



PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

ESTUDO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM PEÇAS IMPRESSAS ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA PROCESSO GMAW-CMT

Rute Borges Miranda dos Santos

Brasília-DF, 26 de Setembro 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

ESTUDO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM PEÇAS IMPRESSAS ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA PROCESSO GMAW-CMT

POR,

Rute Borges Miranda dos Santos

Projeto de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

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

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

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, ENM/FT-UnB (Examinador Interno)

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

BS237e Borges Miranda dos Santos, Rute
ESTUDO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM PEÇAS IMPRESSAS ATRAVÉS
DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA PROCESSO
GMAW-CMT / Rute Borges Miranda dos Santos; orientador
Maksym Ziberov. -- Brasília, 2022.
94 p.

Monografia (Graduação - engenharia mecânica) --
Universidade de Brasília, 2022.

1. CMT. 2. ER70S-6. 3. Ensaio de Tração. 4. Microdureza.
5. Fratura. I. Ziberov, Maksym, orient. II. Título.

Dedicatória

*Dedico este trabalho a minha família, a
Universidade de Brasília e todo corpo
docente.*

Rute Borges Miranda dos Santos

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela força que me deu para superar os tempos difíceis durante a graduação, aos meus pais por acreditarem no meu potencial. Agradeço também em especial ao meu orientador Prof. Dr. Maksym Ziberov pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho, e aos demais professores Profa. Dra. Déborah de Oliveira, ao Prof. Dr. Antonio Piratelli Filho, ao Prof. Dr. Lucival Malcher, ao Prof. Dr. Fábio Comes de Castro, ao Prof. Dr. Guilherme Caribé, aos técnicos de laboratório Ivan Banho de Andrade, Adriano e Rafael pelo suporte na realização deste projeto ao mestrando André Novelino, doutorando Ian Matos e aluna Catarina Claudino pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho.

Deixo registrado o meu agradecimento também a todos os professores do ENM e em especial aos professores que me deram a oportunidade de realizar projetos paralelos à graduação. Agradeço também ao programa de Assistência Estudantil que foi fundamental para me manter na Universidade.

Rute Borges Miranda dos Santos

Resumo

A manufatura aditiva vem se destacando nos processos industriais devido ao seu custo reduzido de fabricação, quando comparado com outros processos. Isso ocorre devido ao desperdício do material ser menor quando comparado aos processos de produção convencionais, além da possibilidade de criação de geometrias complexas. Além disso, a manufatura aditiva compõe um dos pilares da indústria 4.0 e surgiu a partir do avanço da tecnologia na área de soldagem com a utilização de robôs a fim de aumentar a produtividade e qualidade das peças. O processo consiste em realizar deposições de camadas sobrepostas de material para fabricação de diferentes peças, incluindo peças com geometrias complexas. Devido à ampla aplicabilidade da tecnologia, os setores automotivos, aeroespacial e biomédicos se apresentam como grandes investidores no processo. No presente estudo, peças fabricadas através de manufatura aditiva mais especificamente o processo *Wire Arc Additive Manufacturing* foram submetidas a processos como usinagem, lixamento, ensaio de dureza e rugosidade até chegar no ensaio de tração com objetivo de verificar as propriedades mecânicas do material. Sendo assim, esse estudo analisa o comportamento mecânico de corpos de prova fabricados com o arame ER70S-6, obtidos por meio da manufatura aditiva por deposição a arco. Para possibilitar essa análise, além da manufatura aditiva foram utilizados processos de fresamento e corte a jato d'água para que o corpo de prova pudesse ser extraído da parede depositada. Após, os corpos de prova passaram por lixamento para melhor acabamento de sua superfície e a rugosidade média em diferentes regiões foram medidas. Além de serem submetidos ao ensaio de microdureza *Vickers*, a fim de determinar a dureza em determinados pontos da cabeça do corpo de prova. Os resultados mostraram que os corpos de prova apresentaram variações de cerca de 8% na espessura e 3 % na largura após o corte a jato d'água. Além disso, os valores obtidos da microdureza em torno de 275 HV. Os resultados apontaram que o maior limite de resistência à tração alcançado foi de 473 MPa e os corpos de prova romperam-se com a tensão de ruptura aproximada de 345 MPa. Os corpos de prova passaram também pelo teste de excitação por impulso em o objetivo é de caracterizar de forma não-destrutiva os módulos elásticos e do amortecimento de materiais de acordo com a norma ASTM E1876, apresentando 160 GPa de módulo de Young flexional, cerca de 3 % maior quando comparado aos corpos de prova que passaram pelo tratamento térmico de recozimento e foram submetidos ao mesmo ensaio. Os resultados também mostraram que os corpos e prova apresentaram valores de resistência à tração 12% maior quando comparados aos corpos de prova que sofreram tratamento térmico, módulo de *Young* variando cerca de 3% e a ductilidade apresentou 34% de variação. Na região da fratura foi possível determinas as áreas de fratura frágil e fratura dúctil e observou-se que os corpos de prova analisados apresentaram regiões de fratura dúctil nas mesmas áreas.

Palavras-chave: CMT, ER70S-6, Ensaio de Tração, Microdureza, Fratura.

Abstract

Additive manufacturing has been standing out in industrial processes due to its reduced manufacturing cost, when compared to other processes. This is due to less material waste when compared to alternative production processes, in addition to the possibility of creating complex geometry. From this, an additive manufacturing composes a technology from the pillars. The process consists of performing positions of superimposed layers of materials to manufacture different parts, including parts with complex geometries. Due to the applicability of the technology, the automotive and biomedical sectors present themselves as major investors in the process. In the study, parts were produced through the manufacture of a plant more specifically the additive manufacturing process were manufactured processes such as manufacturing processes such as durability, testing and roughness to manufacturing processes, testing and manufacturing of materials. Therefore, this is the mechanical behavior of specimens manufactured with ER70S-6 wire, obtained through additive manufacturing by deposition. To enable this analysis, in addition to industrialization, milling and waterjet cutting processes were used so that the specimen could be extracted from the deposited wall. Afterwards, the bodies showed solutions for the best surface finish and the average roughness in measurement regions. In addition to the verification of the Vickers microhardness test, in order to determine the determination of the test points of the specimen. The results for which the specimens are intended vary 8% in thickness and % in width after the water cut. In addition, the values obtained for the microhardness are around 275 HV. points of resistance to which the biggest attraction was most of the results of 477 and the specimens that broke the rupture stress of 345 MPa. The characterization specimens are also tested according to the impulse in which the objective is destructive, the elastic modulus and the damping modulus of fence materials with a damping modulus of 160Pa Young, presenting 160Pa de Young 3% higher when compared to bodies of evidence that are treated by the recognition treatment and have been applied to the same assay. The similarity results also of resistance that the specimens and proof present values 12% higher compared to the demonstration bodies that present % of thermal resistance, Young attraction modulus varying about 34% of resistance ducts. In the region, it was possible to determine as fragile and ductile fracture areas in the observed- that the fracture bodies of the analysis area are similar ductile fracture regions.

Keywords: CMT, ER70S-6, Tensile Test, Microhardness, Fracture.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	Motivação	4
1.2	Justificativa	4
1.3	Objetivo	5
1.4	Nota da Autora	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Processo de Soldagem MIG/MAG	6
2.1.1	Transferência de Metal a Arco Pulsado	8
2.1.2	Cold Metal Transfer	9
2.2	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco	10
2.3	Vantagens e Limitações da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco	16
2.4	Propriedades Mecânicas dos Metais	21
2.4.1	Resistência ao Desgaste (Dureza)	22
2.4.2	Resistência à Tração (Limite de Escoamento)	24
2.4.3	Resistência a Compressão	25
2.4.4	Resistência a Fadiga	27
2.5	Resistência à Tração em Peças Impressas	29
3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	31
3.1	Metodologia	31
3.2	Equipamentos e Consumíveis	32
3.3	Método de Deposição	34
3.4	Método de Medição das Paredes	35
3.5	Usinagem	36
3.6	Fabricação dos Corpos de Prova	37
3.6.1	Extração dos Corpos de Prova	37
3.6.2	Método de Medição da Rugosidade	38
3.6.3	Método de Medição da Dureza	39
3.7	Ensaio de Tração	40
3.8	Técnica de Excitação por Impulso	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Análise da Deposição	41
4.2	Medição do Perfil da Peça	43
4.3	Etapas realizadas para obtenção do Corpo de Prova	44
4.3.1	Usinagem	44
4.3.2	Corte à Jato D'Água	46
4.3.3	Avaliação das Dimensões e Medições da Rugosidade	47
4.3.4	Microdureza Vickers	49
4.4	Técnica de Excitação por Impulso	50
4.5	Ensaio de Tração	51
4.6	Análise da Fratura	55
4.6.1	Corpo de Prova 1	56
4.6.2	Corpo de Prova 2	57
4.6.3	Corpo de Prova 4	58
4.6.4	Corpo de Prova 6	60
5	CONCLUSÕES	62

5.1 Proposta para Trabalhos Futuros	62
5.2 Análise das Referências Bibliográficas	62
REFERÊNCIAS.....	64
APÊNDICES	70
APÊNDICE A	71
Trabalhos Desenvolvidos	71
APÊNDICE B.....	72
Dados Obtidos no Ensaio de Dureza Vickers.....	72
APÊNDICE C	73
Imagens Complementares da Região da Fratura	73
APÊNDICE D	75
Resultados Obtidos no Sonelastic.....	75
APÊNDICE E.....	76
Desenho Técnico do Corpo de Prova	76
ANEXOS.....	77
ANEXO I	78
Especificações do Arame ER70S-6.....	78
ANEXO II.....	79
Especificações da Ferramenta de Corte.....	79

Lista de Figuras

Figura 1 Patente obtida por Auguste de Méritens em 1892 (AWS, 2021).....	2
Figura 2 História da Manufatura Aditiva ao longo dos anos (Rault et al, 2020)	3
Figura 3 Soldagem por fricção realizada por ferramenta robótica (Adaptado, NASA, 2021)	4
Figura 4 Componentes fabricados com WAAM: a) ponte (Buchanan et al., 2019), b) acabamento (Hirtler, et al., 2018) e c) braço robótico (Greer, et al., 2019)	5
Figura 5 Representação de como ocorre o processo GMAW (Jeffus, 2012, p.235)	6
Figura 6 Diferentes formatos de poça de fusão, (a) e (b) poça elíptica, (c) e (d) poça em gota (Ziberov, 2013).....	7
Figura 7 Representação do arco elétrico durante transferência por curto-circuito (esquerda), globular (centro) e goticular (direita) (Scotti et al., 2008, p 144).	8
Figura 8 Etapas do processo GMAW pulsado (Jeffus, 2012, p.241)	8
Figura 9 Cordões obtidos por GMAW pulsado utilizando diferentes movimentos e técnicas (Kovalenko et al., 2013).....	9
Figura 10 Fases do processo CMT-GMAW (Uusitalo, 2006)	9
Figura 11 Juntas obtidas por processo CMT-GMAW (Selvamani, et al., 2020)	10
Figura 12 Etapas do processo de MA (Gibson, et al., 2010).....	11
Figura 13 a) Estrutura fabricada utilizando MA (AUTODESK, 2017), b) Monobloco (Bugatti, 2021) e c) Propulsor (RAMLAB, 2021)	12
Figura 14 a) Peça modelada em 3D e b) Pós-processamento da peça (MX3D, 2021).....	13
Figura 15 Utilização de mais de um arame durante deposição (Qi, et al., 2018).....	13
Figura 16 Diagrama radial dos principais defeitos encontrados no método WAAM (Wu, et al., 2018).....	13
Figura 17 (a) longarina fabricada por processo CMT pulso avançado e em (b) cone truncado em aço macio fabricado por processo CMT convencional (FRONIUS, 2015).	14
Figura 18 Processos feitos a partir da tecnologia WAAM: a) GMAW, b) GTAW e c) PAW (Ding, et al., 2015)	15
Figura 19 Microestrutura da parede fabricada por PAW, b) microestrutura obtida por GMAW, ambas constituídas por martensita e bainita (Artaza, et al., 2019).....	15
Figura 20 Paredes fabricadas a partir de processo GTAW utilizando WAAM (Antonello, 2020).....	16
Figura 21 Peça obtida ao modificar parâmetro elétricos e base obtida através da dissipação de calor (Silva, 2017)	17
Figura 22 Defeitos encontrados em cordões de solda fabricados por deposição a arco: a) Cordão não homogêneo e b) excesso de deposição Alberti, et al., (2014).....	18
Figura 23 Peças obtidas através de deposição CMT – WAAM. (FRONIUS,2015)	19
Figura 24 Comparação da distribuição de tensão longitudinal em seção transversal de amostra revestida a laser de camada única: (a) sem transformação de fase; (b) com transformação de fase; (c) com influência de tensões Fang, et al., (2015).	19
Figura 25 Placas fabricadas para estudo das distorções Lee, et al., (2019).....	20
Figura 26 Tensões residuais aplicadas ao longo das placas DB-1 e DB-5 Lee, et al., (2019)	21
Figura 27 Comparação de diferentes parâmetros para aumentar a precisão do contorno final com modo CMT-ADV (Gierth, et al., 2020).....	22
Figura 28 Penetradores para ensaio Brinell e Rockwell (Labteste, 2021)	23
Figura 29 a), b) e c) Curvas tensão-deformação. d), e) e f) dureza em diferentes zonas da seção transversal da solda. (Marenych, et al., 2018).....	24

Figura 30 Representação da resistência à tração das amostras verticais e horizontais (Gierth, et al., 2020),.....	25
Figura 31 Ensaio de compressão (Colditz et al, 2020).....	26
Figura 32 Nível de tensão de fluxo abaixo do nível da amostra (Colditz et al, 2020)	26
Figura 33 Montagem para ensaio de fadiga (Ermakova, et al., 2021).....	27
Figura 34 a) Equipamento para fabricação da peça e b) Peça fabricada por CMT Ermakova, et al., 2021).....	28
Figura 35 Deposição vertical com carga máxima de 10 kN (b) Deposição horizontal (c) Deposição vertical (d) Deposição Horizontal (Ermakova, et al., 2021)	28
Figura 36 Corpo de prova padrão para realização do ensaio de tração (Silva, et al., 2018)	29
Figura 37 a) Alongamento obtido para cada processo em cada direção em função do arco e (b) Diagrama tensão-deformação para direção horizontal da amostra de CMT-ADV (Gierth, et al., 2020).....	30
Figura 38 Fluxograma	32
Figura 39 Robô cartesiano MAXR-23-S42-H42-C42 (Schneider Electric, 2009).....	32
Figura 40 Fonte TransPuls Synergic 5000 CMT (Adaptado de Fronius, 2013)	33
Figura 41 Máquina de ensaio universal MTS 810 (Nascimento, 2013).....	34
Figura 42 Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL, 2012).....	34
Figura 43 Esquematização da montagem para realizar deposições.....	35
Figura 44 Ilustração da deposição com arco contínuo utilizando tocha a 90°.....	35
Figura 45 Representação dos pontos medidos.....	36
Figura 46 Esquematização do processo de usinagem.....	36
Figura 47 Geometria e dimensões dos corpos de prova (ASTM, 2013)	37
Figura 48 Quantidade de corpos de prova a serem retirados em ambas as paredes	38
Figura 49 Etapas do processo	38
Figura 50 Corpos de prova selecionados	39
Figura 51 Regiões com rugosidade medida.....	39
Figura 52 Pontos de medição da dureza	40
Figura 53 Dimensões e características da parede	41
Figura 54 Oxidação e respingos das paredes.....	42
Figura 55 Vista superior e rechupe de cratera na parede 1	42
Figura 56 Pontos de medições de altura e largura da Parede	43
Figura 57 Perfil das paredes utilizando medições da altura	43
Figura 58 Perfil das paredes utilizando medições da largura	44
Figura 59 Peça usinada com torno.....	45
Figura 60 Temperatura no momento da usinagem	45
Figura 61 Etapas do processo de usinagem.....	46
Figura 62 Parede após corte à jato d'água	47
Figura 63 Peça após lixamento de superfície	47
Figura 64 Corpos de prova selecionados para teste de rugosidade	48
Figura 65 Dados obtidos com ensaio de microdureza Vickers	50
Figura 66 Dados obtidos a partir do teste sonelastic a) sem tratamento térmico b) com tratamento térmico (Rebouças (2022)	51
Figura 67 a) Corpos de prova com demarcação antes do ensaio, b) corpo de prova sendo submetido ao ensaio de tração.....	51
Figura 68 Gráfico tensão - deformação CPs horizontais.....	52
Figura 69 Gráfico tensão - deformação CPs verticais	53
Figura 70 Gráfico tensão - deformação CPs horizontais e verticais	54
Figura 71 Corpos de prova após o ensaio de tração	55
Figura 72 Análise do CP 1 através do MEV	56

Figura 73	Perfil da seção fraturada CP 1	57
Figura 74	Análise do CP 2 através do MEV	58
Figura 75	Perfil da seção fraturada CP 2.....	58
Figura 76	Análise do CP 4 através do MEV	59
Figura 77	Perfil da seção fraturada CP 4.....	60
Figura 78	Análise do CP 6 através do MEV	60
Figura 79	Perfil da seção fraturada CP 6.....	61
Figura 80	Fontes bibliográficas	63

Lista de Tabelas

Tabela 1 Propriedades do arame ER70S-6 (BOEHLER, 2022)	33
Tabela 2 Dimensões para os corpos de prova horizontais e verticais.....	37
Tabela 3 Valores medidos da parede 2	43
Tabela 4 Dados de espessura e largura dos CPs antes do ensaio e após corte à jato d'água	48
.....	
Tabela 5 Dados obtidos com medição da rugosidade para cada região	48
Tabela 6 Valores obtidos com dureza Vickers	49
Tabela 7 Dados obtidos com teste sonelastic	50
Tabela 8 Dados obtidos através do ensaio de tração para CPs horizontais	52
Tabela 9 Dados obtidos através do ensaio de tração para CPs verticais	53
Tabela 10 Espessura dos CPs após ensaio de tração	55
Tabela 11 Fontes bibliográficas.....	63

Lista de Siglas e Símbolos

Siglas e Símbolos

µm	Micrômetro
°C	Graus Célsius
3D	3 Dimensões
A	Ampere
Ar	Argônio
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
Cu	Cobre
DDE	<i>Deposição Direta de Energia</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HB	Hardness Brinell
He	Hélio
HV	Hardness Vickers
Hz	Hertz
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kN	KiloNewton
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-Força
LRT	<i>Limite de Resistência a Tração</i>
MA	<i>Manufatura Aditiva</i>
MADA	<i>Manufatura aditiva por deposição a arco</i>
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas / Metal Active Gas</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
Ni	Níquel
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
rpm	Rotações por minuto
SLS	<i>Space Launch System</i>
TWI	<i>The Welding Institute</i>
UGPP	<i>Uma Gota Por Pulso</i>
V	Volt
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é o processo de união permanente de metais mais utilizado na indústria, pois, compõe a fabricação de estruturas simples, assim como, estruturas mais complexas como as encontradas nas indústrias químicas petrolífera e nuclear. A soldagem é considerada um processo de união, entretanto, atualmente variações do processo de soldagem são utilizados para a deposição de material sobre uma superfície, visando à recuperação de peças desgastadas ou para a formação de revestimentos. Ressalta-se que não apenas os metais são soldáveis, e que é possível se soldar sem fusão também. As propriedades mecânicas de juntas soldadas podem variar ao longo de seu comprimento, entretanto, em uma junta colada as propriedades mudam abruptamente. Além disso, no conceito de soldagem, inclui-se também as forças de ligação química da natureza que são similares as atuantes no interior dos materiais na região de ligação entre os materiais que se unem (Marques *et al*, 2005, p.18).

A união de peças de metal era feita a partir do forjamento de metais em alta temperatura, ao longo do tempo o processo não sofreu mudanças até ter sido feita a descoberta de novos metais e ligas, assim como, o tratamento térmico. No período da revolução industrial, houve um avanço técnico em diversos campos da soldagem e com isso, no início do século XIX, o físico Humphry Davy teve atrelado ao seu legado a descoberta do arco elétrico. Inicialmente, eram obtidas as uniões entre dois pedaços de carvão ligados a uma bateria, entretanto, a descoberta só foi validada em 1808 quando Humphry apresentou um experimento na Royal Society em Londres. Nessa apresentação, o pesquisador aproximou duas hastes de carbono conectadas a uma bateria, entretanto, o arco elétrico não foi utilizado por muito tempo devido aos equipamentos elétricos poucos desenvolvidos na época e pelo desconhecimento da soldagem a arco elétrico. A soldagem a arco elétrico teve início após 1880 quando Auguste de Méritens apresentou um método de soldagem de metais utilizando arco elétrico. Com isso, mostrou a possibilidade de aproveitar o calor produzido por um arco elétrico para soldar placas de chumbo. A invenção de Mériens foi posteriormente aprimorada por seus alunos portanto, no final do século XIX a soldagem a arco elétrico se popularizou e surgiu a descoberta do eletrodo revestido, assim como, a utilizadas de gases de proteção na soldagem (Yvinec, 2021). A figura 1 ilustra a patente obtida por Auguste de Méritens em 1892 demonstrando a união de duas placas de metal.

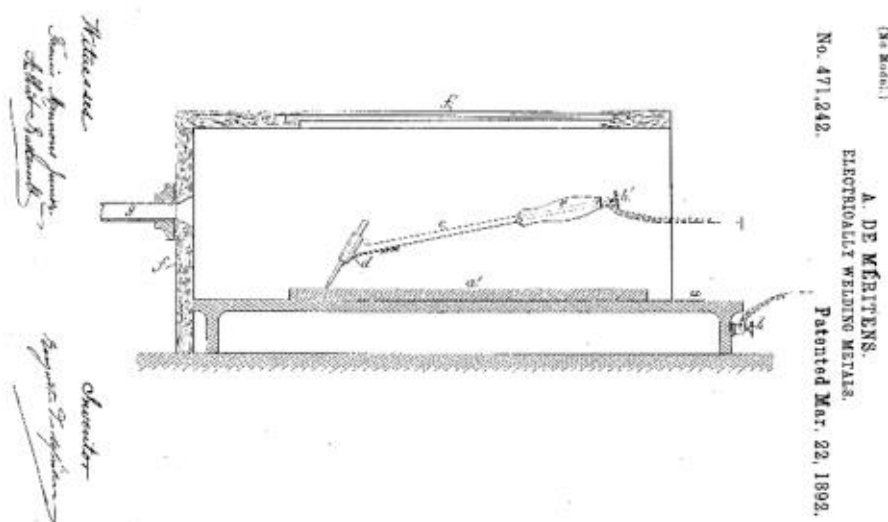


Figura 1 Patente obtida por Auguste de Méritens em 1892 (AWS, 2021)

Por volta de 1890 Blather desenvolveu um método de construção de moldes de mapas de relevo topográfico em três dimensões. Outros métodos de refinamento da construção por

camadas foram realizados nos anos seguintes por outros pesquisadores, mais tarde o método seria conhecido como Manufatura Aditiva (MA) (Volpato, 2017, p.20). O procedimento de deposição a arco teve início em 1925, quando Ralph Baker apresentou uma patente em que ele construiu uma parede para um recipiente depositando camadas de metal, ao controlar um arame, Rault, *et al.*, (2020). Ao longo do tempo com o avanço tecnológico, observa-se a utilização da manufatura aditiva em rotores de turbinas e vasos de pressão e em 1994, foi introduzido o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) na fabricação por MA. A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) ou WAAM (*Wire arc additive manufacturing*) é um processo pertencente à DDE (Deposição de Energia Dirigida), pois utiliza o arco elétrico como estratégia para fundir o metal sendo uma combinação de dois processos: GMAW e MA. Em comparação com o processo de MA convencional, o processo WAAM apresenta diversas vantagens, são elas: tamanho da fabricação (depende apenas do alcance do robô de soldagem), flexibilidade no design (permite a fabricação de formas complexas), custo-benefício quando comparado a fusão direta a laser ou manufatura aditiva por feixe de elétrons, disponibilidade de material (muitas ligas estão disponíveis na forma de arame, ampliando a gama de matérias e propriedades mecânicas a serem utilizadas), fabricação híbrida (combinações de diferentes métodos de produção) e baixa produção de resíduos (devido a precisão do local a ser depositado o material) RAMLAB, (2021). Na figura 2, é possível observar o histórico da trajetória da manufatura aditiva por deposição a arco e os respectivos criadores no período de 1925 a 2019.

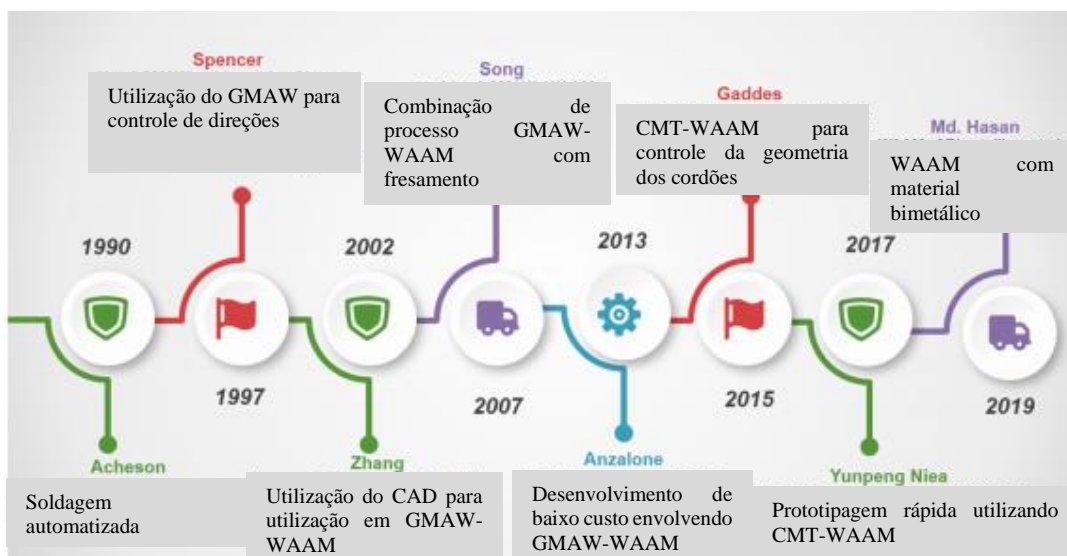


Figura 2 História da Manufatura Aditiva ao longo dos anos (Rault et al, 2020)

A indústria 4.0 surgiu com objetivo de representar um conjunto de avanços tecnológicos nas quais máquinas e produtos interagem sem a necessidade de intervenção humana. Além disso, busca otimizar decisões ao longo da cadeia de suprimentos, para isso, é necessário que a indústria 4.0 se baseie em pilares essenciais, que são eles: big data, simulação, manufatura aditiva, robôs autônomos, realidade aumentada, computação em nuvem, segurança cibernética, internet das coisas e integração de sistemas (Lauxen, 2021). Atualmente, a área está se revolucionando com a indústria 4.0, pois com a utilização de fontes inteligentes e uso de robótica a produtividade e qualidade dos procedimentos vêm aumentando (Mazzaferro, 2018).

A Figura 3 apresenta um exemplo de revolução na área de soldagem em que a inovadora soldagem por fricção é feita no adaptador de estágio do veículo de lançamento (LVSA) utilizado no foguete mais poderoso do mundo o SLS (Space Launch System) para a missão Artemis na qual foram soldados dois cones em uma estrutura, para a soldagem foram utilizadas ferramentas robóticas avançadas (NASA, 2021), conforme figura 3.

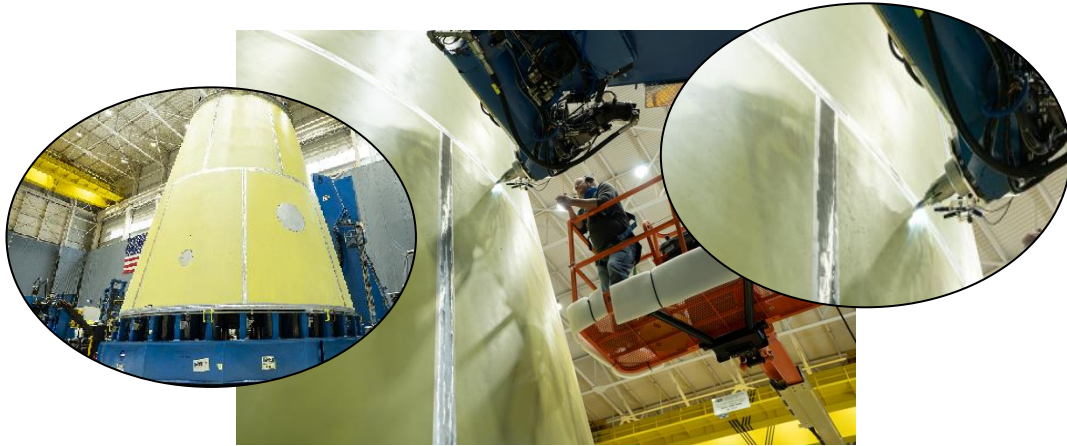


Figura 3 Soldagem por fricção realizada por ferramenta robótica (Adaptado, NASA, 2021)

É de suma importância realizar o estudo das propriedades mecânicas dos materiais fabricados por deposição, pois o estudo das propriedades mecânicas proporciona conhecimento sobre a composição do material, estruturas internas, e influência térmica, química ou mecânica. Estabelece as relações entre diferentes propriedades mecânicas. Além disso, proporciona na escolha de fatores de segurança adequados para o projeto, o que influencia no custo-benefício do projeto a ser realizado. É através do estudo das propriedades mecânicas que são definidas as composições ideais dos materiais para que sejam obtidas as propriedades físicas e mecânicas desejadas. Com isso, auxilia na correta seleção para diferentes usos Vignatti, *et al.*, (2017).

1.1 Motivação

É de suma importância realizar o estudo das propriedades mecânicas dos materiais fabricados por deposição, pois o estudo das propriedades mecânicas proporciona conhecimento sobre a composição do material, estruturas internas, e influência térmica, química ou mecânica. Estabelece as relações entre diferentes propriedades mecânicas. Além disso, proporciona na escolha de fatores de segurança adequados para o projeto, o que influencia no custo-benefício do projeto a ser realizado. É através do estudo das propriedades mecânicas que são definidas as composições ideais dos materiais para que sejam obtidas as propriedades físicas e mecânicas desejadas. Com isso, auxilia na correta seleção para diferentes usos Vignatti, *et al.*, (2017).

A manufatura aditiva, além de apresentar um histórico relevante, apresenta potencial para novas aplicações e inovações na área da indústria 4.0. É possível observar a variedade de aplicações em diversas áreas. Com isso, o crescimento de pesquisas da tecnologia no meio acadêmico mostra o potencial e o espaço que o assunto vem ganhando cada dia mais. Visto isso, a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, é a oportunidade de colaborar com o meio acadêmico fornecendo informações e dados para contribuição em trabalhos a serem realizados na área.

1.2 Justificativa

As propriedades mecânicas de um material são determinadas por meio de testes destrutivos de amostras sob determinadas condições de carregamento. A Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM) define normas para testar as amostras e procedimentos para serem seguidos durante o ensaio e o teste utilizado mais comumente é o ensaio de tração (NORTON, 2013, p. 31).

O procedimento de manufatura aditiva se revela como uma técnica econômica e promissora para os metais. O planejamento do processo é crucial para execução bem-sucedida e com isso, aplica-se no desenvolvimento de grandes estruturas.

Cita-se a primeira ponte construída por WAAM pela empresa MX3D revolucionando a indústria de construção, apresentada na letra (a) da figura 4. Além disso, a exploração de novas aplicações ao fabricar novas camadas a partir de um componente semiacabado também se apresenta com grande aplicabilidade para diferentes interesses em diferentes áreas, figura 4 (b). Além disso, se mostra promissora para diversas áreas com o desenvolvimento de braços robóticos para diversas aplicações em ligas de magnésio, figura 4 (c) (Rodrigues *et al.*, 2019).

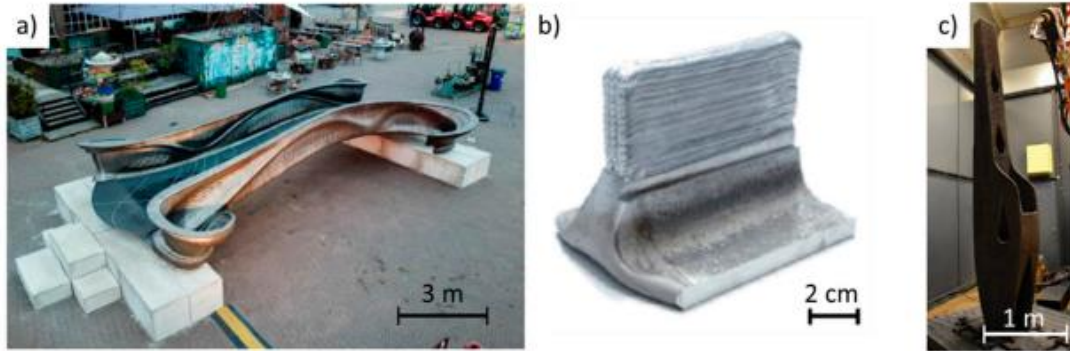


Figura 4 Componentes fabricados com WAAM: a) ponte (Buchanan et al., 2019), b) acabamento (Hirtler, et al., 2018) e c) braço robótico (Greer, et al., 2019)

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar a resistência mecânica de corpos de prova, fabricados pelo processo de manufatura aditiva WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), utilizando especificamente o processo CMT (*Cold Metal Transfer*). Para isso, foram realizados processos de acabamento nos corpos de prova e posteriormente ensaio de tração, para que a área fraturada pudesse ser verificada.

1.4 Nota da Autora

Durante o desenvolvimento do Projeto de Graduação, foi escrito 1 trabalho e apresentado no XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM (Apêndice A). Abaixo, encontra-se as informações do trabalho:

- **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 Processo de Soldagem MIG/MAG

Na década de 1920, iniciou-se a utilização dos processos de soldagem a arco de metal com arame de solda sem proteção gasosa. Em 1948 foi introduzido o arame de soldagem com proteção gasosa e as soldas feitas utilizando a nova técnica obtiveram resultados com qualidade muito superior. O primeiro processo utilizando gás de proteção foi usado para soldar alumínio utilizando gás argônio (Ar) para proteção, um gás de proteção inerte, e posteriormente foram introduzidos o CO_2 e O_2 . A *American Welding Society* iniciou a referência ao processo como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), entretanto, também é conhecido como MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) ou *wire welding* (Jeffus, 2012, p.235).

O processo de soldagem a arco com proteção gasosa, une peças através do aquecimento provocado por um arco elétrico entre um arame consumível, denominado arame de solda, e a peça. A medida com que o arame é fundido cria-se uma poça de fusão. Nessa poça de fusão, todo arame que se fundiu é depositado e durante todo o processo ele é protegido da atmosfera pelo fluxo de gás (ESAB, 2005), demonstrado na Figura 5. Geralmente esse processo ocorre de forma semiautomática, com a alimentação do arame sendo feita através de um alimentador motorizado e o soldador sendo responsável apenas por mover a tocha, iniciar e finalizar a soldagem. O processo MAG utiliza o CO_2 como principal componente de proteção e é utilizada apenas na soldagem de materiais ferrosos. Já o processo MIG é utilizado na soldagem de ferrosos e não ferrosos. Esse tipo de soldagem é bastante utilizado na indústria automobilística e ferroviária com o uso de robôs para fabricação e tem sido bastante utilizada na manutenção de equipamentos e na recuperação de peças, Marques, *et al.* (2005).

