



PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA
EM PEÇAS IMPRESSAS ATRAVÉS DE
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO
A ARCO**

Por

Rodrigo Souza Pimenta

Brasília-DF, 11 de maio de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA EM PEÇAS IMPRESSAS ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO

Por

Rodrigo Souza Pimenta

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico

Banca Examinadora

Prof. Dr. Maksym Ziberov, ENM/FT-UnB (Orientador)

Prof. Dr. José Alexander Araújo, ENM/FT-UnB (Coorientador)

Profa. Dra. Déborah de Oliveira, ENM/FT-UnB (Examinadora interna)

Prof. Dr. Daniel Monteiro Rosa, ENM/FT-UnB (Examinador interno)

Brasília-DF 11 de maio de 2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pa Pimenta, Rodrigo
AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA EM PEÇAS IMPRESSAS
ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO / Rodrigo
Pimenta; orientador Maksym Ziberov; co-orientador José
Alexander Araújo. -- Brasília, 2022.
111 p.

Monografia (Graduação - Engenharia Mecânica) --
Universidade de Brasília, 2022.

1. Manufatura aditiva. 2. WAAM. 3. CMT. 4. Fadiga. I.
Ziberov, Maksym, orient. II. Araújo, José Alexander, co
orient. III. Título.

Agradecimentos

À minha família e amigos por sempre me darem o apoio necessário para que eu alcançasse meus objetivos. À Universidade de Brasília e aos seus professores por todos os conhecimentos passados ao longo dos últimos anos e em especial ao meu orientador Prof. Dr. Maksym Ziberov e coorientador Prof. Dr. José Alexander Araújo por darem oportunidade para a realização deste trabalho. Agradeço também à Profa. Dra. Déborah de Oliveira, ao Prof. Dr. Daniel Monteiro Rosa, ao Prof. Dr. Thiago De Carvalho Rodrigues Doca, ao Prof. Dr. Antonio Piratelli Filho, ao Prof.Dr. Lucival Malcher e ao técnico de laboratório Ivan Banho de Andrade Reis pelo suporte para a realização deste trabalho.

Resumo

O uso da manufatura aditiva nos processos industriais tem ganhado cada vez mais espaço no mercado, isso ocorre principalmente devido às vantagens que ela traz, como: possibilidade de criação de geometrias complexas, menor desperdício de material e, consequentemente, redução de custos de fabricação. Sendo assim, a análise dos parâmetros envolvidos na fabricação e suas consequências nas propriedades do produto final se tornam essenciais para alcançar um projeto seguro e com qualidade. Dentre as propriedades dos materiais, a comportamento à fadiga apresenta grande relevância, dado que a maioria das falhas em máquinas ocorrem por este fator. É pensando nisso que o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento à fadiga de amostras metálicas fabricadas a partir do arame ER70S-6 por manufatura aditiva pelo método *Wire Arc Additive Manufacturing*, mais especificamente o *Cold Metal Transfer*. Para isso, todo o processo, desde a fabricação das peças até a avaliação da região de fratura durante o ensaio de fadiga, foi avaliado. Para a fabricação, foram utilizados, além da manufatura aditiva, processos de fresamento e corte por jato d'água, sendo que os resultados foram analisados após cada etapa. As peças de prova obtidos apresentaram um bom aspecto, mesmo com uma pequena variação de dimensões em função dos valores calculados: 5,5% na espessura, 2,75% na largura e 0,19 % no comprimento total. A caracterização da vida em fadiga das amostras foi dada por meio de curvas S-N, na qual foi encontrada vida infinita para tensões máximas abaixo de 302,04 MPa, que representa 53% do limite de resistência à tração do material. Além da caracterização através da curva S-N, uma avaliação da fratura através de um microscópio eletrônico de varredura possibilitou a identificação de diferentes regiões: zonas com presença de estrias (correspondente à fratura frágil) e zonas de *dimples* (correspondente à fratura dúctil). Dessa forma, foi possível contribuir no estudo para o desenvolvimento da manufatura aditiva nos processos industriais.

Palavras-chaves: Manufatura aditiva, WAAM, CMT, fadiga.

Abstract

The use of additive manufacturing in industrial processes has been gaining more space in the market, this is mainly due to the advantages it brings, such as: possibility of creating complex geometries, less material waste and, consequently, reduced manufacturing costs. Therefore, the analysis of the parameters involved in manufacturing and its consequences on the properties of the final product become essential to achieve a safe and quality project. Among the material properties, the fatigue behavior has great relevance given that most machine failures occur due to this factor. Thinking about this, the present work aims to evaluate the fatigue behavior of metallics manufactured from the wire ER70S-6 by additive manufacturing by Wire Arc Additive Manufacturing, more specifically Cold Metal Transfer. For this, the entire process, from the manufacture of the parts to the evaluation of the fracture region during the fatigue test, was evaluated. For the manufacturing process, besides to additive manufacturing, milling processes and waterjet cutting were used, and the results were analyzed after each step. The specimens obtained showed a good appearance, even with a small variation in dimensions over the calculated values: 5.5% in thickness, 2.75% in width and 0.19% in total length. The characterization of the fatigue life of the samples was given through S-N curves, in which infinite life was found for maximum stresses below 302.04 MPa, which represents 53% of the material's tensile strength limit. In addition to the characterization through the S-N curve, an evaluation of the fracture through a scanning electron microscope made it possible to identify different regions: zones with striations (corresponding to brittle fracture) and dimples zones (corresponding to ductile fracture). In this way, it was possible to contribute to the study for the development of additive manufacturing in industrial processes.

Key-words: Additive manufacturing, WAAM, CMT, fatigue.

Lista de Figuras

Figura 1 – Adoção industrial da manufatura aditiva (adaptado de Vafadar et al. (2021)).	1
Figura 2 – Produtos fabricados pela MX3D (2021) através da manufatura aditiva: a) <i>Arc Bike I</i> ; e b) <i>MX3D Robot Arm</i>	2
Figura 3 – Protótipo para um motor de foguete fabricado por MA pela <i>Cellcore</i> e <i>SLM Solutions</i> (ETMM, 2019).	2
Figura 4 – Exemplo de diferentes processos de soldagem. a) Soldagem subaquática (BRACARENSE, 2016) e b) Soldagem MIG robótica (ESAB, 2020) . . .	5
Figura 5 – Processos de soldagem e afins, segundo AWS (MARQUES et al., 2005, p. 23)	6
Figura 6 – Desenho esquemático de um processo MIG/MAG (MARQUES et al., 2005)	7
Figura 7 – Aspecto do cordão de solda para o arame-eletrodo ER430LNb (FILHO; BALSAMO; FERRARESI, 2007)	8
Figura 8 – Tipos de transferência metálica GMAW: a) Transferência globular (adaptado de Society (2001, p. 11)); b) Transferência <i>spray</i> (adaptado de Society (2001, p. 11)); c) Transferência por curto-circuito (adaptado de Silva (2005)).	9
Figura 9 – Representação do método GMAW pulsado (WILL, 2009 apud BARRA, 2003, p. 12).	11
Figura 10 – Seção transversal do cordão de solda de cada tipo de transferência de gota. (ZHAI et al., 2020). a) Uma gota por múltiplos pulsos (ODMP). b) Uma gota por pulso (ODPP). c) Múltiplas gotas por pulso (MDPP). 11	
Figura 11 – Pinos fabricados pelo método CMT (STELZER; UCSNIK; PINTER, 2016).	12
Figura 12 – Componentes básicos de um sistema CMT: 1 – fonte de Alimentação; 2 – cabeçote alimentador; 3 – buffer de arame; 4 – tocha (MARQUES, 2017).	13
Figura 13 – Forma das ondas de voltagem e corrente no processo CMT (COSTA, 2011, p. 21).	14

Figura 14 – Falta de fusão na raiz (indicada com retângulo vermelho) observada no processo CMT de progressão descendente (adaptado de Costa (2011, p. 21)).	15
Figura 15 – Aparência macroscópica do cordão de solda CMT (FENG; ZHANG; HE, 2009).	15
Figura 16 – Comparação entre solda feito pelo processo MIG convencional e MIG CMT. a) Soldagem manual de Alumínio 5083 com MIG convencional (DUTRA; SILVA; MARQUES, 2013). b) Soldagem manual de Alumínio 5083 com MIG CMT (DUTRA; SILVA; MARQUES, 2013).	16
Figura 17 – Etapas da manufatura aditiva (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015, p. 5).	17
Figura 18 – Exemplos de produtos fabricados através de manufatura aditiva. a) Perna mecânica fabricada por manufatura aditiva de polímeros (MARTINS; DROZDA, 2020). b) Pinça de freio de titânio projetada e produzida por manufatura aditiva (BUGATTI, 2018). c) Peças cerâmicas fabricadas usando CeraFab 7500 na Tampere University (ZAKERI; VIPPOLA; LEVÄNEN, 2020).	18
Figura 19 – Classificação das tecnologias de manufatura aditiva (adaptado de Li et al. (2019)).	19
Figura 20 – Ilustração genérica de um sistema <i>powder bed</i> (adaptado de Frazier (2014)).	20
Figura 21 – Ilustração do processo <i>Binder Jetting</i> (adaptado de Vafadar et al. (2021)).	20
Figura 22 – Ilustração de um processo de manufatura aditiva por deposição de energia direcionada com fonte de feixe eletrônico (adaptado de Sciaky (2021)).	21
Figura 23 – Diagrama esquemático dos processos de manufatura aditiva WAAM: a) GMAW; b) GTAW; c) PAW (adaptado de Ding et al. (2015)).	22
Figura 24 – Corpos de prova utilizados no experimento. Método PAW à esquerda e GMAW à direita (ARTAZA et al., 2019).	23
Figura 25 – Influência dos parâmetros de soldagem na largura final do cordão: a) Velocidade de soldagem; b) Velocidade de alimentação do arame; c) Correção de distância de arco d) Correção de pulso (adaptado de Fang et al. (2019)).	25
Figura 26 – Tomografia computadorizada da amostras: a) CMT b) GMAW-P. Micrografia mostrando as porosidades das amostras: c) CMT d) GMAW-P (DEREKAR et al., 2020)	25
Figura 27 – Quantidade e dimensões de poros para cada processo CMT (adaptado de Fang et al. (2018)).	26
Figura 28 – Classificação dos processos de fabricação (FERRARESI, 1970 apud MACHADO; SILVA, 2004)	27
Figura 29 – Comparação na taxa de remoção de material para os três diferentes lubrificantes (adaptado de Okokpujie e Tartibu (2021)).	28

Figura 30 – Rugosidade obtida por ferramentas de corte com diferentes revestimento (adaptado de Fernández-Abia et al. (2013)).	29
Figura 31 – a) EXOCARB AM-EBT; b) EXOCARB AM-CRE; c) Exemplo de peça fabricada por manufatura aditiva passando pelo processo de fresagem (OSG, 2020)	30
Figura 32 – Modelos desenvolvidos por diferentes métodos: manufatura aditiva, à esquerda, e manufatura subtrativa, à direita (NISHIMURA et al., 2016). 30	
Figura 33 – Gráfico de precisão para a peça A (adaptado de Braian et al. (2018)).	31
Figura 34 – Características dos métodos de ensaio de dureza (adaptado de Callister (2002, p. 95)).	33
Figura 35 – a) Equipamento para medição de dureza Vickers. b) Valores de dureza ao longo da amostra de parede única (adaptado de Sharma (2019)).	34
Figura 36 – a) Representação esquemática do dispositivo usado para conduzir ensaios de tração (adaptado de Callister (2002, p. 81)). b) Diagrama tensão deformação para um aço de baixo carbono (NORTON, 2013, p. 32).	34
Figura 37 – Curva tensão-deformação para os corpos de prova com e sem tratamento nas direções X e Z (adaptado de Yang et al. (2019)).	35
Figura 38 – Corpos de prova dúctil, à esquerda, e frágil, à direita, antes e depois de um ensaio de compressão (NORTON, 2013, p. 35).	36
Figura 39 – Curva tensão-deformação obtida através dos ensaios de compressão para os materiais: a) Ti-6Al-4V; b) AA2319; c) S355JR (adaptado de Abbaszadeh et al. (2021)).	37
Figura 40 – Resultados obtidos através do ensaio de torção para: a) Módulo de cisalhamento; b) Deformação de fratura (adaptado de Balderrama-Armendariz et al. (2018)).	38
Figura 41 – a) Máquina de teste de impacto Charpy JBS-300; b) Energia de impacto absorvida nas amostras horizontais e verticais (adaptado de Waqas et al. (2019)).	39
Figura 42 – a) Falga por fadiga de um parafuso de porca em razão de flexão unidirecional repetida (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 285); b) Eixo com rasgo de chaveta que falhou sob flexão rotativa (NORTON, 2013, p. 309). 40	
Figura 43 – Curva S-N em tração-compressão para uma união soldada por explosão (adaptado de Becker, Gauthier e Vidal (2020)).	42
Figura 44 – Curva S-N para a união soldada de magnésio a uma razão de tensão de -1 (adaptado de Karakaş, Baumgartner e Susmel (2020)).	42
Figura 45 – Curva S-N dos ensaios realizados nos diferentes metais para a junta cruciforme (adaptado de Łagoda e Głowacka (2020)).	43
Figura 46 – Curva S-N dos ensaios realizados para as diferentes entradas de calor e correntes (adaptado de Rojas et al. (2020)).	44

Figura 47 – Curva da taxa de propagação da trinca em função do fator de intensidade ΔK (adaptado de Zhang et al. (2017)).	45
Figura 48 – Curva do crescimento da trinca em função do número de ciclos para as amostras verticais (V) e horizontais (H) (adaptado de Ermakova et al. (2021)).	45
Figura 49 – Estratégias de deposição utilizadas nos testes por (adaptado de Syed et al. (2021b)).	46
Figura 50 – Curva S-N para comparação entre as amostras de referência e amostras de porosidade (adaptado de Biswal et al. (2019b)).	46
Figura 51 – Fluxograma do experimento	48
Figura 52 – Robô cartesiano MAXR-23-S42-H42-C42 (SCHNEIDER, 2009).	49
Figura 53 – Fonte TransPuls Synergic 5000 CMT (adaptado de FRONIUS (2020)).	49
Figura 54 – MTS Landmark 370.10 juntamente com suas características dinâmicas (adaptado de MTS (2021)).	50
Figura 55 – Microscópio Eletrônico por Varredura JSM-7100F utilizado na análise da fratura (JEOL, 2012).	51
Figura 56 – Representação esquemática do sistema de deposição.	52
Figura 57 – Método de deposição bidirecional contínuo.	53
Figura 58 – Pontos de medição	54
Figura 59 – Geometria e dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga (ASTM, 2015).	54
Figura 60 – a) Máquina serra fita Franho FM-500 (FRANHO, 2022); b) Representação esquemática do processo de separação parede-substrato.	56
Figura 61 – Representação esquemática do processo de usinagem em máquina CNC.	57
Figura 62 – Posicionamento para a extração das amostras à partir de uma parede.	58
Figura 63 – Fluxograma da fabricação dos corpos de prova a partir da manufatura aditiva (PIMENTA; OLIVEIRA; ZIBEROV, 2022).	58
Figura 64 – Resposta para pesquisa sobre o uso dos parâmetros de rugosidade nas indústrias em 1999 (vermelho) e 2016 (azul) (adaptado de Todhunter et al. (2017)).	59
Figura 65 – Representação esquemática das regiões de medição da rugosidade ao longo dos CPs.	60
Figura 66 – Paredes enumeradas após deposição com detalhamento da oxidação.	61
Figura 67 – Presença de rugosidade nas paredes após deposição.	62
Figura 68 – a) Grande presença de respingos na parede e substrato obtido pelo processo GMAW convencional (adaptado de Artaza et al. (2019)); b) Presença reduzida de respingos obtida pelo processo CMT (imagem do autor).	62
Figura 69 – Médias locais de altura e largura para a peça depositada.	64
Figura 70 – Vista superior destacando as maiores larguras nas extremidades das paredes.	64

Figura 71 – Separação entre parede e substrato através de corte por serra fita	65
Figura 72 – Fixação da parede para início do processo de usinagem destacando o caminho a ser percorrido pela ferramenta de corte.	66
Figura 73 – Chapa obtida após usinagem da parede fabricada por manufatura aditiva.	66
Figura 74 – Resultado obtido após o processo de corte por jato d’água, destacando a nomenclatura e posicionamento dos conectores em cada corpo de prova.	67
Figura 75 – Comparação entre o CP1 após limpeza superficial com os demais corpos de prova.	67
Figura 76 – Vistas da fixação dos CPs na máquina de ensaio de fadiga: a) Frontal; b) Lateral.	69
Figura 77 – Curva S-N obtida à partir dos ensaios de fadiga.	70
Figura 78 – Curva S-N obtida à partir dos ensaios de fadiga para os métodos CMT e CMT+ <i>rolling</i> (DIRISU et al., 2020).	71
Figura 79 – Representação da divisão entre as etapas de propagação da trinca (II) e fratura rápida (III) (BISWAL et al., 2019a).	72
Figura 80 – Imagens da seção de ruptura do CP 3 obtidas através do MEV.	73
Figura 81 – Imagens do perfil de ruptura do CP 3 obtidas através do MEV.	74
Figura 82 – Imagens da seção de ruptura do CP 5 obtidas através do MEV.	75
Figura 83 – Imagens do perfil de ruptura do CP 5 obtidas através do MEV.	75
Figura 84 – Imagens da seção de ruptura do CP 6 obtidas através do MEV.	76
Figura 85 – Imagens do perfil de ruptura do CP 6 obtidas através do MEV destacando as marcas da ferramenta de usinagem.	77
Figura 86 – Imagens da seção de ruptura do CP 1 obtidas através do MEV.	77
Figura 87 – Imagens do perfil de ruptura do CP 1 obtidas através do MEV.	78
Figura 88 – Distribuição das referências bibliográficas de acordo com as fontes.	81
Figura 89 – Largura por seção das paredes depositadas	101
Figura 90 – Altura por seção das paredes depositadas	102
Figura 91 – Imagens da seção complementar de ruptura do CP 3 obtidas através do MEV.	103
Figura 92 – Imagens do perfil complementar de ruptura do CP 3 obtidas através do MEV.	104
Figura 93 – Imagens da seção complementar de ruptura do CP 5 obtidas através do MEV.	104
Figura 94 – Imagens do perfil complementar de ruptura do CP 5 obtidas através do MEV.	105
Figura 95 – Imagens da seção complementar de ruptura do CP 6 obtidas através do MEV.	105
Figura 96 – Imagens do perfil complementar de ruptura do CP 6 obtidas através do MEV.	106
Figura 97 – Imagens da seção complementar de ruptura do CP 1 obtidas através do MEV.	106

Figura 98 – Imagens do perfil complementar de ruptura do CP 1 obtidas através
do MEV. 107

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação entre as propriedades dos diferentes corpos de prova (YANG-FAN; XIZHANG; CHUANCHU, 2019).	32
Tabela 2 – Composição Química Típica do depósito de solda % (BöHLER, 2022) .	51
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas Típicas do depósito de solda (BöHLER, 2022)	51
Tabela 4 – Dimensões calculadas para o corpo de prova à partir da norma ATSM E466 (ASTM, 2015).	55
Tabela 5 – Altura e largura local e média da parede 1.	63
Tabela 6 – Médias individuais e gerais para as dimensões dos corpos de prova . . .	68
Tabela 7 – Médias por tipo de rugosidade e região para cada um dos 3 CPs escolhidos.	68
Tabela 8 – Resultados obtidos à partir dos ensaios de fadiga.	70
Tabela 9 – Comparação entre os parâmetros de deposição utilizados neste projeto e no projeto de Dirisu et al. (2020).	71
Tabela 10 – Distribuição das referências ao longo dos anos.	80
Tabela 11 – Largura local e média para cada parede.	100
Tabela 12 – Altura local e média para cada parede.	101

Lista de símbolos

Siglas

AWS	<i>American Welding Society</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CMT-P	<i>Pulsed Cold Metal Transfer</i>
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MFLE	Mecânica da Fratura Linear-Elástica
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MS	Manufatura Subtrativa
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>
P-GMAW	<i>Pulsed Gas Metal Arc Welding</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
UTS	<i>Ultimate Tensile Strength</i>
YS	<i>Yield Strength</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Justificativa	3
1.3	Objetivo	3
1.4	Nota do autor	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Processos de soldagem	5
2.1.1	Soldagem GMAW	7
2.1.1.1	Soldagem GMAW Pulsada	10
2.1.1.2	Cold Metal Transfer	12
2.2	Manufatura aditiva e manufatura subtrativa	16
2.2.1	Manufatura aditiva de metais	18
2.2.1.1	Wire Arc Additive Manufacturing	21
2.2.1.2	Wire Arc Additive Manufacturing - CMT	24
2.2.2	Manufatura subtrativa de metais	26
2.3	Vantagens e limitações da manufatura aditiva e manufatura subtrativa	30
2.4	Propriedades mecânicas dos metais	32
2.4.1	Resistência ao desgaste (dureza)	32
2.4.2	Resistência à tração	34
2.4.3	Resistência a compressão	36
2.4.4	Resistência a torção	37
2.4.5	Resistência ao impacto	38
2.4.6	Resistência a fadiga	39
2.5	Resistência à fadiga em peças impressas	44
3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	47
3.1	Metodologia	47
3.2	Equipamentos e consumíveis	49

3.3	Metodologia de deposição	52
3.4	Metodologia de medição da paredes	53
3.5	Fabricação dos corpos de provas	54
3.5.1	Separação entre as paredes e o substrato	55
3.5.2	Usinagem das paredes	56
3.5.3	Corte dos corpos de prova à partir da parede	57
3.5.4	Metodologia de medição das dimensões e rugosidade superficial dos CPs	59
3.6	Ensaio de fadiga	60
	4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1	Avaliação da geometria das peças obtidas por manufatura aditiva	61
4.1.1	Medições	63
4.2	Fabricação dos corpos de prova	65
4.2.1	Separação entre parede e substrato	65
4.2.2	Usinagem das paredes	65
4.2.3	Corte por jato d'água	67
4.3	Avaliação de dimensões e rugosidade dos corpos de prova	68
4.4	Ensaio de fadiga	69
4.5	Análise da fratura	72
4.5.1	Corpo de Prova 3	73
4.5.2	Corpo de Prova 5	74
4.5.3	Corpo de Prova 6	76
4.5.4	Corpo de Prova 1	77
	5 CONCLUSÕES	79
5.1	Propostas para trabalhos futuros	80
5.2	Análise das referências bibliográficas	80
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICES	93
	APÊNDICE A – TRABALHOS DESENVOLVIDOS	94
	APÊNDICE B – CÓDIGO DA MÁQUINA CNC	97
	APÊNDICE C – RESULTADO DAS MEDIÇÕES DAS 5 PAREDES DEPOSITADAS	100
	APÊNDICE D – IMAGENS COMPLEMENTARES DA ANÁLISE DE REGIÃO DE FRATURA	103

ANEXOS	108
ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DO ARAME ER70S-6	109
ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES DA FERRAMENTA DE CORTE .	110
ANEXO C – ESPECIFICAÇÕES DO FLUIDO DE CORTE	111

1 Introdução

1.1 Motivação

Com o crescente avanço das tecnologias e a necessidade de atender as mais diversas demandas, a indústria têm buscado melhorar os métodos de produção, afim de alcançar uma produção otimizada em relação a tempo, qualidade, volume de produção e lucros finais. É neste âmbito que surge a manufatura aditiva (MA), um método de fabricação que permite a criação de produtos de forma rápida e personalizada.

Diferentes setores têm adotado a manufatura aditiva em seus processos. Na indústria automotiva a MA forneceu oportunidades para designs mais flexíveis, otimizados e robustos, produtos mais leves, fortes e seguros com prazos e custos reduzidos. Segundo Najmon, Raeisi e Tovar (2019), todos os setores da indústria aeroespacial como aeronaves, aplicações militares e sistemas de mísseis já estão utilizando processos de manufatura aditiva. Também se destacam a indústria médica e odontológica, com a fabricação de modelos personalizados adaptados às necessidades dos pacientes, indústrias de construção, mineração, óleo e gás (VAFADAR et al., 2021). A Figura 1 representa a distribuição das receitas de MA para o mercado final em 2018 e representa a adoção industrial diversificada de MA.

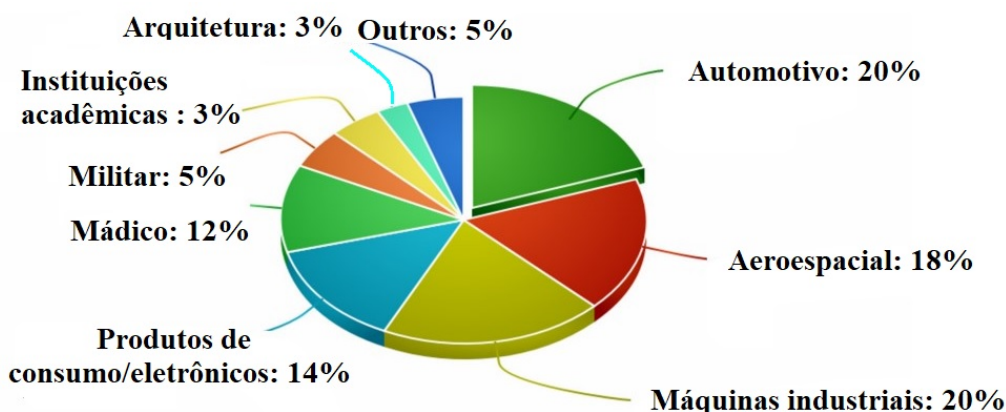


Figura 1 – Adoção industrial da manufatura aditiva (adaptado de Vafadar et al. (2021)).

O surgimento de empresas especialistas em MA têm contribuído ainda mais com o progresso do setor, um bom exemplo é a MX3D (2021). A empresa utiliza da manufatura

aditiva de metais para a fabricação de produtos que, a algum tempo atrás, só poderiam ser fabricados por métodos convencionais, o que diversifica a produção e aumenta as possibilidades do setor industrial. Para ilustrar este cenário, a Figura 2(a) apresenta uma das criações da empresa, a *Arc Bike I*, fabricada por manufatura aditiva de aço. Já a Figura 2(b), apresenta um braço robótico otimizado fabricado pelo mesmo processo, o que possibilitou uma redução de peso de 50%.

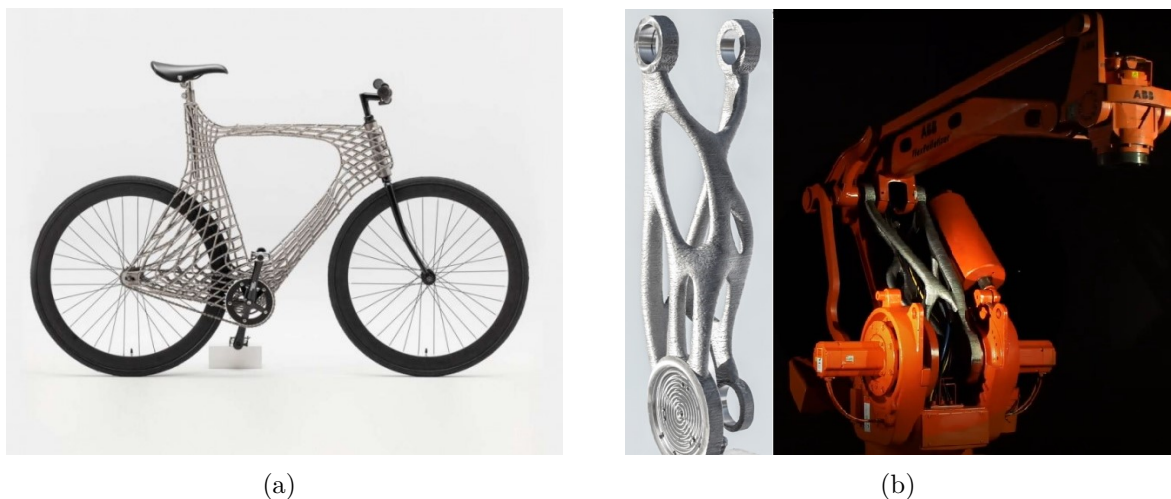


Figura 2 – Produtos fabricados pela MX3D (2021) através da manufatura aditiva: a) *Arc Bike I*; e b) *MX3D Robot Arm*.

Uma das grandes vantagens da manufatura aditiva é a possibilidade de fabricação de peças com geometrias complexas, que dificilmente poderiam ser fabricadas através de algum método convencional. A Figura 3, por exemplo, apresenta um motor de foguete fabricado por MA pelas empresas *Cellcore* e *SLM Solutions*. O produto foi feito em peça única com a liga níquel-cromo IN718 e demorou apenas 3 dias para ser fabricado.

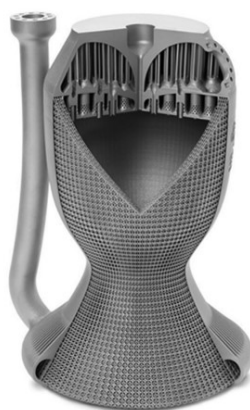


Figura 3 – Protótipo para um motor de foguete fabricado por MA pela *Cellcore* e *SLM Solutions* (ETMM, 2019).

Como apresentado, a manufatura aditiva é um setor que possui um grande potencial no campo industrial, com aplicação nas mais diversas áreas e diferentes projetos.

Sendo assim, a principal motivação deste trabalho é contribuir nos estudos da MA, entendendo suas propriedades e possibilitando com que todo o seu potencial possa ser revertido em projetos reais com segurança.

1.2 Justificativa

A maioria das falhas em máquinas acontece devido a cargas que variam no tempo, e não a esforços estáticos. Essas falhas ocorrem, geralmente, em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais (NORTON, 2013, p. 303). Sendo assim, o estudo da vida em fadiga dos materiais é de extrema importância na execução de um projeto seguro.

Para peças fabricadas por manufatura aditiva não é diferente. Como muitas indústrias estão investindo nessa metodologia em seus processos, garantir que elas suportarão os esforços cíclicos é necessário. Por ser uma metodologia relativamente recente, ainda existe muito espaço para a pesquisa, o que mostra a necessidade e importância de estudos como este.

1.3 Objetivo

O objetivo do trabalho é estudar as propriedades à fadiga em peças metálicas fabricadas através de manufatura aditiva pelo processo WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), especificamente CMT (*Cold Metal Transfer*). Para isso, todo o processo, desde a fabricação dos corpos de prova (CPs) até a análise dos resultados de fadiga, foi avaliado, considerando os fatores relevantes no comportamento do material. A fabricação dos corpos de prova passou por etapas que englobam a manufatura aditiva, usinagem das peças e extração através de corte por jato d'água, sendo o resultado obtido após cada etapa avaliado quanto aos padrões e qualidade do processo. Com isso, a resposta à fadiga dos CPs foi testada por meio de um ensaio uniaxial, do qual foi possível traçar a curva S-N que caracteriza o material. Para um maior detalhamento da falha, a região de fratura foi analisada utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Dessa forma, este trabalho pôde contribuir com a crescente indústria da manufatura aditiva, disponibilizando um material base com resultados que caracterizam o processo e o material quanto a resistência à fadiga.

1.4 Nota do autor

Durante o desenvolvimento do Projeto de Graduação, 3 trabalhos foram escritos, sendo um deles aprovado para o XXIV Colóquio de Usinagem, e outros dois em fase de

revisão para o XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM (Apêndice A). São eles:

- **PIMENTA, R.S.**; OLIVEIRA, D.; ZIBEROV, M. *Preparação de Corpos de Prova Fabricados por Manufatura Aditiva para Ensaio de Fadiga*. XXIV Colóquio de Usinagem. Curitiba. 2022
- **PIMENTA, R.S.**; NOVELINO, A.L.B.; ARAÚJO, J.A.; ZIBEROV, M. *Resistência à Fadiga em Peças Impressas por WAAM – uma Revisão*. XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2022, Teresina. ABCM, 2022.
- SANTOS, R.B.M.; **PIMENTA, R.S.**; ZIBEROV, M. *Resistência à Tração em Peças Impressas: uma Revisão*. XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2022, Teresina. ABCM, 2022.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Processos de soldagem

Os processos de soldagem, juntamente com as técnicas de união de materiais de forma geral, representam uma grande parcela dos processos de fabricação utilizados atualmente na indústria. Essa importância se dá pela grande variedade e versatilidade dos métodos, que possibilita a aplicação da soldagem nas mais diversas condições, desde ambientes controlados de laboratórios até operações em campo. Em relação à dimensões e complexidade de estruturas, o processo também apresenta polivalência sendo empregado tanto na fabricação de peça simples quanto nas indústrias química, petrolífera e nuclear (MARQUES et al., 2005, p. 17–18). A Figura 4 retrata a versatilidade citada, na qual na Figura 4(a) está representado um procedimento de soldagem subaquática para reparo (BRACARENSE, 2016), e, na Figura 4(b), uma soldagem MIG robótica de alta velocidade conhecida como *Swift Arc Transfer* (SAT) (ESAB, 2020, p. 18).

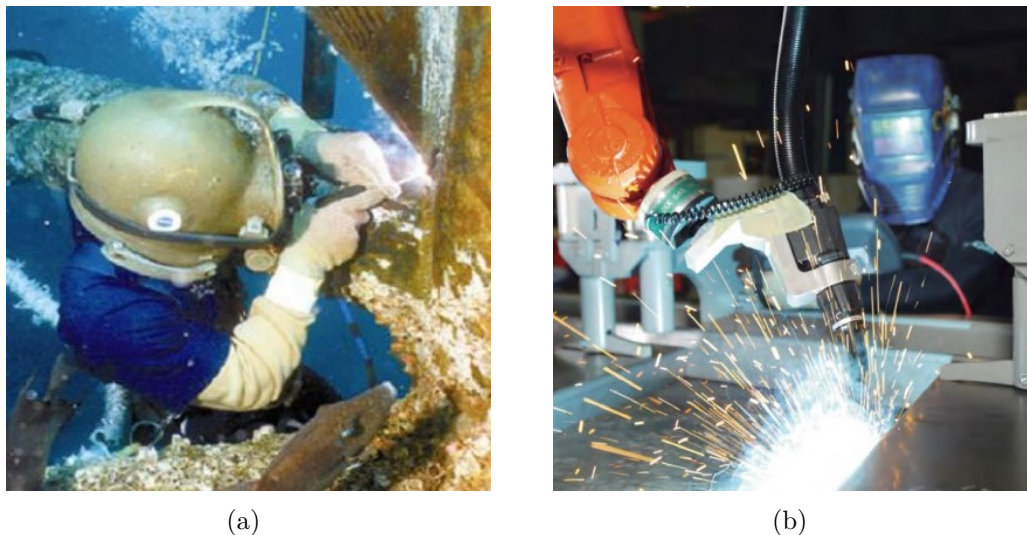


Figura 4 – Exemplo de diferentes processos de soldagem. a) Soldagem subaquática (BRACARENSE, 2016) e b) Soldagem MIG robótica (ESAB, 2020)

A soldagem surgiu da necessidade de unir de forma duradoura diferentes peças. Teoricamente, uma solda seria "espontaneamente" realizada, se duas superfícies tivessem seu átomos convenientemente próximos, de forma que resultasse uma força de atração

entre os mesmos (MACHADO, 1996, p. 5). Porém isso não é o que ocorre na prática, já que os materiais apresentam em suas superfícies rugosidades e camadas de óxidos, gorduras e poeira, que impedem a ocorrência da ligação entre os átomos (MARQUES et al., 2005, p. 19–20).

Embora a soldagem, na sua forma atual, seja um processo recente, com cerca de 100 anos, a brasagem e a soldagem por forjamento têm sido utilizadas desde épocas remotas (MARQUES et al., 2005, p. 25). Devido a esse longo período de existência, a própria definição do que é uma soldagem sofreu alterações no tempo, para melhor se adequar às novas tecnologias e métodos. Atualmente, a *American Welding Society* (AWS) adota como definição: "Processo de união de materiais usado para obter a coalescência localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição." (SOCIETY, 2021).

Devido à grande variedade de processos de soldagem, a classificação dos métodos pode ocorrer de diferentes formas, levando em consideração aplicação ou não de calor localizada, a fonte de energia, tipo de proteção à reação do material com o ambiente, entre outros fatores apresentados pela Figura 5.

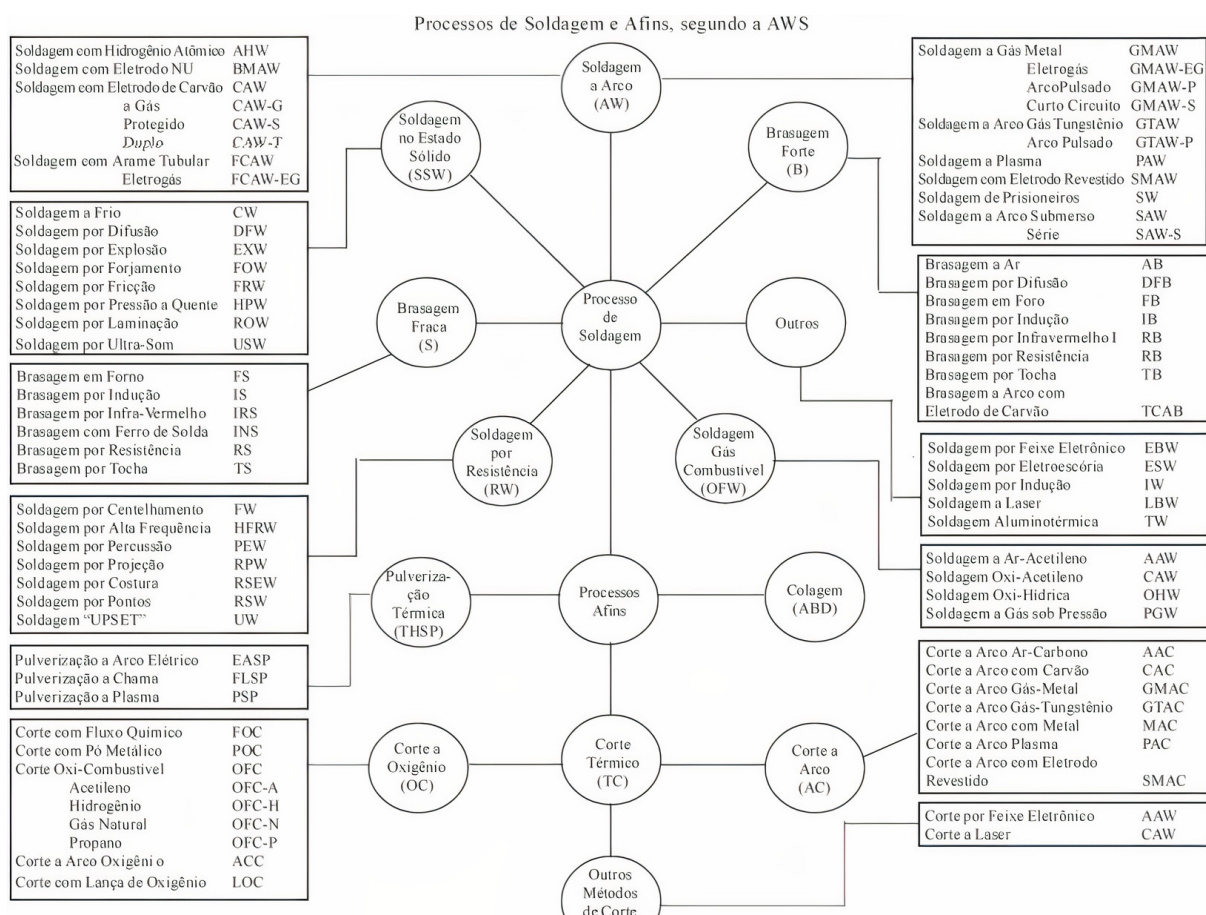


Figura 5 – Processos de soldagem e afins, segundo AWS (MARQUES et al., 2005, p. 23)

De acordo com Marques et al. (2005) p. 20-21, outra forma de agrupar os procedimentos é separando em dois grandes grupos: soldagem por pressão (ou deformação) e

soldagem por fusão. O primeiro consiste na união dos materiais através da deformação de superfícies, podendo haver um aquecimento local para facilitar a deformação. Esse grupo inclui processos como: soldagem por forjamento, ultrassom, fricção, difusão e explosão. Já o segundo se baseia na aplicação localizada de calor até a fusão do metal de base e do metal de adição (quando é utilizado). São exemplos desse grupo os vários processos a arco elétrico, soldagem a laser e soldagem a gás.

Levando em consideração os métodos de soldagem por fusão, aqueles que possuem como fonte de calor o arco elétrico são de grande relevância no âmbito industrial, já que ele possui uma combinação ótima de características: concentração adequada de energia para fusão localizada, facilidade de controle e baixo custo relativo do equipamento. Segundo Sudnik (2011, p. 179), a soldagem a arco é o processo mais amplamente utilizado na construção naval, aeroespacial, oleodutos, vasos de pressão, indústrias automotivas e estruturais. O processo consiste em uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, a alta temperatura, conhecida como plasma (MARQUES et al., 2005, p. 51–52). Na Figura 6 está apresentado um esquema do processo, no qual estão destacadas os principais componentes do método.

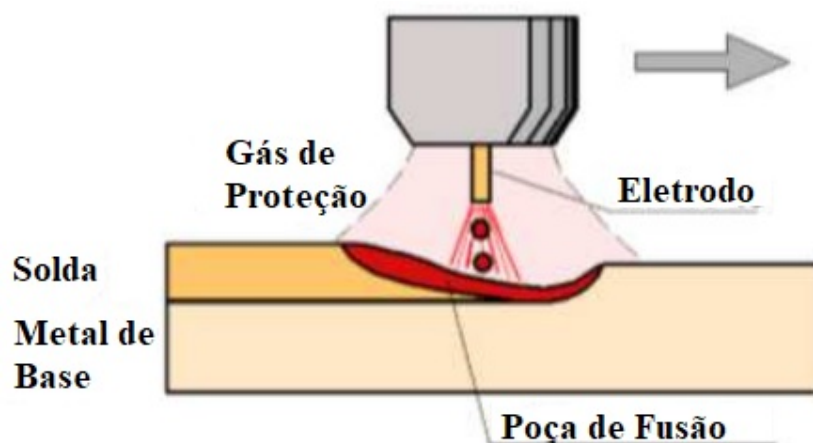


Figura 6 – Desenho esquemático de um processo MIG/MAG (MARQUES et al., 2005)

2.1.1 Soldagem GMAW

Na soldagem a arco elétrico com gás de proteção (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*), também conhecida como soldagem MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas* e MAG – *Metal Active Gas*), um arco elétrico é estabelecido entre a peça de trabalho e um eletrodo metálico nu, consumível, na forma de arame. O calor gerado pelo arco é usado para fundir as peças a serem unidas e o arame de eletrodo, que é transferido para a junta e constitui o metal de adição. O material de adição é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo (MARQUES et al., 2005, p. 233). Para o processo MIG, os principais gases de proteção utilizados são o argônio e o hélio (inertes), já para o processo MAG o principal é o dióxido de carbono (ativo).

A influência do gás de proteção na soldagem GMAW é objeto de estudo de diversas pesquisas. Em seu trabalho, Beltran (2019) mostra essa relação na soldagem de chapas de aço SAE 1020, no qual chegou à conclusão que o emprego de 100% CO_2 produz cordões com maior penetração e uma geometria arredondada mas com presença de alto nível de respingos, se os parâmetros de soldagem não são os otimizados. Enquanto que na misturas de Ar com CO_2 observou-se um cordão com maior penetração no centro que nas bordas mas pouca geração de respingo.

Já Filho, Balsamo e Ferraresi (2007) estudou a influência do gás de proteção para cordões de aço inoxidável, verificando que o aumento da adição tanto de O_2 como de CO_2 na mistura com Ar gera um aumento na quantidade de escória no cordão de solda. Mas, em relação à formação de óxidos, o Ar puro apresentou um melhor aspecto, trazendo um menor nível de oxidação, característica é destacada na Figura 7.

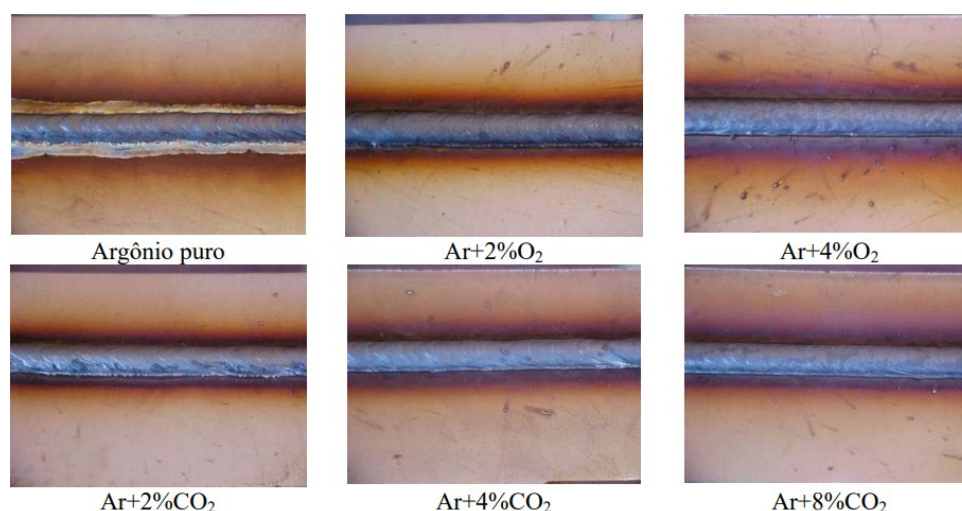


Figura 7 – Aspecto do cordão de solda para o arame-eletrodo ER430LNb (FILHO; BALSAMO; FERRARESI, 2007)

Apesar de ser conhecido há muitos anos, o processo GMAW somente se desenvolveu a partir de 1948, utilizando o gás de proteção inerte (argônio). A aplicação sobre aços tornou-se possível, quando em 1951 foi adicionado oxigênio ao argônio e poucos anos após (1953), introduziu-se dióxido de carbono (CO_2) puro, ou em mistura, também com esse gás (MACHADO, 1996, p. 194). Alguns pontos positivos gerais do processo GMAW são: facilidade de operação, maior taxa de deposição e fator de operação quando comparado com eletrodo revestido, deposição de solda com baixo conteúdo de hidrogênio (responsável pela trinca induzida por hidrogênio nos aços), e conveniência para robotização (MACHADO, 1996, p. 194).

