



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JAMES RODRIGO DA SILVA LIMA

MANUFATURA ADITIVA POR SOLDAGEM: UMA REVISÃO NA LITERATURA

RUSSAS

2023

JAMES RODRIGO DA SILVA LIMA

MANUFATURA ADITIVA POR SOLDAGEM: UMA REVISÃO NA LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Campus Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L698m Lima, James Rodrigo da Silva.
Manufatura aditiva por soldagem: uma revisão na literatura / James Rodrigo da Silva Lima. – 2023.
85 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

1. Manufatura Aditiva. 2. Soldagem. 3. MADA . 4. Tecnologia. I. Título.

CDD 620.1

JAMES RODRIGO DA SILVA LIMA

MANUFATURA ADITIVA POR SOLDAGEM: UMA REVISÃO NA LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Campus Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 13/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por nunca ter me desamparado nos momentos mais difíceis e ter me dado forças para chegar até aqui.

Gratidão aos meus pais, Elisângela e Ozenildo, por sempre terem acreditado em mim, por terem sido meu apoio durante todo esse período e serem meus maiores exemplos na vida.

Aos meus irmãos, Sasha e Kauan, por me alegrarem e estarem comigo em todas as situações da vida, por me ajudarem quando mais precisei de afeto.

À minha namorada, Hávila, por dividir comigo as aflições e alegrias dessa caminhada, pela compreensão e carinho.

Aos meus avós, tios e primos por me incentivarem e acreditarem que eu seria capaz.

Aos meus amigos, Guilherme, Bruna e Patric, que me ajudaram durante toda a graduação, dividindo os melhores e piores momentos.

Aos meus colegas de turma, por todas as vivências de sala e resenhas externas.

Ao meu orientador, Dr. Pedro Helton, por ter aceitado o desafio desse trabalho junto comigo.

Aos professores da UFC, que contribuíram para minha formação.

RESUMO

Com o cenário de crescimento dos últimos anos da tecnologia, todas as etapas de produção tendem a sofrer impactos positivos. A aplicação do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) apresenta elevada taxa de deposição e tem se mostrado como um mecanismo bastante promissor para atender as exigências atuais por um rápido desenvolvimento na fabricação de novos produtos. Em síntese, essa tecnologia é uma junção das técnicas de soldagem com a manufatura aditiva tradicional. Dessa forma, nesse trabalho será estudado como ocorre esse método, esclarecendo a sua importância na manipulação de materiais e demais variáveis decorrentes. O trabalho tem como objetivo geral apresentar uma revisão sobre a manufatura aditiva por soldagem, com uma metodologia dividida em etapas a fim de obter referências para a escrita. Para o desenvolvimento do trabalho, foi realizada uma pesquisa bibliográfica em artigos científicos, livros, dissertações, monografias e teses, para conseguinte à leitura e comparação das literaturas, ter mais entendimento sobre o tema para apresentá-lo. Assim, quanto aos objetivos, a pesquisa é exploratória, visto que o estudo se trata de uma revisão de material que já se encontra elaborado. Concluiu-se nesse estudo que a manufatura aditiva por soldagem é importante e tem trazido avanços na fabricação de materiais, apesar de ser uma tecnologia com recentes estudos e técnicas ainda em desenvolvimento.

Palavras-chave: manufatura aditiva. soldagem. MADA.

ABSTRACT

With the technology growth scenario of recent years, all production stages tend to suffer positive impacts. The application of the Arc Deposition Additive Manufacturing (ADM) process has a high deposition rate and has proven to be a very promising mechanism to meet the current requirements for rapid development in the manufacture of new products. In short, this technology is a combination of welding techniques and traditional additive manufacturing. Thus, this work will study how this method occurs, clarifying its importance in the manipulation of materials and other resulting variables. The general objective of this work is to present a review on additive manufacturing by welding, with a methodology divided into stages in order to obtain references for writing. For the development of the work, a bibliographical research was carried out in scientific articles, books, dissertations, monographs and theses, in order to consequently read and compare the literature, to have more understanding on the subject to present it. Thus, regarding the objectives, the research is exploratory, since the study is a review of material that has already been prepared. It was concluded in this study that additive manufacturing by welding is important and has brought advances in the manufacture of materials, despite being a technology with recent studies and techniques still under development.

Keywords: additive manufacturing. welding. MADA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da metodologia do trabalho	17
Figura 2 - Efeitos da altura de camada sobre a qualidade superficial	21
Figura 3 - Principais etapas do processo de manufatura por camada	21
Figura 4 - Previsão para o mercado de impressão 3D	22
Figura 5 – Audi lunar quattro	24
Figura 6 - Síntese das aplicações da MA na medicina	24
Figura 7 - Esquemática do processo SLA	25
Figura 8 - Primeira máquina de Manufatura Aditiva	26
Figura 9 - Processo FDM	27
Figura 10 - Primeira Impressora SLS comercializada	27
Figura 11 - Etapas de um processo genérico de MA	28
Figura 12 - Representação das etapas de um processo por MA	29
Figura 13 - Modelo de peça em CAD	29
Figura 14 - Peça convertida para STL	30
Figura 15 - Remoção dos suportes de peça produzida por MA	31
Figura 16 - Exemplo de usinagem pelo processo de torneamento	34
Figura 17 - Turbina de gás produzida por manufatura convencional à esquerda, e por manufatura aditiva à direita	36
Figura 18 - Comparação entre o processo de manufatura subtrativa e manufatura aditiva em relação ao custo versus complexidade da peça	36
Figura 19 - Exemplo de um sistema de manufatura híbrido	38
Figura 20 - Processo de MA em metais	39
Figura 21 - Sistema genérico de FLP	40
Figura 22 - Processo de Jateamento de Anglutinante	42
Figura 23 - Processo DED com feixe de elétrons e arame	43
Figura 24 - Comparação entre os principais processos de MA de metais	44
Figura 25 - Processo de soldagem TIG	47
Figura 26 - Representação do processo de soldagem GMAW	49
Figura 27 - Representação do processo de soldagem PAW	50
Figura 28 - Desenho esquemático do processo de MADA	53
Figura 29 - MADA usando robô	54

Figura 30 - Máquina controlada por computador, usando sistema de soldagem do tipo MIG.	55
Figura 31 - Processo de soldagem por CMT	57
Figura 32 - Abordagens de direção de deposição: (a) mesma direção, e (b) direção alternativa	59
Figura 33 - Variação da altura das camadas depositadas com diferentes correntes	60
Figura 34 - Formato da poça de fusão em relação à velocidade de soldagem. (a, c) estrutura de grãos colunares. (b, d) formato elíptico com estrutura axial	62
Figura 35 - Peça obtida ao modificar parâmetros elétricos e base obtida através da dissipação de calor	64
Figura 36 - Defeito vs material utilizado em MADA.....	67
Figura 37 - Defeito comum em processos de soldagem: empenamento devido às tensões residuais.....	68
Figura 38 - Irregularidade geométrica	69
Figura 39 - Defeitos encontrados em cordões de solda fabricados por deposição a arco: a) cordão não homogêneo e b) excesso de deposição	69
Figura 40 - Aplicações de fabricação aditiva baseada em arco na engenharia automotiva.....	70
Figura 41 - Braço de retroescavadeira impresso por MADA	71
Figura 42 - Ponte fabricada por MADA.....	71
Figura 43 - Longarina de asa construída por MADA. Em (a) características retas e curvas da peça, em (b) mostra duas longarinas que foram fabricadas simultaneamente ...	72
Figura 44 - Trem de pouso produzido por MADA e seu substrato, que serve de base para a fabricação	72
Figura 45 - Propulsor marítimo fabricado utilizando MADA.....	73
Figura 46 - (a) asa de 0,8 m para testes em túneis de vento, (b) A asa apresenta uma estrutura oca até o ponto médio.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens Soldagem GTAW.....	48
Tabela 2 - Vantagens e Desvantagens Soldagem GMAW	49
Tabela 3 - Vantagens e Desvantagens Soldagem PAW.....	50
Tabela 4 - Metais com suas áreas de aplicação empregando WAAM	56
Tabela 5 - Rendimento térmico dos processos a arco elétrico.....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais processos de usinagem convencional	33
Quadro 2 - Processos de MA que usam FLP	41
Quadro 3 - Características dos processos de MADA	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três Dimensões
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
EBW	<i>Electron Beam Welding</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
FLP	Fusão em Leito de Pó
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
SLA	<i>Stereo Lithography Apparatus</i>
SHS	<i>Selective Heat Sintering</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
UV	Ultravioleta
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo geral.....	15
1.1.2 Objetivos específicos	16
2 METODOLOGIA.....	17
2.1 Caracterização da pesquisa	17
2.2 Coleta de dados	18
2.3 Análise dos dados.....	18
3 MANUFATURA ADITIVA	20
3.1 Definição de Manufatura Aditiva	20
3.2 Histórico da Manufatura Aditiva e seus Processos	23
3.3 Vantagens e Desvantagens no uso da Manufatura Aditiva.....	31
3.4 Manufatura Redutiva	32
3.5 Vantagens e Desvantagens no uso da Manufatura Redutiva.....	35
3.6 Manufatura Aditiva x Manufatura Redutiva	35
4 MANUFATURA ADITIVA EM METAIS.....	39
4.1 Fusão em Leito de Pó (Powder Bed Fusion - PBF).....	40
4.2 Jateamento de Anglutinante (Binder Jetting - BJ)	42
4.3 Deposição Direta de Energia (Directed Energy Deposition - DED).....	43
5 MANUFATURA ADITIVA POR SOLDAGEM.....	45
5.1 Processos de soldagens aplicados à MA	46
5.1.1 Soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)	47
5.1.2 Soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding).....	48
5.1.3 Soldagem PAW (Plasma Arc Welding).....	50
6 MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA)	52
6.1 Parâmetros da MADA	57
6.1.1 Trajetória de deposição.....	58
6.1.2 Corrente elétrica	59
6.1.3 Aporte térmico (Energia de soldagem)	60
6.1.4 Velocidade do deslocamento	61
6.2 Vantagens MADA	62
6.3 Desvantagens MADA.....	63

6.4 Propriedades mecânicas após a MADA.....	64
6.5 Defeitos pós MADA	66
6.6 Aplicações MADA.....	70
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

As novas tecnologias têm impactado de forma significativa os processos produtivos, aumentando a competitividade no mercado e a demanda por objetos inovadores. Sendo assim, para o desenvolvimento de novos produtos, a manufatura aditiva (MA) surge como uma grande possibilidade de estimular a inovação, aliada ao menor tempo para produzir peças e com propriedades mecânicas de acordo com as aplicações desejadas.

Diferente dos processos de usinagem (processo de fabricação com remoção de pedaço de material de peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar formas geométricas irregulares), a deposição consecutiva de camadas que hoje vem sendo aplicada através da impressão 3D, representa um conjunto de tecnologias de fabricação em que o objeto a ser construído é obtido a partir de um *software* CAD que gera o modelo digital 3D, e depois é definida sua estratégia de confecção baseada na deposição sucessiva de material, ou seja, camada sobre camada.

Gibson et al. (2010), exemplifica que depois de converter o modelo CAD 3D em camadas, é necessário determinar a trajetória e os parâmetros de deposição. Os componentes básicos são: controlador CNC, sistema de movimentação, fonte de energia e um sistema de alimentação de material. Cada camada possui uma espessura finita, de forma que, depois de fabricada, a peça será uma aproximação do modelo original.

Para Alberti et al. (2014), a distinção apresentada pelo processo de fabricação por manufatura aditiva vem ampliando sua aplicação, que se dá na possibilidade de utilizar diferentes materiais, dentre eles, os polímeros e os metais, permitindo também a utilização em processos de soldagem que vão desde os convencionais (GMAW, GTAW, PAW) até aqueles que não são convencionais (EBW, LBW). Contudo, Uziel (2016), ressalta que a escolha pelos processos de soldagem por arco elétrico convencionais vem da característica de possuírem maior eficiência energética e ampla abrangência em relação à quantidade de material depositado, possibilitando a produção de peças maiores, com maior rapidez.

De acordo com Alcalde e Wiltgen (2018), a chance de manipular uma peça desenhada em um ambiente computacional do tipo CAD em 3D, autoriza a visualização de como a peça pode ficar quando fabricada, além de permitir a análise completa do projeto, a implementação de melhorias necessárias e a identificação de interferências funcionais, incluindo a viabilidade de movimentação de peças para observar sua montagem ou mesmo o funcionamento do mecanismo projetado. Ainda acrescenta Alcalde e Wiltgen (2018), que a

probabilidade da união dos projetos desenhados em CAD com as máquinas de fabricação mecânica capazes de executar a construção de peças com informações vindas de modelos, desenhos ou códigos computacionais que o meio para a fabricação de protótipos começou a se tornar mais viável e rápido.

A relevância desse tema se refere ao entendimento de que a manufatura aditiva se constitui na criação de componentes tridimensionais através da deposição de aditivo camada por camada. Esse processo de fabricação possibilita a construção de componentes de geometria complexa em menos etapas e sem empregar o uso de ferramentas ou moldes.

A justificativa para a escolha deste tema dá-se pela importância de conhecer os tipos de manufatura e de soldagem que podem ser utilizados nos processos de manipulação de materiais. A Manufatura por Deposição a Arco (MADA) é uma tecnologia de fabricação aditiva relativamente nova e emergente, estudar essa técnica permite compreender suas capacidades, limitações e potenciais aplicações, seja nos setores aeroespaciais, automotivos ou médicos.

Esse novo recurso não irá substituir os processos tradicionais, a MADA é fundamental para a velocidade e complexidade na produção de peças, enquanto a usinagem vai proporcionar acabamento e tolerância dimensional.

Em resumo, esse estudo sobre MADA é relevante devido ao potencial de impacto nos setores industriais, sua capacidade de produção rápida e personalizada, sua contribuição para a redução de desperdício e custos, sua aplicação em reparo e manutenção, bem como seu papel na inovação e pesquisa.

1.1 Objetivos

Os objetivos serão divididos em dois, geral e específicos, o primeiro explica a ideia do trabalho de forma complexa e o segundo explana as etapas.

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral apresentar uma revisão sobre a manufatura aditiva por soldagem.

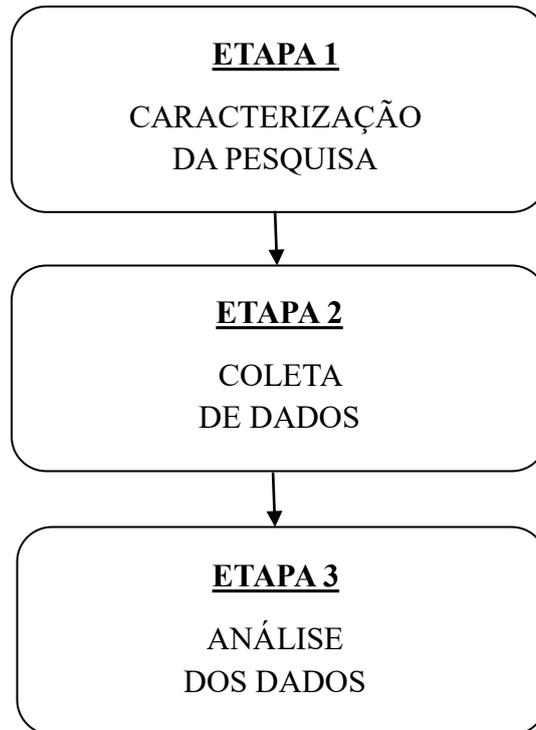
1.1.2 Objetivos específicos

- Contextualizar a definição de manufatura aditiva, abordando seu histórico e processos para aplicações nos dias atuais;
- Diferenciar os processos entre manufatura aditiva e processos convencionais, destacando as principais características de cada um;
- Apresentar a manufatura aditiva aplicada a metais, destacando os métodos e suas especificações;
- Esclarecer como ocorre o processo de manufatura aditiva por soldagem, ressaltando as técnicas que podem ser usadas;
- Expor o que é e como ocorre a manufatura aditiva por deposição a arco, mencionando quais seus parâmetros, vantagens, limitações, defeitos, propriedades mecânicas e aplicações.

2 METODOLOGIA

Essa etapa do trabalho irá explicar como foi realizada a metodologia da pesquisa para a elaboração da escrita, conforme Figura 1.

Figura 1 - Representação da metodologia do trabalho



Fonte: Autor (2023).

2.1 Caracterização da pesquisa

A ideia deste estudo é propor uma revisão bibliográfica a fim de aprofundar o assunto abordado. Assim, o trabalho apresenta teor teórico e a pesquisa é enquadrada como básica quanto à natureza, podendo servir, no entanto, como base para futuros estudos de caso ou problemas práticos.

Para o desenvolvimento desse estudo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica em artigos científicos, livros, websites, e subsequente à leitura e comparação das literaturas, foi possível maior obtenção de informações para a escrita do trabalho. Assim, quanto aos objetivos, a pesquisa é exploratória, visto que se trata de uma revisão de material que já se encontra elaborado.

Quanto à abordagem, a pesquisa é qualitativa, pois não se preocupa com representatividade numérica, e sim em compreender e analisar criticamente os dados obtidos.

2.2 Coleta de dados

Para a coleta de dados foram utilizados websites de empresas de manufatura aditiva, de universidades e de notícias, livros, monografias pertinentes ao tema e os bancos de dados - Google Acadêmico e Science Direct - usados para artigos científicos com conteúdo recente sobre manufatura aditiva.

A pesquisa foi desenvolvida em etapas, inicialmente por palavras-chave em português e em inglês, tais como “manufatura aditiva”, “soldagem” no Periódicos Capes e Science Direct, a ideia era buscar artigos de revisão sobre a tecnologia. Com o decorrer do trabalho, acrescentou-se às palavras-chave iniciais outros termos como, “manufatura aditiva + soldagem”, “parâmetros soldagem + manufatura aditiva”, por exemplo, para buscar estudos referentes ao tópico procurado no momento. Outros bancos de dados foram consultados, como websites de empresas do ramo e universidades. O material analisado foi encontrado em inglês e português em monografias e outros trabalhos acadêmicos.

2.3 Análise dos dados

Finalizada a fase da coleta de dados, iniciou-se o processo de decisão dos tópicos a serem analisados e de roteirização das informações conseguidas, tornou-se fundamental criar tópicos que auxiliem no entendimento do tema, de forma sequencial.

De acordo com Minayo (2010), a análise de dados qualitativos se refere a descobrir e entender um cenário de maneira geral, usando informações individuais. Tanto a análise qualitativa quanto a análise quantitativa usam a rotulagem e codificação de todos os dados para reconhecer as semelhanças e diferenças do que está sendo investigado.

Inicialmente optou-se, além de revisar as diferentes categorias de manufatura aditiva, por uma abordagem mais detalhada dos materiais disponíveis para os processos de MA e os estudos de materiais futuros. Subsequente, o estudo foi aprofundado sobre a manufatura aditiva por soldagem e aplicações na indústria, analisando suas vantagens e desvantagens, bem como os seus parâmetros na aplicação.

Concluído o processo de roteirização dos tópicos a serem abordados na pesquisa, iniciou-se a escrita do trabalho em introdução, metodologia, referencial teórico, abrangendo a

introdução da manufatura aditiva, manufatura aditiva por soldagem e aplicada ao processo por arco elétrico, apresentando suas tecnologias, vantagens, limitações e aplicações, por fim considerações finais e referências.

3 MANUFATURA ADITIVA

Nesta etapa será abordada a definição de manufatura aditiva, discorrendo histórico e nomenclaturas; a relação da manufatura aditiva e manufatura redutiva, demonstrando suas aplicações, vantagens e desvantagens; os processos de manufatura aditiva por metais, com foco na manufatura aditiva por soldagem, analisando parâmetros, defeitos, propriedades mecânicas, limitações, etc.

3.1 Definição de Manufatura Aditiva

A habilidade da manufatura aditiva de promover a liberdade de projeto, facilitar a fabricação de componentes complexos, reduzir a perda de material e diminuir o tempo de lançamento ao mercado constituem as características mais atrativas. O formato final pode ser alcançado em poucas etapas, sem a utilização de ferramental como moldes, matrizes ou punções, nem a necessidade de montagem de diferentes partes. Isto resulta em economia de material.