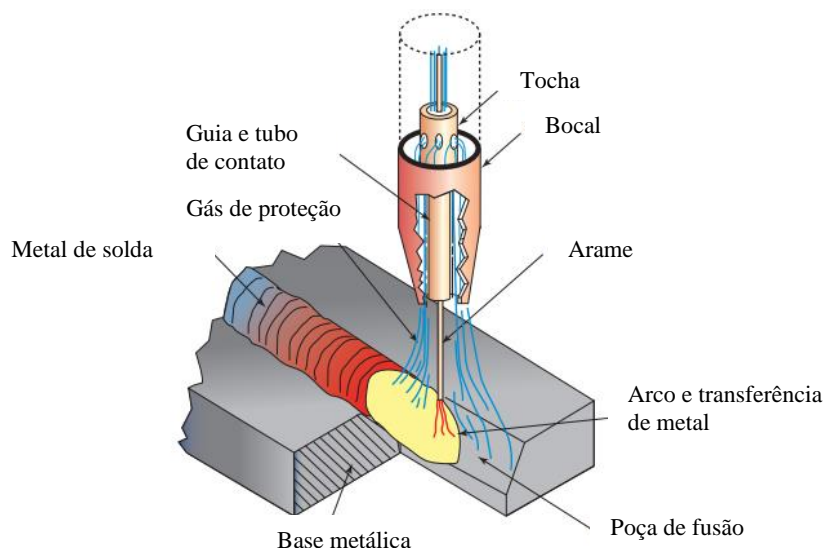


Figura 5 Representação de como ocorre o processo GMAW (Jeffus, 2012, p.235)

Diferentes tipos de poça de fusão podem ser obtidos com GMAW, conforme Figura 6. De acordo com Ziberov, (2013) a poça elíptica Figura 6 (a) e Figura 6 (b) resulta de baixas velocidades de deposição, portanto, há maior quantidade de grãos durante a solidificação. A poça em gota Figura 6 (c) e Figura 6 (d) é resultado de altas velocidades de deposição e com isso, apenas os grãos orientados inicialmente crescem durante a solidificação.

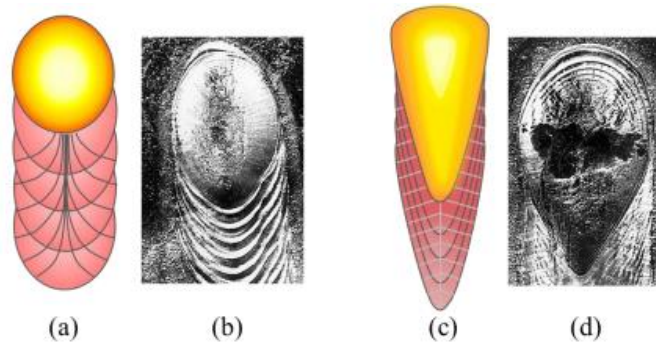


Figura 6 Diferentes formatos de poça de fusão, (a) e (b) poça elíptica, (c) e (d) poça em gota (Ziberov, 2013)

Durante o processo GMAW, os modos de transferência podem ser obtidos por: transferência por curto-circuito (GMAW-S), transferência goticular e transferência globular. A corrente em valor baixo permite a transferência por curto-circuito, pois ocorre por meio de forças de tensão superficial. Com isso, a corrente aumenta a medida com que o arame é depositado, a temperatura se eleva, gerando um vapor que estabelece um arco. É criada uma lacuna entre a ponta do arame e a poça de fusão, aumentando novamente a tensão conforme a corrente diminui, resultando na diminuição do arco. O ciclo é repetido e inicia-se um novo curto-circuito. No modo de transferência goticular é utilizada proteção de argônio puro ou misturas de CO_2 e O_2 ricas em argônio, as gotas produzidas são pequenas e projetadas axialmente em alta velocidade até a poça de fusão permitindo uma soldagem sem respingos. Durante a transferência globular o arco elétrico é responsável por fundir o arame, formando assim, uma gota de metal fundida. Com o aumento da gota, a força gravitacional é responsável pela sua deposição na poça. Para alternar os modos de transferência, deve-se alterar as configurações de tensão e corrente não sendo necessário alterar o tipo de arame, em alguns casos torna-se necessário alterar o gás de proteção Jeffus, (2012, p.235 a 240). O funcionamento do modo de transferência globular é demonstrado no tópico 2.1.1.

Na transferência goticular, mostrada na Figura 7 (direita), o arco passa a envolver completamente a gota ou, pelo menos, mais que a sua metade, enquanto, nos modos da transferência por curto-circuito Figura 7 (esquerda) e globular Figura 7 (centro), o arco é confinado à parte inferior da gota. Tais diferenças ocorrem devido a força de reação pela vaporização dos componentes do metal do arame na região do acoplamento do arco com a gota. Caso o acoplamento do arco se dê somente na calota inferior da gota, como é no caso da transferência por curto-circuito, esses jatos de vapores exercem uma força de reação sobre a gota, tendendo a mantê-la mais tempo retida. Mas correntes muito elevadas ou o uso de gases com baixa capacidade de troca de calor podem fazer com que o arco envolva toda a gota, como mostrado para a transferência goticular, o que dificulta a análise do efeito da vaporização sobre o destacamento desta gota. O acoplamento do arco pode ficar restrito a uma pequena área sob a gota, causado, pela alta capacidade de troca de calor dos gases de proteção, fazendo com que o núcleo de condução do arco fique reduzido. Este fato pode localizar demasiadamente a força de reação e, se ela ocorrer fora da linha de centro da gota, pode desviá-la de sua trajetória normal, repulsando-a e facilitando gerar respingos, dando origem a transferência globular repelida (Scotti *et al*, 2008, p.129 e 144).

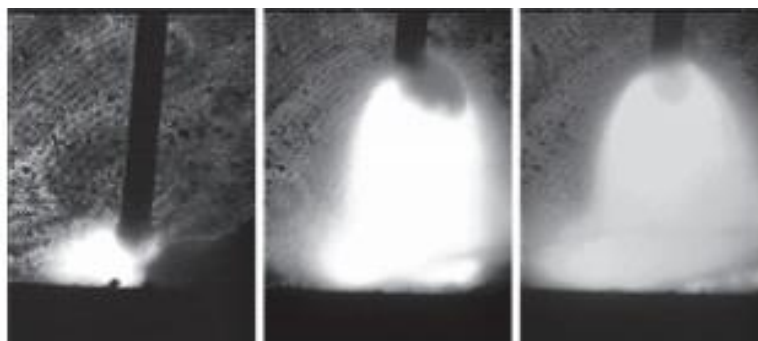


Figura 7 Representação do arco elétrico durante transferência por curto-circuito (esquerda), globular (centro) e goticular (direita) (Scotti et al., 2008, p 144).

2.1.1 Transferência de Metal a Arco Pulsado

A tecnologia de soldagem a arco pulsado teve início nos anos 60 na Inglaterra pelo TWI (*The Welding Institute*) com objetivo de soldar alumínio utilizando como proteção o Argônio. O processo de soldagem GMAW a arco pulsado se caracteriza por ocorrer alternância entre o nível de corrente base e o nível de corrente de pulso durante a transferência. Durante a corrente com alto nível de energia, a transferência do metal ocorre por spray e nesse momento apresentando nível de baixa energia. Em cada pulso, uma gota de metal fundido é depositada na poção de fusão, procedimento conhecido também por UGPP (uma gota por pulso), (Fischer, 2011).

A figura 8 representa como ocorre o processo pulsado. Na letra (a) da Figura 8, a corrente de base tem como objetivo manter o arco aberto e pré-aquecer o material de base, assim como, o arame. Na letra (b) da Figura 8, a corrente aumenta até alcançar a corrente de pulso. Na letra (c) da Figura 8, é representado o estrangulamento do material fundido na ponta do arame. As letras (d) e (e) da Figura 8, demonstram a diminuição da corrente e separação da gota. E por fim, a letra (f) da Figura 8 mostra o final do processo, quando a gota foi transferida para a poça de fusão.

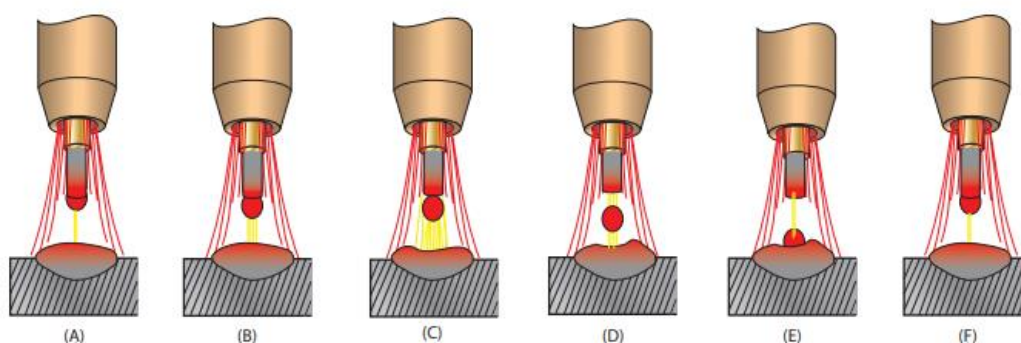


Figura 8 Etapas do processo GMAW pulsado (Jeffus, 2012, p.241)

O processo GMAW pulsado pode ser executado utilizando diferentes movimentos e técnicas em sua aplicação em revestimentos, como mostra figura 9. De acordo com Kovalenko *et al.*, (2013), que avaliou novas técnicas de revestimentos por soldagem, obteve resultados com o processo GMAW pulsado, como mostrado na Figura 9. Os autores obtiveram na sequência de fotos em (a) da Figura 9, os resultados em termos do aspecto superficial do cordão e a sequência em (b) da Figura 9, que apresenta os resultados em termos da seção transversal dos cordões. Os cordões obtidos por movimento reto de tocha (90°) apresentadas no Exp. Nº 1, Figura 9 (a) apresentou piores características, são elas: menor largura e cordão convexo. Os cordões obtidos por tecimento transversal e *Switch-Back* a Figura 9 (a) nas colunas Exp. Nº 2 e

Exp N°3, apresentaram valores de reforço similares. No Exp N° 3 houve formação de ondulações no cordão de solda, dificultando novas deposições sem que ocorram defeitos. A técnica de tecimento transversal consiste em distribuir o metal fundido transversalmente no cordão, obtendo assim, aumento da sua largura de acordo com a amplitude do tecimento. Já a técnica *switch-back* consiste em oscilar a tocha na direção do cordão e não transversalmente Almeida et al., (2012).

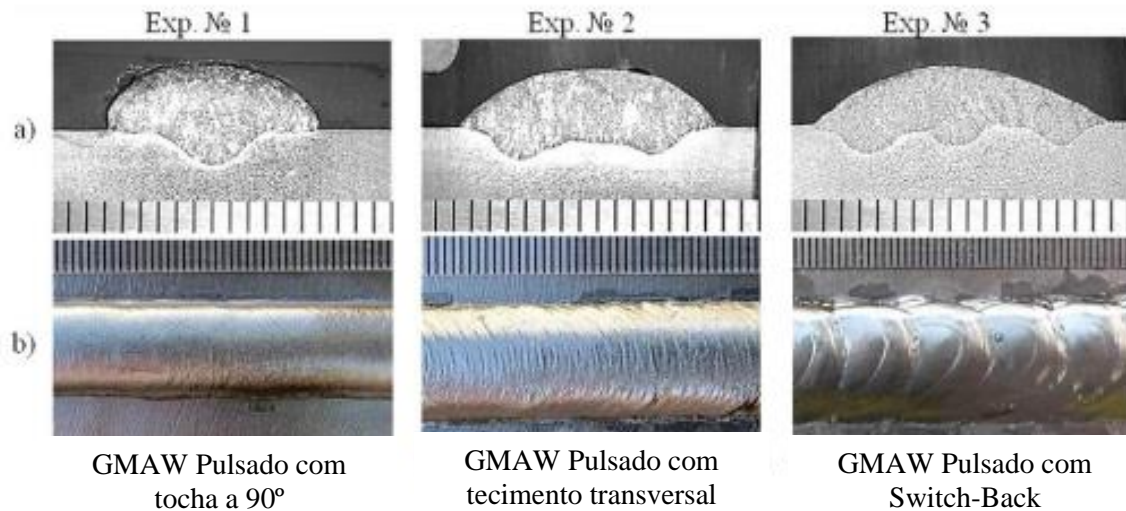


Figura 9 Cordões obtidos por GMAW pulsado utilizando diferentes movimentos e técnicas (Kovalenko et al., 2013).

2.1.2 Cold Metal Transfer

O modo de transferência CMT (*Cold Metal Transfer*) foi desenvolvido pela empresa Fronius da Áustria em 2004. É um processo GMAW baseado no modo curto-circuito, pois há um controle durante a ocorrência do curto-circuito durante a deposição do material e possui um baixo aporte térmico quando a corrente apresenta baixo valor. Durante a transferência do metal, a corrente cai para quase zero, portanto, não há respingos. O processo possui as fases (a), (b), (c) e (d) conforme mostrado na Figura 10. Na fase de corrente de pico (a), durante o alto pulso de corrente o arame é aquecido, tendo como consequência a formação da gota. Na fase de corrente de fundo (b), a corrente apresenta valor baixo para evitar a transferência da gota. Na fase de curto-circuito (c) o arco apresenta tensão zero e ao mesmo tempo, o sinal de retorno é fornecido ao alimentador de arame. Essa fase auxilia na transferência do material para a poça. A análise da forma de onda de corrente e tensão é essencial para estudar a distribuição de energia de diferentes fases na transferência de metal, Selvi, et al. (2018). Na fase (d), tem-se uma diminuição da velocidade e reinício do ciclo (Uusitalo, 2006).

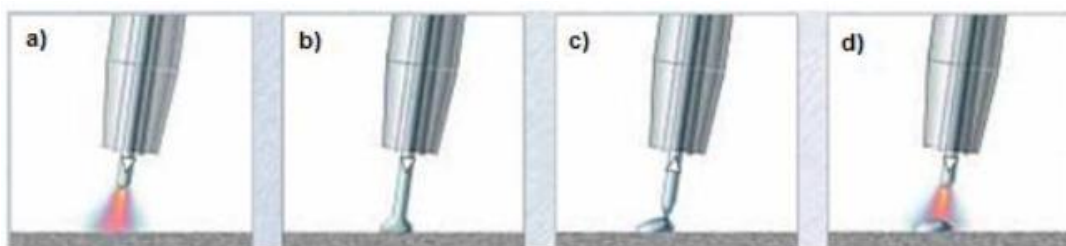


Figura 10 Fases do processo CMT-GMAW (Uusitalo, 2006)

A diferença do processo CMT-GMAW para o GMAW convencional é a forma com que as gotículas de metal se separam do arame, o processo recebe esse nome devido à baixa quantidade de calor gerada Wu, *et al.*, (2018).

Os autores Selvamani, *et al.*, (2020) estudaram os efeitos da distribuição de calor durante a deposição a arco por CMT em aço galvanizado. Para isso, foram analisadas as propriedades mecânicas, metalúrgicas e físicas para compreender o efeito da distribuição de calor nos cordões representadas na figura 11. Com um termômetro infravermelho foram analisadas as distribuições de calor do centro do cordão até o final, variando as distâncias. Logo após as camadas depositadas, foram selecionadas para extração dos corpos de prova a serem submetidos a ensaios de tração e ensaios metalográficos. A simulação do ensaio de tração foi realizada para compreender o comportamento termomecânico após a análise térmica. Os autores obtiveram três diferentes entradas de temperaturas e foi constatado que o calor gerado nos cordões que foram fabricados com baixo aporte térmico (a) da Figura 11, é insuficiente para fundir o metal base, o que causa penetração incompleta do metal e baixa soldabilidade. O cordão depositado em condições consideradas ótimas de entrada de calor (b) da Figura 11, apresentou redução na porosidade. A que foi fabricada com maior aporte de calor (c) da Figura 11, obteve rápida penetração do metal, o que levou a defeitos metálicos como trincas e porosidade. Dessas, a fabricada em condições com médio aporte térmico se mostraram com melhores propriedades mecânicas.

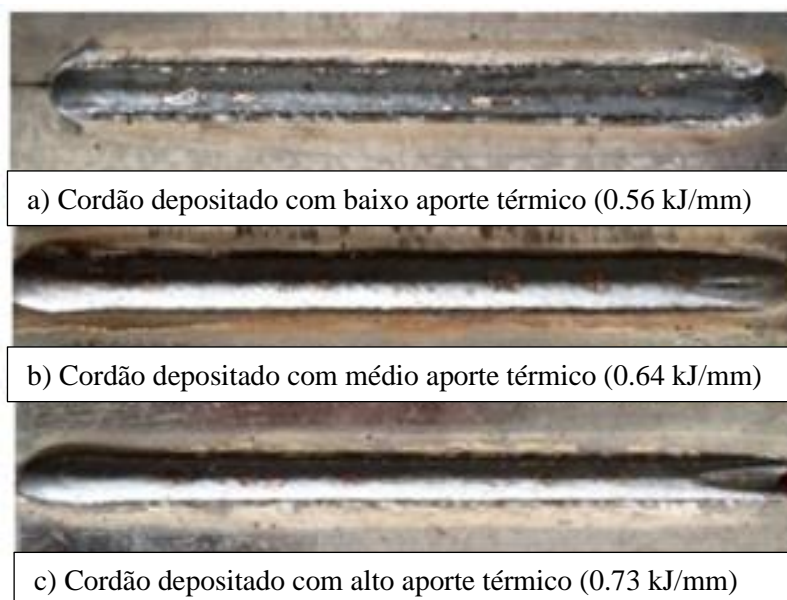


Figura 11 Juntas obtidas por processo CMT-GMAW (Selvamani, et al., 2020)

2.2 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

De acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), a Manufatura Aditiva (MA) é definida como um processo que une materiais a partir de dados computacionais que geram um modelo 3D, depositando camada sobre camada de material, descrito por Rault, *et al.*, (2020). É um termo formal utilizado para o processo de prototipagem rápida, popularmente conhecido como impressão 3D.

Gibson, *et al.*, (2010) considera que o processo genérico de manufatura aditiva ocorre em 8 etapas, desde a modelagem até a aplicação da peça final, mostrado na Figura 12. Essas etapas estão distribuídas da seguinte forma:

1. Na etapa 1 o modelo é feito em um *software* CAD (*Computer-Aided Design*) que resulta em uma superfície 3D;
2. Na etapa 2 o modelo desenhado no CAD deve ser convertido para o formato STL (forma base para o cálculo das fatias a serem impressas), em geral é o formato que as máquinas de MA reconhecem o desenho;
3. Na etapa 3 são definidos os tamanhos, posições e orientações para a fabricação da peça;
4. São definidos os parâmetros de leitura da máquina, como material, fonte de energia, espessura da camada, entre outros;
5. Monitoramento do processo para verificar que o equipamento não apresente erro;
6. Retirada das peças construídas do equipamento;
7. Nesta etapa, a peça recebe tratamentos adicionais necessários como por exemplo, limpeza, até estar pronta para uso;
8. Na etapa 8, a peça encontra-se pronta para uso. Durante o planejamento do processo, são decididos como será o fatiamento, estrutura de suporte e a forma com que o material será depositado. Sendo assim, a peça é fabricada e na etapa de pós-processamento, dependendo da tecnologia utilizada, é analisado se a peça necessita de limpeza e acabamento por usinagem Volpato, (2017).



Figura 12 Etapas do processo de MA (Gibson, et al., 2010)

A *International Organization for Standardization* (ISO) e a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) 52900:2015 classifica os processos de MA em 7 categorias: Jato de aglutinante (BJ) – impresso em finas camadas de pó, a peça é construída camada por camada colando as partes-, Deposição de Energia Dirigida (DDE) – utiliza como fonte de energia um arco elétrico que funde o material de adição (pó/arame)-, Extrusão de material (ME) – material é depositado através de um cabeçote extrusor-, Jato de Material (MJ) – deposição de material por gotas-, Fusão baseada em pó (PBF) – feixe eletrônico funde determinadas regiões de um leito com pó pré-depositado-, laminação de folha (SL) – as folhas de materiais são coladas- e foto polimerização em cuba (VP) – polímero foto curável é curado utilizando uma fonte de luz- Gibson, *et al.*, (2010) e Tofail, *et al.*, (2018).

Metais com boa soldabilidade podem ser utilizados para o processo WAAM, os pesquisadores têm fabricado objetos a base de alumínio, titânio, aço e ligas a base de níquel. Os aços inoxidáveis austeníticos, martensíticos e duplex são bons candidatos para serem

utilizados no WAAM pois apresentam boas propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão Jin, *et al.*, (2020).

No cenário mundial de fabricação a manufatura aditiva por deposição a arco é vista como uma tecnologia inovadora, pois permite o reparo em peças metálicas com geometria complexa e materiais de difícil usinagem. É uma tecnologia que se aplica muito bem em segmentos de fabricação que apresentam custo elevado, principalmente os que utilizam materiais nobres em seus processos, como é o caso da indústria aeroespacial e automotiva. Entretanto, o custo-benefício se torna viável para produção de pequenos lotes, como é o caso do cenário atual devido ao COVID-19 que a tecnologia mostrou seu potencial ao fabricar de acordo com a necessidade e urgência da população. A MA utilizada na fabricação de peças metálicas tem como base o método de Deposição Direta de Energia (DDE), além do pó ou arame como estratégia para fundir o metal. O pó permite que seja obtida maior precisão a uma taxa de deposição baixa, já o arame permite um processo mais rápido e menos preciso. As abordagens utilizam laser, feixe de elétrons e arco elétrico como fonte de energia/deposição Hackernhaar, (2020). A Figura 13 (a) demonstra uma estrutura fabricada a partir da manufatura aditiva, na Figura 13 (b) tem-se a imagem de um monobloco fabricado a partir da MA e na Figura 13 (c), é demonstrado um propulsor fabricado pela RAMLAB.

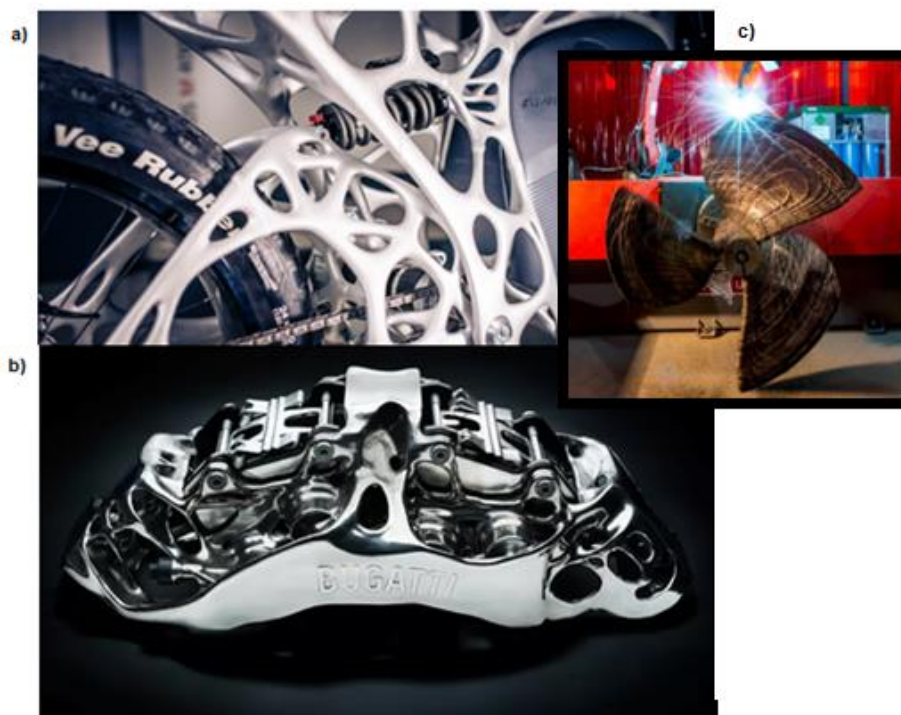


Figura 13 a) Estrutura fabricada utilizando MA (AUTODESK, 2017), b) Monobloco (Bugatti, 2021) e c) Propulsor (RAMLAB, 2021)

A Figura 14 representa as etapas de pré e pós-processamento de um conector de aço estrutural. Na Figura 14 (a) observa-se a peça sendo modelada em um *software*, na Figura 14 (b) a peça encontra-se na fase de pós-processamento, em que já sofreu o acabamento necessário. A peça foi impressa utilizando aço inoxidável duplex, devido às boas características de propriedade mecânica e resistência à corrosão, o conector possui aproximadamente 45 kg MX3D, (2021).



Figura 14 a) Peça modelada em 3D e b) Pós-processamento da peça (MX3D, 2021)

A peça final pode ser fabricada utilizando também, mais de um arame. O estudo realizado por Somashekara, *et al.*, (2017) representado na figura 15, demonstra a utilização de dois arames separados com duas fontes de alimentação para obter peças planas. As fontes utilizadas são independentes e a utilização de mais de um arame tem como objetivo prever a dureza em função da tocha e da corrente de cada fio.

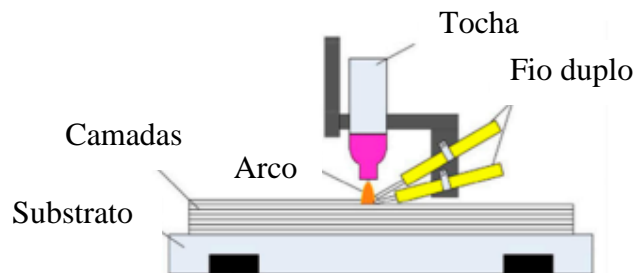


Figura 15 Utilização de mais de um arame durante deposição (Qi, et al., 2018)

Além disso, a escolha do material influencia no tipo de defeito que a estrutura pode apresentar, como mostra figura 16 que apresenta em um diagrama radial em uma escala de 1 a 5 a ocorrência de determinado defeito.

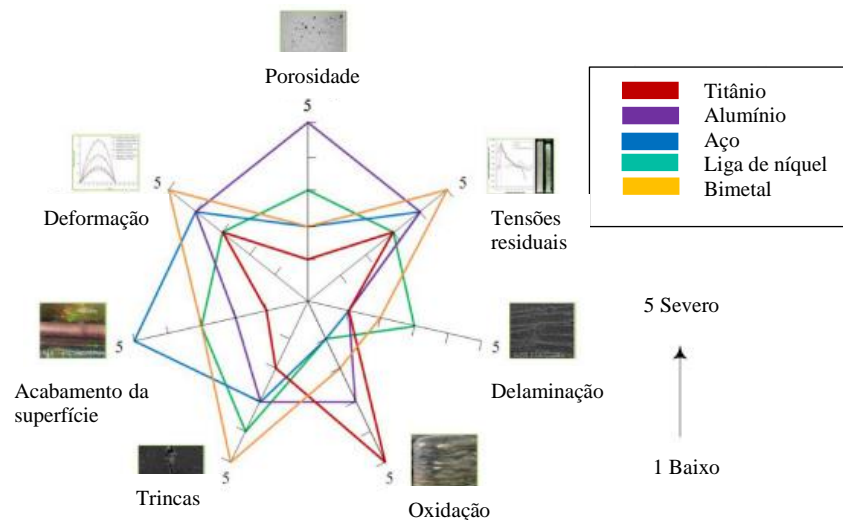


Figura 16 Diagrama radial dos principais defeitos encontrados no método WAAM (Wu, et al., 2018)

Rault, *et al.*, (2020) explicam que no processo de WAAM, há três principais processos, são eles GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), GMAW descrito anteriormente e PAW (*Plasma Arc Welding*), a melhor utilização para cada uma depende do material a ser utilizado e da aplicação. A tecnologia GMAW, descrita no tópico anterior, utiliza um gás para proteção do arco elétrico, sua utilização conta com alto valor de tensão e adequação do ângulo de ataque. Comparada às outras, possui taxa de deposição de 2 a 3 vezes maior, entretanto, o arco é menos estável gerando respingos e fuligem. Como alternativa para melhoria do processo GMAW, o processo CMT foi introduzido, pois possui menor entrada de calor, menos respingos e a qualidade final da solda, mesmo com altas taxas de deposição. O processo CMT possui quatro diferentes modos, são eles: CMT convencional, CMT pulsado, CMT avançado e CMT pulso avançado. Cong, *et al.*, (2014) concluiu que a porosidade do produto final é influenciada pelo modo CMT utilizado e portanto, o CMT convencional não é adequado para o processo WAAM devido à quantidade de poros de gás gerados. Já o processo CMT pulso avançado é mais adequado para deposição de liga de alumínio, pois controla melhor a porosidade através do baixo aporte de calor, obtenção de grãos finos e limpeza eficaz do óxido do fio. Na figura 17 observa-se em (a) longarina fabricada por processo CMT pulso avançado e em (b) cone truncado em aço macio fabricado por processo CMT convencional.



Figura 17 (a) longarina fabricada por processo CMT pulso avançado e em (b) cone truncado em aço macio fabricado por processo CMT convencional (FRONIUS, 2015).

No processo PAW é gerado um arco entre um arame não consumível de tungstênio e o substrato, o argônio restringe através da tocha a formação do arco produzindo alta densidade de energia que aumenta a estabilidade do arco e diminui a contaminação atmosférica. Produz também um arco três vezes maior em densidade de energia, que o do GTAW. O arco de plasma com corrente inferior a 30 A é denominado soldagem a arco por micro plasma (MPAW), devido a sua zona de aquecimento ser menor que a do PAW convencional e a formação de distorções é menor Li, *et al.*, (2019) e Artaza, *et al.*, (2020).

O processo GTAW ocorre a partir da união de peças metálicas utilizando o arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça. A corrente utilizada é constante e na saída seu valor pode se alterar dependendo da aplicação, podendo ser então contínua, alternada ou pulsada. A vantagem em relação à soldagem GMAW é a de ajuste de corrente com valores menores e, os gases utilizados nesse processo devem ter um nível alto de pureza com teores mínimos de 99,99%, esse fator afeta a qualidade da solda. Além disso, apresenta ampla aplicabilidade para diferentes tipos de espessuras e ligas, entretanto, é um processo caro e lento que não se aplica para produção em massa Marques, *et al.* (2005). Na figura 18, há uma demonstração de cada um dos processos, na Figura 18 (a) está representado processo GMAW, na Figura 18 (b) o processo GTAW e na Figura 18 (c) o processo PAW.

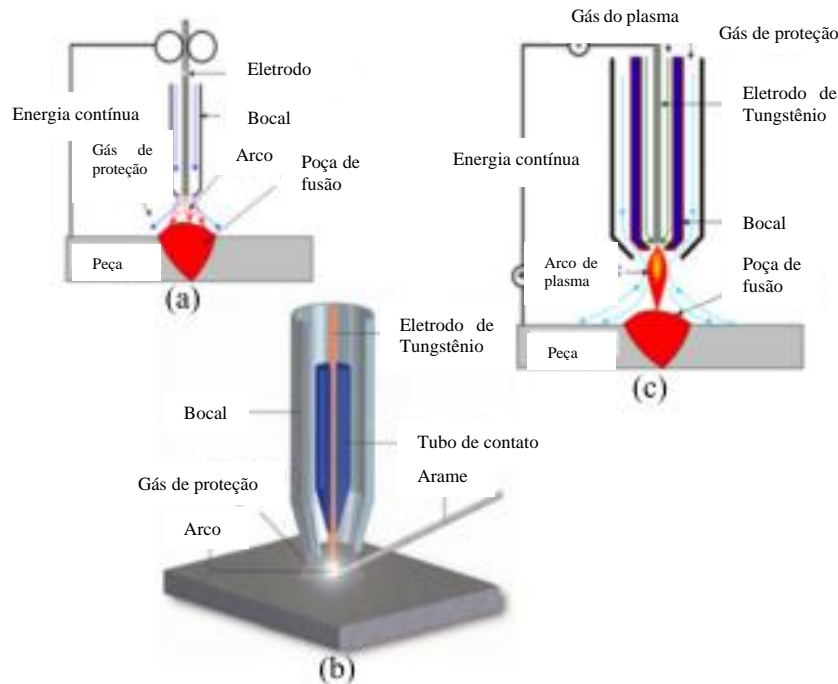


Figura 18 Processos feitos a partir da tecnologia WAAM: a) GMAW, b) GTAW e c) PAW (Ding, et al., 2015)

Artaza, *et al.*, (2019), fizeram um estudo comparando as principais diferenças entre as propriedades mecânicas e metalográficas do aço Mn4Ni2CrMo nos processos de deposição por GMAW e PAW. Foram fabricadas duas paredes de aço AWS A-5.28 e ER 120S-G utilizando substrato de aço S235JR de 10 mm de espessura, cada parede fabricada em um dos tipos de processos citados. No processo GMAW foram necessárias 60 camadas utilizando o gás de proteção Ar (82%) – CO₂ (18%). No processo PAW foram necessárias 55 camadas utilizando Ar (99.997%), a velocidade para ambos foi a mesma. O autor concluiu que o aço Mn4Ni2CrMo se adequa para ser produzido por ambos os processos com taxa de deposição de 2,8 kg/h, entretanto, a parede fabricada com PAW resulta em melhores resultados em relação as propriedades mecânicas quando comparado ao GMAW. Esse resultado ocorre devido a quantidade de energia empregada e, portanto, necessitam-se de estudos mais avançados na área. A metalografia esperada de martensita revenida e bainita foram alcançadas conforme esperado e, as propriedades mecânicas apresentaram-se favoráveis ao processo PAW, como resistência à tração e resistência ao escoamento. A figura 19 apresenta os resultados obtidos através do ensaio metalográfico, na Figura 19 (a) e (b) observa-se a martensita e a bainita obtidas através dos processos citados.

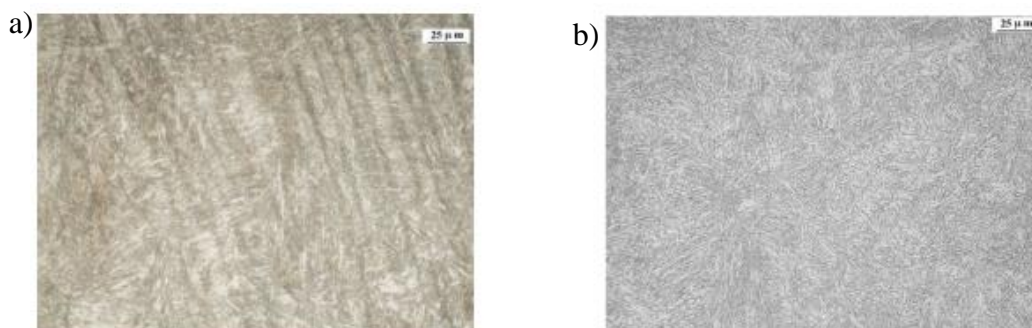


Figura 19 Microestrutura da parede fabricada por PAW, b) microestrutura obtida por GMAW, ambas constituídas por martensita e bainita (Artaza, et al., 2019)

Antonello, (2020) realizou um estudo que visa analisar a variação da frequência de pulso utilizando GTAW sobre chapas de alumínio. Foi utilizado substrato de alumínio 5052 e como material de adição o arame ER-4043 e corrente alternada com variação de 50% de ciclo positivo e negativo. O gás utilizado foi o argônio e as frequências de pulso de 50 Hz e 200 Hz. Como resultado, duas paredes foram obtidas, uma fabricada utilizando frequência de 50 Hz e outra a frequência de 200 Hz e observou-se que a parede fabricada com a frequência de 200 Hz apresentou acúmulo nas camadas superiores. Entretanto, a largura do cordão de solda para as frequências de 50 Hz apresentaram-se mais largas e com mais sinuosidade piorando o acabamento lateral. A figura 20 apresenta os corpos de prova fabricados com ambas às frequências.