Basicamente o processo GMAW inclui três técnicas distintas de modo de transferência de metal: globular (*globular*), aerossol (*spray arc*) e curto-circuito (*short arc*). Essas técnicas descrevem a maneira pela qual o metal é transferido do arame para a poça de fusão. A transferência globular (Figura 8(a)) ocorre quando as gotas de metal fundido são grandes e, em um certo momento, seu peso e, em menor escala, a força eletromagnética e

a força de arraste superam as forças contrárias à transferência e causam o destacamento. Na transferência por *spray* (Figura 8(b)), pequenas gotas (com o diâmetro próximo ao do eletrodo) são transferidas de forma sequencial (e não pulverizadas), em alta frequência. Na transferência por curto-circuito a transferência ocorre quando um curto-circuito elétrico é estabelecido devido ao contato entre a ponta do eletrodo e a poça de fusão.(SCOTTI; PONOMAREV, 2014, p. 134).

A Figura 8(c) apresenta as fases do processo. Em 1 representa a abertura do arco. Em 2 a gota entra em contato com a poça, reduzindo a tensão. Em 3, a corrente sobe, gerando as forças magnéticas que atuarão no destacamento da gota (efeito *Pinch*). Em 4, a corrente é reduzida e ocorre a reabertura do arco. Finalmente, em 5, ocorre um pulso de corrente, destinado à formação de uma nova gota metálica na ponta do arame (SILVA, 2005).

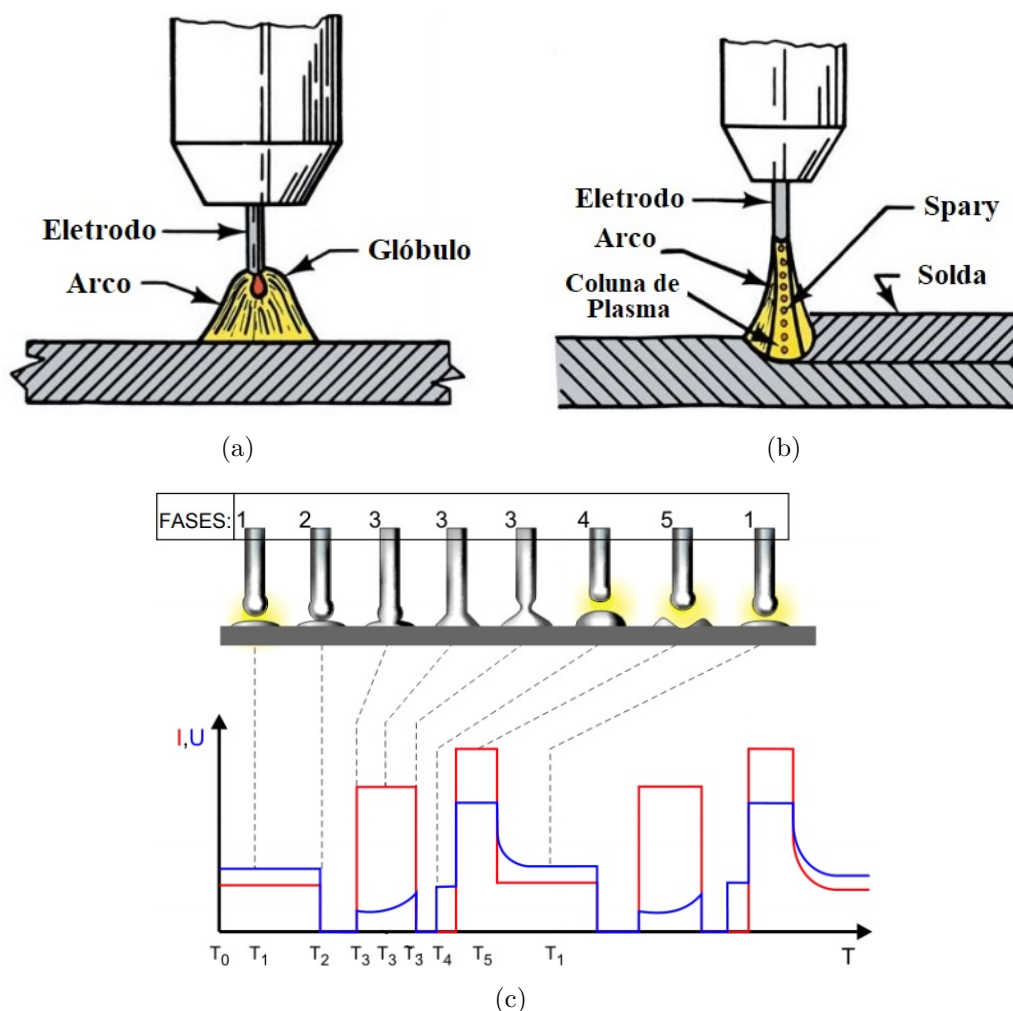


Figura 8 – Tipos de transferência metálica GMAW: a) Transferência globular (adaptado de Society (2001, p. 11)); b) Transferência *spray* (adaptado de Society (2001, p. 11)); c) Transferência por curto-circuito (adaptado de Silva (2005)).

2.1.1.1 Soldagem GMAW Pulsada

Após o surgimento da soldagem GMAW, havia pouco espaço para a modificação do método (MVOLA et al., 2013). O desenvolvimento da tecnologia de arco pulsado foi feita apenas no início da década de 60 na Inglaterra pelo Instituto de Soldagem (TWI- *The Welding Institute*) com objetivo de soldar alumínio com gás de proteção argônio (FISCHER, 2011 apud NEEDHAM; CARTER, 1965, p. 45). Entretanto, a aplicação do método pulsado foi intensificada nas últimas décadas devido a uma melhoria na tecnologia de fontes de energia, trazendo uma série de inovações que foram implementadas com sucesso, melhorando drasticamente o processo P-GMAW (*Pulsed Gas Metal Arc Welding*) (MVOLA et al., 2013).

Com uma fonte de alimentação pulsada, a transferência de metal da ponta do arame do eletrodo para a peça de trabalho durante o GMAW é controlada. A transferência de corrente pulsada é uma transferência do tipo *spray* que ocorre em pulsos em intervalos regularmente espaçados em vez de intervalos aleatórios. A corrente é pulsada entre dois níveis de corrente. O nível inferior serve como uma corrente de fundo para pré-aquecer o arame (nenhuma transferência de metal ocorre), enquanto a corrente de pico força a queda da ponta do arame para a poça de fusão (SUDNIK, 2011, p. 179).

Como consequência de um melhor controle, o método GMAW pulsado traz algumas vantagens como por exemplo: redução dos respingos em relação à transferência por curto-circuito, melhoria do controle da transferência metálica, uma vez que, o tamanho da gota e sua frequência de destacamento são comandados pela pulsação de corrente e obtenção de uma transferência goticular projetada, com um arco estável, porém, em níveis baixos de aporte térmico (em correntes médias abaixo da corrente de transição) (WILL, 2009, p. 11–12). A representação do método é apresentado pela Figura 9.

Pela Figura 9 são identificadas algumas variáveis importantes do processo. A corrente média e a corrente de transição (transferência globular para a de escoamento axial) são representadas respectivamente por I_m e I_t (ANDRADE, 2012). A corrente de pulso (I_p) e o tempo de pulso (t_p) são denominados parâmetros de destacamento da gota. A combinação adequada dessas duas variáveis gera um conjunto de forças que ocasiona o destacamento da gota. A corrente de base (I_b) é ajustada para que se obtenha uma corrente média que equilibre a velocidade de fusão do arame com sua velocidade de alimentação, enquanto que o tempo de base (t_b) deve ser ajustado conforme o diâmetro de gota pretendido (ABDALLA, 2005, p. 26–27).

Em seu trabalho, Zhai et al. (2020) trazem uma comparação entre os modos típicos de transferência de gotículas no GMAW pulsado: ODMP (uma gota por múltiplos pulsos), ODPP (uma gota por pulso) e MDPP (múltiplas gotas por pulso), analisando fatores como aparência, microestrutura, microdureza, propriedades de tração e resistência ao impacto. Os resultados mostraram que uma melhor aparência, penetração mais profunda e menor quantidade de fumaça coberta na placa de aço foi encontrada pelo processo ODPP. Na

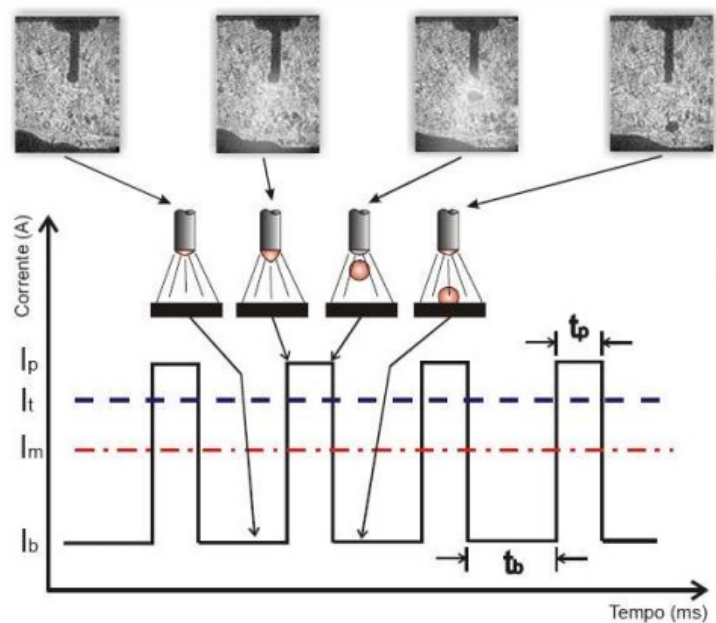


Figura 9 – Representação do método GMAW pulsado (WILL, 2009 apud BARRA, 2003, p. 12).

Figura 10 estão apresentados os cortes transversais dos cordões de solda obtido em cada procedimento, sendo possível observar a melhor aparência do método ODPP, descrita anteriormente.

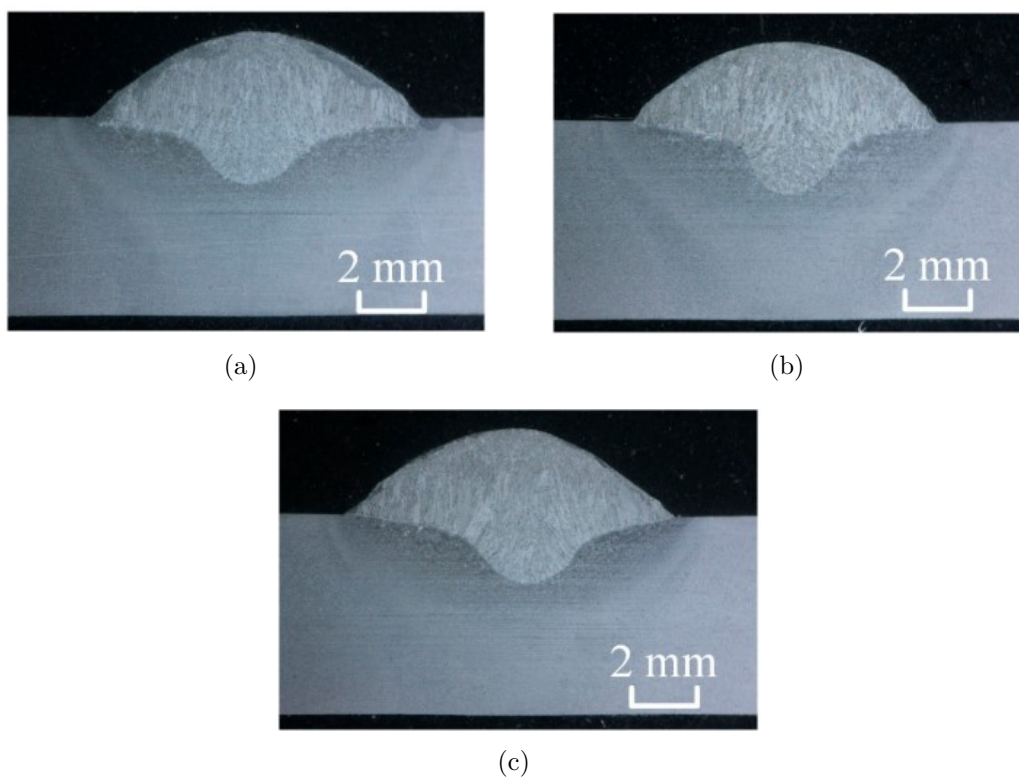


Figura 10 – Seção transversal do cordão de solda de cada tipo de transferência de gota. (ZHAI et al., 2020). a) Uma gota por múltiplos pulsos (ODMP). b) Uma gota por pulso (ODPP). c) Múltiplas gotas por pulso (MDPP).

2.1.1.2 Cold Metal Transfer

O *Cold Metal Transfer* (CMT) é um processo de soldagem MIG modificado que foi inventado pela empresa Fronius. A principal inovação é que os movimentos do arame foram integrados ao processo de soldagem e ao controle geral do processo (FENG; ZHANG; HE, 2009). O procedimento é relativamente novo, criado em 2004, e atualmente apresenta uma ampla variedade de aplicações como em revestimentos, manufatura aditiva, fabricação de pinos compósitos de juntas e soldagem para reparo de rachaduras (SELVI; VISHVAKSENAN; RAJASEKAR, 2018).



Figura 11 – Pinos fabricados pelo método CMT (STELZER; UCSNIK; PINTER, 2016).

O CMT utiliza um sistema inovador de alimentação de arame integrado ao controle digital de alta velocidade para controlar não apenas o comprimento do arco durante a soldagem, mas também o método de transferência de material e a quantidade de entrada térmica transferida para a peça de trabalho (PICKIN; YOUNG, 2006). Quando a ponta do arame do eletrodo faz contato com a poça fundida, o servomotor da tocha de soldagem é revertido pelo controle de processo digital. Isso faz com que o eletrodo retraia, promovendo a transferência de gotículas (SELVI; VISHVAKSENAN; RAJASEKAR, 2018). Durante a transferência de metal, a corrente cai para quase zero e, portanto, qualquer geração de respingos é evitada. Assim que a transferência de metal é concluída, o arco é reacendido e o arame é alimentado para frente mais uma vez com o refluxo da corrente de soldagem definida.

Como todo equipamento de soldagem MIG/MAG, o CMT é composto basicamente por uma fonte, cabeçote alimentador de arame e tocha que, por sua vez, se assemelha à de um sistema *push-pull*. O principal diferencial fica por conta do sistema de alimentação de arame e seu controle, que deve atender ao requisito de movimento de avanço e recuo em frequências bastante elevadas, podendo chegar em até 130 Hz. Para se alcançar esse objetivo, a alimentação do arame é feita por um sistema composto por dois motores, um na tocha e outro no cabeçote alimentador, com o auxílio do dispositivo denominado buffer ou pulmão, instalado no meio do mangote (MARQUES, 2017 apud BRUCKNER, 2013). A Figura 12 apresenta os componentes básicos citados.



Figura 12 – Componentes básicos de um sistema CMT: 1 – fonte de Alimentação; 2 – cabeçote alimentador; 3 – buffer de arame; 4 – tocha (MARQUES, 2017).

Segundo (FENG; ZHANG; HE, 2009) o ciclo pode ser dividido em 3 etapas, que também estão representadas pela Figura 13:

1. Fase da corrente de pico: é representada por uma tensão de arco constante correspondente a um alto pulso de corrente. A alta corrente de pulso torna a ignição do arco de soldagem fácil e então aquece o eletrodo de arame para formar uma gota;
2. Fase da corrente de fundo: corresponde a uma corrente mais baixa. A corrente é diminuída para evitar a transferência globular da pequena gota de líquido formada na ponta do arame. Esta fase continua até que ocorra um curto-circuito;
3. Fase de curto-circuito: nesta fase, a tensão do arco é zerada. Ao mesmo tempo, o sinal de retorno é fornecido ao alimentador de arame, o que confere ao arame uma força de retrocesso. Esta fase auxilia na fratura do líquido e transferência de material para o poço de soldagem.

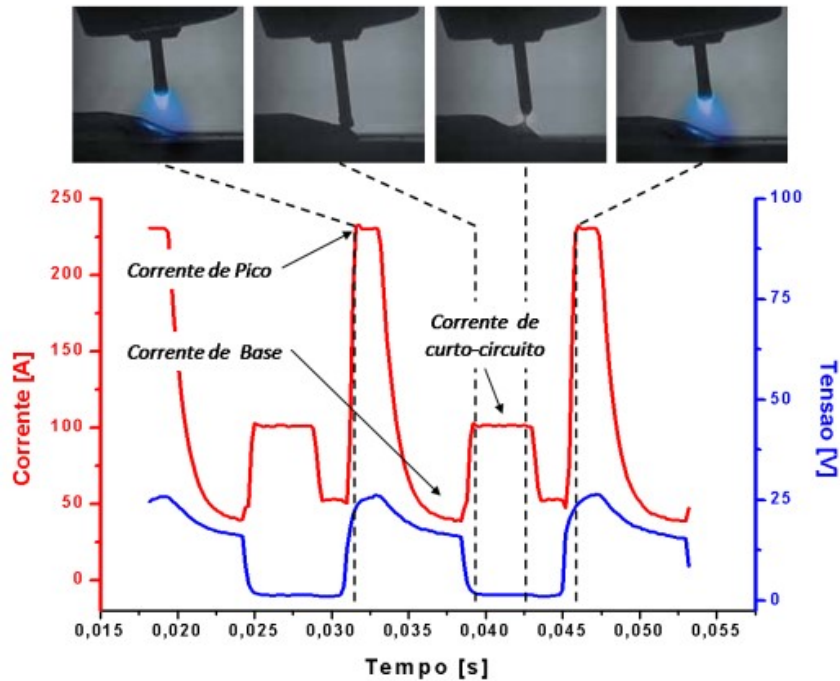


Figura 13 – Forma das ondas de voltagem e corrente no processo CMT (COSTA, 2011, p. 21).

Em seu trabalho, Costa (2011, p. 25) chama atenção para dois parâmetros de regulagem do processo CMT que influenciam no resultado final, são eles o comprimento de arco e o controle dinâmico. O primeiro está relacionado com a regulagem da tensão de soldagem, sendo responsável, como o próprio nome já diz, pelo ajuste do comprimento do arco. Já o controle dinâmico influencia na dinâmica do curto-circuito no momento de destacamento da gota, sendo que o seu ajuste é realizado conforme o material de adição e o diâmetro do arame-eletrodo utilizado.

Em função da grande tendência mundial no setor dutoviário pela utilização dos processos de soldagem GMAW (SARTORI, 2016, p. 35), alguns autores trazem estudos sobre o desempenho de diferentes métodos GMAW na soldagem de dutos. Sartori (2016) destacou o bom resultado de solda quando se utiliza o CMT com chanfro do tipo U, porém aponta problemas com falta de fusão na utilização de chanfro V. Já Costa (2011) ressalta o maior controle de penetração e uniformidade de perfil da raiz na soldagem CMT ascendente quando comparada com os demais processos, mas apresenta também problemas com falta de penetração e/ou falta de fusão da raiz na soldagem CMT descendente, apresentado na Figura 14.

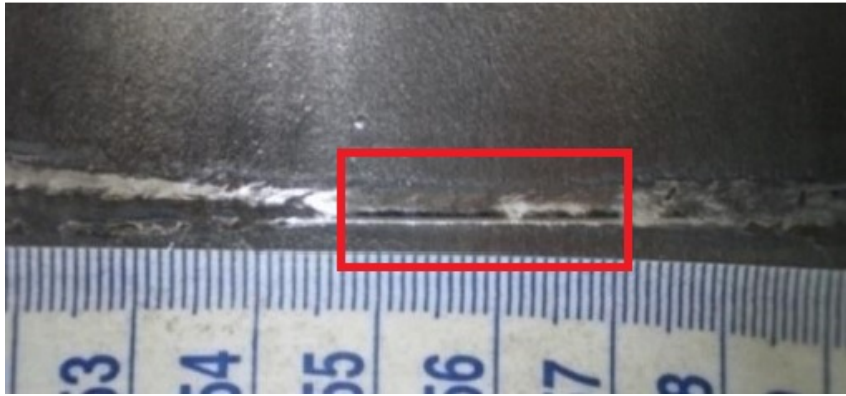


Figura 14 – Falta de fusão na raiz (indicada com retângulo vermelho) observada no processo CMT de progressão descendente (adaptado de Costa (2011, p. 21)).

Devido ao melhor controle do processo de soldagem, o CMT requer menos corrente para a mesma quantidade de deposição de material. Além disso, a penetração da solda pode ser controlada com precisão alterando a duração do curto-circuito (PICKIN; YOUNG, 2006). Observando a Figura 15, é possível perceber a qualidade estética do cordão de solda feito por CMT, caracterizada pela uniformidade, regularidade e ausência de respingos.

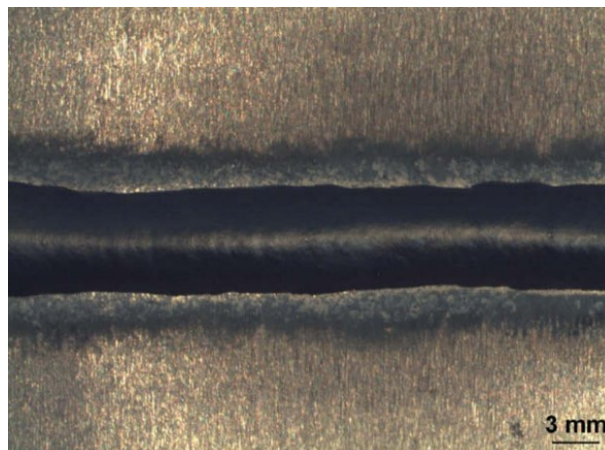


Figura 15 – Aparência macroscópica do cordão de solda CMT (FENG; ZHANG; HE, 2009).

Segundo Dutra, Silva e Marques (2013) a versão CMT do processo MIG é uma boa solução tecnológica principalmente devido à quase perfeita cadência entre fases de grande potência e de muito baixa potência e pelas propriedades de formação do cordão relacionadas ao estado térmico do metal de solda, resultando em ótima capacidade de preencher gaps (*bridgabilit*). Essa característica é de grande relevância quando se trata de uma soldagem de raiz. Através da Figura 16, que apresenta uma comparação entre soldas produzidas pelo processo MIG convencional e CMT, é possível verificar que uma solda de raiz produzida por essa versão de MIG se apresenta com bom acabamento, tanto na face, como no verso da junta, sem excesso de reforço no verso da raiz.

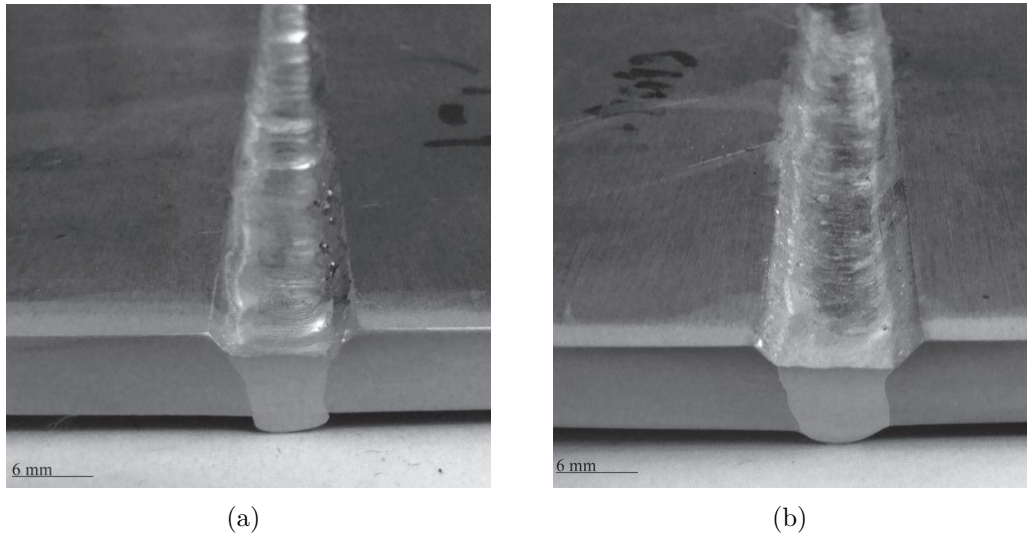


Figura 16 – Comparação entre solda feito pelo processo MIG convencional e MIG CMT. a) Soldagem manual de Alumínio 5083 com MIG convencional (DUTRA; SILVA; MARQUES, 2013). b) Soldagem manual de Alumínio 5083 com MIG CMT (DUTRA; SILVA; MARQUES, 2013).

2.2 Manufatura aditiva e manufatura subtrativa

A manufatura aditiva pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente, normalmente originado de um sistema CAD (*Computer-Aided Design*). O processo de construção é totalmente automatizado e ocorre de maneira relativamente rápida, se comparado aos meios tradicionais de fabricação, como usinagem e fundição (VOLPATO, 2018, p. 16).

Inicialmente, a MA foi usada especificamente para criar modelos de visualização para produtos à medida que estavam sendo desenvolvidos. Porém, recentemente, algumas dessas tecnologias foram desenvolvidas de forma que o produto seja adequado para o uso final. Isso explica por que a terminologia evoluiu essencialmente de prototipagem rápida para manufatura aditiva (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015, p. 3–4).

De acordo com Gibson, Rosen e Stucker (2015), o processo de manufatura, de forma geral, compreende as seguintes etapas, que também estão representadas pela Figura 17.

1. CAD: todas as peças de MA devem começar a partir de um modelo de software que descreva totalmente a geometria externa;
2. Conversão para o formato STL (*STereoLithography*): quase todas as máquinas de MA aceitam o formato de arquivo STL, que se tornou um padrão de fato. Este arquivo descreve as superfícies externas fechadas do modelo CAD original e forma a base para o cálculo das fatias;

3. Transferência para uma máquina de MA e manipulação do arquivo STL: aqui, pode haver alguma manipulação geral do arquivo para que tenha o tamanho, posição e orientação corretos para a construção;
4. Configuração da máquina: essas configurações estariam relacionadas aos parâmetros de construção, como as restrições de material, fonte de energia, espessura da camada, tempos, etc;
5. Construção: a construção da peça é principalmente um processo automatizado e a máquina pode continuar em grande parte sem supervisão. Apenas o monitoramento superficial da máquina precisa ocorrer neste momento para garantir que nenhum erro tenha ocorrido, como falta de material, energia ou falhas de software, etc;
6. Remoção: assim que a máquina de MA tiver concluído a construção, as peças devem ser removidas;
7. Pós-processamento: limpeza adicional das peças antes de estarem prontas para uso;
8. Aplicação: As peças agora podem estar prontas para serem usadas. No entanto, eles também podem exigir tratamento adicional antes de serem aceitáveis para uso.

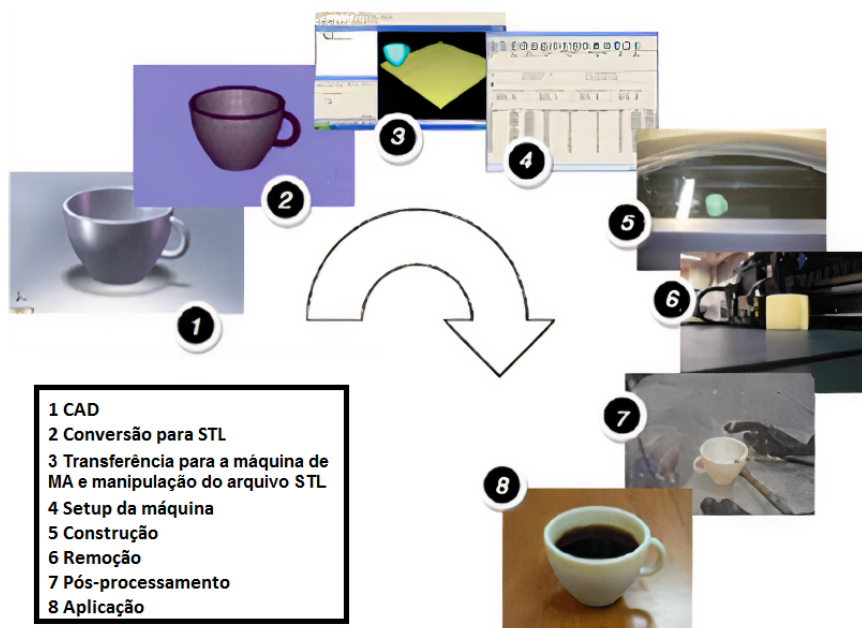


Figura 17 – Etapas da manufatura aditiva (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015, p. 5).

A tecnologia da manufatura aditiva foi originalmente desenvolvida em torno de materiais poliméricos (Figura 18(a)), ceras e laminados de papel. Posteriormente, houve a introdução de compósitos, metais (Figura 18(b)) e cerâmicas (Figura 23(c)) (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015, p. 10). Exemplos de produtos feitos por manufatura aditiva de diferentes materiais e para diferentes aplicações estão apresentados na Figura 18.

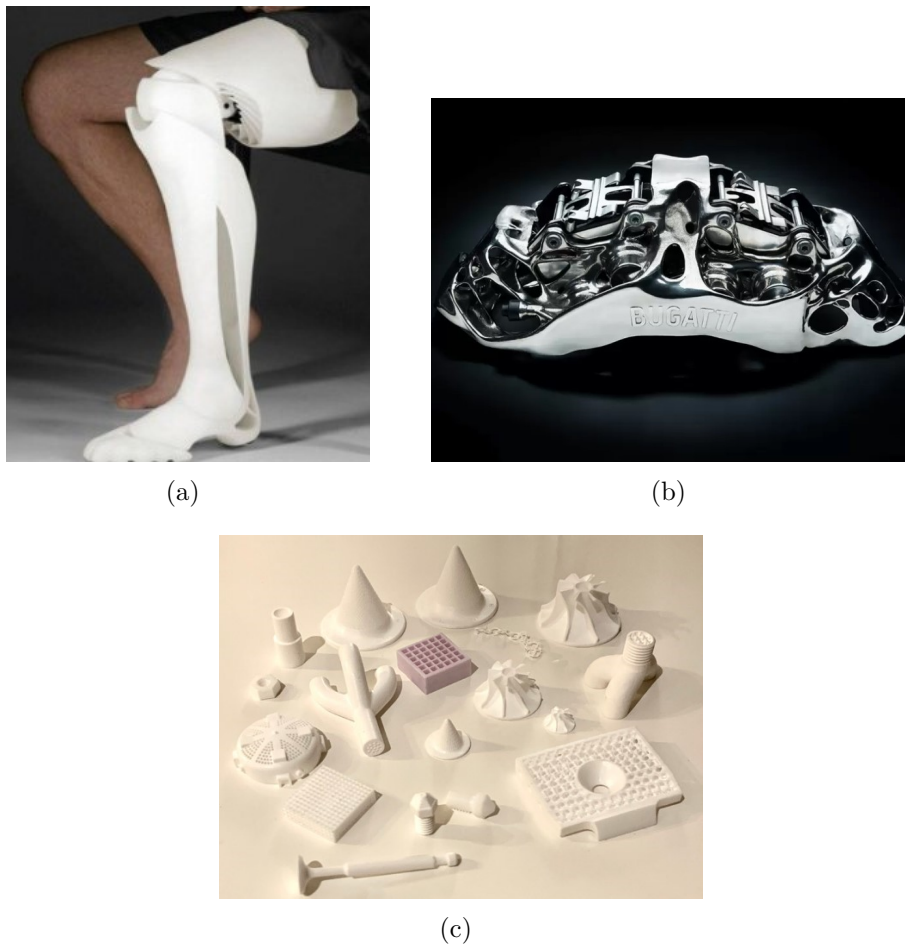


Figura 18 – Exemplos de produtos fabricados através de manufatura aditiva. a) Perna mecânica fabricada por manufatura aditiva de polímeros (MARTINS; DROZDA, 2020). b) Pinça de freio de titânio projetada e produzida por manufatura aditiva (BUGATTI, 2018). c) Peças cerâmicas fabricadas usando CeraFab 7500 na Tampere University (ZAKERI; VIPPOLA; LEVÄNEN, 2020).

2.2.1 Manufatura aditiva de metais

Dentre os diversos tipos de materiais citados na seção anterior, os materiais metálicos estão ganhando um interesse cada vez maior de pesquisadores e indústrias (VAFADAR et al., 2021). Isso ocorre, dentre outros fatores, pela possibilidade da produção de peças sob demanda com redução de custos, energia e também vantagens ambientais como menor desperdício e emissão de poluentes (FRAZIER, 2014) e (VAFADAR et al., 2021).

Assim como nos processos de soldagem, a manufatura aditiva possui diferentes métodos para criar seus produtos. O sistema de MA pode ser classificado/categorizado de algumas formas, como em termos de estoque de alimentação de material, fonte de energia e volume de construção (FRAZIER, 2014). Segundo o mesmo autor, os sistemas de manufatura são divididos em três categorias amplas (embora existam muitas mais): (i) *powder bed systems*, (ii) *powder feed systems*, (iii) *wire feed systems*. Já Li et al. (2019) separa a manufatura aditiva de metais em 4 grupos: *binder jetting*, *powder bed fusion*, *sheet lamination* e *direct energy deposition*, de acordo com a Figura 19.

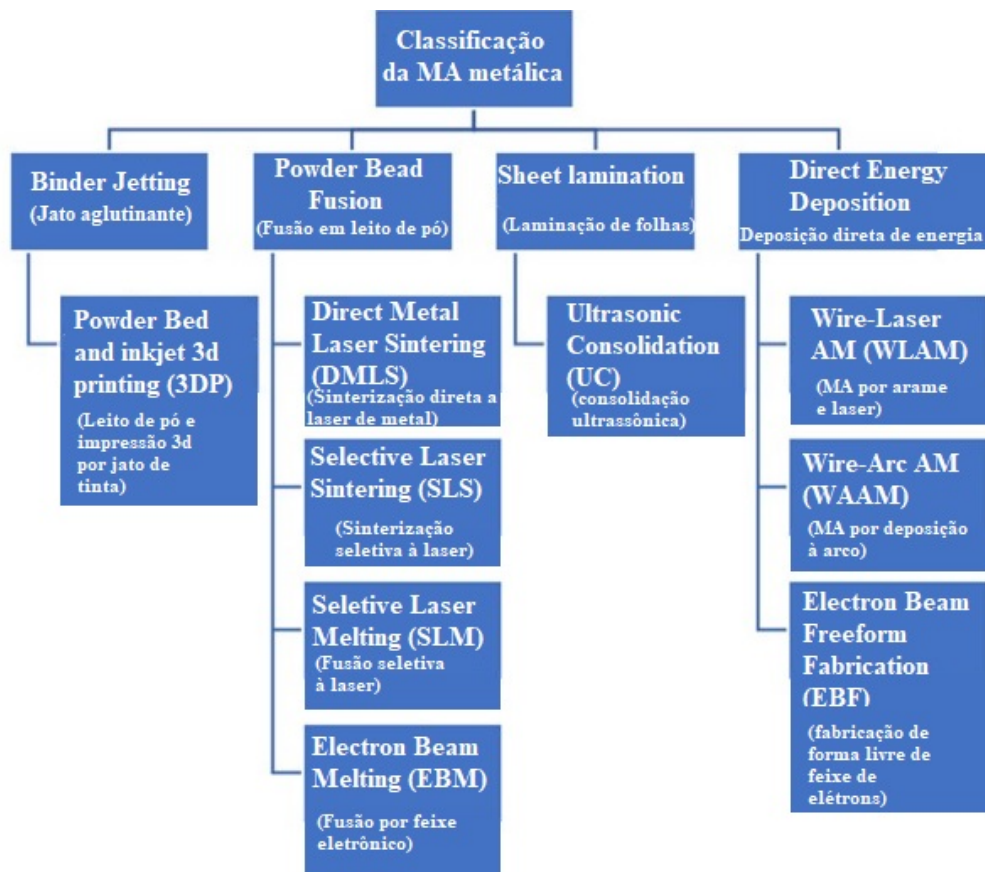


Figura 19 – Classificação das tecnologias de manufatura aditiva (adaptado de Li et al. (2019)).

O processo de fusão em leito de pó (PBF - *Powder Bed Fusion*) é o processo mais utilizado na manufatura aditiva de metais, representando 54% do mercado de MA em 2020 (VAFADAR et al., 2021). Os componentes básicos de um sistema PBF contêm uma câmara fechada com uma fonte de calor (laser ou feixe de elétrons), scanner, leito de pó, cama de suprimento de metal, braço de re-revestidor ou ancinho e geralmente um suprimento de gás inerte (COOKE et al., 2020). O PBF funciona da seguinte forma: Um leito de pó é criado ao espalhar o pó pela área de trabalho. A fonte de energia (feixe de elétrons ou feixe de laser) é programada para fornecer energia para a superfície do leito, derretendo ou sinterizando o pó na forma desejada (FRAZIER, 2014). Pó adicional é espalhado pela área de trabalho e o processo é repetido para criar um componente sólido tridimensional. O processo está representado pela Figura 20.

Os sistemas de jato de aglutinante (BJ - *Binder jetting*) foram desenvolvidos na década de 1990, mas só recentemente se tornaram sistemas de manufatura aditiva de metal populares (COOKE et al., 2020). O processo ocorre de forma semelhante aos demais processos de MA: O metal é espalhado e uma camada de ligante é depositada sobre a camada de metal em pó, quando necessário, o que é ditado pelo modelo CAD e este processo é iterado para construir a peça inteira (GOKULDOSS; KOLLA; ECKERT, 2017). A tecnologia BJ não necessita de estruturas de suporte e imprime objetos muito mais pre-

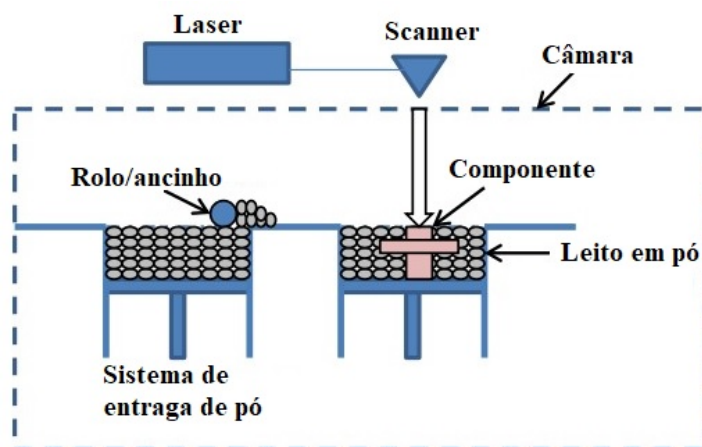


Figura 20 – Ilustração genérica de um sistema *powder bed* (adaptado de Frazier (2014)).

cisos em comparação com o *powder bed fusion* (VAFADAR et al., 2021). A representação do processo é dada pela Figura 21.

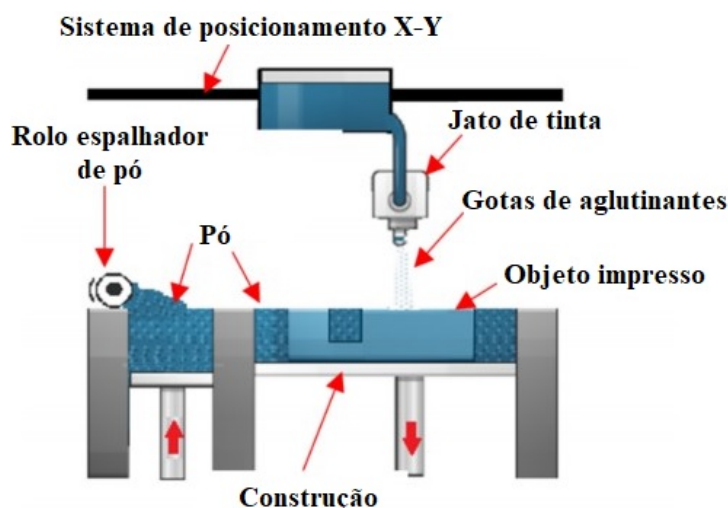


Figura 21 – Ilustração do processo *Binder Jetting* (adaptado de Vafadar et al. (2021)).

Uma das primeiras técnicas de manufatura aditiva comercializadas (1991) foi a fabricação de objetos laminados (LOM - *Laminated Object Manufacturing*), sendo praticada inicialmente através da laminação camada a camada de folhas de papel, cortadas com laser de CO_2 . A partir deste processo diversos outros foram criados, como colagem ou ligação adesiva, ligação térmica, fixação e soldagem ultrassônica (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015, p. 219). Os processos de laminação, de forma geral, têm se mostrado robustos, flexíveis e valiosos para muitas aplicações e materiais, além disso, pelo fato de o corte ocorrer apenas no contorno da camada, em vez de derreter toda a área transversal, o procedimento se torna muito veloz (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015, p. 242).

O método da deposição de energia direcionada (DED - *Directed Energy Deposition*) representava, em 2020, 16% do mercado de manufatura aditiva de metais (VAFADAR et al., 2021). Este procedimento usa a energia térmica focada da fonte de calor para derreter

e fundir o estoque de alimentação à medida que são depositados no substrato. Sistemas de deposição de energia direcionada oferecem uma grande flexibilidade em termos de fonte de calor e matéria-prima. Laser, arco elétrico ou feixe de elétrons (Figura 22) podem ser usados como fonte de calor, e metal em arame ou pó podem ser usados na alimentação do processo (SAMES et al., 2016 apud COOKE et al., 2020).

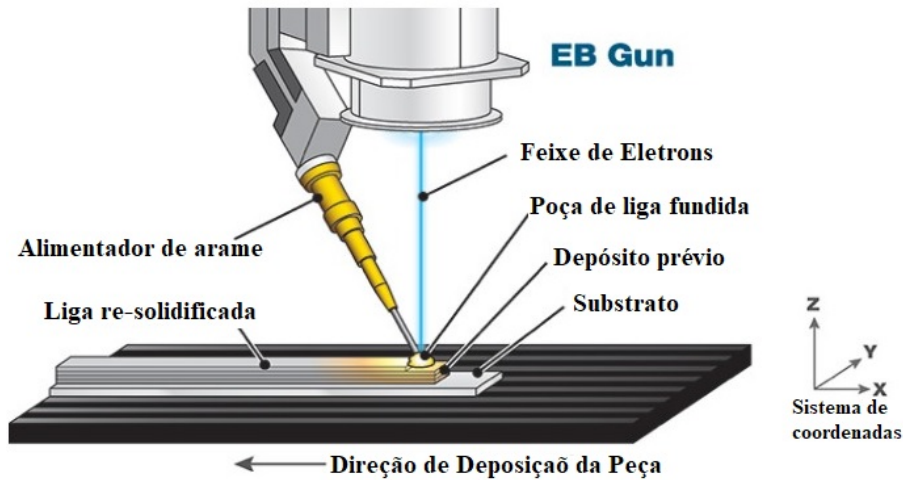


Figura 22 – Ilustração de um processo de manufatura aditiva por deposição de energia direcionada com fonte de feixe eletrônico (adaptado de Sciaky (2021)).

2.2.1.1 Wire Arc Additive Manufacturing

Dentre os processos de manufatura aditiva, o *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), traduzido ao português como Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), que é um dos métodos de deposição de energia direcionada (Figura 19), tem atraído grande interesse tanto do campo acadêmico quanto industrial (ROSLI et al., 2021). Isso ocorre devido à sua capacidade de criar grandes componentes de metal com alta taxa de deposição, baixo custo de equipamento, alta utilização de material e consequente compatibilidade ambiental (WU et al., 2018). Para alguns autores, como Vimal, Srinivas e Rajak (2020), WAAM é a técnica mais avançada usada para manufatura aditiva de metais.

A origem do processo WAAM pode ser rastreada até a década de 1925, quando Ralph (1925) propôs usar um arco elétrico como fonte de calor com arames de enchimento como matéria-prima para depositar ornamentos de metal. Desde então, avanços consistentes têm sido feitos no desenvolvimento dessa tecnologia, principalmente nos últimos 10 anos (WU et al., 2018). Atualmente, a alimentação do sistema ocorre através de arames, que estão disponíveis no mercado em diversos materiais a um custo relativamente baixo (JAFARI; VANEKER; GIBSON, 2021).

