio fosse suspenso, de modo que os CPs que alcançassem este número de ciclos, atingiriam *run-out*.

Em uma etapa prévia aos ensaios, durante a fixação do corpo de prova na máquina e introdução dos dados no software do equipamento, o equipamento SHIMADZU também passou por um processo de calibração, que é de fundamental importância na precisão das amplitudes de tensão controladas pela máquina.

O equipamento conta com um sensor de curso, que atua na medição do deslocamento da forma de onda capturada e registrada no software de dados e, o dispositivo possui um calibrador deste sensor de deslocamento – micrômetro de alto desempenho CDE-25-C1 – (SHIMADZU, 2021).

Tendo isso em vista, determinou-se que para cada amplitude de tensão e de acordo com cada arranjo de material, foram elaborados grupos de 2 corpos de prova. Portanto, totalizou-se uma amostragem de 8 CPs ensaiados.

Nos ensaios conduzidos no equipamento SHIMADZU, a falha foi definida de acordo com o momento em que a trinca do CP atinge um tamanho considerável, perdendo rigidez e, então, consequentemente, o corpo de prova sai do regime de ressonância (SHIMADZU, 2021).

Na Tabela 7, observa-se a disposição das condições definidas para ensaio.

Tabela 7 - Definição das condições de ensaio

$\sigma_2 = 230 \text{ MPa}$	
Condição	
<i>As Built</i>	<i>As Built + H.T.</i>
Corpo de Prova	Corpo de Prova
CP 1	CP 3
CP 2	CP 4
$\sigma_1 = 201 \text{ MPa}$	
Condição	
<i>As Built</i>	<i>As Built + H.T.</i>
Corpo de Prova	Corpo de Prova
CP 5	CP 7
CP 6	CP 8

Fonte: Autoria própria, 2022.

Embora os ensaios tenham sido realizados considerando 8 corpos de prova, foram fabricados ao todo 10 CPs. Esta fabricação de 2 CPs extras, garantiu uma margem de segurança ao planejamento do trabalho, uma vez que imprevistos de confecção ou eventuais erros de usinagem do material em formato final de CP, pudessem comprometer alguma unidade ou seu resultado de ensaio.

Portanto, reforça-se que, de maneira cautelar e planejada, foi produzido um lote maior de CPs do que a quantidade submetida a ensaio.

3.5. Análise da Superfície de Fratura

Em uma etapa seguinte aos ensaios ultrassônicos, foi feita uma análise fractográfica de amostras dos CPs, no Laboratório de Caracterização de Materiais da PUC-Rio.

Estes corpos de prova foram levados a uma máquina de tração para a partição dos CPs em duas metades. Em seguida, em uma máquina de corte, amostras da região dos pescoços dos CPs foram cortadas para a observação de suas superfícies de fratura em um microscópio eletrônico de varredura – MEV.

O equipamento utilizado para esta finalidade foi o modelo *Tabletop Microscope TM3000* da marca HITACHI, que se caracteriza por ser um dispositivo de fácil controle operacional, compacto e que atende as necessidades de observação da superfície de fratura, sendo capaz de ampliar imagens em até 30.000x (HITACHI, 2010).

Na Figura 28, abaixo, observa-se o MEV e o computador utilizados na geração das imagens, presentes em uma bancada do laboratório.