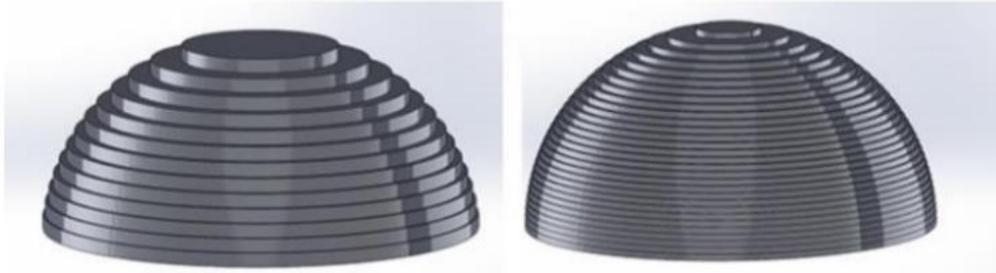
Para Gibson et al. (2010), não se inicia a fabricação a partir de um volume pré-definido, no qual as partes são removidas e descartadas, mas sim mediante a deposição de apenas a quantidade necessária para a construção do produto. Desta forma, a manufatura aditiva se apresenta como uma solução ecologicamente correta, uma vez que as perdas de material são significativamente reduzidas, assim como a energia total utilizada.

Para Sun (2021) manufatura aditiva é o processo de fabricação de objetos camada por camada a partir de modelos digitais de geometria tridimensional, sem as restrições dos processos convencionais de forjamento, fundição e usinagem. Em processos convencionais ou redutivos, para fabricação de uma peça com geometria mais complexa, é exigida uma sequência de operações e ferramentas, na manufatura aditiva esse número de operações é reduzido, sendo assim uma fabricação mais direta (KUMAR; SATHIYA, 2020).

De acordo com Levy et al. (2010), a fabricação de peças camada por camada teve suas origens na prototipagem rápida. Embora este marco seja utilizado como referência para a maioria dos cientistas, a ideia de fabricação por camadas já era utilizada no antigo Egito, para a construção de pirâmides. Apesar disto, foi apenas em 1984 que Chuck Hull criou o processo de Estereolitografia, definido como “método e máquina para fazer objetos sólidos através da impressão sucessiva de finas camadas do material UV curável, uma em cima da outra” (HULL, 1984; WANG et al., 2017).

A Figura 2 apresenta o uso da tecnologia camada por camada na fabricação de peças.

Figura 2 - Efeitos da altura de camada sobre a qualidade superficial

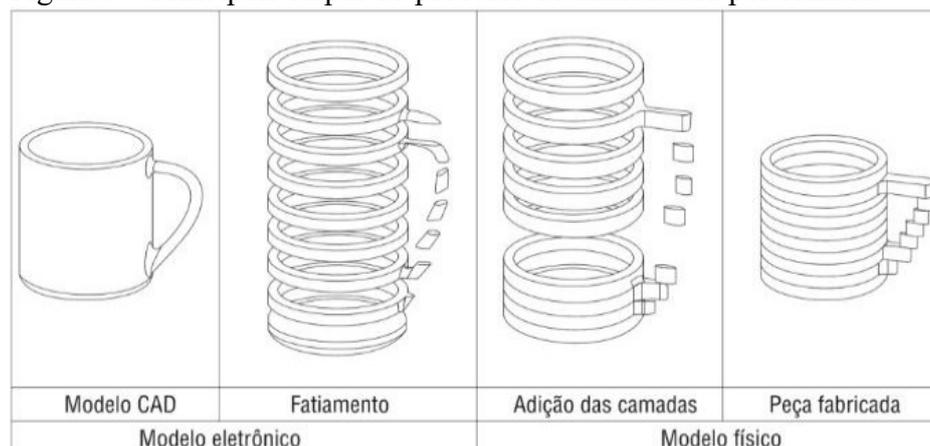


Fonte: Brasília Fab Lab (2017).

De acordo com Schmidt et al. (2017), a manufatura aditiva é definida pelas normas ISO 17296 (Manufatura Aditiva – princípios gerais) e ASTM F2792 (Terminologia Padrão para Tecnologias de MA) como o processo de união de materiais para a fabricação de partes ou objetos a partir de um modelo 3D, usualmente camada por camada, de forma oposta à tecnologia de fabricação subtrativa. A união de materiais pode ser obtida a partir de processos de soldagem.

Para Pazhamannil e Govindan (2021) manufatura aditiva é o processo de criar objetos, camada por camada, de quaisquer geometrias a partir de um modelo digital. Antigamente esse conceito era atribuído à prototipagem rápida, como visto em Choi e Samavedam (2002), que define prototipagem rápida ou manufatura em camadas como o processo em que um sólido de forma pré-definida é formado a partir da adição de matéria-prima sucessivamente em camadas.

Figura 3 – Principais etapas do processo de manufatura por camada

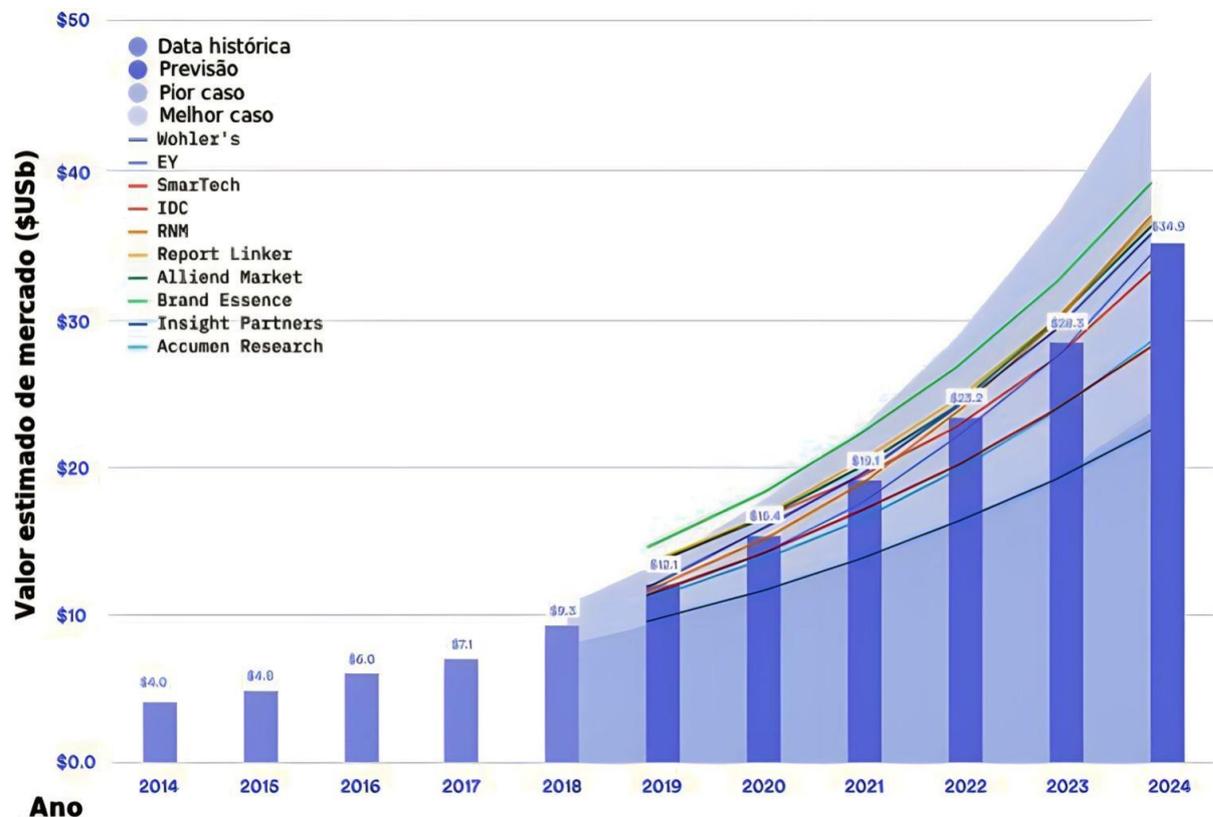


Fonte: Volpato et. al (2007).

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015) manufatura aditiva é o termo formal para o que é popularmente conhecido como impressão 3D e para o que era chamado de prototipagem rápida. Já para Attaran (2017) a manufatura aditiva é a versão industrial da impressão 3D, em que manufatura aditiva é a tecnologia em si e a prototipagem rápida a aplicação dessa tecnologia.

Giordano et al. (2016), ressaltam que a manufatura aditiva tem sido apontada como a tecnologia capaz de revolucionar os processos produtivos das empresas e de alterar as estratégias de produção atualmente empregadas. A tendência é que a manufatura aditiva passe a ser gradativamente utilizada como parte dos processos produtivos de produtos finais à medida que atinja maiores níveis de qualidade, tais como precisão dimensional, acabamento e tolerâncias, além de menores custos de produção, aproximando-se mais daqueles existentes na produção em larga escala.

Figura 4 – Previsão para o mercado de impressão 3D



Fonte: Adaptado de Sculpteo (2020).

3.2 Histórico da Manufatura Aditiva e seus Processos

Veit (2018) resumiu a história da manufatura aditiva em quatro correntes: a primeira corrente é a prototipagem, emergindo no final da década 1980, com aplicações discretas devido ao elevado custo de equipamentos e materiais, e com foco maior no desenvolvimento de protótipos. Inicialmente, o termo Prototipagem Rápida foi bastante utilizado para definir um processo em que se criava um protótipo antes de sua comercialização e de maneira rápida, o foco era basicamente fazer um modelo no qual o produto final seria derivado. Entretanto com a evolução das máquinas e das tecnologias envolvidas, o termo passou a ficar ultrapassado, pois a tecnologia não se limitava apenas a produzir um protótipo, visto que a peça final e funcional cada vez mais passava a ser fabricada diretamente das máquinas que antes realizavam apenas a prototipagem (GIBSON et al., 2015).

Para Debroy et al. (2018), a finalidade era de criar uma representação real do produto, de forma rápida, antes de sua comercialização. Modelos em três dimensões são melhores do que desenhos para a compreensão de um projeto durante a etapa conceitual. No entanto, com o avanço da tecnologia foi possível criar componentes funcionais metálicos, e não apenas poliméricos. Foi necessário, porém, a integração de outras tecnologias como as advindas da soldagem e das fontes de energia associadas, que são o arco, laser e feixe de elétrons. O processo funciona com a consolidação de pó ou arame a partir da sua fusão e solidificação, após entrar em contato com a fonte de energia.

Ainda para Gibson et al. (2010), o termo protótipo deixou de ser utilizado e deu lugar ao termo “Manufatura Aditiva”. Essa fase da evolução é destinada às aplicações, na década de 1990 e 2000, com foco na expansão de materiais e equipamentos utilizados, principalmente na medicina, nos setores aeroespacial, de energia, automotivos, dentre outros.

Na indústria automobilística as aplicações são diversas. A Audi produziu as rodas de seu automóvel, o Audi lunar quattro, projetado para andar na lua, como mostra A Figura 5 (VOLKSWAGEN, 2018).

Figura 5 - Audi lunar quattro

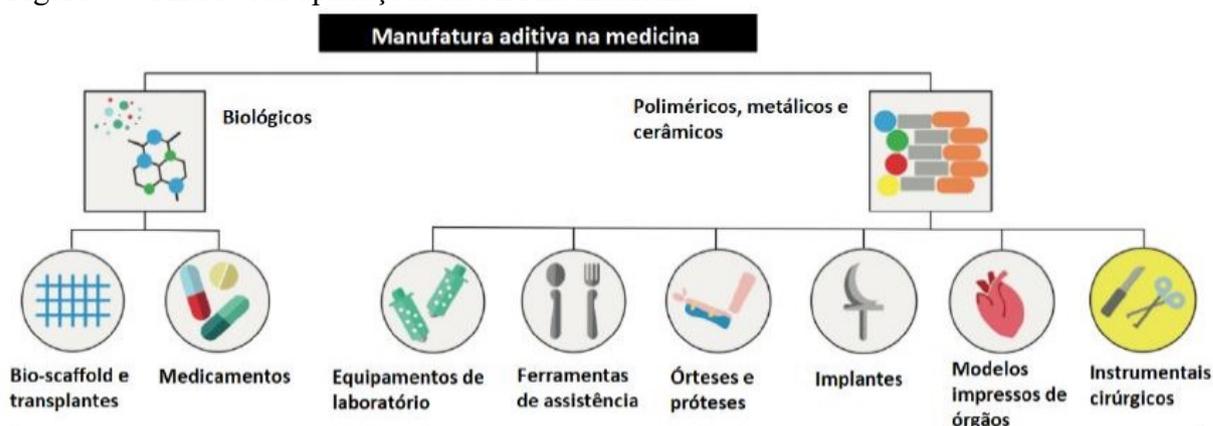


Fonte: Volkswagen (2018).

As tecnologias de manufatura aditiva têm sido aplicadas na medicina quase desde o seu surgimento com a prototipagem rápida. Levando em consideração que a manufatura aditiva evoluiu paralelamente com os softwares CAD, a medicina também evoluiu com os inúmeros equipamentos médicos capazes de reproduzir imagens, como nos exames de tomografia computadorizada, raio x, ressonância magnética, ultrassonografia dentre outros. Com isso, o que originalmente era usado apenas para fins diagnósticos por imagem, a medicina encontrou na manufatura aditiva a possibilidade de reproduzir essas imagens em modelos físicos tridimensionais reais para diversas outras utilidades (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

A Figura 6 apresenta algumas aplicações da manufatura na medicina, de acordo com o tipo de material utilizado.

Figura 6 – Síntese das aplicações da MA na medicina

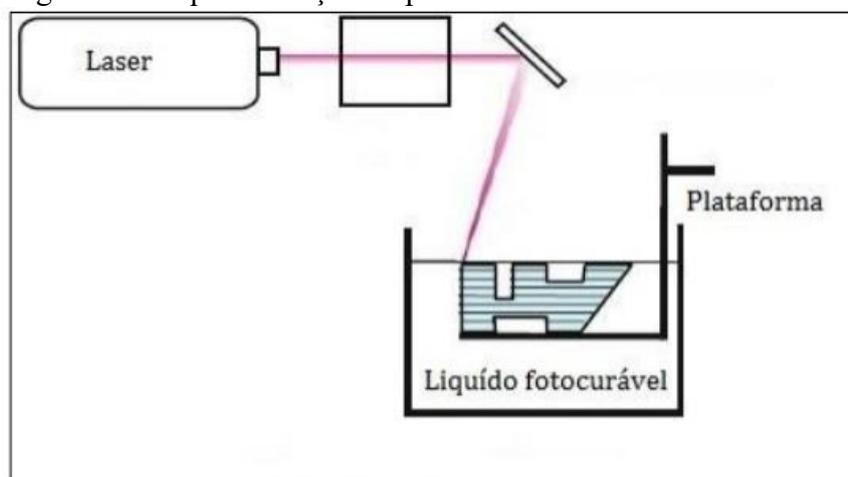


Fonte: Adaptado de Culmone, Smit e Breedveld (2019).

O conceito de manufatura aditiva ou impressão 3D foi iniciado por Hideo Kodama em 1981, no Instituto de Pesquisa Industrial de Nagoya, Japão. Kodama desenvolveu um modelo que utilizava luz ultravioleta (UV) para endurecer polímeros fotossensíveis e assim obter objetos tridimensionais, porém a tecnologia não foi comercializada (SCHOTTE, 2019).

Em seguida, mas ainda na década de 1980, Charles Hull se destacou com a invenção da Estereolitografia (SLA), como mostra a Figura 7, criando modelos a partir da reação de cura de uma resina líquida por meio de raios ultravioletas ou laser. No processo, essa resina é armazenada em um recipiente, submergindo à medida que as camadas vão sendo constituídas, e ganhando resistência mecânica com a solidificação das camadas (SCHOTTE, 2019; CHUA et al., 2010).

Figura 7 – Esquemática do processo SLA



Fonte: Gibson (2015).

Em 1986, Hull participou da fundação da 3D Systems, empresa pioneira no ramo de impressão 3D e um ano depois, em 1987, a primeira máquina de manufatura aditiva foi comercializada no mundo, a SLA-1, pela própria 3D Systems, conforme Figura 8 (3D SYSTEMS, 2021).

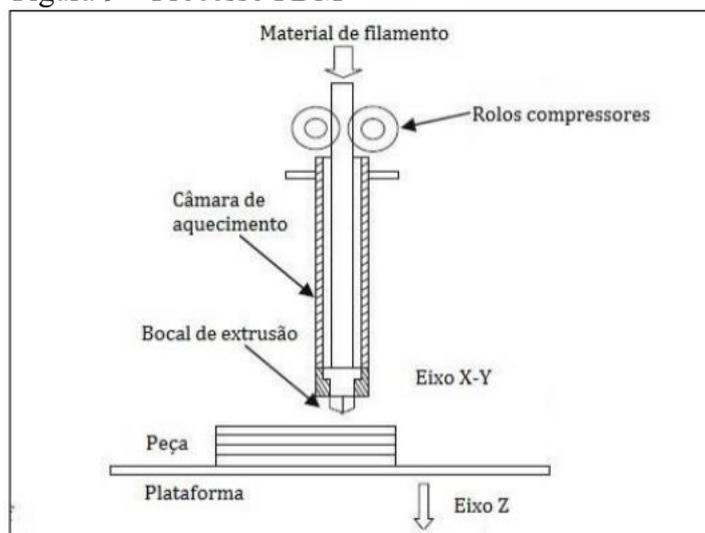
Figura 8 - Primeira máquina de Manufatura Aditiva



Fonte: Done 3D (2022).

No final da década de 80, Scott Crump inventou a tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), bastante utilizada nas impressoras 3D a nível amador atualmente, pois caracteriza-se por apresentar menores custos de produção, simplicidade de construção, bem como da utilização de materiais termoplásticos como matéria prima, fazendo a extrusão de plástico para formar os objetos CHUA, LEONG e LIM, 2010; ABREU, 2017). Gibson (2015) definiu o processo como sendo uma câmara de aquecimento, utilizada para liquefazer um termoplástico que alimenta o sistema por meio de um filamento, esse filamento é forçado a adentrar no interior da câmara de aquecimento por um conjunto mecânico que gera a pressão de extrusão. Essa tecnologia só foi comercializada em 1990 pela Stratasys. A Figura 9 apresenta de forma esquemática como acontece o processo de FDM.

Figura 9 – Processo FDM



Fonte: Gibson (2015).

Em 1992, a primeira máquina utilizando a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) foi comercializada pela DTM, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Primeira Impressora SLS comercializada



Fonte: RenderBlog (2021).

Baseado nas muitas definições da nomenclatura e particularidades dos processos, em 2009 o comitê F42 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) foi criado para guiar o desenvolvimento das padronizações em manufatura aditiva. Na ASTM F2792, o termo manufatura aditiva foi definido como padrão e na ASTM F2915 aconteceram padronizações com relação ao formato dos arquivos da tecnologia, permitindo assim a transferência entre diferentes hardwares e softwares (FRAZIER, 2014).

Em 2015 foi publicada a ISO/ASTM 52900, sucedendo a ASTM F2792 e expandindo mais ainda a padronização da manufatura aditiva. Foi a primeira norma para MA com a *International Organization for Standardization* (ISO), e de grande importância para a tecnologia (SPRINKLE, 2021).

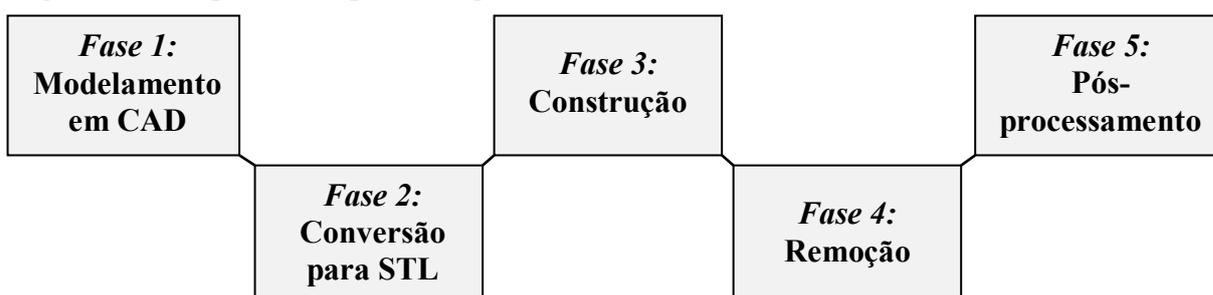
Com relação às categorias de manufatura aditiva, também há divergências nas nomenclaturas. Antes de terem os termos padronizados, os autores costumavam definir as tecnologias de MA apenas com relação a seus processos, conforme eram registradas nas patentes ou por outras variáveis, fazendo com que para um mesmo processo semelhante, vários nomes sejam encontrados nas literaturas.