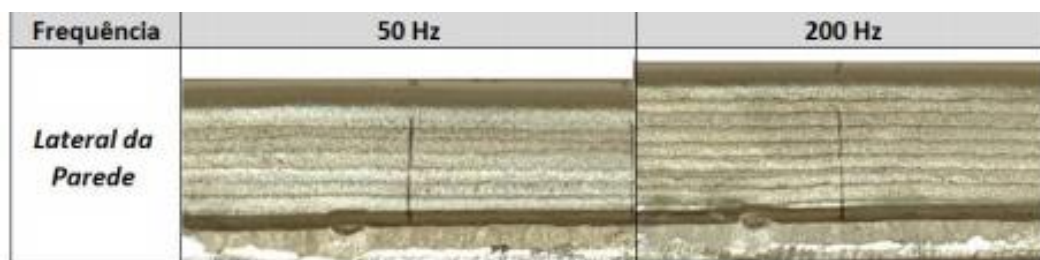


Figura 20 Paredes fabricadas a partir de processo GTAW utilizando WAAM (Antonello, 2020)

2.3 Vantagens e Limitações da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

A Manufatura Aditiva é descrita atualmente como uma revolução tecnológica no desenvolvimento e fabricação de produtos devido a sua rapidez ao fabricar peças. Realiza também, leitura de dados feita por computador de forma contínua, com isso, o fabricante não necessita se preocupar com o tempo de elaboração. Independente da complexidade da peça, fabricar em uma máquina de MA é um processo simples quando comparado com outros processos de fabricação que exigem a realização de múltiplos estágios de iteração. MA pode, portanto, ser vista como uma forma de prever com eficácia o tempo necessário para fabrica modelos, independente de eventuais mudanças realizadas durante o desenvolvimento do produto. Além disso, o processo mudou a maneira como são projetados produtos e criados negócios Gibson, *et al.*, (2010).

De acordo com Volpato, (2017) dentre as vantagens da fabricação por manufatura aditiva, cita-se a acessibilidade, alta velocidade e o não desperdício de material no caso da impressão 3D – processo disponível comercialmente desde 1993 pela empresa Z Corporation originária nos EUA - devido a possibilidade de reutilização do material que eventualmente sobra. Além disso, a boa precisão dimensional, qualidade superficial e pouca necessidade de pós-processamento também são citados. Como desvantagens cita a velocidade de fabricação lenta, como é o caso das peças fabricadas por Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) – processo disponível comercialmente desde 1992 pela empresa Stratasys Inc. originária nos EUA -, elevado custo do equipamento e poucos fornecedores de matéria prima, como é o caso da Sinterização Direta à Laser de Metal (DLMS) e Fusão por Feixe de Elétrons (EBM) – processos originários respectivamente na Alemanha pela empresa EOS GmbH e Arcam EBM originária na Suécia - e matéria prima tóxica no caso da Estereolitografia (SL) – processo originário nos EUA pela empresa 3D System Inc-.

Para Silva, (2017) a consolidação da Manufatura Aditiva de Metais atualmente ainda não está no mesmo patamar quando comparada a Manufatura Aditiva de Polímeros. O autor faz

essa afirmação, pois acredita que a partir da manufatura aditiva de polímeros é menos complicado obter determinadas propriedades. A manipulação do metal em seu estado líquido não proporciona a mesma facilidade em obter determinadas propriedades metalúrgicas. Por isso, o método de geração de trajetória é importante para que a geometria e o nível de qualidade sejam atingidos para que sejam evitados formação de defeitos. O autor sugere como solução que o aporte térmico seja alterado e pequenas estruturas íntegras sejam fabricadas e somente em seguida ao utilizar em conjunto tais estruturas, seja possível construir objetos maiores e com maior complexidade geométrica. A figura 21 apresenta as peças obtidas pelo autor ao mudar parâmetros elétricos e ao apresentar dissipação de calor insuficiente.



Figura 21 Peça obtida ao modificar parâmetro elétricos e base obtida através da dissipação de calor (Silva, 2017)

O processo de deposição a arco elétrico possui maior eficiência energética quando comparado a outros processos de manufatura aditiva e por isso, possui ampla abrangência em relação ao material depositado, pois produz peças maiores com maior rapidez. Um exemplo da rapidez que o processo possui, é a verificação da taxa de deposição do processo a laser e feixe de elétrons que possuem taxa de deposição entre 2 e 10 g/min e o processo de deposição a arco elétrico atinge valores superiores a 130 g/min. A alta taxa de deposição se encaixa bem em processos de construção como reparos. Outra característica evidenciada por Alberti, *et al.*, (2014), é a deposição de cordões individuais e com larguras superiores a 12 mm e altura de 2mm utilizando o processo GMAW, ideal para construções de câmaras de combustão, há também o baixo efeito térmico e baixa probabilidade de trincas nas ligas de níquel quando são depositadas com plasma. A sobreposição de cordões de aço inoxidável AISI 308 utilizando GTAW permitiu a construção de paredes de 8 mm de espessura e 30 mm de altura sem a presença de trincas ou poros, mantendo as propriedades mecânicas constantes, tais características representam o nicho de grande potencial para aplicação da MA, o que a torna competitiva. A Figura 22 apresenta diversos tipos de defeitos encontrados em cordões de solda depositados por manufatura aditiva, na figura (a) observa-se um cordão não homogêneo e na figura (b) observa-se o cordão com excesso de deposição em sua extremidade. O autor considera também que os métodos de deposição a arco requerem um rigoroso controle de parâmetros, pois garante o controle da geometria e tem impacto em suas propriedades. Na maioria dos casos é necessário um tratamento térmico para homogeneização da estrutura.

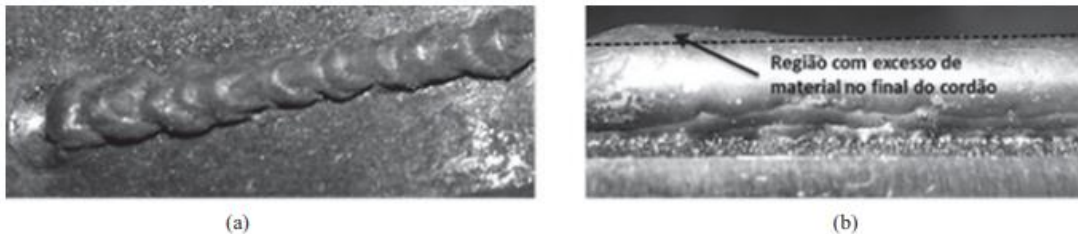


Figura 22 Defeitos encontrados em cordões de solda fabricados por deposição a arco: a) Cordão não homogêneo e b) excesso de deposição Alberti, et al., (2014).

De acordo com os estudos de Williams, *et al.*, (2016), o processo CMT-GMAW possui diversas vantagens e cita primeiramente o custo-benefício, pois, os componentes básicos de *hardware* para iniciar o processo de deposição, principalmente deposição de aço e alumínio são poucos e baratos e na época em que foi feita a pesquisa, por um total de £90k é possível ter tais componentes. Além disso, o custo do arame de solda é uma matéria prima barata e acessível que evita problemas como pó, tem-se um maior controle do tamanho do cordão e distribuição das partículas que afetam o desempenho do processo. Como o arame ao ser fundido torna-se parte da estrutura final, a probabilidade de contaminação é baixa. A arquitetura aberta permite que o usuário final tenha maior controle do processo, pois, pode realizar alterações em qualquer parâmetro de deposição. O tamanho da peça para materiais como alumínio e aço é determinado apenas pelo alcance do manipulador, para materiais como titânio o tamanho é limitado pelo envelope interno da câmara, tais diferenças ocorrem devido ao alumínio e aço não necessitarem de uma rigorosa proteção gasosa, já o titânio exige e o elemento utilizado para criar a atmosfera inerte limita essa vantagem que para os outros materiais citados não é limitada. Como citado por outros autores descritos anteriormente, a taxa de deposição aparece mais uma vez como vantagem, pois é suficientemente alta e a deposição de peças em grande escala alcançam tempos razoáveis.

Os mesmos autores citam também as tensões residuais como desafio para o processo. O arco com a entrada de calor significativa leva a alta tensão residual causando distorções na peça. Durante o resfriamento, ocorre o encolhimento da peça devido às tensões residuais e essas tensões são maiores ao longo da direção de deposição. Apesar das desvantagens, alguns métodos são empregados para mitigar o problema, como é o caso de alternar a deposição da camada nas fazes do substrato, com a técnica a camada depositada em um lado produz tensões que equilibram as produzidas no outro lado, sempre que houver um plano de simetria o substrato é alinhado ao plano para obter equilíbrio. Outra solução para este problema é o controle do calor, em que a próxima camada só é depositada quando a anterior está mais fria e a construção de cada camada em diferentes etapas, como é o caso da fabricação de longarina que as peças são tratadas termicamente após fabricação para aliviar as tensões residuais. A figura 23 apresenta peças fabricadas utilizando o processo citado com o controle simétrico da peça sendo utilizado para evitar as tensões residuais. Na figura 23, tem-se peças obtidas por meio do processo de deposição CMT-WAAM, à esquerda tem-se conjunto de trem de pouso externo e à direita, longarina de alumínio de 2,5 metros.

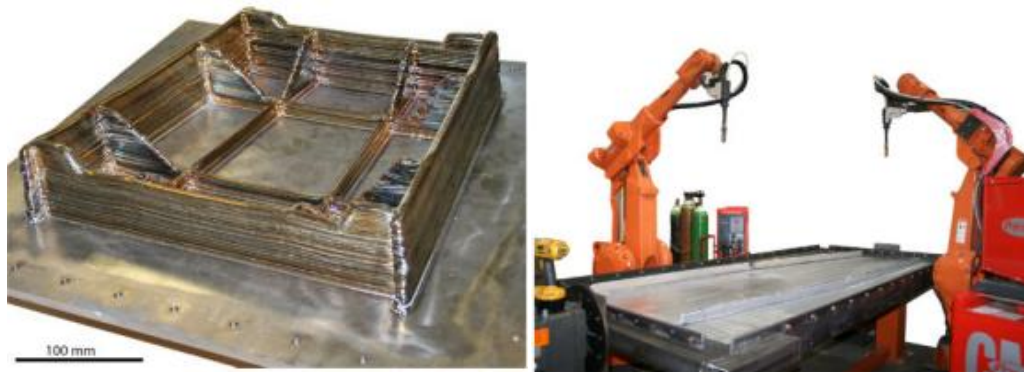


Figura 23 Peças obtidas através de deposição CMT – WAAM. (FRONIUS,2015)

Fang, *et al.*, (2015) afirma que o pós-processamento térmico é descrito como necessário para aliviar as tensões pois, altas valores de tensões residuais podem ter efeitos substanciais nas propriedades mecânicas das estruturas. Tensões residuais superiores ao limite de resistência a tração do material podem levar a fissuras, tensões entre o limite de resistência ao escoamento e o limite de resistência a tração, podem causar empenamento ou deformação plásticas. A figura 24 mostra a distribuição de tensões residuais longitudinais (direção Z, ao longo do percurso do laser) da deposição de pó de metal a laser, que são analisados sob três tipos de condições. Dois casos para transformação de fase (considerando tensões) e um sem transformação de fase. Os casos em que há transformação de fase as tensões residuais se apresentam menores no cordão de solda e na área adjacente, apresentam-se também em baixo valor na interface entre o revestimento e o substrato do que no cordão de revestimento. A tensão máxima de tração é observada cerca de 3 mm da superfície do cordão, pois não há transformação de fase do estado sólido na área durante o processo. As tensões de tração diminuem gradualmente e se transformam em tensões de compressão à medida que a distância aumenta. No caso em que a transformação de fase não é considerada, as tensões residuais no cordão estão próximas da tensão de escoamento. A tensão de tração máxima é encontrada na interface entre a placa de substrato e o cordão de solda, a tensão de compressão máxima é maior quando a transformação de fase é ignorada. A influência da tensão demonstra reduzir a magnitude das tensões longitudinais.

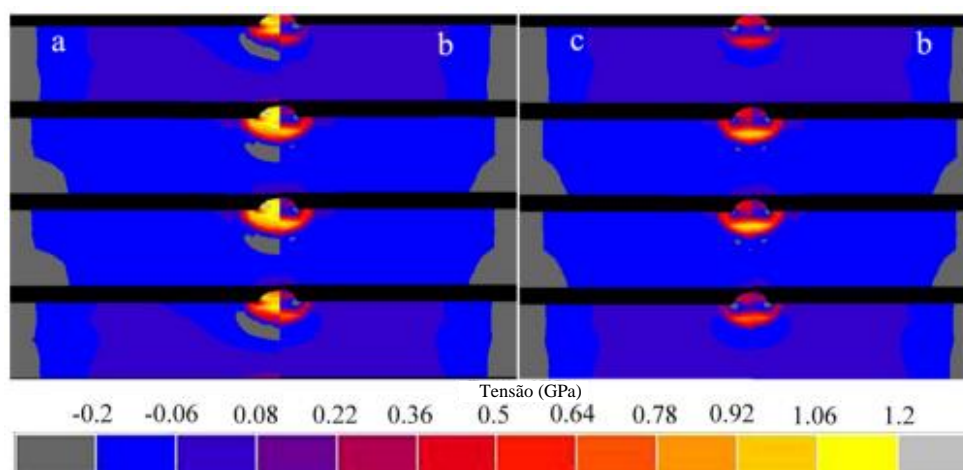


Figura 24 Comparação da distribuição de tensão longitudinal em seção transversal de amostra revestida a laser de camada única: (a) sem transformação de fase; (b) com transformação de fase; (c) com influência de tensões Fang, *et al.*, (2015).

Além das tensões residuais as distorções também são inevitáveis para o processo WAAM, no estudo de Jin, *et al.*, (2020), são descritas as deformações por flexão, encolhimento na

direção longitudinal e transversal como distorções causadas nas peças fabricadas por deposição a arco. Com repetições de aquecimento e resfriamento, a peça pode sofrer expansão térmica ou encolhimento das partes depositadas levando a deformação. Os componentes que possuem paredes finas são os mais suscetíveis a esse tipo de deformação. No estudo de Lee, *et al.*, (2019), seis paredes foram construídas para investigar o efeito do tempo de resfriamento da camada intermediária e da restrição na deformação da peça, conforme Figura 25. As paredes que apresentam um único cordão são as SB e cordões duplos DB, foram fabricadas três paredes de cordões duplos apresentando distorção na região lateral e dois DB com distorções na região central. A placa DB-4 apresentou distorção de 3,3 mm nas bordas laterais, a distorção diminuiu progressivamente em direção ao centro, tendendo a zero devido aos grampos e parafusos. Em DB-1 e DB-2, as placas distorcem para cima entre 1 e 1,5 mm e 3,3 mm e 2,6 mm para as placas DB-4 e DB-5. A flexão ocorre devido à camada depositada se expandir durante o aquecimento e contrair durante o resfriamento e a contração da camada superior é restringida pela camada depositada anteriormente, gerando tensões residuais de tração e consequentemente flexionando para cima. O nível de distorção aumentou com o tempo de resfriamento entre as camadas.

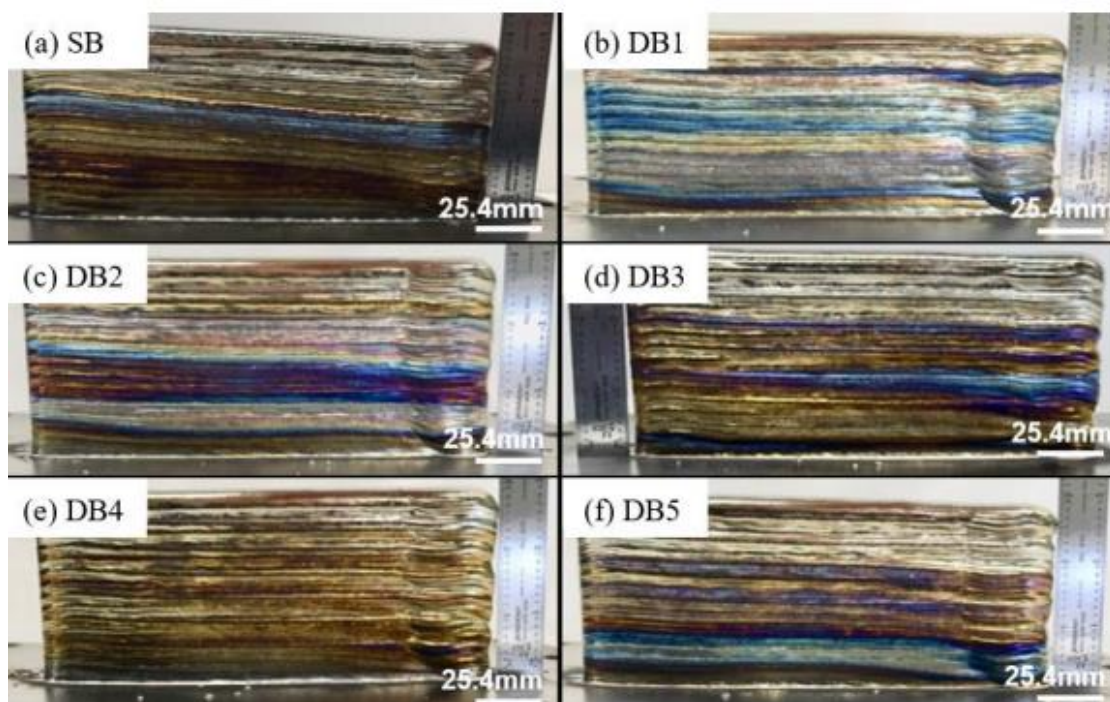


Figura 25 Placas fabricadas para estudo das distorções Lee, et al., (2019)

O caminho percorrido durante a deposição também influencia na diminuição das tensões residuais, pois em uma trajetória bidirecional com rotação de 180° a tensão residual é diminuída em 50%, reduzindo também a suscetibilidade a rachaduras. Ao analisar a trajetória bidirecional com rotação de 180°, observa-se que além dos 50% de tensões reduzidas na placa DB-1, foi observada uma queda simétrica de tensão na placa DB-5 nas bordas da parede ao longo da linha média. Isso indica que a trajetória percorrida melhora a distribuição simétrica da tensão residual. Os resultados discutidos estão demonstrados na figura 26.

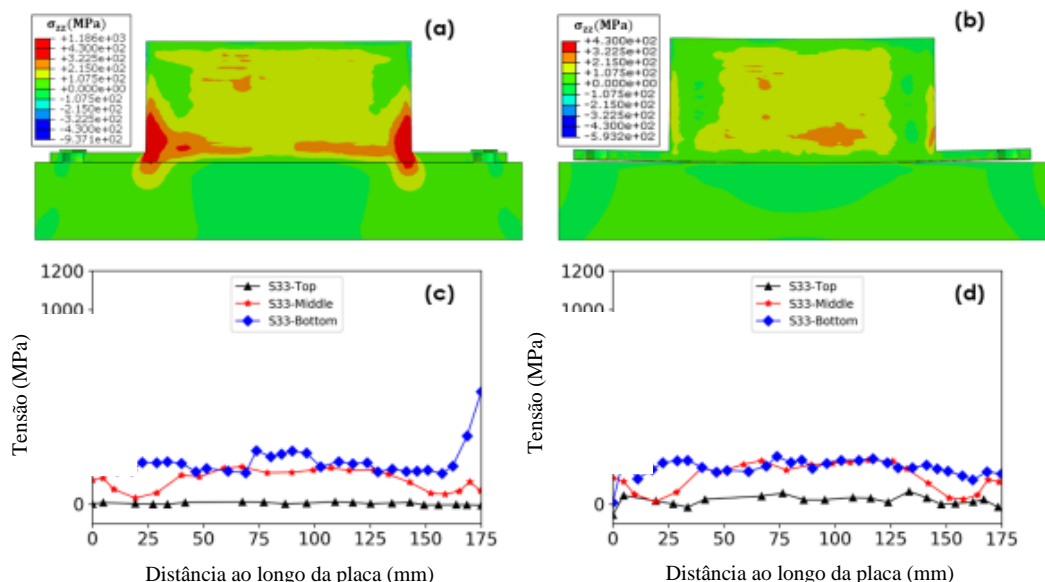


Figura 26 Tensões residuais aplicadas ao longo das placas DB-1 e DB-5 Lee, et al., (2019)

2.4 Propriedades Mecânicas dos Metais

As propriedades mecânicas são necessárias para projetos de estruturas e componentes que utilizem determinados materiais. São estudadas a fim de evitar que inaceitáveis níveis de deformação ou falha ocorram ao serem expostos a tensões e forças externas, assim como, devem também apresentar níveis apropriados de determinadas características como: ductilidade, rigidez, resistência à tração e tenacidade. A ductilidade é uma medida do grau de deformação plástica que foi suportado até a fratura, em casos de pequenos valores para deformação plástica, o material é denominado frágil. A tenacidade pode ser definida como a capacidade do material absorver energia e se deformar plasticamente antes de fraturar. Tais propriedades são verificadas através de experimentos laboratoriais aplicando determinadas cargas, geralmente cargas de tração, compressão ou cisalhamento em determinado intervalo de tempo. Os experimentos laboratoriais devem seguir técnicas padronizadas e o estabelecimento e publicação dessas padronizações são coordenados por sociedades profissionais, como a Sociedade Americana para Ensaio e Materiais (ASTM – *American Society for Testing and Materials*) (Callister *et al.*, 2012, p. 130).

As características mecânicas determinam o comportamento do material ao ser exposto a esforços mecânicos, pois, determina a capacidade do material resistir ou transmitir os esforços aplicados sem rompimentos ou deformações. Portanto, são essas propriedades que definem o comportamento e a memória de forma do material após sofrer ações de esforços Vignatti, *et al.*, (2017).

Além das características citadas, os metais possuem também porosidade, como Gierth, *et al.*, (2020) cita em seu estudo. O processo de deposição a arco utilizando materiais como o alumínio, é limitado devido aos defeitos como porosidade e trincas de solidificação. A porosidade limita severamente as propriedades mecânicas como a resistência e a ductilidade. O aporte térmico atua como um tratamento térmico de baixa temperatura para a camada depositada anteriormente, com isso, o crescimento dos poros ocorre principalmente em ligas de alumínio. A porosidade, microestrutura e propriedades mecânicas do alumínio dependem da escolha do processo de soldagem a arco, da velocidade de soldagem e da entrada de calor resultante. O processo CMT apresenta bons resultados em relação a diminuição da porosidade devido à baixa entrada de energia devido à redução na temperatura de pico, como é o caso da

diminuição relatada no estudo da liga de alumínio S Al 5183. Como resultado, os autores concluíram que o enfraquecimento da seção transversal ocorreu devido a presença de porosidade nos limites da camada. Além disso, a resistência à tração foi reduzida, o que tem efeitos negativos para a ductilidade. As porosidades foram maiores no processo CMT e CMT-ADV. O CMT-PADV apresentou menor porosidade. A figura 27 apresenta os parâmetros utilizados e obtidos para o processo CMT-ADV.

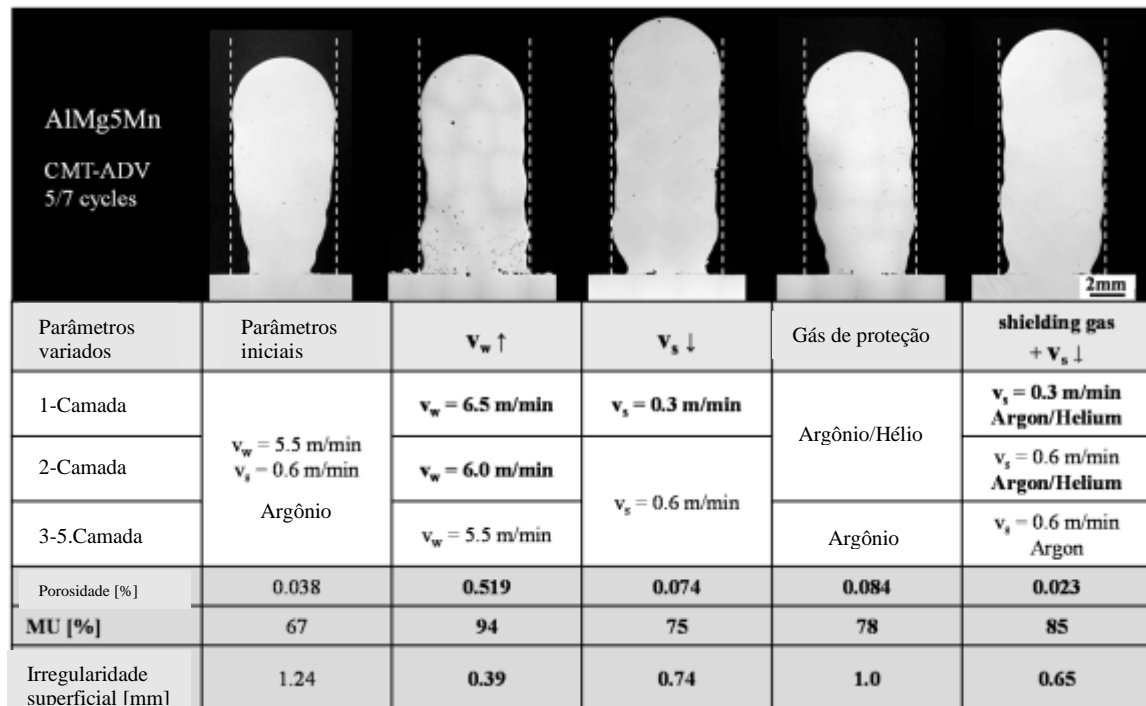


Figura 27 Comparação de diferentes parâmetros para aumentar a precisão do contorno final com modo CMT-ADV (Gierth, et al., 2020)

2.4.1 Resistência ao Desgaste (Dureza)

A dureza é uma medida de resistência de um material a uma deformação plástica localizada. Ao longo do tempo diversas técnicas para determinar essa medida foram desenvolvidas e a mais utilizada é o ensaio de dureza que utiliza um pequeno penetrador contra a superfície do material sob determinadas condições de aplicação da carga. Por meio do tamanho da impressão feita na peça, são feitas medidas e, portanto, quanto mais profunda a impressão, menor o número de dureza associado. Quanto mais macio o material, maior e mais profunda será a impressão e menor a dureza. Esse ensaio é mais utilizado que qualquer outro ensaio mecânico devido ao custo-benefício, simplicidade, é um ensaio não destrutivo, ou seja, o corpo de prova não é fraturado nem deformado e pela grandeza informada pode ser utilizada para cálculos de outras propriedades, como limite de resistência a tração. Os ensaios de dureza mais utilizados são: ensaio de dureza *Brinell*, ensaio de dureza *Rockwell* e ensaio de dureza *Vickers*. No ensaio de dureza *Brinell*, o penetrador utilizado é esférico fabricado em aço endurecido, ou carbeto de tungstênio com diâmetro de 10 mm e a carga utilizada varia entre 500 e 3000 kg, em incrementos de 500 kg. A superfície de impressão deve ser lisa e plana e o tempo em que a carga é mantida constante varia de 10 a 30 s. O valor obtido para esse ensaio é o HB (*Hardness Brinell*) e a norma ASTM E 10 descreve o método padrão de ensaio para esse tipo de dureza em materiais metálicos. No ensaio de dureza Rockwell, pode haver combinações de diferentes penetradores e diferentes cargas, e são aplicáveis a todas as ligas metálicas e alguns polímeros. Geralmente, os penetradores são esferas de aço endurecidas com diâmetro de 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2

polegadas, e um penetrador cônico de diamante, que é utilizado em materiais mais duros. O cálculo da dureza é feito através da diferença na profundidade de penetração entre a carga inicial e a carga principal, a menor carga é de 10 kg e as principais são de 60, 100 e 150 kg. No ensaio de dureza *Vickers*, um penetrador de diamante pequeno com geometria piramidal é forçado contra a superfície e possui cargas que variam entre 1 e 100 g. O cálculo da dureza é feito por meio da impressão resultante, observada no microscópio e então é medida (Callister, *et al*, 2012, p.149). Na figura 28 é possível observar a diferença dos penetradores para realização do ensaio de dureza *Brinell* e *Rockwell*.

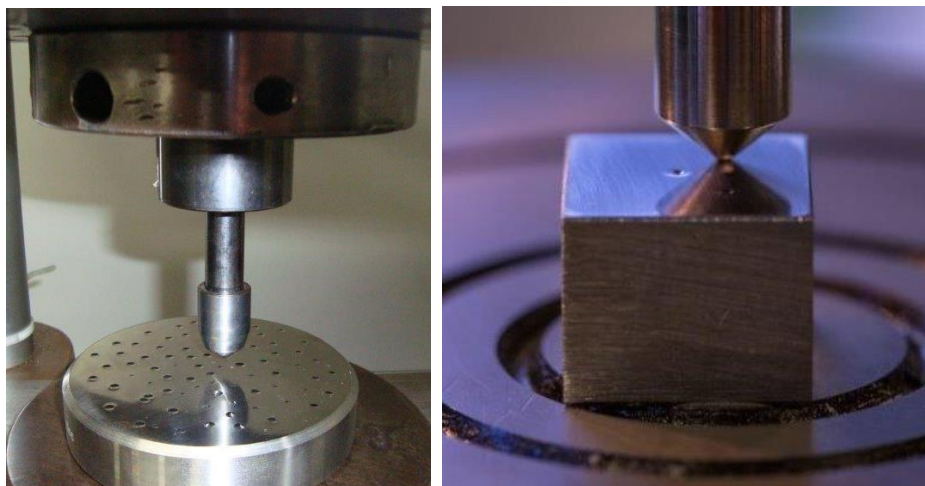


Figura 28 Penetradores para ensaio *Brinell* e *Rockwell* (Labteste, 2021)

No estudo de Marenych, *et al.*, (2018), foi realizado a deposição de duas ligas de Ni-Cu (Monel K500 e FM 60) com diferentes teores de Mn, Fe, Al, Ti e C em uma placa Monel K500 utilizando três diferentes velocidades de deposição (300, 400 e 500 mm/min). Os diâmetros dos consumíveis foram de 1 mm e 1,2 mm, respectivamente, e a base com dimensões de 600x260x8 mm. A deposição foi realizada utilizando o método CMT com gás de proteção 100% Argônio. Com esse estudo, foram obtidas diferentes propriedades mecânicas como dureza, tração e desgaste. A norma utilizada para a resistência ao desgaste foi ASTM G 99-95a. Os resultados obtidos para o desgaste foram que o Monel 500 apresentou maior resistência ao desgaste em comparação ao FM 60. E independente da liga, a tenacidade apresentou maiores valores para velocidade de deposição de 400 mm/min, correspondendo então a uma maior resistência ao desgaste. O aumento da resistência ao desgaste com um aumento na dureza aparece também em aços de médio carbono. Esse valor teve aumento devido a precipitação de carbonetos ricos em Nb e Cr, entretanto, o autor sugere que o equilíbrio entre tenacidade e dureza tenha sido o causador da resistência ao desgaste. Na figura 29, letras (a), (b) e (c) tem-se os valores para cada corpo de prova em um gráfico tensão-deformação. Na figura 29 letras (d), (e) e (f) tem-se os valores de dureza para diferentes zonas da seção transversal de solda. Na figura 29 letras (g), (h) e (i) tem-se os valores de resistência ao desgaste de ambas as peças, representada em perda de massa ao longo do tempo.

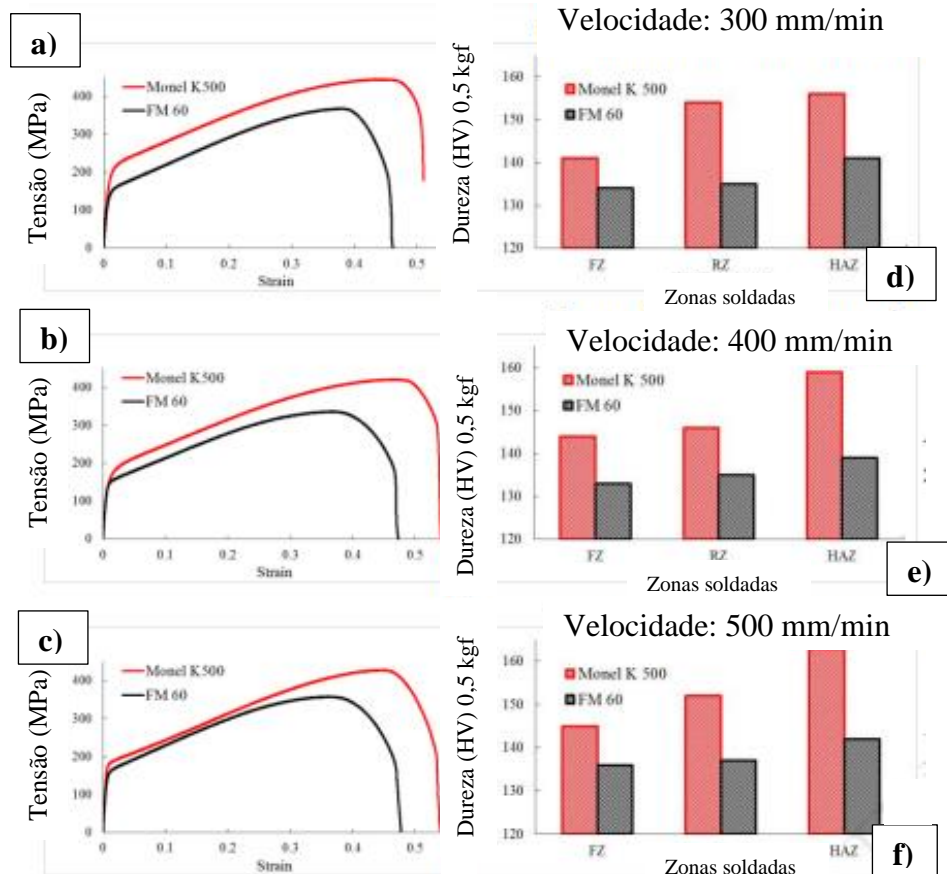


Figura 29 a), b) e c) Curvas tensão-deformação. d), e) e f) dureza em diferentes zonas da seção transversal da solda. (Marenych, et al., 2018)

2.4.2 Resistência à Tração (Limite de escoamento)

Ao projetar uma estrutura, é desejável que ao aplicar uma tensão ocorra apenas deformação elástica, entretanto, caso tenha ocorrido deformação plástica a estrutura pode não funcionar conforme esperado. Para isso, é necessário estudar o nível de tensão que deu início ao escoamento, em metais, o ponto de transição entre a deformação elástica e a deformação plástica é determinado como limite de escoamento. Devido à dificuldade de medir com precisão o limite de proporcionalidade, determinou-se que o melhor método seria inserir uma linha reta paralela a região plástica da curva tensão-deformação em uma pré-deformação de 0,002. A partir disso, a tensão correspondente a inserção da linha conforme inclinação na região plástica, é definida como limite de escoamento. Para materiais em que a região elástica não é linear, o método citado não se aplica, portanto, define-se o limite de escoamento como a tensão necessária para produzir uma determinada quantidade de formação. Para materiais em que a transição da fase elástica para a fase plástica é muito bem definida e ocorre de forma abrupta, como é o caso de alguns aços, a deformação gira em torno de um valor de tensão constante e portanto, é determinado de limite de escoamento inferior. Em casos assim, o limite de escoamento é obtido através da tensão média associada ao limite de escoamento inferior. Os limites de escoamento podem variar entre 35 MPa para um alumínio de baixa resistência e acima de 1400 MPa para aços de alta resistência. Após o escoamento, é necessário um valor de tensão para que a deformação plástica continue até alcançar um valor máximo. Depois, a tensão é diminuída até que ocorra a fratura do material. A tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação de engenharia, é chamada de limite de resistência à tração. Essa tensão representa a tensão máxima suportada por uma estrutura sob tração e se mantida, a fratura ocorre. Os

valores de LRT pode variar de 50 MPa para alumínio até 3000 MPa para aços de alta resistência. A dureza e o limite de resistência à tração se correlacionam, pois, são indicadores da resistência de um metal à deformação plástica e por isso, são considerados proporcionais (Callister, *et al.*, 2012, p.139).