Dependendo da natureza da fonte de calor, existem normalmente três tipos de processos WAAM: com base em GMAW, com base em *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) e com base em soldagem a arco com plasma (*Plasma Arc Welding* PAW), cada um com suas características específicas como a utilização de tungstênio como eletrodo não consumível

no GTAW e uma taxa de deposição típica de 2-4 kg/h para o PAW (WU et al., 2018). A representação dos processos é dada pela Figura 23.

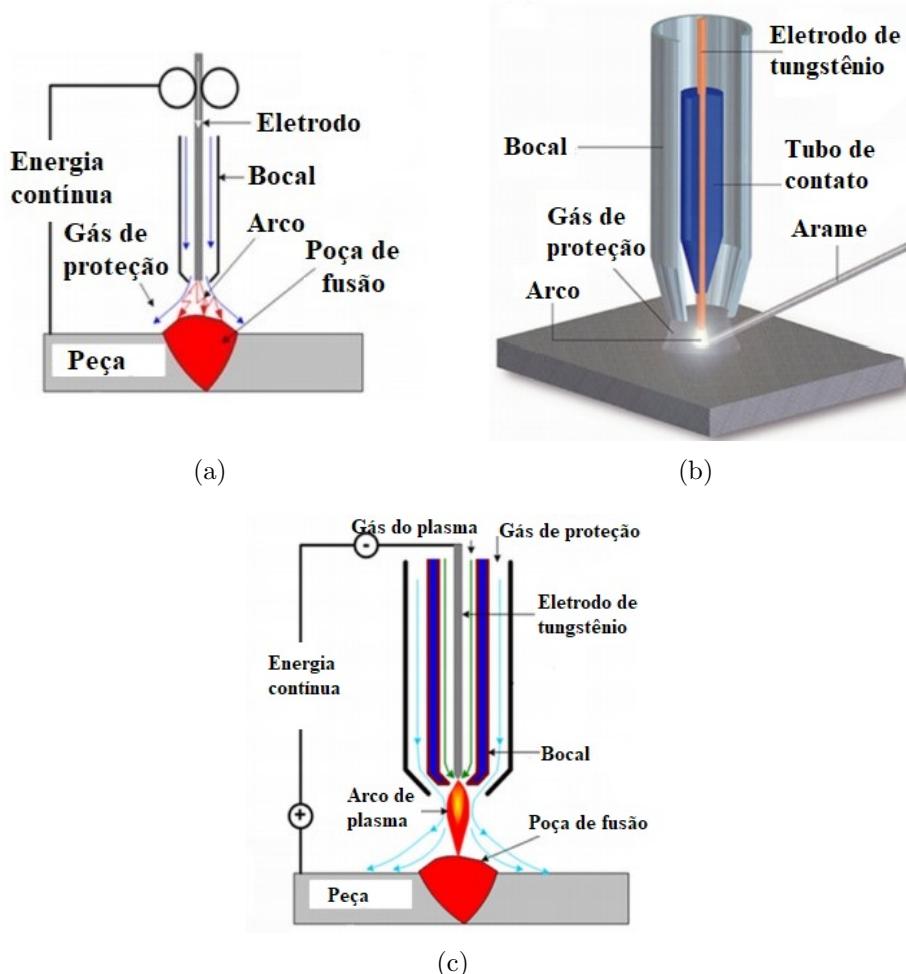


Figura 23 – Diagrama esquemático dos processos de manufatura aditiva WAAM: a) GMAW; b) GTAW; c) PAW (adaptado de Ding et al. (2015)).

No processo GMAW, um arco elétrico se forma entre um eletrodo de arame consumível e a peça de metal, sendo que o arame é, normalmente, perpendicular ao substrato (PAN et al., 2018). O diâmetro do arame está na faixa de 0,6 mm a 1,6 mm, podendo fabricar peças de alumínio, cobre, aço, latão titânio e ligas de níquel (VIMAL; SRINIVAS; RAJAK, 2020). A taxa de deposição de WAAM baseado em GMAW é 2–3 vezes maior do que os métodos baseados em GTAW ou PAW. No entanto, o WAAM baseado em GMAW é menos estável e gera mais fumaça de solda e respingos devido à corrente elétrica agindo diretamente na matéria-prima (WU et al., 2018).

No processo WAAM baseado em GTAW, um eletrodo de tungstênio é usado como eletrodo não consumível e gases como argônio e hélio podem ser usados como gases inertes de proteção, atuando contra a oxidação, corrosão e defeitos de fusão, além de contribuir com o transporte de calor no eletrodo e na estabilidade do arco (VIMAL; SRINIVAS; RAJAK, 2020). Por se tratar de um eletrodo não consumível, existe um processo separado para a alimentação por arame, que ocorre com uma taxa média de deposição de 1-2 kg/h

(JAFARI; VANEKER; GIBSON, 2021).

Durante o processo, a orientação do arame de alimentação tem influência na transferência de material e na qualidade de deposição, podendo ser feito de forma lateral (*side feed*), à frente (*front feed*) ou por trás (*back feed*). Procedimentos a base de titânio e ferro, por exemplo, geralmente utilizam o *front feed* (PAN et al., 2018). Porém, de forma geral, o GTAW também é amplamente utilizado para materiais como alumínio, aço, cobre e magnésio (VIMAL; SRINIVAS; RAJAK, 2020).

Assim como no GTAW, a manufatura aditiva PAW utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio para estabelecer o arco elétrico com a peça sob um gás de proteção. O processo é de alta densidade de energia, onde o arco é forçado a passar por um orifício colocado entre o cátodo e o ânodo que restringe o arco, resultando em um aumento da estabilidade do arco (RODRIGUES et al., 2019). A zona termicamente afetada dos cordões feitos através do PAW é estreita, o que permite um melhor controle da geometria do cordão de solda devido à maior facilidade de controlar independentemente a corrente e a velocidade da alimentação de arame (RODRIGUES et al., 2019 apud WANG; WILLIAMS; RUSH, 2011).

Em seu trabalho, Artaza et al. (2019) trazem uma comparação entre aspectos construtivos e mecânicos de dois corpos de prova, um fabricado por manufatura aditiva baseado em PAW e, o segundo, pelo método GMAW. Mantendo as mesmas taxas de alimentação e velocidade do arame para os dois processos, observou-se que a energia empregada no PAW foi muito maior quando comparada ao GMAW, sendo necessárias 55 camadas para o primeiro método e 60 camadas para o segundo método alcançarem as mesmas dimensões. Os corpos de prova estão apresentados na Figura 24. Quanto às propriedades mecânicas, foram observados calores maiores em 23% para o limite de resistência à tração e 56% para deformação na direção vertical processo no PAW quando comparado ao GMAW.



Figura 24 – Corpos de prova utilizados no experimento. Método PAW à esquerda e GMAW à direita (ARTAZA et al., 2019).

2.2.1.2 Wire Arc Additive Manufacturing - CMT

Dentre os diferentes processos de manufatura aditiva GMAW, a metodologia CMT tem apresentado grande relevância, este fato pode ser observado através de vasta quantidade de trabalhos publicados sobre o processo. Fang et al. (2019), por exemplo, analisam em seu trabalho a influência de quatro parâmetros na altura e largura em cordões de camada e passo únicos (*Single Layer Single Pass - SLSP*): velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame, correção de comprimento de arco e correção de pulso. O resultado do experimento mostrou que as velocidades de soldagem e de alimentação têm grande influência na largura e altura final, mas que as correções de comprimento de arco e pulso apresentam certa influência na largura, mas pouca influência na altura. Os resultados em relação à largura estão apresentados na Figura 25.

Pela Figura 25(a), é possível perceber que a largura da deposição é inversamente proporcional à velocidade de soldagem, sendo que uma velocidade de 0,3 m/min resulta em uma largura média de aproximadamente 8,50 mm e uma velocidade de 0,7 m/min resulta em uma largura de aproximadamente 6,00 mm. A Figura 25(b) mostra a proporcionalidade entre velocidade de alimentação de arame e a largura da deposição, resultando em uma largura de 4,25 mm para uma velocidade de 5 m/min e largura de 6,75 mm para 7 m/min. A Figura 25(c) apresenta uma alteração na largura de cerca de 6,25 mm para 5,25 mm quando a correção de distância de arco passa de 0% para 30%. Já a Figura 25(d) apresenta uma alteração na largura de cerca de 6,25 mm para 7,5 mm quando a correção de pulso passa de 0 para 5, mostrando que a correção de pulso possui proporcionalidade direta enquanto que a correção de distância de arco apresenta caráter indireto.

Derekar et al. (2020) fazem uma comparação entre diferentes métodos de WAAM, analisando em seu trabalho a dissolução de hidrogênio e, conseqüentemente, a formação de poros em peças de alumínio fabricadas por GMAW pulsado e CMT. Para isso, foram feitos oito corpos de prova de cada método e divisões de aproximadamente 7200 mm³ foram escaneadas por tomografia computadorizada (*X-ray Computed Tomography, XCT*). O resultado mostrou que, mesmo que ambos os processos tenham apresentado em sua maioria poros pequenos (0,21-0,30 mm), os corpos de prova fabricado por GMAW-P apresentaram uma maior quantidade de poros quando comparado ao CMT. As imagens obtidas estão apresentadas pela Figura 26.

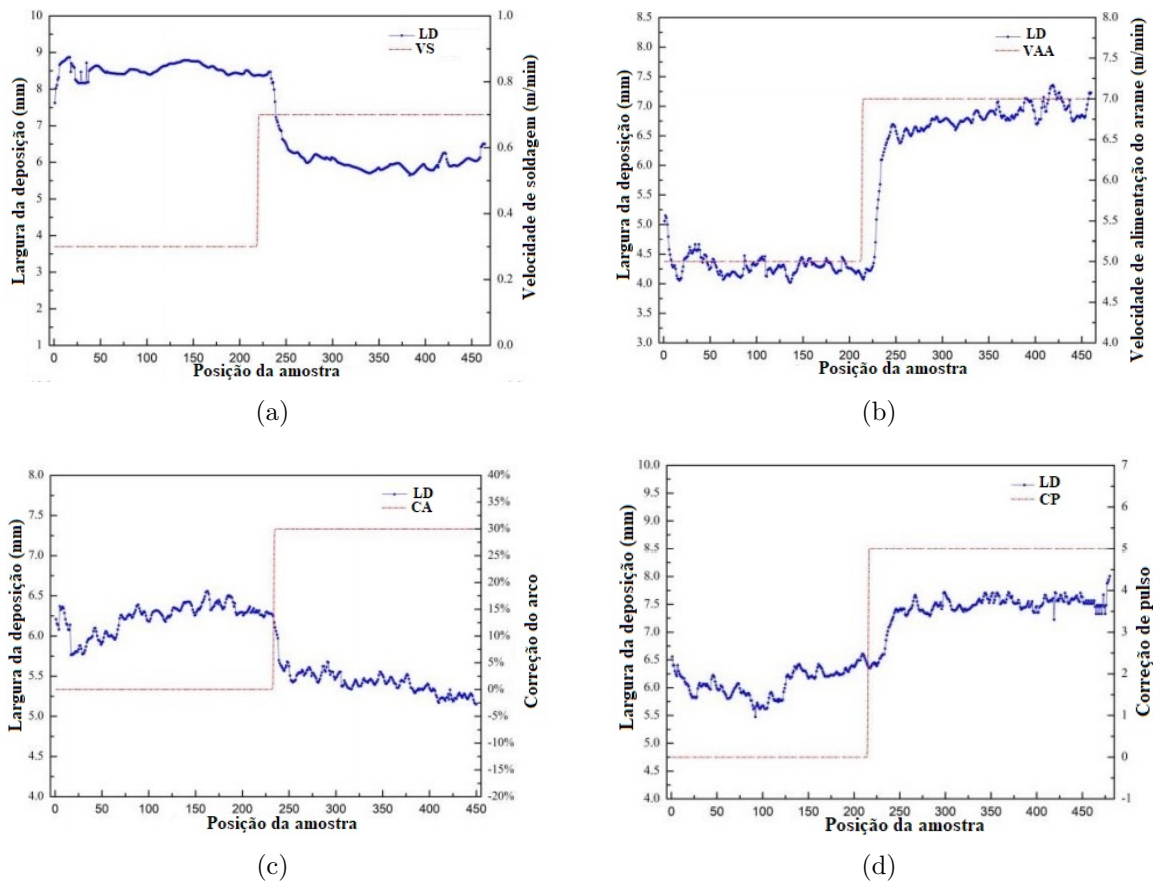


Figura 25 – Influência dos parâmetros de soldagem na largura final do cordão: a) Velocidade de soldagem; b) Velocidade de alimentação do arame; c) Correção de distância de arco d) Correção de pulso (adaptado de Fang et al. (2019)).

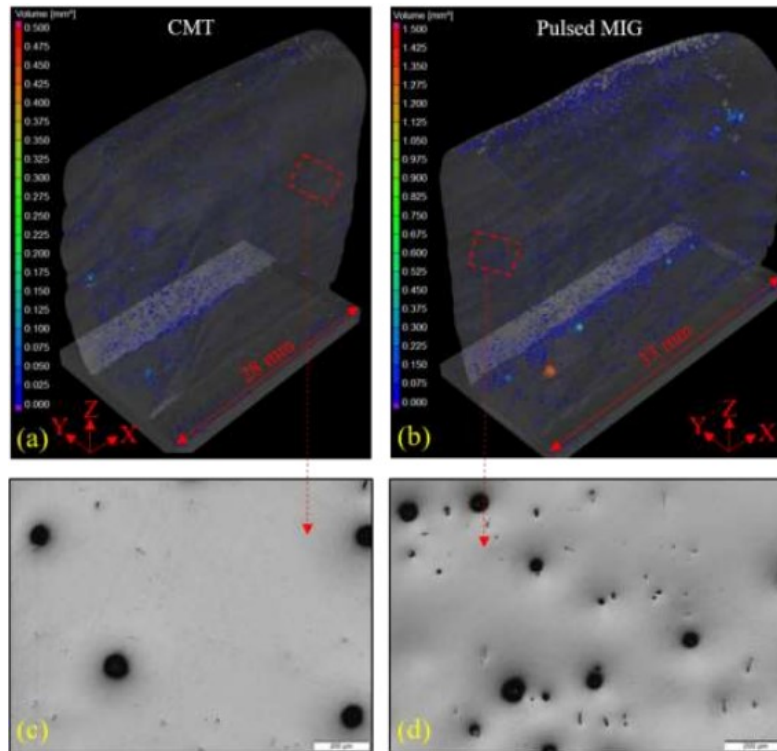


Figura 26 – Tomografia computadorizada da amostras: a) CMT b) GMAW-P. Micrografia mostrando as porosidades das amostras: c) CMT d) GMAW-P (DEREKAR et al., 2020)

De forma semelhante, Fang et al. (2018) analisam, dentre outros fatores como a microestrutura e resistência à tração, a presença de poros em peças de alumínio fabricada através de diferentes tipos de processo CMT: CMT *advance* (CMT-A), CMT pulsado (CMT-P) e o CMT convencional. Utilizando um microscópio de luz, as seções médias dos corpos de prova foram avaliados, e os resultados mostraram que o método CMT-P apresentou uma maior quantidade de poros, devido ao maior input de calor durante a deposição, seguido do CMT e, com a menor quantidade de poros, o CMT-A. Os resultados do trabalho estão apresentados na Figura 27. Para o limite de resistência à tração os corpos de prova apresentaram valores semelhantes, variando de 270,2 MPa, na posição vertical do método CMT-P, a 297,6 MPa na posição horizontal do método CMT.

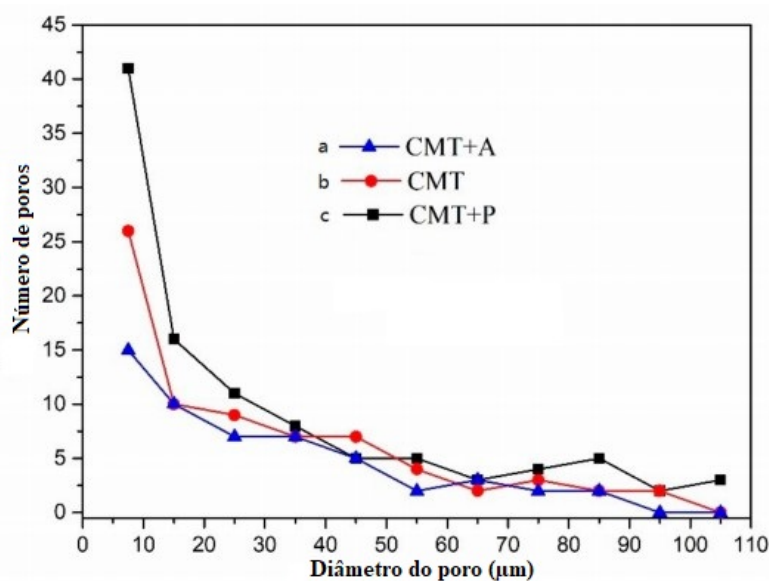


Figura 27 – Quantidade e dimensões de poros para cada processo CMT (adaptado de Fang et al. (2018)).

2.2.2 Manufatura subtrativa de metais

Nos processos de fabricação, geralmente há mais de um método que pode ser empregado para produzir um determinado componente, sendo que cabe ao engenheiro a seleção do método mais adequado com base em fatores como o tipo de material, propriedades finais desejadas, tolerâncias e acabamentos exigidos, custo, tempo e disponibilidade de equipamento (MACHADO et al., 2015). A Figura 28 apresenta uma classificação dos diversos processos de fabricação.

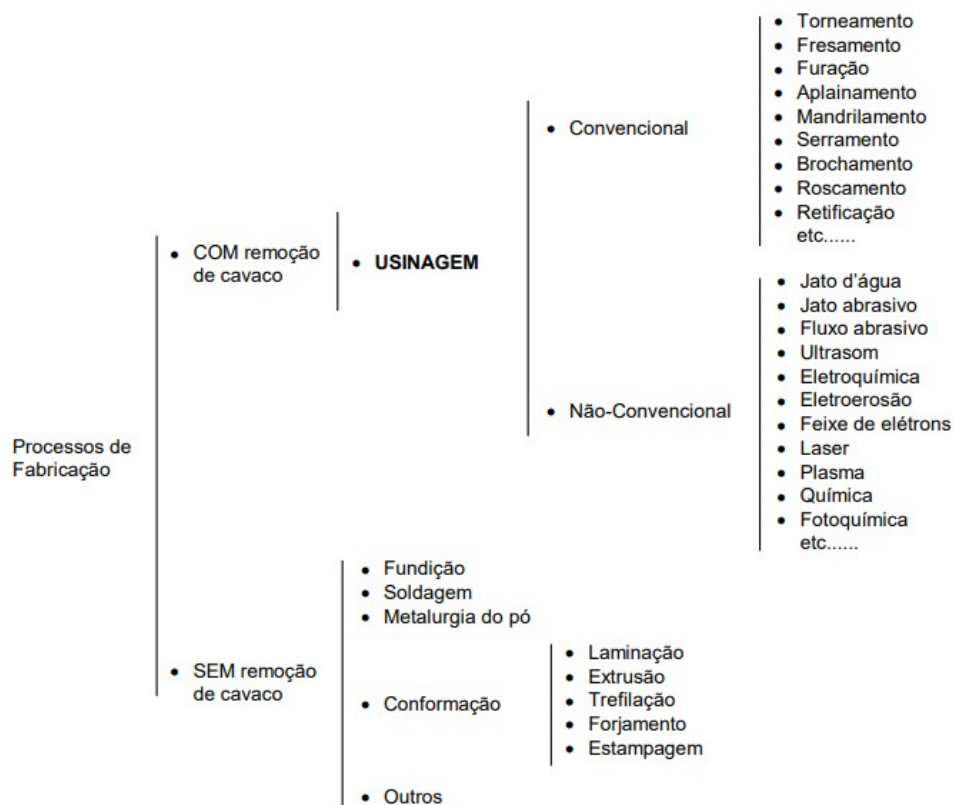


Figura 28 – Classificação dos processos de fabricação (FERRARESI, 1970 apud MACHADO; SILVA, 2004)

Através da Figura 28 é possível extrair a definição de usinagem como sendo: "Processo de fabricação com remoção de cavaco". Uma definição mais abrangente é: "Operação que ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco", sendo cavaco definido como: "Porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular" (MACHADO et al., 2015).

Os processos de manufatura subtrativa (MS) são relativamente antigos. A primeira contribuição relevante foi apresentada em 1774 por John Wilkinson, ao construir uma máquina para mandrilhar cilindros de máquinas a vapor. Avanços consideráveis continuaram a se desenvolver, como o desenvolvimento do primeiro torno com avanço automático em 1797 por Henry Maudslay, a criação da retificadora em 1860 e a primeira fresadora universal, desenvolvida por J. R. Brown em 1862. No século XX, com o surgimento de produtos feitos de materiais mais duráveis, o advento das ferramentas de aço rápido, e mais tarde carboneto de tungstênio, permitiu a usinagem de aços e de outros materiais metálicos com produtividade crescente. Avanços tecnológicos no campo das máquinas-ferramentas, como o desenvolvimento de máquinas automáticas e, mais tarde, de máquinas comandadas numericamente (CN) também são importantes marcos no campo da manufatura subtrativa (MACHADO et al., 2015).

Atualmente, existem vários estudos que contribuem com a contínua melhoria dos

processos de manufatura subtrativa, avaliando os diferentes parâmetros que afetam o resultado final dos produtos fabricados. Em seu trabalho, Okokpujie e Tartibu (2021) analisam a influência do fluido de corte na usinagem avançada de ligas de alumínio 8112 através de um estudo da taxa de remoção de material (*Material Removal Rate* - MRR). Foram avaliados três diferentes tipos de lubrificantes: *copra oil*, *copra oil* com nano-aditivo de dióxido de titânio (TiO_2) e *copra oil* com nano-aditivo de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (*Multi-walled Carbon Nanotubes* - MWCNTs). Os resultados, dados pela Figura 29, mostram que lubrificante com aditivo de dióxido de titânio é o mais indicado para a usinagem do processo em questão, por apresentar uma maior MRR máxima (54,57 mm^3/min) quando comparado aos outros lubrificantes (52,19 mm^3/min para o MWCNTs e 46,44 mm^3/min para o *copra oil*).

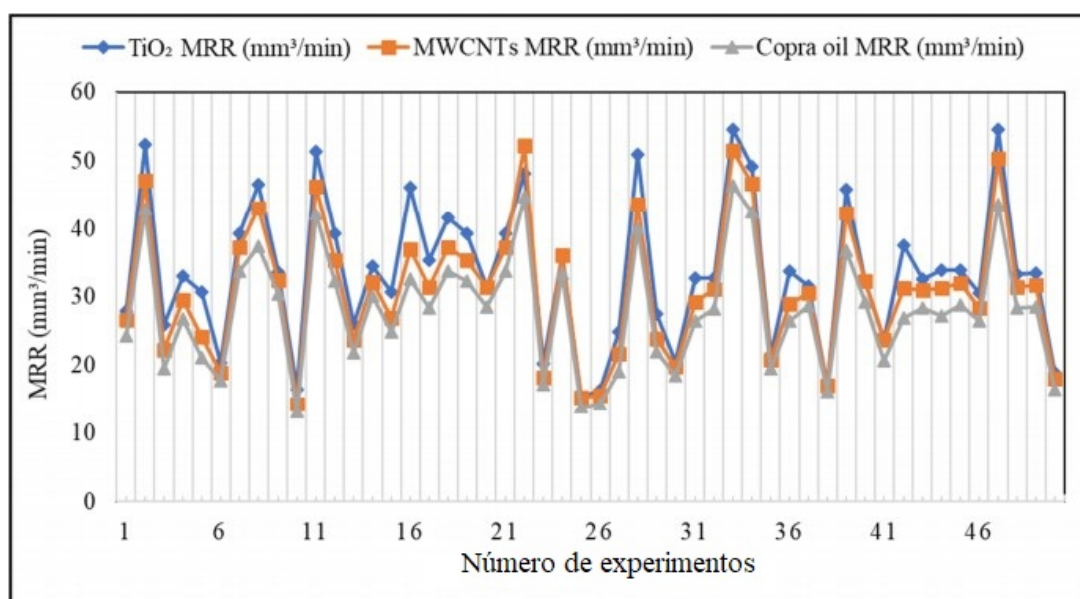


Figura 29 – Comparação na taxa de remoção de material para os três diferentes lubrificantes (adaptado de Okokpujie e Tartibu (2021)).

Já Fernández-Abia et al. (2013) fazem um estudo sobre as ferramentas de corte, comparando a rugosidade obtida na usinagem de aço inoxidável austenítico AISI 304L a partir de ferramentas com diferentes revestimentos: AlTiN, AlTiSiN, AlCrSiN e TiAlCrN. Através da Figura 30 é possível identificar, pela baixa rugosidade obtida, que os revestimentos AlTiN e AlTiSiN são os mais apropriados para a usinagem desse material, isso ocorre devido às suas estruturas nanocristalinas.

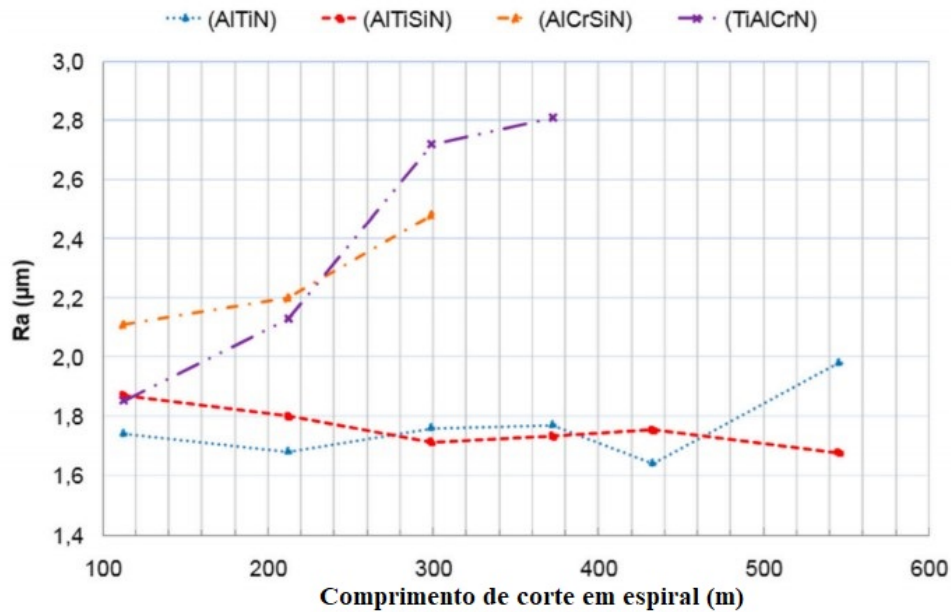


Figura 30 – Rugosidade obtida por ferramentas de corte com diferentes revestimento (adaptado de Fernández-Abia et al. (2013)).

O desenvolvimento dos processos ocorre também a partir de criações e melhorias de máquinas-ferramentas, aprimorando a qualidade de corte e estendendo a vida útil das ferramentas. A Sandvik (2021), por exemplo, traz uma nova geração de ferramentas GC4425 e GC4415, que promete um melhor desempenho em operações de corte intermitente, evitando quebras repentinas, e um aumento da vida útil. Já a Pramet (2021) desenvolveu uma nova classe de pastilha para o torneamento de aços, ferro fundido e superligas, a T8430. Segundo a empresa, a nova classe garante um aumento de até 69% na vida útil comparado à versões anteriores, especialmente na usinagem de aço bruto ou materiais de difícil usinagem, como Inconel e Stellite.

Outro exemplo é o desenvolvimento de ferramentas de usinagem destinados a proporcionar o acabamento de peças fabricadas através de manufatura aditiva. A OSG (2020) traz novas fresas, EXOCARB AM-EBT (Figura 31(a)) e AM-CRE (Figura 31(b)), com geometria negativa robusta e com o revestimento DUROREY, desenvolvido recentemente pela empresa com uma estrutura exclusiva, que oferece uma maior resistência ao calor e dureza para fresamento de aços resistentes, além de proporcionar uma maior vida útil à ferramenta.

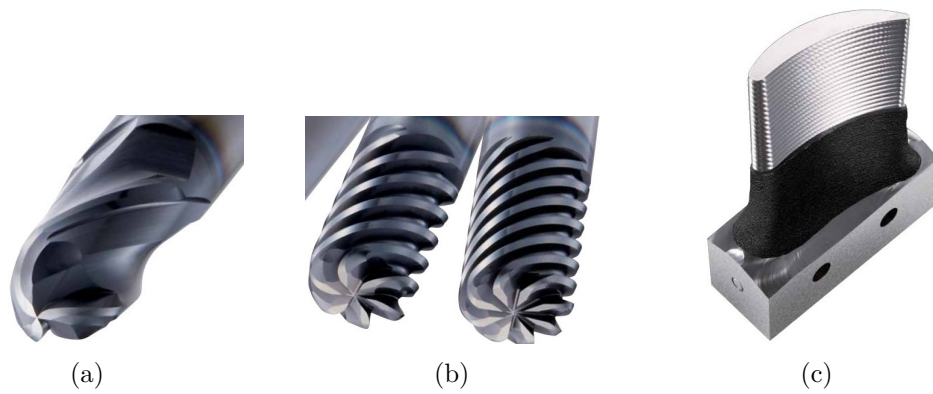


Figura 31 – a) EXOCARB AM-EBT; b) EXOCARB AM-CRE; c) Exemplo de peça fabricada por manufatura aditiva passando pelo processo de fresagem (OSG, 2020)

2.3 Vantagens e limitações da manufatura aditiva e manufatura subtrativa

A busca por processos de manufatura que possibilitem uma redução de custo, energia e uma ampliação da capacidade de produção geram uma comparação entre possíveis processos de fabricação, com o objetivo de definir um modelo ótimo de produção. É neste âmbito que indústrias e pesquisadores trabalham para identificar onde os processos recentes, como a manufatura aditiva, podem substituir métodos tradicionais ou criar novos sistemas de manufatura (PEREIRA; KENNEDY; POTGIETER, 2019). Em seu trabalho, por exemplo, Nishimura et al. (2016) comparam a fabricação de um mesmo modelo (Figura 32) através de uma tecnologia aditiva de prototipagem rápida e uma tecnologia subtrativa utilizando uma fresadora CNC (*Computerized Numerical Control*). Os autores destacaram, dentre outros fatores, o bom acabamento do processo CNC, porém, este apresentou um tempo de fabricação de 32 h e 40 min, bastante superior às 6 h e 16 min obtidos pela manufatura aditiva.



Figura 32 – Modelos desenvolvidos por diferentes métodos: manufatura aditiva, à esquerda, e manufatura subtrativa, à direita (NISHIMURA et al., 2016).

Diversos aspectos devem ser considerados na escolha do método de fabricação, como o volume produzido, complexidade da geometria e customização. De acordo com os

modelos de custo atuais, altos volumes de produção são mais adequados para os métodos de fabricação tradicionais, no entanto, quanto maior a complexidade ou customização necessária, a MA é mais adequada. A manufatura aditiva oferece flexibilidade e simplificação da cadeia de produção, o que permite aos fabricantes criar um design ideal para a produção enxuta (PEREIRA; KENNEDY; POTGIETER, 2019).

Diferentes métodos de manufatura causam diferentes impactos na qualidade final da peça. A vasta capacidade da MA, referente à variedade de materiais e diferenciação do processo de fabricação, resulta em requisitos e padrões de qualidade multifacetados. Por este motivo, a MS continua a dominar a MA em qualidade, precisão e confiabilidade (PEREIRA; KENNEDY; POTGIETER, 2019 apud NEWMAN et al., 2015). Em seu trabalho, Braian et al. (2018) analisam a precisão e acurácia obtidas na fabricação de peças de titânio utilizadas na odontologia. Para a manufatura aditiva foram utilizados as máquinas: Arcam, Concept laser, EOS e SLM Solutions, e para a manufatura subtrativa foi utilizada a máquina Mikrom. As medidas dos produtos finais foram avaliadas através de um paquímetro digital, sendo que o processo de manufatura subtrativa apresentou uma melhor precisão geral, abaixo de 0,050 mm. As precisões obtidas (eixo Y) em função do maquinário e eixos definidos (eixo X) para uma das peças estão apresentados na Figura 33.

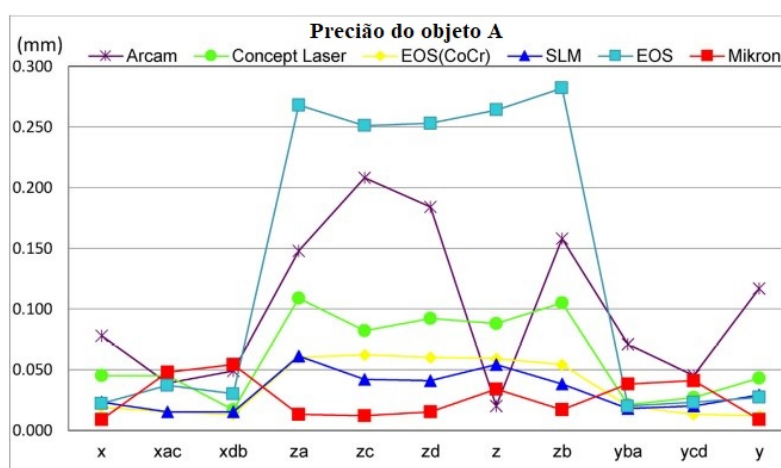


Figura 33 – Gráfico de precisão para a peça A (adaptado de Braian et al. (2018)).

Em seu trabalho, Yangfan, Xizhang e Chuanchu (2019) demonstram a adequação do processo CMT na fabricação de peças de ligas Inconel 625, destacando como vantagens do processo a excelente formação de superfícies, ausência de respingos e uma menor quantidade de defeitos relacionados à soldagem. Considerando suas vantagens, o CMT se torna uma opção promissora para produção de grandes peças mas, segundo o autor, estudos sobre a microestrutura e propriedades são de grande importância na consolidação do método. Os resultados obtidos no experimento, apresentados na Tabela 1, mostram que o limite de resistência à tração (*Ultimate Tensile Strength* - UTS) e o limite de escoamento (*Yield Strength* - YS) aumentam com o aumento da velocidade de soldagem, devido à formação de grãos mais finos.

Amostra	Velocidade da tocha (mm/s)	UTS (MPa)	YS (MPa)	Alongamento (%)
1	8	647,9	376,9	46,5
2	9	675,6	391,4	44,45
3	10	687,7	400,8	43
Fundição	/	710	350	40

Tabela 1 – Comparação entre as propriedades dos diferentes corpos de prova (YANGFAN; XIZHANG; CHUANCHU, 2019).

Analisando do ponto de vista da sustentabilidade, a vantagem mais clara da MA em relação à MS é a redução no desperdício de material e a melhor eficiência de recursos (PEREIRA; KENNEDY; POTGIETER, 2019), mas outros fatores também devem ser analisados. Paris et al. (2016) utilizam em seu trabalho o método da avaliação do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment - LCA*) para comparar a utilização de manufatura aditiva, por *Electron Beam Melting*, e manufatura subtrativa, por fresagem, na fabricação de uma turbina aeronáutica. Como resultado, observou-se que a energia consumida pelos dois métodos durante a fabricação foram quase idênticas. O que fez a diferença em termos de impactos ambientais foi principalmente a fabricação do pó para o processo EBM, e a produção de cavaco na fresagem, tornando a manufatura aditiva mais sustentável neste caso.

Já Ingarao et al. (2018) trazem uma comparação em termos ambientais de componentes de ligas de alumínio fabricados pela manufatura aditiva de fusão seletiva à laser (*Selective Laser Melting - SLM*), e por usinagem. Os resultados mostraram que, devido à grande intensidade de energia do processo SLM, a manufatura aditiva apenas se torna uma solução sustentável sob condições específicas: formatos de alta complexidade, redução significativa de massa e aplicação em sistemas de transporte.

2.4 Propriedades mecânicas dos metais

2.4.1 Resistência ao desgaste (dureza)

A dureza é a medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada, como uma pequena impressão ou risco. Os primeiros ensaios de dureza eram baseados em minerais naturais, com uma escala construída unicamente em função da habilidade de um material em riscar um outro mais macio. As técnicas quantitativas para determinação da dureza foram desenvolvidas ao longo dos anos, nas quais um pequeno penetrador é forçado contra a superfície de um material a ser testado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação. Os ensaios de dureza são realizados com mais frequência do que qualquer outro ensaio mecânico por diversas razões como: simplicidade, baixo custo, por ser um ensaio de baixo custo e pela possibilidade de estimativa de outras

propriedades mecânicas a partir dos dados obtidos nos ensaios de dureza (CALLISTER, 2002, p. 94).

A dureza é mais frequentemente medida em três escalas: Brinell, Vickers e Rockwell. No ensaio Brinell se utiliza uma esfera de carboneto de tungstênio de 10 mm de diâmetro sobre a qual se aplica uma carga de 500 kgf ou 3000 kgf, dependendo da faixa de dureza do material. O diâmetro resultante da impressão é medido com um microscópio e utilizado para calcular o valor da dureza. O ensaio Vickers utiliza uma pirâmide de diamante para imprimir a marca e a largura da impressão é medida em microscópio para o cálculo da dureza. Já o ensaio Rockwell usa uma esfera de 1/16 in (1,59 mm) de diâmetro ou uma ponta de diamante em forma de cone com ângulo de 120° e mede a profundidade de penetração. Neste método existem várias escalas utilizadas para materiais em diferentes faixas de dureza, sendo necessário especificar a letra e o número da leitura (NORTON, 2013, p. 42–43). As características e formulas para valor de dureza dos três métodos estão apresentados na Figura 34.

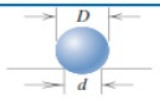
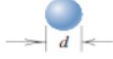
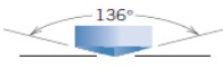

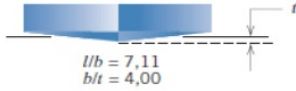
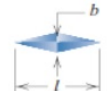
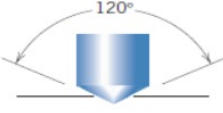






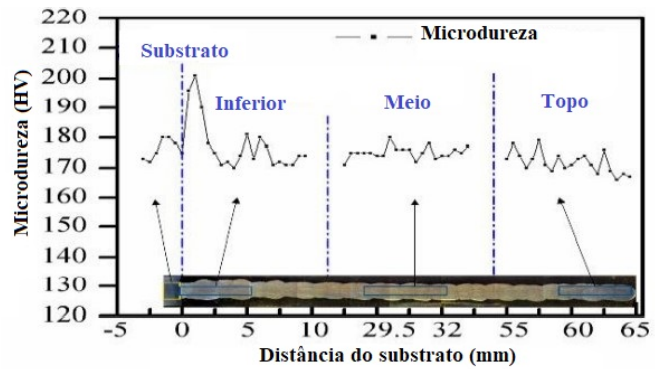
Ensaio	Indentador	Vista Lateral	Vista Superior	Carga	Equação
Brinell	Esfera de aço ou carbeto de tungstênio com 10 mm			P	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Microdureza Vickers	Pirâmide de diamante			P	$HV = 1.854P/d^2$
Microdureza Knoop	Pirâmide de diamante			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell e Rockwell Superficial	<ul style="list-style-type: none"> Cono de diamante; esferas de aço com diâmetros de $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in 		<ul style="list-style-type: none">  60 kg  100 kg  150 kg  15 kg  30 kg  45 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Rockwell Rockwell superficial 	

Figura 34 – Características dos métodos de ensaio de dureza (adaptado de Callister (2002, p. 95)).

Os diferentes processos e parâmetros de fabricação podem causar alterações nos valores de dureza dos produtos finais. Em seu trabalho, Sharma (2019) destaca, através de ensaios de dureza Vickers, a influência do efeito de calor na dureza de corpos de prova fabricados em aço inoxidável 316L pelo método CMT. Como resultado, o autor observou uma maior dureza na região mais próxima ao substrato devido à influência das taxas de resfriamento e efeito de calor das camadas superiores. De forma análoga, uma amostra de paredes múltiplas obteve uma maior dureza média, de 207 HV, quando comparada à amostra de parede única, 192,06 HV, devido à maior entrada de calor. O equipamento utilizado e o resultado encontrado ao longo da amostra de parede única estão apresentados na Figura 35.



(a)

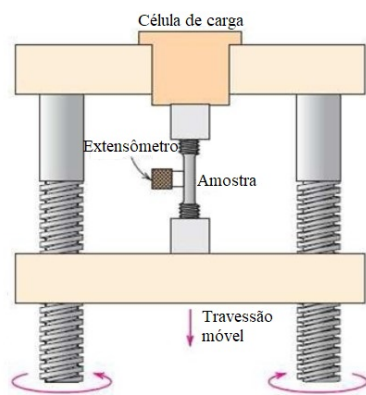


(b)

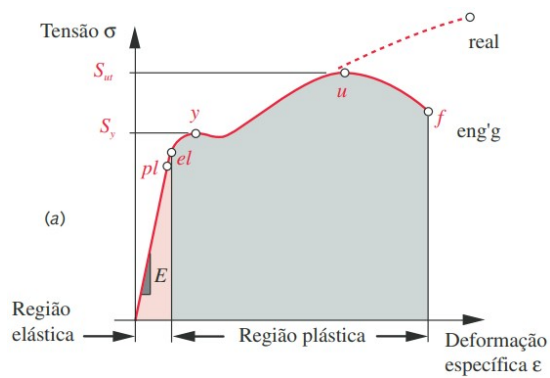
Figura 35 – a) Equipamento para medição de dureza Vickers. b) Valores de dureza ao longo da amostra de parede única (adaptado de Sharma (2019)).

2.4.2 Resistência à tração

Um dos ensaios mecânicos de tensão-deformação mais comuns é executado sob tração. O ensaio consiste na deformação de uma amostra, geralmente até a sua fratura, mediante uma carga de tração gradativamente crescente que é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo mais comprido do corpo de prova. A amostra é presa pelas suas extremidades nas garras de fixação do dispositivo de teste e as cargas aplicadas e alongamentos resultantes são medidos continuamente por uma células de carga e extensômetros respectivamente. Com os dados obtidos é traçada uma curva da tensão σ (força aplicada dividida pela área de seção do centro do corpo de prova) em função da deformação ϵ (variação do comprimento dividido pelo comprimento original) (CALLISTER, 2002, p. 79–81). A representação da montagem típica do ensaio de tração e a curva resultante estão apresentados na Figura 36.



(a)



(b)

Figura 36 – a) Representação esquemática do dispositivo usado para conduzir ensaios de tração (adaptado de Callister (2002, p. 81)). b) Diagrama tensão deformação para um aço de baixo carbono (NORTON, 2013, p. 32).

Através da curva tensão-deformação, Figura 36(b), importantes características dos materiais podem ser determinadas. Representado pela letra E, o módulo de elasticidade é uma medida da rigidez do material em sua região elástica, onde seu valor constante, para a maioria dos metais, é dado pela Lei de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.1)$$

O ponto *pl* representa limite da proporcionalidade dada pela Lei de Hooke e o ponto *el* representa o limite elástico, ponto além do qual o material adquirirá uma deformação plástica. Por serem muito próximos, estes dois pontos normalmente são considerados como um só. O ponto *y* indica a resistência ao escoamento, onde o material começa a ceder mais facilmente à tensão aplicada e sua taxa de deformação aumenta. O limite de resistência à tração é dado pelo ponto *u*, considerada a maior tensão da tração que o material pode suportar antes da ruptura considerando o diagrama tensão de engenharia-deformação, já que no diagrama tensão real-deformação, representado pela linha pontilhada na Figura 36(b), a redução da área do corpo de prova é considerada e a tensão de ruptura, ponto *f*, se torna maior (NORTON, 2013, p. 31–33).

Em seu trabalho, Yang et al. (2019) avalia a propriedades mecânicas de amostras da liga de alumínio AlSi7Mg0.6 fabricadas a partir da manufatura aditiva por CMT, sendo que uma delas passou por um tratamento térmico T6 (solid solution 535 °C/1h + quenching + artificial aging 120 °C/1h + 165 °C/8h). Os resultados mostraram que, após o tratamento térmico, o modo de elasticidade, resistência ao escoamento e o limite de resistência à tração na direção X (direção de viagem da tocha de soldagem) tiveram um aumento de 37,79%, 272,46% e 181,22% respectivamente e as propriedades ao longo da direção Z (direção de construção) tiveram um aumento de 41,97%, 318,37% e 171,41%. As curvas tensão-deformação para ambas as direções e amostras estão apresentadas na Figura 37.

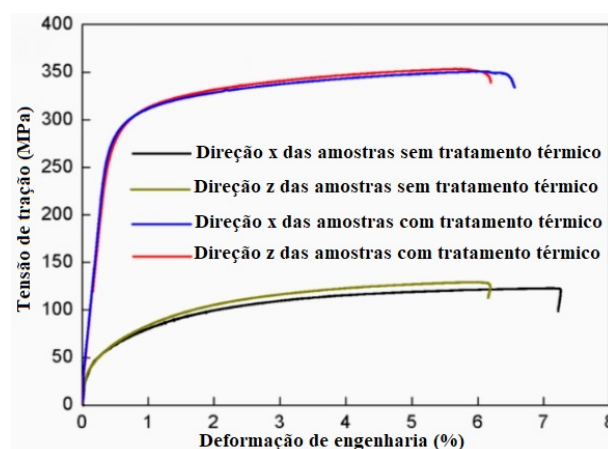


Figura 37 – Curva tensão-deformação para os corpos de prova com e sem tratamento nas direções X e Z (adaptado de Yang et al. (2019)).