Dentre os materiais utilizados na manufatura aditiva, se destacam os polímeros, metais, materiais cerâmicos e compósitos, sendo escolhidos dependendo da aplicação requerida e da categoria de manufatura aditiva adotada. Com relação aos metais, os mais utilizados incluem o titânio, alumínio e aço inoxidável, devido à crescente procura por materiais mais leves e resistentes, principalmente na indústria aeroespacial (REPORTS AND DATA, 2020).

Quanto aos processos da manufatura aditiva, são classificados em três grupos devido às matérias primas utilizadas: baseados em líquidos, baseados em sólidos e baseados em pó. A escolha do processo de fabricação vai depender da função que se deseja que o protótipo desempenhe, ou seja, existem processos que devido às suas características, são utilizados na fabricação de protótipos visuais, enquanto outros permitem a obtenção de protótipos que se assemelham muito às peças finais (VOLPATO et al., 2007).

Embora haja diferentes processos de manufatura aditiva, várias etapas são comuns a todos eles. Cada tecnologia possui suas particularidades, entretanto, de um modo geral pode-se dividir o processo em cinco fases, que são: modelamento em CAD, conversão para STL e manipulação, construção, remoção e pós-processamento, como exposto na Figura 11 (REDWOOD, 2017).

Figura 11 – Etapas de um processo genérico de MA



Fonte: Autor (2023).

A Figura 12 mostra todas as etapas listadas acima para a fabricação de uma peça.

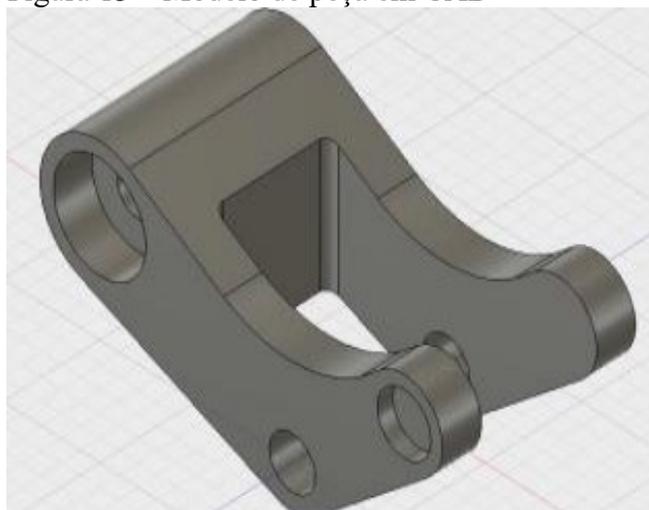
Figura 12 – Representação das etapas de um processo por MA



Fonte: Toffoli (2018).

Fase 1 - primeiro passo nas técnicas de manufatura aditiva a partir de um software. Todos os tipos de MA iniciam a partir de um modelo virtual, que pode ser obtido de diversas maneiras e que irá retratar toda a geometria externa da peça final. Este modelamento viabiliza a construção de modelos volumétricos ou de superfície fechada que deverão ser interpretados como um objeto único e consistente (VOLPATO, 2007).

Figura 13 – Modelo de peça em CAD

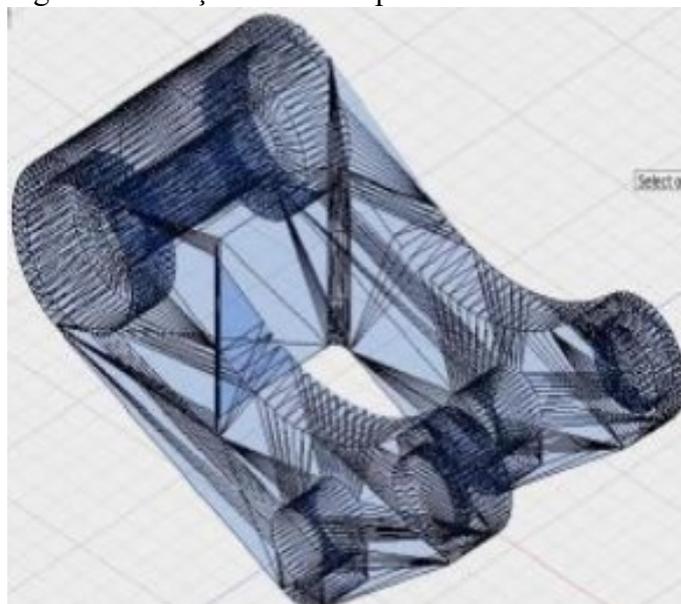


Fonte: Lima, Santos (2018).

Fase 2 - nesse passo o modelo CAD é convertido em STL, conforme Figura 14, que descreve a superfície fechada do modelo e servirá de base para os cálculos realizados. O arquivo STL, de *stereolithography* ou estereolitografia, descreve o modelo CAD em função apenas de sua geometria, sem cor, materiais, unidades entre outras informações; e funciona

aproximando as superfícies do modelo a uma série de faces triangulares, formando uma malha que recobre por completo o objeto (GIBSON, ROSEN E STUCKER, 2015).

Figura 14 – Peça convertida para STL



Fonte: Lima, Santos (2018).

Fase 3 - o arquivo STL recebe as alterações necessárias dependendo das condições de cada operação, e depois é enviado para a máquina de manufatura aditiva, que é configurada baseada nos parâmetros do processo, como por exemplo: material utilizado, fontes de energia, dimensões geométricas, espessura da camada, dentre outras variáveis. Após a definição de todas as variáveis, inicia-se a impressão com o material adicionado camada por camada, formando o objeto desejado (GIBSON, ROSEN E STUCKER, 2015).

Fase 4 - após a máquina finalizar a operação, a peça deve ser retirada do interior do equipamento, os suportes podem ser removidos manualmente por remoção mecânica ou por meio de quebra de estruturas frágeis, dissolução através de agentes corrosivos ou detergentes, ou fusão por temperatura (VOLPATO, 2006).

A Figura 15 demonstra como ocorre o processo de remoção dos suportes na peça produzida.

Figura 15 – Remoção dos suportes de peça produzida por MA



Fonte: Site hubs.com.

Fase 5 - etapa geralmente manual onde são realizados procedimentos de lixamento, polimento ou aplicação de revestimento. Alguns processos necessitam de infiltração/revestimento de superfície, ou processos térmicos para que as peças fabricadas adquiram a resistência mecânica necessária (GIBSON, 2015).

3.3 Vantagens e Desvantagens no uso da Manufatura Aditiva

Os ramos industriais que estão sendo transformados pela manufatura aditiva são: aeroespacial; automobilística; médica; setor elétrico; bens de consumo em geral, entre outros. Borille (2016) ressalta as vantagens da aplicação de MA na fabricação e reparo de moldes e componentes para a injeção de plásticos. Esta tecnologia permite a construção de moldes com canais de refrigeração acompanhando a superfície do molde de modo a facilitar a troca de calor e homogeneizar a temperatura do molde. Com isso, obtêm-se menores tempos para os ciclos de injeção além de maior controle de deformações nas peças causadas por gradientes térmicos. Ainda acrescenta Borille (2016), que as vantagens de construções, reparo de machos metálicos, bem como a recuperação de superfície desgastadas de moldes. Com a Manufatura Aditiva (MA) é possível obter reparos de baixo custo em comparação com a substituição de todo o molde.

Para Alberti et al. (2015), Chen et al. (2015), Mani et al. (2014), pode-se descrever algumas vantagens das técnicas de manufatura aditiva podem ser citadas: possibilidade de utilização de uma variada gama de materiais; geração de menos resíduos durante a fabricação;

capacidade de aperfeiçoar geometrias e criar componentes leves que reduzem o consumo de material na fabricação e consumo de energia em uso; e a subsequente redução do custo de transporte na cadeia de suprimentos. Dada às suas vantagens, observam-se aplicações da tecnologia manufatura aditiva em diferentes segmentos indústrias. Ainda acrescenta Alberti et al. (2015), Chen et al. (2015), Mani et al. (2014), na indústria aeroespacial, por exemplo, componentes a base de ligas de titânio e alumínio podem ser fabricados por manufatura aditiva, conciliando baixa densidade, alta resistência mecânica e geometria complexa. Igualmente, a manufatura aditiva encontra aplicação na manufatura de carros de luxo, que envolve produção em baixa escala de componentes de geometria complexa.

Quanto às desvantagens desse processo, pelo próprio princípio de funcionamento de adicionar material camada por camada, limitações com relação às dimensões da peça aparecem, visto que quanto maior a peça, mais material deve ser adicionado e maior será o tempo de produção, e peças maiores requerem máquinas e estruturas maiores de impressão 3D. Outros pontos contras que se destacam: os custos iniciais elevados; falta de padronizações e certo desconhecimento ainda sobre a tecnologia; a dificuldade de aplicar a tecnologia em grandes volumes de produção, principalmente com relação à velocidade de produção; presença de tensões superficiais e empenamentos; anisotropia; desalinhamento das camadas, sendo necessário em praticamente todas as técnicas de MA o pós-processamento para melhor acabamento e propriedades mecânicas (ARAÚJO, 2021).

3.4 Manufatura Redutiva

Divergente ao processo de manufatura aditiva, a manufatura redutiva tem como característica a remoção de material com geração de cavaco, cujos objetivos são determinar forma, dimensão ou acabamento de peças. Nos processos de usinagem ocorrem movimentos relativos entre o gume da ferramenta e a peça a ser usinada e desta forma as peculiaridades provenientes destes movimentos de contato, como a formação de cavaco, força de corte exigida e desgastes da ferramenta são resultantes da geometria da ferramenta escolhida. (KÖNIG; KLOCKE, 1997).

De acordo com Din (2003), a usinagem fundamenta-se no estudo de mecânica no que envolve o atrito e deformações plásticas, nela é estudada a termodinâmica através dos impactos do calor e por fim pode-se abranger uma análise nas propriedades dos materiais.

Em concordância com os atores citados, Machado et al. (2009), define o a usinagem como o procedimento de fabricação mecânica que possibilita dar acabamento,

dimensão, forma ou ainda a associação qualquer destes três pela retirada de material, produzindo o cavaco.

Ferraresi (1970) relaciona dentre os principais processos de usinagem convencional: torneamento, fresamento, furação, aplainamento, brochamento, mandrilhamento e rosqueamento. O Quadro 1 apresenta como ocorrem esses métodos.

Quadro 1 – Principais processos de usinagem convencional

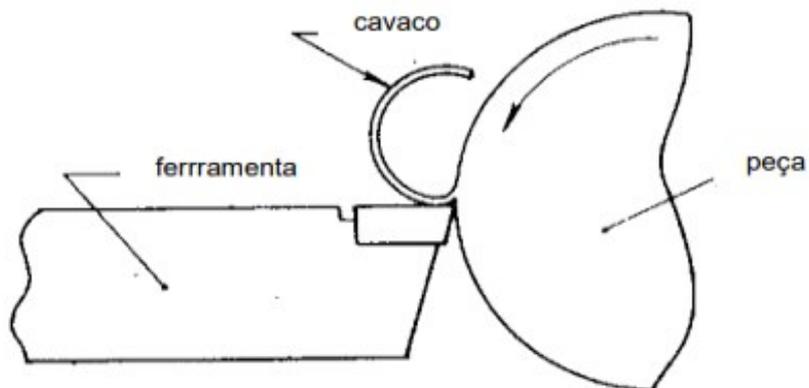
Processo	Conceito
<i>Torneamento</i>	Consiste na retirada de material superficial de uma peça presa a um mandril que gira em torno do eixo de rotação da máquina, enquanto a ferramenta se desloca simultaneamente. É utilizado para obter superfícies de revolução e podem ser de várias modalidades: retilíneo, cilíndrico, cônico, radial, perfilamento, etc (GROOVER et al., 2014).
<i>Fresamento</i>	De acordo com Ferraresi (1969), o fresamento é um processo mecânico utilizado para alcançar formas em peças com o apoio de ferramentas usualmente multicortantes. A ferramenta gira, e ocorre o deslocamento da ferramenta ou da peça para qualquer direção. É caracterizado de acordo com o tipo de ferramenta a ser utilizada, como por exemplo: fresamento circunferencial, de topo, frontal, entre outros. (KÖNIG; KLOCKE, 1997).
<i>Furação</i>	Processo mecânico de usinagem utilizado para a obtenção de um furo geralmente cilíndrico em uma peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça gira e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela com o eixo principal de rotação da máquina (FERRARESI, 1970).
<i>Aplainamento</i>	Técnica com finalidade de realizar operações de desbaste ou acabamento superficial. Sua operação consiste no conjunto de facas posicionadas para remover uma quantidade de camada de material da parte superior da peça usinada gerando cavaco (NAYLOR; HACKNEY, 2013).
<i>Brochamento</i>	Equivale em remover material da superfície da peça de forma progressiva, pela ação ordenada dos fios de corte, dispostos em série, de ferramentas multicortantes. Este processo de usinagem é destinado ao corte de

	material para geometrias desejadas com altas taxas de remoção. Devido à sua característica de produção em curso único, que inclui do desbaste ao acabamento, o brochamento é considerado um processo autônomo (MEIER et al., 2014 e SECCO et al., [s.i]).
<i>Mandrilhamento</i>	Procedimento utilizado principalmente no acabamento de superfícies internas de furos cilíndricos e/ou externas com perfis especiais, sendo que, a ferramenta é dotada dos movimentos de corte e avanço, enquanto a peça permanece fixada (MACHADO et al., 2009).
<i>Rosqueamento</i>	Pode ser definido como um processo mecânico, de usinagem ou conformação, destinado à obtenção de filetes de rosca, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. (FERRARESI, 1995)

Fonte: Autor (2023).

Segundo Kalpakjian e Schmid (2014), variáveis importantes no processo de usinagem são o material e o formato da peça e da ferramenta de corte, tal como suas características, as condições de corte como o avanço, a profundidade, a velocidade e o uso de fluidos de corte. Essas variáveis influenciam em parâmetros como forças e consumo de energia, desgaste da ferramenta, integridade e acabamento superficial, aumento da temperatura e precisão dimensional da peça de trabalho.

Figura 16 – Exemplo de usinagem pelo processo de torneamento



Fonte: Adaptado de Chiaverini (1986).

3.5 Vantagens e Desvantagens no uso da Manufatura Redutiva

De acordo com Novaski e Corrêa (1998) e Capla (2006), as vantagens estão relacionadas à escolha adequada da ferramenta, juntamente com parâmetros de cortes adequados para o material, garantindo assim, uma segurança e melhor estabilidade na usinagem. Algumas dessas vantagens citadas podem ser:

- I. Grande redução nos custos no processo de fabricação;
- II. Produção de peças mais complexas e com alta precisão;
- III. Melhor qualidade superficial (eliminados trabalhos posteriores de acabamento);

Apesar disso, são observados pontos negativos como:

- I. Maior custo para a matéria-prima;
- II. Maior habilidade na execução do processo;
- III. Maior tempo e gasto de energia.

3.6 Manufatura Aditiva x Manufatura Redutiva

Para Levy et al. (2003), ao se comparar o processo de manufatura aditiva com os processos de fabricação convencionais, verifica-se que a fabricação em camadas é adequada para geometrias de média a elevada complexidade, em pouca quantidade de peças produzida. Porém, Schmidt et al. (2017), com a sua crescente evolução e diminuição nos custos de fabricação, este processo tem expandido sua abrangência em regiões ocupadas pela usinagem e pela fundição.

Um exemplo bastante interessante sobre o comparativo entre as duas manufaturas, foi o combustor de turbina a gás mostrado na feira de Siemens em Hannover, como mostra a Figura 17. Na imagem esquerda é representada a peça produzida por manufatura convencional, composto de 13 componentes, 18 soldas e revestimento térmico, com necessidade de 26 semanas para sua produção. Já na direita, é mostrada a mesma peça fabricada por FLP, com duração de três semanas (ARC ADVISORY GROUP, 2018).

Figura 17 – Turbina de gás produzida por manufatura convencional à esquerda, e por manufatura aditiva à direita



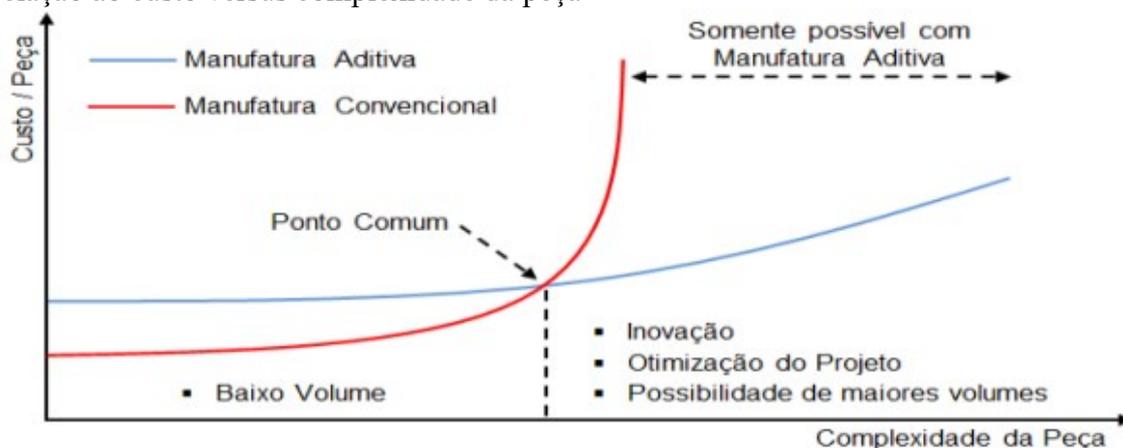
Fonte: Arc Advisory Group (2018).

Giordano et al. (2016) citam que apesar de ainda existirem limitações quanto à qualidade das peças produzidas pela manufatura aditiva em comparação com os meios convencionais de produção, em que a peça é obtida pela retirada de material, em processos como a usinagem, por exemplo, a manufatura aditiva já apresenta diversas características que têm tornado cada vez mais comum à sua aplicação, existindo benefícios que se sobrepõe às suas limitações.

Merklein et al. (2016) aborda que para a necessidade de produzir lotes de pequenas peças complexas de forma econômica e rápida, os métodos de fabricação tradicionais, como a remoção de cavacos e conformação são limitados, destacando os processos de conformação que precisam de ferramentas com custo considerável e não podem proporcionar uma velocidade de produção significativa quando comparadas a manufatura aditiva.

Dependendo da complexidade geométrica, as peças fabricadas pelos métodos convencionais podem chegar a um ponto em que não são viáveis financeiramente e/ou tecnicamente em relação ao processo de manufatura aditiva, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 – Comparação entre o processo de manufatura subtrativa e manufatura aditiva em relação ao custo versus complexidade da peça



Fonte: Wahlstrom (2016).

Apesar das divergências, essas duas manufaturas são frequentemente utilizadas lado a lado em diferentes estágios de desenvolvimento do produto durante a fabricação. A usinagem proporciona a entrega de peças com fino acabamento e muita precisão, já a manufatura aditiva concede o desenvolvimento de peças com uma complexidade quase que inalcançável com a utilização de técnicas da usinagem tradicional, podendo ainda destacar a redução de desperdícios de matéria-prima. Nesse sentido, combinando esses métodos, a indústria irá se favorecer de ambos os processos, pois elas se complementam na produção de ferramentas, acessórios, suportes e moldes.

Para comprovação de tal avanço, existem os processos híbridos, que juntam as duas manufaturas, permitindo que os designers e fabricantes de produtos unam a versatilidade da rapidez da manufatura aditiva com a resistência das peças produzidas subtrativamente (FORMLABS, 2021). A Figura 19 representa uma peça que passa por um processo de manufatura aditiva, mas que em seguida terá que submeter-se a um pós-processamento.