No estudo de Gierth, *et al.*, (2020), foi observado o comportamento da liga de alumínio AlMg5Mn utilizando deposição a arco com três modos: CMT, CMT-ADV e CMT-PADV. Para ocorrer o processo, o substrato foi fixado em uma mesa de soldagem, a fonte de energia foi regulada digitalmente e o robô que proporcionou o movimento contém seis eixos. Logo após a fabricação, foi realizado o teste de tração com uma máquina de teste universal seguindo as normas DIN EM ISO 6892-1. Foi obtido que a resistência de 275 MPa representa as especificações dadas pelo fabricante do metal de solda puro. Das deposições ocorridas na direção horizontal, a maior foi de 296,1 MPa determinada pelo processo CMT-PADV, como os valores estão próximos uns dos outros, a resistência à tração na direção horizontal pode ser considerada equivalentes. Como o desvio padrão dos resultados foi pequeno, o autor concluiu que na direção horizontal as propriedades de resistência são homogêneas. A resistência obtida para deposição realizada na direção vertical é menor para o CMT e CMT-ADV. Além disso, não houve diminuição no diagrama tensão-deformação antes de ocorrer a falha e, portanto, a capacidade de deformação na direção vertical dos corpos de prova fabricados com CMT e CMT-ADV é reduzida. Com isso, os autores concluíram que a resistência anisotrópica e as propriedades de ductilidade estão presentes na estrutura e a direção do carregamento tem influência na força ou tensão máxima suportável. A figura 30 representa os valores obtidos em cada processo.

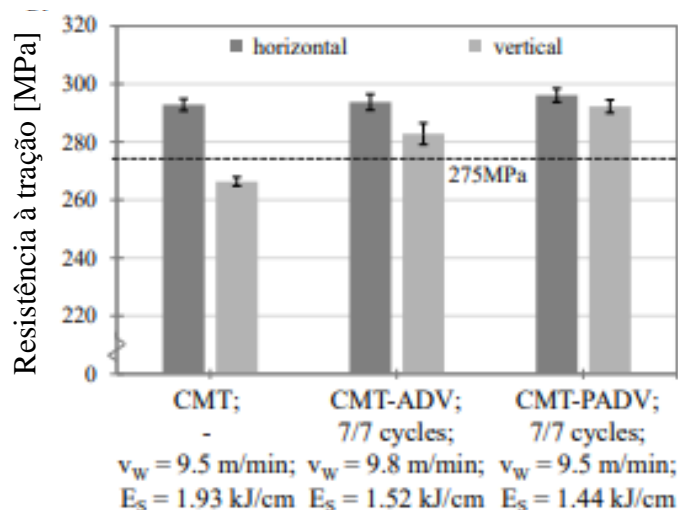


Figura 30 Representação da resistência à tração das amostras verticais e horizontais (Gierth, et al., 2020),

O estudo de Marenych, *et al.*, (2018), conforme descrito anteriormente, apresentou resultados para o teste de tração também. Ao analisar as curvas de tensão-deformação, Monel K500 apresentou maior tensão de escoamento, maior resistência à tração e alongamento até a ruptura. Portanto, se saiu melhor que o FM60 em todas as condições de estudo. A velocidade de deposição não influenciou nas propriedades de tração.

2.4.3 Resistência a Compressão

O ensaio de compressão descreve o comportamento do material submetido a deformações grandes e permanentes, como é o caso das deformações plásticas. Essa deformação é obtida em

processos de fabricação ou quando o material é frágil e encontra-se sob tração. A carga em compressão produz uma contração e uma deformação linear negativa. O ensaio de tensão-deformação sob compressão é semelhante ao ensaio sob tração, o que os diferencia é que o corpo de prova se contrai ao longo da direção da tensão. A força compressiva é considerada negativa, assim como, as deformações compressivas também são negativas. Os ensaios de tração são mais comuns, pois, fornecem mais informações que os de compressão, além de serem mais fáceis de serem executados. A norma utilizada para padronização dos ensaios de compressão é a ASTM E 9 (Callister, *et al*, 2012, p.148). A figura 31 ilustra o processo de compressão em uma máquina.

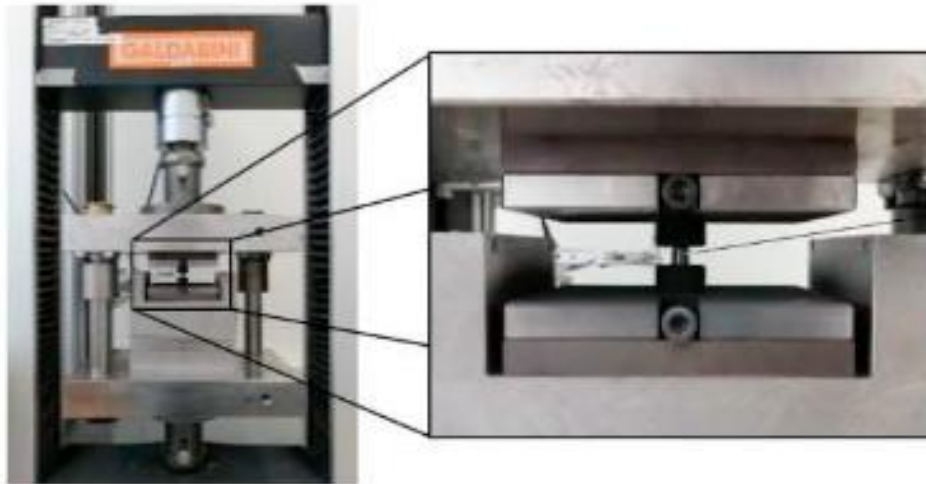


Figura 31 Ensaio de compressão (Colditz et al, 2020)

As investigações experimentais de Colditz, *et al.*, (2020), basearam-se na fabricação de um componente retangular de parede fina feito de G4Si1 utilizando o processo CMT-WAAM. O material foi aplicado na placa de base de S235JR sem pausa entre as camadas individuais. O diâmetro do fio utilizado foi de 1,2 mm, a velocidade de soldagem de 40 cm/min, velocidade de alimentação do arame de 3 mm/min, altura da camada de 1,7 mm, amperagem de 130 A, tensão de 18 V e gás de 82% Argônio e 18% CO₂. Após fabricação, foi realizado teste de compressão nos corpos de prova fabricados com o mesmo material de adição. Como resultado, foi verificado que a microestrutura sofreu alongamento e que os valores de dureza medidos também estão na faixa das amostras tratadas termicamente. Como a amostra fundida tem uma estrutura de grão ligeiramente mais grossa, a recristalização é mais rápida. Como resultado, o nível de tensão de fluxo da amostra fundida está logo abaixo do nível da amostra WAAM, conforme Figura 32.

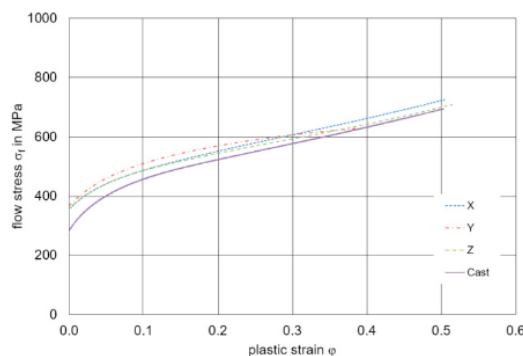


Figura 32 Nível de tensão de fluxo abaixo do nível da amostra (Colditz et al, 2020)

2.4.4 Resistência a Fadiga

A fadiga é uma falha que ocorre após a estrutura sofrer um longo período sob tensões cíclicas de deformação, com isso, a falha ocorre sob um nível de tensão cíclica no regime elástico ou limite de escoamento para uma carga estática. É uma falha que ocorre de forma repentina mesmo em metais dúcteis, possuindo natureza frágil através da iniciação e propagação de trincas. A superfície da fratura é perpendicular à direção de uma tensão de tração aplicada. As tensões cíclicas são de natureza axial (tração-compressão), de flexão ou torção, os ensaios que utilizam essas tensões são determinados pela norma ASTM 3 466 e ASTM E 468. Quanto maior a tensão, menor será o número de ciclos que o material suporta antes da falha. Para ligas ferrosas e de titânio, existe um nível de tensão limite, chamado limite de resistência à fadiga, abaixo do qual a falha por fadiga não ocorre. Esse limite representa o maior valor da tensão variável que não causará falha após infinitos ciclos e para aços, esse limite varia entre 35% e 60% do limite de resistência à tração. Alumínio, cobre e magnésio, não possuem limite de resistência à fadiga, pois de acordo com experimentos laboratoriais, foi constatado que ocorre fadiga independente da magnitude da tensão. Por isso, para esses materiais, a resposta à fadiga é tida como uma resistência à fadiga (nível de tensão que ocorre a falha para determinado número de ciclos). Além dos parâmetros citados, a vida em fadiga também caracteriza o comportamento à fadiga de um material que corresponde ao número de ciclos necessários para causar falha de acordo com um valor específico de tensão (Callister, *et al*, 2012, p.219). A figura 33 demonstra representação da montagem do ensaio.

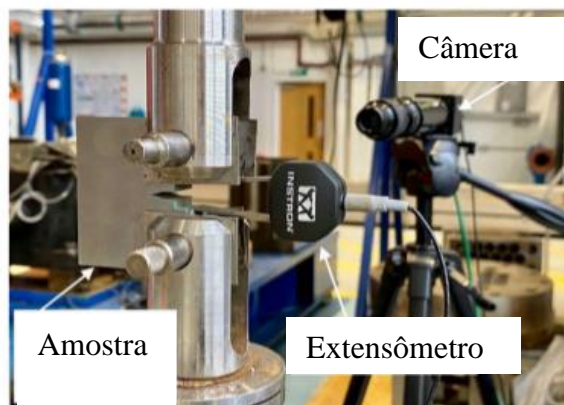


Figura 33 Montagem para ensaio de fadiga (Ermakova, et al., 2021)

Devido à fusão, solidificação e reaquecimento repetidas vezes das camadas, a técnica WAAM resulta em algumas deformações elásticas, plásticas e viscosas que afetam a degradação do material. Portanto, é crucial caracterizar o comportamento das fissuras em componentes construídos via WAAM. Devido a isso, Ermakova, *et al.*, (2021) realizou testes de crescimentos de trincas por fadiga em peças produzidas com arame ER70S-6 utilizando o processo CMT-WAAM. Durante o teste a peça foi submetida a cargas cíclicas, os dados obtidos foram encontrados com objetivo de alcançar valores menores de tendência para o padrão BS7910 e acima dos pontos de dados obtidos do material forjado S355. O material utilizado é adequado para soldagem automática e possui excelentes propriedades de soldagem, como, arco estável, alta eficiência de deposição e poucos respingos. Esse material é aplicável em reparos de aços de liga leve, tubulações de pequeno diâmetro e chapas de metal. Duas paredes foram fabricadas com os seguintes parâmetros: O gás de proteção utilizado foi o Ar+20% CO_2 , fluxo de gás de 115 kg/min, o diâmetro do fio foi de 1,2 mm, a velocidade de deslocamento do robô foi de 7,33 mm/s, velocidade de alimentação do arame de 7,5 m/min e o tempo de permanência de 120 segundos. A figura 34 demonstra o robô utilizado e a parede fabricada.

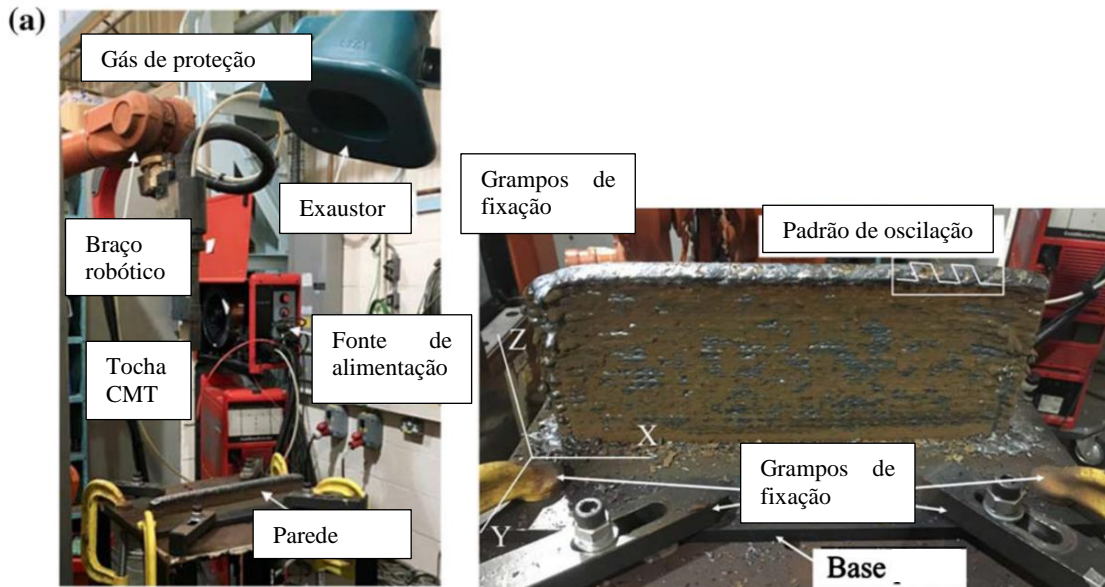


Figura 34 a) Equipamento para fabricação da peça e b) Peça fabricada por CMT Ermakova, et al., 2021)

O autor obteve com os testes de crescimento de trinca por fadiga que a extração do material da base não influencia no comportamento da trinca por fadiga. Cargas aplicadas com valores de 10kN apresentaram a vida em fadiga maior na direção de deposição horizontal, enquanto as verticais apresentaram vida em fadiga 1,3 vezes maior sob cargas de 11 kN. Além disso, na deposição vertical foi possível observar uma sensibilidade do material aos efeitos da plasticidade em níveis de carga mais altos, o que causaria regiões de fratura. A análise obteve valor abaixo das tendências recomendadas no padrão BS7910. A figura 35 apresenta as fraturas obtidas na superfície da peça para diferentes valores de carga e deposição. Na figura 35 (a) tem-se a representação obtida para deposição vertical com carga máxima de 10 kN, na figura 35 (b) tem-se para a deposição horizontal com o mesmo valor de carga, nas letras (c) e (d) tem-se a representação obtida para a carga máxima de 11 k N com deposição vertical e horizontal respectivamente.

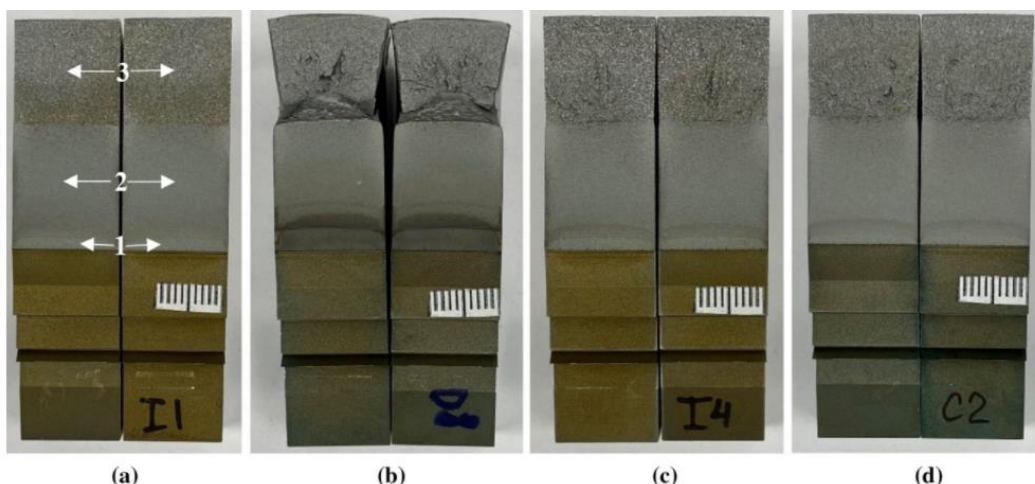


Figura 35 Deposição vertical com carga máxima de 10 kN (b) Deposição horizontal (c) Deposição vertical (d) Deposição Horizontal (Ermakova, et al., 2021)

2.5 Resistência à Tração em Peças Impressas

Para obter valores de resistência à tração de um metal, deve-se realizar ensaio de tração em um corpo de prova retirado da peça. Os ensaios de tração são feitos em corpos de prova normalizados por diferentes associações de normas técnicas, como é o caso da ABNT MB-4 e ASTM E8 que indicam as formas e dimensões dos corpos de prova para cada caso Souza, (1982). Além disso, de acordo com o site da ABNT, (2021), as seguintes normas para ensaio de tração estão em vigor:

- ABNT NBR 7549 de 2021 – Ensaio de tração do alumínio e suas ligas;
- ABNT NBR 15796-5 de 2019 – Ensaio de tração para liga superelástica;
- ABNT ISO 6892-1 de 2018 – Ensaio de Tração para materiais metálicos à temperatura ambiente;
- ABNT NBR ISO 7500-1 de 2016 – Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial;
- NM-ISO 783 de 1996 – Ensaio de tração de materiais metálicos à temperatura elevada.

A figura 36 representa um corpo de prova para ensaio de tração, deve-se ter a parte útil com seção circular ou retangular, em casos de corpo de prova retirados de placas, chapas ou lâminas possuem seção retangular com espessura igual à espessura da placa. Corpos de prova circulares são feitos se o produto acabado for de seção circular ou irregular, produzido por fundição ou tenha espessura grande. Em peças fundidas, é necessário fundir um tarugo anexo ao produto fundido para que seja usinado com o corpo de prova. Em peças laminadas e forjadas, as propriedades mecânicas variam dependendo da direção em que o corpo de prova foi retirado. O corpo de prova é composto pela parte útil, que é a região onde são feitas as medidas. E, pela cabeça do corpo de prova, onde é fixada na máquina de ensaio podendo ou não ser rosqueada, depende do tipo de garra da máquina. Souza, (1982) cita também que em materiais soldados, pode-se retirar corpos de prova com a solda no meio. Entretanto, o valor registrado é o da carga de ruptura, pois em materiais heterogêneos a determinação da parte de sofre o escoamento é duvidosa e o escoamento é afetado pela solda. Com isso, não se pode prever o local de ruptura para que seja medida a seção inicial. Caso não haja irregularidade entre a solda e o metal base, é possível calcular o limite de resistência e a estrição. É possível medir a eficiência da solda, que no caso seria o coeficiente de ruptura do material soldado e a carga de ruptura do material base em porcentagem. Se a solda for mais resistente que o material base, utiliza-se como parâmetro o alongamento do material base. Caso contrário, utiliza-se as propriedades do material da solda.



Figura 36 Corpo de prova padrão para realização do ensaio de tração (Silva, et al., 2018)

No estudo de Gierth, *et al.*, (2020), descrito anteriormente, obteve-se para o ensaio de tração da peça impressa que a resistência à tração e o alongamento à fratura das amostras tiradas da vertical são menores para os processos CMT e CMT-ADV do que para os processos horizontais. Como resultado, foi obtido o valor de resistência à tração de 266,4 MPa e 15,6% de alongamento para o processo CMT. Para o processo CMT-ADV obteve-se 282,2 MPa e 21,2%.

Foi observado também que houve diminuição da tensão no diagrama tensão deformação pouco antes da falha da amostra. Assim, a capacidade de deformação na direção vertical dos corpos de prova fabricados com os processos CMT e CMT-ADV é reduzida. Conseqüentemente, a resistência anisotrópica e as propriedades de ductilidade estão presentes nas estruturas, portanto, a direção do carregamento também tem influência na tensão máxima suportável. Com o processo CMT-PADV foi obtido um comportamento quase isotrópico da estrutura. A figura 37 representa na letra (a) o alongamento obtido para cada processo em cada direção em função do arco e na letra (b) tem-se um diagrama tensão-deformação para direção horizontal da amostra de CMT-ADV.

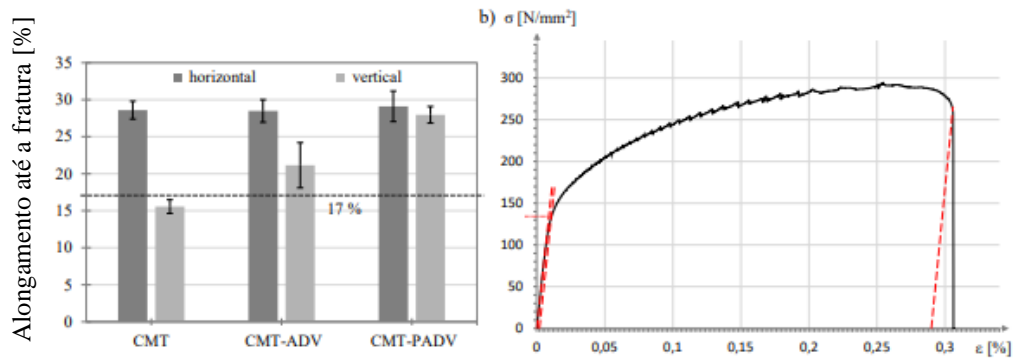


Figura 37 a) Alongamento obtido para cada processo em cada direção em função do arco e (b) Diagrama tensão-deformação para direção horizontal da amostra de CMT-ADV (Gierth, et al., 2020).

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Metodologia

Para iniciar o processo, um substrato de aço 1020 foi preparado com lixamento e limpeza da superfície para que os óxidos e sujeiras fossem retirados da superfície de contato e, para que a superfície permanecesse o mais regular possível. O substrato de aço 1020 foi utilizado devido ao material ser compatível com o material de adição e por possuir melhor custo-benefício. Posteriormente, o substrato foi fixado na mesa de trabalho com auxílio de parafusos para que durante o procedimento não houvesse deslocamento da base, logo após, a fonte CMT foi configurada. O código de programação G foi ajustado para que a deposição das 100 camadas fosse permitida. A quantidade de camadas foi determinada com base no estudo realizado pelo Novelino (2021), no qual obteve-se uma peça final de perfil estável utilizando essa quantidade de camadas. Com os itens iniciais adequados, o robô cartesiano foi posicionado de acordo com a posição da base metálica para que o processo de deposição fosse iniciado.

Após a deposição das camadas foi necessário medir altura e largura das paredes, e como foram fabricadas 3 paredes, uma de pré-teste e outras duas, sendo que uma delas passou por tratamento térmico de recozimento descrito no trabalho de Rebouças (2022), a parede 1 foi escolhida para ser utilizada neste estudo. Logo após, cada parede passou pelo processo de usinagem para que houvesse faceamento da superfície e com isso, fosse alcançada a espessura desejada para os corpos de prova. Os corpos de prova foram retirados da parede através do corte a jato d'água abrasivo, pois este processo tem menos impacto na alteração das propriedades mecânicas dos corpos de prova (CPs).

Foram realizadas medições das dimensões dos CPs com objetivo de verificar se o procedimento a jato d'água seguiu as dimensões informadas. Além disso, foi realizada a medição da rugosidade de 3 regiões dos corpos de prova utilizando um Rugosímetro e verificada a dureza de cada CP.

Ao realizar todas as etapas descritas, o ensaio de tração foi realizado gerando os resultados necessários para se obter as propriedades mecânicas da peça fabricada por manufatura aditiva. Após passar pelo procedimento, a fratura foi analisada utilizando o MEV. No fluxograma da Fig. 38, tem-se um resumo visual de todas as etapas descritas para obtenção do corpo de prova.

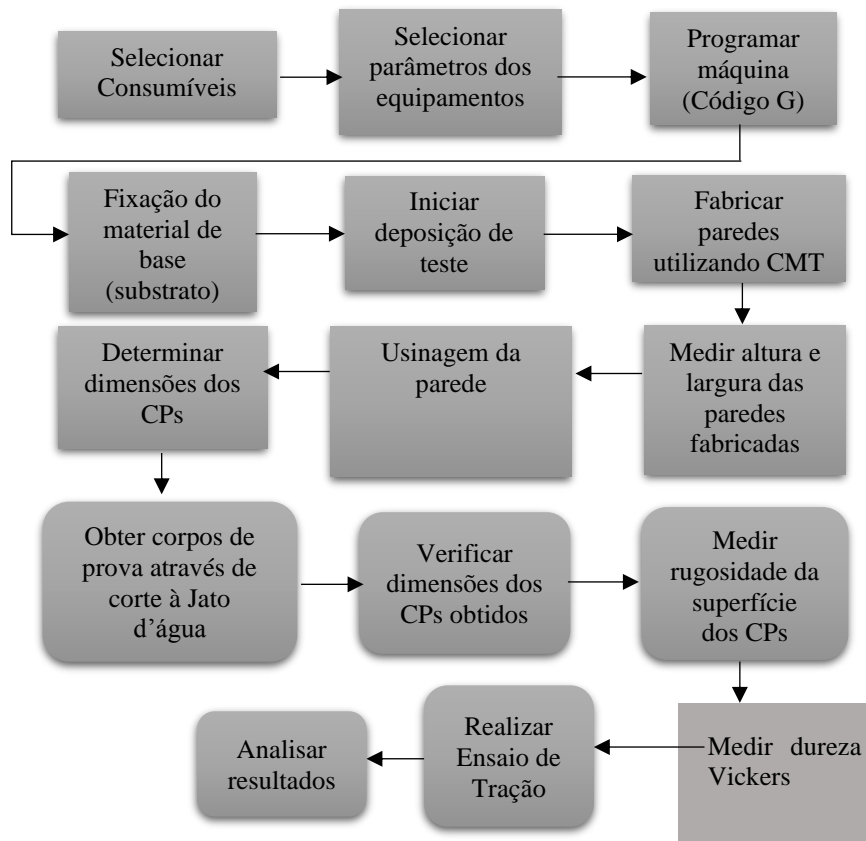


Figura 38 Fluxograma

3.2 Equipamentos e Consumíveis

O equipamento responsável por conduzir a deposição do material ao longo da base é o robô cartesiano MAXR23-S42-H42-C42 da Schneider Electric, conforme Fig. 39, permitindo que a deposição ocorra nas direções X, Y e Z com volume de trabalho de 750x540x480 mm e resolução de 0,1 mm, o código G é utilizado para programar a trajetória a ser percorrida.

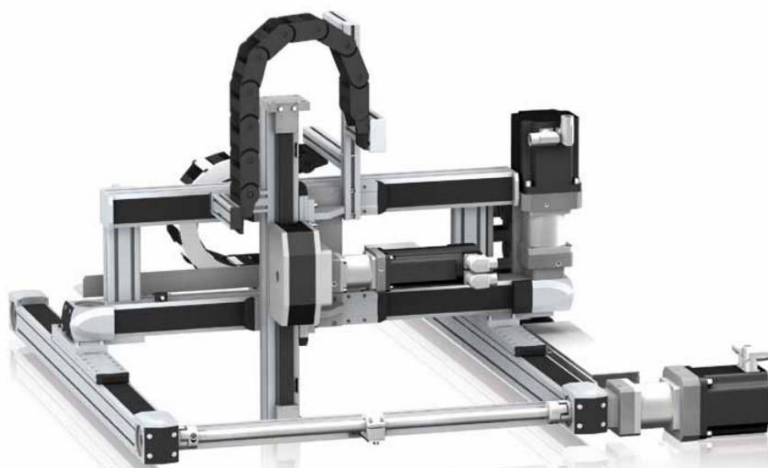


Figura 39 Robô cartesiano MAXR-23-S42-H42-C42 (Schneider Electric, 2009)

O consumível utilizado é o arame ER70S-6 (material de deposição) com 1,20 mm de diâmetro e gás de proteção utilizado é o Ar+18% CO₂, com vazão de 15 l/min. A composição

e propriedades mecânicas do arame ER70S-6 estão representadas na Tabela 1, a especificação mais detalhada do arame encontra-se no Anexo I.

Composição química típica do arame (%)			Propriedades mecânicas - Valores típicos (valores mínimos)			
C	Mn	Si	Limite escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento %	Resistência ao impacto Charpy-J (-30°C)
0,07	1,5	0,85	450 (≥ 420)	575 (≥ 500-640)	30 (≥ 20)	≥ 27

Tabela 1 Propriedades do arame ER70S-6 (BOEHLER, 2022)

Os parâmetros de deposição utilizados para corrente foi de 57 A e tensão de 18,3 V. Todos os parâmetros foram utilizados com base nos estudos de Novelino (2021), que após tentativas e análises de cordões fabricados, obteve os melhores resultados com os valores utilizados citados.

Acompanhado do robô, é utilizada a fonte TransPuls Synergic 5000 CMT da empresa Fronius que possui controlador remoto, alimentador de arame, fonte, gás de proteção e unidade de refrigeração, conforme mostrado na Fig. 40. A fonte possui pacote funcional para o processo CMT consistindo em *hardware* e *software*, é controlada digitalmente. O sistema possui fácil operação devido a simplicidade no manuseio do controlador remoto, neste controlador, são definidos parâmetros de trabalho como corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame. A unidade de refrigeração é responsável pela refrigeração da tocha, sendo disponível na versão de água refrigerada (Fronius, 2013).

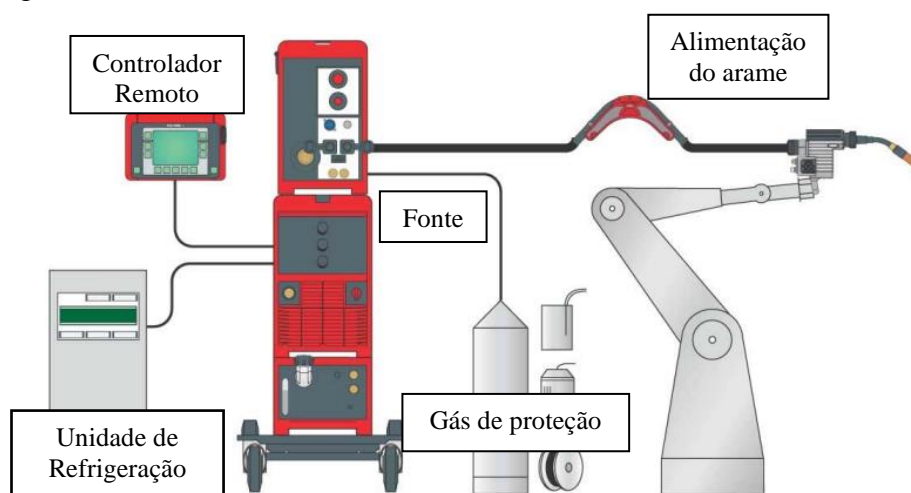


Figura 40 Fonte TransPuls Synergic 5000 CMT (Adaptado de Fronius, 2013)

A máquina MTS 810 foi utilizada para realização do ensaio de tração e, o equipamento é controlado por um computador central que aciona a bomba principal para que o atuador hidráulico seja acionado também. Possui um sensor de deslocamento e controla a carga, deslocamento, amplitude e frequência, o ensaio é programado no atuador hidráulico e os dados referentes à carga aplicada são enviados ao computador por intermédio da célula de carga (MTS, 2004). O *software* utilizado para aquisição de dados é o Station Manager que permite além da leitura de dados, selecionar a taxa de aquisição de dados necessários, que para o estudo é de 10 Hz. A Figura 41 mostra os componentes do equipamento.

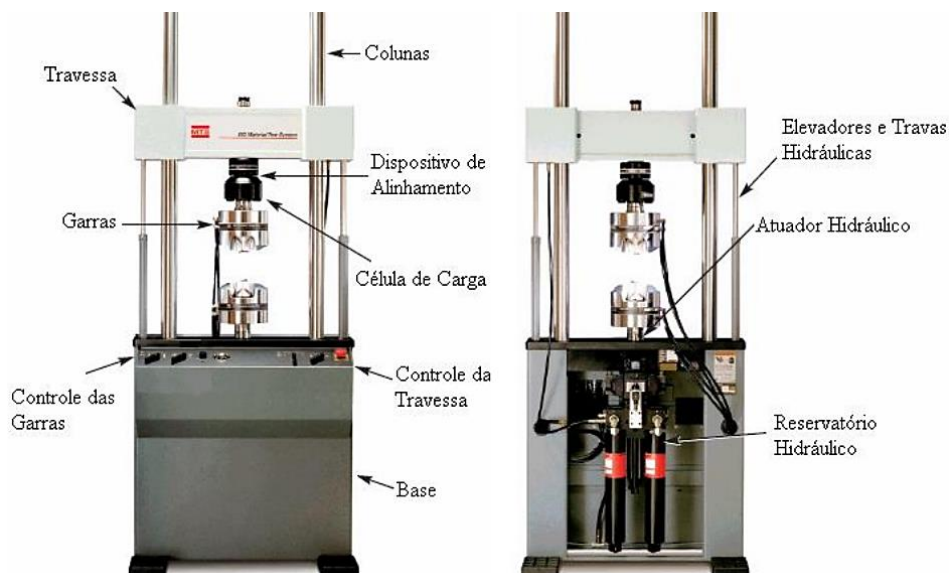


Figura 41 Máquina de ensaio universal MTS 810 (Nascimento, 2013)

O equipamento de medição de dureza *Vickers* também foi utilizado para verificar a dureza na cabeça dos corpos de prova depositados na vertical, possuindo sua seção transversal ortogonal à direção de deposição. Além disso, foi utilizado o Rugosímetro para análise da superfície dos corpos de prova quanto a presença de descontinuidades. O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV JSM-7100F) foi utilizado conforme Figura 42, com intuito de verificar a área fraturada do corpo de prova. Nessa área podem ser verificadas as regiões das trincas, *dimples* (microcavidades), clivagem e tipo de fratura.



Figura 42 Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL, 2012).

3.3 Método de Deposição

O início do processo de deposição ocorreu através da preparação dos equipamentos, sendo que, a fonte CMT, o gás de proteção e a inserção do arame de deposição foram os primeiros a serem preparados conforme desejado. Após este preparo, o código G foi adaptado para que fosse possível realizar a deposição das 100 camadas e o robô cartesiano foi posicionado de acordo com a base que estava fixa na mesa de trabalho. Esse posicionamento ocorre para que o robô esteja pronto para realizar as deposições na direção e coordenadas desejadas. A Figura 43 apresenta a esquematização da montagem do processo.