2.4.3 Resistência a compressão

A máquina de ensaio de tração pode ser revertida para aplicar uma força de compressão a um corpo de prova. Porém, é difícil obter um diagrama tensão-deformação a partir desse ensaio, porque um material dúctil escoa e aumenta a área de sua seção transversal, conforme apresentado na Figura 38. A maior parte dos materiais dúcteis tem resistência à compressão semelhante à resistência à tração, e o diagrama tensão-deformação na tração é utilizada para representar também seu comportamento sob compressão. Um material que tenha resistências essencialmente iguais à tração e à compressão é chamado de material uniforme. Já os materiais frágeis rompem-se sob pressão, como apresentado na Figura 38, e geralmente apresentam resistência muito maior à compressão do que à tração, sendo considerados materiais não uniformes (NORTON, 2013, p. 34–35).

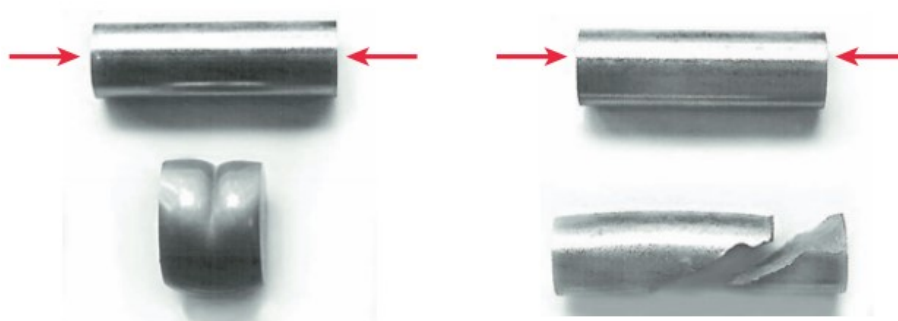


Figura 38 – Corpos de prova dúctil, à esquerda, e frágil, à direita, antes e depois de um ensaio de compressão (NORTON, 2013, p. 35).

Características importantes dos materiais como a presença ou não de isotropia podem ser verificadas através de um ensaio de compressão. Abbaszadeh et al. (2021) avaliam, dentre outras características, a isotropia dos aços Ti-6Al-4V, AA2319 e S355JR fabricados por MA através dos métodos a plasma, CMT-P e CMT convencional respectivamente. Os resultados obtidos através de ensaios de compressão nas direções longitudinal, transversal e normal, apresentados na Figura 39, mostram uma isotropia do S355JR, devido à presença de uma microestrutura homogênea. Para o Ti-6Al-4V, o comportamento anisotrópico observado ocorreu devido à presença de diferentes planos cristalinos na direção normal. Já para o aço AA2319, a formação de porosidades causou um comportamento anisotrópico durante os últimos estágios do ensaio.

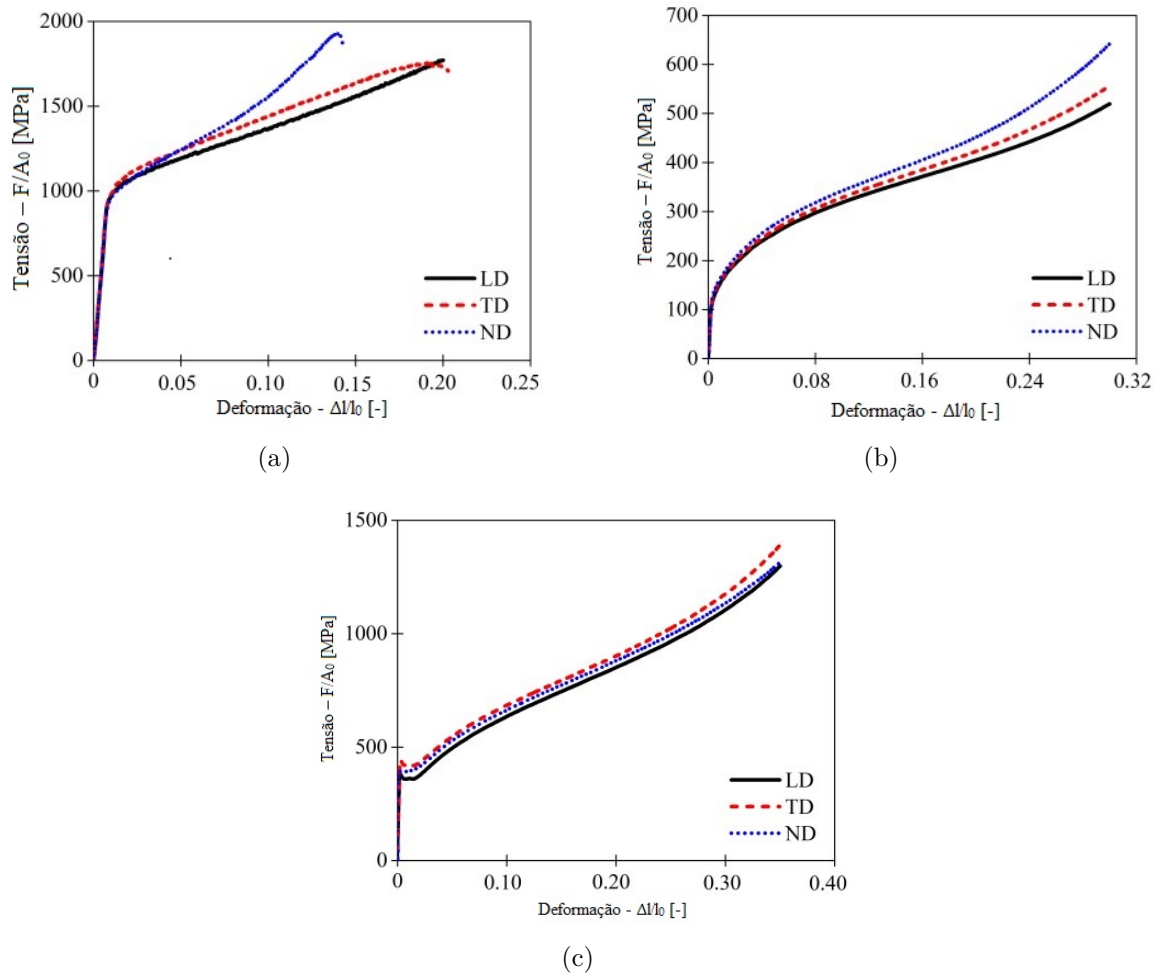


Figura 39 – Curva tensão-deformação obtida através dos ensaios de compressão para os materiais: a) Ti-6Al-4V; b) AA2319; c) S355JR (adaptado de Abbaszadeh et al. (2021)).

2.4.4 Resistência a torção

Qualquer vetor de momento que seja colinear com um eixo de um elemento mecânico é chamado de vetor de torque, pois o momento faz com que o elemento seja torcido em torno desse eixo. Uma barra submetida a um tal momento também é dita estar em torção (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 121). Essa situação é comum em eixos que transmitem potência, em aparafusadores e em qualquer situação em que o vetor do momento aplicado seja paralelo ao eixo longitudinal de um corpo, em vez de ser transversal a ele como no caso da flexão (NORTON, 2013, p. 177).

O ângulo de torção de uma barra redonda maciça é dado pela Equação 2.2:

$$\theta = \frac{Tl}{GJ} \quad (2.2)$$

onde T representa o torque, l o comprimento, G o módulo de rigidez e J o segundo momento polar de área. A tensão máxima dada por um dado torque é encontrada em

função do raio, pela Equação 2.3 (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 121–122).

$$\tau_{max} = \frac{Tr}{J} \quad (2.3)$$

Com o objetivo de diversificar a caracterização de produtos fabricados através de manufatura aditiva, (BALDERRAMA-ARMENDARIZ et al., 2018) buscam, em seu trabalho, analisar as propriedades de torção do termoplástico *Stratasys ABS-M30* produzido pelo método FDM (*fusion deposit modeling*), comparando-o com uma amostra solida de injeção plástica. Diferentes orientações e direções de construção foram avaliadas e o estudo apontou que os dois métodos de fabricação apresentaram valores semelhantes de módulo de rigidez, limite de escoamento e limite de resistência à tração, diferenciando de forma notável apenas na tensão de fratura. Segundo os autores, essa diferença pode indicar que o processo FDM pode imprimir componentes com propriedades elásticas semelhantes em torção, mas com menos ductilidade do que os componentes de moldagem por injeção. Os resultados para o módulo de cisalhamento e deformação de fratura estão apresentados na Figura 40.

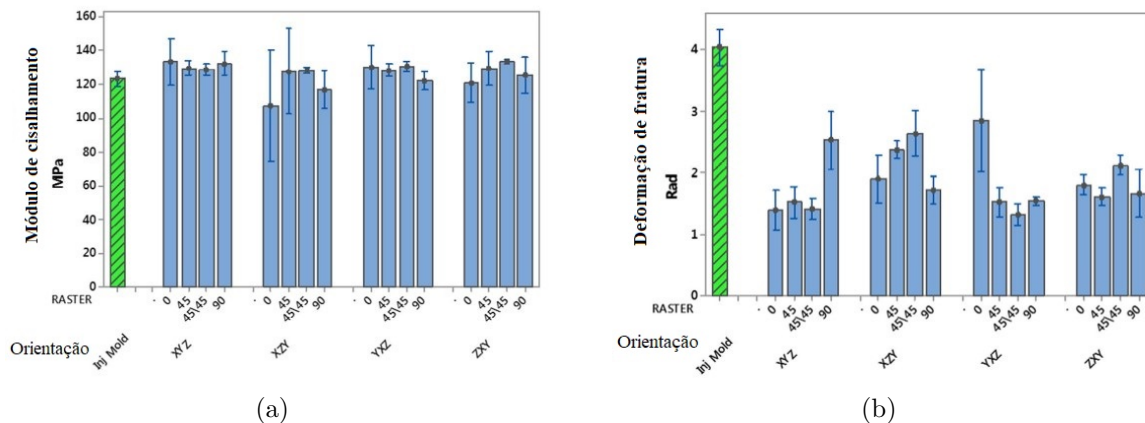


Figura 40 – Resultados obtidos através do ensaio de torção para: a) Módulo de cisalhamento; b) Deformação de fratura (adaptado de Balderrama-Armendariz et al. (2018)).

2.4.5 Resistência ao impacto

O impacto refere-se à colisão de duas massas com velocidade relativa inicial. Em alguns casos é desejável, como por exemplo em prensas de cunhagem, estampas e conformação. Em outros casos, os impactos são indesejados, podendo causar ruídos e falha do material, como durante a operação de engrenagens (BUDYNAS; NISBETT, 2011, 209). Com o objetivo de determinar a energia de impacto, algumas vezes também chamada de tenacidade ao entalhe, dois tipos de ensaios foram criados, as técnicas Charpy e Izod. Porém, as energias de impacto são de interesse principalmente em termos relativos, bem como para se realizar comparações (os valores absolutos possuem pouco significado) (CALLISTER, 2002, p. 143–145).

Durante ambos os ensaios de impacto, uma carga é aplicada como um impacto instantâneo de um martelo de pêndulo balanceado que é liberado de uma posição elevada que se encontra a uma altura fixa. Com a liberação, uma aresta atinge o corpo de prova em uma região de entalhe, que atua como um ponto de concentração de tensões. A medida da energia de impacto é computada a partir da diferença entre a altura inicial do pêndulo e sua altura alcançada após o impacto. A diferença principal entre os dois testes está no posicionamento do corpo de prova (CALLISTER, 2002, p. 143).

Em seu artigo, Waqas et al. (2019) utilizam o ensaio Charpy para determinarem a energia absorvida no impacto por amostras de aço carbono fabricadas pelo método GMAW com o eletrodo ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Foram feitas medições em 16 corpos de prova do material, sendo 8 obtidas na direção paralela à deposição (horizontal) e 8 na direção perpendicular à deposição (vertical). Os resultados mostram uma energia de impacto absorvida média de 189 J para a direção horizontal e 202 J para a direção vertical, valores próximos aos 205 J encontrados na literatura para o aço com teor de carbono semelhante (0,11% C). O maquinário utilizado no experimento e os valores obtidos por ensaio estão apresentados na Figura 41.

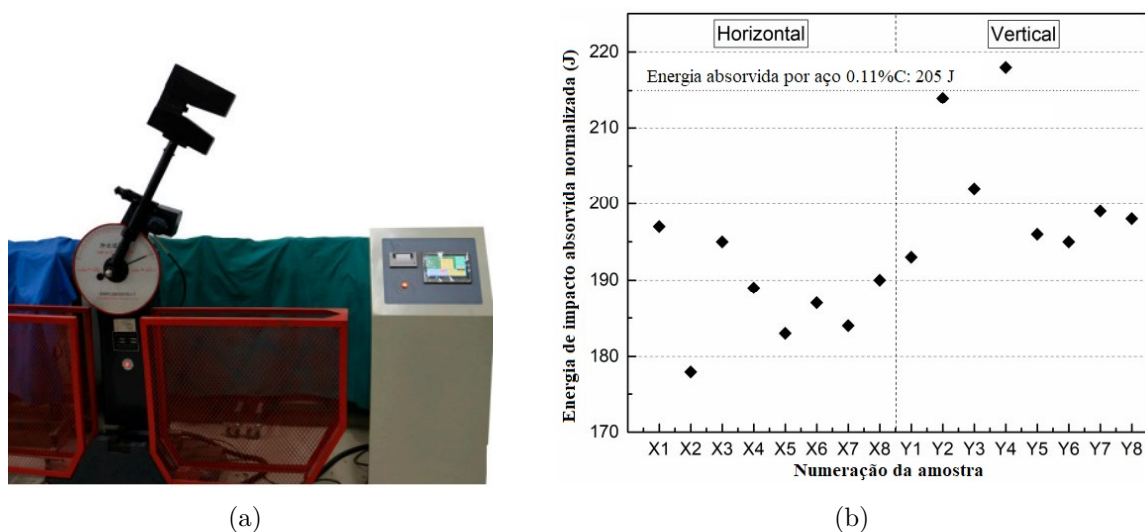


Figura 41 – a) Máquina de teste de impacto Charpy JBS-300; b) Energia de impacto absorvida nas amostras horizontais e verticais (adaptado de Waqas et al. (2019)).

2.4.6 Resistência a fadiga

A maioria das falhas em máquinas acontece devido a cargas que variam no tempo, e não a esforços estáticos. Essas falhas ocorrem, geralmente, em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais (NORTON, 2013, p. 303). A característica mais distinguível dessas falhas é que as tensões foram repetidas um número muito grande de vezes, daí a falha ser chamada de falha por fadiga. Além disso, outra propriedade da falha por fadiga é que, ao contrário das falhas sob ten-

sões estáticas, a falha por fadiga não dá sinais como grandes deflexões, ela é súbita, o que a torna muito perigosa e desperta o interesse dos engenheiros (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 284).

Esse fenômeno foi observado pela primeira vez por volta de 1800, quando os eixos de um vagão ferroviário começaram a falhar após um pequeno período em serviço. Apesar de serem feitos de aço dúctil, eles exibiam características de fraturas frágeis e repentinas. Rankine publicou um artigo em 1843, “As Causas da Ruptura Inesperada de Munhões de Eixos Ferroviários”, no qual dizia que o material havia “cristalizado” e se tornado frágil devido às tensões flutuantes. Falhas envolvendo fadiga continuam ocorrendo, as vezes de forma trágica, como na destruição do primeiro avião a jato comercial com passageiros em 1954, o inglês *Comet*, e também do Boeing 737 em 1988 (NORTON, 2013, p. 303 – 305).

O processo de falha por fadiga pode ser dividido em 3 estágios. O primeiro estágio é a iniciação de uma ou mais microtrincas devido à deformação plástica cíclica seguida de propagação cristalográfica que se estende de dois a cinco grãos da origem. Trincas do estágio 1 normalmente não são discerníveis a olho nu. No estágio 2 a fratura progride de microtrincas a macrotrincas, formando superfícies de fratura tal qual platôs paralelos separados por sulcos paralelos. Essas superfícies podem ter bandas onduladas claras e escuras, conhecidas como marcas de praia ou marcas de concha de ostra. No estágio 3, o material remanescente não consegue suportar as cargas, resultando em uma fratura rápida e repentina (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 284).

Na Figura 76(a), por exemplo, é possível identificar que a falha se iniciou no ponto A, propagou-se ao longo da maior parte da seção transversal como evidenciado pelas marcas de praia em B, e teve sua fratura rápida final em C. A Figura 76(b), apresenta um eixo com rasgo de chaveta que falhou sob flexão rotativa, nela estão destacados o início e fim da ruptura, assim como o sentido de rotação e as marcas de praia formadas.

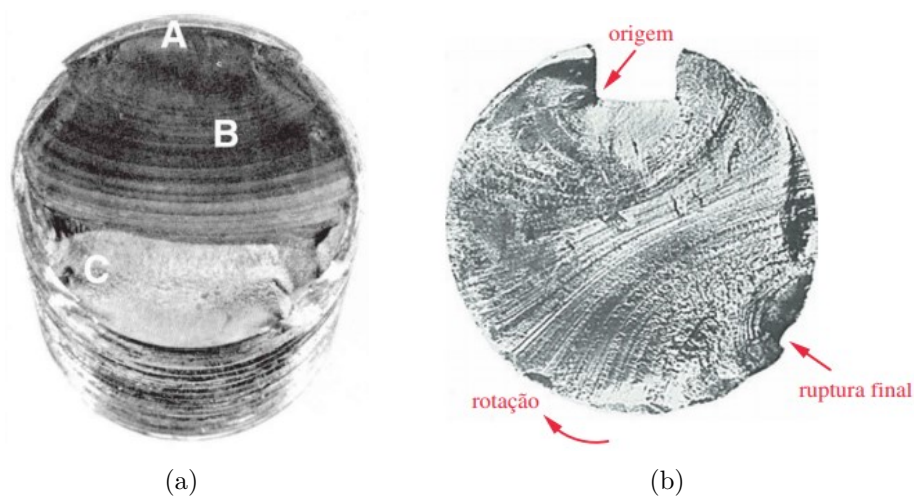


Figura 42 – a) Falga por fadiga de um parafuso de porca em razão de flexão unidirecional repetida (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 285); b) Eixo com rasgo de chaveta que falhou sob flexão rotativa (NORTON, 2013, p. 309).

Existem três modelos de falha por fadiga em uso, atualmente, e cada um possui uma área de aplicação e um propósito. As abordagens são: o modelo tensão-número de ciclos (S-N), o modelo deformação-número de ciclos (ϵ -N) e o modelo da mecânica da fratura linear-elástica (MFLE).

No método tensão-número de ciclos, os espécimes são submetidos a forças repetidas ou variáveis de magnitudes especificadas enquanto os ciclos ou reversões de tensão são contados até a destruição. O primeiro ensaio é feito com uma tensão algo inferior à resistência última do material, o segundo é feito com uma tensão menor que a utilizada no primeiro teste. O processo é continuado e os resultados são traçados em um diagrama S-N ou Curva de Wöhler. Neste diagrama é possível observar a chamada resistência à fadiga em função do seu número de ciclos correspondente e, para alguns casos como no aço, o limite de endurance ou limite de fadiga, que representa a resistência para uma vida infinita. O método tensão-número de ciclos é o procedimento menos acurado, especialmente para aplicações de baixa ciclagem, contudo é o mais tradicional, com muitos dados disponíveis publicados (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 292 – 293) (NORTON, 2013, p. 317).

Exemplos da utilização do diagrama S-N na descrição dos materiais podem ser encontrados nos trabalhos de Becker, Gauthier e Vidal (2020) e Karakaş, Baumgartner e Susmel (2020). O primeiro faz uma análise das propriedades à fadiga de uma união soldada por explosão entre aço S533 e alumínio 5754 com uma camada intermediária de alumínio 1050. O resultado do diagrama S-N para diferentes razões de tensões R (quociente entre a tensão mínima e tensão máxima) estão apresentados na Figura 43 sendo que os losangos com setas no lado direito representam amostras que não romperam com 10 milhões de ciclos. Já o segundo trabalho estudou a fadiga em uniões soldadas feitas de liga de magnésio forjada AZ31 em diferentes arranjos e níveis de penetração. O diagrama S-N para as diferentes uniões a uma mesma razão de tensão, -1, está apresentado na Figura 44.

A abordagem de deformação-número de ciclos fornece uma visão razoavelmente precisa do estágio de iniciação da trica (estágio 1) pois esse fenômeno envolve escoamento. Este método é aplicado com maior frequência em regimes de fadiga de baixo-ciclo e em problemas de vida finita, nos quais as tensões cíclicas são elevadas o suficiente para causarem escoamento local. É a aproximação mais complicada dos três modelos para ser utilizada e requer uma solução com o auxílio de computadores (NORTON, 2013).

A teoria da mecânica da fratura fornece o melhor modelo para o estágio de propagação da trinca do processo de fadiga (estágio 2). Este método, bastante utilizado para prever o tempo de vida restante em peças trincadas durante serviço, é aplicado em regimes de fadiga de baixo-ciclo e em problemas de vida finita nos quais as tensões cíclicas são conhecidas por serem elevadas o suficiente para causarem a formação de trincas. Esta abordagem é frequentemente utilizada em conjunto com ensaios não destrutivos (END) em programas periódicos de inspeção de serviço, especialmente na indústria aeronáutica/aeroespacial (NORTON, 2013).

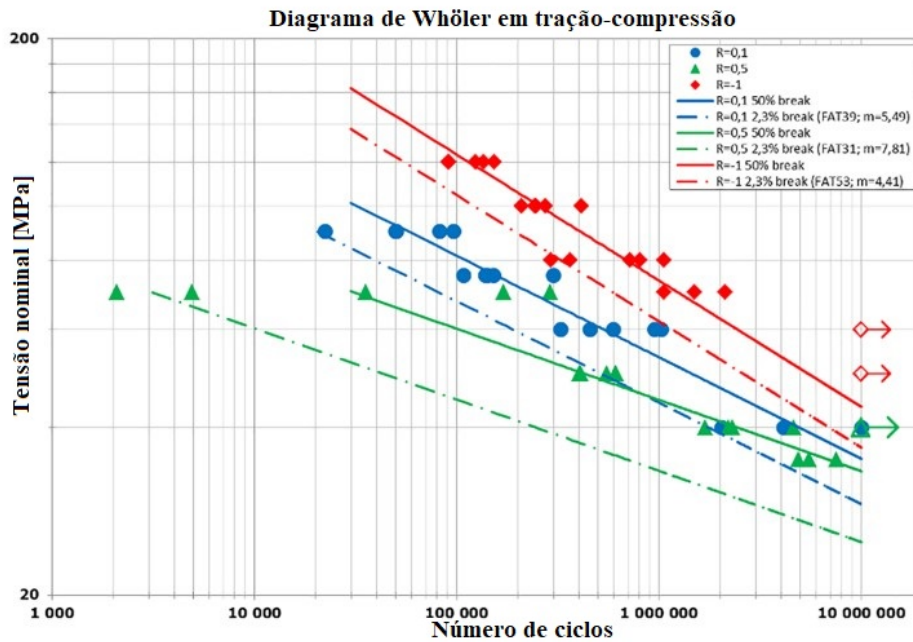


Figura 43 – Curva S-N em tração-compressão para uma união soldada por explosão (adaptado de Becker, Gauthier e Vidal (2020)).

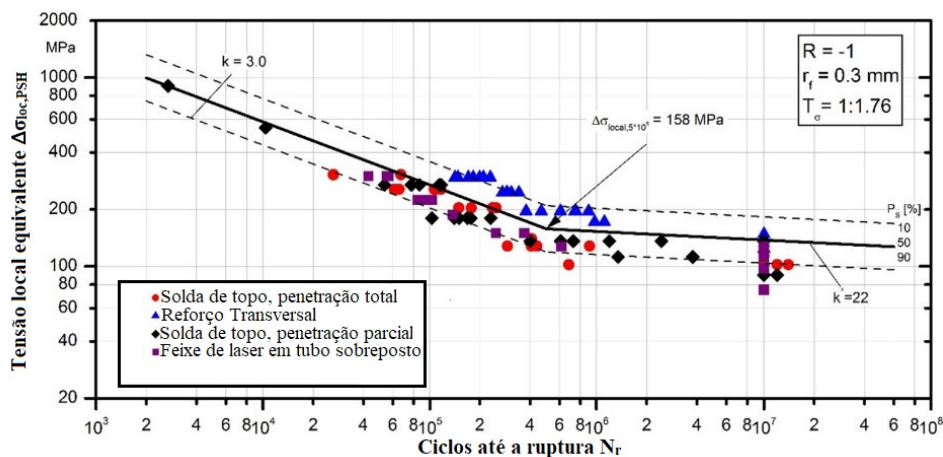


Figura 44 – Curva S-N para a união soldada de magnésio a uma razão de tensão de -1 (adaptado de Karakaş, Baumgartner e Susmel (2020)).

Diversos fatores podem influenciar na vida em fadiga de uniões soldadas, como por exemplo as características geométricas da solda e o processo de soldagem utilizado. Porém, em seu trabalho, (ŁAGODA; GŁOWACKA, 2020) concluíram que, para o caso estudado, o material das partes a serem unidas não interferem na resistência à fadiga, apenas o tipo de junta altera os resultados. Os testes foram feitos utilizando 4 tipos de aços: S355N, S355N, S690Q e S960Q, soldados pelo método GMAW com 3 diferentes tipos de juntas: junta de topo plana com uma face não usinada, junta cruciforme e junta de topo feita de amostras redondas com uma face usinada. Além destes fatores, as amostras foram testadas com razões de tensões de -1 e 0. As curvas S-N foram traçadas e, como apresentado no exemplo da Figura 45, os diferentes metais apresentaram características

muito próximas.

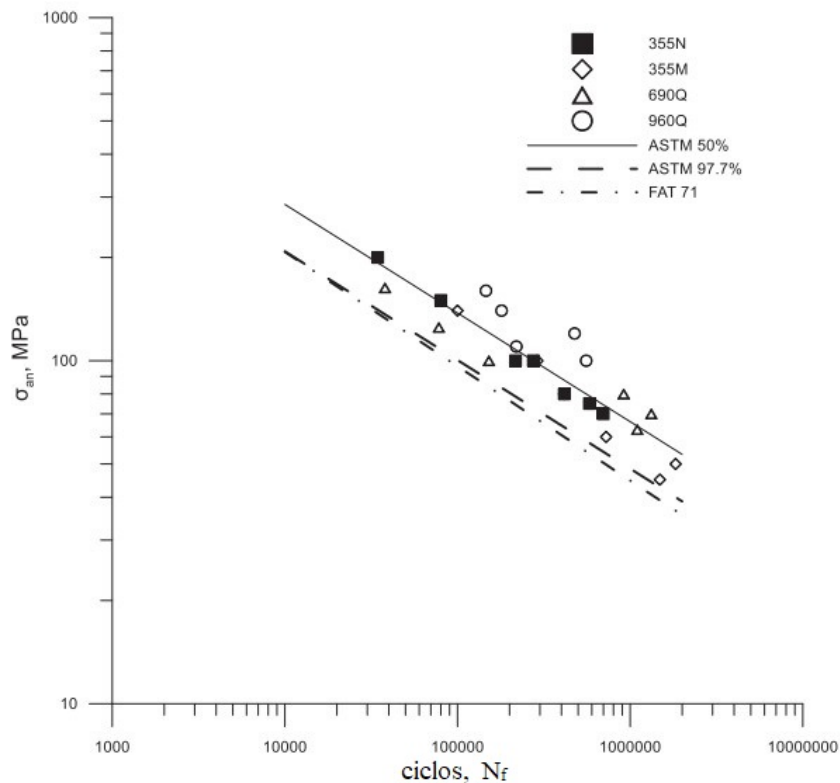


Figura 45 – Curva S-N dos ensaios realizados nos diferentes metais para a junta cruciforme (adaptado de Łagoda e Głowacka (2020)).

Já Rojas et al. (2020) avaliaram a influência da entrada de calor na resistência à fadiga em amostras de liga de alumínio 6061-T6 soldadas através de um processo TIG. Os resultados (Figura 46) mostraram uma queda considerável, mas previsível, das tensões suportadas pelas amostras soldadas quando comparadas a um corpo de prova não soldado. Comparando a tensão para uma vida em fadiga de 10^7 ciclos, as amostras soldadas apresentaram valores crescentes em função da entrada de calor, sendo eles de 10,5 MPa, 11,3 MPa e 28,7 MPa para as entradas de calor de 356 J/mm, 373 J/mm e 389 J/mm respectivamente. A melhoria das propriedades de fadiga foram atribuídas à menor presença de defeitos na soldagem, como penetração parcial, poros e encolhimento de cavidades. Porém, segundo outros autores, maiores entradas de calor podem promover a formação de defeitos e reduzir a vida em fadiga de juntas soldadas (SCHIJVE, 2001), o que mostra a complexidade do fenômeno.

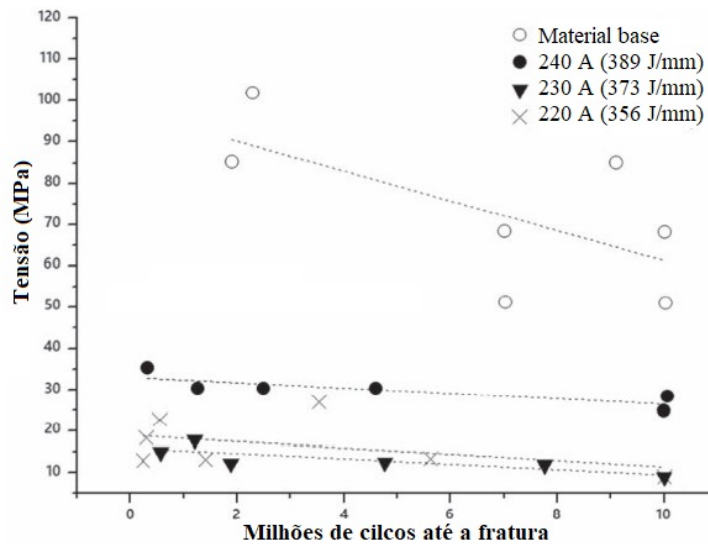


Figura 46 – Curva S-N dos ensaios realizados para as diferentes entradas de calor e correntes (adaptado de Rojas et al. (2020)).

2.5 Resistência à fadiga em peças impressas

Com o avanço das tecnologias e o aumento do uso da manufatura aditiva de metais na fabricação de peças, o estudo da fadiga sobre este processo se torna de grande importância para garantir a segurança durante o trabalho. É por este motivo que vários autores têm abordado o tema em suas pesquisas, contribuindo com a caracterização destes materiais.

O estágio de propagação da trinca, citado na subseção 2.4.6, é alvo de estudo em diversas publicações. Zhang et al. (2017), assim como Ermakova et al. (2021), fazem uma análise da vida em fadiga de amostras em função da direção de propagação relativa à deposição. Ambos os autores utilizaram o método WAAM, sendo o segundo especificamente o CMT, e os respectivos materiais utilizados foram: liga de titânio Ti-6Al-4V e aço ER70S-6. Os resultados mostraram que as diferentes microestruturas causaram diferentes respostas em função da direção avaliada. Para Zhang et al. (2017) (Figura 47), as trincas propagadas através da direção de deposição sempre obtiveram propagações mais lentas quando comparadas às trincas ao longo da deposição. Já Ermakova et al. (2021) (Figura 48) concluiu que, para um nível de carga de 10 kN, a velocidade de propagação ao longo da deposição foi duas vezes mais lenta em relação à direção perpendicular, mas, para uma carga de 11 kN, a direção perpendicular apresentou uma vida a fadiga 1,3 vez maior.

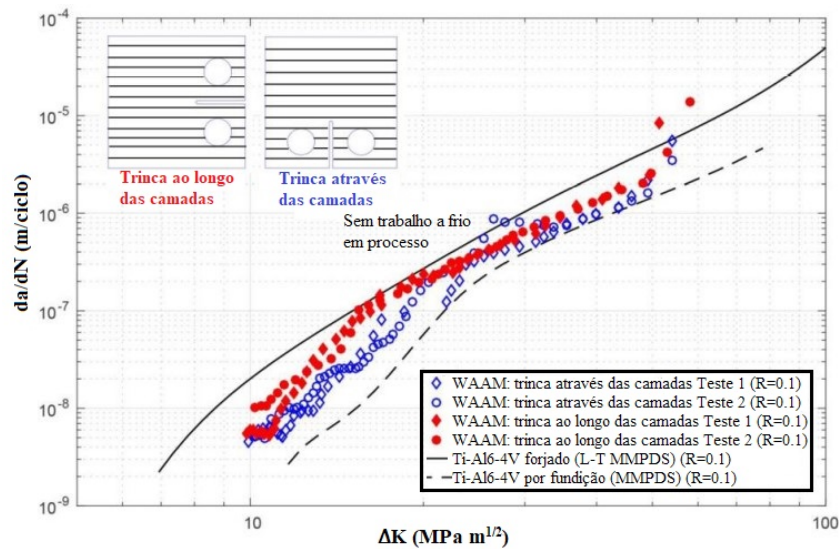


Figura 47 – Curva da taxa de propagação da trinca em função do fator de intensidade ΔK (adaptado de Zhang et al. (2017)).

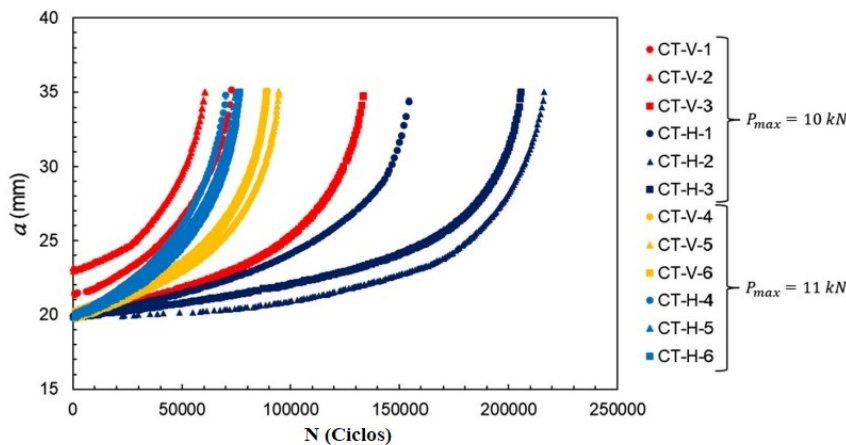


Figura 48 – Curva do crescimento da trinca em função do número de ciclos para as amostras verticais (V) e horizontais (H) (adaptado de Ermakova et al. (2021)).

Além da direção de propagação da trinca, o método de deposição também causa diferentes comportamentos à fadiga nas peças fabricadas por manufatura aditiva. Syed et al. (2021b) testou em seu trabalho amostras de liga de titânio Ti-6Al-4V fabricadas por manufatura aditiva a plasma em com 3 diferentes estratégias de deposição, apresentadas na Figura 49: passe único, múltiplos passos paralelos e oscilação. Assim como Zhang et al. (2017), o autor também encontrou uma menor velocidade de propagação na direção perpendicular às camadas se comparada à direção paralela. Já em relação aos modos de deposição, as amostras depositadas pelo terceiro método de oscilação apresentaram uma melhor propriedade à fadiga, com uma propagação de trinca mais lenta que as demais.

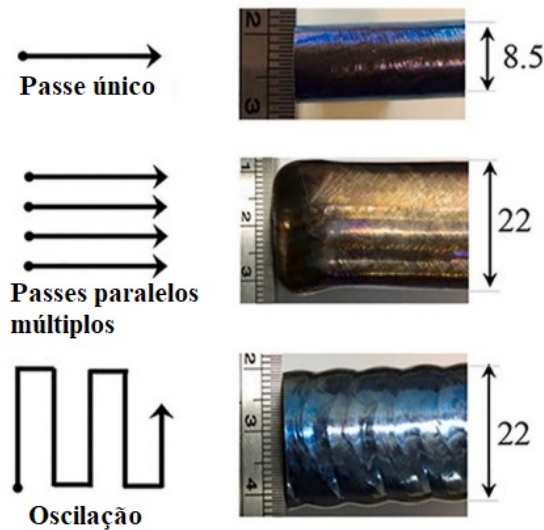


Figura 49 – Estratégias de deposição utilizadas nos testes por (adaptado de Syed et al. (2021b)).

Outro fator determinando na resistência à fadiga em peças impressas é a presença de porosidade. Biswal et al. (2019b) utilizaram a manufatura aditiva a plasma para fabricarem duas diferentes paredes, uma feita com um grupo controlado de liga de titânio Ti-6Al-4V sem porosidades (amostra referência) e outro grupo do mesmo material porém com arames contaminados (amostra de porosidade), que causam porosidade. Após a análise da presença de poros, foram feitos corpos de prova sem defeitos e com poros menores que $100\ \mu\text{m}$ a partir das amostras referência, e corpos de prova com poros maiores que $100\ \mu\text{m}$. O resultado, apresentado na Figura 50, mostra como a porosidade causa um impacto nas propriedades do material, diminuindo em cerca de 33% sua vida à fadiga.

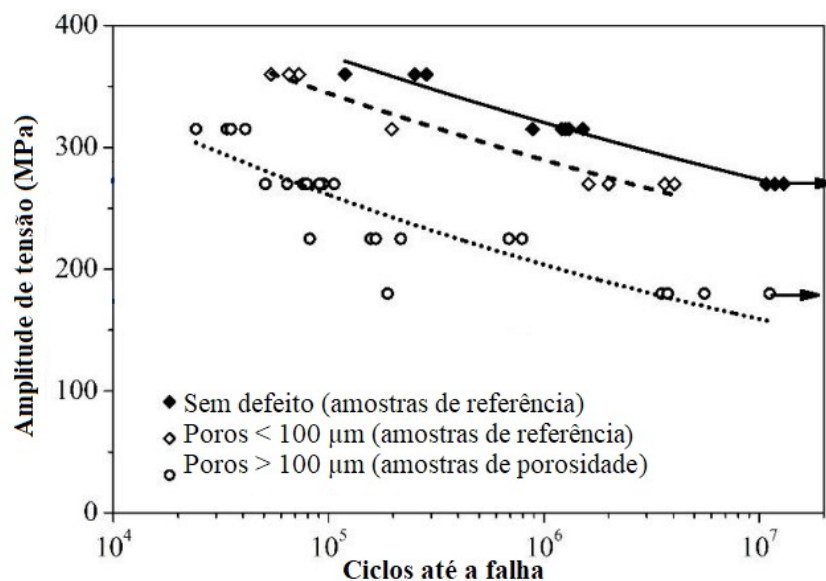


Figura 50 – Curva S-N para comparação entre as amostras de referência e amostras de porosidade (adaptado de Biswal et al. (2019b)).

3 Planejamento Experimental

3.1 Metodologia

Para os experimentos, primeiramente foi feita a preparação do equipamento, que ocorreu através da fixação do material da base, alimentação da máquina, e sua programação. Com o *set up* correto do equipamento, foi possível dar início ao processo de fabricação das peças, cuja geometria apresenta o formato de uma parede retangular.

A partir da deposição das paredes, deu-se início ao processo de extração dos CPs. Para isso foram realizados procedimentos de corte utilizando serra fita, usinagem por máquina CNC e corte por jato d'água. Após cada etapa, o resultado obtido passou por avaliações quanto à qualidade superficial e dimensional, sendo que a utilização dos CPs nos ensaios de fadiga só pôde ser feita após a avaliação da qualidade das amostras. Caso fossem detectadas imperfeições que trouxessem problemas ao prosseguimento do experimento, os parâmetros deveriam ser alterados.

Após a aprovação dos corpos de prova, o ensaio de fadiga pôde ser realizado, gerando os resultados necessários para compor a curva S-N do material. À medida que os corpos de prova foram se rompendo, foram feitas análise da região de fratura por meio de um microscópio eletrônico de varredura, proporcionando uma avaliação mais detalhada sobre a ruptura. A Figura 51 apresenta o fluxograma que descreve o andamento experimental.

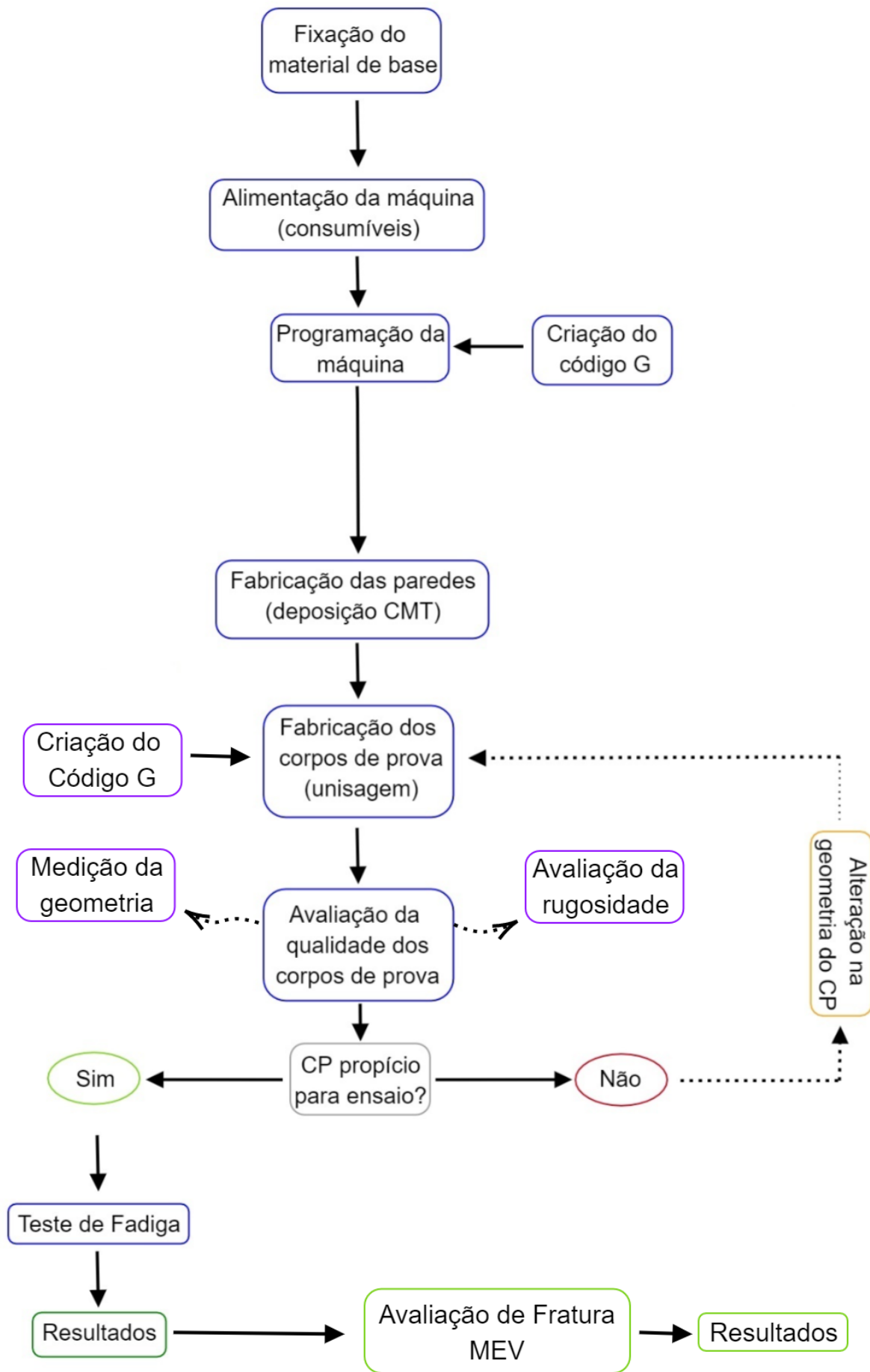


Figura 51 – Fluxograma do experimento

3.2 Equipamentos e consumíveis

Para conduzir a deposição do material ao longo do espaço, foi utilizado o robô cartesiano MAXR23-S42-H42-C42 da Schneider Eletric (Figura 52). O efetuator terminal do robô tem como dimensões: $X*Y*Z = 800x800x500$ mm e utiliza como programação o código G. Todo o projeto de instalação, configuração e integração do robô cartesiano à fonte de soldagem foi realizado por alunos da UnB durante o projeto de graduação (FERNANDES, 2016), (NETO, 2018), (MENDES, 2019), (GONÇALVES, 2019).