Figura 19 – Exemplo de um sistema de manufatura híbrido



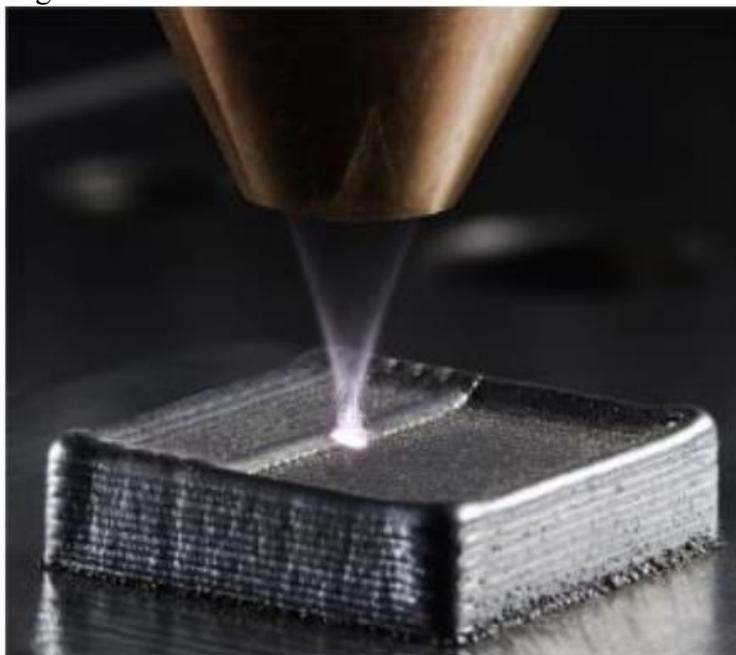
Fonte: Morrow (2019).

4 MANUFATURA ADITIVA EM METAIS

Este tópico do trabalho irá detalhar as principais técnicas de manufatura aditiva por metais, especificando suas características e como funcionam.

Em síntese, metais ou quaisquer outros materiais em manufatura aditiva são formados pela sobreposição de camada por camada, ou seja, a composição do modelo físico real depende da inserção de matéria-prima, esse é o motivo deste processo se chamar aditivo devido a adição de material. A matéria-prima é adicionada na proporção necessária para a construção da peça conforme o modelo digital evitando desta maneira o desperdício de matéria-prima, que em muitos casos pode ter custo muito elevado, como metais raros, preciosos ou de tecnologia (GARDAN, 2016). A Figura 20 demonstra um exemplo da manufatura aditiva aplicada em metais.

Figura 20 – Processo de MA em metais



Fonte: Frank Geyer (2016).

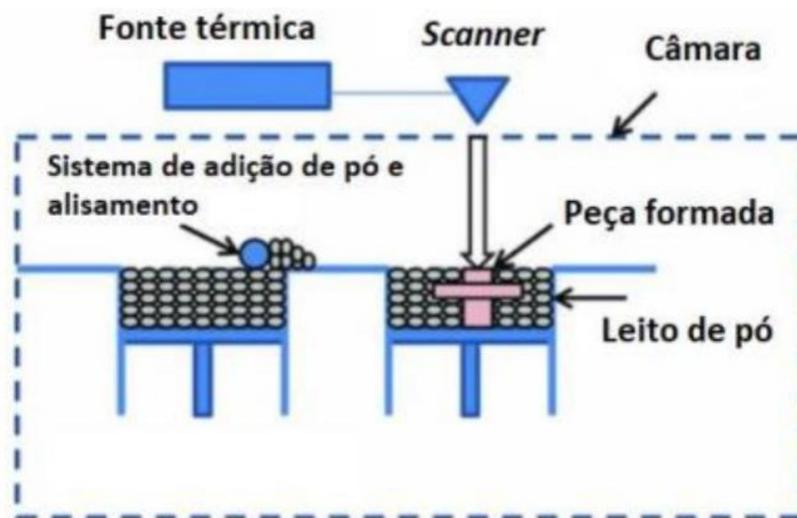
No que se refere à MA de componentes metálicos, atualmente existem mais de 18 técnicas diferentes (AMPOWER, 2019). Porém, é importante ressaltar que as opções industriais são limitadas pelas poucas tecnologias comercialmente disponíveis. Toyserkani et al. (2022), destacam três tecnologias principais para fabricação de componentes metálicos

funcionais: Fusão em Leito de Pó, Jateamento de Aglutinante e Deposição com Energia Direcionada.

4.1 Fusão em Leito de Pó (Powder Bed Fusion - PBF)

No processo FLP, esquematizado na Figura 21, finas camadas de pó são depositadas sobre um leito no interior de uma câmara preenchida com gás inerte. Então, a fonte de calor seja de laser ou feixe de elétrons funde seletivamente e com o auxílio de espelhos galvanométricos, os pontos previstos no software CAD. Após a solidificação do metal, forma-se uma camada, e o eixo vertical são deslocados para baixo de modo incremental, com novas camadas sendo depositadas e processadas, até que todas as camadas sejam construídas e a peça esteja completa (FRAZIER, 2014). Dentro da categoria FLP estão inseridos os processos: *Selective Laser Sintering (SLS)*, *Selective Laser Melting (SLM)*, *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*, *Selective Heat Sintering (SHS)*, *Electron Beam Melting (EBM)*.

Figura 21 - Sistema genérico de FLP



Fonte: Adaptado de Frazier (2014).

O Quadro 2 apresenta de forma simplificada como ocorrem os processos por meio da Fusão em Leito de Pó.

Quadro 2 – Processos de MA que usam FLP

Processo	Definição
<i>SLS</i>	Técnica iniciada pelo preenchimento da câmara de impressão com a matéria prima, em seguida a máquina faz o nivelamento do material e um feixe de luz de alta potência é projetado no pó fazendo o material entrar em fusão. Para minimizar os efeitos de transferência de calor, a superfície da plataforma é aquecida para dar maior precisão ao processo. Após a formação da camada, a plataforma desce e então um rolo aplica uma nova camada de pó sobre a mesa. Em seguida, o procedimento é reiniciado e segue de forma contínua até se obter o objeto desejado (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015; GRIMM, 2004; ANTAS, 2007).
<i>SLM</i>	Nesse processo o laser é utilizado para fundir totalmente o pó metálico para produzir peças homogêneas com um único elemento, em geral, ele possui limitação no que tange à matéria-prima metálica consumida, uma vez que nem todos os tipos de metais podem ser utilizados. No entanto, é um procedimento que dispõe de boas propriedades mecânicas, com aplicações nas indústrias automotiva e aeronáutica, medicina, etc (SINGH; MAHENDER; REDDY, 2020).
<i>DMLS</i>	Diferente da tecnologia SLM, na DMLS não acontece a fusão completa do pó, é utilizado o feixe de laser de modo que ocorre a sinterização do pó metálico, gerando o derretimento de parte do pó metálico na superfície em que se deseja imprimir o tridimensional (CASTELLS, 2016). A técnica é repetida quantas vezes forem necessárias até que se obtenha a geometria almejada.
<i>SHS</i>	Método bastante semelhante ao SLS, mas é utilizado um cabeçote aquecido para fundir o pó termoplástico ao invés do laser, típico do processo de Sinterização Seletiva a Laser, o que reduz significativamente os níveis de calor e energia necessários (ARAÚJO, 2021).
<i>EBM</i>	Nessa técnica é utilizado feixe de elétrons de alta energia para fundir o pó metálico, ele proporciona ao processo uma densidade maior de energia, disponibilizando uma velocidade de impressão maior, quando comparada aos processos anteriores. Porém, as peças fabricadas dispõem de um acabamento

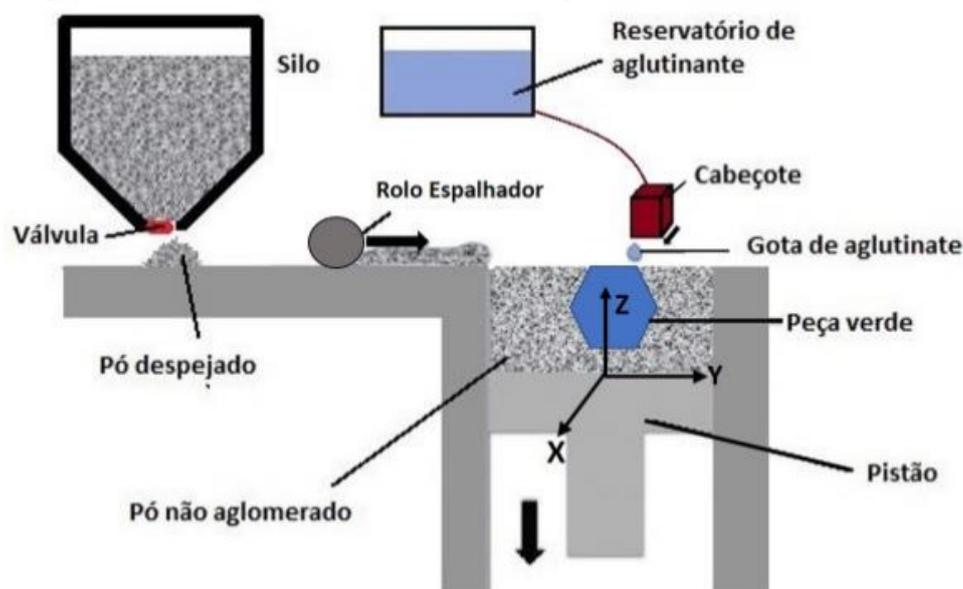
superficial, resolução inferior e tamanho das partículas do pó maiores. Outro ponto a considerar é que a fusão do material ocorre a vácuo, diferente do gás inerte da SLM, e o processo só pode ser utilizado em materiais condutores (REDWOOD; SCHFFER; GARRET, 2017).

Fonte: Autor (2023).

4.2 Jateamento de Anglutinante (*Binder Jetting - BJ*)

Conforme Coelho (2018) é um processo em base pó, onde há uma plataforma que servirá de base para a construção das peças, um cabeçote que despeja líquido sobre o leito de pó e um rolo que espalha o pó. A Figura 22 apresenta de forma esquemática como acontece o processo.

Figura 22 – Processo de Jateamento de Anglutinante



Fonte: Coelho (2018).

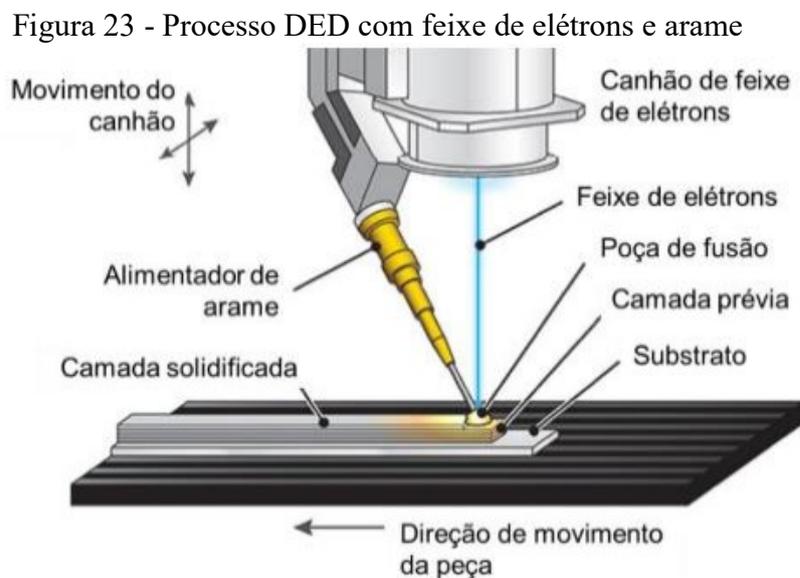
Após o pó ter sido despejado pelo silo, o rolo irá espalhar este pó sobre a plataforma na direção do eixo y, em seguida um líquido será jateado ao longo do eixo x através do cabeçote, que se movimentará no eixo x e y sobre a área da camada da peça a ser formada. Com a aglomeração dos pó, o pistão da plataforma desce no eixo z o equivalente à espessura da camada para que o rolo deposite novamente o pó, que por sua vez, terá a área desejada novamente jateada. O processo se repetirá até que todas as camadas necessárias para a construção da(s) peça(s) sejam feitas. E por fim, o pó não aglomerado é removido com auxílio

de um aspirador, para que assim as peças sejam removidas da máquina para o pós-processo necessário.

Uma grande vantagem da BJ em relação a outras tecnologias de manufatura aditiva é que o processo ocorre à temperatura e atmosfera ambientes, evitando problemas relacionados à oxidação, tensão residual e mudanças de fase. Com isso, o pó não utilizado é altamente reciclável. Em contrapartida, as peças produzidas possuem densidade relativa aproximadamente 50% menor, maior rugosidade superficial, menor resolução quando comparadas a técnicas de PBF (MOSTAFAEI *et al.*, 2020).

4.3 Deposição Direta de Energia (*Directed Energy Deposition - DED*)

No processo de DDE, representado na Figura 23, o pó ou arame são adicionados na poça de fusão criada por uma fonte de calor, por exemplo, arco, laser ou feixe de elétrons. O material funde e em seguida solidifica, dando origem ao depósito. Argônio é usualmente utilizado como gás para proteger a poça contra a oxidação e para o transporte de pó. Depósitos consecutivos dão origem a uma camada que, quando sobreposta por outras camadas com seus formatos específicos, forma a peça com geometria final prevista no software CAD. Se após essa deposição, a pré-forma não atender os requisitos dimensionais, algum retrabalho/reparo pode ser realizado, assim, a pré-forma é submetida a etapas de pós-processamento para atingir a funcionalidade, tipicamente tratamento térmico e usinagem (MENDES, 2022).



Fonte: Adaptado de Sciaky (2021).

A MA por processos DDE pode ser usada com uma ampla variedade de materiais, incluindo cerâmica, metais e polímeros. Os sistemas DED têm como principais características: capacidade de processar componentes de grandes volumes ($> 1000 \text{ mm}^3$), taxas de deposição relativamente altas, alimentação da matéria-prima diretamente à poça de fusão, capacidade de depositar diretamente nos componentes existentes (recuperação de componentes degradados), e potencial de alterar a composição química dentro de uma construção para produzir componentes com gradiente funcional (SILVA, 2019).

Para Dadbakhsh et al. (2010) e Chan et al. (2012), de acordo com a possibilidade de se utilizar diferentes fontes de calor, a nomenclatura pode ser alterada para DDE-L (laser), DDE-EB (feixe de elétrons), DDE-PA (arco plasma) e DDE-GMAW (MIG/MAG). Outras denominações são encontradas na literatura como *Laser-Engineering Net Shaping* (LENS), *Directed Light Fabrication* (DLF), *Directed Metal deposition* (DMD), *Laser Additive Manufacturing* (LAM) e *Laser Metal Deposition* (LMD) e *Laser Beam Melting* (LBM). Além destas, também é comum classificar o processo como uma variante do laser cladding.

Figura 24 - Comparação entre os principais processos de MA de metais

Processo	Dimensão	Resolução	Taxa Dep.	Eficiência	Contaminação
Laser					
Feixe eletr.					
Arco Plasma					
Baixo					Alto
	1	2	3	4	
Esta Tabela é um guia genérico. Variações individuais podem as características individuais de cada sistema.					

Fonte: Adaptado de Silva (2019).

5 MANUFATURA ADITIVA POR SOLDAGEM

Conforme apresentado nos tópicos anteriores, a produção de componentes a partir de materiais metálicos emprega técnicas de MA baseadas em processos de soldagem.

Segundo a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), soldagem é o processo de união de materiais usados para obter coalescência localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição. Portanto, quando a soldagem é realizada com material de adição, pode ser considerada como um processo de manufatura aditiva.

No entanto, alguns processos de soldagem têm sido utilizados para depositar materiais sobre uma superfície visando a proteção ou recuperação contra o desgaste, formando uma espécie de revestimento especial, logo esse conceito é limitador. Assim, Marque et al. (2009) aborda que levando em consideração todos os processos envolvidos, na união, proteção e o aspecto conceitual, a soldagem pode ser definida como o processo de união baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos.

O processo de soldagem é um dos modos de fabricação mais utilizados na indústria metal mecânica, para promover principalmente a união de peças, o que engloba as atividades mais simples até projetos inovadores e de alto grau de responsabilidade e grande confiabilidade como no caso das indústrias naval e aeroespacial (Alberti, Silva & d'Oliveira, 2014).

Para Okumura e Taniguchi (1982), apesar de parecer simples, a técnica de soldagem abrange diversas áreas do conhecimento tais como engenharia elétrica, estrutural, mecânica, metalúrgica, química e conhecimento sobre física aplicada, com aplicações em enchimento de falhas em fundidos, reparo de trilhos, depósito superficial de alta dureza em ferramentas, reparos e manutenção.

Em concordância, Davis (2002) diz que a soldagem é um dos processos de fabricação que possui maior importância na expansão do uso das ligas de alumínio para os diversos segmentos industriais. Os processos utilizados devem produzir juntas soldadas com resistência similar à do metal base, apresentar bom aspecto visual, bom desempenho à vida em fadiga e resistência à corrosão. Dentre os processos utilizados para atender a estas exigências, os de maior importância atualmente são os que utilizam gás inerte de proteção,

como os processos TIG e MIG.

Importante ressaltar que a literatura ainda é escassa no que se refere ao efeito dos parâmetros do processo de deposição sobre as características microestruturais e propriedades mecânicas do material depositado (ALBERTI et al. 2014).

5.1 Processos de soldagens aplicados à MA

A escolha entre as técnicas disponíveis baseia-se nas características dos componentes a serem construídos (dimensão, complexidade geométrica, tolerâncias dimensionais e geométricas do componente). Peças com dimensões reduzidas e geometrias complexas demandam processos de MA com baixas taxas de deposição (sendo empregados, nestes casos, os processos a laser e feixe de elétrons que apresentam taxas de deposição da ordem de 2 e 10 g/min). Por outro lado, o processamento de peças de grandes dimensões requer processos de MA com altas taxas de deposição (técnicas de soldagem a arco elétrico que apresentam taxas de deposição superiores a 130 g/min) (ALBERTI et al. 2014).

Nesse sentido, Alberti et al. (2014) aborda que os processos a arco elétrico capazes de proporcionarem elevada produtividade de acordo com a eficiência energética e ampla abrangência em relação à quantidade de material depositado, são GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e PAW (*Plasma Arc Welding*), estes são facilmente aplicados com manipuladores robóticos e garantem a precisão exigida na fabricação.

Complementando, Williams et al. (2016) explana que o processo de soldagem mais empregado para a MA corresponde ao MIG-MAG, isso deve-se pela própria característica desse tipo de processo, uma vez que possuem diversos tipos de controle de transferência metálica, alimentação de arame automático e alta capacidade das bobinas de arame eletrodo. Os processos TIG e PAW permitem maior controle da entrada de calor, no entanto, são limitados ao fato de o metal de adição ser alimentado sempre na mesma direção, o que requer rotação da tocha/peça, dificultando a programação do sistema de movimentação.

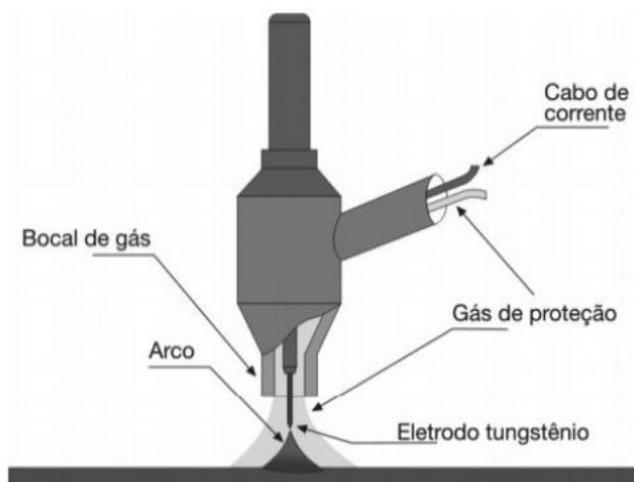
Os processos por arco elétrico apresentam uma ampla abrangência quando se trata da variedade de materiais possíveis de serem processados, além da possibilidade de processamento de componentes com grandes dimensões, e da elevada velocidade de deposição. Essa tendência de crescimento só é possível devido a várias pesquisas que são realizadas neste setor, demonstrando exemplos de aplicações reais da tecnologia.