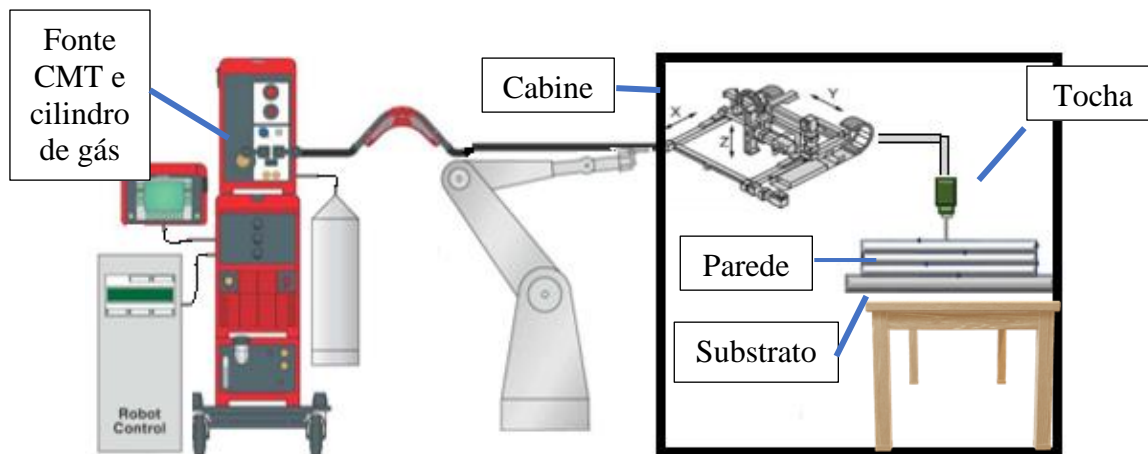


Figura 43 Esquemática da montagem para realizar deposições

Os parâmetros de entrada da fonte CMT foram obtidos a partir do estudo realizado por Novelino (2021). Para a deposição das camadas, o método utilizado foi a deposição contínua bidirecional sem interrupção do arco elétrico utilizando o método CMT, devido ao seu elevado controle durante a deposição e nesse tipo de deposição o arco elétrico é mantido ativo. Conforme estudo de Novelino (2021) foi observado que a deposição com 45° (empurrando) e de 135° (puxando) não apresentou resultados satisfatórios, portanto, a inclinação utilizada da tocha foi a de 90° (reto). As paredes obtidas possuem 84 mm de altura e 180 mm de largura, com velocidade de subida de uma camada para outra subsequente de aproximadamente 24 mm/s e velocidade de deslocamento de 8 mm/s. Durante a deposição também há variação nos parâmetros de entrada devido a fonte CMT ajustar automaticamente para se obter uma deposição mais estável. A Figura 44 representa a deposição contínua bidirecional sendo feita por uma tocha de 90° .

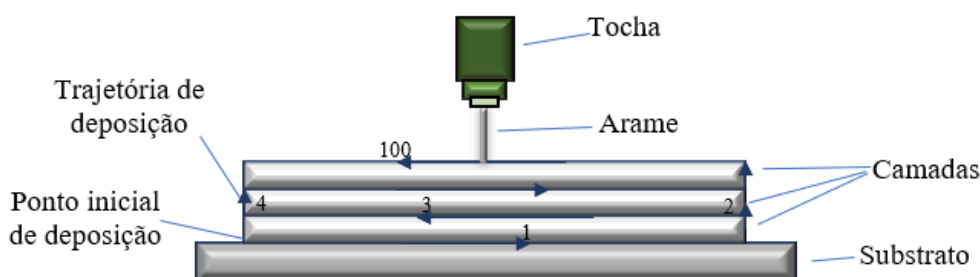


Figura 44 Ilustração da deposição com arco contínuo utilizando tocha a 90°

3.4 Método de Medição das Paredes

Após fabricação das paredes, foi realizada medição de altura e largura em 9 pontos espaçados entre si em aproximadamente 15 mm. Essas medições foram realizadas com objetivo de traçar um gráfico para verificar o perfil das paredes. O espaçamento de 15 mm foi definido com base no trabalho do Novelino (2021), que verificou que espaçamentos menores não apresentou variações.

Foram realizadas 3 medições em cada ponto para que fosse obtida a média da altura e da largura, foi utilizado um paquímetro da marca Ford ® (resolução de 0,05 mm e faixa nominal de 150 mm). De acordo com a ABNT NBR NM ISO 1 (ABNT, 1997), a temperatura padrão de referência para medições dimensionais é de 20°C , entretanto, as medições foram realizadas em um local com aproximadamente 26°C . Com isso, através da Regra Empírica de confiança de 99,73%, foi calculado o desvio padrão para cada ponto. A Fig. 45 apresenta esquematicamente a parede fabricada e os pontos medidos.



Figura 45 Representação dos pontos medidos

3.5 Usinagem

Com objetivo de obter a planificação da superfície da parede, o procedimento de usinagem da peça foi realizado através da máquina TOS KURIM FA3A que realizou o processo de fresamento. A ferramenta de corte utilizada foi ROCAST DIN 844K de diâmetro de 25 mm (ROCAST, 2022) (Anexo II). A parede foi submetida a esse procedimento devido a superfície apresentar elevada rugosidade ocasionada pelo método de fabricação utilizado. Portanto, o processo de usinagem ocorreu até que fosse obtida a planificação da superfície até atingir a espessura desejada de aproximadamente 2,3 mm.

Durante o processo, a rotação da máquina foi de 700 rpm, ocorrendo no sentido da direção de deposição, e descida de 0,5 a 0,1 mm nas passagens da ferramenta de corte. A velocidade de corte variou de 28 m/s a 80 m/s, essa variação ocorre devido as necessidades do processo de acabamento, a velocidade diminui no avanço e no desbaste aumenta. Não foi utilizado fluido de corte, e houve aquecimento da peça de até 84°C durante o processo.

Para realização do processo, inicialmente a parede foi fixada na máquina através de grampos de fixação em suas extremidades e logo em seguida, a ferramenta de corte percorreu toda a parede no sentido da direção de deposição, e posteriormente em suas laterais para um melhor acabamento, conforme esquematização na Fig 46.

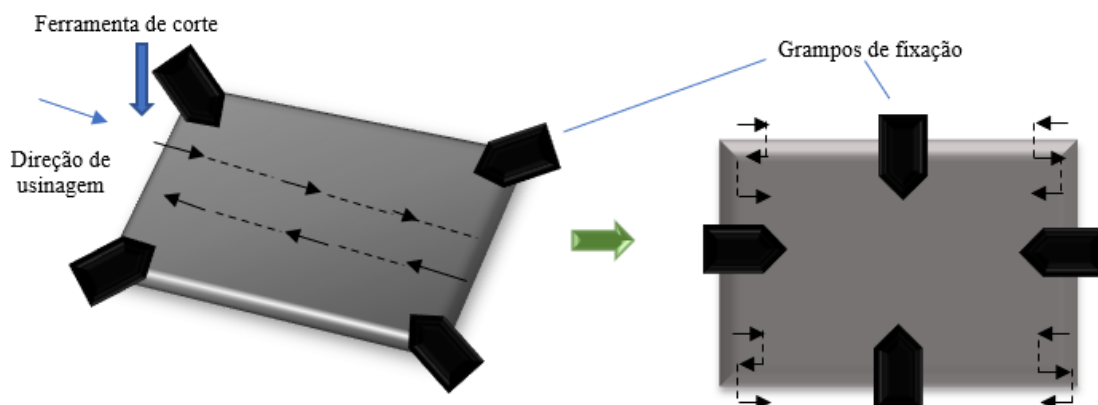


Figura 46 Esquematização do processo de usinagem

3.6 Fabricação dos Corpos de Prova

Para que os corpos de provas fossem dimensionados, foi utilizada a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2013) como base. Como o intuito é extrair corpos de prova horizontais e verticais, as dimensões apresentadas na norma não se mostram adequadas para o tamanho da parede fabricada e por isso, foi realizada uma adaptação nas dimensões, baseando-se nas dimensões especificadas para corpos de prova em miniatura apresentadas na norma. A Figura 47 apresenta a geometria utilizada.

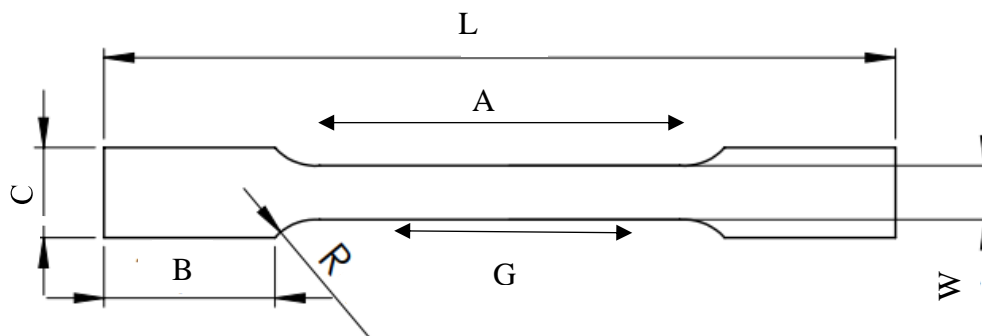


Figura 47 Geometria e dimensões dos corpos de prova (ASTM, 2013)

Como foi necessário realizar adaptações nas dimensões, foi necessário também a base de aço 1020 para que a região a ser extraída os corpos de prova fossem um pouco maior e os corpos de prova não fossem tão pequenos. Feita essa mudança, ainda sim os valores sugeridos pela norma não se enquadrariam na área disponível e, portanto, foi necessário realizar adaptações em algumas das medidas para que fosse possível obter a peça desejada. A tabela 2 apresenta as dimensões do corpo de prova conforme a norma e as dimensões utilizadas.

	Comprimento Total (L) [mm]	Comprimento útil (G) [mm]	Comprimento paralelo (A) [mm]	Comprimento da cabeça (B) [mm]	Altura da cabeça (C) [mm]	Raio (R) [mm]
Medidas utilizadas após adaptação	80,94	32,00	42,00	15,00	10,00	6,00
Medidas descritas na norma	100,00	25,00	32,00	30,00	10,00	6,00

Tabela 2 Dimensões para os corpos de prova horizontais e verticais

Observa-se que o raio e altura da cabeça não necessitou ser modificado, pois são tamanhos ideais para o tamanho da parede fabricada. O restante dos valores necessitou ser modificado devido a área disponível na parede.

3.6.1 Extração dos Corpos de Prova

Após a usinagem ter sido realizada e as dimensões dos corpos de prova determinados, foi realizado o corte a jato d'água abrasivo para extrair os CPs na geometria desejada da parede fabricada. Este método foi escolhido devido ao baixo impacto que apresenta em relação as alterações das propriedades das peças e, não interage diretamente com a peça quando se trata de contato (ferramenta-peça), não gerando calor na área de corte e as forças de corte

apresentam-se reduzidas, tais características tornam esta uma boa opção quando não se deseja alterar as propriedades mecânicas da peça (Hascoet, 2021).

Foi utilizada uma das paredes fabricadas para retirar os corpos de prova, portanto, foram retirados 6 corpos de prova verticais e 6 horizontais. Para melhor aproveitamento do espaço, o substrato foi mantido e utilizado como parte da parede para extração dos corpos de prova. A Figura 48 apresenta a esquematização e a quantidade a ser retirada em ambas as direções.

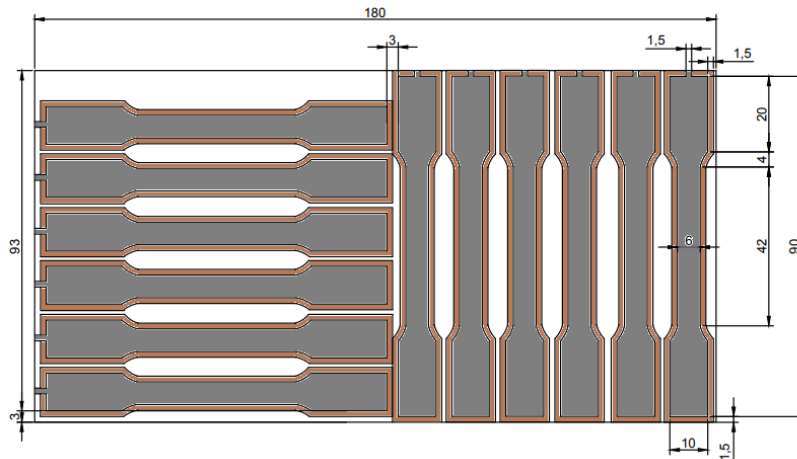


Figura 48 Quantidade de corpos de prova a serem retirados em ambas as paredes

Ao obter os corpos de prova recortados por Jato d'água, foi necessário realizar lixamento de toda superfície para melhor acabamento. Devido ao processo de usinagem utilizado, a superfície apresentou irregularidades relevantes que influenciaria o ensaio de tração. Portanto, foram utilizadas lixas P120, P200 e P400 durante o acabamento da superfície. Na esquematização abaixo na Fig. 49, é possível observar melhor como foi todo o processo desde a extração até o acabamento.

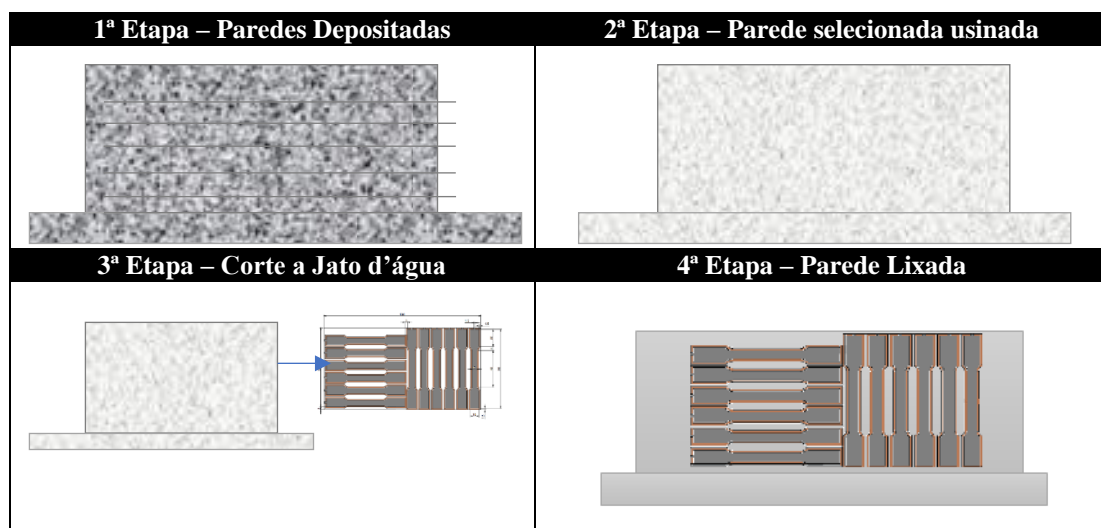


Figura 49 Etapas do processo

3.6.2 Método de Medição da Rugosidade

Após o lixamento de toda a peça, a superfície encontra-se agora mais uniformizada sendo possível medir a rugosidade obtida antes de a peça ser submetida ao ensaio de tração. Sendo assim, para medição da rugosidade superficial foi utilizado o rugosímetro Mitutoyo SJ-201 com

comprimento das amostragens *cut-off* de 2,5 mm, conforme ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008).

Foram selecionados 3 corpos de prova da direção vertical conforme resfriamento das camadas durante a deposição. Portanto, o primeiro CP escolhido foi o do topo da deposição (CP 2), onde a zona termicamente afetada resfriou por último, logo em seguida o CP 4 e por último o CP 6, que resfriou primeiro comparado com o restante. De acordo com a Fig. 50, os CPs selecionados (CP 2, CP 4 e CP 6) podem ser observados, assim como a sua posição em relação aos demais.

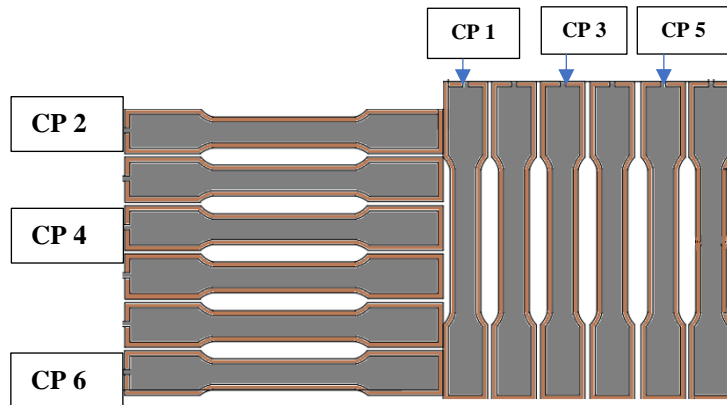


Figura 50 Corpos de prova selecionados

Com os CPs selecionados, foram feitas medições de dez pontos referentes a rugosidade aritmética (R_a), rugosidade quadrática média (R_q), e rugosidade de pontos principais (R_z). Os parâmetros foram escolhidos com base no estudo de Todhunter et al., (2017) que cita esses como os parâmetros mais utilizados na indústria até 2016.

As medições foram realizadas em três regiões diferentes para que fosse possível compará-las posteriormente, após obter seus valores médios e desvio padrão. As medições foram realizadas em ambiente com temperatura controlada de $22,5\text{ °C} \pm 1,5\text{ °C}$. Conforme Fig. 51, podem ser observadas as regiões que foram submetidas as medidas de rugosidade, cada cor representa uma região, a cor amarela a região 2, cor vermelho vinho a região 1 e cor azul a região 3.

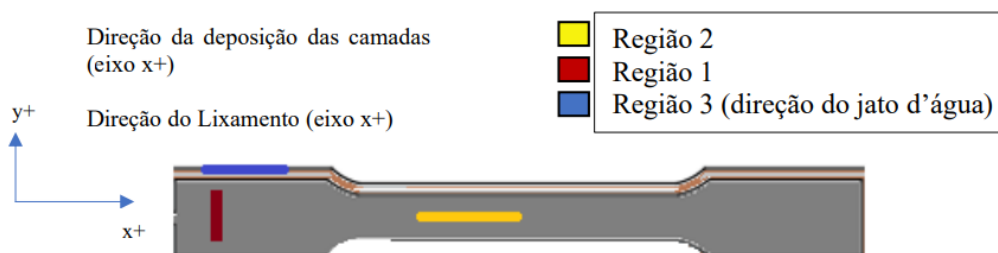


Figura 51 Regiões com rugosidade medida

3.6.3 Método de Medição da Dureza

A partir do ensaio de microdureza em uma peça, é possível obter um indicador de sua resistência ao desgaste. É considerado um ensaio não destrutivo desde que a integridade da amostra não seja afetada (Norton, 2013). Para este estudo foi realizado o ensaio de dureza *Vickers* com base na norma ISO 6507-1 (ISO, 2018) que indica a sua competência para selecionar a metodologia e interpretar os valores obtidos.

As medidas foram realizadas utilizando um microdurômetro Emco Test DuraScan com penetrador piramidal e força de 0,5 kgf. O espaçamento entre as impressões foi de 2,5 vezes o valor da diagonal, tornando assim o espaçamento de 4 mm entre cada ponto. As medidas foram feitas nos CPs 1, 3 e 5 somente na cabeça superior do CP para que não afetasse o comprimento útil do corpo de prova, pois ainda seria realizado o ensaio de tração. Foram determinados 5 pontos de medida e em seguida foi realizada a média aritmética, conforme Fig. 52.

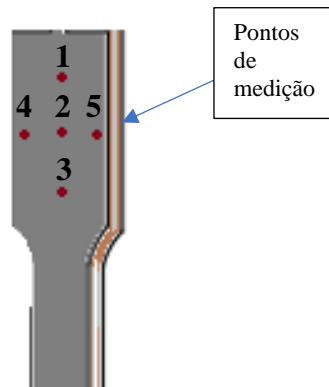


Figura 52 Pontos de medição da dureza

3.7 Ensaio de Tração

O ensaio de tração teve como base a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2013) que descreve como proceder em testes de tensão para materiais metálicos. Durante o ensaio, o corpo de prova é fixado em suas extremidades a uma máquina de ensaio de tração, e é submetido a esforços crescentes axiais até que atinja sua ruptura.

A partir deste ensaio é possível obter a resistência à tração da peça, ao gerar um gráfico tensão x deformação a partir da carga aplicada e, localizar a área de estrição do corpo de prova conforme alongando. A tensão aplicada utilizada como base foi de 480 MPa para peças sem tratamento térmico, conforme estudo de Nemani et al, (2017). A velocidade de deslocamento relativo entre as garras utilizada foi de 1 mm/min e utilizado também um extensômetro do tipo *clip-gage* para medir a deformação durante o ensaio.

3.8 Técnica de Excitação por Impulso

Através do *Software* Sonelastic 3.0 foi realizada a técnica de excitação por impulso, que consiste em caracterizar de forma não-destrutiva os módulos elásticos e do amortecimento de materiais de acordo com a norma ASTM E1876. O ensaio é realizado da seguinte maneira: um analisador de vibrações transitórias extrai as frequências para o cálculo dos módulos elásticos e as respectivas taxas de atenuação para o cálculo do amortecimento. O *software* identifica quais são as frequências de vibração e os respectivos amortecimentos mediante o processamento da resposta acústica do corpo a uma excitação mecânica por impulso (ATCP Engenharia Física, 2014).

Foram realizados 11 ensaios em um corpo de prova aleatório e com isso, foram obtidos os dados referentes ao módulo de *Young* flexional, sua incerteza, frequência e amortecimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da Deposição

Durante a deposição, há alteração dos parâmetros e o valor de parâmetros informados são valores médios que o equipamento utiliza, foram depositadas 100 camadas sobrepostas até que fosse formada uma parede vertical. Foi depositada uma parede de pré-teste para verificação da qualidade da camada antes de iniciar de fato a fabricação das paredes. E logo em seguida, fabricadas duas paredes verticais com dimensões de 84 mm de altura e 185 mm de comprimento, conforme mostrado na Figura 53.

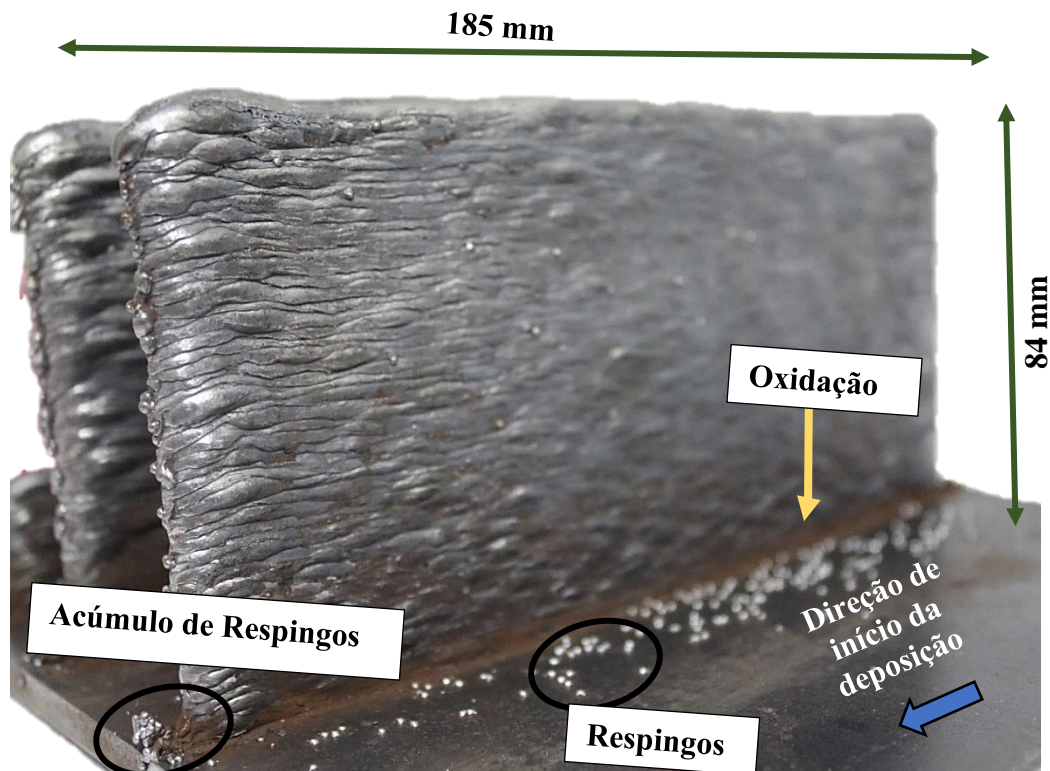


Figura 53 Dimensões e características da parede

Além das dimensões, na Figura 53 são observadas irregularidades, ou seja, as características físicas não apresentam homogeneidade ao longo da parede, como é o caso da oxidação e da irregularidade da superfície. Mesmo com a utilização do gás de proteção, vê-se a presença de oxidação devido ao ambiente ser rico em oxigênio.

Apesar do processo CMT promover menor quantidade de respingos comparado com o GMAW convencional no estudo feito por Rault, et al., (2020), durante o processo de deposição, observa-se ainda na Figura 53 que houve grande quantidade de respingos ocorridos na parte direita da figura, onde iniciou o processo de deposição. Ao final, ao lado esquerdo da figura observa-se diminuição desta quantidade, entretanto, há uma quantidade de material acumulado nessa parte final que ocorre naturalmente devido a deposição do material finalizar sempre nas extremidades. Como se apresentam de forma padrão, uma proposta para ocorrência deles é a configuração dos parâmetros utilizados.

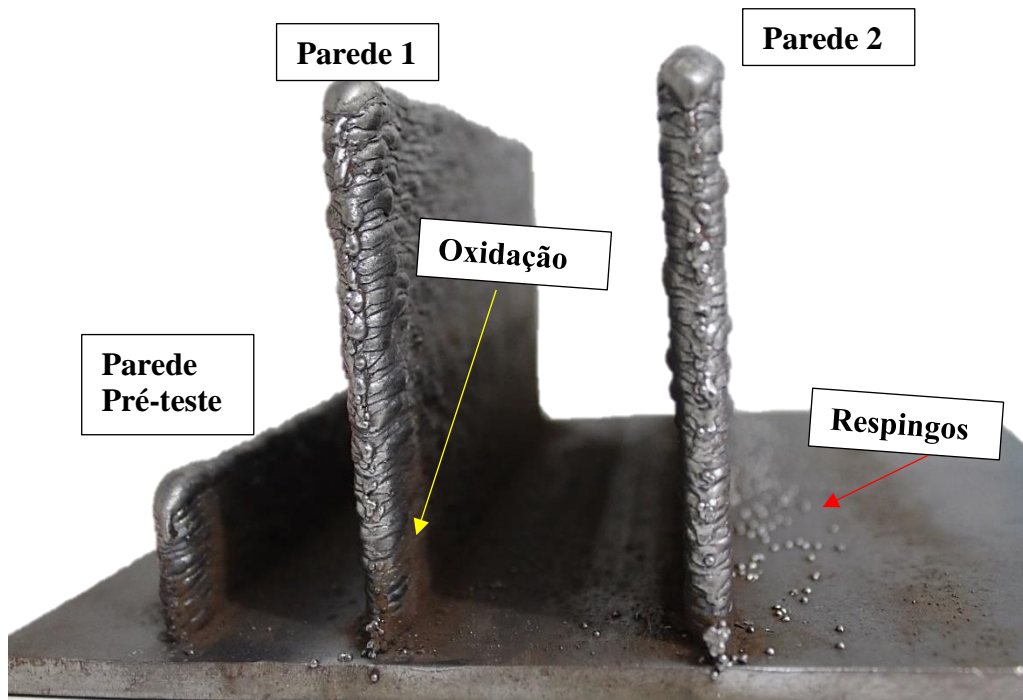


Figura 54 Oxidação e respingos das paredes

É possível observar na Fig. 54, os pontos onde ocorrem a oxidação e os respingos. Além disso, é possível observar a irregularidade na superfície das paredes, assim como, um acúmulo de material nas bordas das paredes. Na parede de pré-teste a borda aparece com a geometria similar a uma gota na camada superior devido a interrupção abrupta do processo.

Nas paredes 1 e 2 os acúmulos nas bordas são similares, como a deposição corre de baixo para cima, as camadas iniciais apresentam pouco escorrimento nas bordas, entretanto, conforme a parede fica maior o acúmulo nos cordões superiores aumenta. Isto ocorre provavelmente devido ao maior aporte térmico gerado pela configuração do processo.

A irregularidade ao longo de toda área da superfície ocorre devido a instabilidades do arco, e ao olhar pela vista superior das paredes, observa-se que as paredes apresentam espessuras similares. Devido a irregularidade, ocorre uma diferença de altura ao longo das paredes, pois, em determinados a quantidade de material depositada foi maior, essa maior deposição ocorre principalmente na região correspondente a metade das paredes, conforme Figura 55. Além disso, é observável a ocorrência do rechupe de cratera, conforme descrito pela N-1738 (Petrobrás, 2003) na parede 1, apontado na figura pela seta vermelha. Esse fator ocorre quando o material é contraído durante a solidificação, onde é gerada uma região não preenchida.

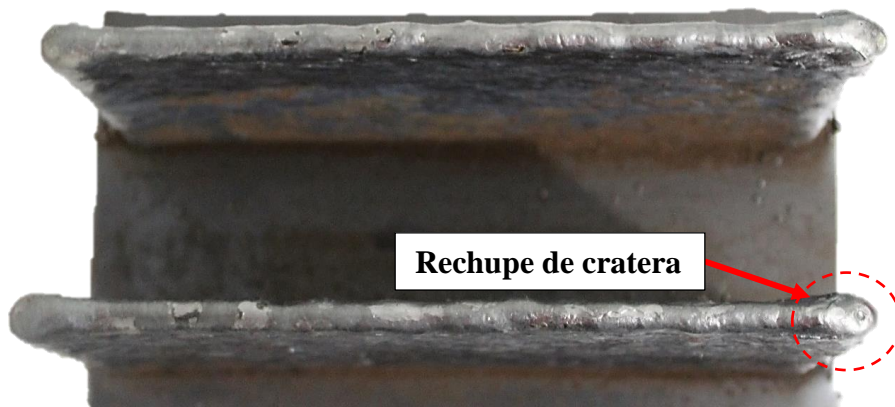


Figura 55 Vista superior e rechupe de cratera na parede 1

4.2 Medição do Perfil da Peça

Os pontos foram medidos apenas na parede utilizada para extração dos corpos de prova, na Fig. 56 é possível observar os pontos que foram medidos e a tabela 3 apresenta os valores obtidos para as alturas e desvios padrões obtidos. Ao comparar os resultados obtidos na tabela 3 com o trabalho do Novelino (2021) e Pimenta (2022), observa-se que a média da altura e a média da largura obtida por eles foram respectivamente de 85,46 mm de altura e 7,26 mm de largura e 87,41 mm altura e largura 7,50 mm. As paredes medidas pelo Novelino (2021) apresentam variação de 24% na largura e 9,4% na altura, quando comparadas com os valores apresentados, já o de Pimenta (2022) apresenta 7,34% na altura e 22% na largura.

Essa variação ocorre devido à altura da parede utilizada não ter sido separada do substrato para melhor aproveitamento da região para obter os corpos de prova e, portanto, na altura considera-se a base de 6 mm. Já a grande variação obtida nas medidas da largura deu-se devido aos pontos 1 e 9 apresentarem maior acúmulo de material depositado em relação aos pontos próximos, levando a um resultado maior de largura.

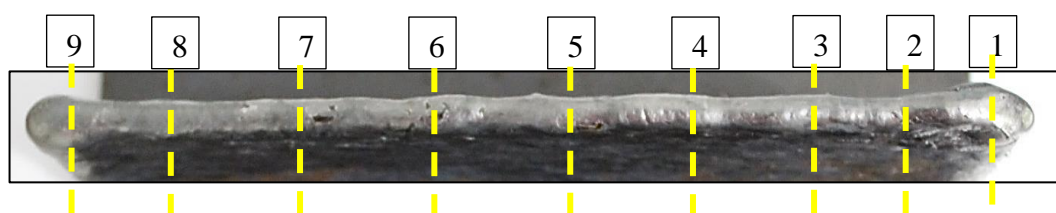


Figura 56 Pontos de medições de altura e largura da Parede

Altura (mm)										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Média
Média	93,57	93,57	94,17	94,60	95,30	94,93	95,07	94,03	93,77	94,33
DP	0,513	1,069	0,289	0,557	0,608	0,058	0,153	0,058	0,058	0,63
Largura (mm)										
Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Média
Média	10,12	9,81	9,51	9,61	9,82	8,31	9,75	9,01	11,01	9,66
DP	0,015	0,012	0,006	0,017	0,006	0,006	0,005	0,006	0,005	0,70

Tabela 3 Valores medidos da parede 2

Após cálculo das médias para altura e desvio padrão, foram traçados gráficos para verificar o perfil de cada parede, com as respectivas barras de erro conforme mostrado nas Figuras 57 e 58.

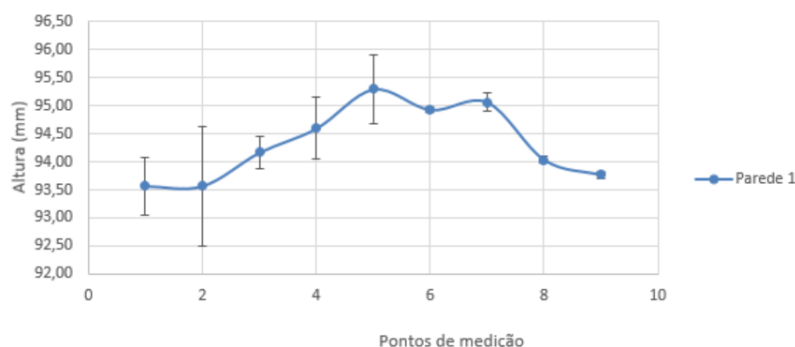


Figura 57 Perfil das paredes utilizando medições da altura

Na Figura 58, observa-se que nos primeiros pontos a altura apresenta valor mais baixo e com o passar do comprimento da peça ele aumenta, até atingir um pico no ponto 5 e a partir do ponto 7 inicia-se o decaimento novamente. O decaimento ocorre devido a interrupção do processo, quando a quantidade de material está diminuindo para o processo finalizar e a maior quantidade de material no meio da peça é em decorrência da instabilidade do arco.

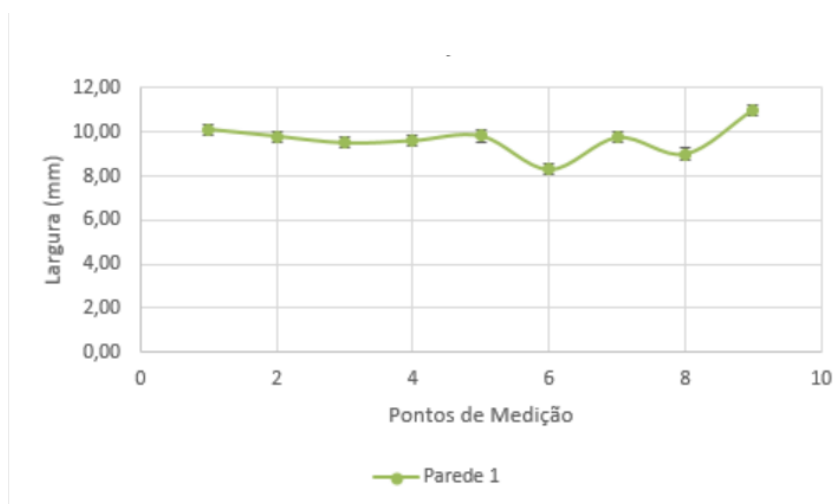


Figura 58 Perfil das paredes utilizando medições da largura

Em relação as medidas feitas na largura da parede, Figura 58, observa-se uma estabilidade no início da deposição. A parede inicia com um decaimento de largura após o primeiro ponto e a partir do ponto 5 há um aumento de largura, em que visualmente é possível observar alteração na altura da parede, que conseqüentemente neste caso, aumentou a quantidade de material na largura da parede também.