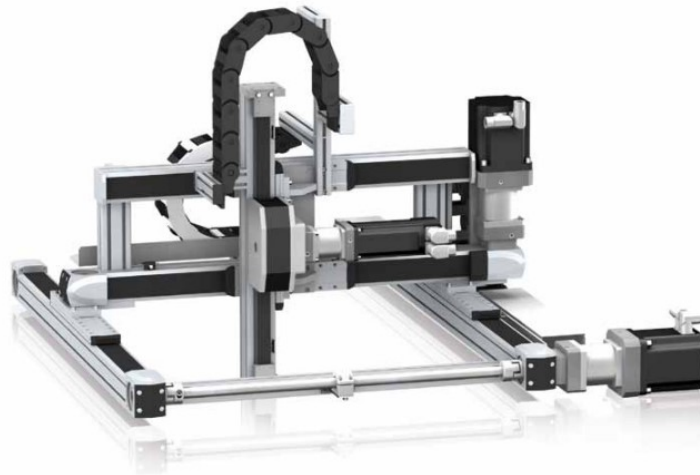


Figura 52 – Robô cartesiano MAXR-23-S42-H42-C42 (SCHNEIDER, 2009).

Para a alimentação do sistema, foi utilizada a fonte TransPuls Synergic 5000 CMT da *Fronius*. A Figura 53 apresenta o equipamento, indicando os seus acessórios, utilizados para a deposição pelo método CMT.

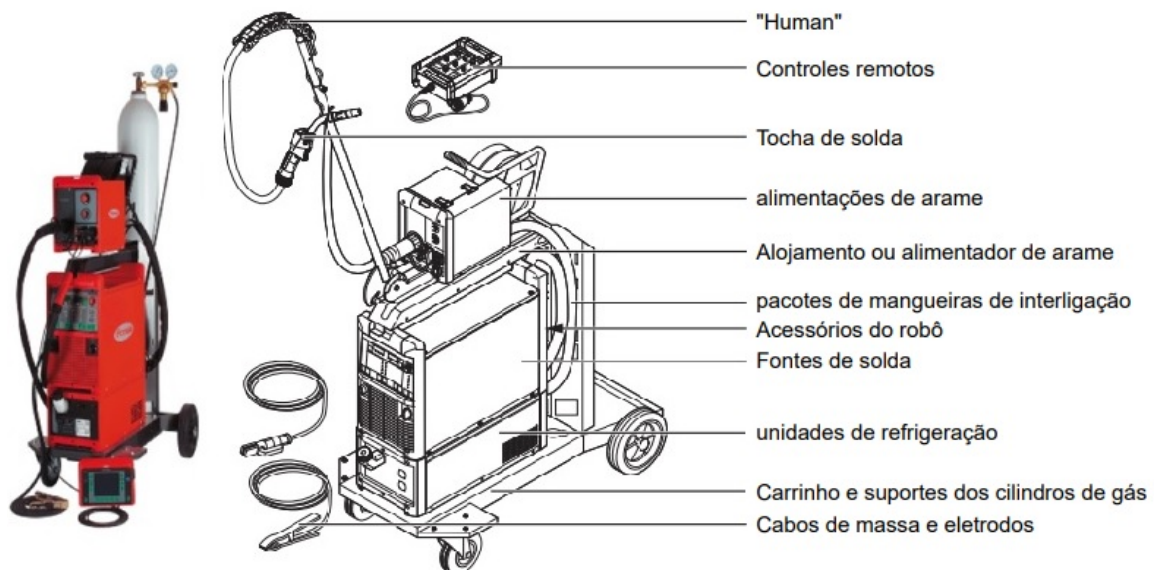


Figura 53 – Fonte TransPuls Synergic 5000 CMT (adaptado de FRONIUS (2020)).

Para a realização dos ensaios de fadiga, foi utilizado o maquinário servo-hidráulico MTS Landmark modelo 370.10 (MTS, 2021). O equipamento foi selecionado em função da possibilidade de um carregamento dinâmico com amplitudes menores quando comparados aos outros modelos, fator necessário dado que a utilização de corpos de prova de menores seções implicam em uma menor carga aplicada. Para a fixação das amostras foi utilizado o 647.10 *Wedge Set Assy*, que pode ser utilizado para uma faixa de espessuras que varia de 0 mm a 7,6 mm (MTS, 2016). A Figura 54 apresenta a máquina juntamente com o gráfico que apresenta as características da performance dinâmica de uma amostra de configurações disponíveis para a máquina, sendo que a performance depende também dos padrões do corpo de prova utilizado.

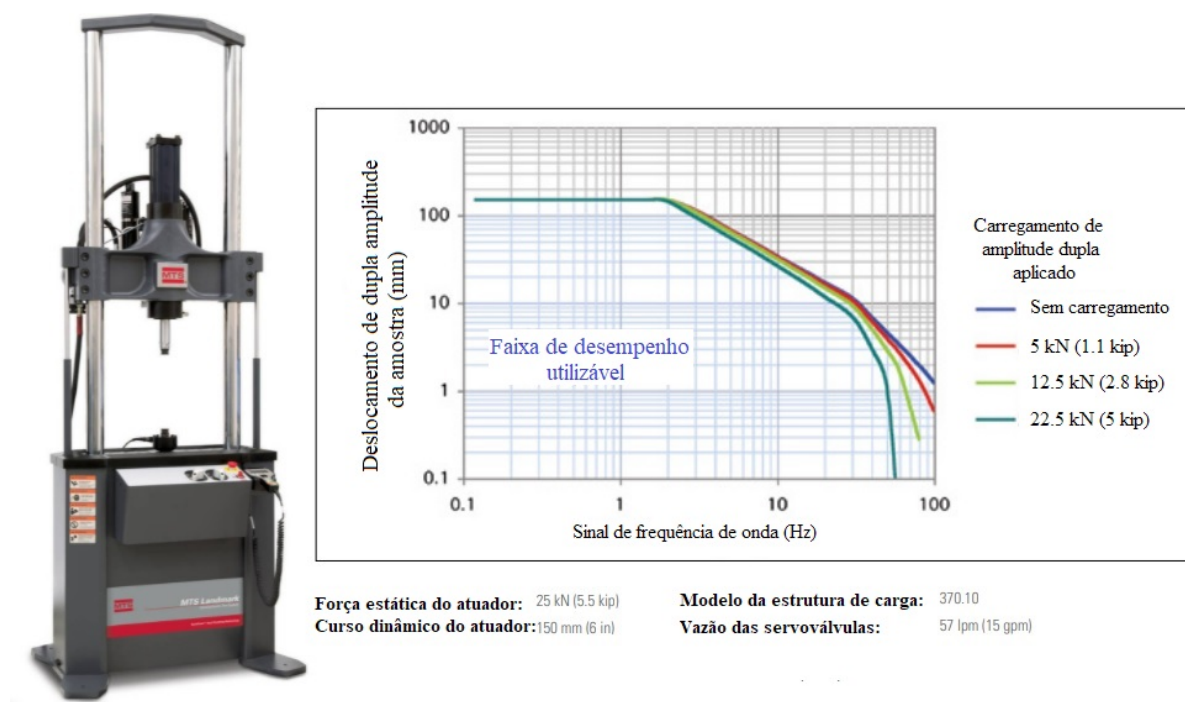


Figura 54 – MTS Landmark 370.10 juntamente com suas características dinâmicas (adaptado de MTS (2021)).

Para a avaliação por imagens da região de fratura, foi utilizado o MEV JSM-7100F, apresentado na Figura 55. Nele, as metades de cada um dos CPs rompidos foram preparadas e avaliadas quanto ao padrão da superfície, presença de descontinuidades e perfis de relevo, possibilitando a caracterização da falha por fadiga ocorrida.



Figura 55 – Microscópio Eletrônico por Varredura JSM-7100F utilizado na análise da fratura (JEOL, 2012).

Em questão de consumíveis e gás de proteção, foram selecionados elementos tipicamente utilizados na manufatura aditiva: o arame ER70S-6 e $Ar + 18\%CO_2$ respectivamente. A vazão do gás utilizada foi de 15 l/min. O diâmetro selecionado para o arame foi de 1,2 mm, muito utilizado na soldagem porém levemente maior quando comparado aos diâmetros mais comuns na MA (0,8 mm a 1,0 mm, com base nos trabalhos estudados). Sendo assim, este estudo também irá avaliar a eficiência deste maior diâmetro na manufatura aditiva. As especificações do arame ER70S-6 de acordo com o fabricante estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3, mais informações sobre o arame se encontram no Anexo A.

Composição química (%)		
C	Si	Mn
0,07	0,85	1,5

Tabela 2 – Composição Química Típica do depósito de solda % (BöHLER, 2022)

Propriedades mecânicas			
Limite de Escoamento MPa	Resistência à tração MPa	Alongamento %	Resistência ao Impacto Charpy - J
450	575 Mín	30	27 Mín (-30C)

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas Típicas do depósito de solda (BöHLER, 2022)

3.3 Metodologia de deposição

O processo de fabricação das paredes se iniciou com a preparação das máquinas para a deposição. Essa etapa incluiu a inserção da bobina com o arame na máquina, fixação e limpeza do substrato na área de trabalho da máquina, set up do robô cartesiano com o código G e dos parâmetros de entrada para a fonte CMT. A Figura 56 apresenta os componentes do sistema.

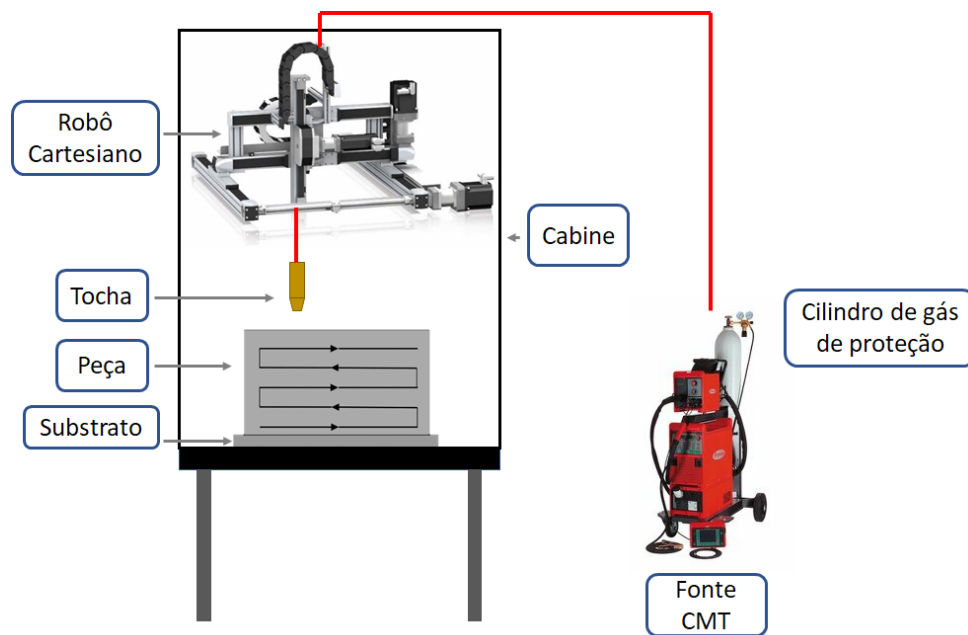


Figura 56 – Representação esquemática do sistema de deposição.

Para a programação da fonte CMT, os parâmetros de entrada foram obtidos à partir do estudo realizado por Novelino (2021), no qual a deposição com um melhor aspecto foi obtida pelo modo sinérgico para espessura de chapa de 1 mm. Como a fonte ajusta os valores de entrada ao longo do procedimento para manter a deposição mais estável, a corrente, tensão e alimentação finais podem apresentar uma leve variação de uma parede para outra.

Para se obter uma boa quantidade de corpos de prova, as paredes foram depositadas com 100 camadas, com comprimento de 180 mm de forma bidirecional contínua, conforme a Figura 57. A velocidade de deslocamento horizontal da tocha foi de 8 mm/s e, verticalmente, 24 mm/s, com uma elevação vertical de 1 mm para início da deposição da próxima camada. Este método foi escolhido devido à velocidade do processo, que ocorre de forma consideravelmente mais rápida quando comparado a um processo de arco interrompido com controle de temperatura de interpasse.

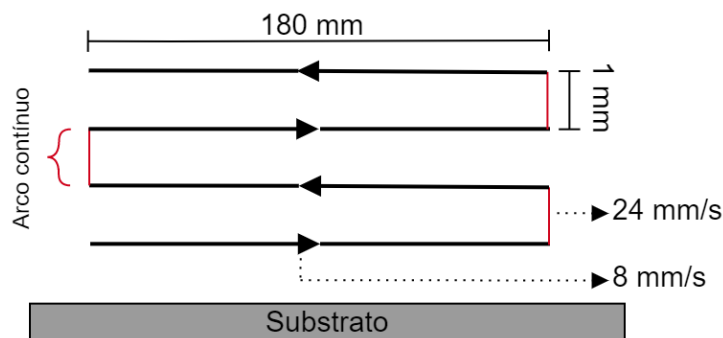


Figura 57 – Método de deposição bidirecional contínuo.

Vale ressaltar que, inicialmente, estava prevista para este trabalho a utilização de diferentes inclinações da tocha para a obtenção de paredes com propriedades distintas. Porém, após testes no laboratório em conjunto com Novelino (2021), observou-se que as inclinações resultavam em cordões com geometria inapropriada para a formação de paredes com várias camadas, o que impossibilitou a avaliação deste parâmetro em relação à fadiga.

3.4 Metodologia de medição da paredes

Ao término da deposição das paredes foram feitas medições ao longo das direções com o objetivo de avaliar a qualidade e homogeneidade obtidas. Para isso, foram definidos em cada parede 13 pontos, nomeados de A à M à partir da linha de origem da deposição (ponto no substrato onde se iniciou o processo), espaçados entre si por 15 mm (Figura 58) devido a um bom padrão nas dimensões observadas visualmente e levando também em consideração o trabalho do Novelino (2021), no qual, para os parâmetros utilizados neste trabalho, um espaçamento menor não apresentou grande variação nas medidas. Para cada região foram feitas 5 medições na porção superior da parede tanto para a largura quanto para a altura através de um paquímetro da marca Zaas® (resolução de 0,05 mm e faixa nominal de 150 mm). A temperatura padrão de referência para medições dimensionais, segundo a ABNT NBR NM ISO 1 (ABNT, 1997), é 20 °C, porém as medições foram realizadas em uma sala cuja temperatura era de 25°C. Com isso foi possível encontrar o valor médio com desvio padrão (DP) das dimensões em cada ponto das paredes. Através da Regra Empírica para o desvio padrão, o valor de confiança utilizado para a confiança das medições foi de 99,73%.

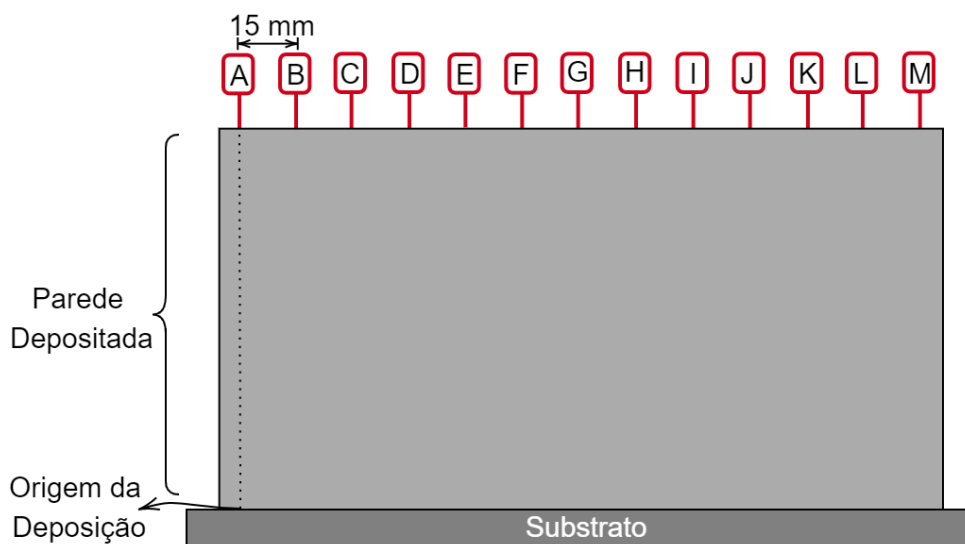


Figura 58 – Pontos de medição

3.5 Fabricação dos corpos de provas

Após a fabricação das paredes pelo método CMT, os corpos de prova foram extraídos seguindo as condições e dimensões adotadas pela norma ASTM E 466 (ASTM, 2015). Com o objetivo de extrair a maior quantidade de amostras possível, foi escolhida a geometria de corpo de prova que apresenta seção transversal retangular (Figura 59) porque, de acordo com a norma ASTM E 466 (ASTM, 2015), é a mais adequada para espécimes em miniatura. Partindo de um valor para espessura, as demais dimensões foram calculadas seguindo as relações dadas pela norma. As dimensões do corpo de prova estão apresentadas na Tabela 4.

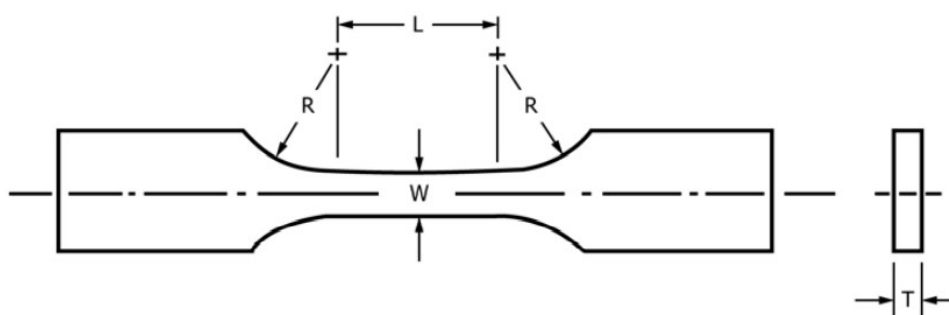


Figura 59 – Geometria e dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga (ASTM, 2015).

Espessura (T) [mm]	Largura (W) [mm]	Comprimento útil (L) [mm]	Raio do Filete (R) [mm]	Área [mm²]
2,00	4,00	8,00	32,00	8,00

Tabela 4 – Dimensões calculadas para o corpo de prova à partir da norma ATSM E466 (ASTM, 2015).

A preparação dos corpos de prova para os ensaios apresenta grande importância nos resultados finais, já que métodos impróprios causam grande divergência no resultado final. A norma ASTM 466 (ASTM, 2015) indica algumas precauções essenciais para o sucesso do experimento, como por exemplo:

- Direção de remoção final de material do CP deve ocorrer em uma direção aproximadamente paralela ao maior comprimento da peça;
- Durante o processo de usinagem, os principais efeitos a serem evitados são tensões residuais e filete inapropriado;
- Espécimes sujeitos a corrosão em temperatura ambiente devem ser protegidos;
- Inspeções visuais devem ser conduzidas, sendo que anormalidades óbvias como trincas e marcas de usinagem não são aceitáveis.
- As amostras devem passar por um processo de limpeza para serem removidas camadas de óleos, impressões digitais e assim por diante.

O processo de extração dos corpos de prova à partir das paredes depositadas envolveu 3 etapas principais: separação entre as paredes e o substrato, usinagem das paredes e corte seguindo geometria definida. Ao final das 3 etapas, o resultado obtido passou por verificações para que as amostras seguissem para os ensaios de fadiga.

3.5.1 Separação entre as paredes e o substrato

Como a deposição do material para a formação das peças ocorre sobre um substrato que impossibilita a usinagem da geometria e também não é utilizado no ensaio de fadiga, a primeira etapa para a extração dos corpos de prova é a separação entre o substrato e as paredes. Para isso, foi utilizada a máquina serra fita Franho FM-500 com uma lâmina FM 500 bi-alfa cobalt (27×09×3880 mm). Todo o processo foi realizado utilizando fluido de corte para evitar o aquecimento da peça na região. A Figura 60 apresenta o equipamento utilizado e a ilustração esquemática do processo.

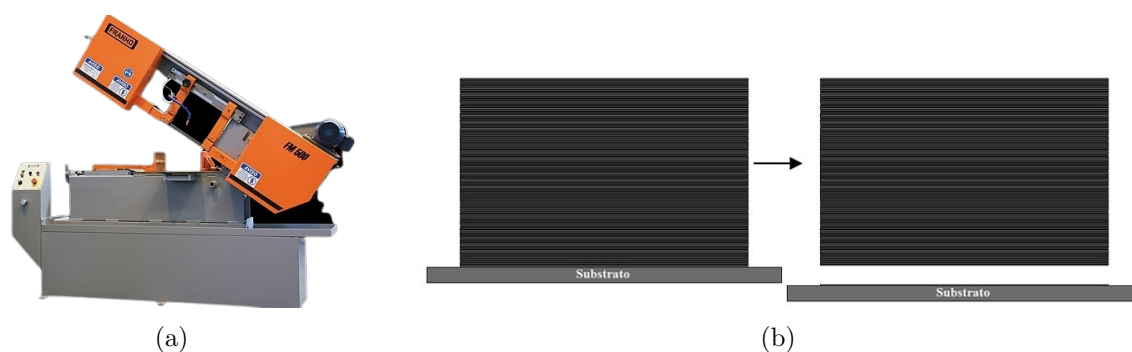


Figura 60 – a) Máquina serra fita Franho FM-500 (FRANHO, 2022); b) Representação esquemática do processo de separação parede-substrato.

3.5.2 Usinagem das paredes

As paredes fabricadas por manufatura aditiva possuem uma superfície com elevada rugosidade devido ao método camada por camada que é utilizado. Para melhorar a qualidade superficial e chegar à espessura de CP necessária para os ensaios de fadiga, foi realizado um processo de usinagem através de uma máquina CNC (VEGA XH7132) (código no Apêndice B), utilizando como ferramenta de corte a DORMER C247, sem revestimento e com diâmetro de 10 mm (DORMER, 2021) (Anexo B). No processo, primeiramente foi feita uma remoção inicial de material afim de deixar essa superfície plana. Para finalizar a segunda etapa, ainda na máquina CNC, o outro lado foi usinado, alcançando a espessura necessária.

A usinagem foi feita no sentido perpendicular à direção de deposição, totalizando 9 passagens de cada lado, com uma descida de 0,5 mm por passagem da ferramenta de corte. Como parâmetros do processo, foram utilizadas velocidade de corte, avanço e rotação da ferramenta de 89,54 m/min, 0,57 m/min e 2850 RPM, respectivamente, escolhidos à partir da realização de um pré-teste. Durante toda a usinagem foi utilizado o fluido de corte BIO 100 E (BIOLUB, 2017), cuja especificação se encontra no Anexo C, com o objetivo de lubrificar, proteger e, principalmente, refrigerar a peça, evitando a formação de zonas termicamente afetadas. A Figura 61 apresenta o esquema do processo, no qual inicialmente as presilhas fixavam a chapa nos extremos e depois passaram ao centro das arestas, para facilitar a usinagem dos cantos.

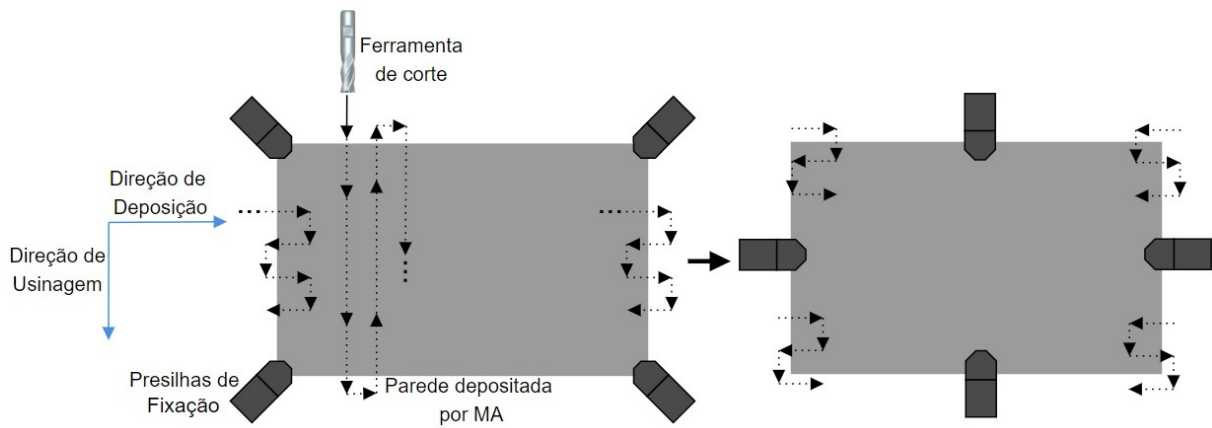


Figura 61 – Representação esquemática do processo de usinagem em máquina CNC.

3.5.3 Corte dos corpos de prova à partir da parede

Após a etapa da usinagem, as chapas obtidas estão prontas para serem cortadas de acordo com a geometria definida através da norma ASTM E466 (ASTM, 2015). Para isso alguns métodos de corte foram considerados, considerando trabalhos semelhantes. Em seu trabalho, Wächter et al. (2020) destacam a utilização da usinagem CNC na obtenção dos corpos de prova a partir das peças depositadas por manufatura aditiva. Gordon et al. (2019) e Bartsch et al. (2021) utilizaram em sua pesquisa o processo de corte por jato d'água na extração dos corpos de prova. Já outros autores como Ermakova et al. (2022) e Syed et al. (2021a) realizaram a extração através da usinagem por eletroerosão EDM (Electrical Discharge Machining) ou, para os estudos de Biswal et al. (2019b) a usinagem por eletroerosão a fio WEDM (*Wire Electric Discharge Machining*).

Para este trabalho foi dada prioridade por processos que causassem a menor alteração possível nas propriedades dos CPs. Sendo assim, optou-se pela utilização do corte por jato d'água. Este método de corte, que ocorre sem interação ferramenta-peça, proporciona benefícios ao processo, como a redução das forças de corte e a não geração de calor na área de corte, característica muito importante para a fabricação de corpos de prova dado que mudanças de temperatura podem alterar as propriedades mecânicas dos materiais (ESCOBAR-PALAFIX; GAULT; RIDGWAY, 2012 apud RAUCH; HASCOET, 2021).

Com o objetivo de avaliar a resposta à fadiga em CPs cuja direção dos esforços aplicados são longitudinais à direção de deposição, foi escolhida para a extração das amostras da parede a orientação horizontal. Também foi necessário, pensando no processo como um todo, fornecer espaços tanto na porção superior quanto na porção inferior para que a chapa pudesse ser fixada durante o corte por jato d'água. Sendo assim, foi feita uma representação esquemática, apresentada pela Figura 62, que possibilitou a extração de 7 amostras horizontais à partir de uma parede.

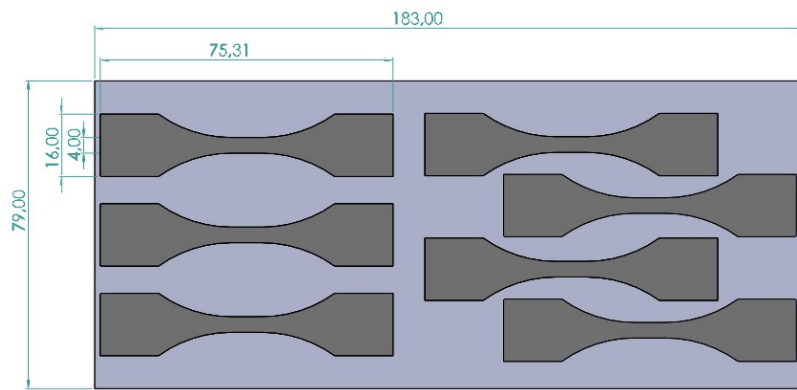


Figura 62 – Posicionamento para a extração das amostras à partir de uma parede.

A Figura 63 apresenta o fluxograma ilustrado das etapas que envolvem o processo de extração dos corpos de prova das paredes depositadas por manufatura aditiva. Ao final das etapas, os CPs passaram por avaliações quanto à aparência e rugosidade para que seguissem para os ensaios de fadiga.

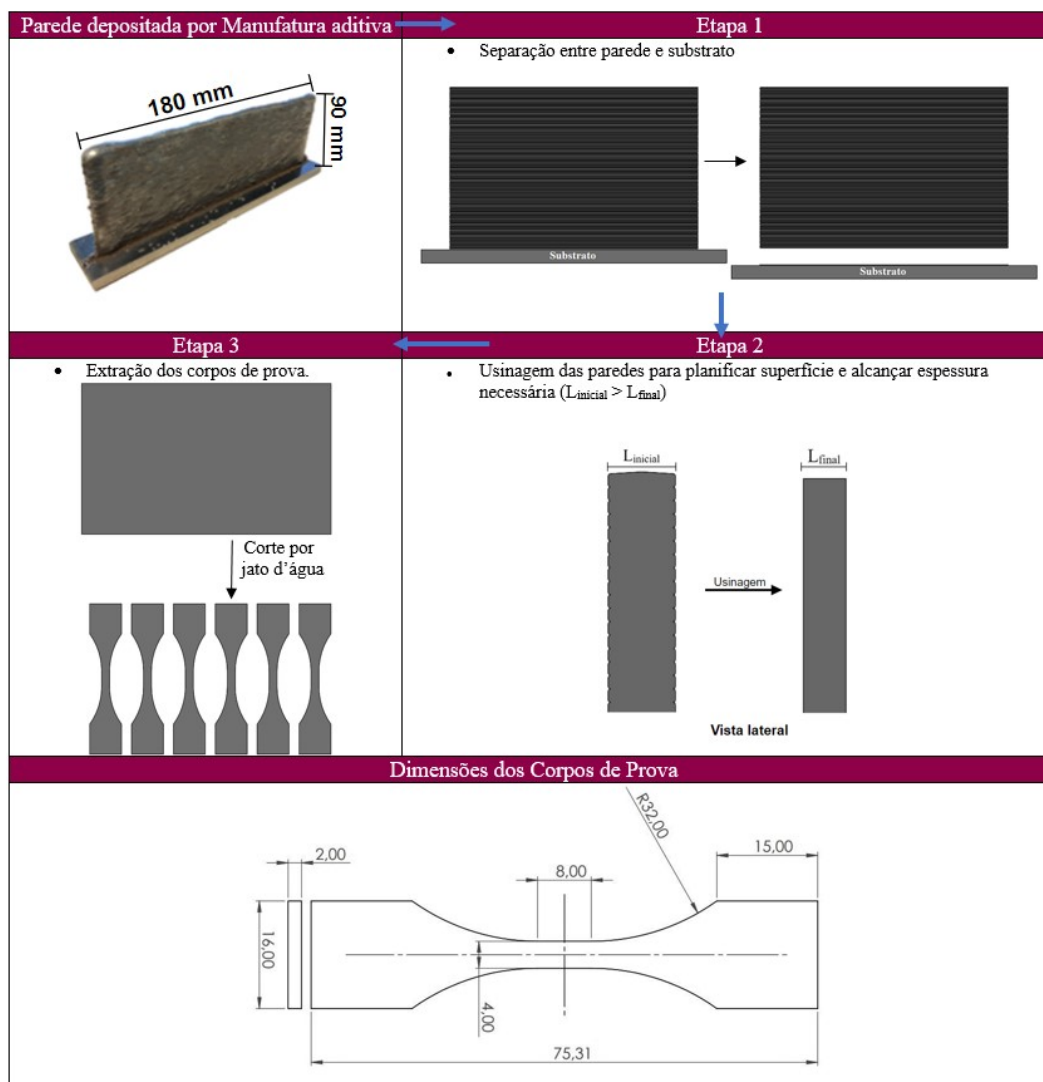


Figura 63 – Fluxograma da fabricação dos corpos de prova a partir da manufatura aditiva (PIMENTA; OLIVEIRA; ZIBEROV, 2022).

3.5.4 Metodologia de medição das dimensões e rugosidade superficial dos CPs

Após a extração dos corpos de prova seguindo as etapas apresentadas, deu-se início à verificação das dimensões e rugosidade, que são importantes parâmetros no ensaio de fadiga.

A medição das dimensões dos CPs seguiram de forma similar ao apresentado na seção 3.4. Os corpos de prova foram medidos com relação à sua seção central e comprimento total, sendo que, para cada dimensão, foram feitas 5 medições através de um paquímetro Brasfort® (resolução de 0,02 mm e faixa nominal de 150 mm) a uma temperatura ambiente de 25°C. Com isso, foram encontrados os valores médios com desvios padrões. O valor de confiança utilizado nas medições foi de 99,73%.

Para a medição da rugosidade superficial foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo®, sendo as medições feitas com um comprimento de amostragem *cut-off* de 2,5 mm, conforme a norma ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008). Para isso, 3 CPs foram escolhidos ao acaso e foram feitas as medições da rugosidade aritmética (R_a), rugosidade de dez pontos principais (R_z) e a rugosidade quadrática média (R_q). A escolha dos parâmetros de rugosidade foi baseada na pesquisa feita por Todhunter et al. (2017), na qual estes 3 parâmetros foram os mais utilizados nas indústrias pelo mundo no ano de 2016, conforme a Figura 64.

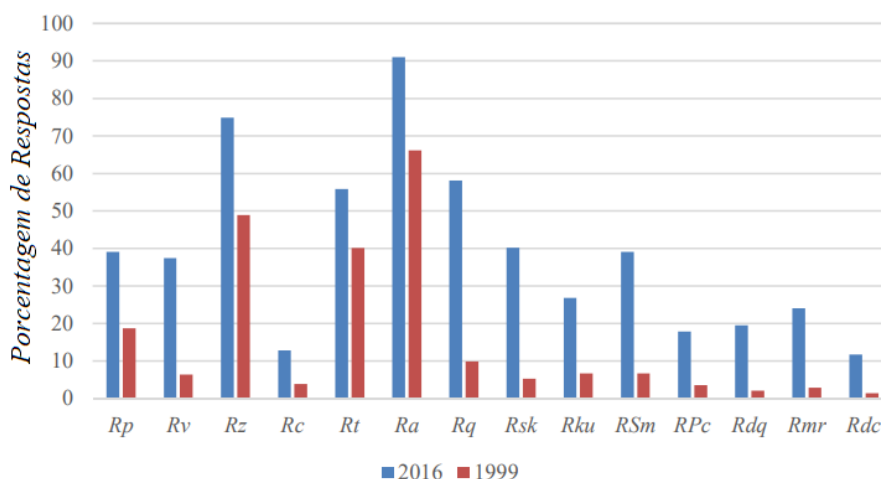


Figura 64 – Resposta para pesquisa sobre o uso dos parâmetros de rugosidade nas indústrias em 1999 (vermelho) e 2016 (azul) (adaptado de Todhunter et al. (2017)).

Para possibilitar uma comparação, 3 regiões diferentes foram utilizadas: 1 - longitudinalmente na região central, 2 - transversalmente na região de fixação do CP e 3 - longitudinalmente na lateral da região de fixação do CP (região do corte por jato d'água). Para cada CP, região e tipo de rugosidade foram feitas 3 medições, o que possibilitou

encontrar os respectivos valores médios com desvios padrões. A Figura 65 apresenta as regiões de medição.

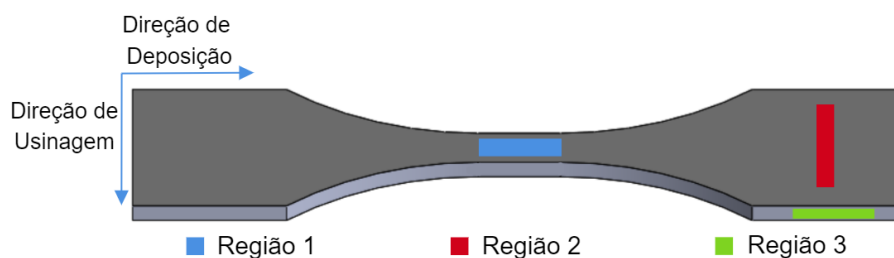


Figura 65 – Representação esquemática das regiões de medição da rugosidade ao longo dos CPs.

3.6 Ensaio de fadiga

Os corpos de prova foram submetidos a um ensaio de fadiga uniaxial utilizando como padrão uma razão de carga $R = 0.1$, baseado em ensaios semelhantes encontrados na literatura (BISWAL et al., 2019b), (DIRISU et al., 2020) e (WANG et al., 2020). O valor da frequência também foi baseado em trabalhos disponíveis. Para os 3 estudos acima, os valores de frequência utilizados foram respectivamente de 50 Hz, 10 Hz e 5 Hz. Sendo assim, para este trabalho foi definida inicialmente uma frequência de 5 Hz, porém, como o aumento da frequência não afetou a boa resposta dos sinais medidos pela máquina, foi possível alcançar um valor de 20 Hz, ficando este como o padrão dos ensaios.

Como ponto inicial da curva S-N, foi calculada uma tensão na região central correspondente à 0,61% do limite de resistência à tração do material, ou seja, 350 MPa. À partir deste ponto, os demais foram escolhidos de forma a manter uma boa distribuição de pontos ao longo da curva. Dessa forma foi possível obter a curva S-N que representa a vida em fadiga do material.

4 Resultados e Discussões

4.1 Avaliação da geometria das peças obtidas por manufatura aditiva

O resultado obtido à partir da deposição está apresentado na Figura 66, onde as paredes estão enumeradas de acordo com a ordem cronológica na qual foram depositadas. Mesmo sendo necessária apenas uma parede para a extração dos corpos de prova para este estudo, as 5 paredes foram fabricadas com o objetivo de verificar a estabilidade do processo e os padrões de deposição, que foram avaliados através das medições. Também é notável a presença de uma camada de oxidação, formada devido ao longo período de exposição ao ambiente, que em seguida foi retirada para prosseguir com a fabricação dos CPs.

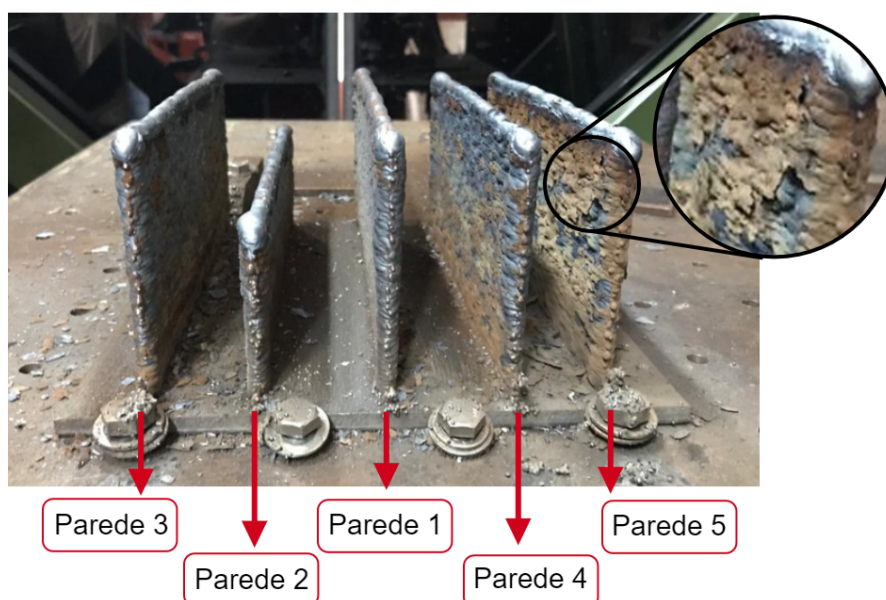


Figura 66 – Paredes enumeradas após deposição com detalhamento da oxidação.

Após um processo inicial de retirada da camada oxidada, as paredes apresentaram um melhor aspecto. Pela Figura 67 é possível notar a ondulação superficial, resultado das deposição camada por camada do processo de manufatura aditiva. Essa ondulação apresentou um padrão linear ao longo de toda estrutura e, como a usinagem posterior

possibilitou a obtenção de uma superfície plana e suficientemente lisa, essa ondulação inicial não tem grande impacto nos ensaios realizados.

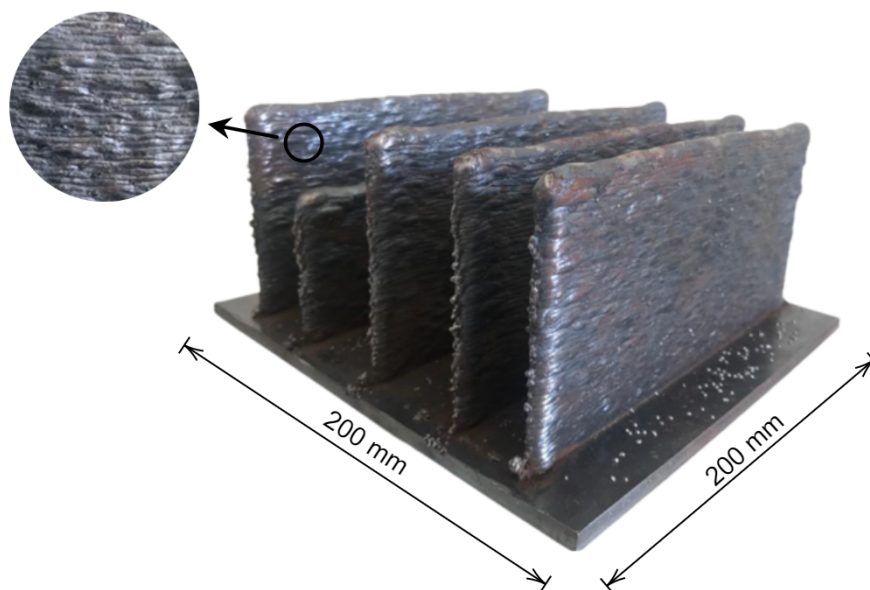


Figura 67 – Presença de rugosidade nas paredes após deposição.

Além disso, mesmo o CMT sendo um processo que permite um maior controle da poça de fusão quando comparado aos métodos GMAW convencionais, ainda há a presença de alguns respingos ao lado e nas extremidades das paredes. Porém, comparando por exemplo a deposição GMAW realizada por Artaza et al. (2019), é possível perceber uma notável redução de respingos presentes tanto no substrato quanto nas paredes depositadas pelo processo CMT. A Figura 68 apresenta a comparação.



Figura 68 – a) Grande presença de respingos na parede e substrato obtido pelo processo GMAW convencional (adaptado de Artaza et al. (2019)); b) Presença reduzida de respingos obtida pelo processo CMT (imagem do autor).

Quanto aos parâmetros dos processos, os valores de corrente, tensão e velocidade de alimentação obtidos ao final de cada parede apresentaram valores próximos, dado que o modo sinérgico de 1 mm foi adotado em todos os casos, como descrito anteriormente. As médias para cada grandeza entre as 5 paredes foram de 62,3 A, 19,9 V e 2,6 m/min,

respectivamente. Para dar seguimento ao processo de fabricação de CPs, ensaios e análises neste trabalho, foi escolhida a parede de número 1.

4.1.1 Medições

Os resultados obtidos quanto aos valores de altura e largura dos pontos da parede utilizada neste projeto estão apresentados na Tabela 5, já o resultado para as demais paredes se encontram no Apêndice D. Utilizando como base o trabalho feito por Novelino (2021), é possível observar que o resultado obtido foi bem semelhante, dado que os parâmetros de deposição utilizados neste trabalho foram iguais à maior parede depositada no trabalho anterior. Quantitativamente, a largura e altura médias obtidas na parede do Novelino (2021) foram respectivamente 7,26 mm e 85,46 mm, já no presente estudo, fazendo uma média entre as 4 paredes completas, a largura e altura foram respectivamente 7,50 mm e 87,41 mm, uma variação de 3,3 % na largura e 2,3 % na altura.

Parede 1		
Ponto	Altura	Largura
A	86,48	9,28
B	87,5	7,99
C	87,39	6,65
D	87,76	6,69
E	88,12	6,61
F	88,47	6,66
G	88,96	6,86
H	88,66	6,49
I	88,65	6,69
J	87,95	6,67
K	87,41	6,72
L	87,95	8,79
M	87,82	9,93
Média (mm)	87,93	7,39
DP (mm)	0,443	0,309

Tabela 5 – Altura e largura local e média da parede 1.

Para uma melhor visualização, a Figuras 69 apresenta graficamente a distribuição das larguras e alturas ao longo da parede (gráfico para demais paredes no Apêndice D). Além das características quantitativas explicitadas anteriormente, foi possível perceber através dos gráficos e da Figura 70 um padrão no comportamento das curvas, caracterizado por maiores alturas na região central e maiores larguras nos extremos. Este fator se deve ao acúmulo de calor nas extremidades, gerado pelo deslocamento da tocha, que por ser bidirecional, permanece um maior período consecutivo nessas regiões, causando uma maior dilatação e conseqüentemente maiores larguras.

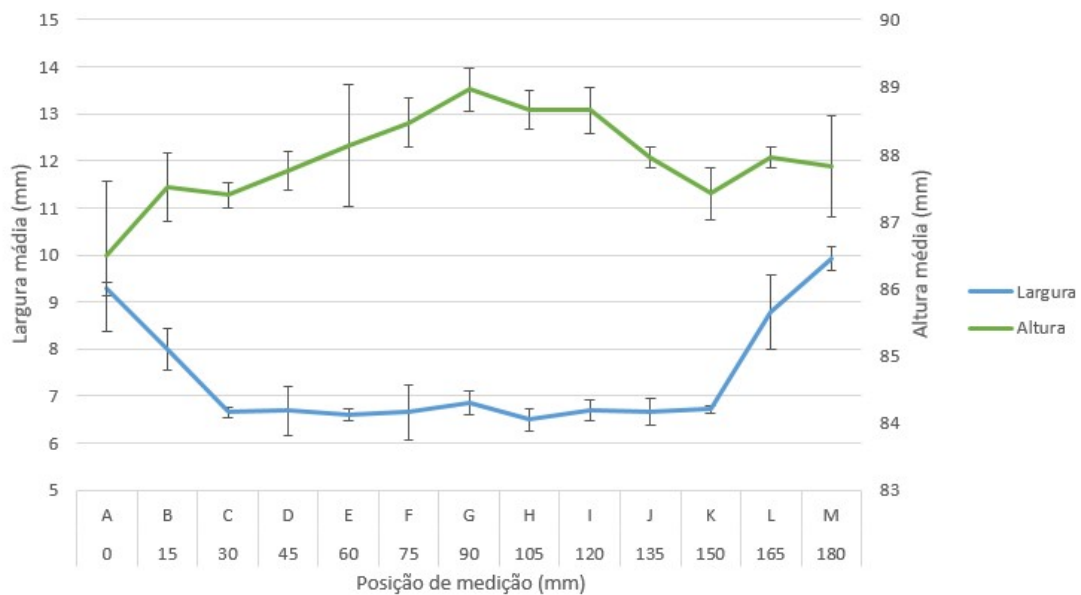


Figura 69 – Médias locais de altura e largura para a peça depositada.