5.1.1 Soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)

Também conhecido como TIG (*Tungsten Inert Gas*), esse processo foi patenteado no final da década de 20, e utilizado comercialmente a partir de 1942 para a soldagem de magnésio em assentos de aviões, nos Estados Unidos. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Atualmente é muito empregado para soldagem de alumínio, magnésio, titânio e aços inoxidáveis (Wainer et al. 1992).

De acordo com a AWS (1991), no processo de soldagem TIG, como mostra a Figura 25, um arco elétrico é formado entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça de trabalho. A proteção da poça de fusão é realizada por um gás ou uma mistura de gases inertes. O arco elétrico é bastante suave, produzindo soldas de boa aparência, exigindo pouca ou nenhuma limpeza após a operação. A capacidade de controlar a quantidade de calor cedido à peça faz com que este processo seja ideal para soldagem de peças de pequenas espessuras e que exijam alta precisão e controle, comprometendo um pouco a produtividade.

Figura 25 - Processo de soldagem TIG



Fonte: Cunha (2008).

A soldagem GTAW pode ser manual ou mecanizada. O processo é considerado o mais controlável dos processos de soldagem a arco. As suas principais variáveis são: corrente de soldagem, composição, diâmetro e forma do eletrodo, composição do gás de proteção e metal de adição. Pode ser usado para soldagem de precisão ou de elevada qualidade;

soldagem de peças de pequena espessura e tubulações de pequeno diâmetro; soldagem de ligas especiais, não ferrosas e materiais exóticos. (MODENESI et al. 2012).

Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens: Soldagem TIG

Vantagens	Desvantagens
Excelente controle da poça de fusão	Produtividade relativamente baixa
Pode ser usado para soldar a maioria dos metais	Custo de consumíveis e equipamento é relativamente elevado
Produz soldas de alta qualidade e excelente acabamento	Só pode ser realizado em local coberto ou protegido

Fonte: Adaptado de Modenesi et al. (2012).

5.1.2 Soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding)

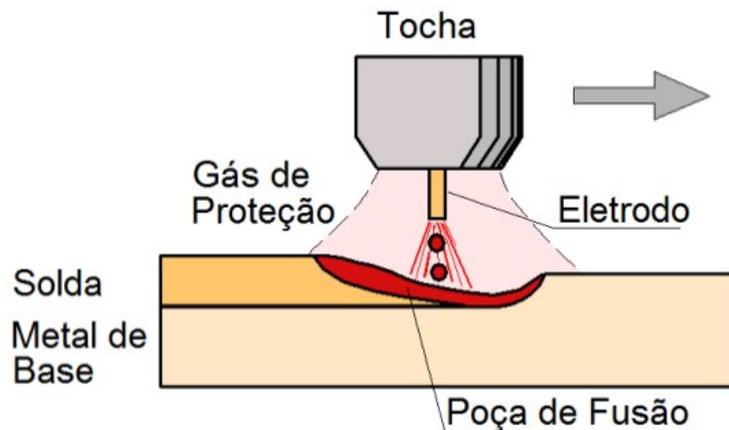
Este processo, como ilustrado na Figura 26, utiliza o arco elétrico como fonte de calor e proteção gasosa, é usado eletrodo consumível, o qual é aquecido por efeito Joule que funde a ponta do eletrodo e inicia a transferência metálica através de gotas metálicas em estado líquido. Nele, há uma complexa interação entre forças, que são influenciadas pelos parâmetros de soldagem e resultam em três principais tipos de modo de transferência: curto-circuito, globular e aerossol (MACHADO, 1996). Esses modos são diretamente proporcionais à quantidade de energia utilizada, indo do curto-circuito, onde a energia utilizada no processo é menor, até o aerossol, o qual é obtido com maiores correntes de soldagem, resultando em um processo com maior aporte térmico.

O procedimento é realizado de forma semiautomática e a alimentação do consumível ocorre de forma contínua, sendo o operador ou o mecanismo de movimentação responsável pelo posicionamento da tocha e controlar o processo. A fonte de energia opera com tensão constante, tende em manter invariável os valores da tensão elétrica e a velocidade de alimentação do arame e, conseqüentemente, o comprimento do arco, mantendo o processo estável e, durante possíveis variações do processo, refletem nas alterações na corrente de soldagem. Pode ser aplicado em soldagem de ligas ferrosas e não ferrosas; soldagem de carrocerias e estruturas de veículos, etc. (KALPAKJIAN, SCHMID 2001).

A proteção se dá por uma corrente de gás inerte ou ativo. Quando são usados gases inertes, o processo é conhecido como MIG (*Metal Inert Gas*), já quando se usa misturas ricas em gases ativos, o processo é conhecido como MAG (*Metal Active Gas*) (MODENESI et al. 2012).

A ideia dessa técnica é aproveitar a energia de uma condição estável de soldagem, sem provocar perturbações significativas no processo ou alterações na qualidade da solda, e assim se obter maior produção, menor diluição, e soldas de qualidade com potencial de utilização na manufatura aditiva de ligas metálicas (GARCIA, 2011; ANDRADE, 2010 BARCELAR, 2005).

Figura 26 - Representação do processo de soldagem GMAW



Fonte: Modenesi et al. (2012).

Tabela 2 - Vantagens e Desvantagens Soldagem GMAW

Vantagens	Desvantagens
Elevadas velocidades de soldagem	Equipamento relativamente caro e complexo
Alta taxa de deposição e produtividade	Pode apresentar dificuldade para soldar juntas de acesso restrito
Fácil robotização	Proteção do arco é sensível a correntes de ar.
Elevada penetração	Pode gerar elevada quantidade de respingos

Fonte: Adaptado de Modenesi et al. (2012); Kalpakjian, Schmid (2001).

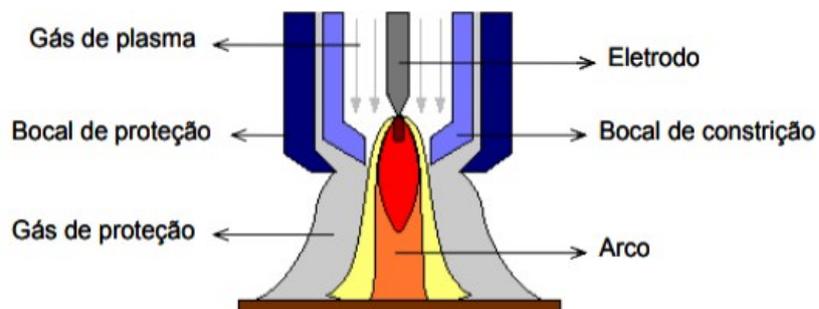
5.1.3 Soldagem PAW (Plasma Arc Welding)

É um processo de soldagem que produz coalescência dos metais pelo aquecimento com um arco constrito entre o eletrodo e a peça de trabalho, ou entre o eletrodo e o bocal constrito da tocha (WAINER et al. 1992).

Os autores ainda complementam que esse processo consiste em provocar numa coluna de gás, com o auxílio de um arco elétrico, o aumento de sua temperatura, o suficiente para que os impactos entre as moléculas de gás provoquem dissociação e ionização. O sistema consiste de uma tocha, fonte de energia, consolo de controle, cilindros de gases de plasma e proteção, circuito de água de refrigeração, controle remoto de corrente de soldagem, etc. O arco permite maior concentração do calor e melhor aproveitamento da temperatura, que aliado à alta velocidade do jato de plasma, intensificam a penetração ou permitem maiores velocidades de soldagem sejam utilizadas.

Esse processo pode ser semiautomático ou totalmente automatizado, podendo ser empregado com ou sem metal de adição, uso de gás inerte, eletrodo não consumível e aplicável à maioria dos metais e a muitos materiais não metálicos (QUITES 2002; MODENESI et al. 2012). Suas aplicações são destinadas à área automotiva, indústria de móveis, indústria aeroespacial, fabricação de equipamentos clínicos e afins.

Figura 27 - Representação do processo de soldagem PAW



Fonte: Reis (2005).

Tabela 3 - Vantagens e Desvantagens Soldagem PAW

Vantagens	Desvantagens
Elevadas velocidades de soldagem	Necessidade de grande conhecimento do processo
Controle da velocidade de soldagem	Escassez de informações consolidadas sobre o ajuste dos parâmetros

Soldagem em elementos de baixa espessura	Pequena tolerância para desalinhamento da junta de solda, devido ao arco estreito
Capacidade de soldagem em baixa corrente	A tocha utilizada é de construção mais difícil

Fonte: Adaptado de Reis (2005); Bracarense (2000).

6 MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA)

O termo “arco elétrico” é extenso e amplamente utilizado no universo da união de materiais por fusão. A soldagem a arco se aplica à grande maioria dos processos convencionais de soldagem de materiais metálicos, os quais utilizam um arco elétrico como a principal fonte de calor para atingir o ponto de fusão dos materiais no processo de soldagem (TOALDO, 2022).

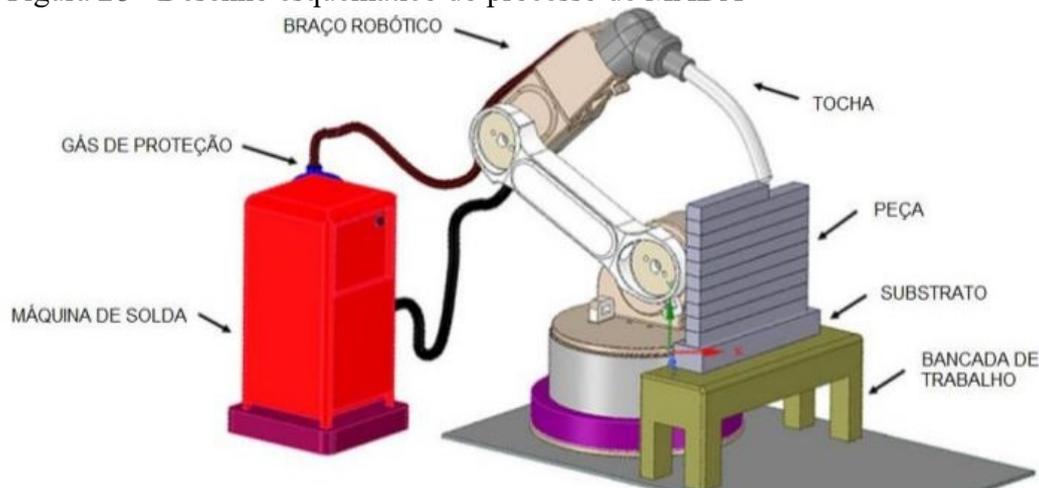
Esse mecanismo é amplamente utilizado na soldagem por fusão de materiais metálicos, pois apresenta uma combinação ótima de características, tais como concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde dos seus operadores (MODENESI, 2012).

A soldagem a arco é iniciada quando as superfícies do eletrodo e do metal de base são aquecidas por resistência elétrica, até atingir a capacidade de emitir e receber elétrons, assim como levar o meio que está entre o eletrodo e a peça às condições necessárias para se ionizar (SCOTTI; MONTEIRO, 2012). Desse modo, os gases na eminência do eletrodo são submetidos a um campo elétrico de altíssima intensidade, sendo satisfeita a condição para seus átomos liberar ou receber elétrons (íons se tornando em cátions e, em menor probabilidade, ânions). Esse processo é denominado de emissão catódica e faz parte da física do arco elétrico (TALKINGTON, 1998).

O processo de fabricação aditiva de arco elétrico (WAAM – *Wire Arc Additive Manufacturing*) consiste na união da tecnologia de manufatura aditiva com o processo de soldagem, que adota o material e a fonte de calor proveniente da tecnologia de soldagem somado ao método da teoria MA, conforme Figura 28. É um processo de deposição de energia direta que usa matéria-prima de arame metálico, analogamente à impressão 3D de polímero. Porém, se faz necessário uma fonte de energia de maior intensidade, para alcançar o ponto de fusão deste metal. (DING; PAN et al., 2015).

Comparado com o modo de processamento tradicional de montagem de matéria-prima (remoção de material ou métodos de solidificação tradicionais), a MADA é um método de fabricação “*bottom-up*” (de baixo para cima) por meio do acúmulo de materiais (PARVARESH; MIRESMAEILI; YAZDIZADEH, 2020).

Figura 28 - Desenho esquemático do processo de MADA



Fonte: Adaptado de Raut; Taiwade (2021).

A utilização de processos de alta densidade de energia na manufatura aditiva apresenta vantagens competitivas, mas possuem uma baixa eficiência energética (JHAVAR et al., 2014), motivando diversas pesquisas que buscam processos mais eficazes. Processos com arco elétrico se enquadram nesse quesito por possuir maior eficiência energética e exibindo uma ampla abrangência em relação à quantidade de material depositado, possibilitando a produção de peças maiores com maior rapidez.

Segundo Giarollo et al. (2021), a MADA consiste em um processo que envolve deposição direta de material, utilizando matéria-prima na forma de arame e o arco elétrico como fonte de energia. Este processo permite a fabricação de componentes metálicos camada por camada, por meio da aplicação da técnica de soldagem por arco elétrico com eletrodo consumível e proteção gasosa, podendo utilizar dois principais processos: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungest Arc Welding* (GTAW) e *Plasma Arc Welding* (PAW) (ROSA, 2020). O Quadro 3 representa de forma sucinta as especificações de cada processo por MADA.

Quadro 3 – Características dos processos de MADA

MADA	Processo de soldagem	Propriedades
Baseado em GTAW	GTAW	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Eletrodo não consumível; ➤ Processo de alimentação do arame separado; ➤ Taxa de deposição típica: 1-2kg / hora; ➤ Movimentação do arame e da tocha é necessária.
Baseado em	GMAW	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Eletrodo de fio consumível;

GMAW		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Taxa de deposição típica: 3-4kg / hora; ➤ Baixa estabilidade do arco, respingos.
	CMT	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Eletrodo de fio consumível alternativo; ➤ Taxa de deposição típica: 2-3kg / hora; ➤ Baixa entrada de calor com zero respingos, alta tolerância de processo.
Baseado em PAW	Plasma	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Eletrodo não consumível; ➤ Processo de alimentação do arame separado; ➤ Taxa de deposição típica: 2-4kg / hora; ➤ Movimentação do arame e da tocha é necessária.

Fonte: Adaptado de WU et al., (2018).

Cada processo de soldagem possui características específicas. O processo GMAW apresenta-se como um substituto ou aliado viável das formas convencionais de fabricação, nele é empregado eletrodo consumível alimentado coaxialmente à tocha de soldagem, resultando em uma maior facilidade para deposição. No entanto, o GMAW apresenta maiores problemas com respingos e geometria de cada camada depositada. A escolha do tipo de processo de soldagem utilizado na MADA influencia diretamente as condições de processamento e a taxa de produção para um componente (WU et al., 2018).

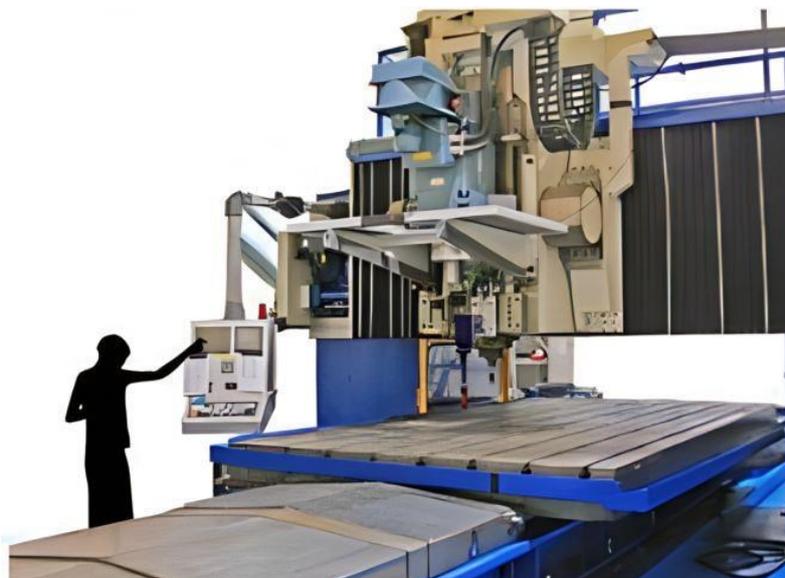
Na execução do procedimento, a soldagem pode ser automatizada com o uso de sistemas robóticos, ou pórticos controlados por computador, como mostram as Figuras 29 e 30.

Figura 29 – MADA usando robô



Fonte: Williams et al., (2016).

Figura 30 – Máquina controlada por computador, usando sistema de soldagem do tipo MIG



Fonte: Williams et al., (2016).

Para peças de baixa a média complexidade, a MADA tem se tornado uma forte candidata a substituir os processos de fabricação a partir de tarugos ou grandes forjamentos, pois tem a capacidade de produzir grandes componentes metálicos devido sua alta taxa de deposição, baixo custo de materiais/equipamentos e boa integridade estrutural (WILLIAMS et al., 2016).

De acordo com Queguineur et al. (2018), utilizando a manufatura aditiva por deposição a arco, tem-se desenvolvido pesquisas com ligas avançadas a aplicações aeroespaciais, como são os casos das ligas de aço AISI 316L e cobre Cu-Al8Ni2Fe2, usadas para fabricação de componentes navais utilizando a manufatura aditiva por deposição a arco.

Comparado com a manufatura feita através de processos com aditivos em pó e fusão a laser, a MADA possui aplicabilidade mais ampla, pois abrange uma maior variedade de materiais metálicos e custo mais baixo, mesmo sendo capaz de fabricar peças grandes e complexas, é um método recomendado para componentes com peso maior que 10 quilogramas. Além disso, possui maior taxa de deposição e um custo de hardware do sistema mais barato do que os de sistemas envolvendo fusão a laser e pó, fazendo com que o processo possua uma aplicação comercial muito ampla (Liu et al., 2020).

Dayton (2018) destaca que a MADA é especialmente importante para o uso em aços carbono, uma vez que o emprego de pós desse material é de extrema dificuldade em função da grande reatividade com o oxigênio da atmosfera.

As ligas utilizadas em deposições com arco elétrico são similares às utilizadas com o processo de laser, sendo possível encontrar pesquisas que focam em aços, alumínio e níquel. Mas a grande maioria das pesquisas estuda ligas de titânio, principalmente a liga Ti-GAI-4V (SKIBA et al., 2009). Essa liga tem aplicações no mercado aeronáutico e biomédico, que têm apoiado um grande número de pesquisas, buscando mapear a resposta dessa liga com diferentes processos de deposição.

Outro conjunto de ligas com grande potencial de aplicação na MADA são as ligas a base de níquel, usadas no setor de energia e aeronáutica, em consequência das excelentes propriedades em elevadas temperaturas (HENDERSON et al., 2004). A aplicação dessas ligas com processos a arco ocorre em casos onde há necessidade de altas taxas de deposição, tanto para trabalhos de construção como para reparos. Processos de soldagem GMAW, por exemplo, permitem depositar cordões individuais com larguras superiores a 12 mm e alturas de 2 mm. Clark et al. (2008), utilizando a liga de níquel 718 na deposição de múltiplas camadas conseguiram obter paredes com larguras maiores que 30 mm e alturas superiores a 60 mm, na construção de câmaras de combustão.

Deposições com plasma também são bastante atrativas para processar ligas a base de níquel. Como esse processo promove um menor efeito térmico, a probabilidade de trincas nas ligas de níquel é menor do que nos outros processos a arco, além de que o custo de equipamento e processamento é significativamente menor do que dos processos de feixe de elétrons e laser (SU et al., 1997). Pesquisas demonstram que deposições utilizando a técnica de PTA apresentam a possibilidade de depositar esta liga com uma larga faixa de espessuras, com cordões variando de 2 mm até 10 mm de espessura. A Tabela 4 apresenta as aplicações que cada tipo de liga tem.