De acordo com a visualização gráfica, considera-se a parede com características razoáveis de largura e altura das camadas depositadas, quando comparado com o trabalho de Pimenta (2022), pois não apresentou maior continuidade em uma maior quantidade de pontos. O fato de a parede ter tido uma irregularidade no meio e logo em seguida ter tido um ganho muito significativo de espessura caracteriza o processo como instável. Além disso, essa conclusão se reforça com base nas variações significativas quando comparado com o estudo de Pimenta (2022) e Novelino (2022) de cerca de 20% nas medidas da largura.

4.3 Etapas realizadas para obtenção do Corpo de Prova

4.3.1 Usinagem

O processo de usinagem iniciou-se com a tentativa de usinar a parede no torno, entretanto, não foi possível devido a parede apresentar valor baixo de espessura e por isso, a peça durante o procedimento sofreu deformação. Optou-se então por realizar fresamento. A Fig. 59 apresenta a tentativa de usinagem da peça no torno, onde é possível observar afinamento na região central e maior quantidade de material nas extremidades, além disso, é possível observar marcas profundas nas regiões usinadas.

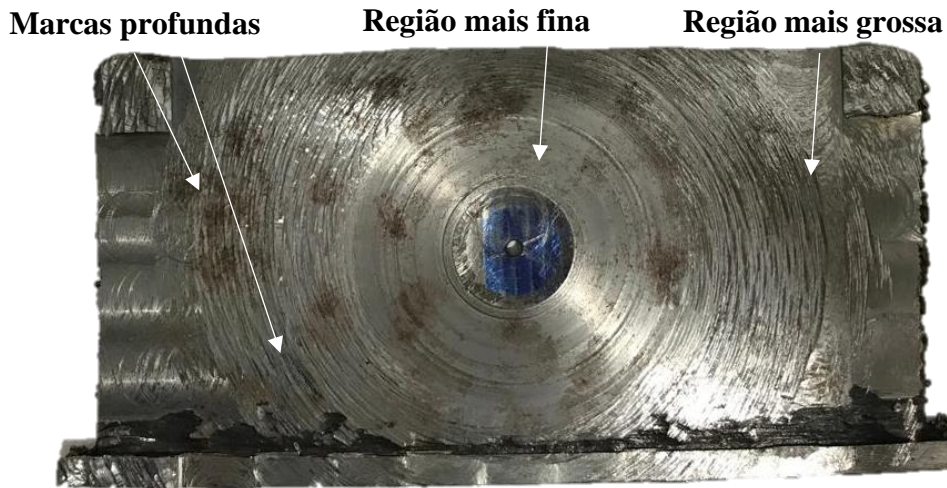


Figura 59 Peça usinada com torno

Não foi utilizado fluido de corte no processo e portanto, a temperatura na peça foi monitorada, a maior temperatura apresentada durante o processo foi de 85,4 °C, medido com a câmera termográfica FLIR Cx-Series, e tal valor não é suficientemente alto para que a estrutura da peça fosse alterada conforme Fig. 60.

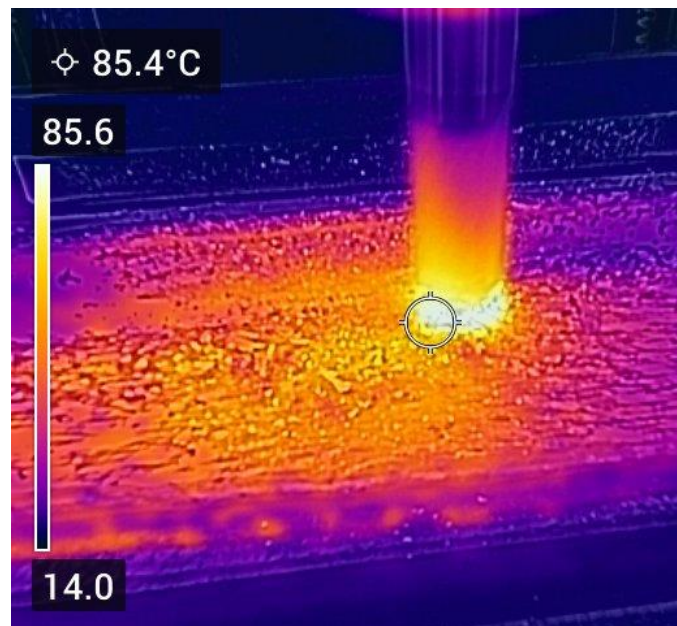


Figura 60 Temperatura no momento da usinagem

Para que o processo fosse iniciado, a peça foi fixada na máquina através de grampos fixadores com parafusos e porcas em suas laterais, a ferramenta de corte devidamente colocada e os parâmetros iniciais regulados. Antes da usinagem a peça foi pesada e apresentou valor de 800 gramas, no final do processo a peça foi medida novamente e apresentou peso de 310 gramas, uma redução de 38,75%. Com isso, houve a diminuição considerável da espessura, conforme pretendida para o corpo de prova e a qualidade da superfície apresentou significativa melhora, pois os desníveis na superfície e respingos foram eliminados. Devido a média da espessura ter sido de 9,33 mm e o desejável para o corpo de prova ser de aproximadamente 2 mm, a necessidade dessa retirada de material durante a usinagem pode ser contornada através das alterações nos parâmetros de deposição para que seja evitado o desperdício do material.

As etapas do processo de usinagem são demonstradas na Fig. 61. Na primeira etapa, observa-se a peça fixada com os grampos, na segunda etapa tem-se a ferramenta de corte

percorrendo a superfície da peça de acordo com a direção de deposição, logo em seguida na terceira etapa tem-se o produto quase finalizado por completo e na última etapa o resultado da peça totalmente usinada. Na etapa final, apesar de totalmente usinada, a peça apresentou muita irregularidade em sua superfície sendo necessário posteriormente realizar lixamento.

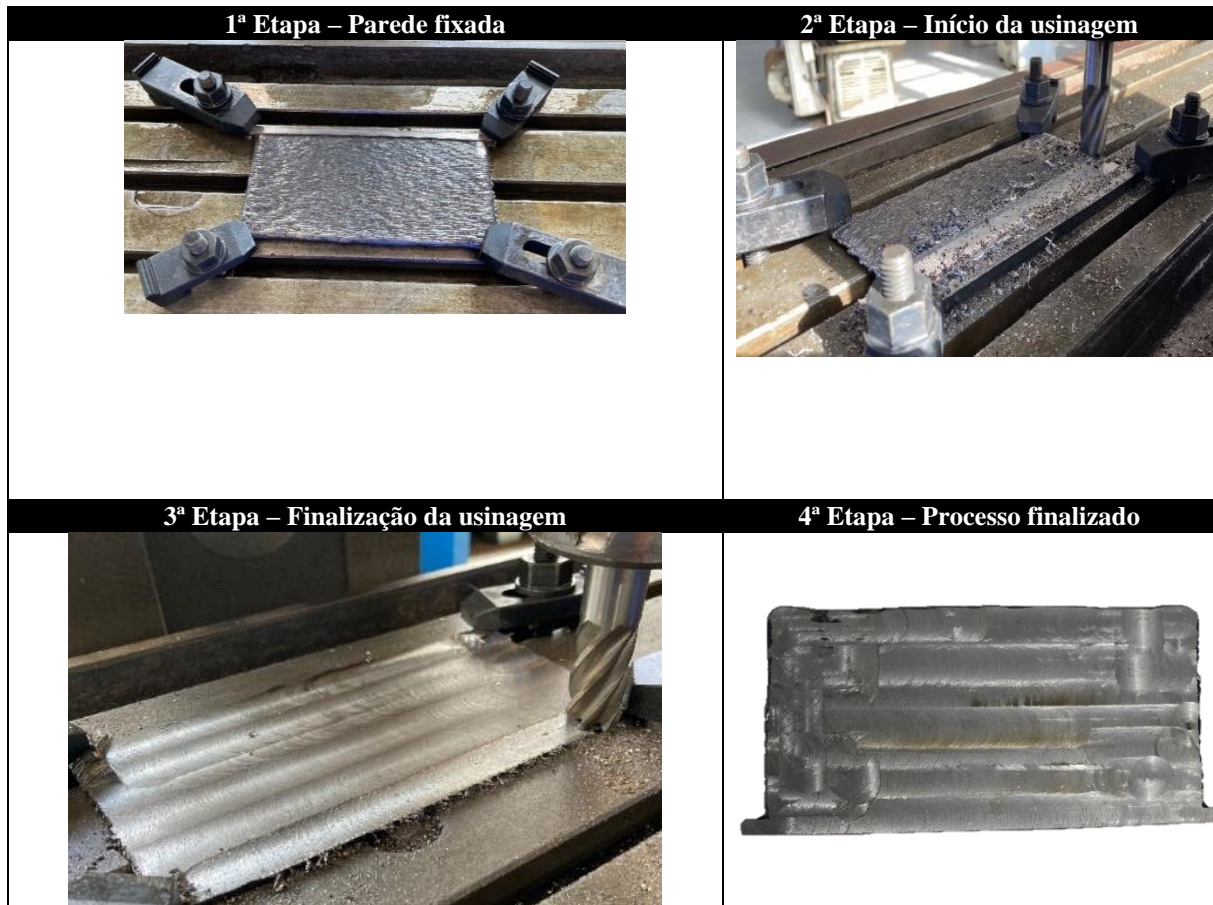


Figura 61 Etapas do processo de usinagem

4.3.2 Corte à Jato D'Água

A etapa de corte dos corpos de prova ocorre após a usinagem da peça e portanto, foram utilizadas as dimensões descritas anteriormente na tabela 2. Foi desenhado um espaçamento de 15 mm na extremidade de cada corpo de prova, para que a peça ficasse presa e não se soltasse da base após o corte. O diâmetro do jato utilizado é de aproximadamente 1,5 mm e portanto, para evitar que os CPs tivessem suas dimensões afetadas pela tolerância aproximada, no desenho técnico foi destacado exatamente o local por onde o jato deveria percorrer. A Fig. 62 apresenta a peça com os corpos de prova recortados, foram recortados 6 corpos de prova na horizontal e 6 na vertical, assim como previsto no planejamento experimental. Além disso, os círculos em vermelho na Fig. 62, representa as fixações dos corpos de prova que foram deixados na peça para que os CPs horizontais e verticais permanecessem fixados na parede para fácil identificação de sua direção.

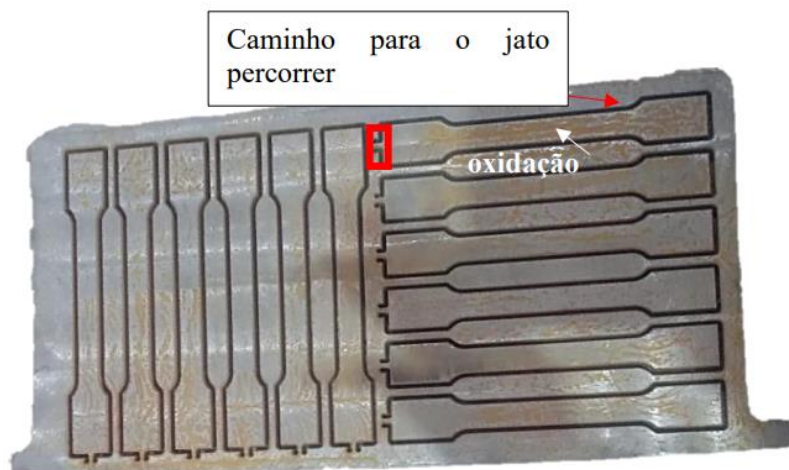


Figura 62 Parede após corte à jato d'água

É possível observar ainda na Fig. 62 que em alguns pontos a peça sofreu oxidação. Para reverter a situação, foi necessário realizar limpeza superficial com escova de aço circular EM 1083-2. Além disso, foi a superfície foi lixada com lixas P120, P200 e P400 para acabamento antes de submeter o corpo de prova ao ensaio de tração, pois as irregularidades em sua superfície influenciariam a região de fratura no momento do ensaio. A Fig 63. apresenta a peça final após lixamento, observa-se que a superfície se apresentou mais contínua quando comparada com a superfície da Fig. 62. Os principais pontos onde foi necessário obter um melhor acabamento na região de comprimento útil incluindo o raio, pois são os locais onde o corpo de prova está sujeito a romper.

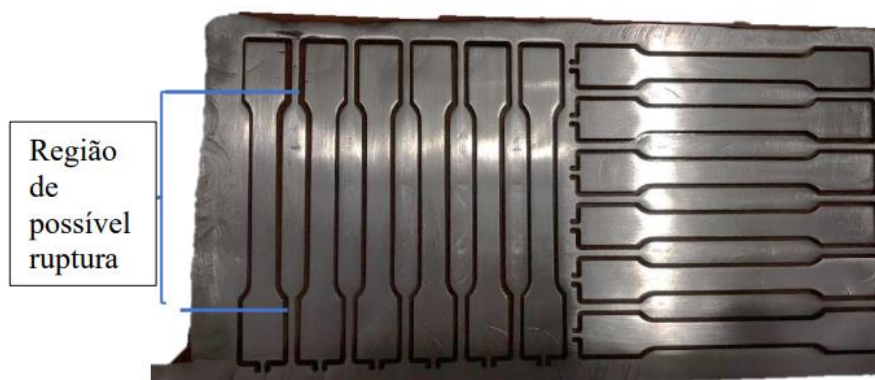


Figura 63 Peça após lixamento de superfície

4.3.3 Avaliação das Dimensões e Medições da Rugosidade

Antes de medir a rugosidade, foi medida a espessura, largura e comprimento em cada corpo de prova após terem sido submetidos aos processos de usinagem, lixamento e corte à jato d'água. Essas medições foram realizadas com objetivo de comparar os resultados obtidos após esses processos, com os resultados definidos inicialmente através das adaptações de dimensões realizadas com base na norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2013). Os valores podem ser verificados na tabela 4, onde observa-se que houve variação de 8% em relação a espessura, 3,38% em relação a largura quando comparado com os valores definidos.

Comparando os resultados obtidos de variação de altura, largura e espessura com os trabalhos do Pimenta (2022) observa-se variação de 1% em relação a espessura, e 33% de largura.

	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área (mm)
CP 1	2,11	6,21	13,10
CP 2	2,07	6,19	12,81
CP 3	2,04	6,16	12,57
CP 4	2,11	6,19	13,06
CP 5	2,15	6,28	13,50
CP 6	2,31	6,23	14,39
Média	2,13	6,21	13,24
DP	0,09	0,04	0,59

Tabela 4 Dados de espessura e largura dos CPs antes do ensaio e após corte à jato d'água

Para medição da rugosidade, enumerou-se os corpos de prova depositados horizontalmente conforme Fig. 64. Esses CPs foram selecionados para medição da rugosidade com intuito de verificar se a ordem de resfriamento das camadas influenciaria neste parâmetro.



Figura 64 Corpos de prova selecionados para teste de rugosidade

Através da medição da rugosidade, foi possível verificar na tabela 5 que os valores obtidos na região 1 (direção perpendicular a usinagem) apresentou valores menores quando comparado com os valores obtidos para a região 2 (região de direção da usinagem) de 61,6% em Ra, 48,89% em Rz e 61,03% em Rq. A Região 3, que foi afetada pelo corte a jato d'água, apresentou valores discrepantes em relação as regiões 1 e 2 cerca de 89,85%.

No geral, o CP 4 apresentou os menores valores na região 1 e região 3 e o CP 6 apresentou valores menores na região 2. O CP 2 apresentou valores intermediários quando comparado com os CPs 4 e CP 6. Dada a ordem de deposição de camadas e consequentemente de resfriamento durante a deposição, não é possível estabelecer uma regra que defina que os corpos de prova localizados próximo ao substrato e os que se localizam no topo da parede, possuam variação de rugosidade provocadas pela ordem de resfriamento de suas camadas durante a deposição.

Amostra	Região 1 (µm)			Região 2 (µm)			Região 3 (µm)		
	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq	Ra	Rz	Rq
CP 2	0,39	2,40	0,52	0,54	4,10	0,69	4,78	30,06	6,00
CP 4	0,33	2,00	0,41	0,79	5,74	1,02	4,61	27,50	5,68
CP 6	0,38	2,23	0,47	0,47	3,74	0,60	4,98	35,40	6,43
Média	0,37	2,21	0,47	0,60	4,52	0,77	4,79	30,99	6,03
DP	0,03	0,16	0,04	0,14	0,87	0,18	0,15	3,29	0,30

Tabela 5 Dados obtidos com medição da rugosidade para cada região

Comparando os valores obtidos com os valores obtidos no trabalho de Pimenta (2022), observa-se discrepância em todos os parâmetros das regiões 1 e 2, possuindo semelhanças apenas nos valores da região 3, que apresentou variação no Ra de apenas 2%, Rz de 6% e Rq de 1%. Tais diferenças podem ser explicadas pelo tipo de usinagem realizadas nas paredes do autor e na parede citada, pois sua peça utilizou fluido de corte e máquinas de usinagem diferentes. Já a peça em estudo, foi usinada com fresamento e lixada manualmente para obter o acabamento necessário. Os valores da região 3 foram parecidos, devido ao corte a jato d'água ter sido realizado com os mesmos parâmetros.

4.3.4 Microdureza Vickers

O ensaio de dureza realizado nos corpos de prova foi o ensaio de microdureza *Vickers* e para isso, foi aplicada força de 0,5 kgf e foram realizadas 5 medições ao longo de uma das cabeças dos CPs verticais (CP 1, 3 e 5) e calculada a média para se obter os valores finais, conforme tabela 5. Na tabela 6 é possível observar a distância entre o topo da cabeça dos CPs e os pontos que foram medidos. Observa-se que o CP 5 (localizado mais nas extremidades da parede) apresentou menor variação entre os valores medidos e que o CP 1 (localizado no meio da parede) apresentou maior variação e, portanto, verifica-se que conforme o CP se afasta da parte central da parede fabricada, o seu valor de dureza diminui.

Dureza Vickers (HV)				
Pontos	Distância do topo da cabeça (mm)	CP 1	CP 3	CP 5
1	4	267,00	247,00	237,00
2	8	255,00	245,00	255,00
3	12	230,00	224,00	243,00
4	8	264,00	322,00	241,00
5	8	362,00	307,00	260,00
Média		275,60	269,00	247,20
DP		45,12	38,31	8,77

Tabela 6 Valores obtidos com dureza *Vickers*

Representado os valores na Fig. 65, é possível observar que os pontos 4 e 5 obtiveram maior valor de dureza. Esses pontos estão localizados na extremidade das cabeças dos CPs, conforme mostrado na Fig. 52. Ao comparar os dados obtidos com os estudos de Rebouças (2022) que também utilizou os mesmos processos de fabricação da parede com única diferença que foi realizado tratamento térmico de recozimento nos corpos de prova, obtêm-se que para os corpos de prova verticais obteve como média 188,4 HV para o CP localizado próximo a região central da parede e 213,2 HV para o CP localizado mais à direita da região central. Já nos estudos de Dutra et al., (2019), que utilizou o mesmo arame, os valores obtidos para ensaio de dureza *vickers* foi em torno de 250 HV. No trabalho de Oliveira (2022) foi encontrada uma dureza média para ambas as faixas de medição e 144 HV, apesar da análise ser com a peça fabricada em mesmo material e mesmos parâmetros de usinagem, a diferença ocorre devido as regiões que foram medidas as durezas, neste estudo foi medida em 5 pontos da superfície e no estudo da autora, foi medido ao longo de todo comprimento, porém de regiões laterais.

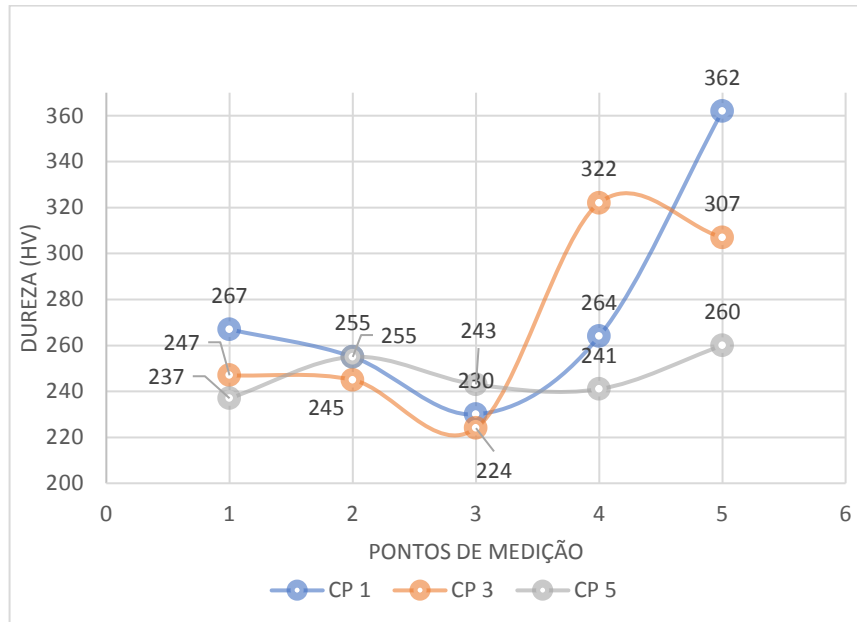


Figura 65 Dados obtidos com ensaio de microdureza Vickers

4.4 Técnica de Excitação por Impulso

A técnica de excitação por impulso realizada em um CP aleatório, retornou os valores médios abaixo. Observa-se que os resultados obtidos quando comparados com o site do próprio Sonelastic tem-se que a incerteza na medida deve ser menor que 2% do valor, e, portanto, o resultado obtido para o módulo de *Young* flexional atende este critério. Os valores obtidos para o módulo de *Young* flexional sofreram mínimas variações, cerca de 0,25% em cada medida. Quanto a frequência, apresenta variações com cerca de 0,13% e em cada medida. A tabela 7 apresenta os valores médios obtidos no ensaio.

Ensaio	E flex (GPa)	± (GPa)	F. Damping (Hz)	Damping (Ad.)	A (V)
MÉDIA	160,60	2,52	1650,66	0,00011	0,01

Tabela 7 Dados obtidos com teste sonelastic

O CP submetido ao mesmo ensaio, porém com tratamento térmico de recozimento apresentou valores aproximados de módulo de *Young* flexional, com variação de 3,76% e variação de frequência de 4,17%, Rebouças (2022). A Figura 65 apresenta graficamente os valores obtidos, onde se pode observar que durante certo intervalo de tempo e certa faixa de frequência, o fator de amortecimento varia. Graficamente, observa-se que no corpo de prova que passou pelo tratamento térmico, não houve muitas variações quando comparado ao que não sofreu. Na Fig. 66 a) encontra-se a figura do CP sem tratamento térmico e na Fig. 66 b) encontra-se a figura do CP com tratamento térmico de recozimento.

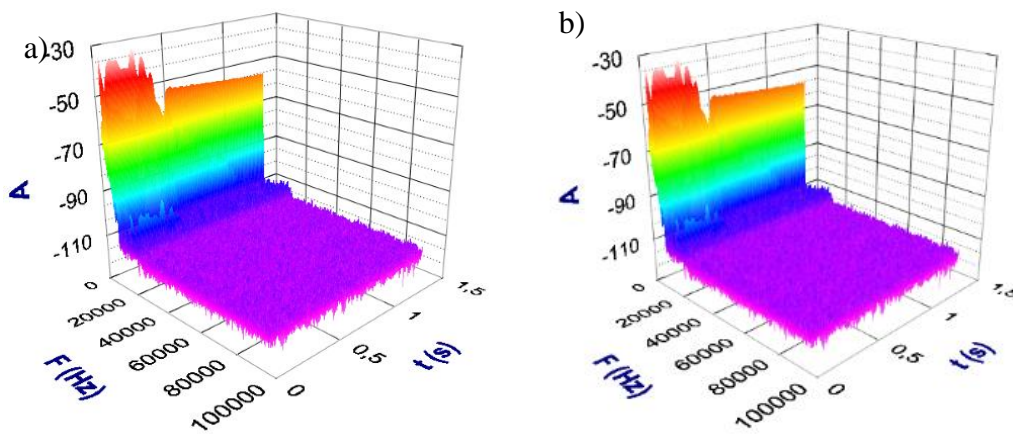


Figura 66 Dados obtidos a partir do teste sonelastic a) sem tratamento térmico b) com tratamento térmico (Rebouças (2022))

4.5 Ensaio de Tração

Inicialmente para preparo do ensaio de tração, foi necessário realizar uma marcação no centro do corpo de prova para que fosse posicionado corretamente nas garras da máquina de ensaio conforme Fig. 67 (a). Na Figura 67 (b) é possível observar o posicionamento do CP na máquina, assim como o extensômetro (*clip-gage*) que foi colocado em seu comprimento uti para medir o percentual de deformação. As garras utilizadas possuem comprimento de 50 mm e a pressão utilizada foi de 2 MPa para que o a cabeça do CP não sofresse deformação ao ser posicionado entre as garras.

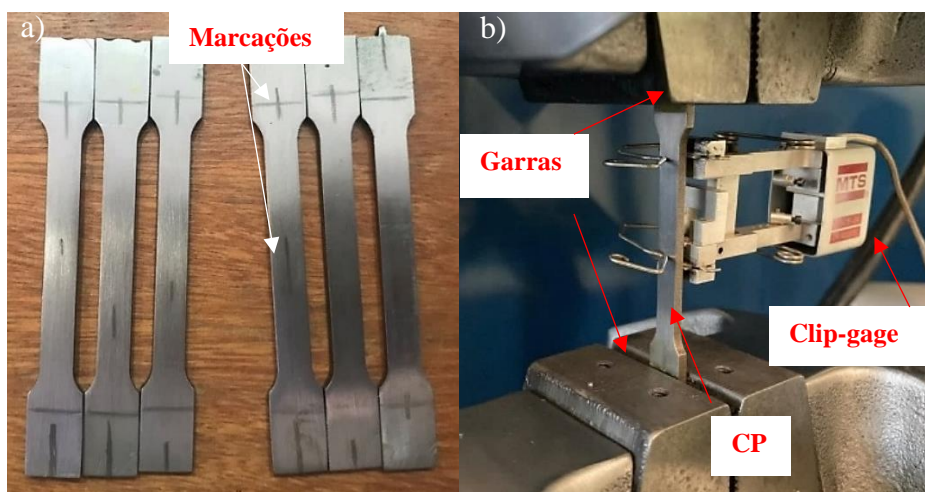


Figura 67 a) Corpos de prova com demarcação antes do ensaio, b) corpo de prova sendo submetido ao ensaio de tração

Os valores medidos da seção transversal medidos antes do ensaio foram utilizados nos cálculos de deformação de engenharia e tensão de engenharia para plotar os gráficos. Com os CPs posicionados e os parâmetros iniciais ajustados, o ensaio teve início. Os corpos de prova horizontais apresentaram resultados conforme Fig. 68, nele é possível observar que o limite de resistência à tração não ultrapassou 500 MPa para nenhum corpo de prova e a maior deformação obtida foi de 18%. Os valores obtidos de resistência à tração para os corpos de prova horizontais foram próximos, com o CP 2 apresentando maior valor. A região de escoamento do CP 6 é bem definida no gráfico, quando comparada aos outros. De acordo com os estudos de Gierth, *et al.*, (2020), os CPs obtidos tiveram tensão máxima de 300 MPa para os corpos de prova depositados

longitudinalmente, já nos estudos de Gu et al., (2020) os CPs horizontais obtiveram valor de tensão próximo a 300 MPa. Os CPs horizontais submetidos ao mesmo ensaio, porém que tiveram tratamento térmico, apresentou valor de resistência a tração em média de 441,33 MPa Rebouças (2022).

O *clip-gage* disponível retorna um valor de deformação de no máximo 12% e, portanto, durante o ensaio ao atingir esse valor, o extensômetro foi retirado. Para saber o valor de deformação dos pontos após retirada do *clip-gage*, foi necessário realizar uma estimativa, com base na deformação axial retornada pelo *software*. Os corpos de prova horizontais romperam com valor de tensão: CP 2 de 345,72 MPa, CP 4 de 302,90 MPa e CP 6 de 306,72 MPa.

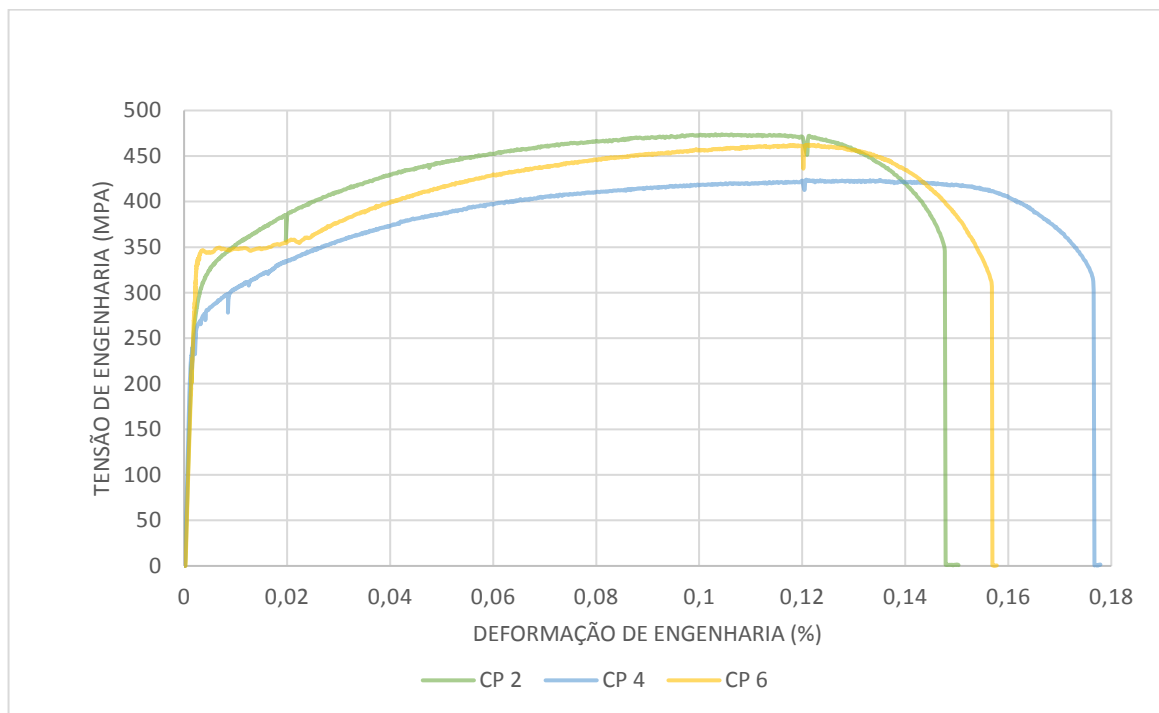


Figura 68 Gráfico tensão - deformação CPs horizontais

A tabela 8 apresenta os valores de propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de tração para os corpos de prova horizontais. Comparando com os valores obtidos por Rebouças (2022), os valores do módulo de *Young* foram bem próximos, variando cerca de 35%, já os valores de ductilidade variaram por volta de 11,70%. Os alongamentos no regime elástico variaram 27,7% e no regime plástico 37,50%.

	E (GPa)	Limite de Proporcionalidade (MPa)	Limite de Resistência ao escoamento (MPa)	Limite de Resistência a Tração (MPa)	%AL total (Ductilidade)	%AL elástico	%AL plástico
CP 2	1,36	240,00	260,00	473,96	14,76%	0,20%	14,57%
CP 4	1,42	230,00	270,41	424,01	17,75%	0,18%	17,57%
CP 6	1,17	340,00	350,12	462,49	15,68%	0,17%	15,51%
Média	1,32	270,00	293,51	453,49	16,06%	0,18%	15,88%
DP	0,11	49,67	40,25	21,36	1,25%	0,01%	1,25%

Tabela 8 Dados obtidos através do ensaio de tração para CPs horizontais

Os CPs verticais apresentados na Fig. 69, apresentaram valores de resistência à tração em média de 428,01 MPa, nos estudos de Gu et al., (2020) os CPs verticais obtiveram valor de

tensão próxima a 250 MPa. Os CPs verticais submetidos ao mesmo ensaio, porém que tiveram tratamento térmico, apresentou valor de resistência a tração em média de 408,44 MPa Rebouças (2022). Nos estudos de Tonelli et al., (2021) a resistência à tração obtida em média para os CPs transversais foi de 290 MPa.

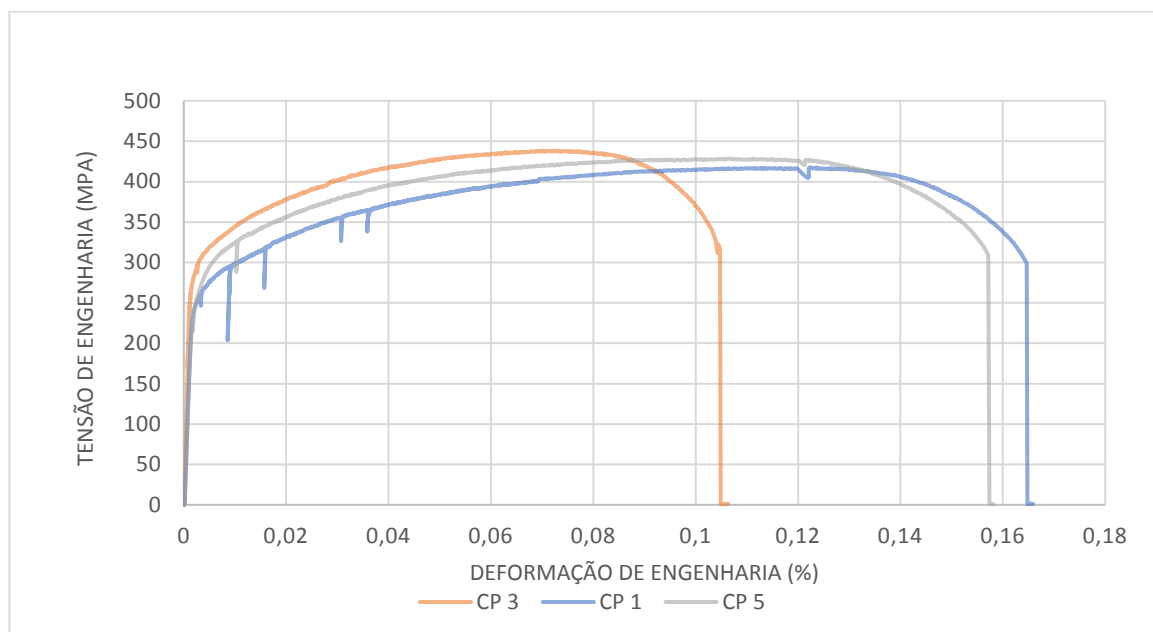


Figura 69 Gráfico tensão - deformação CPs verticais

Os corpos de prova verticais romperam com valor de tensão: CP 1 de 297,90 MPa, CP 3 de 313,90 MPa e CP 5 de 308,26 MPa. A tabela 9 apresenta os valores de propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de tração para os corpos de prova horizontais. Comparando com os valores obtidos por Rebouças (2022), os valores do módulo de *Young* foram bem próximos, variando cerca de 3%, já os valores de ductilidade variaram por volta de 34%. Os alongamentos no regime elástico variaram 18% e no regime plástico 13,79%.