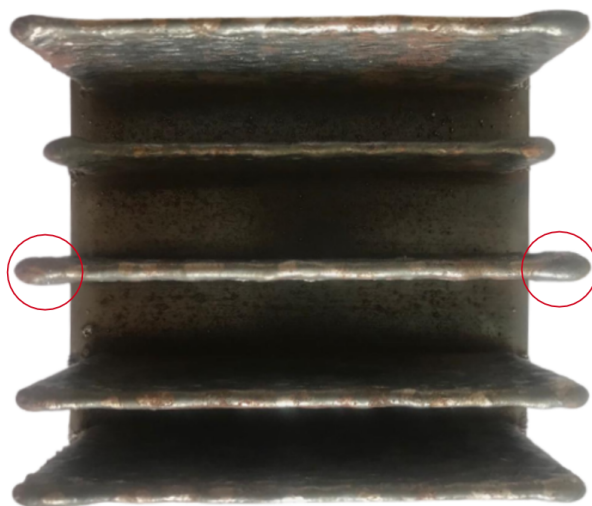


Figura 70 – Vista superior destacando as maiores larguras nas extremidades das paredes.

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar uma proximidade entre as dimensões das diferentes paredes entre si e também em relação ao trabalho do Novelino (2021) tanto nas medidas quanto nas características. A uniformidade e o bom aspecto das paredes tornou possível que se desse continuidade com o processo de usinagem para a fabricação dos corpos de prova.

4.2 Fabricação dos corpos de prova

4.2.1 Separação entre parede e substrato

A primeira etapa do processo de fabricação dos corpos de prova foi a separação entre a parede, que seguirá para as demais etapas, e o seu substrato. O resultado obtido está apresentado pela Figura 71. É possível perceber que houve um bom aproveitamento da região depositada, dado que o corte foi realizado rente ao substrato. Essa característica é muito importante para garantir uma boa quantidade de CPs e reduzir o desperdício de material.

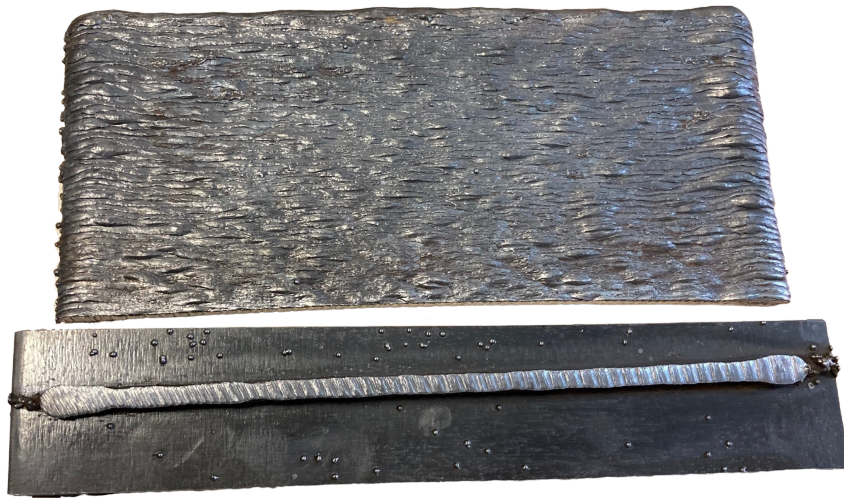


Figura 71 – Separação entre parede e substrato através de corte por serra fita

4.2.2 Usinagem das paredes

Dando seguimento à fabricação dos corpos de prova, a parede resultante da primeira etapa foi levada na máquina de usinagem CNC, onde, como apresentado pela Figura 72, foi fixada para dar início ao processo. Inicialmente, o código G foi inserido na máquina e testado sem contato com a chapa, para garantir o funcionamento de acordo com o planejado e, posteriormente, a ferramenta de corte foi aproximada da chapa para realmente começar a usinagem.

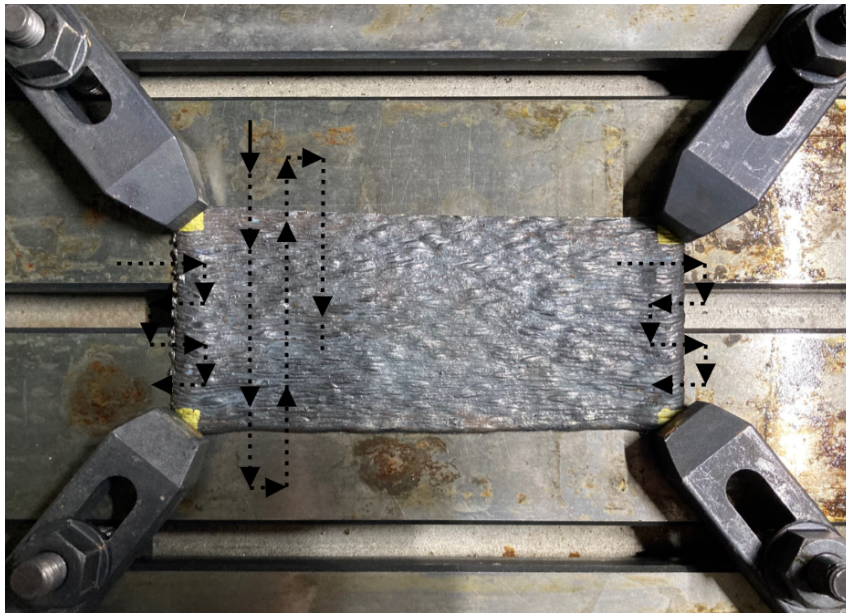


Figura 72 – Fixação da parede para início do processo de usinagem destacando o caminho a ser percorrido pela ferramenta de corte.

O processo de usinagem teve como média de tempo 5,5 min/passagem, considerando cada "passagem" o deslocamento da ferramenta de corte a uma altura específica no eixo vertical, totalizando 1h39min de tempo de usinagem (desconsiderando o tempo gasto com configurações da máquina e preparação do processo) após as 9 passagens por lado, conforme a seção 3.5.2. A chapa foi pesada antes e após a usinagem, sua massa passou de 667 g para 233 g, uma redução de 65,07 %. Dessa forma, foi possível melhorar a qualidade da superfície e diminuir a espessura, que tinha média de 7,39 mm, para 2 mm. Essa grande redução de massa do material só foi necessária devida à espessura obtida durante o processo de deposição, que foi consideravelmente maior quando comparada àquela pretendida para os corpos de prova. A alteração dos parâmetros da deposição pode ser considerada para evitar o desperdício de material. A Figura 73 apresenta a peça obtida imediatamente após a usinagem.



Figura 73 – Chapa obtida após usinagem da parede fabricada por manufatura aditiva.

4.2.3 Corte por jato d'água

Após a usinagem da peça, a próxima etapa consistiu no corte por jato d'água seguindo a geometria definida para os CPs. Utilizando as dimensões da Tabela 4 e a disposição da Figura 62, as peças foram cortadas. Algumas observações foram feitas a partir do resultado. Devido a um provável longo período de exposição à ambientes úmidos, a peça passou por um processo de oxidação superficial. Além disso, o corpo de prova 6 foi cortado à partir da sua menor seção, diferentemente dos demais, que foram cortados à partir da região de fixação do CP no ensaio de fadiga, como apresentado pela Figura 74. Essa característica pode afetar no ensaio de fadiga, dado que a retirada do pequeno conector, destacado em vermelho, pode influenciar na estrutura do corpo de prova. Esses fatores foram considerados durante os ensaios de fadiga.

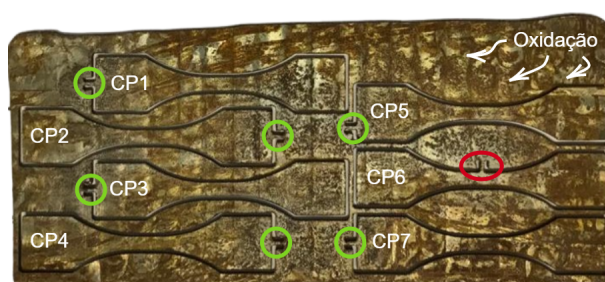


Figura 74 – Resultado obtido após o processo de corte por jato d'água, destacando a nomenclatura e posicionamento dos conectores em cada corpo de prova.

Após serem destacados da chapa, os CPs passaram ainda por uma limpeza através de uma escova de aço circular EN 1083-2 para que a camada oxidada fosse retirada antes dos ensaios de fadiga. Foi notável a melhoria na qualidade superficial, apresentada pela Figura 75, e dessa forma os CPs ficaram prontos para seguirem para as demais etapas de acordo com o planejamento experimental.



Figura 75 – Comparação entre o CP1 após limpeza superficial com os demais corpos de prova.

4.3 Avaliação de dimensões e rugosidade dos corpos de prova

Ao final da extração e limpeza, os corpos de prova passaram por medições para que fossem comparados com as dimensões calculadas inicialmente e para verificar a qualidade do acabamento superficial alcançado. Seguindo a metodologia apresentada na seção 3.5.4, as médias encontrados para a largura, espessura e comprimento total foram de 2,11 mm, 4,11 mm e 75,45 mm. Comparando com as medidas calculadas, houve uma variação de 5,5 % na espessura, 2,75 % na largura e 0,19 % no comprimento total. Por este motivo, as forças aplicadas durante os ensaios de fadiga foram ajustados para as novas dimensões, de forma a manter a mesma tensão na seção central. O detalhamento das dimensões estão apresentadas pela Tabela 6.

amostra	Espessura (mm)		Largura (mm)		Comprimento (mm)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
CP1	2,10	0,042	4,13	0,054	75,37	0,210
CP2	2,07	0,109	4,11	0,054	75,39	0,109
CP3	2,06	0,050	4,14	0,085	75,45	0,109
CP4	2,08	0,085	4,11	0,033	75,39	0,124
CP5	2,15	0,033	4,12	0,078	75,53	0,188
CP6	2,15	0,033	4,02	0,066	75,53	0,124
CP7	2,16	0,027	4,12	0,073	75,46	0,115
média	2,11	0,054	4,11	0,063	75,45	0,140

Tabela 6 – Médias individuais e gerais para as dimensões dos corpos de prova

Através da medição da rugosidade, cujo detalhamento é apresentado pela Tabela 7 em μm , foi possível perceber a influência da direção de usinagem no acabamento da superfície. A rugosidade medida na mesma direção da usinagem (região 2) apresentou valor menor quando comparada à direção perpendicular à usinagem (região 1), 28,57 % em Ra, 21,91 % em Rz e 28,11% em Rq, o que mostra as marcas que a ferramenta de corte deixa na peça. Além disso, foi possível verificar que a zona afetada pelo corte por jato d'água (região 3) apresentou uma rugosidade semelhante à região 2, onde a medição foi feita na direção de usinagem, tendo uma variação mínima de 0,20 % em Ra e máxima de 4,42 % em Rz.

Amostra	Região 1 (μm)			Região 2 (μm)			Região 3 (μm)		
	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq
CP1	8,04	40,19	9,78	3,98	25,21	5,04	4,13	25,88	5,12
CP2	5,42	30,24	6,90	5,92	29,42	7,06	4,82	28,12	5,91
CP3	7,13	36,38	8,63	4,79	28,76	6,07	5,77	33,08	7,22
Média	6,86	35,60	8,43	4,90	27,80	6,06	4,91	29,03	6,09
DP	3,766	15,155	4,214	2,802	9,190	2,958	2,333	11,917	2,954

Tabela 7 – Médias por tipo de rugosidade e região para cada um dos 3 CPs escolhidos.

Para componentes fabricados por manufatura aditiva, a rugosidade apresenta uma maior influência quanto menor for a seção transversal analisada, dado que devido à essa rugosidade a tensão média real pode ser maior que a considerada teoricamente (BARTSCH et al., 2021). Em um exemplo utilizado pela norma ASTM E466 (ASTM, 2015), a rugosidade aritmética máxima sugerida foi de $0,2 \mu\text{m}$. Syed et al. (2021a) utilizaram este padrão em seu trabalho, e Biswal et al. (2019b) utilizaram um valor próximo ($0,5 \pm 0,1 \mu\text{m}$). Já Bartsch et al. (2021), por testarem corpos de prova fabricados por manufatura aditiva não usinados, trabalhou com valores de rugosidade aritmética de até $329 \mu\text{m}$. Neste trabalho, a rugosidade aritmética máxima, medida na região 1, foi de $6,86 \mu\text{m}$, este fator foi considerado durante a análise dos resultados dos ensaios de fadiga.

4.4 Ensaios de fadiga

Após a preparação e avaliação dos CPs, estes seguiram para os ensaios de fadiga seguindo os parâmetros definidos, frequência em 20 Hz, razão de carga em $R=0.1$ e cargas variando de acordo com as respostas obtidas em cada ensaio, conforme o planejamento experimental. A Figura 76 apresenta a fixação para a realização dos ensaios de fadiga.

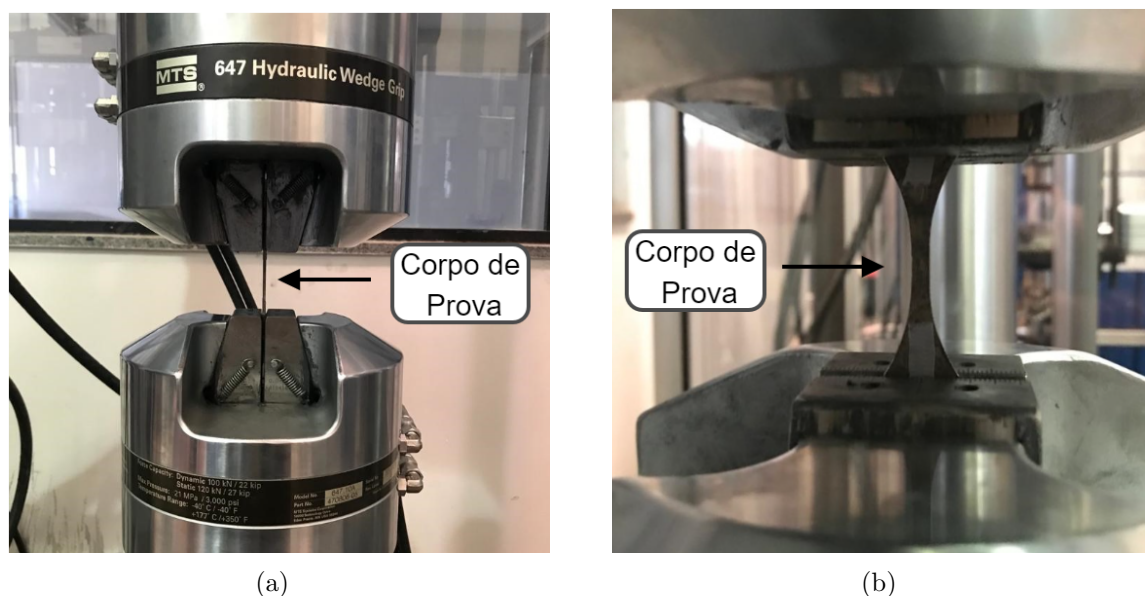


Figura 76 – Vistas da fixação dos CPs na máquina de ensaio de fadiga: a) Frontal; b) Lateral.

Após a utilização da tensão de 350 MPa como ponto inicial ($0,61S_u$), os ensaios seguiram de acordo com o apresentado pela Tabela 8. Nela estão apresentados os ensaios conforme a ordem que foram realizados, os CPs utilizados, a tensão máxima, a razão de tensão em relação ao limite de resistência à tração do material e os resultados obtidos. O padrão adotado para vida infinita foi de 1 milhão de ciclos, sendo que os CPs 2 e 7 alcançaram essa quantidade de ciclos nos ensaios 4 e 6.

Ensaio	CP	Tensão Máxima (MPa)	Razão de tensão	Ciclos
1	CP6	350	0,61Su	274417
2	CP1	384	0,67Su	174105
3	CP3	316,8	0,55Su	423650
4	CP2	283,2	0,49Su	1200000
5	CP5	316,8	0,55Su	731704
6	CP7	302,04	0,53Su	1200000

Tabela 8 – Resultados obtidos à partir dos ensaios de fadiga.

À partir da Tabela 8 foi traçada a curva S-N em escala log-log que representa o comportamento à fadiga do material estudado (arame ER70S-6) (Figura 77). No eixo Y está a tensão máxima aplicada durante o ensaio e no eixo X está a quantidade de ciclos até a falha. Os pontos marcados em vermelho representam a fratura do corpo de prova, enquanto os pontos verdes representam aqueles que apresentaram vida infinita.

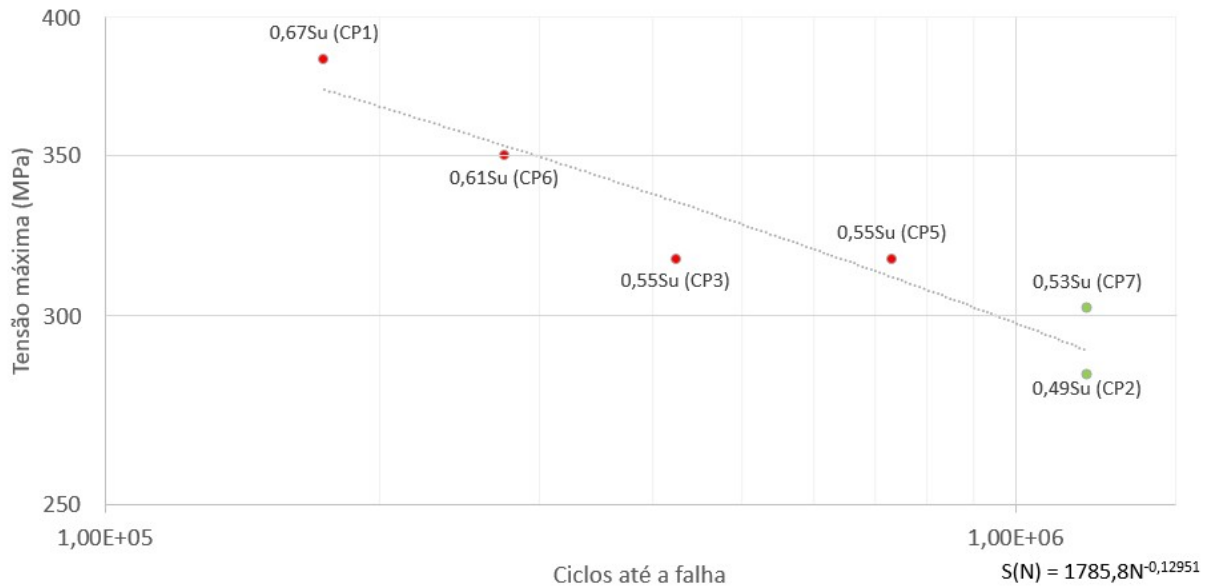


Figura 77 – Curva S-N obtida à partir dos ensaios de fadiga.

Como comparação ao resultado obtido, foi utilizado o artigo publicado por Dirisu et al. (2020), que trata sobre a resistência à fadiga em corpos de prova do arame ERS70-6 (mesmo material usado neste trabalho) fabricados pelo método CMT e também pelo método híbrido de CMT com a utilização de *rolling*. Para o ensaio de fadiga, os autores utilizaram a mesma razão de carga do atual trabalho, $R = 0.1$, porém com uma frequência de 10 Hz, metade da utilizada neste trabalho. O resultado, apresentado pela Figura 78 em função do método de fabricação e ondulação da superfície (*Surface Waviness* (SW)), mostra que a vida infinita para os CPs usinados foi alcançada para tensões abaixo de 350 MPa, já neste trabalho uma tensão de 350 MPa resultou em uma vida de 275000 ciclos, sendo que a vida infinita ocorreu à partir de 302,04 MPa (ensaio 6).

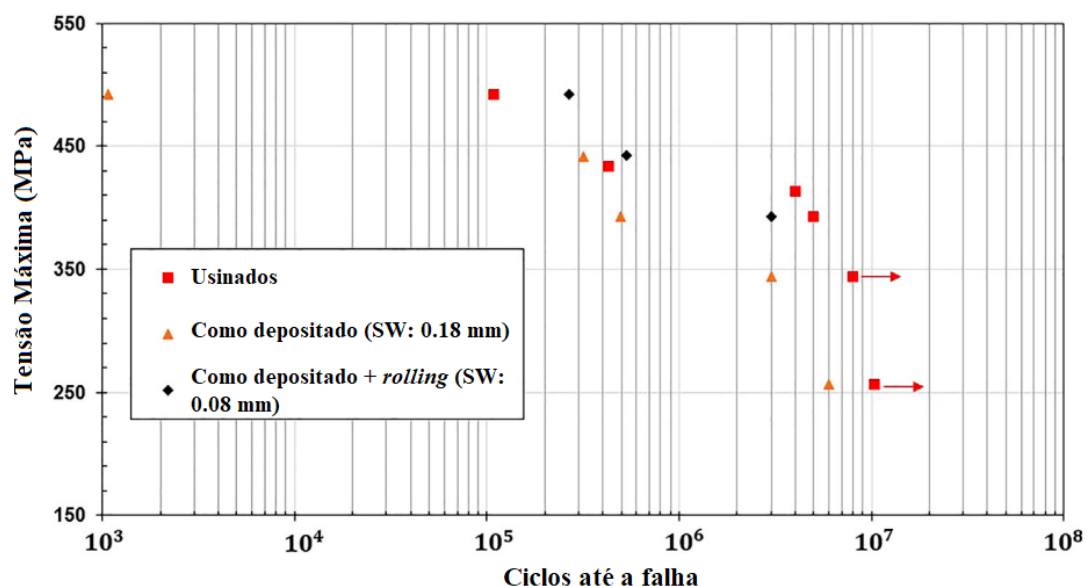


Figura 78 – Curva S-N obtida à partir dos ensaios de fadiga para os métodos CMT e CMT+rolling (DIRISU et al., 2020).

Vale apenas ressaltar que a comparação entre os trabalhos pode ser feita apenas de modo qualitativo, dado que, de acordo com a Tabela 9, os parâmetros usados no processo de deposição foram diferentes, o que resulta em peças com propriedades diferentes. Para este caso, a principal divergência foi a velocidade de alimentação do arame, cerca de 2,4 vezes maior no estudo de Dirisu et al. (2020). Essa relação pode sugerir que uma maior velocidade de alimentação de arame resulta em uma melhor resistência à fadiga, porém, devido ao grande número de variáveis do processo, essa relação precisa de mais estudos para ser confirmada.

Parâmetro	Trabalho Dirisu et al. (2020)	Atual Trabalho
Diâmetro Arame (mm)	1,00	1,20
Alimentação arame (m/min)	4,00	1,70
Velocidade da tocha (m/min)	0,40	0,48

Tabela 9 – Comparação entre os parâmetros de deposição utilizados neste projeto e no projeto de Dirisu et al. (2020).

De acordo com Norton (2013, p. 316), um método para a estimativa do limite de fadiga, cuja definição é o nível de tensão abaixo do qual não ocorrem mais falhas por fadiga, é à partir do limite de resistência à tração do material. Para aços, o limite de fadiga é aproximado pela metade do limite de resistência à tração. Considerando que neste projeto a vida infinita se iniciou em uma tensão de 302,04 MPa e utilizando as propriedades fornecidas pela Tabela 3, temos uma razão de 0,525 na relação entre o limite de fadiga e limite de resistência à tração, o que representa uma proximidade à estimativa teórica.

4.5 Análise da fratura

A avaliação da região de fratura através do MEV revelou importantes características a falha por fadiga dos CPs. Dos 4 CPs que foram rompidos nos ensaios, 3 deles apresentaram características bem semelhantes, com regiões bem definidas (CPs 3, 5 e 6), enquanto que o CP 1 apresentou um comportamento visivelmente diferente dos demais.

Um aspecto que pode descrever o caminho percorrido pelas trincas durante o processo da fadiga é a presença de regiões de *dimples* e regiões de clivagem. Regiões de *dimples* caracterizam uma fratura dúctil, enquanto que regiões de clivagem são indicadores de fratura frágil (ERMAKOVA et al., 2021). Mattos et al. (2010) apontam em seu trabalho que, o início e o fim da fratura por fadiga pode ser representado respectivamente pela presença de estrias, características da clivagem e, ao final, a presença de *dimples*. Para servir de comparação de resultados, a Figura 79 apresenta a separação das regiões, representando em I o poro que causou o início da trinca, em II a região de crescimento da trinca, representado pelas estrias da clivagem e em III, o final da fratura, representado pela presença de *dimples*.

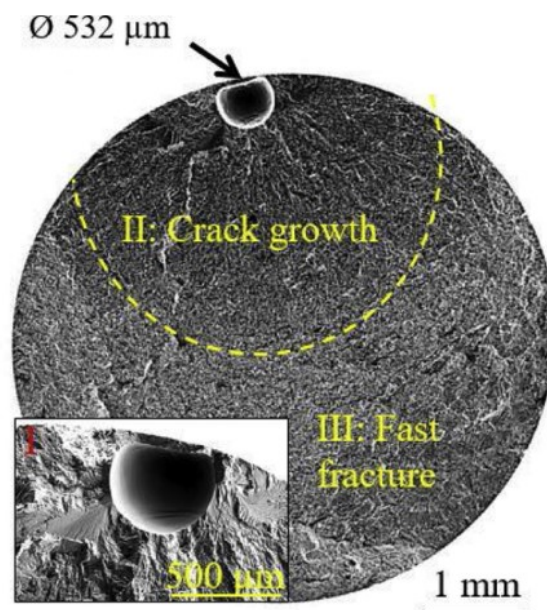


Figura 79 – Representação da divisão entre as etapas de propagação da trinca (II) e fratura rápida (III) (BISWAL et al., 2019a).

A partir de resultados semelhantes na literatura para experimentos semelhantes, fadiga em materiais fabricados por manufatura aditiva, foi possível caracterizar a região de fratura dos 4 CPs através do MEV. A análise foi feita com base em um lado do CP rompido, a seção complementar para cada CP encontra-se no Apêndice D.

4.5.1 Corpo de Prova 3

Os resultados obtidos pela avaliação do CP 3 através do MEV estão apresentados pela Figura 80. Nela é possível perceber a formação de estrias na região à esquerda, ampliadas pelas imagens 1 e 6. Essa característica, em contraste com as regiões mais irregulares da direita, indicam um possível início da fratura em um concentrador de tensões apresentado pela imagem 1. A avaliação da região à direita possibilitou a identificação das regiões de *dimples*, representando a porção final da fratura. Além da estrutura de *dimples*, também está presente porosidade, representada pelas ampliações 7, 8, 9 e 10.

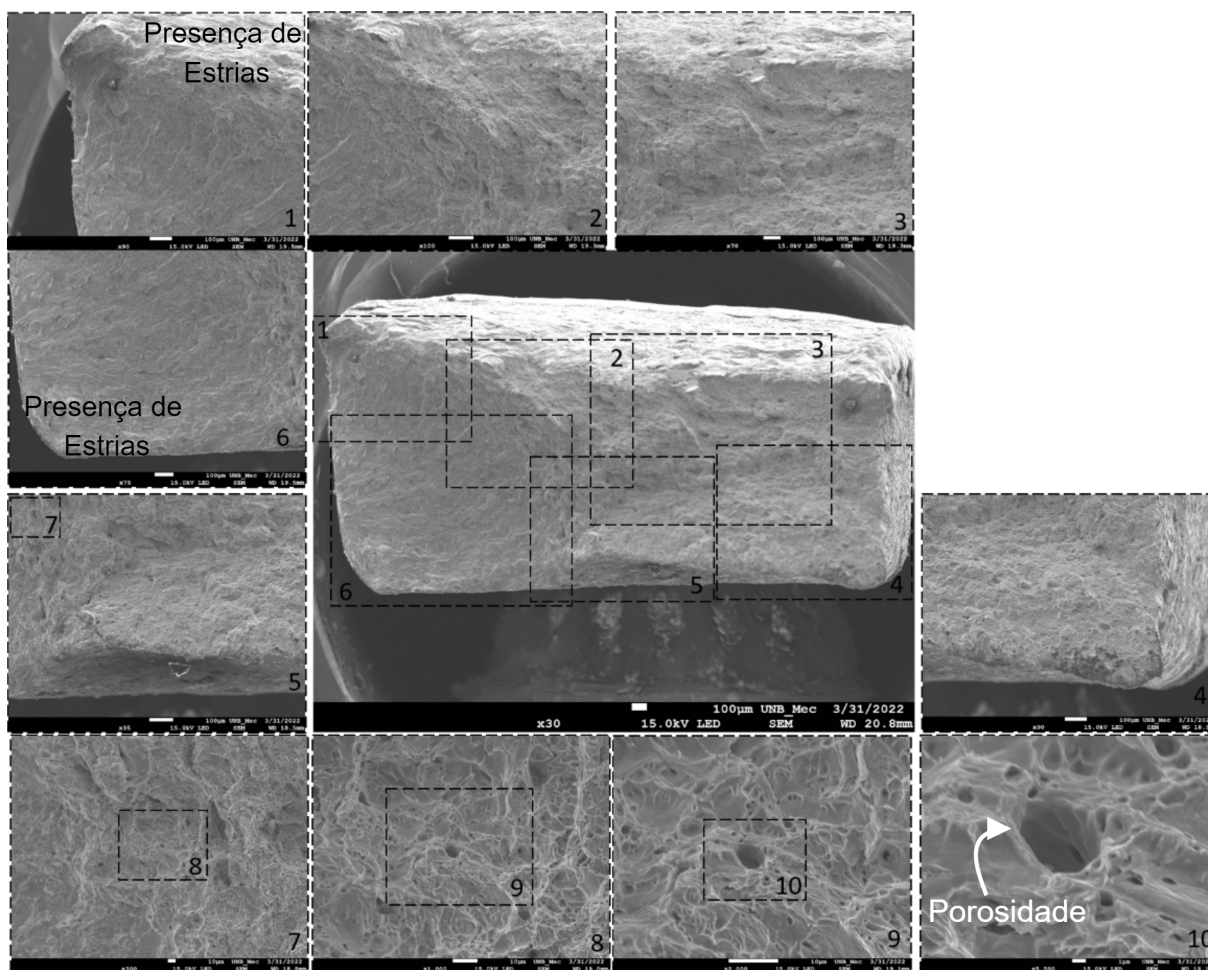


Figura 80 – Imagens da seção de ruptura do CP 3 obtidas através do MEV.

Além das imagens de seção, também foram avaliadas o perfil da ruptura, apresentada pela Figura 81. Nela é possível perceber a delimitação de uma região mais aprofundada, equivalente à região de estrias, e uma região mais elevada, equivalente à região de fratura dúctil (*dimples*).

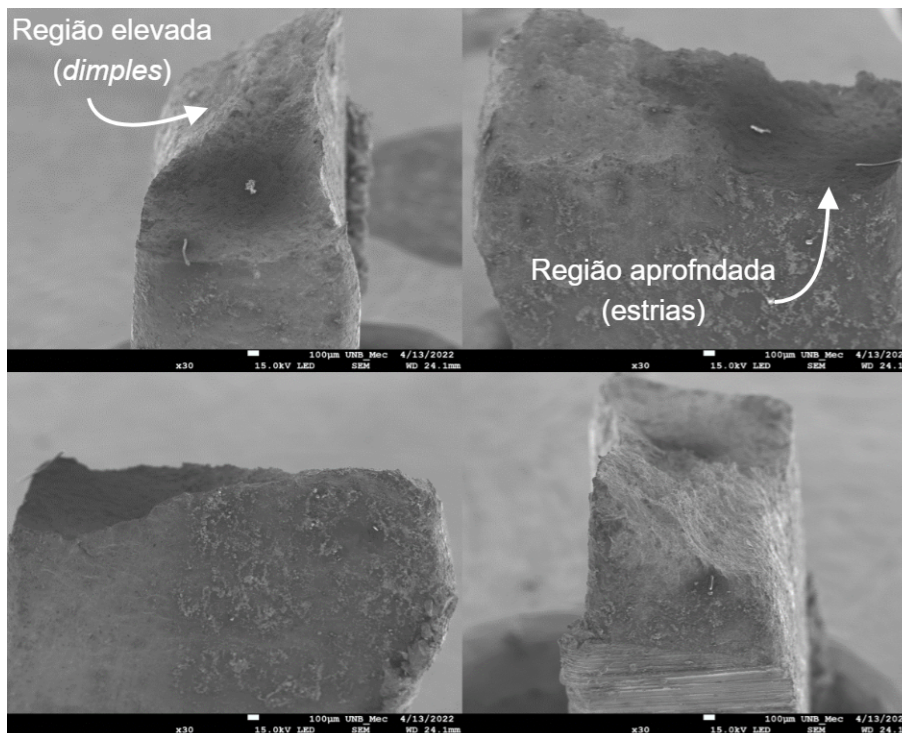


Figura 81 – Imagens do perfil de ruptura do CP 3 obtidas através do MEV.

4.5.2 Corpo de Prova 5

Assim como o CP3, o CP 5 também apresentou uma boa definição entre as regiões de propagação da trinca e da ruptura final (Figura 82). A região à esquerda consistiu em estrias formadas durante a propagação da trinca sendo que, pela direção das estrias, o provável início da trinca se deu por algum concentrador de tensões na extremidade da imagem 1. Na imagem 8 é possível observar a transição entre a fratura frágil (à esquerda) e a fratura dúctil (à direita). As demais regiões à direita consistiram da estrutura de *dimples*, apresentado de forma mais detalhada pela ampliação na imagem 7.

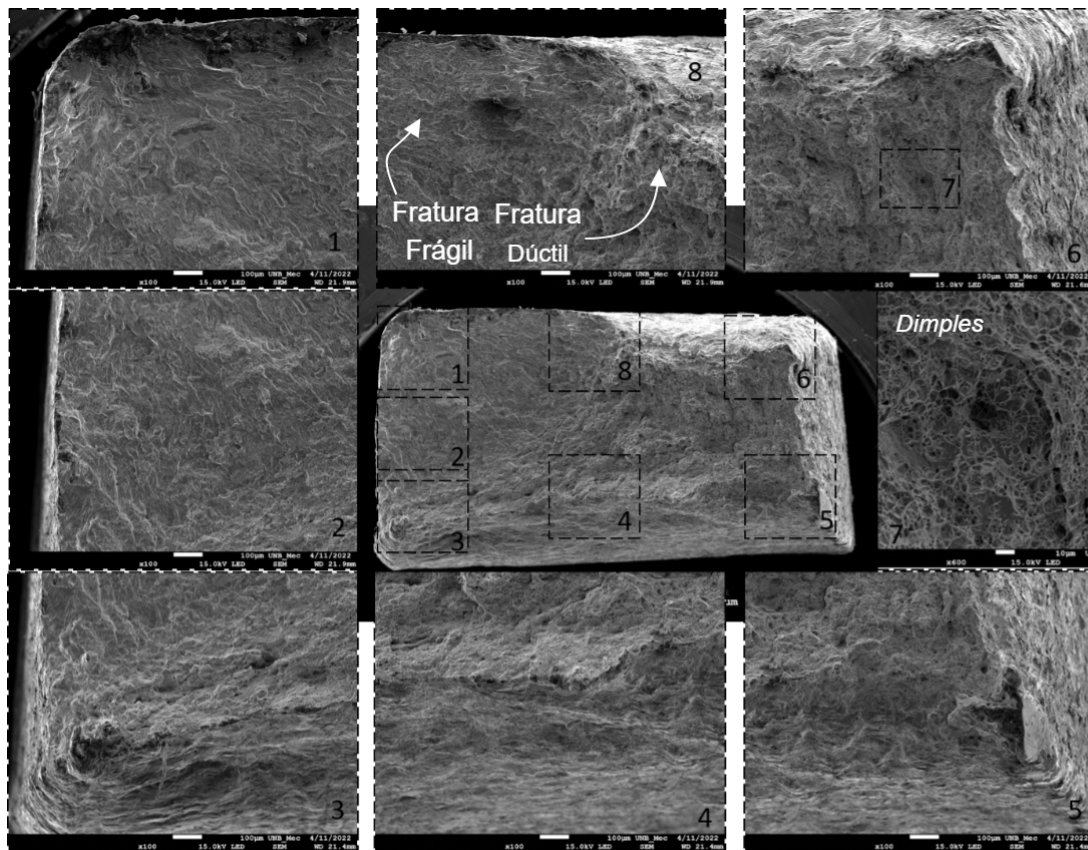


Figura 82 – Imagens da seção de ruptura do CP 5 obtidas através do MEV.

As imagens de perfil do CP 5 (Figura 83) também revelaram uma região de fratura frágil mais rebaixada em relação à região de fratura dúctil, o que mostra um padrão bem semelhante ao CP 3 que já era esperado, dado que ambos passaram pelo ensaio de fadiga com os mesmos parâmetros.

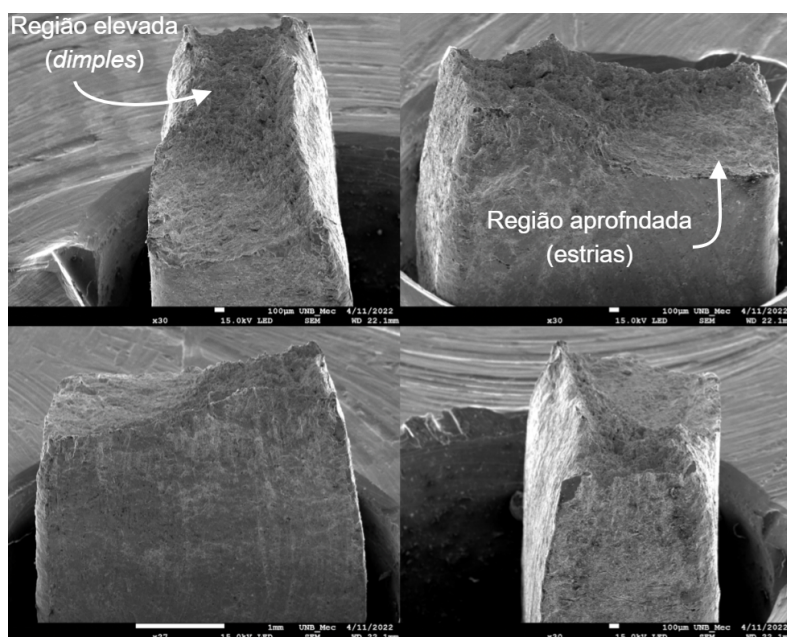


Figura 83 – Imagens do perfil de ruptura do CP 5 obtidas através do MEV.

4.5.3 Corpo de Prova 6

Através da avaliação das imagens da fratura do corpo de prova 6 (Figura 84) foi possível notar a região de clivagem à esquerda, onde as estrias apresentaram uma direção praticamente horizontal (imagem 4, Figura 84), diferentemente do que ocorreu, por exemplo, na imagem 1 da Figura 82, onde as estrias partiam de um ponto da extremidade do CP 5. Este fato sugere um início de trinca na região central da aresta esquerda, provavelmente devido a uma descontinuidade na superfície do corpo de prova, que pode ter sido gerada devido ao processo de extração do conector do CP, já discutido na seção 4.2.3. Nas imagens 7 e 8 da Figura 84 é possível observar a transição da região de fratura frágil para a fratura dúctil. Através das ampliações das imagens 1, 5 e 6 na Figura 84 é possível perceber a irregularidade da superfície de fratura dúctil.

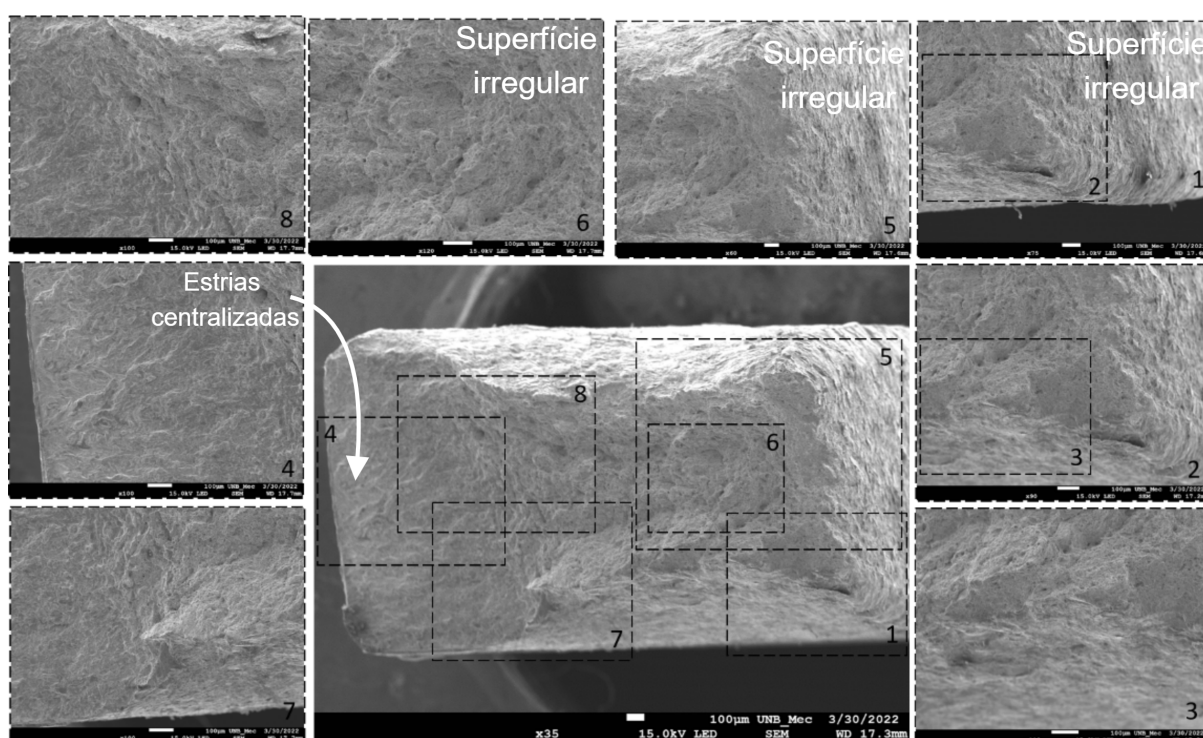


Figura 84 – Imagens da seção de ruptura do CP 6 obtidas através do MEV.

O perfil da região de ruptura do CP 6 é apresentado pela Figura 85. Nela estão destacadas as marcas deixadas pelo lixamento da região de onde foi extraído o conector do CP, mesma região que, pela Figura 84, apresentou fratura frágil, o que mostra a relação entre as marcas na superfície e a propagação da trinca durante o processo de fadiga.

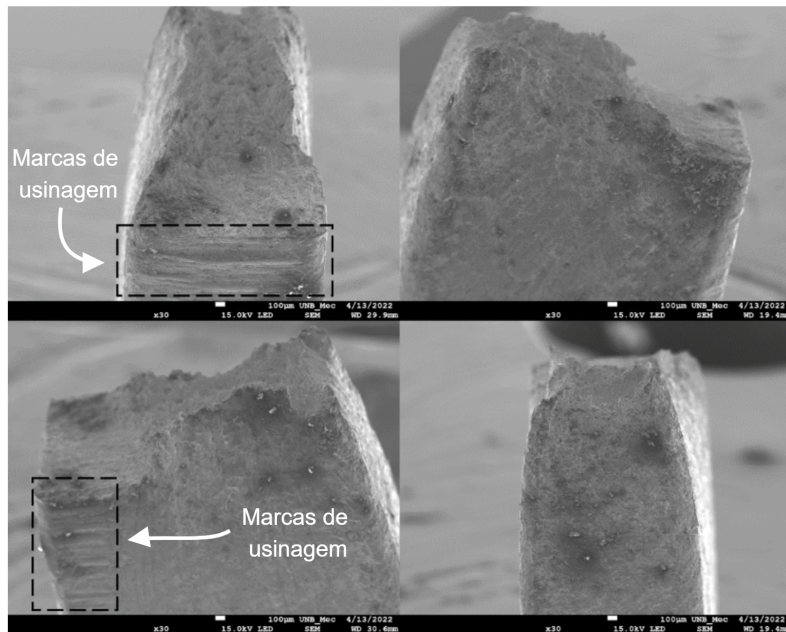


Figura 85 – Imagens do perfil de ruptura do CP 6 obtidas através do MEV destacando as marcas da ferramenta de usinagem.