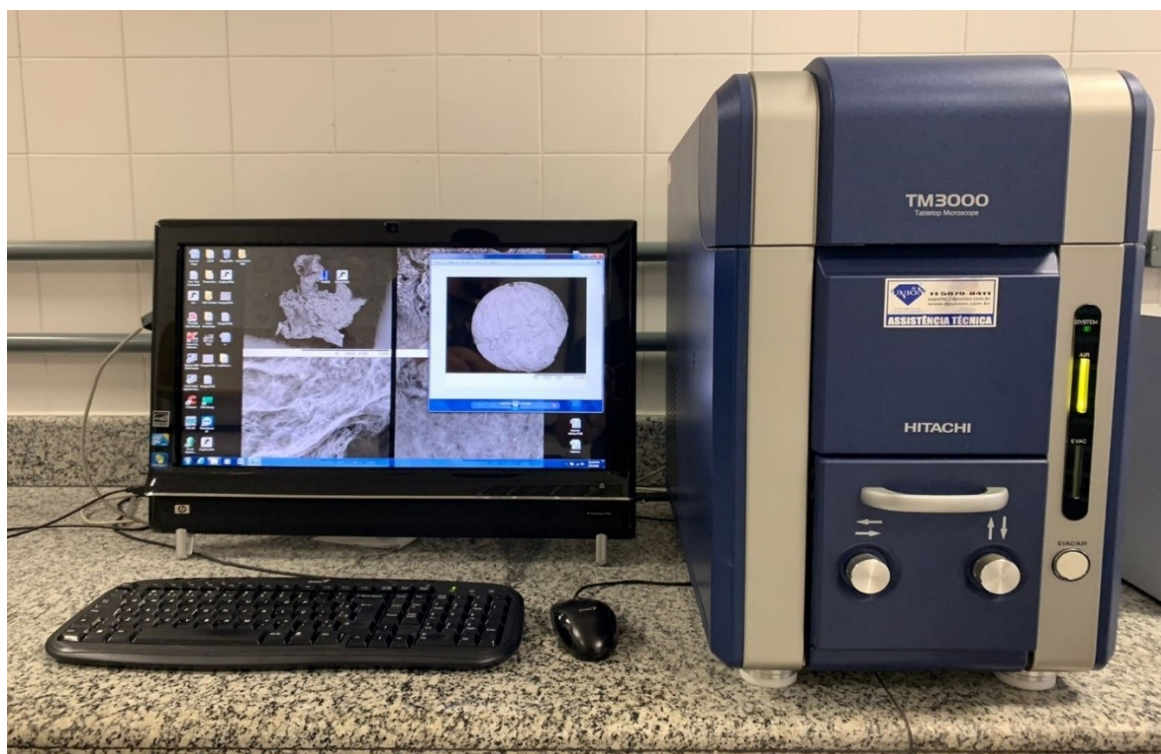


Figura 28 - Equipamento HITACHI TM3000 (Fonte: Autoria Própria, 2022).

4 RESULTADOS

Finalizado o procedimento experimental, os resultados dos ensaios ultrassônicos em regime *VHCF* e as imagens das superfícies de fratura dos corpos de prova que falharam, puderam ser apresentados.

4.1. Ensaios de Fadiga de Altíssimo Ciclo

Na tabela seguinte, observa-se o desempenho dos corpos de prova das duas condições de material, segundo o número de ciclos atingidos para cada amplitude de tensão ensaiada.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios ultrassônicos

$\sigma_2 = 230 \text{ MPa}$			
Condição			
<i>As Built</i>		<i>As Built + H.T.</i>	
Corpo de Prova	Nº de Ciclos	Corpo de Prova	Nº de Ciclos
CP 1	$2,11 \times 10^8$ (falhou)	CP 3	$3,99 \times 10^5$ (falhou)
CP 2	$1,00 \times 10^9$ (<i>run-out</i>)	CP 4	$1,29 \times 10^6$ (falhou)
$\sigma_1 = 201 \text{ MPa}$			
Condição			
<i>As Built</i>		<i>As Built + H.T.</i>	
Corpo de Prova	Nº de Ciclos	Corpo de Prova	Nº de Ciclos
CP 5	$1,00 \times 10^9$ (<i>run-out</i>)	CP 7	$1,00 \times 10^9$ (<i>run-out</i>)
CP 6	$1,00 \times 10^9$ (<i>run-out</i>)	CP 8	$1,00 \times 10^9$ (<i>run-out</i>)

Fonte: Autoria própria, 2022.

A tabela de resultados acima, mostra que para a amplitude de tensão σ_1 , as duas condições de material atingiram *run-out* e, portanto, apresentaram desempenhos favoráveis no regime *VHCF*.

Quanto à amplitude de tensão σ_2 , observou-se uma dispersão maior dos resultados. Na condição *As Built*, os dois corpos de prova entraram em regime *VHCF*. O CP 1 falhou, porém em um número de ciclos da ordem de 10^8 e o CP 2 atingiu *run-out*.

Quanto ao desempenho da condição *As Built + H.T.*, sob essa mesma magnitude de tensão σ_2 , vê-se como o CP 3 e o CP 4 falharam, respectivamente em um número de ciclos da ordem de 10^5 e 10^6 . Constatou-se, portanto, que os dois CPs não entraram em regime *VHCF*.