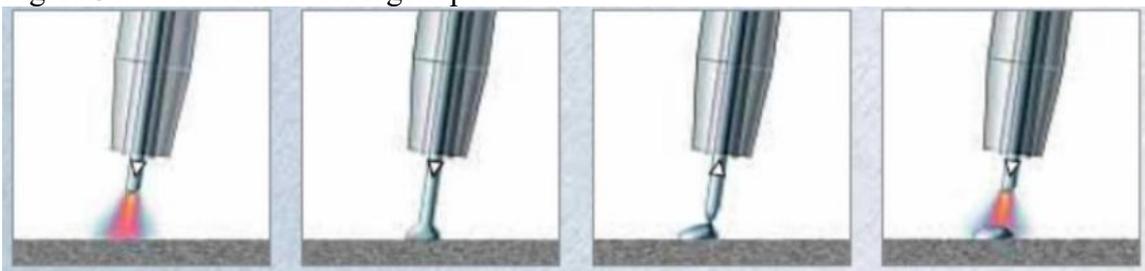
Tabela 4 - Metais com suas áreas de aplicação empregando MADA

Aplicações	Ligas				
	Titânio	Alumínio	Aços	Níquel	Bimetais
Aeroespacial			*		
Automotiva	*			*	
Marítimas		*		*	*
Resistência à corrosão		*	*		
Altas temperaturas		*	*		
Moldes e ferramentas	*	*		*	*

Fonte: Adaptado de Sudhanshu e Khanna (2020).

Existe ainda uma variante do processo GMAW que é recorrentemente utilizada em MADA, o CMT do inglês *Cold Metal Transfer* (Transferência de Metal Frio), esquematizado na Figura 31. Nessa técnica a transferência metálica ocorre de forma semelhante a um curto-circuito, só que quando ocorre contato do metal de adição com a poça de fusão o sentido da alimentação de arame é revertido por um processo digital de controle e dessa forma é possível diminuir a corrente neste período de contato e por consequência a quantidade de calor fornecida para o componente (REVILLA-LEON; et al., 2018).

Figura 31 – Processo de soldagem por CMT



Fonte: Brochura Fronius (2007).

Cong et al. (2015) explicam que o CMT é o processo de soldagem mais bem-sucedido na manufatura aditiva do alumínio, sendo capaz de praticamente eliminar os poros da solda além de promover intenso refinamento microestrutural, minimizar respingos e manter bom aspecto superficial.

Dentre os processos a arco elétrico, várias pesquisas tendem a utilizar do CMT para a deposição que se baseia na utilização de um processo com curto-circuito controlado, possibilitando a obtenção de uma poça fundida mais viscosa e que tenderá a permanecer no mesmo local até a sua solidificação (PEREIRA; HENKE; OLIVEIRA, 2018). O que também propicia, segundo Scotti, Ponomarev (2008) a soldagem em maiores velocidades.

6.1 Parâmetros da MADA

O principal desafio para todos os processos de MA com alimentação de arame vem das tensões residuais e distorções geradas durante o processo MA. Esses fenômenos são causados pela entrada excessiva de energia, alta taxa de deposição e grande gradiente de temperatura durante os processos de MA com alimentação de arame. (DINOVITZER; CHEN et al., 2019). Desse modo, entender seus parâmetros e características é primordial para o resultado desejado ao criar uma peça. Além dos parâmetros intrínsecos do processo de

soldagem como velocidade de soldagem, taxa de alimentação do arame, distância de trabalho, tensão e corrente do arco, se faz necessário a estratégia de deposição e planejamento do caminho de soldagem. Esse caminho que a tocha percorre entre as camadas é um termo comumente chamado de “*toolpath*”, do inglês caminho da ferramenta (tocha de soldagem).

A evolução térmica está relacionada aos parâmetros do processo a arco elétrico, desta forma, este crescimento envolve tanto a distribuição quanto o ciclo de calor do processo e estas variáveis influenciam diretamente a camada depositada e torna-se necessário conhecer o efeito de cada variável e seu domínio sobre a qualidade da geometria obtida. Podem-se classificar estes parâmetros de deposição em três categorias (Kim & Eagar, 1993), (Kim, 1995).

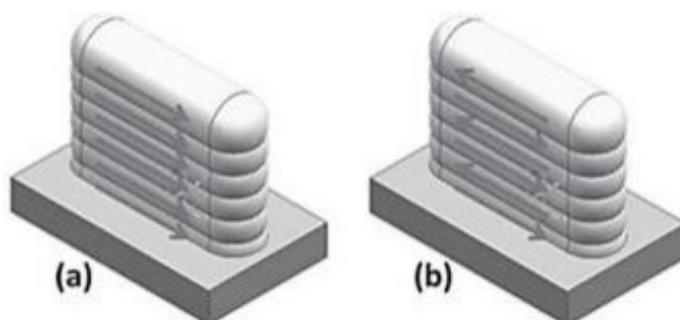
- Parâmetros pré-selecionados: não são alterados com facilidade e são desfavoráveis para um controle. Cita-se: tipo e diâmetro do arame, tipo de gás de proteção, a polaridade, composição e espessura do material de base.
- Parâmetros ajustáveis primários: controlam e podem ser alterados durante o processo. Influenciam a estabilidade do arco, a geometria obtida, a velocidade de deposição e a qualidade da camada. Estas variáveis são: a tensão do arco, a corrente e a velocidade do processo.
- Parâmetros ajustáveis secundários: podem ser alteradas e atuam nos parâmetros primários. Sendo variáveis como o *stickout* e a inclinação da tocha.

6.1.1 Trajetória de deposição

Este parâmetro controla o ciclo térmico associado às deposições dos sucessivos cordões, influenciando diretamente sobre a microestrutura final do componente. Esta condição gera uma complexa distribuição de gradiente térmico ao longo da peça, o que influencia na distribuição de tensões, deformações, microestrutura e, conseqüentemente, no desempenho do componente produzido. Há uma variação superior destas características nas posições iniciais e finais do cordão, já na parte central as tensões tendem a se manter estáveis (DINDA et al. 2012, ZHAO et al. 2012).

A trajetória de deposição também influencia sobre as características finais da peça. As duas principais táticas para construção de paredes finas são a direção igual (Figura 32a), e a direção reversa (Figura 32b) (ALBERTI et al. 2014).

Figura 32 - Abordagens de direção de deposição: (a) mesma direção, e (b) direção alternativa



Fonte: Alberti et al. (2014).

A variação dessa trajetória exerce efeito sobre a estrutura solidificada, no gradiente térmico, e nas tensões geradas pela deposição. A estrutura gerada nas deposições com direção igual tende a ter maior homogeneidade, com uma direção de solidificação constante em todas as camadas; enquanto que, nas deposições com direção reversa, a direção de crescimento, que segue o escoamento de calor, muda a cada camada, interrompendo o crescimento das dendritas. As tensões geradas durante a deposição em função do gradiente térmico, também variam dependendo da trajetória utilizada, sendo que com a mudança de direção entre os cordões, as tensões ao longo da deposição tendem a ser menores (ALBERTI et al. 2014, DINDA et al. 2012, ZHAO et al. 2012).

6.1.2 Corrente elétrica

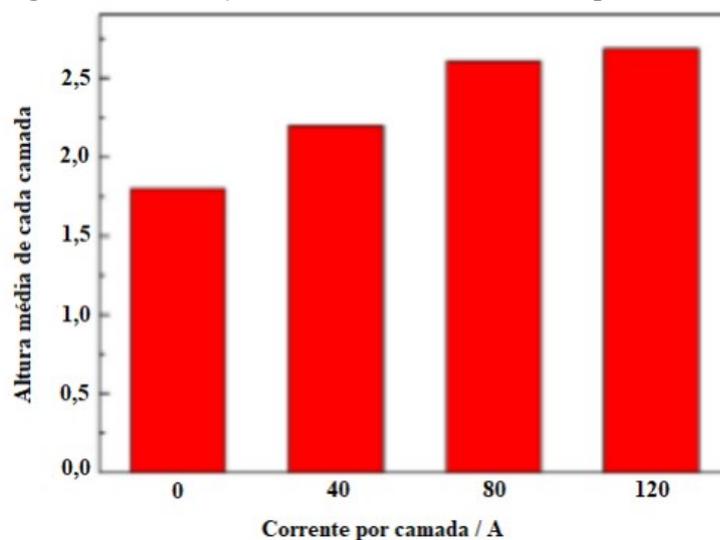
Para a MADA, o procedimento necessita ser controlado para minimizar os níveis de respingo, bem como o calor imposto, com isso, o uso da transferência pulsada se fundamenta na metodologia da antecipação de picos de corrente para transferir as gotas antes que estas toquem a peça e promovam o curto-circuito. Assim, evitam-se intensos surtos de corrente e tende a manter o arco com uma pressão razoavelmente homogênea sobre a poça de metal líquido, o que permite um processo mais estável obtido pelo comportamento regular da corrente em dois patamares, um inferior ao valor da corrente de transição e outro superior.

Durante o tempo em que a corrente se mantém em nível baixo o arco elétrico é mantido e na transição para a corrente mais alta uma gota começa a se formar e cresce na ponta do arame fundido e esta é transferida quando o valor da corrente é reduzido. No entanto, é necessário que os níveis de corrente sejam ajustados para que possa obter um valor médio dentro dos níveis 35 necessários e se apresentar abaixo da corrente normal de transição,

como na soldagem convencional, produzindo baixos níveis de aporte térmico (IMC-Soldagem, 2019).

A Figura 33 apresenta a relação do valor da corrente elétrica em relação à altura das camadas depositadas no processo de Manufatura Aditiva a Arco (Yang, He, & Zhang, 2016). Com os demais parâmetros do sistema constantes, os autores sugerem aumento da altura devido ao acréscimo na taxa de deposição de material, associado a uma redução da largura.

Figura 33 - Variação da altura das camadas depositadas com diferentes correntes



Fonte: Adaptado de Yang, He, & Zhang (2016).

6.1.3 Aporte térmico (Energia de soldagem)

A quantidade de energia por unidade de comprimento de solda, conhecida por energia de deposição, ou aporte térmico, é um importante parâmetro considerado no processo convencional, pois relaciona a energia introduzida no metal de base por unidade de comprimento do cordão de solda.

Tabela 5 - Rendimento térmico dos processos a arco elétrico

Processos de soldagem	Rendimento térmico
GMAW	0,75 – 0,95
GTAW	0,50 – 0,80
PAW	0,50 – 0,80

Fonte: (EN1011-1, 2009).

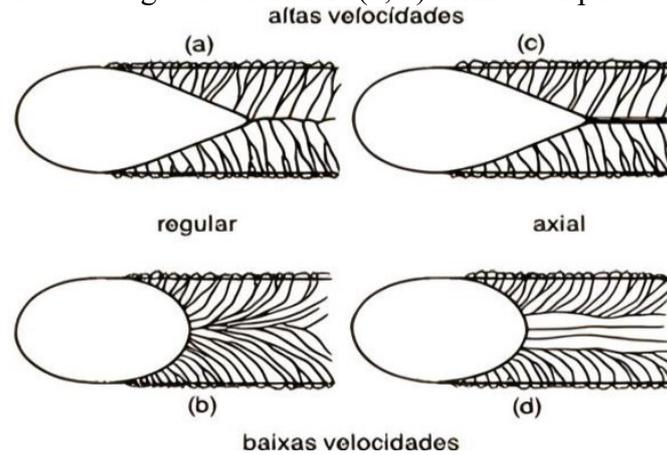
Nesse parâmetro é importante respeitar a pausa de tempo entre a confecção das camadas devido à quantidade de energia transferida para a peça. Não respeitar essa pausa sem o ajuste de corrente e/ou tensão, transfere para a peça a mesma quantidade de energia já transferida anteriormente. Como o cordão já está com uma parcela da energia anterior, a enorme quantidade de energia térmica transferida para a peça provoca um descontrole da poça fundida. Autores demonstraram que, caso não houver essa pausa entre os passes, é necessário 20% de decréscimo da fonte de calor para produzir uma deposição uniforme. (DINOVITZER; CHEN et al., 2019)

Também é ressaltado pela literatura erros de geometria induzidos pelas camadas inferiores, sendo somados à medida que outras camadas são adicionadas. Para superar o problema da irregularidade superfície induzida por procedimentos de início e término de arco, é ajustada a deposição parâmetros nas porções inicial e final dos caminhos de solda para controlar de forma flexível o cordão de solda geometria (ZHANG; CHEN et al., 2003).

6.1.4 Velocidade do deslocamento

A velocidade de deslocamento da fonte de calor, além de afetar a taxa de distribuição altera a forma da poça de fusão. Quando se utiliza altas velocidades de deslocamento da tocha, atribui-se a poça de fusão um formato alongado, semelhante a uma gota e os grãos crescem em linha reta, perpendicularmente à fronteira da poça de fusão, como representado na Figura 34(a). Em baixas velocidades, o formato predominante passa a ser elíptica e o crescimento de seus grãos tende a ser colunares, os quais crescem e se curvam em direção ao gradiente máximo de temperatura, como apresentado na Figura 34(b). Diversos estudos descrevem por aproximação matemática o perfil da poça de fusão, alguns resultados demonstram o formato elíptico o que considera a tensão superficial constante sobre toda a superfície e produzem equações para a largura, reforço e volume do metal líquido em função do ângulo de contato do cordão de solda com a superfície (Matsunawa & Ohji, 1982).

Figura 34 - Formato da poça de fusão em relação à velocidade de soldagem. (a, c) estrutura de grãos colunares. (b, d) formato elíptico com estrutura axial



Fonte: Adaptado de (Kou & Le, 1983).

6.2 Vantagens MADA

A MADA tem como vantagens as suas altas taxas de deposição e na capacidade de fabricação de componentes maiores, em comparação com outras tecnologias de manufatura aditiva e baixos custos de capital associados aos equipamentos, uma vez que utilizam equipamentos iguais ou muito similares aos empregados nos processos de soldagem ao arco elétrico e a flexibilidade nas composições dos materiais (XIONG et al., 2015).

Volpato (2017) cita que as vantagens da fabricação por manufatura aditiva são: acessibilidade, alta velocidade e o não desperdício de material no caso da impressão 3D devido à 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.

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.

6.3 Desvantagens MADA

Uma das desvantagens da utilização da MADA é a necessidade de um controle preciso durante o processo, para evitar imperfeições e características geométricas indesejadas na peça, que podem ocorrer devido aos processos de deposição de material camada por camada.

A baixa precisão dimensional das peças também é uma das desvantagens desse processo, no entanto, uma possível solução é a combinação do processo de manufatura aditiva com os processos tradicionais subtrativos, melhorando a precisão e a qualidade das peças (LEE et al., 2018).

Liu et al., 2020 mencionam algumas desvantagens como maior instabilidade no processo, precisão inferior da peça formada e qualidade superficial menor quando comparado a outros métodos. Além disso, é comum a presença de defeitos de soldagem como rachaduras, poros e distorções de solda. Por possuir uma alta taxa de deposição como vantagem, e uma grande quantidade de energia envolvida no processo, o acúmulo de calor, devido a uma dissipação insuficiente, é um fator crítico que afeta a estabilidade do processo MADA com relação à precisão geométrica, defeitos de deposição, propriedades do material e microestrutura (WU et al., 2017). Para solucionar esse fato, é possível fazer o resfriamento da peça, atualmente já é realizado a impressão em reservatórios com água, onde a peça fica em contato direto, passando por um radiador para realizar a troca de calor, a fim de aproveitar a alta taxa de deposição do processo sem gerar prejuízos ao objeto.

Conforme Yang et al. (2016), em peças de trabalho com paredes finas, à medida que a altura da parede se eleva, o acúmulo de calor se torna um fator ainda mais influente. Conforme observado em Wu et al. (2017), devido à dissipação térmica ao longo da parede, existe uma diferença significativa na variação de temperatura entre o substrato e a camada depositada. Além disso, durante a fabricação, a diferença na temperatura de interpasso entre as camadas subsequentes determina o acúmulo de calor final ao longo da deposição.

Para Silva (2017), a consolidação da Manufatura Aditiva de Metais atualmente ainda não está no mesmo patamar quando comparada à 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 e 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 35 apresenta as peças obtidas pelo autor ao mudar parâmetros elétricos e ao apresentar dissipação de calor insuficiente.

Figura 35 - Peça obtida ao modificar parâmetros elétricos e base obtida através da dissipação de calor



Fonte: Silva (2017).

6.4 Propriedades mecânicas após a MADA

Um dos fatores de relevância para fabricação de componentes metálicos são suas propriedades mecânicas. Pois muitas dessas características são requisitos de projeto e podem fazer com que um componente seja escolhido ou não.

Segundo Linnert (1994), entre as principais propriedades mecânicas que devem ser avaliadas no cordão de solda após o processo são:

- Resistência à tração: obtida a partir do ensaio de tração que consiste na aplicação de uma força num corpo sólido promovendo uma deformação do material na direção do esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo. Este ensaio permite que sejam adquiridas informações como limite de resistência, de escoamento, estrição e entre outros (DIETER, 1988).
- Dureza: é comumente relacionada à resistência à deformação, principalmente por penetração. Sabe-se que a dureza por penetração é o método mais utilizado e citado nas especificações técnicas de materiais e componentes na indústria, os

ensaios de dureza por penetração mais utilizados são: Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop e Meyer.

- Tenacidade: trata-se da capacidade de absorver energia de deformação plástica até o momento da fratura, podendo ser medida através do ensaio de impacto charpy a partir da resistência à fratura na presença de uma incisão e em acomodar as cargas internas pela deformação plástica. A tenacidade aparece como um fator influente na aprovação ou reprovação de procedimentos de soldagem uma vez que esta propriedade está diretamente relacionada à microestrutura dos metais (MAUROUÇO, 2014).

Para prever os efeitos dos processos de MA na qualidade final dos produtos, simulações numéricas vêm sendo amplamente aplicadas. Os modelos avaliam diferentes aspectos, como a distribuição das temperaturas resultantes, distorção, tensões residuais, microestrutura, etc (XIONG et al., 2012).

Quando comparado com materiais semelhantes produzidos por outros processos de fabricação, os componentes produzidos utilizando MADA muitas vezes apresentam propriedades mecânicas reduzidas. Em ligas de alumínio com quantidades de cobre e manganês, é observado o acréscimo da tensão de escoamentos dos depósitos com o aumento da razão Cu/Mg, assim como aumento da dureza (QI et al., 2018). Tratamentos térmicos podem melhorar significativamente as propriedades, porém, aplicar tratamento térmico agrega um custo à produção do componente, além de certos estudos indicarem o aumento da anisotropia após o tratamento.

Ding et al. (2011), propôs dois modelos de elementos finitos (modelos transientes e estacionário) para investigar o comportamento termomecânico de peças de múltiplas camadas usando o processo GMAW como fonte de calor. Com isso, os autores conseguiram verificar que o tempo computacional do modelo de estado estacionário pode ser reduzido em até 80%. Montevecchi et al. (2016), propôs uma estratégia de modelagem para a MADA com base em um novo modelo de fonte de calor, o que permitiu levar em consideração a distribuição de energia entre a base e o material de deposição. Este modelo possibilitou simular com precisão o processo sem a necessidade de identificar os parâmetros das fontes de calor.

De acordo com Xiong et al. (2012), devido às elevadas temperaturas geradas neste processo necessárias para promover a fusão e deposição do material, assim como a existência de ciclos térmicos não uniformes, problemas de tensões residuais e distorções afetam significativamente a qualidade dos componentes obtidos neste processo, justificando a

necessidade de uma maior compreensão do comportamento térmico deste processo, além da dificuldade referente ao controle da precisão dimensional sob condições térmicas em constante mudança, por exemplo, temperatura entre camadas e taxa de resfriamento.

Xiong et al. (2012), desenvolveram um modelo tridimensional de transferência de calor para uma peça circular contendo dez camadas para investigar o comportamento térmico em manufatura aditiva baseada em GMAW. Os resultados da modelagem mostraram que o pré-aquecimento do substrato pode tornar os ciclos térmicos muito mais suaves e diminuir a taxa de resfriamento da poça fundida. O gradiente máximo de temperatura na mistura fundida diminuiu com o aumento da temperatura de pré-aquecimento do substrato. Ao término da deposição, o pré-aquecimento pode provocar um aumento na temperatura das camadas depositadas, muito embora cause pouco efeito na distribuição do gradiente de temperatura das camadas.