4.5.4 Corpo de Prova 1

Ao contrário dos demais corpos de prova, o CP 1 não apresentou uma clara divisão entre as regiões de formação de estria (fratura frágil) e as regiões com estrutura de *dimples* (fratura dúctil), mas, através da Figura 86 é possível notar uma maior presença de *dimples* na região superior (imagem 7). Uma possível causa para a diferença existente neste CP é a tensão aplicada, que foi a mais elevada utilizada nos ensaios (0,67 Su).

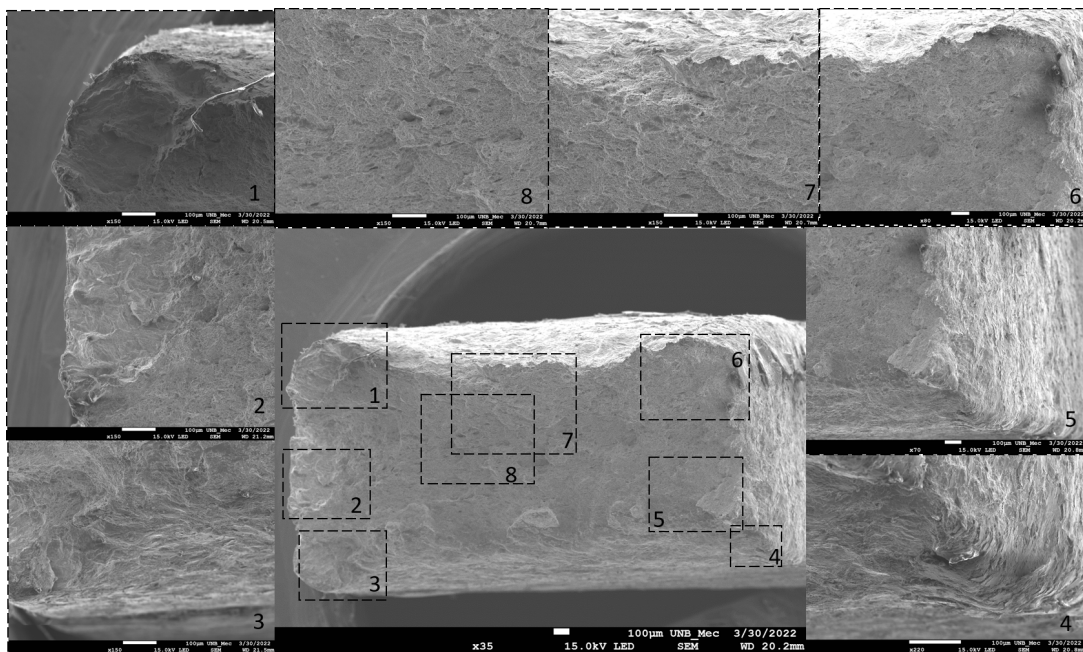


Figura 86 – Imagens da seção de ruptura do CP 1 obtidas através do MEV.

O perfil da fratura do CP 1, apresentado pela Figura 87, apresentou também um padrão diferente: enquanto nos demais CPs a diferença de elevação ocorria de um lado para o outro, no CP 1 a diferença ocorreu principalmente entre as regiões superior e inferior.

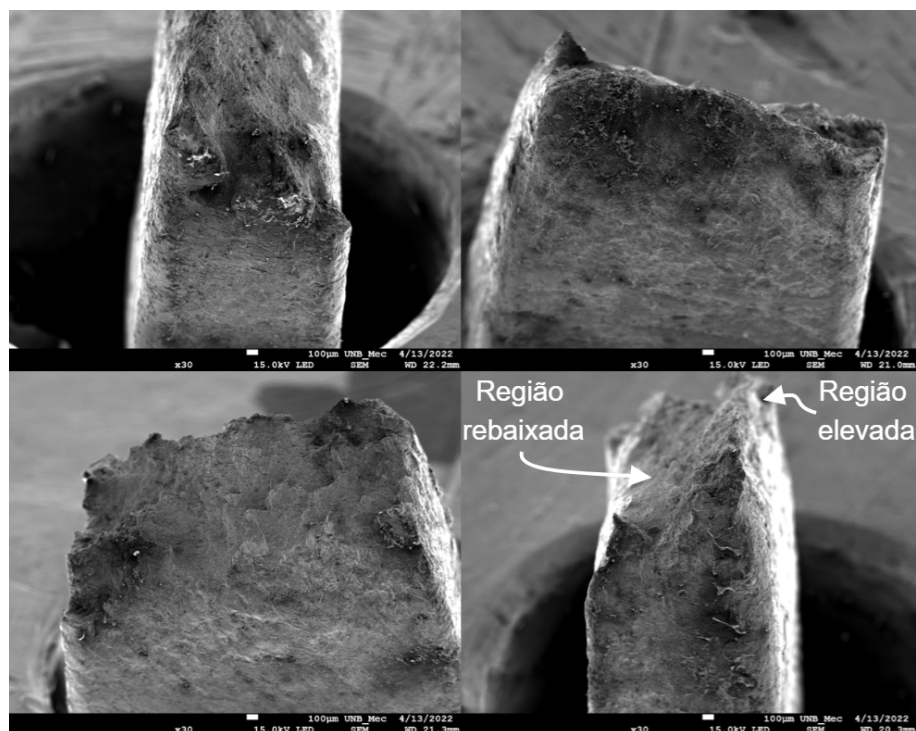


Figura 87 – Imagens do perfil de ruptura do CP 1 obtidas através do MEV.

5 Conclusões

O projeto teve como objetivo avaliar o comportamento a fadiga de peças obtidas pelo processo de manufatura aditiva, utilizando para isso uma caracterização através da curva S-N do material e da avaliação da região de fratura por meio do MEV. Para chegar ao resultado final o trabalho passou por diversas etapas, incluindo uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados e a realização do processo de fabricação dos corpos de prova utilizados. Com isso, foi possível realizar as seguintes conclusões sobre os temas:

1. Fabricação dos corpos de prova

- O processo de deposição das peças apresentou um bom aspecto visual quando comparado a trabalhos disponíveis na literatura. As características geométricas das peças apresentaram um bom padrão e repetibilidade, com uma variação máxima de 3,3% na largura e 2,3% na altura em relação à trabalhos anteriores.
- Os processos de separação entre a peça e o substrato e a usinagem da mesma apresentaram resultados satisfatórios, o que possibilitou a preparação de chapas com uma redução de 65,07% na massa e 5,39 mm na espessura.
- Apesar de problemas com oxidação, o processo de corte por jato d'água foi realizado com uma boa precisão em relação à geometria planejada, com variações de 5,5% na espessura, 2,75% na largura e 0,19 % no comprimento total.
- A rugosidade aritmética apresentou valores semelhantes na direção da usinagem e na região de corte por jato d'água, com médias de 4,90 mm para a primeira e 4,91 mm para a segunda.

2. Ensaio de fadiga

- Foi possível a caracterização da vida em fadiga do material através da curva S-N. A comparação com outros trabalhos publicados mostrou uma semelhança qualitativa, mesmo utilizando diferentes parâmetros de deposição.
- Nos ensaios, a vida infinita se deu para tensões abaixo de 302,04 MPa (0,53 Su), valor aproximado da estimativa para limite de fadiga encontrado na literatura (0,5 Su).
- A avaliação da fratura utilizando o MEV proporcionou a identificação de diferentes regiões, sendo as regiões de clivagem e *dimples* essenciais na descrição

das fraturas frágil e dúctil respectivamente. Dessa forma, foi possível caracterizar o comportamento do CP durante o ensaio de fadiga.

5.1 Propostas para trabalhos futuros

Para ampliar a abrangência dos resultados, diferentes parâmetros de deposição e preparação dos corpos de prova podem ser utilizados. Dentre eles encontram-se:

- Avaliação da temperatura de interpasse durante a deposição das camadas.
- Alteração da orientação de extração de corpos de prova da parede, com o objetivo de analisar a anisotropia entre CPs ao longo das camadas e através das camadas.
- Aplicação de tratamento térmico nos CPs, avaliando a efetividade do procedimento na melhoria da vida em fadiga do material.
- Realização de ensaio de fadiga seguindo os critérios de acabamento superficial especificados pela norma ASTM E466 (ASTM, 2015).

Por meio de uma maior variação dos parâmetros durante os ensaios, torna-se possível uma melhor caracterização do comportamento a fadiga dos materiais fabricados por manufatura aditiva, contribuindo para a consolidação deste método de fabricação em processos industriais pelo mundo.

5.2 Análise das referências bibliográficas

Para a formação da revisão bibliográfica do presente trabalho, as informações foram buscadas nas mais diversas fontes e em diferentes períodos, dando sempre preferência para trabalhos mais atuais. Dessa forma, a distribuição das 118 referências deste trabalho ao longo dos anos é dada de acordo com a Tabela 10.

Ano	Até 1970	1971-2000	2001-2010	2011-2017	2018	2019	2020	2021	2022
Quant.	3	2	15	31	9	17	16	21	4
(%)	3	2	14	25	8	15	14	18	3

Tabela 10 – Distribuição das referências ao longo dos anos.

Quanto às fontes das referências, a distribuição ocorreu da seguinte forma:

- Revistas: 59;
- Livros: 15;

- Congressos: 5;
- Teses, Dissertações e Monografias: 16;
- Outros (catálogos, apostilas, sites e patentes): 23.

A Figura 88 apresenta a distribuição das fontes presentes neste trabalho.

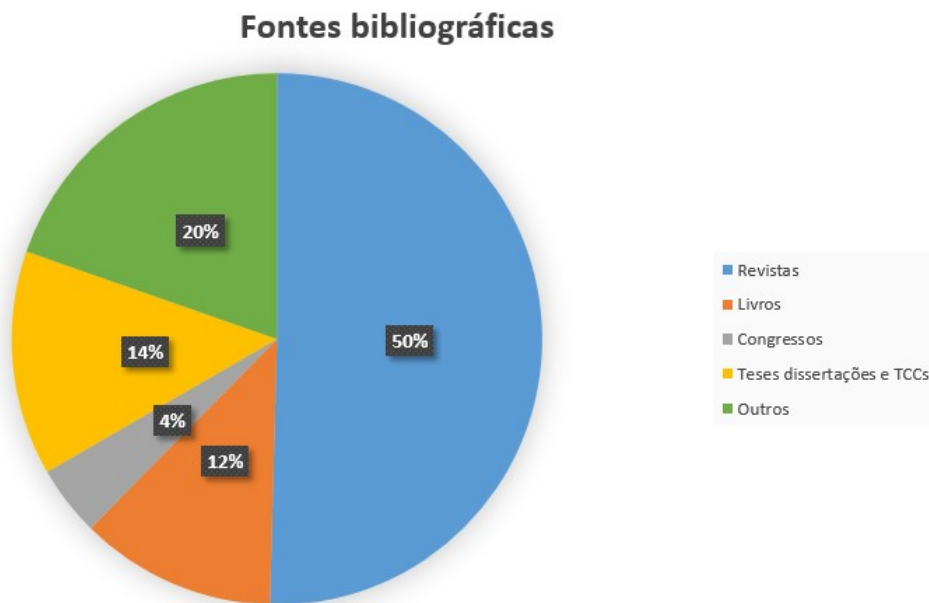


Figura 88 – Distribuição das referências bibliográficas de acordo com as fontes.

Referências

- ABBASZADEH, M.; VENTZKE, V.; NETO, L.; RIEKEHR, S.; MARTINA, F.; KASHAEV, N.; HÖNNIGE, J.; WILLIAMS, S.; KLUSEMANN, B. Compression behaviour of wire+ arc additive manufactured structures. *Metals*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 6, p. 877, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/met11060877>>. Citado 3 vezes nas páginas viii, 36 e 37.
- ABDALLA, F. E. S. *Aplicação das variantes MAG pulsado e MAG pulsado térmico com arame maciço em soldas de revestimento do tipo "LINING"*. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) — UFSC, Santa Catarina, 2005. Citado na página 10.
- ABNT. *NBR NM-ISO 1: Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento*. 1997. 2 p. Citado na página 53.
- ABNT. *NBR ISO 4288: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade*. 2008. 10 p. Citado na página 59.
- ANDRADE, A. F. C. d. *Influência da corrente de pulso, do tempo de pulso e diâmetro de gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo mig-p*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012. Citado na página 10.
- ARTAZA, T.; SUÁREZ, A.; MURUA, M.; GARCÍA, J.; TABERNERO, I.; LAMIKIZ, A. Wire arc additive manufacturing of mn4ni2crmo steel: Comparison of mechanical and metallographic properties of paw and gmaw. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 41, p. 1071–1078, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.10.035>>. Citado 4 vezes nas páginas vii, ix, 23 e 62.
- ASTM. *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. 2015. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=342565>>. Acesso em: 11 oct. 2021. Citado 7 vezes nas páginas ix, xii, 54, 55, 57, 69 e 80.
- BALDERRAMA-ARMENDARIZ, C. O.; MACDONALD, E.; ESPALIN, D.; CORTES-SAENZ, D.; WICKER, R.; MALDONADO-MACIAS, A. Torsion analysis of the anisotropic behavior of fdm technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 96, n. 1, p. 307–317, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-018-1602-0>>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 38.
- BARRA, S. R. *Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida*. 218 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Citado 2 vezes nas páginas vi e 11.

- BARTSCH, H.; KÜHNE, R.; CITARELLI, S.; SCHAFFRATH, S.; FELDMANN, M. Fatigue analysis of wire arc additive manufactured (3d printed) components with unmilled surface. In: ELSEVIER. *Structures*. 2021. v. 31, p. 576–589. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.068>>. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 69.
- BECKER, N.; GAUTHIER, D.; VIDAL, E. E. Fatigue properties of steel to aluminum transition joints produced by explosion welding. *International Journal of Fatigue*, Elsevier, v. 139, p. 105736, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105736>>. Citado 3 vezes nas páginas viii, 41 e 42.
- BELTRAN, J. H. D. *Influência do metal de adição e do gás de proteção na soldagem MAG de chapas de aço SAE 1020*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. 30 p. Citado na página 8.
- BIOLUB. *BIO 100 E: ÓLEO SOLÚVEL SINTÉTICO BIODEGRADÁVEL PARA CORTE DE METAIS*. 2017. Disponível em: <<https://biolub.com.br/>>. Citado na página 56.
- BISWAL, R.; ZHANG, X.; SHAMIR, M.; MAMUN, A. A.; AWD, M.; WALTHER, F.; SYED, A. K. Interrupted fatigue testing with periodic tomography to monitor porosity defects in wire+ arc additive manufactured ti-6al-4v. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 28, p. 517–527, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.026>>. Citado 2 vezes nas páginas x e 72.
- BISWAL, R.; ZHANG, X.; SYED, A. K.; AWD, M.; DING, J.; WALTHER, F.; WILLIAMS, S. Criticality of porosity defects on the fatigue performance of wire+ arc additive manufactured titanium alloy. *International Journal of Fatigue*, Elsevier, v. 122, p. 208–217, 2019. Citado 5 vezes nas páginas ix, 46, 57, 60 e 69.
- BRACARENSE, A. *Processos de Soldagem, Apostila*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. Citado 2 vezes nas páginas vi e 5.
- BRAIAN, M.; JÖNSSON, D.; KEVCI, M.; WENNERBERG, A. Geometrical accuracy of metallic objects produced with additive or subtractive manufacturing: A comparative in vitro study. *Dental Materials*, Elsevier, v. 34, n. 7, p. 978–993, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.03.009>>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 31.
- BRUCKNER, J. *Current Welding Practice: CMT Technology*. Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2013. Citado na página 12.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. *Elementos de Máquinas de Shigley*. [S.l.]: AMGH Editora Ltda., 2011. Citado 5 vezes nas páginas viii, 37, 38, 40 e 41.
- BUGATTI. *World premiere brake caliper from 3-D printer*. 2018. Disponível em: <<https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/>>. Acesso em: 02 Aug. 2021. Citado 2 vezes nas páginas vii e 18.
- BÖHLER. *BÖHLER SG 2, Solid Wire, mild steel*. 2022. Disponível em: <http://www.vabw-service.com/documents/boehler/datenblaetter/en/L1_16699_en__BOEHLER_SG_2_3U10B20G_3291525__EN.pdf?cache=1648417168>. Citado 2 vezes nas páginas xii e 51.
- CALLISTER, J. W. D. *Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução*. [S.l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., 2002. Citado 5 vezes nas páginas viii, 33, 34, 38 e 39.

COOKE, S.; AHMADI, K.; WILLERTH, S.; HERRING, R. Metal additive manufacturing: Technology, metallurgy and modelling. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 57, p. 978–1003, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.025>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.

COSTA, T. F. *Aplicação de processos MAG curto-circuito convencional e controlado na soldagem de dutos de aço carbono*. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Uberlândia, 2011. Citado 4 vezes nas páginas vi, vii, 14 e 15.

DEREKAR, K. S.; ADDISON, A.; JOSHI, S. S.; ZHANG, X.; LAWRENCE, J.; XU, L.; MELTON, G.; GRIFFITHS, D. Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-mig) and cold metal transfer (cmt) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (waam) of aluminium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 107, n. 1, p. 311–331, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-04946-2>>. Citado 3 vezes nas páginas vii, 24 e 25.

DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 81, n. 1, p. 465–481, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 22.

DIRISU, P.; SUPRIYO, G.; MARTINA, F.; XU, X.; WILLIAMS, S. Wire plus arc additive manufactured functional steel surfaces enhanced by rolling. *International Journal of Fatigue*, Elsevier, v. 130, p. 105237, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105237>>. Citado 5 vezes nas páginas x, xii, 60, 70 e 71.

DORMER. *Milling 2021-2022*. 2021. Disponível em: <https://5wyuco84ao39w9tsgkkmnmx.blob.core.windows.net/cms/DORMER_PRAMET_Milling_Catalogue_2021_EN.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2022. Citado na página 56.

DUTRA, J. C.; SILVA, R. H. G. e; MARQUES, C. Características de fusão e potência de soldagem com a transferência mig - cmt versus mig convencional para alumínio 5183. *Soldag. Insp.*, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000100003>>. Citado 3 vezes nas páginas vii, 15 e 16.

ERMAKOVA, A.; GANGULY, S.; RAZAVI, J.; BERTO, F.; MEHMANPARAST, A. Experimental investigation of the fatigue crack growth behavior in wire arc additively manufactured er100s-1 steel specimens. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Wiley Online Library, v. 45, n. 2, p. 371–385, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/ffe.13598>>. Citado na página 57.

ERMAKOVA, A.; MEHMANPARAST, A.; GANGULY, S.; RAZAVI, J.; BERTO, F. Fatigue crack growth behaviour of wire and arc additively manufactured er70s-6 low carbon steel components. *International Journal of Fracture*, Springer, p. 1–13, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10704-021-00545-8>>. Citado 4 vezes nas páginas ix, 44, 45 e 72.

ESAB. *Soldagem Robótica: soluções ESAB*. 2020. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-solucoes-robotica_pt_rev0.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2021. Citado 2 vezes nas páginas vi e 5.

ESCOBAR-PALAFOX, G.; GAULT, R.; RIDGWAY, K. Characterisation of abrasive water-jet process for pocket milling in inconel 718. *Procedia Cirp*, Elsevier, v. 1, p. 404–408, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.072>>. Citado na página 57.

ETMM. *Case Study: Additive Manufacturing 3D printing a rocket engine*. 2019. Disponível em: <<https://www.etmm-online.com/3d-printing-a-rocket-engine-a-886960/>>. Acesso em: 11 oct. 2021. Citado 2 vezes nas páginas vi e 2.

FANG, X.; REN, C.; BAI, H.; WANG, C.; LU, B. Analysis of characteristics of process parameters in cmt additive manufacturing. In: IOP PUBLISHING. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. v. 504, n. 1, p. 012018. Disponível em: <[doi:10.1088/1757-899X/504/1/012018](https://doi.org/10.1088/1757-899X/504/1/012018)>. Citado 3 vezes nas páginas vii, 24 e 25.

FANG, X.; ZHANG, L.; CHEN, G.; DANG, X.; HUANG, K.; WANG, L.; LU, B. Correlations between microstructure characteristics and mechanical properties in 5183 aluminium alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing with different arc modes. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 11, p. 2075, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma11112075>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 26.

FENG, J.; ZHANG, H.; HE, P. The cmt short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding. *Materials and Design*, v. 30, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.015>>. Citado 4 vezes nas páginas vii, 12, 13 e 15.

FERNANDES, M. Projeto de instalação de um robô cartesiano de 3 graus de liberdade. trabalho de graduação em engenharia de controle e automação. *Publicação FT. TG-nº06, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85p*, 2016. Citado na página 49.

FERNÁNDEZ-ABIA, A.; BARREIRO, J.; FERNÁNDEZ-LARRINOVA, J.; LACALLE, L. L. de; FERNÁNDEZ-VALDIVIELSO, A.; PEREIRA, O. Behaviour of pvd coatings in the turning of austenitic stainless steels. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 63, p. 133–141, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.241>>. Citado 3 vezes nas páginas viii, 28 e 29.

FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. [S.l.]: Editora blucher, 1970. Citado 2 vezes nas páginas vii e 27.

FILHO, D. F.; BALSAMO, P. S. de S.; FERRARESI, V. A. Influência do tipo de gás de proteção na soldagem mig/mag na qualidade do cordão de aço inoxidável. *4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, 2007. Disponível em: <<http://grima.ufsc.br/cobef4/files/021008077.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 8.

FISCHER, A. *Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW-Arco Pulsado*. 170 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8S7H6T>>. Citado na página 10.

FRANHO. *FM-500*. 2022. Disponível em: <<https://www.franho.com.br/fm-500>>. Acesso em: 27 mar. 2022. Citado 2 vezes nas páginas ix e 56.

FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, Springer, v. 23, n. 6, p. 1917–1928, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>>. Citado 4 vezes nas páginas vii, 18, 19 e 20.

FRONIUS, I. G. *Manual de operação TransPuls Synergic 5000 CMT Advanced*. 2020. Disponível em: <[https://www.fronius.com/~downloads/PerfectWelding/OperatingInstructions/42,0426,0001,PB.pdf](https://www.fronius.com/~/downloads/PerfectWelding/OperatingInstructions/42,0426,0001,PB.pdf)>. Acesso em: 09 oct. 2021. Citado 2 vezes nas páginas ix e 49.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Switzerland: Springer, 2015. Citado 4 vezes nas páginas vii, 16, 17 e 20.

GOKULDOSS, P. K.; KOLLA, S.; ECKERT, J. Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting—selection guidelines. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 6, p. 672, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma10060672>>. Citado na página 19.

GONÇALVES, G. C. Integração do processo gmaw ao robô cartesiano maxr23-s42-h42-c42. *Publicação FT. TG-nº02/2019, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100p*, 2019. Citado na página 49.

GORDON, J.; HOCHHALTER, J.; HADEN, C.; HARLOW, D. G. Enhancement in fatigue performance of metastable austenitic stainless steel through directed energy deposition additive manufacturing. *Materials & Design*, Elsevier, v. 168, p. 107630, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107630>>. Citado na página 57.

INGARAO, G.; PRIARONE, P. C.; DENG, Y.; PARASKEVAS, D. Environmental modelling of aluminium based components manufacturing routes: Additive manufacturing versus machining versus forming. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 176, p. 261–275, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.115>>. Citado na página 32.

JAFARI, D.; VANEKER, T. H. J.; GIBSON, I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Materials and Design*, v. 202, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.

JEOL. *JSM-7100F Thermal field emission electron microscope*. 2012. Disponível em: <<https://www.jeolbenelux.com/JEOL-BV-News/jsm-7100f-thermal-field-emission-electron-microscope>>. Citado 2 vezes nas páginas ix e 51.

KARAKAŞ, Ö.; BAUMGARTNER, J.; SUSMEL, L. On the use of a fictitious notch radius equal to 0.3 mm to design against fatigue welded joints made of wrought magnesium alloy az31. *International Journal of Fatigue*, Elsevier, v. 139, p. 105747, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105747>>. Citado 3 vezes nas páginas viii, 41 e 42.

ŁAGODA, T.; GŁOWACKA, K. Fatigue life prediction of welded joints from nominal system to fracture mechanics. *International Journal of Fatigue*, Elsevier, v. 137, p. 105647, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105647>>. Citado 3 vezes nas páginas viii, 42 e 43.

- LI, J. Z.; ALKAHARI, M. R.; ROSLI, N. A. B.; HASAN, R.; SUDIN, M. N.; RAMLI, F. R. Review of wire arc additive manufacturing for 3d metal printing. *International Journal of Automation Technology*, Fuji Technology Press Ltd., v. 13, n. 3, p. 346–353, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.20965/ijat.2019.p0346>>. Citado 3 vezes nas páginas vii, 18 e 19.
- MACHADO, Á. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. da. *Teoria da usinagem dos materiais*. [S.l.]: Editora Blucher, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- MACHADO, Á. R.; SILVA, M. B. d. Usinagem dos metais. *Metal Cutting*), *Technical Notes, 9th version, [In Portuguese]*, 2004. Citado 2 vezes nas páginas vii e 27.
- MACHADO, I. G. *Soldagem e Técnicas Conexas: Processos*. Porto Alegre: UFRGS, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 8.
- MARQUES, C. *Análise de técnicas e efeitos físicos da alimentação dinâmica do arame no processo de soldagem MIG/MAG com vistas ao desenvolvimento de um sistema flexível nacional*. 210 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. Citado 3 vezes nas páginas vi, 12 e 13.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. et al. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. Belo Horizonte: UFMG, 2005. Citado 4 vezes nas páginas vi, 5, 6 e 7.
- MARTINS, J. F. de R.; DROZDA, F. O. Oportunidades de design para a manufatura aditiva. *ConBRePro: Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, 2020. Disponível em: <https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/anais/arquivos/10102020_211016_5f824b10d6696.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 18.
- MATTOS, J.; UEHARA, A.; SATO, M.; FERREIRA, I. Fatigue properties and micromechanism of fracture of an alsimg0. 6 cast alloy used in diesel engine cylinder head. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 2, n. 1, p. 759–765, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.082>>. Citado na página 72.
- MENDES, R. F. Integração e planejamento de trajetória de um robô cartesiano para construção de modelos por soldagem 3d. *Publicação FT. TG-nº17, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 81p*, 2019. Citado na página 49.
- MTS. *647 Side-Loading Hydraulic Wedge Grips: Precision, easy-to-load grips for a wide range of tensile and fatigue applications*. 2016. Disponível em: <<https://www.mts.com/-/media/materials/pdfs/brochures/mts-647-hydraulic-grips-brochure.pdf?as=1>>. Acesso em: 30 oct. 2021. Citado na página 50.
- MTS. *MTS Landmark Testing Solutions: Versatile, high-performance servohydraulic systems for static and dynamic material and component testing*. 2021. Disponível em: <<https://www.mts.com/-/media/materials/pdfs/brochures/mts-landmark-test-system-brochure.pdf?as=1>>. Acesso em: 30 oct. 2021. Citado 2 vezes nas páginas ix e 50.
- MVOLA, B.; KAH, P.; MARTIKAINEN, J.; HILTUNEN, E. Applications and benefits of adaptive pulsed gmaw. *Mechanika*, v. 19(6), 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.19.6.6003>>. Citado na página 10.

- MX3D. *MX3D*. 2021. Disponível em: <<https://mx3d.com/>>. Acesso em: 11 oct. 2021. Citado 3 vezes nas páginas vi, 1 e 2.
- NAJMON, J. C.; RAEISI, S.; TOVAR, A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive manufacturing for the aerospace industry*, Elsevier, p. 7–31, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>>. Citado na página 1.
- NEEDHAM, J. C.; CARTER, A. W. Metal transfer characteristics with pulsed current. *British Welding Journal*, v. 12, 1965. Citado na página 10.
- NETO, P. L. d. S. Instalação, configuração e integração dos dispositivos de controle de um robô cartesiano. *Publicação FT. TG-nº06, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92p*, 2018. Citado na página 49.
- NEWMAN, S. T.; ZHU, Z.; DHOKIA, V.; SHOKRANI, A. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals*, Elsevier, v. 64, n. 1, p. 467–470, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.109>>. Citado na página 31.
- NISHIMURA, P. L. G.; RODRIGUES, O. V.; JÚNIOR, G. B.; SILVA, L. A. da. Prototipagem rápida: um comparativo entre uma tecnologia aditiva e uma subtrativa. *Blucher Design Proceedings*, v. 2, n. 9, p. 4481–4491, 2016. Citado 2 vezes nas páginas viii e 30.
- NORTON, R. L. *Projeto de máquinas: uma abordagem integrada*. [S.l.]: Bookman, 2013. Citado 11 vezes nas páginas viii, 3, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41 e 71.
- NOVELINO, A. L. B. Estudo da geometria dos cordões fabricados por manufatura aditiva metálica por arco elétrico e arame consumível. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80 p., 2021. Citado 4 vezes nas páginas 52, 53, 63 e 64.
- OKOKPUJIE, I. P.; TARTIBU, L. K. Performance investigation of the effects of nano-additive-lubricants with cutting parameters on material removal rate of al8112 alloy for advanced manufacturing application. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 15, p. 8406, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su13158406>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 28.
- OSG. *EXOCARB® Ball Radius End Mills Designed for Additive Manufacturing*. 2020. Citado 3 vezes nas páginas viii, 29 e 30.
- PAN, Z.; DING, D.; WU, B.; CUIURI, D.; LI, H.; NORRISH, J. Arc welding processes for additive manufacturing: a review. *Transactions on intelligent welding manufacturing*, Springer, p. 3–24, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5355-9_1>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- PARIS, H.; MOKHTARIAN, H.; COATANÉA, E.; MUSEAU, M.; ITUARTE, I. F. Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals*, Elsevier, v. 65, n. 1, p. 29–32, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.036>>. Citado na página 32.
- PEREIRA, T.; KENNEDY, J. V.; POTGIETER, J. A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia manufacturing*, Elsevier, v. 30, p. 11–18, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003>>. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 32.

PICKIN, C. G.; YOUNG, K. Evaluation of cold metal transfer (cmt) process for welding aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 11, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/174329306X120886>>. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 15.

PIMENTA, R.; OLIVEIRA, D.; ZIBEROV, M. Preparação de corpos de prova fabricados por manufatura aditiva para ensaio de fadiga. *XXIV Colóquio de Usinagem. Curitiba.*, 2022. Citado 2 vezes nas páginas ix e 58.

PRAMET, D. *Uma nova geração emblemática de classe torneamento*. 2021. Disponível em: <<https://www.dormerpramet.com/pt-pt/newssite/pages/2021-t8430-grade-launched.aspx>>. Acesso em: 23 aug. 2021. Citado na página 29.

RALPH, B. *Method of making decorative articles*. [S.l.]: Google Patents, 1925. US Patent 1,533,300. Citado na página 21.

RAUCH, M.; HASCOET, J.-Y. Improving additive manufactured surfaces properties with post processing techniques. 2021. Citado na página 57.

RODRIGUES, T. A.; DUARTE, V.; MIRANDA, R.; SANTOS, T. G.; OLIVEIRA, J. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (waam). *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 7, p. 1121, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/ma12071121>>. Citado na página 23.

ROJAS, H.; MOLINA, A.; VALDEZ, S.; CAMPILLO, B.; MARTÍNEZ, H.; SEDANO, A.; SERNA, S. The impact of heat input on the microstructures, fatigue behaviors, and stress lives of tig-welded 6061-t6 alloy joints. *Materials Research Express*, IOP Publishing, v. 7, n. 12, p. 126512, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/2053-1591/abd136>>. Citado 3 vezes nas páginas viii, 43 e 44.

ROSLI, N. A.; ALKAHARI, M. R.; ABDOLLAH, M. F.; MAIDIN, S.; RAMLI, F. R. Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. *journal of materials research and technology*, Elsevier, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.002>>. Citado na página 21.

SAMES, W. J.; LIST, F.; PANNALA, S.; DEHOFF, R. R.; BABU, S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International materials reviews*, Taylor & Francis, v. 61, n. 5, p. 315–360, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>>. Citado na página 21.

SANDVIK. *As mais novas soluções e ferramentas de corte*. 2021. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/news/pages/default.aspx>>. Acesso em: 23 aug. 2021. Citado na página 29.

SARTORI, F. *Tecnologias e técnicas modernas do processo MIG/MAG para o passe de raiz em soldagem orbital de tubos*. 155 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. Citado na página 14.

SCHIJVE, J. *Fatigue of structures and materials*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2001. Citado na página 43.

SCHNEIDER, E. *Lexium Linear Motion: A Comprehensive Range of Modular Single- and Multi-Axis Systems for All Linear Movements*. 2009. Disponível em: <https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Brochure&p_File_Name=DIA7ED1090605EN.pdf&p_Doc_Ref=DIA7ED1090605EN>. Acesso em: 09 oct. 2021. Citado 2 vezes nas páginas ix e 49.

- SCIACKY. *ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING (EBAM)*. 2021. Disponível em: <<https://www.sciacky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder>>. Acesso em: 09 Aug. 2021. Citado 2 vezes nas páginas vii e 21.
- SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. *Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho*. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2014. Citado na página 9.
- SELVI, S.; VISHVAKSENAN, A.; RAJASEKAR, E. Cold metal transfer (cmt) technology - an overview. *Defence Technology*, v. 14, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002>>. Citado na página 12.
- SHARMA, N. K. *Analysis of Single-walled and Multi-walled Stainless Steel 316 L samples manufactured using CMT based WAAM technique*. 14 p. Tese (Doutorado) — National Institute of Technology, Tiruchirappalli, 2019. Citado 3 vezes nas páginas viii, 33 e 34.
- SILVA, R. H. G. *Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz*. 127 p. Dissertação (Mestrado) — UFSC, Florianópolis, SC, 2005. Citado 2 vezes nas páginas vi e 9.
- SOCIETY, A. W. *Welding Handbook*. Miami-FL: American Welding Society, 2001. Citado 2 vezes nas páginas vi e 9.
- SOCIETY, A. W. *Welding*. 2021. Disponível em: <<https://awo.aws.org/glossary/welding/>>. Acesso em: 02 jul. 2021. Citado na página 6.
- STELZER, S.; UCSNIK, S.; PINTER, G. Strength and damage tolerance of composite-composite joints with steel and titanium through the thickness reinforcements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 88, p. 39–47, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.020>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 12.
- SUDNIK, W. *Arc Welding*. Croatia: InTech, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 10.
- SYED, A. K.; ZHANG, X.; CABALLERO, A.; SHAMIR, M.; WILLIAMS, S. Influence of deposition strategies on tensile and fatigue properties in a wire+ arc additive manufactured ti-6al-4v. *International Journal of Fatigue*, Elsevier, v. 149, p. 106268, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106268>>. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 69.
- SYED, A. K.; ZHANG, X.; DAVIS, A. E.; KENNEDY, J. R.; MARTINA, F.; DING, J.; WILLIAMS, S.; PRANGNELL, P. B. Effect of deposition strategies on fatigue crack growth behaviour of wire+ arc additive manufactured titanium alloy ti-6al-4v. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 814, p. 141194, 2021. Citado 3 vezes nas páginas ix, 45 e 46.
- TODHUNTER, L. D.; LEACH, R.; LAWES, S. D.; BLATEYRON, F. Industrial survey of iso surface texture parameters. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Elsevier, v. 19, p. 84–92, 2017. Citado 2 vezes nas páginas ix e 59.
- VAFADAR, A.; GUZZOMI, F.; RASSAU, A.; HAYWARD, K. Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 3, p. 1213, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app11031213>>. Citado 6 vezes nas páginas vi, vii, 1, 18, 19 e 20.

VIMAL, K.; SRINIVAS, M. N.; RAJAK, S. Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: a review. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.153>>. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 23.

VOLPATO, N. *Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Editora Edgar Blucher LTda, 2018. Citado na página 16.

WÄCHTER, M.; LEICHER, M.; HUPKA, M.; LEISTNER, C.; MASENDORF, L.; TREUTLER, K.; KAMPER, S.; ESDERTS, A.; WESLING, V.; HARTMANN, S. Monotonic and fatigue properties of steel material manufactured by wire arc additive manufacturing. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 15, p. 5238, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/app10155238>>. Citado na página 57.

WANG, F.; WILLIAMS, S.; RUSH, M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured ti6al4v alloy. *The international journal of advanced manufacturing technology*, Springer, v. 57, n. 5, p. 597–603, 2011. Citado na página 23.

WANG, X.; ZHAO, Y.; WEI, L.; GUAN, X. In-situ sem investigation of the fatigue behavior of additive manufactured titanium alloys. In: SPRINGER. *European Workshop on Structural Health Monitoring*. [S.l.], 2020. p. 612–621. Citado na página 60.

WAQAS, A.; QIN, X.; XIONG, J.; ZHENG, C.; WANG, H. Analysis of ductile fracture obtained by charpy impact test of a steel structure created by robot-assisted gmaw-based additive manufacturing. *Metals*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 11, p. 1208, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/met9111208>>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 39.

WILL, C. R. *Comportamento à corrosão de juntas de superduplex UNS S32760 soldadas por GMAW pulsado com diferentes misturas gasosas*. 93 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/18290>>. Citado 3 vezes nas páginas vi, 10 e 11.

WU, B.; PAN, Z.; DING, D.; CUIURI, D.; LI, H.; XU, J.; NORRISH, J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 35, p. 127–139, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

YANG, Q.; XIA, C.; DENG, Y.; LI, X.; WANG, H. Microstructure and mechanical properties of als7mg0.6 aluminum alloy fabricated by wire and arc additive manufacturing based on cold metal transfer (waam-cmt). *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 16, p. 2525, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/ma12162525>>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 35.

YANGFAN, W.; XIZHANG, C.; CHUANCHU, S. Microstructure and mechanical properties of inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing. *Surface and Coatings Technology*, Elsevier, v. 374, p. 116–123, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.079>>. Citado 3 vezes nas páginas xii, 31 e 32.

ZAKERI, S.; VIPPOLA, M.; LEVÄNEN, E. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography. *Additive Manufacturing*, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101177>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 18.

ZHAI, P.; XUE, S.; WANG, J.; TAO, Y.; CHEN, W.; CHEN, T.; JI, S. Comparative study of droplet transfer modes on appearance, microstructure, and mechanical properties of weld during pulsed gmaw. *Metals*, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/met10050611>>. Citado 3 vezes nas páginas vi, 10 e 11.

ZHANG, X.; MARTINA, F.; SYED, A. K.; WANG, X.; DING, J.; WILLIAMS, S. W. Fatigue crack growth in additive manufactured titanium: Residual stress control and life evaluation method development. VTT Information Service, 2017. Citado 3 vezes nas páginas ix, 44 e 45.

Apêndices

A Trabalhos desenvolvidos



25, 26 e 27 de maio de 2022, Curitiba, PR, Brasil
PUCPR – PPGEM
Escola Politécnica
Laboratório de Pesquisa em Usinagem – LAUS

PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA PARA ENSAIO DE FADIGA

Rodrigo Souza Pimenta, Universidade de Brasília, souzapimentarodrigo@gmail.com
Déborah de Oliveira, Universidade de Brasília
Maksym Ziberov, Universidade de Brasília

Resumo. O uso da manufatura aditiva nos processos industriais tem ganhado cada vez mais espaço no mercado, isso ocorre principalmente devido às vantagens que ela traz, como: possibilidade de criação de geometrias complexas, menor desperdício de material e, conseqüentemente, redução de custos de fabricação. Por apresentar esse grande potencial, torna-se necessária a avaliação do comportamento e propriedades das peças produzidas por este processo de fabricação nas mais diversas condições de serviço, sendo o comportamento à fadiga de grande relevância dada as baixas tensões nas quais as falhas ocorrem em relação a carregamentos estáticos. No entanto, a manufatura aditiva possui ainda limitações no acabamento, apresentando superfícies irregulares e rugosas, sendo necessário o pós processamento, ou seja, sua usinagem. Ao estudar as propriedades mecânicas dessas peças, é desejável que seu acabamento seja próximo do acabamento que as peças teriam em operação. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um plano de usinagem para realizar a fabricação de corpos de prova para ensaios de fadiga a partir de peças produzidas por manufatura aditiva. A metodologia engloba processos de usinagem de superfície e corte por jato d'água, possibilitando a extração dos corpos de prova com as dimensões calculadas para o devido fim. Através da deste plano de trabalho, será possível avançar com os estudos da manufatura aditiva, identificando os parâmetros de usinagem adequados para a obtenção de ensaios seguros com resultados confiáveis.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Usinagem, Acabamento superficial, Integridade sub superficial, Corte por jato d'água.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescente avanço das tecnologias e a necessidade de atender as mais diversas demandas, a indústria tem buscado melhorar os métodos de produção, a fim de alcançar uma produção otimizada em relação ao tempo, qualidade, volume de produção e lucros finais. É neste âmbito que surge a Manufatura Aditiva (MA), um método de fabricação que permite a criação de produtos de forma rápida e personalizada. O processo pode ser definido como uma fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente, normalmente originado de um sistema *Computer-Aided Design* (CAD) (Volpato, 2017).

Inicialmente, a MA foi usada especificamente para criar modelos de visualização para produtos à medida que estavam sendo desenvolvidos. Porém, recentemente, algumas dessas tecnologias foram melhoradas de forma que o produto seja adequado para o uso final. Isso explica por que a terminologia evoluiu essencialmente de prototipagem rápida para manufatura aditiva (Gibson *et al.*, 2015). Atualmente diferentes setores têm adotado a manufatura aditiva em seus processos. Na indústria automotiva a MA forneceu oportunidades para designs mais flexíveis, otimizados e robustos, produtos mais leves, fortes e seguros com prazos e custos reduzidos. Segundo Najmon *et al.* (2019), todos os setores da indústria aeroespacial como aeronaves, aplicações militares e sistemas de mísseis já estão utilizando processos de manufatura aditiva. Também se destacam a indústria médica e odontológica, com a fabricação de modelos personalizados adaptados às necessidades dos pacientes, indústrias de construção, mineração, óleo e gás (Vafadar *et al.*, 2021). A Figura 1 representa a distribuição das receitas de MA para o mercado final em 2018 e representa a adoção industrial diversificada de manufatura aditiva.

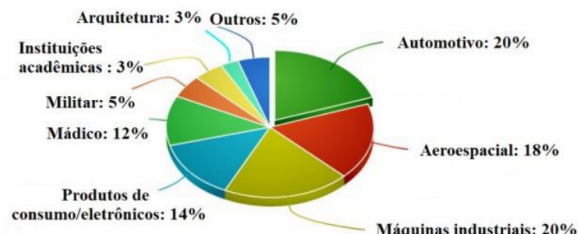


Figura 1 - Adoção industrial da manufatura aditiva (Adaptado de Vafadar *et al.*, 2021)

Observação: primeira página do artigo

RESISTÊNCIA À FADIGA EM PEÇAS IMPRESSAS POR WAAM – UMA REVISÃO

Rodrigo Souza Pimenta, souzapimentarodrigo@gmail.com
André Luiz Brito Novelino, andre_novelino@hotmail.com
José Alexander Araújo, alex07@umb.br
Maksym Ziberov, mziberov@umb.br

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Darcy Ribeiro, Asa norte, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil.

Resumo: O uso da manufatura aditiva em processos industriais tem apresentado grande aumento nos últimos anos, resultado das melhorias que este método de fabricação pode causar, como por exemplo: aumento da automatização, produção de peças com geometrias complexas, utilização otimizada de material com redução do desperdício e, conseqüentemente, redução dos custos de fabricação. Sendo assim, a análise dos parâmetros envolvidos na fabricação e suas conseqüências nas propriedades do produto final se tornam essenciais para alcançar um projeto seguro e com qualidade. Dentre as propriedades dos materiais, o comportamento à fadiga apresenta grande relevância, dado que a maioria das falhas em máquinas ocorrem por este fator, que possui como característica um nível de tensão significativamente inferior ao limite de escoamento e ocorre de forma súbita, sem sinais como grande deflexões, o que a torna muito perigosa, despertando o interesse de engenheiros por muitos anos. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre o comportamento à fadiga dos materiais fabricados por manufatura aditiva, especificamente pelo método Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), apresentando os principais aspectos e propriedades que caracterizam o processo. Para isso, este artigo foi dividido em função do método de deposição para favorecer a análise e discussão das características de cada método. Assim, foi possível identificar vantagens e desvantagens, bem como semelhanças e diferenças entre os métodos. Com a análise foi possível notar o fator anisotrópico possui grande influência no comportamento à fadiga na manufatura aditiva; diferentes estratégias e métodos de deposição alteram as características das microestruturas e, conseqüentemente, as propriedades dos materiais.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, WAAM, CMT, PAW, Fadiga

1. INTRODUÇÃO

Com o crescente avanço das tecnologias e a necessidade de atender as mais diversas demandas, a indústria têm buscado melhorar os métodos de produção, a fim de alcançar uma produção otimizada em relação a tempo, qualidade, volume de produção e lucros finais. É neste âmbito que surge a Manufatura Aditiva (MA), um método de fabricação que permite a criação de produtos de forma rápida e personalizada. Diferentes setores têm adotado a manufatura aditiva em seus processos. Na indústria automotiva a MA forneceu oportunidades para *designs* mais flexíveis, otimizados e robustos, produtos mais leves, fortes e seguros com prazos e custos reduzidos. Segundo Najmon, Raeisi e Tovar (2019), todos os setores da indústria aeroespacial como aeronaves, aplicações militares e sistemas de mísseis já estão utilizando processos de manufatura aditiva. Também se destacam a indústria médica e odontológica, com a fabricação de modelos personalizados adaptados às necessidades dos pacientes, indústrias de construção, mineração, óleo e gás (Vafadar *et al.*, 2021).