De tal modo, pode-se dizer que o comportamento da condição *As Built* foi superior ao da condição *As Built + H.T.* na comparação de desempenho das duas condições de material sob a tensão σ_2 .

4.2. Análise da Superfície de Fratura

No microscópio eletrônico de varredura TM3000 da HITOSHI foram produzidas as imagens das superfícies de fratura dos corpos de prova que falharam: CPs 1, 3 e 4.

Ressalta-se que não foram observadas formações de *fish-eye* em nenhum dos CPs, mas sim de trincas superficiais que se propagaram até a falha dos materiais.

Inicialmente, em uma ampliação de 100x, pela Figura 29, observou-se a superfície de fratura do CP 1.

Trata-se de um corpo de prova da condição *As Built*, que falhou no regime *VHCF*. Conforme a figura abaixo, viu-se a nucleação de uma trinca na parte superior da seção transversal do CP. As setas indicam a região da nucleação desta trinca superficial e as possíveis direções de propagação.

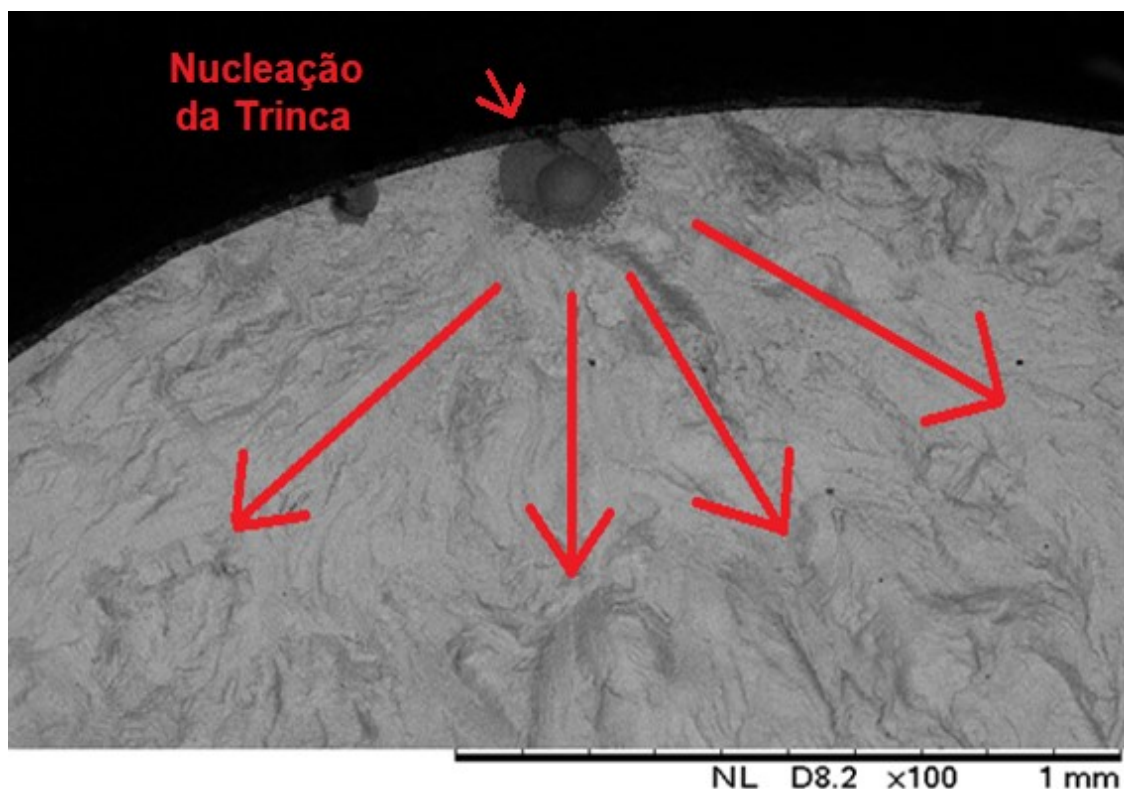


Figura 29 - Superfície de Fratura do CP 1 com ampliação de 100x (Fonte: Autoria própria, 2022).

O surgimento da trinca (A) se deu em uma região marcada pela presença de uma inclusão não-metálica, que atuou como um concentrador de tensão na microestrutura cristalina.

Dada a propagação da trinca (B), visualizou-se a região de propagação estável e lenta, até a mudança para uma região instável e de rápido deslocamento da trinca. A região (C) corresponde à região de fratura final do material.