	E (GPa)	Limite de Proporcionalidade (MPa)	Limite de Resistência ao escoamento (MPa)	Limite de Resistência a Tração (MPa)	%AL total (Ductilidade)	%AL elástico	%AL plástico
CP 1	1,54	250,00	270,00	416,98	16,46%	0,24%	16,23%
CP 3	1,50	280,00	300,00	438,53	10,47%	0,21%	10,26%
CP 5	1,44	290,00	295,00	428,52	15,71%	0,21%	15,50%
Média	1,49	273,33	288,33	428,01	14,21%	0,22%	14,00%
DP	0,04	17,00	13,12	8,81	2,66%	0,01%	2,65%

Tabela 9 Dados obtidos através do ensaio de tração para CPs verticais

A Fig. 70 apresenta uma comparação de todos os CPs que foram submetidos ao ensaio de tração. Observa-se que o maior valor de resistência à tração obtido foi do CP 2, com configuração de deposição longitudinal e logo em seguida o CP 6, com configuração longitudinal também. O CP que mais sofreu deformação, foi o CP 4, atingindo 17,75% de deformação. Os valores quando comparados os horizontais e os verticais, apresentam variação de 11,83% no módulo de *Young*, 1,76% na resistência ao escoamento, 5,62% na resistência à tração e 11,52% na ductilidade.

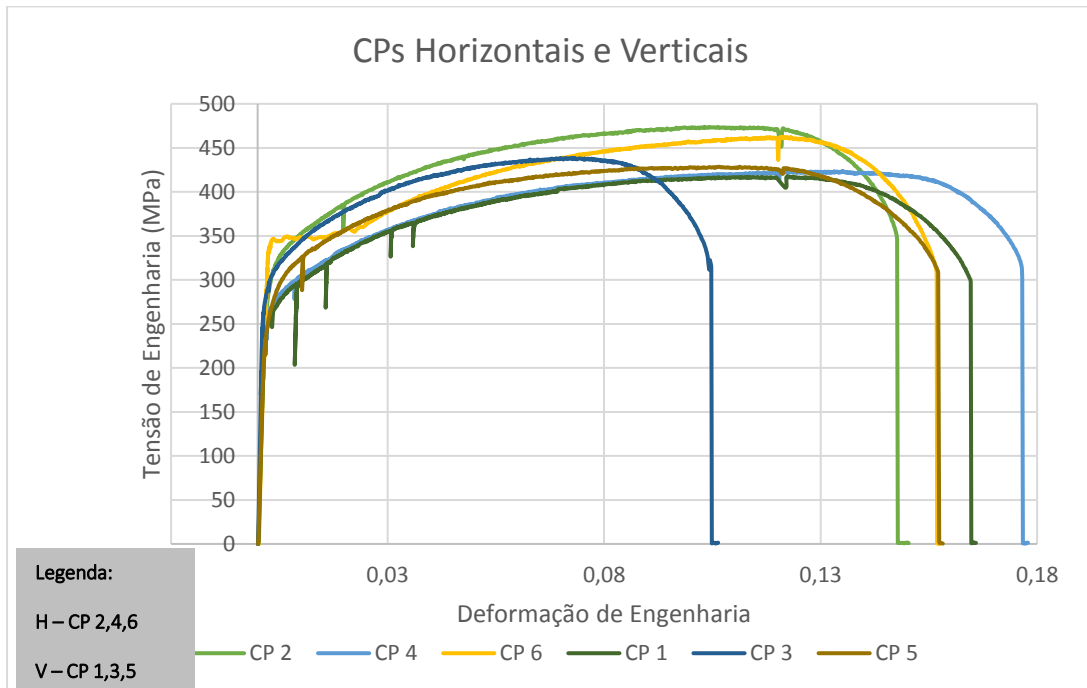


Figura 70 Gráfico tensão - deformação CPs horizontais e verticais

Nos estudos realizados por Ermakova et al., (2020), utilizando o arame ER70S-6, tem-se que LRT de 520 MPa, Tensão no escoamento de 378 MPa e 155 HV. Já nos resultados obtidos por Tonelli, et al., 2021 da liga AA5083, observa-se que os corpos de prova retirados na direção horizontal, apresentam valor de resistência à tração de 300 MPa, enquanto os retirados na direção vertical apresentam valor de resistência à tração de 200 MPa. Os estudos de Gu et al., 2020 da liga Al-Cu4.3-Mg1.5 com tratamento térmico apresenta valores de resistência à tração dos CPs retirados na vertical de 298 MPa e os retirados na vertical 250 MPa.

Após o ensaio, os CPs foram colocados lado a lado para verificação da região fraturada e como pode ser observado na Fig. 71, os corpos de prova horizontais CP 2 e CP 6 tiveram a ruptura na parte superior do comprimento útil e o CP 4 fraturou na metade de seu comprimento útil. Ainda na figura é possível observar que próximo a região da estrição dos CPs 4 e 2 marcados em azul na Figura 71, mostra que a superfície sofreu enrugamento. As marcas nos CPs marcado em vermelho na figura, é consequência da pressão aplicada pela garra na cabeça.

Já os CPs verticais 3 e 5 sofreram a ruptura em regiões bem próximas a parte central do comprimento útil, o CP 1 sofreu a ruptura em parte superior mais afastada da parte central. Todos os CPs apresentam área de estrição característica, apresentado leve curva nessa zona, com exceção do CP 2.

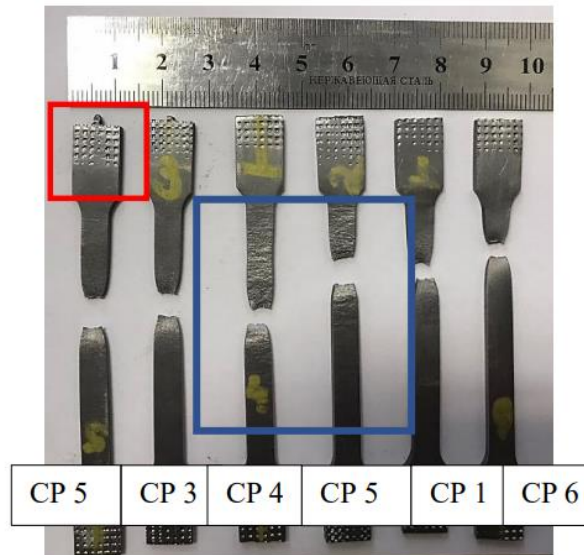


Figura 71 Corpos de prova após o ensaio de tração

Depois desta etapa, foi observado que com o ensaio de tração a espessura dos CPs foram alteradas, próxima a região da fratura a espessura ficou menor em alguns casos (comportamento esperado para materiais dúcteis) e, portanto, a tabela 10 apresenta os valores medidos das espessuras dos CPs após ensaio e em verde, o momento da ruptura do CP. Observa-se que próximo a região de fratura a espessura do CP geralmente diminuiu, entretanto, no CP 2 e no CP 4, os valores durante a fratura permaneceram constantes.

	Espe- sura (mm)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
CP 1	1,87	2,00	2,00	2,00	1,93	1,93	1,92	1,87	1,87	1,88	1,91	2,01	2,01
CP 2	1,93	2,02	2,02	2,01	2,00	2,00	1,95	1,96	1,70	1,70	1,90	1,90	1,98
CP 3	1,99	1,97	1,97	2,00	2,01	2,01	1,98	1,97	1,97	1,95	1,99	2,02	2,02
CP 4	1,97	1,96	2,00	1,98	1,98	1,94	1,94	1,95	1,98	1,99	1,99	1,97	1,97
CP 5	1,99	2,01	2,01	1,98	1,99	1,99	1,96	1,97	1,98	2,00	1,99	2,01	2,01
CP 6	1,99	2,04	2,04	2,02	1,98	1,98	1,97	1,97	1,96	1,96	1,94	2,00	2,00

Tabela 10 Espessura dos CPs após ensaio de tração

4.6 Análise da Fratura

Com a análise da fratura por meio do MEV, foram identificadas importantes características da área fraturada por meio do ensaio de tração. No geral os corpos de prova apresentam áreas visivelmente parecidas, com exceção dos CPs 2 e CP 6 que apresentam regiões com características marcantes, como a presença de profundidades.

De acordo com Hertzberg (1996), a presença de planos de clivagem ocorre em regiões da fratura devido à baixa energia absorvida no momento da fratura. Esses planos caracterizam a presença de uma fratura frágil na região, a presença de estrias na fratura é uma característica de planos de clivagem. Além disso, o autor cita em seu estudo que durante a análise da fratura podem ser observadas partículas oxidadas em formato esferoidal de coloração clara. No estudo de Ermakova et al., (2021) é citada também em regiões de fratura a presença de *dimples* que caracterizam uma fratura dúctil.

A partir dos estudos citados, as análises nos corpos de prova foram feitas com base em um dos lados do CP rompido, as demais fotografias encontram-se no Apêndice C.

4.6.1 Corpo de Prova 1

Os resultados obtidos para o CP 1 utilizando o MEV estão apresentados na Fig 72. Observa-se que nas regiões de quinas nas partes superiores representadas na imagem como 1 e 3, há presença de *dimples* seguidos de área de clivagem bem inclinada. Na imagem 1, é possível observar irregularidades maiores que na região 3 e, portanto, este pode ser o indício do início da fratura. Ainda na imagem 3, é possível observar partículas oxidadas similares às encontradas no estudo de Teske et al., (2007), que explica esse fator como a intensa reação de oxidação na peça devido ao oxigênio presente no gás de proteção e no metal de adição.

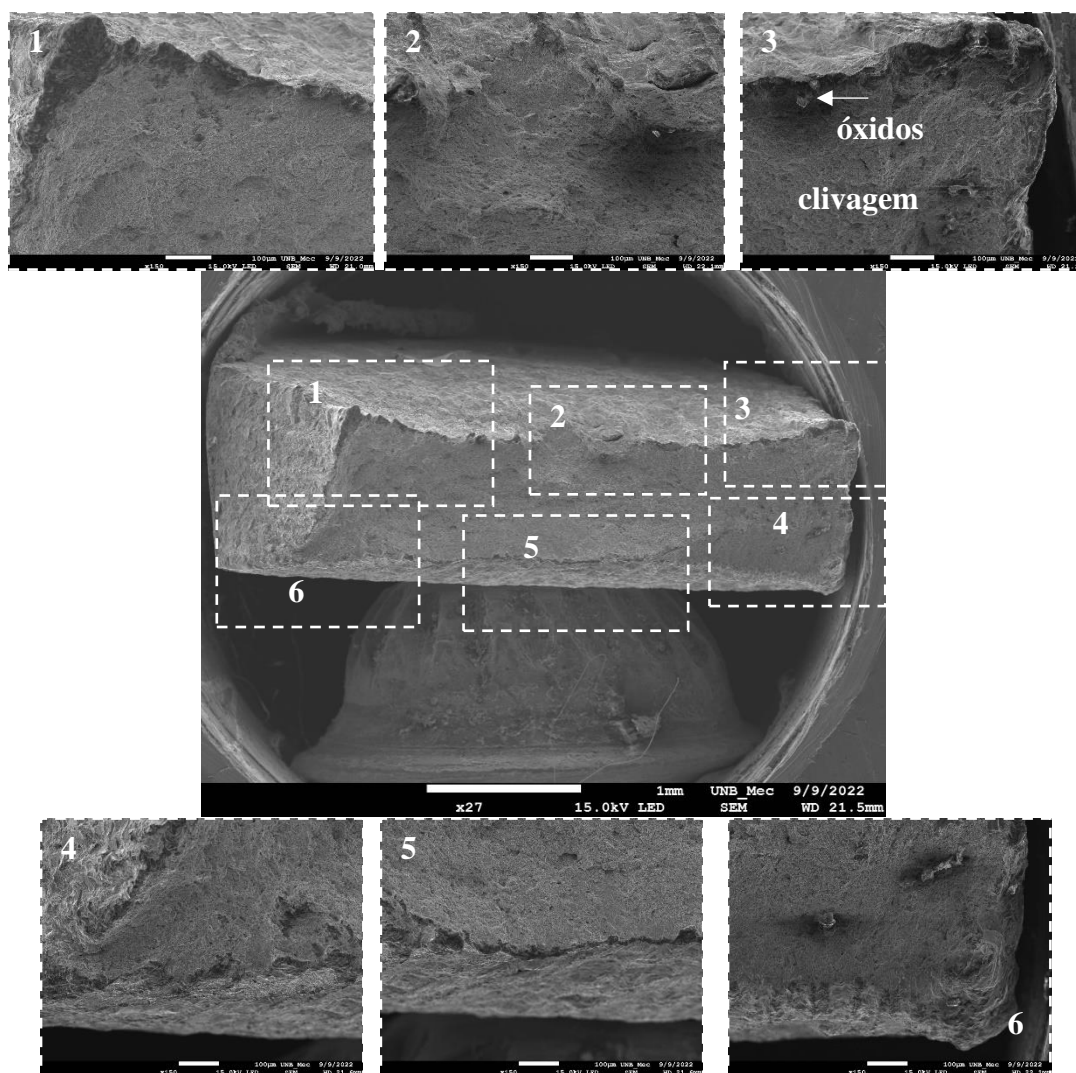


Figura 72 Análise do CP 1 através do MEV

Além das imagens mostradas na seção da fratura, foi avaliado o perfil de ruptura de cada CP na Fig. 73. Observa-se que há regiões mais aprofundadas e outras mais elevadas, estão indicadas na figura as características que indicam se a região é de fratura dúctil ou frágil. Além disso, foi verificada a presença de porosidade na lateral da área fraturada.

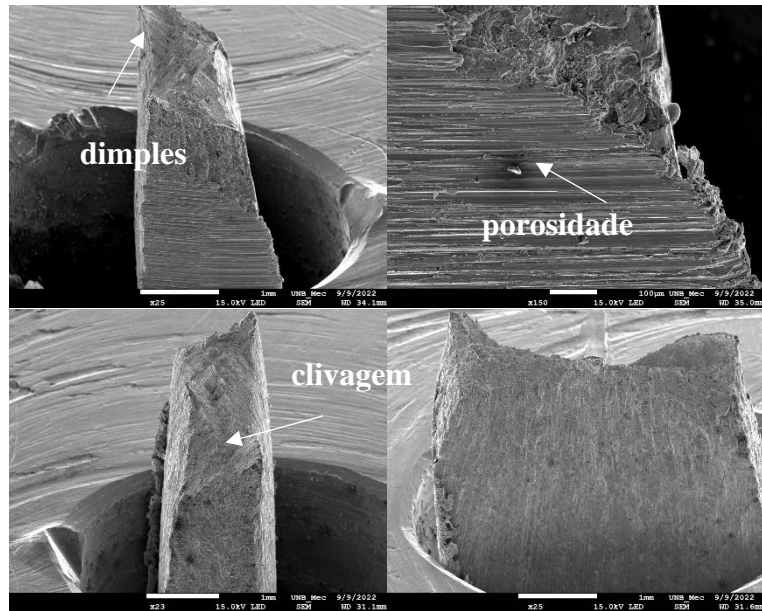
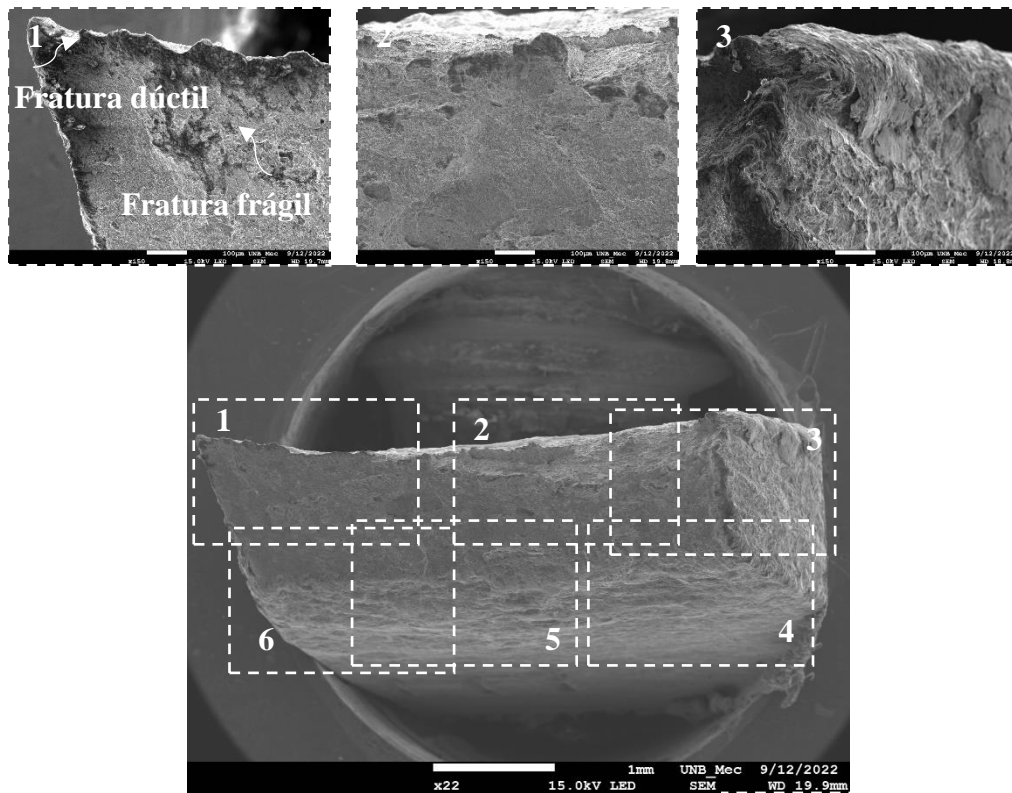


Figura 73 Perfil da seção fraturada CP 1

4.6.2 Corpo de Prova 2

Assim como o CP 1, no CP 2 foi possível observar com tranquilidade as regiões de propagação da trinca e de ruptura, mostrada na Fig. 74. As regiões 1 e 3 encontram-se com *dimples* assim como nas regiões do CP 1. Foram encontradas regiões aprofundadas equivalente a regiões de estrias na imagem 6, a seção do CP 2 apresenta-se mais regular quando comparada ao do CP 1, entretanto, com *dimples* não tão elevados quanto na Figura 68.



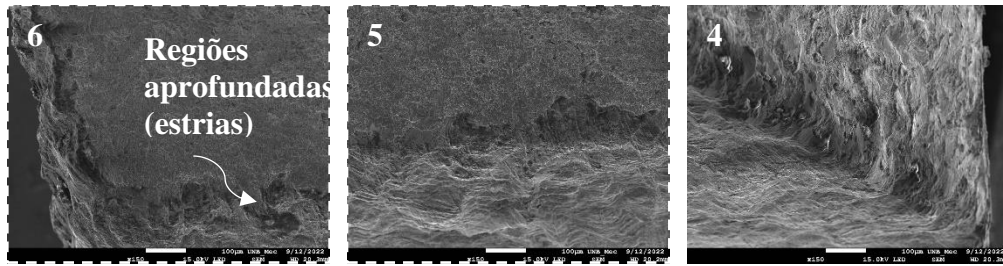


Figura 74 Análise do CP 2 através do MEV

Além das imagens mostradas na seção da fratura, foi avaliado o perfil de ruptura de cada CP na Fig. 75. Observa-se que há regiões mais aprofundadas e outras mais elevadas, estão indicadas na figura as características que indicam se a região é de fratura dúctil ou frágil. Além disso, foi verificada a presença de estrias na lateral da fratura durante a propagação da trinca, o que indica que a fratura ocorreu devido a algum concentrador de tensões neste local.

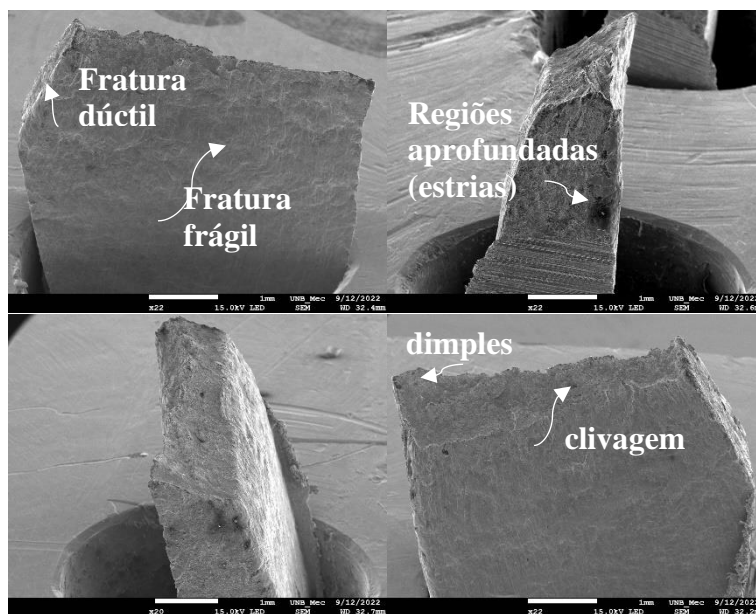


Figura 75 Perfil da seção fraturada CP 2

4.6.3 Corpo de Prova 4

Os resultados obtidos para o CP 4 utilizando o MEV estão apresentados na Fig 76. Observa-se que nas regiões de quinas nas partes superiores representadas na imagem como 1 e 3, há presença de *dimples* seguidos de área de clivagem. Na imagem 3, é possível observar irregularidades maiores que na região 1 e, portanto, este pode ser o início do início da fratura. Na imagem 2, é possível observar presença de diversos pontos de porosidade ao longo da fratura. Nas regiões 4 e 5 é possível notar a diferença da regularidade superfície quando comparada com as das imagens 1, 2 e 3.

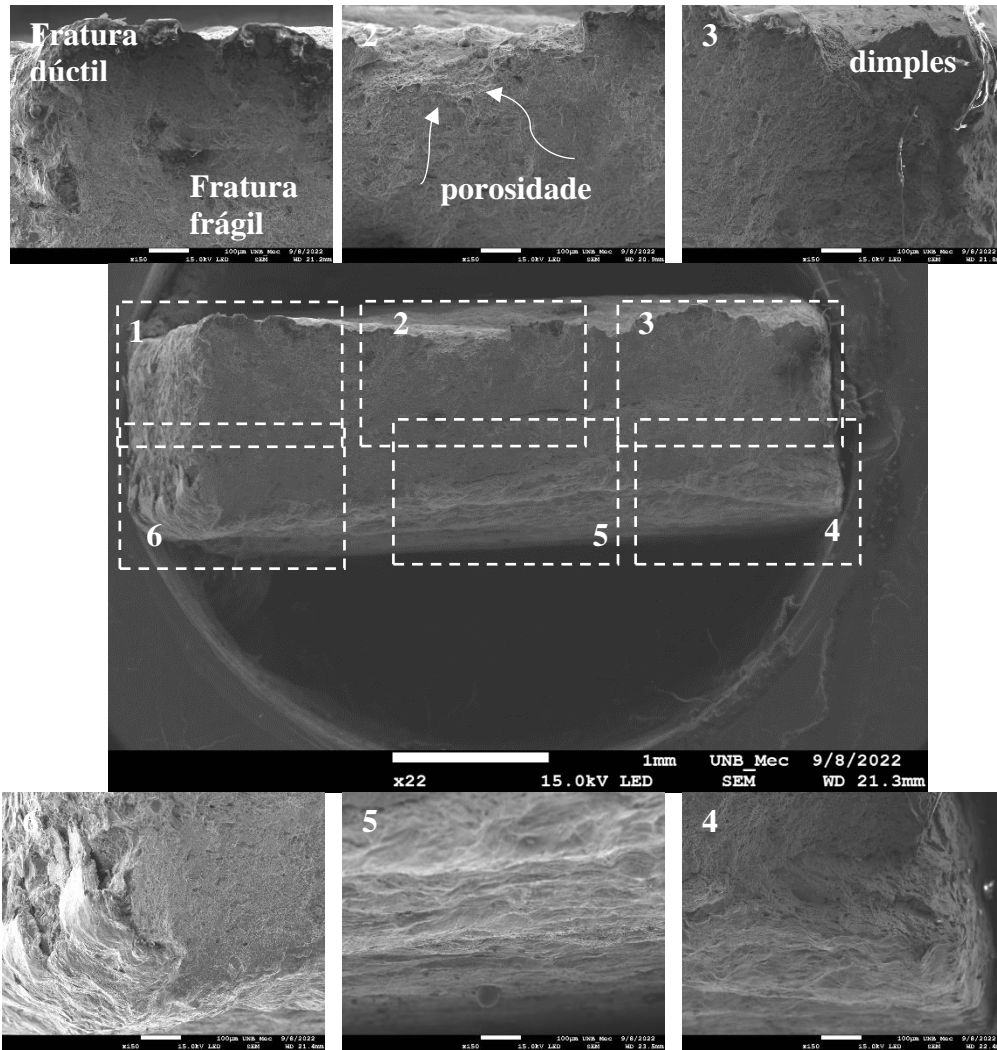
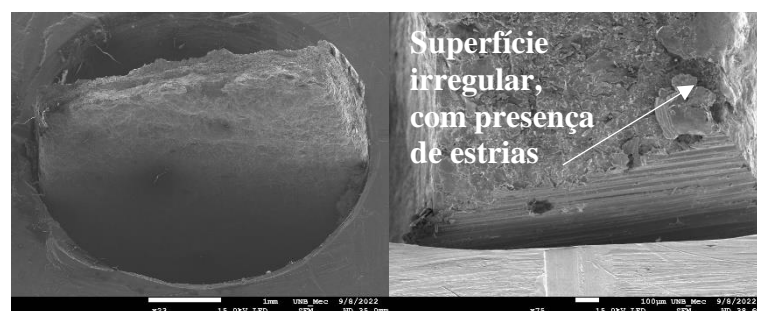


Figura 76 Análise do CP 4 através do MEV

Além das imagens mostradas na seção da fratura, foi avaliado o perfil de ruptura de cada CP na Fig. 77. Observa-se que há regiões mais aprofundadas e outras mais elevadas, estão indicadas na figura as características que indicam se a região é de fratura dúctil ou frágil. Além disso, foi verificada a presença de estrias na lateral da fratura durante a propagação da trinca, o que indica que a fratura ocorreu devido a algum concentrador de tensões neste local.



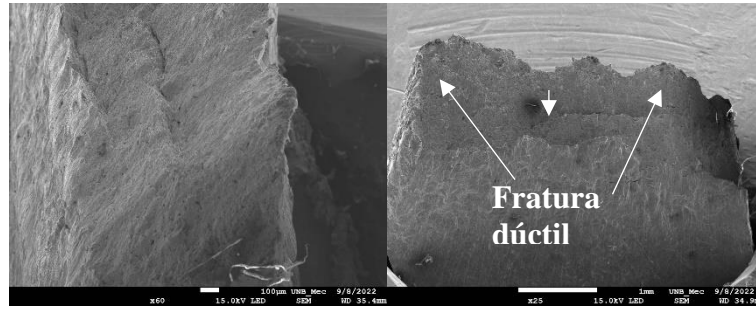


Figura 77 Perfil da seção fraturada CP 4

4.6.4 Corpo de Prova 6

Os resultados obtidos para o CP 6 utilizando o MEV estão apresentados na Fig 78. Observa-se que nas regiões de quinas nas partes superiores representadas na imagem como 1, 2 e 3, há presença de *dimples* seguidos de área de clivagem. Na imagem 3, é possível observar irregularidades maiores que na região 1 e 2 e, portanto, este pode ser o indício do início da fratura. Na imagem 1, 2 e 3, é possível observar presença de diversos pontos de estrias ao longo da fratura. Nas regiões 4 e 5 é possível notar a diferença da regularidade superfície quando comparada com as das imagens 1, 2 e 3.

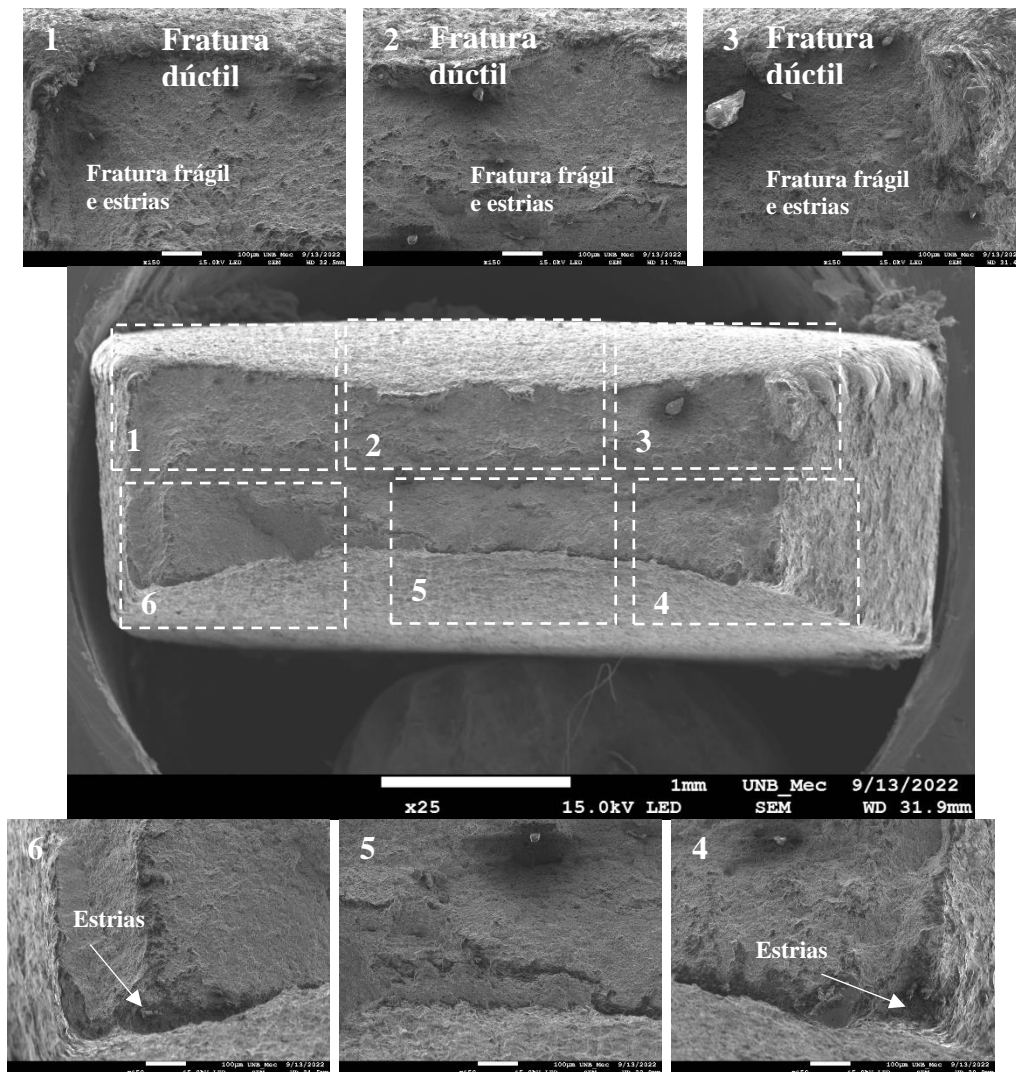


Figura 78 Análise do CP 6 através do MEV

Além das imagens mostradas na seção da fratura, foi avaliado o perfil de ruptura de cada CP na Fig. 79. Observa-se que há regiões mais aprofundadas e outras mais elevadas, estão indicadas na figura as características que indicam se a região é de fratura dúctil ou frágil. Além disso, foi verificada a presença de estrias na lateral da fratura durante a propagação da trinca, o que indica que a fratura ocorreu devido a algum concentrador de tensões neste local.

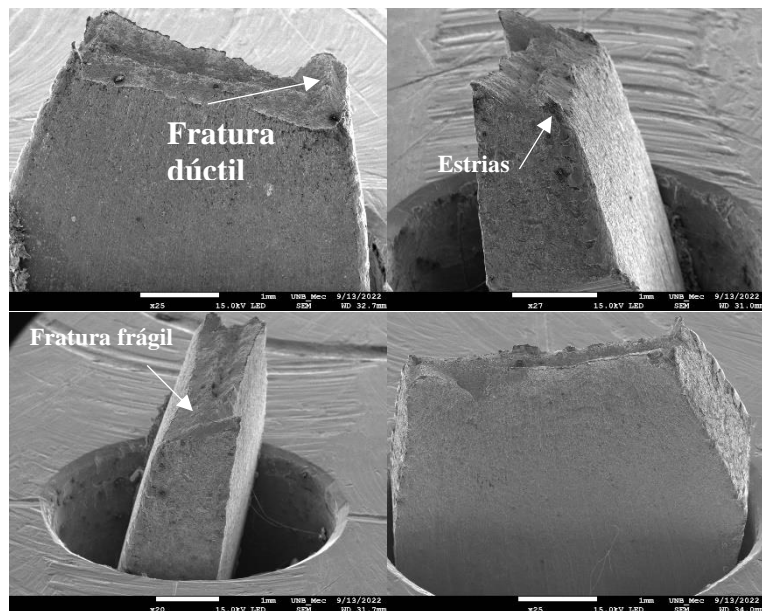


Figura 79 Perfil da seção fraturada CP 6

5 CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos dos 6 corpos de prova por meio do ensaio de tração, foi possível analisar as propriedades mecânicas das amostras fabricadas com um mesmo material, no caso, o arame ER70S-6 e com os mesmos parâmetros de deposição, usinagem e lixamento. Além disso, foi possível observar a anisotropia dos corpos de prova retirados na direção horizontal e vertical. Conclui-se então os seguintes pontos:

- A deposição das peças apresentou bom aspecto visual ao ser comparado com os trabalhos disponíveis na literatura. A repetibilidade de valores ao longo da geometria apresentou poucas variações em torno de 7,34% na altura, resultado acima dos valores comparados devido a utilização do substrato para composição das medições.
- O processo de corte à jato d'água com boa precisão em relação à geometria planejada, pois apresentou variação de 8% em relação a espessura, 3,38% em relação a largura quando comparado com os valores definidos
- A rugosidade aritmética apresentou valores aproximados na região da superfície e na região ortogonal à superfície, com médias de 1,01 μm e 1,96 μm . A rugosidade aritmética da região 3 apresentou valores aproximados com os comparados na literatura.
- Tendência ao aumento no valor da dureza *Vickers* para pontos localizados nas laterais da cabeça do CP. Principalmente dos CPs localizados na região próxima a parte central da parede.
- O CP 6 que utilizou parte do substrato como constituinte de sua estrutura, apresentou valores aproximados ao CP 2 e CP 4, que foram depositados na mesma direção e não utilizaram o substrato como constituinte.
- A avaliação das regiões de fratura utilizando o MEV proporcionou a identificação de regiões de fratura frágil e fratura dúctil, podendo assim, caracterizar o comportamento do CP durante o ensaio de tração.

5.1 Proposta para Trabalhos Futuros

Com objetivo de ampliar a abrangência dos resultados, alguns ajustes podem ser realizados na obtenção dos corpos de prova, são eles:

- Deposição de paredes com mais de 100 camadas, com objetivo de obter os corpos de prova conforme dimensões especificadas nas normas disponíveis de ensaio de tração.
- Extração dos corpos de prova na direção diagonal para que os dados obtidos sejam comparados com os corpos de prova na horizontal e vertical.
- Aplicação de diferentes tratamentos térmicos para avaliar a efetividade do procedimento na melhoria das propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de tração.