Dentre os processos de manufatura aditiva destaca-se o *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), também conhecido como Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), um método de deposição metálica por energia direcionada, este método tem atraído grande interesse tanto do campo acadêmico quanto industrial (Rosli *et al.*, 2021). Isso ocorre devido à sua capacidade de criar grandes componentes de metal com alta taxa de deposição e baixo custo de equipamento (Wu *et al.*, 2018). Para alguns autores, como Vimal *et al.*, (2020), WAAM é a técnica mais avançada usada para manufatura aditiva de metais. Dado o grande potencial dessa tecnologia, a análise dos parâmetros envolvidos na fabricação e suas conseqüências nas propriedades do produto se tornam essenciais para alcançar um projeto seguro e com qualidade.

A maioria das falhas em máquinas acontece devido a cargas que variam no tempo, e não a esforços estáticos. Essas falhas ocorrem, geralmente, em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais (Norton, 2013). Sendo assim, o estudo da vida em fadiga dos materiais é de extrema importância

Observação: primeira página do artigo

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM PEÇAS IMPRESSAS: UMA REVISÃO

Rute Borges Miranda dos Santos, rute.borges@live.com
Rodrigo Souza Pimenta, souzapimentarodrigo@gmail.com
Maksym Ziberov, mziberov@unb.br

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, A sa Norte, CEP 70910-900, Brasília-DF.

Resumo: A manufatura aditiva baseia-se na fabricação de peças através de camadas depositadas sucessivamente. Ao utilizar a manufatura aditiva para fabricação de peças e componentes, tem-se a otimização de etapas, economia de materiais, baixo custo de fabricação, baixo impacto ambiental e a possibilidade de construir objetos complexos. Os metais, as cerâmicas e os polímeros são exemplos de matérias primas que podem ser utilizadas na fabricação de peças por manufatura aditiva. Para alcançar produtos finais com a qualidade necessária para sua aplicação, os parâmetros utilizados no processo e as propriedades dos materiais utilizados tornam-se essenciais. Devido a isso, após a fabricação, um dos principais ensaios que se deve submeter a peça final é o ensaio de tração, que nos retorna parâmetros máximos de tensão antes da ruptura, tensão limite de escoamento e a resistência à deformação. Tais propriedades são relevantes para determinar se a peça que foi fabricada é adequada para a aplicação desejada, ou se é necessário realizar algum tratamento térmico posteriormente para que ela atinja as propriedades necessárias. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão dos estudos encontrados na literatura acerca das propriedades mecânicas de peças fabricadas por manufatura aditiva posteriormente submetidas ao ensaio de tração e por fim, analisar o melhor método de deposição utilizado que apresenta resultados mais satisfatórios nos ensaios de tração. Os métodos de deposição analisados foram baseados no método de fabricação WAAM que compreende os métodos de deposição GMAW, CMT e suas variações, GTAW, PAW e processos híbridos. Através da análise da literatura, foi possível relacionar os materiais utilizados e seus respectivos métodos de deposição com os resultados dos ensaios de tração. Portanto, foram identificadas as vantagens e limitações em cada método de deposição após as peças passarem pelo ensaio de tração.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, WAAM, CMT, Ensaio de Tração.

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) conhecida na nomenclatura em inglês como *Additive Manufacturing* (AM) permite a fabricação de peças inicialmente modeladas tridimensionalmente (3D), que passam por sucessivas impressões ao serem depositadas camada sobre camada de determinado material. O processo permite que geometrias complexas sejam fabricadas em uma única etapa sem as limitações que a fabricação convencional propicia. Além disso, o tempo e custo para fabricação apresentam-se reduzidos neste tipo de processo, desencadeando uma melhora em etapas posteriores como o abastecimento, armazenamento e distribuição da peça final. Diferentes tipos de materiais podem ser utilizados na fabricação, são eles: os polímeros, as cerâmicas e os metais, atualmente o metal é o grupo mais utilizado em setores industriais odontológicos, de construção e aeroespacial. A utilização desse material no processo impacta de forma positiva o meio ambiente e produz peças com boa qualidade (Vafadar *et al.*, 2021).

Os metais são aplicáveis em diversos campos da engenharia e sua crescente utilização se dá com base nos estudos sobre suas propriedades e comportamento sob diversas condições. As propriedades mecânicas do metal que são mais relevantes para estudos de engenharia se relacionam a resistência do material ao ser submetido a esforços. Expor o corpo de prova metálico à esforços de tração, permite que seja obtida a curva de tensão-deformação que fornece dados relevantes para que sejam determinadas suas características. Através do ensaio de tração, é possível obter a máxima tensão que o material suporta sem se deformar permanentemente, o quanto o material resiste à deformação e determina também quanto da tensão deixa de ser proporcional à deformação conforme o esforço aplicado (Chiaverini, 1986). A Fig. 1 demonstra as aplicações que a MA de metais possui em diversas áreas.

Assim, o trabalho tem como objetivo apresentar os métodos de deposição utilizados na manufatura aditiva de metais, como é o caso dos processos GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), CMT (*Cold Metal Transfer*), GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), PAW (*Plasma Arc Welding*) e processo híbrido. Além disso, destacar os pontos positivos e negativos encontrados das propriedades mecânicas das peças fabricadas pelos métodos descritos que foram submetidas a ensaios de tração.

Observação: primeira página do artigo

B Código da máquina CNC

O2003

O2003

N10 G17 G21 G90 G94

N20 Z5 X0 Y-10 38

N30 S2850 M3

N40 G1 F570

N50 Z-3

N60 X0 Y-10

N70 X0 Y100

N80 X8 Y100

N90 X8 Y-10

N100 X16 Y-10

N110 X16 Y100

N120 X24 Y100

N130 X24 Y-10

N140 X32 Y-10

N150 X32 Y100

N160 X40 Y100

N170 X40 Y-10

N180 X48 Y-10

N190 X48 Y100

N200 X56 Y100

N210 X56 Y-10

N220 X64 Y-10

N230 X64 Y100
N240 X72 Y100
N250 X72 Y-10
N260 X80 Y-10
N270 X80 Y100
N280 X88 Y100
N290 X88 Y-10
N300 X96 Y-10
N310 X96 Y100
N320 X104 Y100
N330 X104 Y-10
N340 X112 Y-10
N350 X112 Y100
N360 X120 Y100
N370 X120 Y-10
N380 X126 Y-10
N390 X126 Y100
N400 X126 Y23
N460 X160 Y23
N471 X160 Y30
N470 X126 Y30
N480 X126 Y38
N490 X160 Y38
N500 X160 Y46
N510 X126 Y46
N520 X126 Y54
N530 X160 Y54
N540 X160 Y62
N553 X-30 Y62
N560 X-30 Y54
N570 X5 Y54

N580 X5 Y46

N590 X-30 Y46

N600 X-30 Y38

N610 X5 Y38

N620 X5 Y30

N630 X-30 Y30

N640 X-30 Y23

N650 X5 Y23

N660 Z5

N2000 G1 F 1500

N2010 Z20

N2020 X0 Y-10

N2030 N9 M30

%

C Resultado das medições das 5 paredes depositadas

		Parede 1	Parede 2	Parede 3	Parede 4	Parede 5
Distância da origem [mm]	Ponto	Média [mm]	Média [mm]	Média [mm]	Média [mm]	Média [mm]
0	A	9,28	9,22	9,61	9,56	9,48
15	B	7,99	6,99	8,03	7,35	8,74
30	C	6,65	6,44	6,69	7,00	6,94
45	D	6,69	6,56	6,76	6,88	6,77
60	E	6,61	6,21	6,90	6,53	6,44
75	F	6,66	6,30	6,51	6,49	6,91
90	G	6,86	6,26	6,82	7,10	6,62
105	H	6,49	6,23	6,58	6,83	6,79
120	I	6,69	6,65	7,18	6,67	6,98
135	J	6,67	6,34	6,67	7,27	6,73
150	K	6,72	6,04	6,68	6,95	7,32
165	L	8,79	7,93	8,57	9,45	9,15
180	M	9,93	8,37	9,86	10,03	9,91
Largura Média [mm]	-	7,39	6,89	7,45	7,55	7,60
Desvio padrão [mm]	-	0,309	0,585	0,360	0,288	0,387

Tabela 11 – Largura local e média para cada parede.

		Parede 1	Parede 2	Parede 3	Parede 4	Parede 5
Distância da origem [mm]	Ponto	Média [mm]	Média [mm]	Média [mm]	Média [mm]	Média [mm]
0	A	86,48	59,60	86,78	85,79	85,73
15	B	87,50	59,30	87,30	86,60	87,03
30	C	87,39	58,92	87,21	86,01	86,91
45	D	87,76	59,69	87,75	86,98	87,87
60	E	88,12	60,28	88,47	87,07	87,88
75	F	88,47	60,61	88,87	87,65	88,62
90	G	88,96	60,33	89,21	87,70	88,19
105	H	88,66	60,16	89,28	87,76	88,37
120	I	88,65	60,18	88,94	86,62	87,46
135	J	87,95	59,62	88,35	86,13	86,86
150	K	87,41	58,42	87,54	85,40	85,81
165	L	87,95	59,17	88,10	85,34	85,92
180	M	87,82	59,01	88,04	85,16	85,55
Altura Média [mm]	-	87,93	59,64	88,14	86,48	87,09
Desvio padrão [mm]	-	0,444	0,531	0,414	0,375	0,525

Tabela 12 – Altura local e média para cada parede.

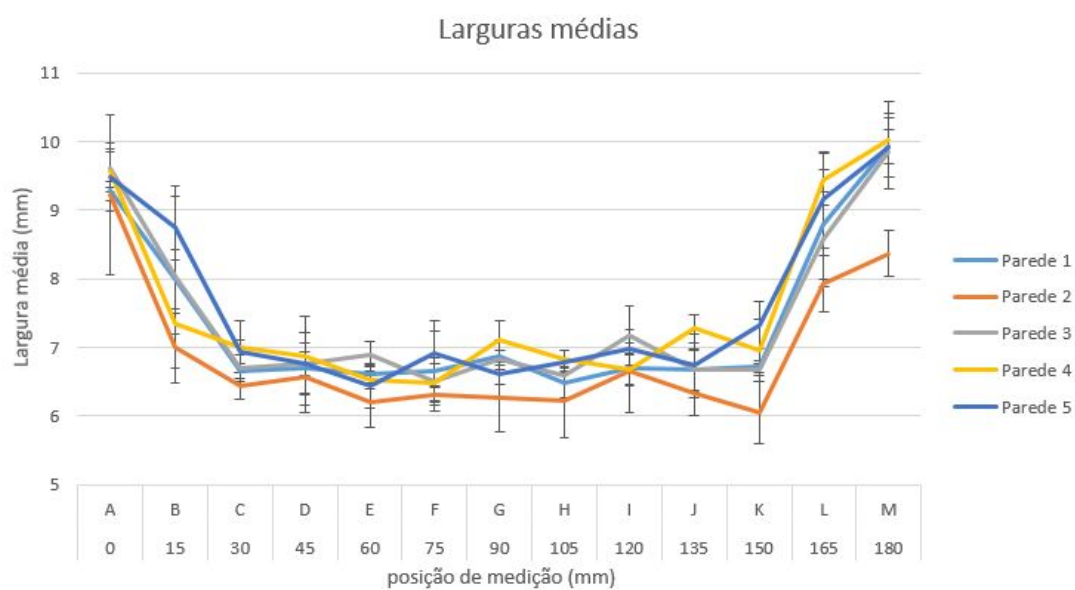


Figura 89 – Largura por seção das paredes depositadas

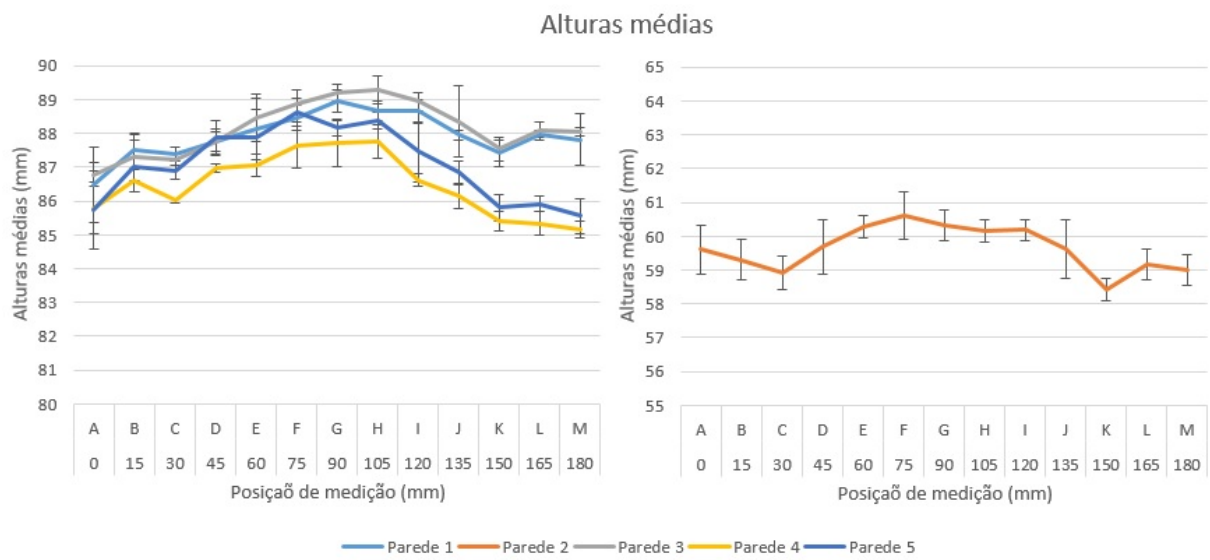


Figura 90 – Altura por seção das paredes depositadas

D Imagens complementares da análise de região de fratura

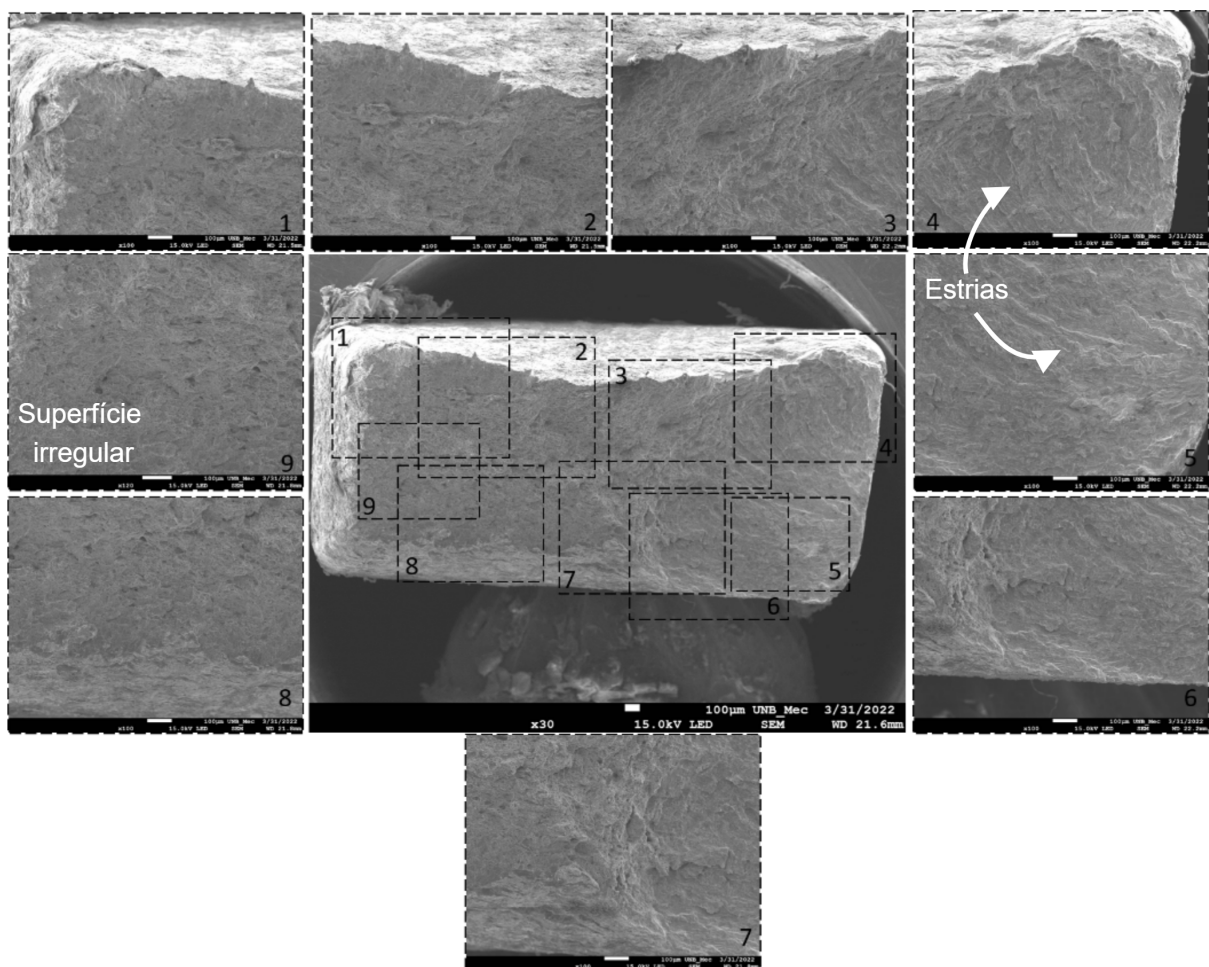


Figura 91 – Imagens da seção complementar de ruptura do CP 3 obtidas através do MEV.

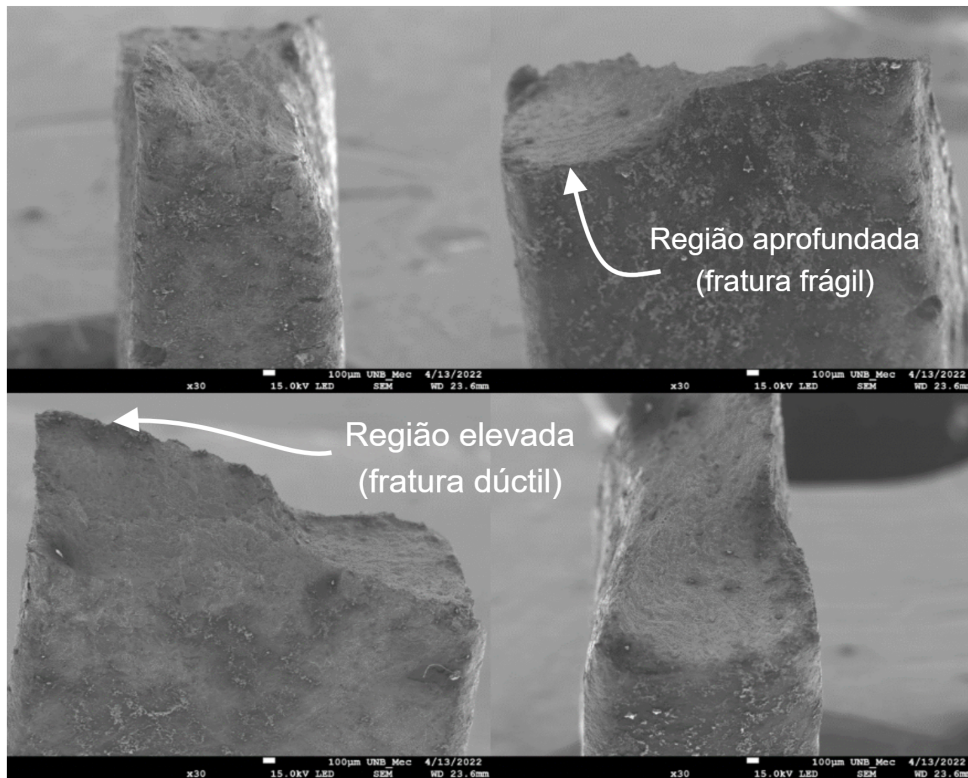


Figura 92 – Imagens do perfil complementar de ruptura do CP 3 obtidas através do MEV.

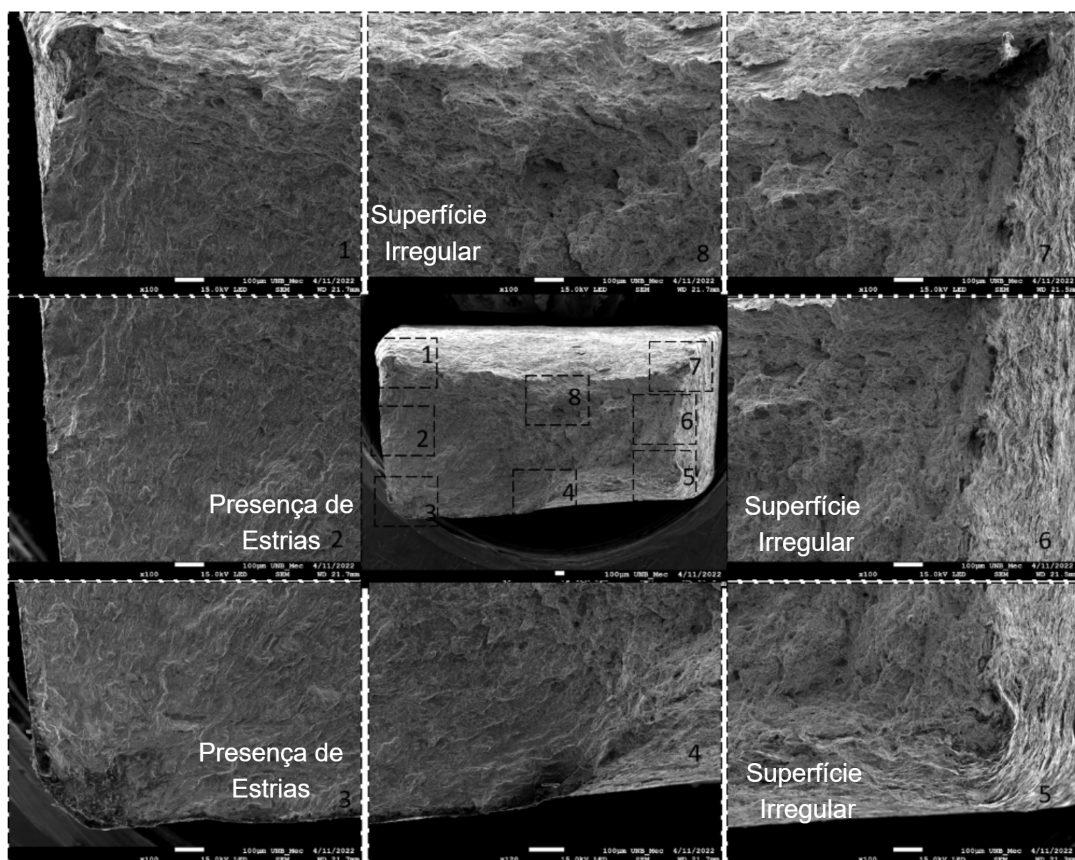


Figura 93 – Imagens da seção complementar de ruptura do CP 5 obtidas através do MEV.

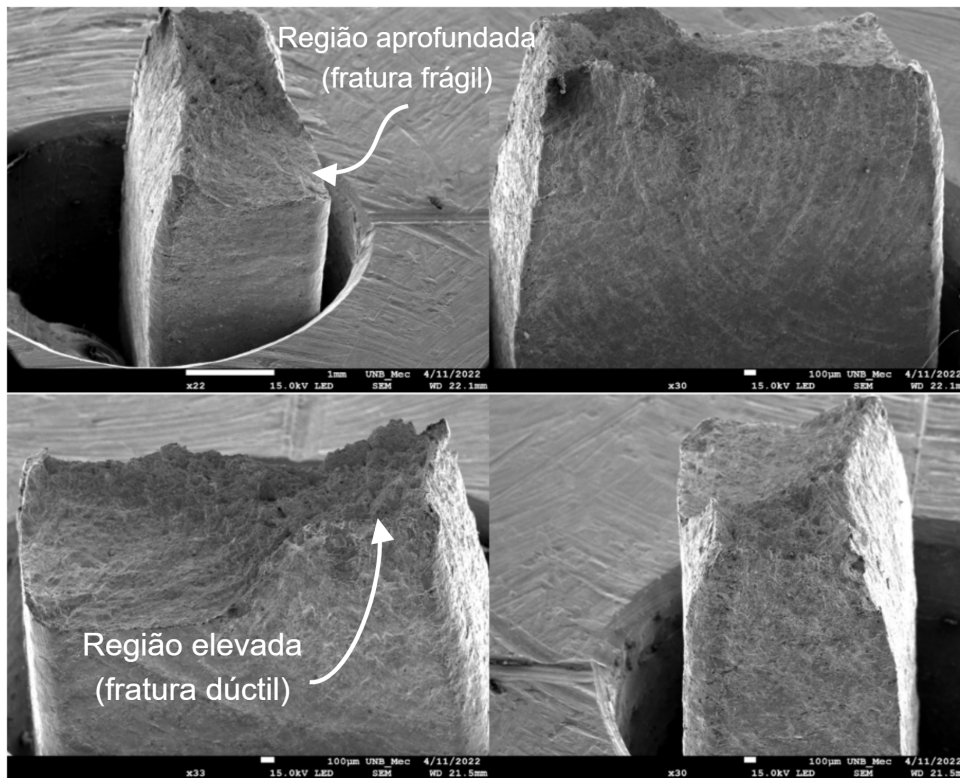


Figura 94 – Imagens do perfil complementar de ruptura do CP 5 obtidas através do MEV.

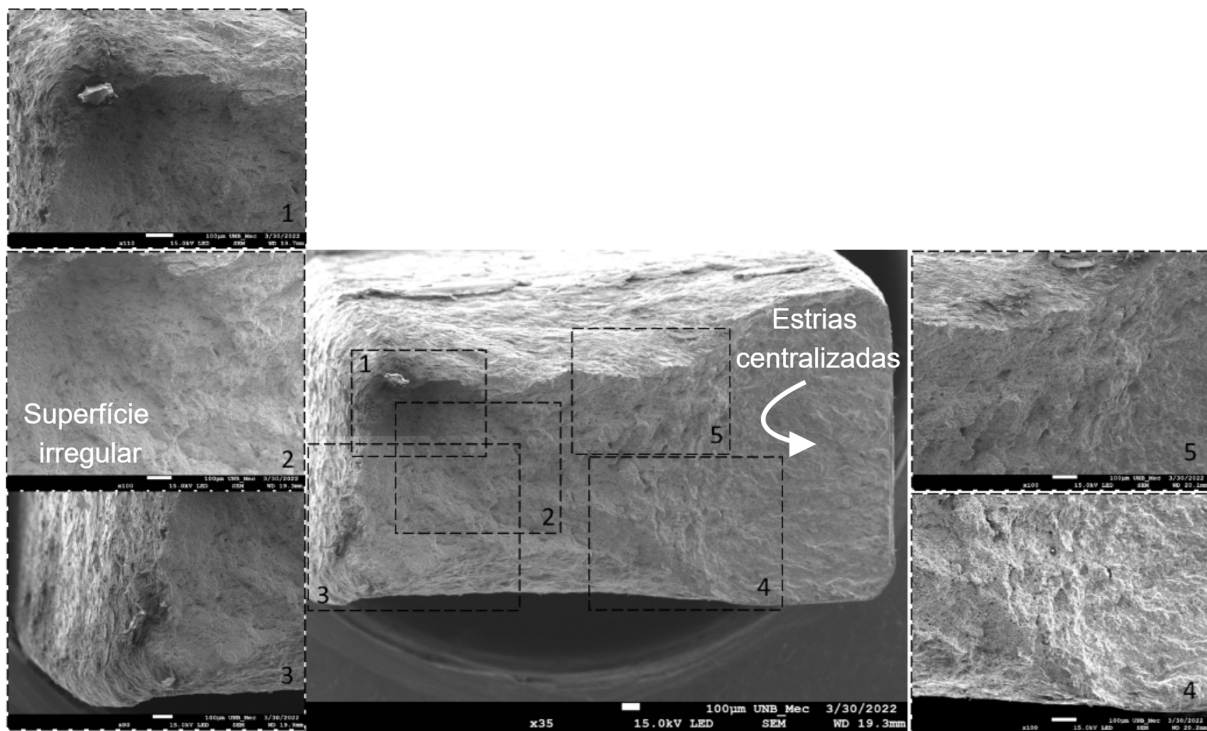


Figura 95 – Imagens da seção complementar de ruptura do CP 6 obtidas através do MEV.

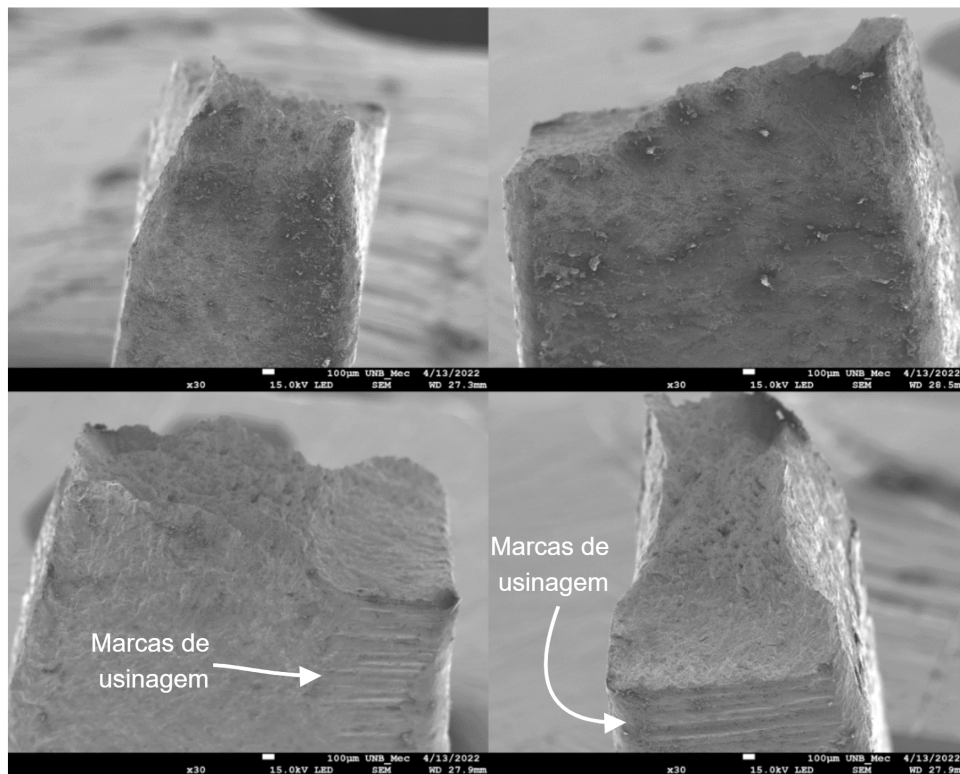


Figura 96 – Imagens do perfil complementar de ruptura do CP 6 obtidas através do MEV.

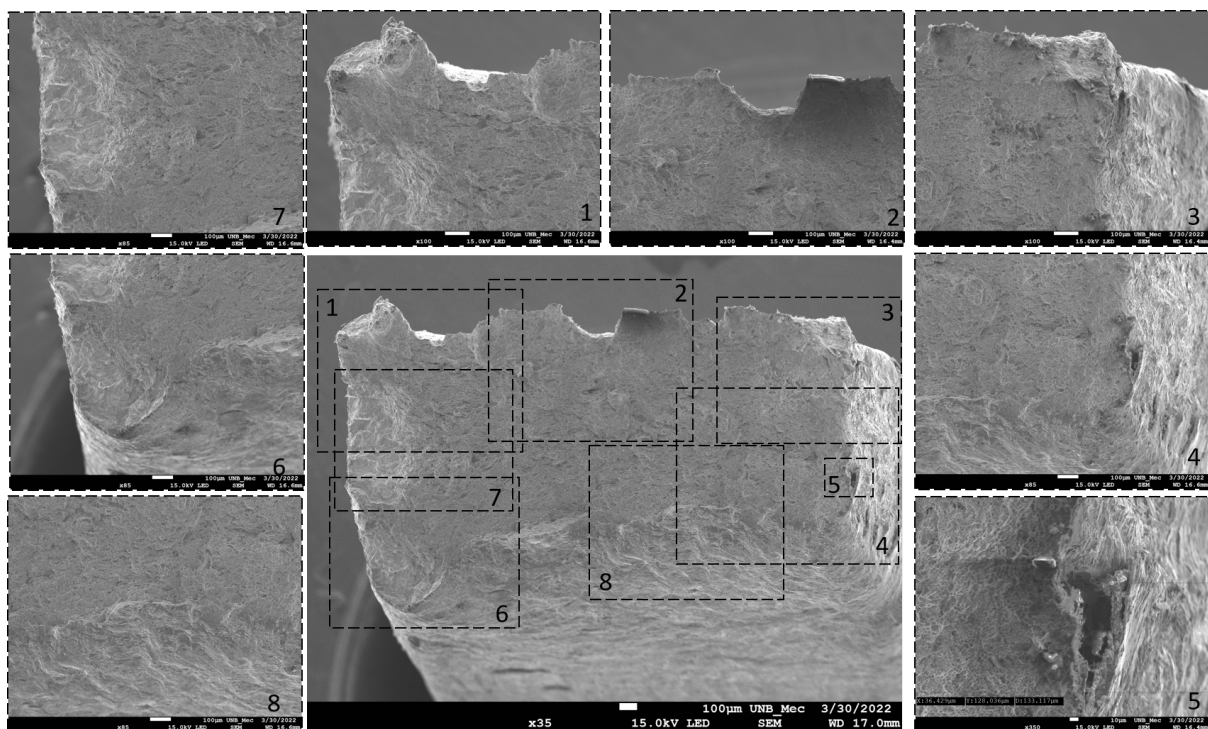


Figura 97 – Imagens da seção complementar de ruptura do CP 1 obtidas através do MEV.

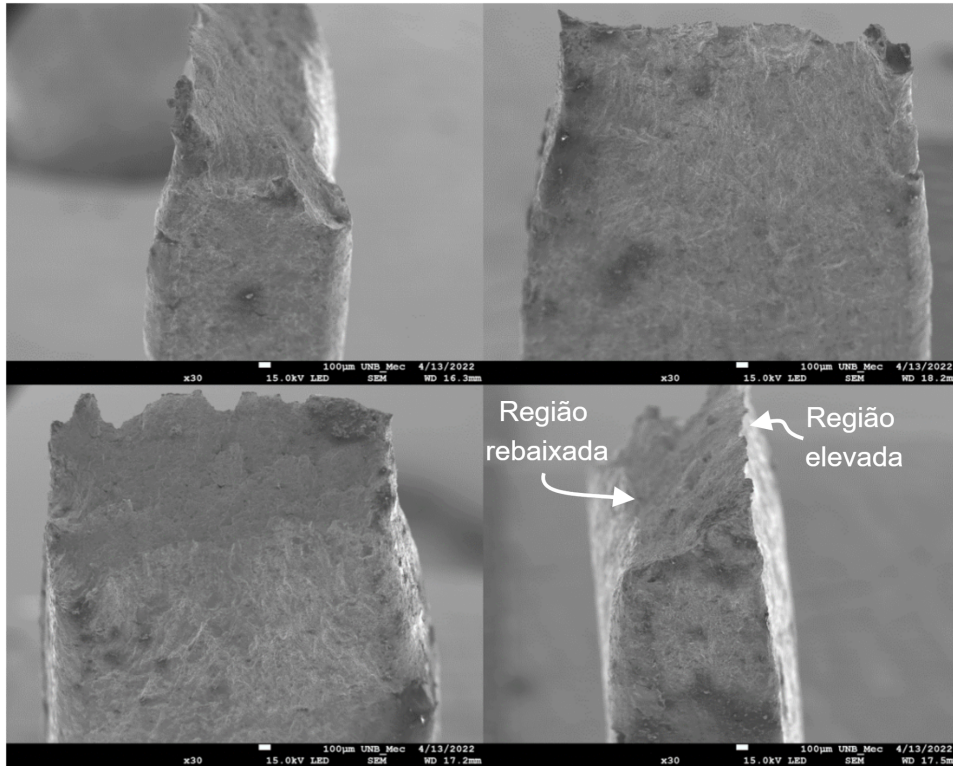


Figura 98 – Imagens do perfil complementar de ruptura do CP 1 obtidas através do MEV.

Anexos

A Especificações do arame

ER70S-6



BÖHLER SG 2

Solid Wire, mild steel

Classifications				
EN ISO 14341-A		AWS A5.18 / SFA-5.18		
G 42 3 M21 3Si1		ER70S-6		
G 38 3 C1 3Si1				
Characteristics and typical fields of application				
GMAW solid wire for welding unalloyed and low alloy steels. Low spatter in short and spray arc transfer modes with CO ₂ or gas mixture. The wire is used in boiler, pipeline and structural constructions, shipbuilding and vehicle manufacturing.				
Base materials				
Steels with yield strength < 420 MPa (60 ksi) S235JR-S355JR, S235J0-S355J0, S235J2-S355J2, S275N-S420N, S275M-S420M, P235GH-P355GH, P275NL1-P355NL1, P215NL, P265NL, P355N, P285NH-P420NH, P195TR1-P265TR1, P195TR2-P265TR2, P195GH-P265GH, L245NB-L415NB, L245MB-L415MB, GE200-GE240, ship building steels: A, B, D, E, A 32-E 36 ASTM A 106 Gr. A, B, C; A 181 Gr. 60, 70; A 283 Gr. A, C; A 285 Gr. A, B, C; A 350 Gr. LF1; A 414 Gr. A, B, C, D, E, F, G; A 501 Gr. B; A 513 Gr. 1018; A 516 Gr. 55, 60, 65, 70; A 573 Gr. 58, 65, 70; A 588 Gr. A, B; A 633 Gr. C; A 662 Gr. B; A 711 Gr. 1013; A 841 Gr. A; API 5 L Gr. B, X42, X52, X56, X60				
Typical analysis				
	C	Si	Mn	
wt.-%	0.07	0.85	1.5	
Mechanical properties of all-weld metal - typical values (min. values)				
Condition	Yield strength R _e	Tensile strength R _m	Elongation A (L ₀ =5d ₀)	Impact energy ISO-V KV J
	MPa	MPa	%	-30°C
u	450 (≥ 420)	575 (≥ 500 - 640)	30 (≥ 20)	≥ 27
u2	430 (≥ 420)	555 (≥ 500 - 640)	29 (≥ 20)	≥ 27
u untreated, as welded – shielding gas Ar + 15 – 25% CO ₂ u2 untreated, as welded – shielding gas 100% CO ₂				
Operating data				
	Polarity	DC+	Dimension mm	
	Shielding gas (EN ISO 14175)	M21	0.8	
		C1	0.9	
			1.0	
			1.2	
		1.6		
Approvals				
TÜV (13009), DB (42.236.01), ABS, CWB, CE				

B Especificações da ferramenta de corte



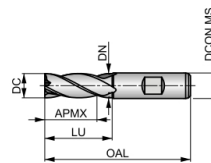
C247



Multi-Flute HSS-E-PM End Mill, Bright Finish

Short cut length, 4, 5, 6 or 8 flute design provides high rigidity for general profile and ramp milling applications in mild steels and non-ferrous materials.

HSS-E PM	N	4-8
	λ 30°	γ 12°
	Bright	DC k10
	DIN 844K	



Workpiece material group suitability, starting values for cutting speed (m/min) and Alpha Code. Tables with feed per tooth and correction factors can be found starting from page 194.

P1.1	P1.2	P1.3	P2.1	P2.2	P3.1	P3.2	P4.1	M1.1	M1.2	M2.1	M2.2	K1.1	K1.2
■ 53 D	■ 59 D	■ 61 D	■ 45 D	■ 40 D	■ 36 D	■ 29 C	■ 22 C	■ 34 D	■ 29 D	■ 31 D	■ 25 C	■ 30 D	■ 22 D
■ 17 D	■ 55 D	■ 45 D	■ 36 C	■ 49 D	■ 37 D	■ 30 B	■ 45 C	■ 34 C	■ 25 C	■ 22 B	■ 18 B	■ 51 C	■ 39 C
■ 30 C	■ 95 F	■ 71 E	■ 48 E	■ 48 D	■ 43 D	■ 31 D	■ 50 D	■ 29 D	■ 15 D	■ 50 D	■ 30 C	■ 25 C	■ 20 B
S3.1	S4.1												
■ 15 B	■ 12 B												

DCON MS tolerance h6.

Product	DC	DC	DCON MS	APMX	OAL	NOF	LU	DN
	[inch]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]
C2472.0	—	2.00	6.00	7.00	51.0	4	—	—
C2472.5	—	2.50	6.00	8.00	52.0	4	—	—
C2473.0	—	3.00	6.00	8.00	52.0	4	—	—
C2471/8 ³	1/8	3.18	6.00	10.00	54.0	4	—	—
C2473.5	—	3.50	6.00	10.00	54.0	4	—	—
C2474.0	—	4.00	6.00	11.00	55.0	4	—	—
C2474.5	—	4.50	6.00	11.00	55.0	4	—	—
C2473/16 ²	3/16	4.76	6.00	13.00	57.0	4	—	—
C2475.0	—	5.00	6.00	13.00	57.0	4	—	—
C2475.5	—	5.50	6.00	13.00	57.0	4	—	—
C2476.0	—	6.00	6.00	13.00	57.0	4	—	—
C2471/4 ³	1/4	6.35	10.00	16.00	66.0	4	—	—
C2476.5	—	6.50	10.00	16.00	66.0	4	—	—
C2477.0	—	7.00	10.00	16.00	66.0	4	—	—
C2477.5	—	7.50	10.00	16.00	66.0	4	—	—
C2475/16 ²	5/16	7.94	10.00	19.00	69.0	4	—	—
C2478.0	—	8.00	10.00	19.00	69.0	4	—	—
C2478.5	—	8.50	10.00	19.00	69.0	4	—	—
C2479.0	—	9.00	10.00	19.00	69.0	4	—	—
C2479.5	—	9.50	10.00	19.00	69.0	4	—	—
C2473/8 ³	3/8	9.52	10.00	22.00	72.0	4	31.50	9.50
C24710.0	—	10.00	10.00	22.00	72.0	4	31.50	9.50
C24711.0	—	11.00	12.00	22.00	79.0	4	—	—
C24712.0	—	12.00	12.00	26.00	83.0	4	37.50	11.50
C2471/2 ³	1/2	12.70	12.00	26.00	83.0	4	37.50	11.50

C Especificações do fluido de corte



BIO 100 E

ÓLEO SOLÚVEL SINTÉTICO BIODEGRADÁVEL PARA CORTE DE METAIS

APRESENTAÇÃO: Óleo solúvel sintético para usinagem. Em solução aquosa continua transparente esverdeado. Possui excepcional durabilidade, excelente poder lubrificante, refrigerante e anticorrosivo. Não provoca manchas em metais amarelo, alumínio e aço inox. Não causa dermatites quando usado adequadamente. Produto biodegradável, facilitando assim sua manipulação, diminuindo os riscos de uso e descarte.

APLICAÇÃO: Na maioria das operações de usinagens de metais ferrosos e não ferrosos, tais como: rosquear, mandrilhar, afiar, aplainar, brunir, escarear, serrar, furar, etc. Utilizado em máquinas operatrizes, inclusive retificas e CNC.

CARACTERÍSTICAS E VANTAGENS

-Produto Sintético: Oferece maior segurança a saúde e meio ambiente, por ser isento de Nitrito, fenóis, óleo minerais, metais pesados, cloro, enxofre, amins secundárias, etc. Atende norma NR 15;

-Excelente resistência à ação microbiana e poder anticorrosivo

-Baixa formação de espuma

MODO DE USAR: Deve-se esgotar e limpar o tanque reservatório do sistema. Higienizar com PRESERV X 49, para em seguida diluir o BIO 100 E em água, numa proporção de 1:20 ou 5% (1 litro de óleo para 19 litros de água). Em usinagens mais severas, dilua na proporção de 1:10 ou 10% (1 litro de óleo para 9 litros de água).

TABELA DE CONCENTRAÇÃO

Concentração	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%
Leitura refratômetro	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,3	3,6	3,9	4,2	4,5

CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS:

Aspecto-visual	Amarelo Esverdeado
Densidade _{20/4 C} -NBR 7148	1,065g/cm ³
Fator de Refração-MT 29	3,33
PH (3% em Água)-MT 6	9,5
Corrosão ferro fundido GG 25,sol. 3%-DIN 51.3560/2	Sem corrosão

EMBALAGENS: 1 litro, 5 litros, 20 litros, 50 litros e 200 litros.

PRECAUÇÕES: Trabalhar com EPI's. Não ingerir. Evitar contato prolongado com a pele. Em contato com os olhos, lave com água em abundância por no mínimo 15 minutos. Mantenha fora do alcance de crianças e animais. Para maiores informações de segurança, solicite a FISPQ do produto.

VALIDADE: Acondicionado em lugar fresco e seco - 24 meses.

BIO 100 E

Revisão 07
Data: 13/07/2017