As regiões A, B e C puderam ser observadas em uma visualização completa da seção transversal do pescoço do CP, em uma ampliação de 30x, disposta na Figura 30, a seguir.

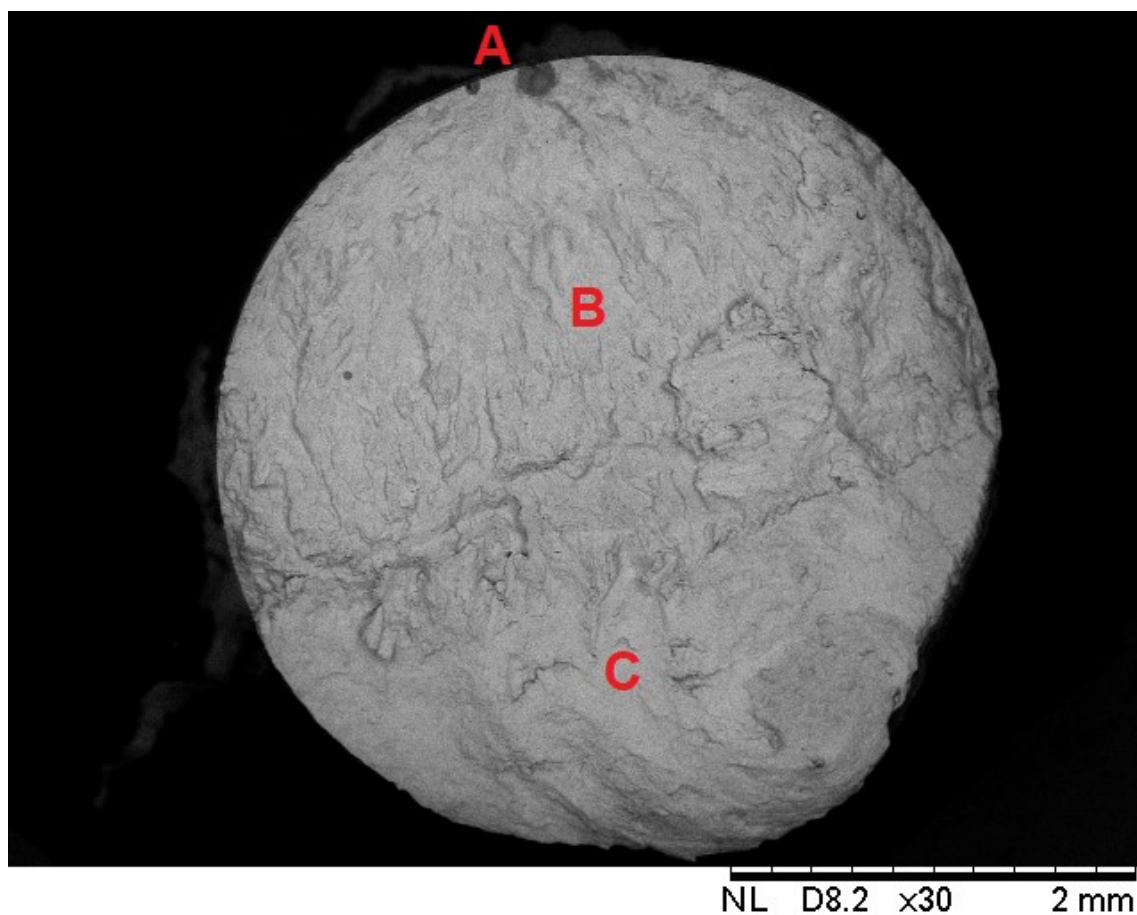


Figura 30 - Superfície de Fratura do CP 1 com ampliação de 30x (Fonte: Autoria própria, 2022).

Observou-se também as superfícies de fratura dos CPs 3 e 4, respectivamente nas Figuras 31 e 32, preservando-se a ampliação de 30x. Os dois corpos de prova – pertencentes à condição *As Built* + *H.T* – falharam sem alcançar o regime *VHCF*.