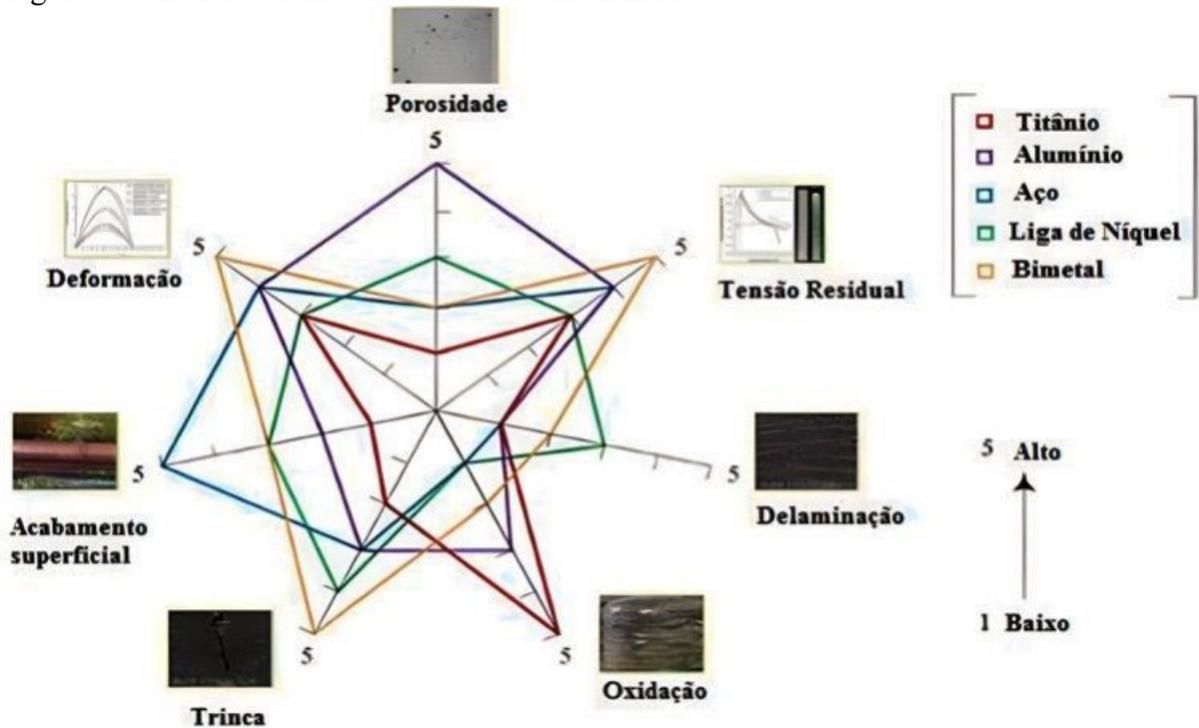
Hejripour et al. (2019), ressaltam que existem dois modelos térmicos para prever a distribuição de temperatura em peças planas e circulares, utilizando o software COMSOL Multiphysics. O objetivo consiste em monitorar os parâmetros do processo e a taxa de resfriamento para investigar a evolução microestrutural.

6.5 Defeitos pós MADA

Apesar das propriedades mecânicas das peças fabricadas pelo processo de MADA serem equiparadas às propriedades dos processos convencionais, existem alguns defeitos que aparecem com mais frequência neste tipo de processo, tais como: porosidade, alto nível de tensão residual, trincas, delaminação, mal acabamento superficial, oxidação e deformações dimensionais. Estes defeitos podem ocorrer por várias razões, como: má programação das coordenadas dos sistemas de MA, instabilidade do arco elétrico devido à configuração deficiente de parâmetros de soldagem e o acúmulo de calor durante a deposição (WU et al., 2018).

A Figura 36 correlaciona os principais defeitos com os materiais utilizados no processo de MADA.

Figura 36 – Defeito vs material utilizado em MADA



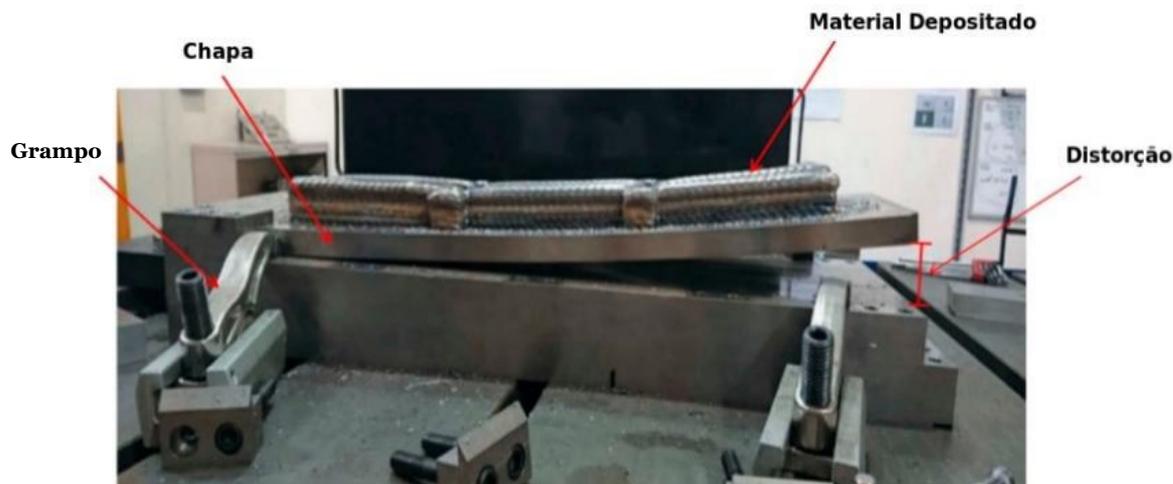
Fonte: Adaptado de (WU et al., 2018).

A porosidade é um defeito muito comum em processos de MADA e deve ser minimizado devido ao seu impacto nas propriedades mecânicas da peça (EDWARDS; O'CONNOR; RAMULU, 2013). No geral, este tipo de defeito é ocasionado por matéria prima ou processo. Considerando a matéria prima, o arame ou o substrato, muitas vezes tem um grau de contaminação na superfície proveniente de umidade, graxa ou outros compostos de hidrocarbonetos que podem ser de difícil remoção. Esses contaminantes podem ser facilmente absorvidos pelo fundido acumulado e gerar porosidade após a solidificação (BUSACHI et al., 2015), (SAMES et al., 2014).

As trincas e delaminações não têm relação apenas com a temperatura, mas também com as características do material utilizado. As trincas dependem principalmente da natureza de solidificação do material e é geralmente causada pela obstrução do fluxo de grãos solidificados ou alta tensão na peça de fusão (M. ADINARAYANAPPA; SIMHAMBHATLA, 2017). Já a delaminação ocorre devido à fusão incompleta ou insuficiente da solidificação adjacente entre camadas (WU et al., 2018).

Além das inconsistências geométricas, ainda existem os problemas de tensões residuais, conforme Figura 37, e as grandes distorções causadas pelo aporte térmico excessivo que é outro problema tradicional quando se trata com deposição a arco elétrico.

Figura 37 - Defeito comum em processos de soldagem: empenamento devido às tensões residuais



Fonte: Rodrigues et al., (2019).

O excesso de calor não ocasiona apenas irregularidades geométricas, mas também pode resultar em distorções e altas tensões residuais (DING et al., 2011), microestrutura grosseira (ZHANG et al., 2019) e oxidação excessiva (WU et al., 2017). Portanto, o gerenciamento térmico no processo de MADA é um fator chave para mitigar o acúmulo de calor e lidar com as limitações relacionadas aos ciclos de deposição, os problemas de geometria e a anisotropia de propriedades mecânicas (DA SILVA et al., 2020). Nesse sentido, várias técnicas têm sido estudadas para mitigar o acúmulo de calor, como é o caso do processo CMT.

As deformações dimensionais são causadas pelos ciclos térmicos durante repetidos processos de aquecimento e resfriamento, que é um problema particular de grandes estruturas com parede fina (WANG et al., 2013).

Quando um cordão de solda é depositado não raramente podem ser observadas pequenas variações geométricas, tanto na sua altura, quanto na largura do cordão. Em muitos casos há uma tolerância aceitável para essas variações. Todavia, quando a finalidade do cordão é a construção de um componente camada por camada, essas pequenas variações podem impactar nas dimensões do componente final, fazendo com que o mesmo fique fora do especificado (ALBERTI et al., 2014).

A irregularidade geométrica obtida no perfil da seção transversal de uma parede multicamadas de único passe produzida por processo a arco, como mostra a Figura 38, pode promover acúmulo excessivo de material nas camadas superiores e promover o transbordamento deste. Este fenômeno tem como causa a redução da taxa de transferência de calor por condução durante o processo, o que promove um acervo de calor na região superior

da parede, então esta porção de metal fundido tem um tempo de solidificação maior (COELHO, 2021). O autor ainda considera 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 38 – Irregularidade geométrica



Fonte: Coelho (2021).

Devido à alta capacidade de deposição no processo por MADA, é possível também encontrar defeitos nos cordões de solda, conforme mostra a Figura 39. Na 39(a) observa-se um cordão não homogêneo e na 39(b) observa-se o cordão com excesso de deposição em sua extremidade.

Figura 39 – Defeitos encontrados em cordões de solda fabricados por deposição a arco:
a) cordão não homogêneo e b) excesso de deposição



a)



b)

Fonte: Alberti; Silva; D'Oliveira (2014).

As inconsistências podem ser atribuídas à movimentação do fluido na poça de fusão e podem ter relação com o comprimento da poça. Além disso, fatores como corrente e velocidade de soldagem apresentam forte influência nas inconsistências geométricas do cordão, indicando que correntes mais baixas e velocidades mais altas podem produzir perfis de cordão mais adequados para utilização em MA (HU et al., 2018).

Uma forma de alongar a poça de fusão é utilizar em conjunto com arco elétrico uma fonte de calor adicional, no caso um laser, passando a chamar-se Wire Laser Arc Additive Manufacture (WLAAM). Com essa técnica é possível não só alongar a poça como adicionar outro material de adição com o intuito de se obter um cordão de solda geometricamente adequado e com propriedades desejadas (EIMER et al., 2020).

6.6 Aplicações MADA

Há inúmeras aplicações da MADA, dentre elas pode-se citar o reforço de estrutura automotiva, demonstrada por Josten; Hofemann, 2020, no trabalho: Fabricação aditiva baseada em soldagem a arco para reforço de carroceria, como mostra a Figura 40.

Figura 40 - Aplicações de fabricação aditiva baseada em arco na engenharia automotiva



Fonte: Josten; Hofemann (2020).

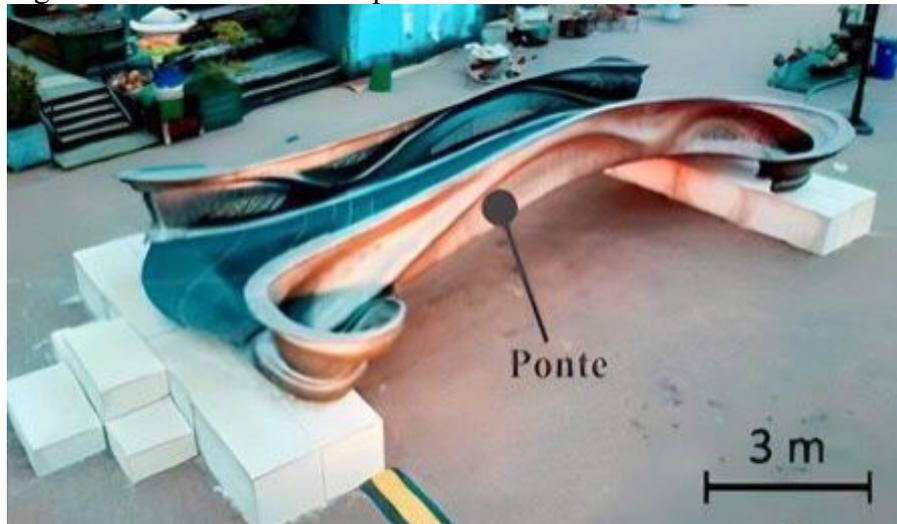
Outras aplicabilidades são a fabricação de componentes de grande porte como a criação de um elemento do braço de retroescavadeira (GREER et al., 2019), como demonstrado na Figura 41, e a criação de uma ponte com mais de 4500 kg e cerca de 12,5 m de comprimento (BUCHANAN; GARDNER, 2019), como mostra a Figura 43.

Figura 41 – Braço de retroescavadeira impresso por MADA



Fonte: Greer et al., (2019).

Figura 42 – Ponte fabricada por MADA

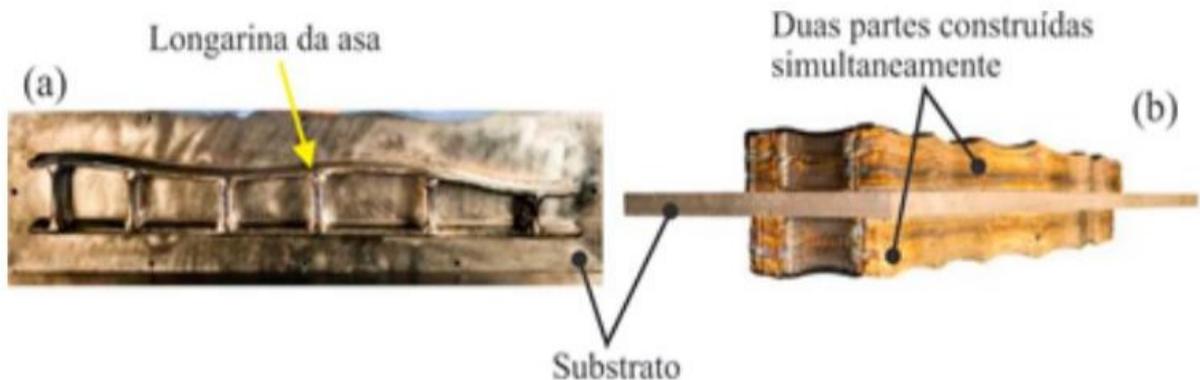


Fonte: Adaptado de Buchanan; Gardner (2019).

A figura 43 (a) mostra uma longarina de asa em Ti-6Al-4V de 1,2m feita para a BAE Systems. A peça apresenta características retas e curvas, todas perpendiculares ao

substrato e junções T. Duas partes foram construídas simultaneamente por deposição alternada em ambos os lados de um substrato sacrificial, Figura 43 (b) (WILLIAMS et al., 2016; BAE SYSTEMS, 2014).

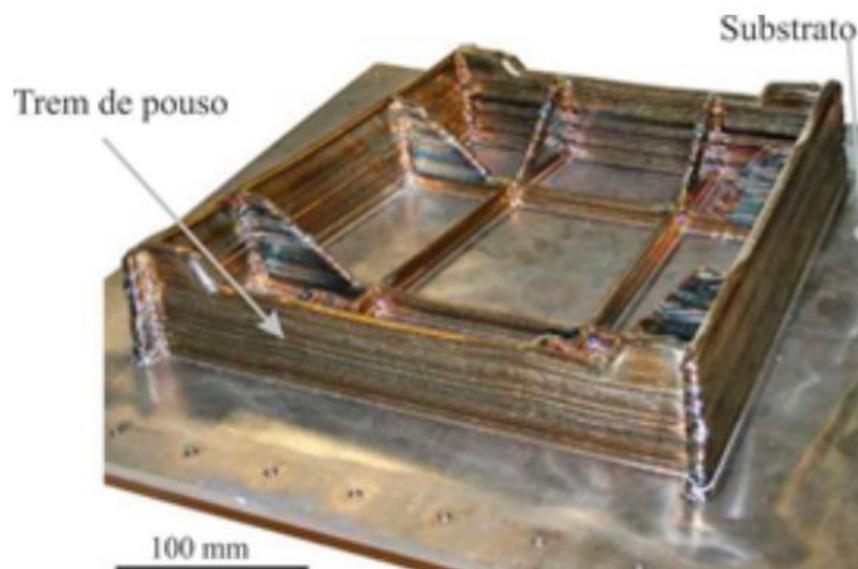
Figura 43 - Longarina de asa construída por MADA. Em (a) características retas e curvas da peça, em (b) mostra duas longarinas que foram fabricadas simultaneamente



Fonte: Adaptado de Williams et al. (2016) e BAE Systems (2014).

Outra fabricação de componente feita por MADA, foi um conjunto de trem de pouso de 24kg de Ti6Al-4V, como ilustra a Figura 44. Esta peça apresenta junções em T, cruzamentos, paredes perpendiculares e levemente inclinadas. Com a execução feita por esse processo, houve uma economia de material superior a 220 kg.

Figura 44 - Trem de pouso produzido por MADA e seu substrato, que serve de base para a fabricação



Fonte: Adaptado de Williams et al. (2016) e Fronius (2015).

Outro exemplo de empresa que tem usado a MADA para produção de componentes de grande porte e complexidade, é a *Rotterdam Additive Manufacturing LAB* (RAMLAB). Ela produziu um propulsor marítimo de grande porte, depositando uma liga de níquel, alumínio e bronze, totalizando 298 camadas depositadas, conforme mostrado na Figura 45.

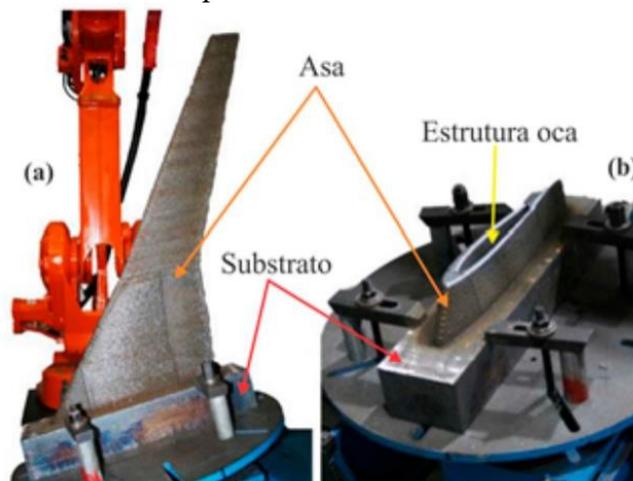
Figura 45 - Propulsor marítimo fabricado utilizando MADA



Fonte: Adaptado de RAMLAB (2020).

Uma asa de 0,8m para testes em túneis de vento foi construída em parceria com a Aircraft Research Association, como exibido na Figura 46 (a). O processo de deposição foi em uma máquina Fronius CMT11 com uma taxa de deposição de 238 3,5kg/h. A asa apresenta uma estrutura oca até o ponto médio, Figura 46 (b), porém, ainda será usinada com uma precisão de 0,05mm.

Figura 46 - (a) asa de 0,8 m para testes em túneis de vento, (b) A asa apresenta uma estrutura oca até o ponto médio



Fonte: Adaptado de Williams et al. (2016) e Fronius (2015).

A MADA tem sido fundamental para a indústria naval, pois ela é capaz de fornecer rotas de fabricação mais eficientes, de menor custo e mais sustentáveis. Essa indústria por possuir componentes de grandes dimensões, utiliza, por exemplo, o processo de fundição para manufaturar suas peças. Esse processo envolve grande complexidade para se conseguir uma fundição isenta de defeitos e dentro das especificações de projeto. Somado a isso, têm-se o alto custo envolvido no processo de fundição e, por conseguinte, os custos agregados ao transporte dos componentes fabricados. A MADA, porém, tem ampla capacidade de fabricar esses componentes náuticos com menor custo operacional, viabilizando a fabricação tanto nos estaleiros quanto dentro da própria embarcação, diminuindo consideravelmente os custos de transporte e movimentação de carga.

Na área biomédica foram estudadas ligas de magnésio produzidas por MADA (TAKAGI, 2018), mas sua aplicação nessa área ainda não atende aos requisitos, em termos de resistência à corrosão e biocompatibilidade. Uma vez assegurados, esses componentes podem ser usados para protótipos de vértebras humanas, implantes de quadril, entre outros.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos muitos entendimentos nesse estudo, percebe-se na fundamentação teórica que a manufatura aditiva já faz parte da realidade da indústria, sendo uma tecnologia que busca a produção de peças e inovação com potencial de revolucionar o mercado, apresentando resultados satisfatórios em suas diversas aplicações.

Foi possível notar que a manufatura aditiva não irá substituir definitivamente os métodos tradicionais, mas o trabalho em conjunto e sabendo escolher o melhor método para cada procedimento irá enriquecer a indústria com as possibilidades oferecidas por cada tecnologia. De um lado a usinagem permite a entrega de peças com fino acabamento e muita precisão. Do outro, a manufatura aditiva permite a criação de peças com uma complexidade inviável de se alcançar com o processo de usinagem tradicional, reduzindo matéria-prima, tempo e peso das peças finais.