5.2 Análise das Referências Bibliográficas

Para obtenção de dados para realizar o estudo, foram buscadas informações em diversas fontes em diferentes períodos. Dessa forma, totalizam 98 referências bibliográficas para composição das informações aqui inseridas.

Ano	1982	2000-2009	2010-2017	2018	2019	2020	2021	2022
Quantidade	1	7	22	7	7	13	15	26
(%)	1%	7%	22%	7%	7%	13%	15%	27%

Tabela 11 Fontes bibliográficas

Para composição destas fontes, segue abaixo a distribuição das origens de todas elas:

- Revistas: 24 (24,49) %;
- Livros: 10 (10,20) %;
- Congressos: 28 (28,57) %;
- Teses, dissertações e monografias: 20 (20,41) %;
- Normas: 6 (6,12) %;
- Outros (catálogos, manuais, apostilas, sites): 16 (16,33) %;

A Figura abaixo apresenta graficamente o percentual de utilização dessas fontes.

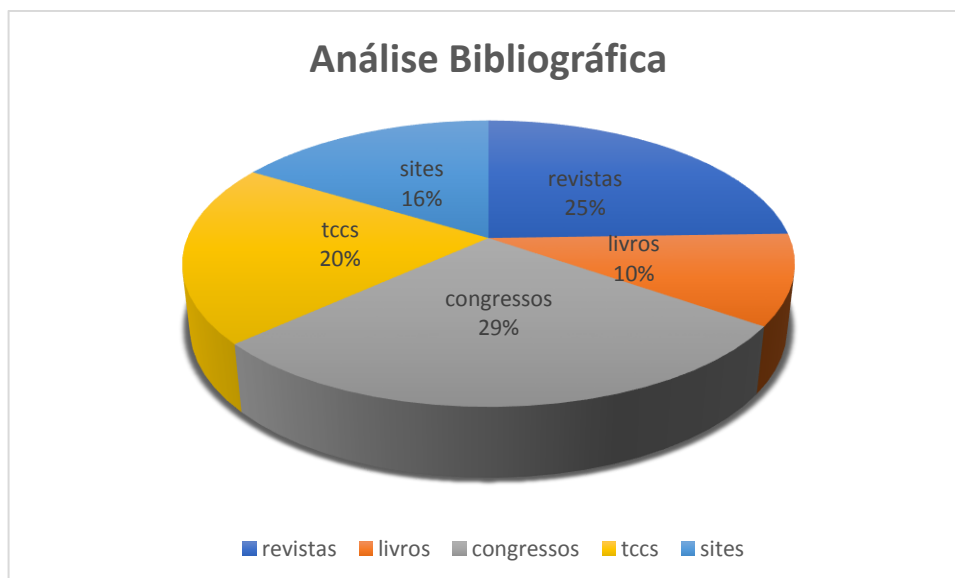


Figura 80 Fontes bibliográficas

REFERÊNCIAS

- ABNT. 2013. “Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente”. ISBN 978-85-07-04168-9.
- ABNT. 2021. Disponível em <<https://www.abntcatalogo.com.br/normagrid.aspx>>. Acesso em 08 de outubro de 2021.
- Alberti, E.A. Silva, L.J. d’Oliveira, A.C.M. 2014. “Manufatura Aditiva: O papel da soldagem nesta janela de oportunidade”. Soldagem&Inspeção. Vol. 19, Nº. 02, p.190-198.
- Antonello, M, G. 2020. “Variação da frequência de pulso na manufatura aditiva de alumínio com gtaw alimentado”. Brazilian Journal of Development. [DOI:10.34117/bjdv6n11-428](https://doi.org/10.34117/bjdv6n11-428)
- Artaza, T. Suárez, A. Veiga, F. Braceras, I. Taberero, I. Larrañaga, O. Lamikiz, A. 2020. “Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres”. Journal of Materials Research and Technology. Vol. 9, p15454-15466. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.012>
- Artaza, T. Suárez, A. Murua, M. García, J,C. Taberero, I. Lamikiz, A. 2019. “Wire Arc Additive Manufacturing of Mn4Ni2CrMo Steel: Comparison of Mechanical and Metallographic Properties of PAW and GMAW”. Procedia Manufacturing. Vol. 41, p 1071–1078.
- ASTM. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. 2017.
- ASTM. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2013.
- ATCP Engenharia Física. 2014. Teste Sonelastic. Disponível em: <http://sonelastic.com/images/downloads/ManualSoftwareSonelastic3.1-PT.pdf>. Acessado em 09 de Setembro de 2022.
- AutoDesk, 2021. Disponível em <<https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/solutions/metal-additive-manufacturing/apworks-customer-story-netfabb-en.pdf>>. Acesso em 26 de Agosto de 2021.
- AWS, 2021. Disponível em <<https://awo.aws.org/glossary/auguste-de-meritens/>>. Acesso em 08 de Outubro de 2021.
- Buchanan, C.; Gardner, L. 2019. “Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges”. Eng. Struct. Vol. 180, p 332–348
- BUGATTI AUTOMOTIVE, Calipet from 3D Printer, 2019. Disponível em <<https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/>>. Acesso em 26 de Agosto de 2021.
- Callister, W.D. Rethwisch, D.G. 2012. “Ciência e Engenharia de Materiais”. 8ª Ed. Editora LTC. ISBN 978-85-216-2124-9.
- Colditz, P. Graf, M. Halsig, A. Hartel, S. Awiszus, B. 2020. “Experimental Investigation on the Forming of Additively Manufactured Components with Regard to Forming Behavior and

- Component Properties”. *Procedia Manufacturing*. Vol. 47, p.1164-1169. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.162>
- Cong, B. Ding, J. Williams, S. 2014. “Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy”. *Manufacturing Technology*. Vol 36, N° 12.
- D. H. Ding, Z. X. Pan, D. Cuiuri, and H. J. Li. 2015. “Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests,” *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.81, Issues 1-4, p. 465-481.
- Ermakova, A. Mehmanparast, A. Ganguly, S. Razavi, J. Berto, F. 2021. “Fatigue crack growth behaviour of wire and arc additively manufactured ER70S-6 low carbon steel components”. *Int J Fract.* <https://doi.org/10.1007/s10704-021-00545-8>
- ESAB BR. 2005. “Soldagem MIG/MAG”. 68p. Disponível em < https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf >. Acesso em 10 de Julho de 2021.
- Fang, J.X. Dong, S.Y. Wang, Y.J. Xu, B.S. Zhang, Z.H. Xia, D. He, P. 2015. “The effects of solid-state phase transformation upon stress evolution in laser metal powder deposition”. *Materials and Design*. Vol. 87, p. 807-814. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.061>
- Fischer, A., 2011. “Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW - arco pulsado”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 170p.
- Felizardo, I. 2016. “Apostila – Tecnologia da Soldagem”. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET –MG. Disponível em < <https://www.dem.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/39/2017/09/Apostila-Tecnologia-da-Soldagem.pdf> >. Acesso em 24 de Outubro de 2021.
- FRONIUS, 2015. “CMT Advanced”. Disponível em https://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-2BF524E9-5150258D/fronius_international/hs.xsl/79_17482_ENG_HTML.htm . Acesso em 06 de Setembro de 2021.
- FRONIUS, 2013. “Processo CMT”. Disponível em https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/2013-11-28-processo-cmt.pdf. Acesso em 07 de Setembro de 2021.
- GERDAU. 2003. “Manual de Aços”. Disponível em < https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_aços_gerdau.pdf >. Acesso em 24 de Outubro de 2021.
- Gibson, I. Rosen, D. Stucker, B. 2010. “Additive Manufacturing Technologies”. Ed. Springer, 2nd Edition. ISBN 978-1-4939-2112-6
- Gierth, M. Henckell, P. Ali, Y. Scholl, J. Bergmann, J. P. 2020. “Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminium Alloy AlMg5Mn with Energy-Reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW)”. *Materials*. Vol. 13, p-2671. <https://doi.org/10.3390/ma13122671>
- Greer, A.C.; Nycz, A.; Noakes, M.; Post, B.; Kurfess, T.; Love, L.; Greer, C.; Nycz, A.; Noakes, M.; Richardson, B. 2019. “Introduction to the Design Rules for Metal Big Area Additive Manufacturing”. *Addit. Manuf.* Vol. 27, p. 159–166.

- Hackernhaar, W. 2020. “ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DO RESFRIAMENTO EM MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO”. UFRGS, Tese de Doutorado.
- Hirtler, M.; Jedynek, A.; Sydow, B.; Sviridov, A.; Bambach, M. 2018. “Investigation of microstructure and hardness of a rib geometry produced by metal forming and wire-arc additive manufacturing”. In Proceedings of the 5th International Conference on New Forming Technology (ICNFT 2018), Bremen, Germany, 18–21 September 2018; p. 1–6.
- H Soldas. 2016. “Catálogo Geral H Soldas Técnicos em Soldas”. 2ª Ed. Disponível em < <https://hsoldas.com.br/pdf/CatalogoGeralHSoldas.pdf> > .Acesso em 24 de Outubro de 2021.
- Jeffus, L. 2012. “Welding Principles and Applications”. DELMAR CENGAGE Learning Ed.70th. 962p.
- JEOL, 2012. “High performance analytical tool with improved observation and analysis functions”. Disponível em: <https://www.jeol.co.jp/en/news/detail/20120130.347.html>. Acessado em 08 de Setembro de 2021.
- Jin, W. Zhang, C. Jin, S. Tian, Y. Wellmann, D. Liu, W. 2020. “Wire Arc Additive Manufacturing of Stainless Steels: A Review”. Applied Sciences. Vol. 10, p. 1563. doi:10.3390/app10051563.
- Kang, K., Liu, Y., Li, J., Liu, C., Zhen, Z., Wang, Y., Sun, Q. 2020. “Microstructure and Mechanical Properties of Al/Steel Butt Joint by Hybrid CMT Welding with External Axial Magnetic Field”. Materials 2020, Vol. 16, n.3601, p. 1-12. <https://doi.org/10.3390/ma13163601>
- Kovalenko, O., Skhabovskiy, I., Ziberov, M., Reis, R.P. e Scotti, A. 2013. “Aplicação e Avaliação de Novas Técnicas de Revestimentos por Soldagem MIG/MAG”. XXXIX CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Curitiba. Associação Brasileira de Soldagem, p. 1-12.
- LABTESTE, 2021. Disponível em < <https://www.labteste.com.br/ensaios-dureza-brinell-rockwell-vickers> > . Acesso em 05 de Outubro de 2021.
- Lauxen, R.E. 2021. “VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE CÉLULAS DE SOLDAGEM ROBOTIZADAS EM UMA EMPRESA DE MÁQUINAS E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS”. Universidade Federal de Santa Maria. Trabalho de conclusão de curso.
- Lee, Y. Bandari, Y. Nandwana, P. Gibson, B.T. Richardson, B. Simunovic, S. 2019. “Effect of Interlayer Cooling Time, Constraint and Tool Path Strategy on Deformation of Large Components Made by Laser Metal Deposition with Wire”. Applied Sciences. Vol. 9, p. 5115. <https://doi.org/10.3390/app9235115>
- Li, J. L. Z., Alkahari, M. R., Rosli, N. A., Hasan, R., Sudin, M. N., Ramli, F. R. 2019. “Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing”. *International Journal of Automation Technology*, 13. 346-353. DOI: [10.20965/ijat.2019.p0346](https://doi.org/10.20965/ijat.2019.p0346).
- Marenych, O. Ding, D. Pan, Z. Kostryzhev, A.G. Li, H. Van Duin, S. 2018. “Effect of chemical composition on microstructure, strength and wear resistance of wire deposited Ni-Cu

- alloys”. Additive Manufacturing. Vol. 24, p 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.003>
- Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q. 2005. “Soldagem: Fundamentos e Tecnologia”. UFM, 362p. ISBN:8570414374.
- Mazzaferro, J.A.E. 2018. “Indústria 4.0 e a Qualidade da Informação”. Soldagem & Inspeção, Vol. 23, Nº 01, p. 1-2. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2301.01> .
- Melchels, F.P.W. Domingos, M.A.N. Klein, T. Malda, J. Bartolo, P.J. Hutmancher, D.W. 2011. “Additive Manufacturing of Tissues and Organs”. Progress in Polymer Science. Vol. 37, p. 1079 – 1104. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007>
- MTS. 2004. “ Máquina Servo Hidráulica para teste em materiais”. Disponível em: <https://www.mts.com/en/products/materials/dynamic-materials-test-systems/landmark-servo-hydraulic#technical>. Acessado em 07 de setembro de 2021.
- MX3D, 2021. Disponível em <<https://mx3d.com/industries/construction/connector-for-takenaka/>>. Acesso em 26 de Agosto de 2021.
- NASA, 2021. “NASA Completes Weld of Rocket Adapter for First Artemis Launch with Crew”. Disponível em <<https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/nasa-completes-weld-of-rocket-adapter-for-first-artemis-launch-with-crew.html>>. Acesso em 07 de Julho de 2021.
- Nascimento, A.G. 2013. “Estudo Comparativo da Resistência à Fadiga do aço API 5L Grau B Submetido a Tratamento Criogênico”. Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas. Universidade de Brasília.
- NBR ISO 6892. 2002. “Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente”. ABNT. 34p.
- Nemani, A. V. Ghaffari, M. Nasiri, A. Comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of shipbuilding steel plates fabricated by conventional rolling versus wire arc additive manufacturing. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101086>
- Norton, R. L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. Bookman, 2013.
- Novelino, A.L.B. 2021. “Estudo da Geometria dos Cordões Fabricados por Manufatura Aditiva Metálica por Arco Elétrico e Arame Consumível”. Projeto de Graduação 1. Universidade de Brasília.
- Ohlsson, L. 1995. “The Theory and Practice of Abrasive Water Jet Cutting”. ISSN 0348 – 8373.
- Oliveira, C.C.F. 2022. “ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DE PEÇAS IMPRESSAS DE ARAME ER70S-6 OBTIDAS ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA PROCESSO CMT”. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Pimenta, RS. 2022. “Avaliação da Resistência à Fadiga em Peças Impressas Através de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco”. Projeto de Graduação 2. Universidade de Brasília.

- Qi, Z.; Cong, B.; Qi, B.; Sun, H.; Zhao, G.; Ding, J. 2018. "Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys". *J. Mater. Process. Tech.* 2018, 255, 347–353.
- RAMLAB. 2021. "WAAM 101 Uma introdução à fabricação de aditivos para arco elétrico". Disponível em <https://www.ramlab.com/resources/waam-101/> . Acesso em 24 de Agosto de 2021.
- Raut, L.P., Taiwade, R, V. 2020. "Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions". *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 30 p. 7. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05871-5>
- Rebouças, R.C. 2022. "Estudo da influencia do tratamento térmico em peças de arame ER70S-6 obtidas por manufatura aditiva por deposição a arco". Projeto de Graduação 2. Universidade de Brasília, DF.
- Rodrigues, T.A. Duarte, V. Miranda, R.M. Santos, T.G. Oliveira, J.P. 2019. "Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)". *Materials*. Vol. 12, p 1121. <https://doi.org/10.3390/ma12071121>
- SCHNEIDER ELECTRIC. Lexium Linear Motion, Linear axes and multi-axis systems, Catalogue, abril de 2011. Disponível em: < https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Brochure&p_File_Name=DIA7ED1090605EN.pdf&p_Doc_Ref=DIA7ED1090605EN >. Acesso em 18 de Outubro de 2021.
- Scotti, A., Ponomarev, V. 2014. "Soldagem MIG/MAG". Artliber Ed. 2008. 284p.
- Selvamani, S. T., Velmurugana, S., Balasubramanianb, V. e Palanikumar, K. 2020. "Effects of heat distribution during cold metal transfer arc welding on galvanized steel using volumetric heat source model". *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, Issue 5, p. 10097-10109. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.004> .
- Selvi, S., Vishvaksenan, A., Rajasekar, E. 2018. "Cold metal transfer (CMT) technology – anoverview". *Def. Technol*, Vol. 14, n.1, p. 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002>
- Silva, F.L.S. 2017. "Desenvolvimento de Estratégias para Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco". UFSC, Projeto de Fim de Curso.
- Silva, L. J. Souza, D.M. Araujo, D.B. Saad, N.S. Reis, R.P. Scotti, A. 2018. "Gerenciamento Térmico via Resfriamento Ativo por Quase-imersão Aplicado à Manufatura Aditiva por Fusão-Deposição a Arco". Associação Brasileira de Soldagem. XLIV CONSOLDA.
- Souza, S.A. 1982. "Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos Teóricos e Práticos". Editora Edgar Blucher Ltda. 5ª Ed.
- Souza, D.2021. "EFEITO DO RESFRIAMENTO ATIVO POR QUASE-IMERSÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PRÉ-FORMAS DE ALUMÍNIO FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO". Universidade Federal de Uberlândia.
- Somashekara, M.A.; Suryakumar, S. 2017. "Studies on Dissimilar Twin-Wire Weld-Deposition for Additive Manufacturing Applications". *Trans. Indian Inst. Met.* 2017, 70, 2123–2135.

- TECHNO ALLOYS, 2016. Catálogo Metal Arc 76 – ER70S-6. Disponível em < [https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/aco-carbono-e-baixa-liga/arames/ARAME%20METAL%20ARC%2076%20\(ER%2070S-6\).pdf](https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/aco-carbono-e-baixa-liga/arames/ARAME%20METAL%20ARC%2076%20(ER%2070S-6).pdf) >. Acesso em 24 de Outubro de 2021.
- Teske, F. Allenstein, C.L.M. Martins, F. 2007. “INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO GÁS DE PROTEÇÃO NA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DO AÇO ASTM A516 GRAU 70 SOLDADO PELO PROCESSO GMAW”. COBEF IV. Disponível em < <https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2007/files/node074.html> > . Acesso em 15 de Setembro de 2022.
- 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.
- Tofail, S. A. M. Koumoulos, E.P. Bandyopadhyay, A. Bose, S. O’Donoghue, L. Charitidis, C. 2018. “Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities”. Materials Today. Vol. 21, N° 1. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- Uusitalo, Jyri. 2006. “FastROOT - a new welding process for root pass and thin sheet welding”. p.4-6.
- 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.
- Vignatti, A. Sena, G.W.A. Ferreira, N.B.H.G. 2017.”A Importância das Propriedades Mecânicas dos Metais no Projeto e Fabricação de um Componente Mecânico”. Faculdade Norte Capixada de São Mateus.
- Volpato, N. 2017. “Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D”. Blucher. ISBN 978-85-212-1150-1.
- Williams, S.W. Martina, F. Addison, A.C. Ding, J. Pardal, G. Colegrove, P. 2016. “Wire + Arc Additive Manufacturing”. Materials Science and Technology. Vol, 32, p. 641-647. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H. e Xu, J. Norrish. 2018. “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement”. Manuf. Process. Vol. 35 , p. 127–139.
- Yvinec, K.2021. “Uma Investigação Sobre a Prioridade da Invenção do Processo de Soldagem a Arco Elétrico”. Universidade Federal de Uberlândia. Projeto de conclusão de curso.
- Ziberov, M. 2013. “Avaliação da Pulsação Térmica para Controle da Poça de Fusão em Soldagem de Raiz com MIG/MAG Automatizado”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 144p.

APÊNDICES

Trabalho Desenvolvido



XI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECANICA
DE 07 A 11 DE AGOSTO DE 2022, TERESINA-PI, BRASIL

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, Asa 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 a 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.

Obs: Primeira página do artigo.

APÊNDICE B

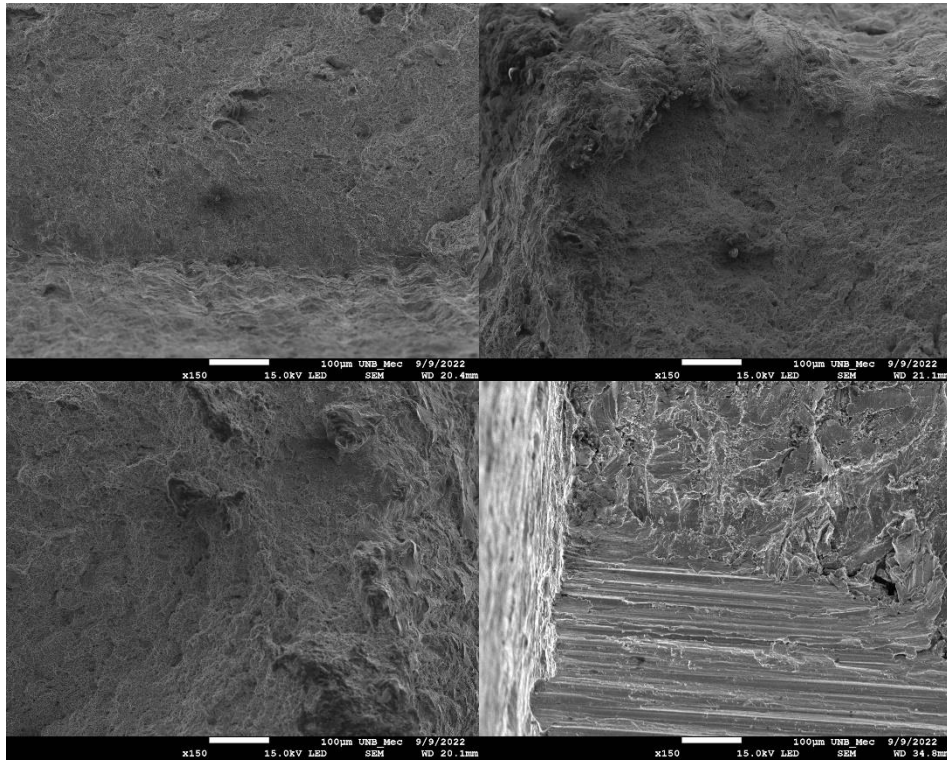
Dados Obtidos no Ensaio de Dureza Vickers

Dureza Vickers (HV)			
Pontos	CP 1	CP 3	CP 5
1	267,00	247,00	237,00
2	255,00	245,00	255,00
3	230,00	224,00	243,00
4	264,00	322,00	241,00
5	362,00	307,00	260,00
Média	275,60	269,00	247,20
DP	45,12	38,31	8,77

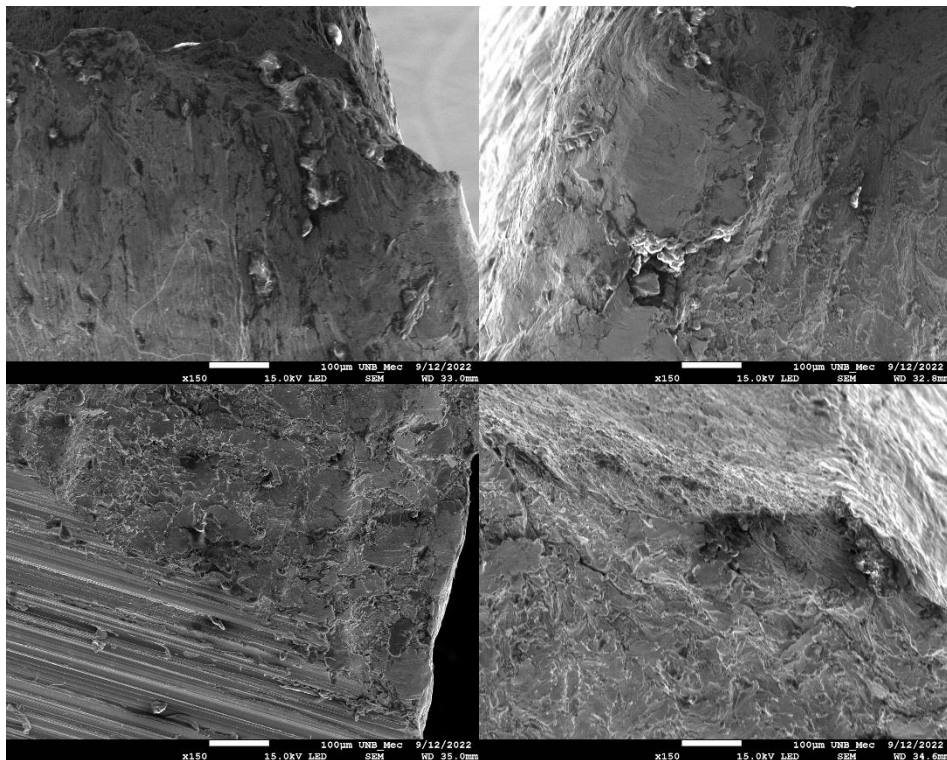
APÊNDICE C

Imagens Complementares da Região da Fratura

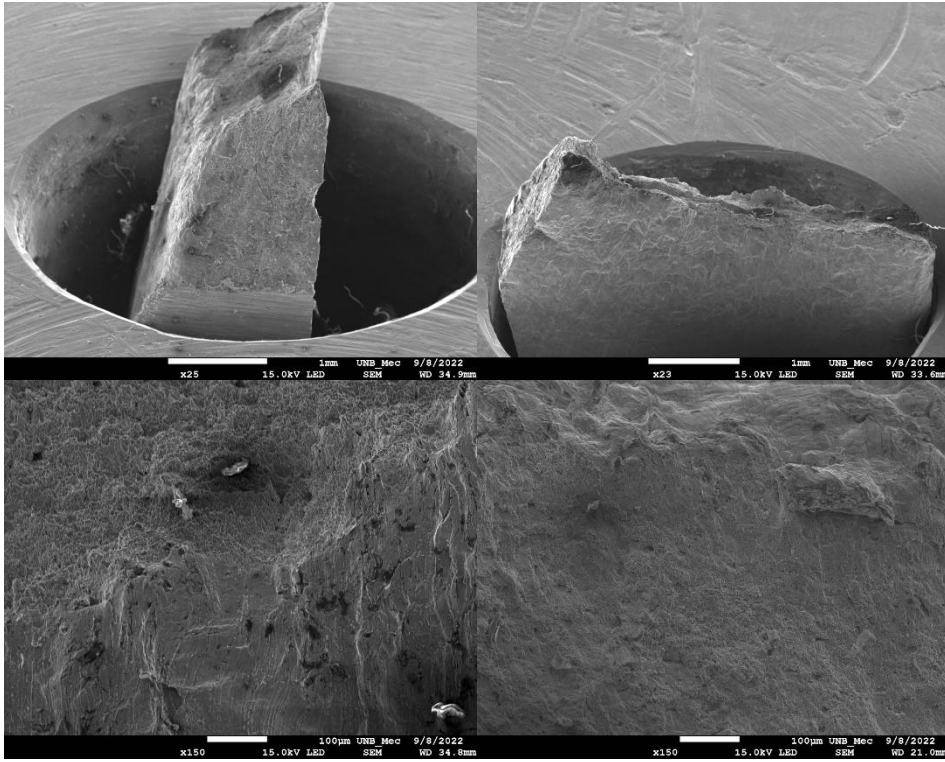
CP 1



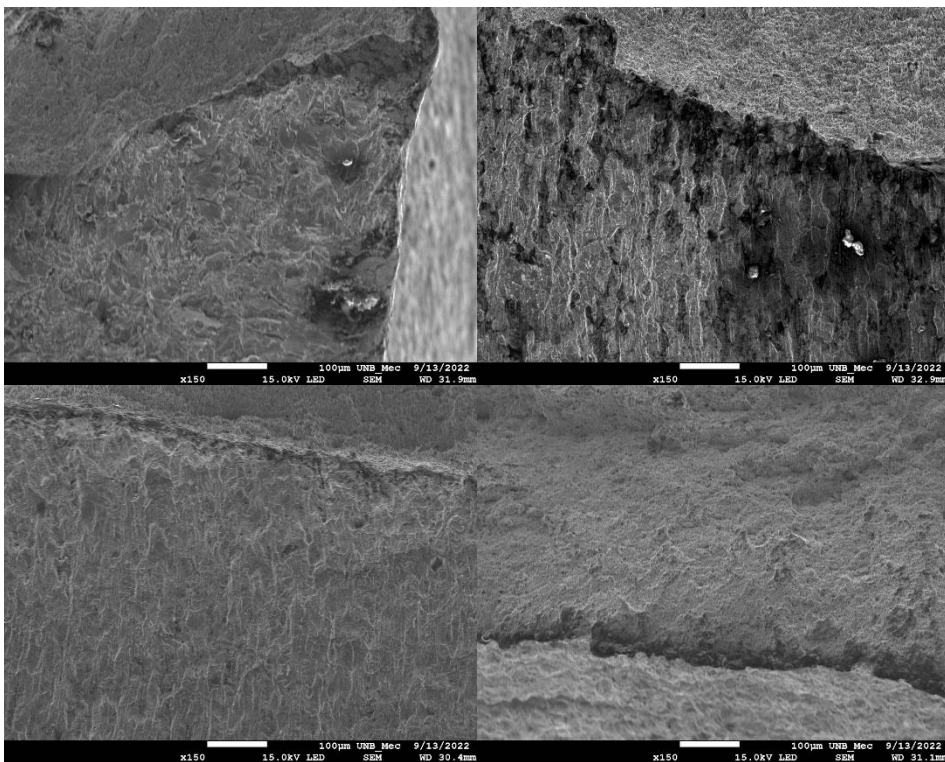
CP 2



CP 4



CP 6



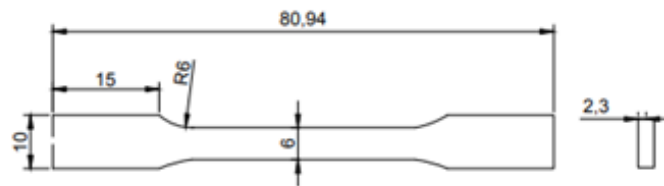
APÊNDICE D

Resultados Obtidos no Sonelastic

Ensaio	E flex (GPa)	± (GPa)	F. Damping (Hz)	Damping (Ad.)	A (V)
Ensaio 1	160,24	2,51	1648,80	0,00005	0,01
Ensaio 2	160,69	2,52	1651,10	0,00006	0,02
Ensaio 3	160,37	2,51	1649,50	0,00007	0,01
Ensaio 4	160,77	2,52	1651,50	0,00021	0,02
Ensaio 5	160,84	2,52	1651,90	0,00000	0,02
Ensaio 6	160,76	2,52	1651,50	0,00016	0,01
Ensaio 7	160,38	2,51	1649,50	0,00000	0,01
Ensaio 8	159,79	2,50	1646,50	0,00017	0,01
Ensaio 9	161,12	2,52	1653,30	0,00024	0,02
Ensaio 10	160,75	2,52	1651,40	0,00013	0,01
Ensaio 11	160,92	2,52	1652,30	0,00014	0,02
MÉDIA	160,60	2,52	1650,66	0,00011	0,01
DP	0,36	0,01	1,83	0,00008	0,01

APÊNDICE E

Desenho Técnico do Corpo de Prova



Universidade de Brasília Departamento de Engenharia Mecânica		
Projeto de Graduação 2	Unidade: mm	
Aluno: Rute Borges Miranda dos Santos	Diedro: 1°	
Data: 08/07/2022	Título: Corpo de Prova	
Matrícula: 160144400	Escala: 1:1	Página: 01/01

ANEXOS

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, S235JO-S355JO, 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 _g =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				

Especificações da Ferramenta de Corte


format
 professional quality

Septembrie 2017

Freze

Freze HSS-E Co8, Tip N, lungi, DIN 844L, prindere cilindrică conform DIN 1835 B, punct de centrare, 3 tăişuri



Dimensiuni (mm)				HSS Co8		HSS Co8 TiAlN	
Ø nominal	L tăiere	L totală	Ø prindere	€/buc	Cod articol	€/buc	Cod articol
3	8	52	6	6.44	FR.2154XX0300	12.48	FR.2155XX0300
4	11	55	6	6.44	FR.2154XX0400	12.48	FR.2155XX0400
5	13	57	6	6.44	FR.2154XX0500	12.48	FR.2155XX0500
6	13	57	6	6.44	FR.2154XX0600	12.48	FR.2155XX0600
8	19	69	10	8.74	FR.2154XX0800	18.81	FR.2155XX0800
10	22	71	10	8.74	FR.2154XX1000	19.49	FR.2155XX1000
12	26	83	12	11.61	FR.2154XX1200	25.90	FR.2155XX1200
14	26	83	12	-	-	28.50	FR.2155XX1400
16	32	92	16	15.68	FR.2154XX1600	34.30	FR.2155XX1600
18	32	92	16	-	-	42.90	FR.2155XX1800
20	38	104	20	23.07	FR.2154XX2000	55.70	FR.2155XX2000

Recomandate pentru frezarea materialelor cu rezistență < 1400 N/mm².

Frezele titanizate (TiAlN) au o durată de viață mai mare și asigură o calitate superioară a tăierii.

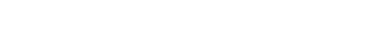
Freze HSS Co 8, Tip W, scurte, DIN 844K, prindere cilindrică conform DIN 1835 B, punct de centrare, 3 tăişuri



Dimensiuni (mm)				HSS Co8	
Ø nominal	L tăiere	L totală	Ø prindere	€/buc	Cod articol
3	8	52	6	6.84	FR.2160XX0300
4	11	55	6	6.84	FR.2160XX0400
5	13	57	6	6.84	FR.2160XX0500
6	13	57	6	6.84	FR.2160XX0600
8	19	69	10	9.22	FR.2160XX0800
10	22	72	10	9.22	FR.2160XX1000
12	26	83	12	12.33	FR.2160XX1200
16	32	92	16	16.51	FR.2160XX1600
20	38	104	20	24.43	FR.2160XX2000

Recomandate pentru frezarea aluminiului și metalelor neferoase. Pentru realizarea de locașe de pană adânci.

Freze HSS Co 8, Tip W, lungi, DIN 844L, prindere cilindrică conform DIN 1835 B, punct de centrare, 3 tăişuri



Dimensiuni (mm)				HSS Co8	
Ø nominal	L tăiere	L totală	Ø prindere	€/buc	Cod articol
6	24	68	6	8.89	FR.2163XX0600
8	38	88	10	12.52	FR.2163XX0800
10	45	95	10	12.52	FR.2163XX1000
12	53	110	12	16.57	FR.2163XX1200
14	53	110	12	18.92	FR.2163XX1400
16	63	123	16	23.16	FR.2163XX1600
20	75	141	20	34.20	FR.2163XX2000

Recomandate pentru frezarea aluminiului și metalelor neferoase. Pentru realizarea de locașe de pană adânci.

Freze profilate HSS Co8, TIP NR, scurte, DIN 844K, prindere cilindrică conform DIN 1835 B, 3 și 4 tăişuri



Dimensiuni (mm)				Nr. tăişuri	HSS Co8		HSS Co8 TiAlN	
Ø nominal	L tăiere	L totală	Ø prindere		€/buc	Cod articol	€/buc	Cod articol
6	13	57	6	3	13.83	FR.2190XX0600	17.46	FR.2196XX0600
8	19	69	10	3	14.73	FR.2190XX0800	20.98	FR.2196XX0800
10	22	72	10	4	14.73	FR.2190XX1000	21.55	FR.2196XX1000
12	26	83	12	4	16.40	FR.2190XX1200	23.94	FR.2196XX1200
14	26	83	12	4	20.84	FR.2190XX1400	29.30	FR.2196XX1400
16	32	92	16	4	23.35	FR.2190XX1600	32.60	FR.2196XX1600
18	32	92	16	4	24.53	FR.2190XX1800	35.60	FR.2196XX1800
20	38	104	20	4	28.40	FR.2190XX2000	45.30	FR.2196XX2000

Recomandate pentru frezarea materialelor cu rezistență < 1400 N/mm².

Frezele titanizate (TiAlN) au o durată de viață mai mare și asigură o calitate superioară a tăierii.