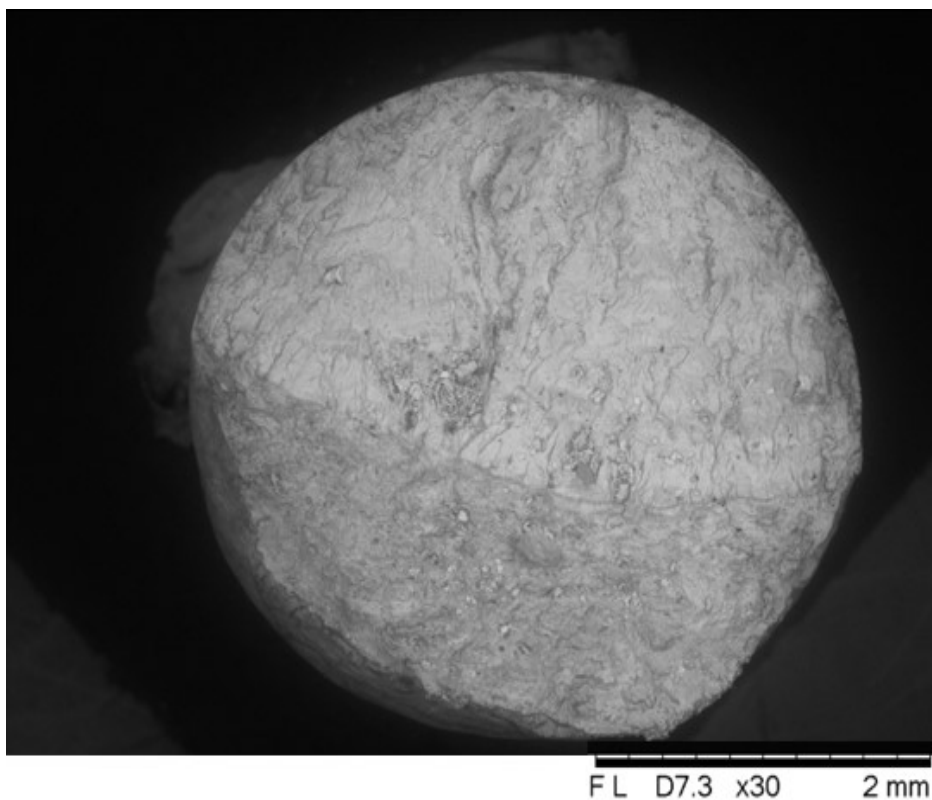


Figura 31 - Superfície de Fratura do CP 3 com ampliação de 30x (Fonte: Autoria própria, 2022).



Figura 32 - Superfície de Fratura do CP 4 com ampliação de 30x (Fonte: Autoria própria, 2022).

5 CONCLUSÃO

Tendo em vista a apresentação dos resultados dos ensaios ultrassônicos de fadiga e das imagens de superfície de fratura dos CPs que falharam, é possível definir as principais conclusões deste estudo.

Nos ensaios realizados com a amplitude de tensão de 201 MPa (σ_1), as duas condições de material atingiram *run-out* e, portanto, apresentaram um desempenho favorável no regime *VHCF*.

Já nos ensaios realizados com a amplitude de tensão de 230 MPa (σ_2), apesar das duas condições de material apresentaram uma dispersão de resultados, a condição *As Built* teve um desempenho superior ao da condição *As Built + H.T.*.

Os tratamentos térmicos aos quais a condição *As Built + H.T.* foi submetida, não representaram melhoras significativas na performance do material, mas sim, uma piora de desempenho frente à condição *As Built*. Esta condição apresentou uma maior longevidade em termos de número de ciclos, pois possui maior resistência à fadiga, uma vez que possui um LRM maior do que a condição tratada termicamente.

Embora saiba-se que tratamentos térmicos são realizados com o objetivo de aprimorar as propriedades mecânicas de um material e, conseqüentemente, o seu desempenho à fadiga, uma vez que já se tinha conhecimento das propriedades dos dois grupos de material e de que o LRM e o LE da condição *As Built + H.T.* eram inferiores ao da condição *As Built*, os resultados mencionados anteriormente são coerentes com os dados de trabalho.

A análise fractográfica dos CPs demonstrou que as trincas nuclearam de modo superficial, e não foi observada a formação de *fish-eye*. Caso fosse possível ter definido *run-out* para um número alvo de ciclos maior que 10^9 , ainda existiria a possibilidade de os corpos de prova falharem ou não, no entanto, seria mais provável que se registrasse o surgimento de *fish-eye*.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de desenvolvimento e continuação para trabalhos futuros, é possível elencar certas ações que serão fundamentais para o refinamento deste trabalho e aumento de sua confiabilidade.

Ensaio em regime *VHCF* poderiam ser feitos para amostragens do aço inox 316L produzido pelos métodos tradicionais de usinagem, de modo a se comparar a resistência deste material com aquele produzido por manufatura aditiva.

É essencial que um número maior de corpos de prova seja submetido às mesmas condições de ensaio, visando a diminuição da margem de erros associados aos testes realizados e a validação dos resultados obtidos, permitindo a realização de um tratamento estatístico das informações.

Além disso, a realização de ensaios com diferentes amplitudes de tensões possibilitará o levantamento da curva *S-N*.

Estudos mais aprofundados acerca dos impactos dos parâmetros de processamento da técnica *L-DED* na microestrutura cristalina do material podem ser elaborados, no sentido de uma otimização ainda maior da janela operacional dos parâmetros da MA.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, W. & RETHWISCH, D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução – 9ª Edição**. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2016.

CASTRO, J. & MEGGIOLARO, M. **Fadiga – Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço. Volume I – Iniciação de Trincas**. Createspace Independent Publishing Platform, United States, 2009.

DOWLING, N. **Mechanical Behavior of Materials – Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue – Fourth Edition**. Pearson Education Limited, Essex, England, 2013.

FONTES, F. **Previsão do Desempenho de Componentes para Sistemas de Ancoragem Sob Carregamentos Monotônicos e Cíclicos**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2008.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B.; KHORASANI, M. **Additive Manufacturing Technologies - Third Edition**. Springer, Boston, Massachusetts, 2021.

GOMES, J. & WILTGEN, F. **Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas**. Revista Tecnologia, Fortaleza, Ceará, 2020.

HITACHI HIGH-TECHNOLOGIES CORPORATION. **Next Generation Tabletop Microscope TM 3000 Offers Smaller Size and Ease-of-Use with Improved Functions**. Available at: <https://www.hitachi-hightech.com/global/about/news/2010/nr20100129.html>

HÖGANÄS AB. **Metal powders for serial production of Additive Manufacturing componentes**. Available at: <https://www.hoganas.com/pt-br/powder-technologies/additive-manufacturing-metal-powders/3d-printing-metal-powders/stainless-steel-3d-printing-metal-powders/>. Luleå, Sweden, October, 2016.

ISO/ASTM 52900:2021 - **Additive Manufacturing - General Principles - Terminology**. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:em>. Acesso em 21 de Abril de 2022.

KAZYMYROVYCH, V. **Very High Cycle Fatigue of Engineering Materials: A literature Review**. Karlstad University, Karlstad, 2009.

MIEDZINSKI, M. **Materials for Additive Manufacturing by Direct Energy Deposition – Identification of material properties that can have an influence on the building process or the resulting component properties**. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2017.

MONTUORI R.; FIGUEIRA G.; CATALDI T.; ALCÂNTARA, N.; BOLFARINI, C.; COELHO, R.; GARGARELLA, P. **Manufatura aditiva de aço inoxidável 316L por Fusão Seletiva a Laser - Soldagem & Inspeção**. 2020;25:e2530. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.30>

MUKHERJEE, T. & DEBROY, T. **Printability of 316 Stainless Steel**. Department of Materials Science and Engineering, Pennsylvania State University, University Park, PA, 2019.

NICHOLAS, T. **High Cycle Fatigue**. A Mechanism of Materials Perspective. 1st Edition. Elsevier, 2006.

SABOORI, A.; AVERSA, A; MARCHESE, G.; BIAMINO, S.; LOMBARDI, M.; FINO, P. **Microstructure and Mechanical Properties of AISI 316L Produced by Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing: A Review**. Department of Applied Science and Technology, Politecnico Di Torino, Torino, Italy.

SHIMADZU CORPORATION. **USF-2000A – Ultrasonic Fatigue Testing System** Available at: <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/fatigue-testingimpact-testing/usf-2000a/index.html>

THIESEN Jr., A. **Selection of processing parameters for the laser directed energy deposition process applied to additive manufacturing: a methodological proposal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Universidade Federal de Santa Catarina em parceria com o Instituto Senai de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser, Joinville, 2021.

VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva - Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D - 1ª Edição**. Editora Blucher, São Paulo, 2017.