Com a conclusão do estudo foi possível notar que o processo MADA apresenta vantagens em comparação com outras tecnologias de manufatura aditiva, pois possui alta aplicabilidade, abrangendo uma ampla variedade de materiais metálicos, além de possuir custo baixo, maior taxa de deposição, ampla aplicação em diferentes tipos de peça de trabalho e diversidade na escolha do tipo de deposição (MIG/MAG, TIG, Plasma), possibilidade de automatização através de um manipulador robótico. Além disso, o acúmulo de calor é comum no processo MADA, podendo ser amenizado por algum processo de resfriamento.

Apesar dos benefícios, foi observado que devido às elevadas temperaturas geradas neste processo, necessárias para promover a fusão e deposição do material, assim como a existência de ciclos térmicos não uniformes, problemas de tensões residuais e distorções afetam a qualidade dos componentes obtidos neste processo, justificando a necessidade de uma maior compreensão do comportamento térmico deste processo.

Importante destacar que o principal ponto da pesquisa foi o fator geométrico causado pela MADA, mas um estudo para avaliar os fatores metalúrgicos é necessário, visto que a soldagem já encontra limitações e podem ser maiores quando aplicada a manufatura camada por camada.

Percebe-se que os objetivos foram alcançados quando se contextualizou a definição de MA; se abordou sua relação com os processos convencionais; sua aplicação em metais, destacando os métodos e suas especificações; como ocorre o processo de manufatura aditiva por soldagem; se expôs o que é e como ocorre a manufatura aditiva por deposição a arco; se justificou as vantagens do uso da MADA e suas outras principais especificações.

REFERÊNCIAS

- ALBERTI EA, SILVA L, D'OLIVEIRA ASCM. **Manufatura aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade.** Soldagem e Inspeção. 2014;19(2):190-198. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.11>> Acesso em: jul.2022.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS 3.0: Standard Welding Terms and Definitions.** Miami, p. 162. 2010.
- AMPOWER, 2019. **Technology overview metal Additive Manufacturing** [WWW Document]. MAP. URL <https://am-power.de/en/insights/metal-additivemanufacturing/>
- AMS BRASIL. **Manufatura Aditiva no setor aeroespacial: Produza peças de alta tecnologia com eficiência e sustentabilidade.** 2021. Disponível em: <<https://amsbrasil.com.br/manufaturaaditiva-no-setor-aeroespacial-produza-pecas-de-alta-tecnologia-com-eficiencia-esustentabilidade/>>. Acesso em: out. 2022.
- ARAÚJO, V. C. **Manufatura aditiva e suas aplicações na Indústria: uma revisão de literatura.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceara, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2021.
- ASTM International. **ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.** West Conshohocken. 2012.
- BAE SYSTEMS. **Growing knowledge, growing parts: innovative 3D printing process reveals potential for aerospace industry.** 2014.
- BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHYSSOLOURIS, G. **Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review.** In: Int. J. Adv. Manuf. Technol. Atenas, Grécia, v. 83, p. 389-405, 2015.
- BRACARENSE, Alexandre, Q. **Soldagem a Plasma – PAW,** 2000. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/11515027-Soldagem-a-plasma-paw.html>>. Acesso em nov. 2022.
- BUCHANAN, C.; GARDNER, L. **Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges.** Engineering Structures, [S. l.], v. 180, n. March 2018, p. 332–348, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>>
- BUSACHI, Alessandro; ERKOYUNCU, John; COLEGROVE, Paul; MARTINA, Filomeno; DING, Jialuo. **Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications.** Procedia CIRP, [S. l.], v. 37, p. 48–53, 2015.
- CAPLA, R. L., **Estudo da Influência do Sobremetal Excedente de Desbaste Na Operação de Acabamento Aplicando Usinagem Com Altas Velocidades** (2006), Dissertação referente ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, USP, São Carlos.
- CASTELLS, R. **DMLS vs SLM 3D printing for metal manufacturing.** [S. l.]: Element Materials Technology, 2016.

CHAN, Kwai S. et al. **Fatigue Life of Titanium Alloys Fabricated by Additive Layer Manufacturing Techniques for Dental Implants**. Metallurgical And Materials Transactions A, [s.l.], v. 44, n. 2, p.1010-1022, 17 out. 2012. Springer Nature. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11661-012-1470-4>>. Acesso em: ago.2022.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill Editora, 1986.

CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. **Rapid prototyping: principles and applications**. Ed 3. New York, EUA, 2010. ISBN: 978-9810245160.

CLARK, D.; BACHE, M.R.; WHITTAKER, M.T. **Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications**. Journal of Materials Processing Technology, p.439-448, 2008.

COELHO, F. G. F. **Desenvolvimento de um sistema baseado em aquisição de imagens para a parametrização do processo gmaw-p em manufatura aditiva**, 2021. Tese de doutorado referente ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, Belo Horizonte.

CONG, B.; DING, J.; WILLIAMS, S. **Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactures Al-6.3%Cu alloy**. International Journal of Manufacturing Technology. pp. 1593 – 1606. 2015.

CUNHA, L. J. G . D.C. Luzzatp Ed., Porto Alegre, RS,1985.

DADBAKSH, Sasan; HAO, Liang; KONG, Choon Yen. **Surface finish improvement of LMD samples using laser polishing**. Virtual And Physical Prototyping, [s.l.], v. 5, n. 4, p.215-221, dez. 2010. Informa UK Limited. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2010.528180>>. Acesso em: ago. 2022.

DAVIS, J.R. ASM International (Ed.). ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys. Ohio, 2002.

DEBROY, T. et al. **Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties**. Progress In Materials Science, [s.l.], v. 92, p.112-224, mar. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>>. Acesso em: ago. 2022.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. McGraw-Hill Book Company. United Kingdom, 1988.

DINDA, G.P; DASGUPTA, A.K.; MAZUMDER, J. **Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability**. Materials Science and Engineering A, 509 (2009) 98-104.

DING, J. et al. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts, **Computational Materials Science**, 50, p.3315-3322, 2011.

DING, D. et al. **Wirefeed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests**. The international journal of advanced manufacturing technology, v. 81, p. 465481, 2015.

DINOVITZER, M. et al. **Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) Process Parameters on Bead Geometry and Microstructure**. Additive manufacturing, v. 26, p. 138146, March 2019.

DONE 3D, **História das impressoras 3D**, 2022. Disponível em: <<https://done3d.com.br/historia-das-impressoras-3d/>>. Acesso em: jul. 2022.

EDWARDS, P.; O'CONNOR, A.; RAMULU, M. **Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, [S. l.], v. 135, n. 6, 2013.

EN1011-1, DIN (2009). **Welding - Recommendations for Welding of Metallic Materials**. Part I: General Guidance for Arc Welding.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, 1970. ISBN 978-85-212-0859-4.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Carlos: Edgard Blücher Ltda, 1969. 751 p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 3 ed. v.1, S.P: Editora Edgard Blücher Ltda, 1995. 751p.

FORMLABS. 2021. **Manufatura Aditiva vs. Manufatura Subtrativa**. Disponível em: <<https://formlabs.com/blog/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing/>>. Acesso em: fev. 2023.

FRAZIER, W. E. **Metal additive manufacturing: a review**. Journal of Materials Engineering and performance, v. 23, n. 6, p. 1917-1928, 2014.

FRONIUS. **Fabricação econômica de componentes metálicos - wire arc additive manufacturing**. 2019.

GARDAN, J., **Additive Manufacturing Technologies: State of the Art and Trends**. International Journal of Production Research, Taylor&Francis, 2016.

GIAROLLO, D. F., MAZZFERRO, C. C. P., MAZZAFERRO, J. A. E. Modelagem Térmica do Processo de Manufatura Aditiva Utilizando GMAW. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.5, p.45661-45676 may.2021

GIBSON, Ian; STUCKER, Brent; ROSEN, David W. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. New York: Springer, 2010. 459 p

GREER, Clayton et al. **Introduction to the design rules for Metal Big Area Additive Manufacturing**. **Additive Manufacturing**, [S. l.], v. 27, n. November 2018, p. 159–166, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.016>> Acesso em: out. 2022.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

HEJRIPOUR, F. et al. Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel, **Journal of Materials Processing Technology**, 272, p. 58 - 71, 2019.

HENDERSON, M.B. et al., **Nickel-Based Superalloy Welding Practices for Industrial Gas Turbine Applications**. Science and Technology of Welding and Joining, no. 1, 2004.

HUBS, **SLA serviço de impressão 3D**. Disponível em: <<https://www.hubs.com/3d-printing/sla-dlp/>> Acesso em: abr. 2023.

HU, Zeqi et al. **Understanding and overcoming of abnormality at start and end of the weld bead in additive manufacturing with GMAW**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [S. l.], v. 95, n. 5–8, p. 2357–2368, 2018.

JHAVAR, S., JAIN, N.K., PAUL, C.P. **Development of micro-plasma transferred arc (u-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications**. Journal of Materials Processing Technology, p.1102-1110, 2014.

JOSTEN, A.; HÖFEMANN, M. Arc-welding based additive manufacturing for body reinforcement in automotive engineering. **Welding in the World**, [S. l.], v. 64, n. 8, p. 1449–1458, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40194-020-00959-3>> Acesso em: out. 2022.

KALPAKJIAN, S., & Schmid, S. R. (2001). **Manufacturing Engineering and Technology**. Prentice Hall.

KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren - Drehen, Bohren, Fräsen**. Aachen, Alemanha: Springer Verlag, 1997.

LEE, Y. S. et al. **Role of scan strategies on thermal gradient and solidification rate in electron beam powder bed fusion**. Additive Manufacturing, 2018.

LEVY, Gideon N. et al. **The role and future of the Laser Technology in the Additive Manufacturing environment**. Physics Procedia, [s.l.], v. 5, p.65-80, 2010. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.123>>. Acesso em: ago. 2022.

LEVY, Gideon N.; SCHINDEL, Ralf; KRUTH, J.p. **Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives**. Cirp Annals, [s.l.], v. 52, n. 2, p.589-609, 2003. Elsevier BV. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60206-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60206-6)>. Acesso em: ago. 2022.

LIMA, E. D; SANTOS, J. R. **Estudo sobre novos componentes fabricados pela indústria automobilística com o auxílio da manufatura aditiva**, 2018.

LINNERT, G. E. **Welding Metallurgy – Carbon and Alloy Steels**. 4th ed. Miami: American Welding Society, 1994.

LIU, J.; XU, Y.; GE, Y.; HOU, Z.; CHEN, S. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 111, n. 1-2, p. 149-198, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>.

LIU, Z. et al. Corrosion and high-temperature tribological behavior of carbon steel claddings by additive manufacturing technology. **Surface and Coatings Technology**, v. 384, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125325>.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. 1. ed. Porto Alegre: [s. n.], 1996. E-book.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. rev. São Paulo: Blucher, 2009. ISBN 978-85-212-0452-7.

M. ADINARAYANAPPA, Somashekara; SIMHAMBHATLA, Suryakumar. **Twin-wire welding based additive manufacturing (TWAM): manufacture of functionally gradient objects**. Rapid Prototyping Journal, [S. l.], v. 23, n. 5, p. 858–868, 2017

MEIER, Harald et al. **Hard Broaching of Case Hardened SAE 5120**. Procedia Cirp, [s.l.], v. 14, p.60-65, 2014.

MENDES, N. **Manufatura Aditiva por Deposição a Arco em leito de fluxo: prova de conceito**. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p.13, 2022.

MERKLEIN, M.; JUNKER, D.; SCHAUB, A.; NEUBAUER, F. **Hybrid additive manufacturing technologies – an analysis regarding potentials and applications**. Physics Procedia, v. 83, p. 549–559, 2016.

MINAYO, MCS. **O desafio do conhecimento**. 12 ed. São Paulo: Editora Hucitec; 2010.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução a Metalurgia da Soldagem**, Belo Horizonte, janeiro 2012. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>> Acesso em: set. 2022.

MONTEVECCHI, F. et al. Heat accumulation prevention in Wire-Arc-additive- - Manufacturing using air jet impingement. **Manufacturing Letters**, v. 17, p. 14-18, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.06.004>>. Acesso em: jul. 2022.

MOSTAFAEI, A. *et al.* Binder jet 3D printing–Process parameters, materials, properties, and challenges. **Progress in Materials Science**, 2020.

NAYLOR, A.; HACKNEY P. **A Review of Wood Machining Literature with a Special Focus on Sawing**. BioResources, v. 8, n. 2, p. 3122-3135, 2013.

NOVASKI, O.; CORRÊA, M., **A HSC como vantagem competitiva**. Revista Máquina e Metais, n. 394, Editora Aranda, São Paulo, 1998.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora Sa, 1982.

PARVARESH, B.; MIRESMAEILI, R.; YAZDIZADEH, M. **Characterization of Wire Arc Additive Manufactured Products: A Comparison Between AsDeposited and Interlayer Cold Worked Specimens**. Journal of manufacturing processes, v. 57, p. 6171, 2020.

PEREIRA, H. C. B., HENKE, S. L., de OLIVEIRA, A. S. C. M., **Caracterização de Multicamadas de IN625 Depositadas por CMT**. Revista Soldagem e Inspeção, 2018;

QI, Zewu et al. **Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys**. Journal of Materials Processing Technology, [S. l.], v. 255, n. December 2017, p. 347–353, 2018.

QUEGUINEUR, A. et al. Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications. **Welding in the World**, [S. l.], v. 62, n. 2, p. 259–266, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40194-017-0536-8>> Acesso em: jun. 2022.

RAUT, L. P.; TAIWADE, R. V. **Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions**. Journal of materials engineering and performance, v. Springer, June 2021.

REDWOOD, Ben; SCÖFFER, Filemon; GARRET, Brian. **The 3D Printing Handbook: Techonologies, design and applications**. 3D Hubs B. V.,2017.

REIS, Ruham, P. **Soldagem Plasma “Melt-in” de aço comum ao carbono**, p. 3, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14820/1/RPReis1DISSPRT.pdf>> Acesso em: set. 2022.

RENDERBLOG, **A história da impressão 3D: uma retrospectiva de 40 anos**, 2021. Disponível em: [https://blog.render.com.br/impressao-3d/a-historia-da-impressao-3d-uma-retrospectiva-de-40-anos/#:~:text=Comercializa%C3%A7%C3%A3o%3A%20Em%201992%2C%20a%20startup,para%20Impress%C3%A3o%20ColorJet%20\(CJP\)](https://blog.render.com.br/impressao-3d/a-historia-da-impressao-3d-uma-retrospectiva-de-40-anos/#:~:text=Comercializa%C3%A7%C3%A3o%3A%20Em%201992%2C%20a%20startup,para%20Impress%C3%A3o%20ColorJet%20(CJP).). Acesso em: jun. 2022.

REVILLA-LEON, M.; SADEGHPOUR, M.; ÖZCAN, M. **A Review of the Applications of Additive Manufacturing Technologies Used to Fabricate Metals in Implant Dentistry**. J. Prosthodont. 2020, 29, 579–593.

SAMES, W. J.; MEDINA, F.; PETER, W. H.; BABU, S. S.; DEHOFF, R. R. **Effect of Process Control and Powder Quality on Inconel 718 Produced Using Electron Beam Melting**. In: 8th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2014. p. 409–423.

SCHMIDT, Michael et al. **Laser based additive manufacturing in industry and academia**. Cirp Annals, [s.l.], v. 66, n. 2, p.561-583, 2017. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.011>>. Acesso em: ago. 2022.

SCOTTI, A.; MONTEIRO, L. S. **Uma metodologia para parametrização do processo GMAW**. Soldagem & inspeção, São Paulo, v. 17, p. 271277, Jul/Set 2012.

SCULPTEO. The state of 3D printing 2020. [S. l.: s. n.].

SECCO, Adriano Ruiz et al. **Brochamento**. In: SECCO, Adriano Ruiz et al. Processos de Fabricação. [s.i]: Senai. p. Cap. 67.

SELVI, S.; VISHVAKSENAN, A.; RAJASEKAR, E. **Cold metal transfer (CMT) technology - An overview**. *Defence Technology*, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 28–44, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002>> Acesso em: out. 2022.

SHER, Davide. Inside the Volkswagen 3D printing center at the Autostadt. **3D Printing Media Network**, 2018. Disponível em: <https://www.3dprintingmedia.network/insidethe-volkswagen-3d-printing-center-at-the-autostadt/>. Acesso em: abr. 2023.

SIEMENS Additive Manufacturing at Hannover Fair. **Arc Advisory Group**, 2018. Disponível em: <<https://www.arcweb.com/blog/siemens-additive-manufacturinghannover-fair>>. Acesso em: abr. 2023.

SILVA, F.L.S. **Desenvolvimento de Estratégias para Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco**. UFSC, Projeto de Fim de Curso, 2017.

SILVA, LJ. **Near-immersion active cooling for wire+arc additive manufacturing: from concept to application**. PhD Thesis. UFU, 2019.

SINGH, D.D; MAHENDER, T.; REDDY, A.V. Powder bed fusion process: A brief review. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

SKIBA, T; BAUFELD, B; BIEST, O. **Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel Component Manufactured by Shaped Metal Deposition**. ISIJ International, p. 1588-1591, 2009.

SU, C.Y. et al., **Plasma transferred arc repair welding of the nickel-base superalloy IN-738LC**. *Journal of Materials Engineering and Performance*, p.619-627, 1997.

SUDHANSHU, R.S.; KHANNA, P. **Wire and additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials**. *Materials Today: Proceedings*, Ago. 2020.

TAKAGI, H. et al. **Material-property evaluation of magnesium alloys fabricated using wire and-arc-based additive manufacturing**. *Addit. Manuf.*, v. 24, p. 498- 507, 2018.

TALKINGTON, J. E. **Variable polarity gas metal arc welding**. Ohio: Ohio State University, 1998.

TOALDO, P. H. **Avaliação da influência dos parâmetros de processamento na manufatura aditiva do aço vp50im por arco elétrico a gás**. Dissertação (Mestre em

Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2022.

TOFFOLI, H. T. **PROJETO, MELHORIA E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA - “IMPRESSORA 3D”**. 2018

TOYSERKANI, E., Dyuti, S., Ibhadode, O.O., Liravi, F., Russo, P., Taherkhani, K., 2022. 70 **Metal additive manufacturing**, 1st ed. Wiley, NJ.

UZIEL, A. **Looking at large-scale, arc-based additive manufacturing**. *Welding Journal*, 2016; 95(4): 42-46.

VOLPATO, N. et al. **Prototipagem rápida: tecnologia e aplicações**. São Paulo: E. Blucher, 2007.

VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Blucher. ISBN 978-85-212-1150-1, 2017.

WAHLSTROM, T., SAHLSTROM, J. **Additive Manufacturing in Production: For the Automotive Industry**. Master Thesis, Faculty of Engineering LTH, Lund University – Sweden, 2016. 140 p.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **SOLDAGEM: Processos e Metalurgia**. 2. ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 1992. 494 p.

WILLIAMS, S. W. et al. **Wire + Arc Additive Manufacturing Wire þ Arc Additive Manufacturing**. [S. l.], v. 0836, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>> Acesso em: out.2022.

WU, B. et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 250, p. 304-312, 2017.

WU, B; PAN, Zengxi; DING, Donghong; CUIURI, Dominic; LI, Huijun. **Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing**. *Additive Manufacturing*, [S. l.], v. 23, n. August, 2018.

XIONG, J. et al. Forming appearance analysis in multi-layer single - pass GMAW -based additive manufacturing, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 80, p. 1767 - 1776, 2015

XIONG, J. et al. Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second - order regression analysis, **Journal of Intelligent Manufacturing**, 25, p. 157 - 163, 2012

YANG, D.; HE, C.; ZHANG, G. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 227, p. 153-160, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.08.021>>. Acesso em: set. 2022.

ZHANG, Bowen; WANG, Chao; WANG, Zhaohui; ZHANG, Laiqi; GAO, Qiang. **Microstructure and properties of Al alloy ER5183 deposited by variable polarity cold metal transfer**. Journal of Materials Processing Technology, [S. l.], v. 267, p. 167–176, 2019.

ZHANG, Y. et al. **Weld depositionbased rapid prototyping: a preliminary study**. Journal of materials processing technology, v. 135, p. 347357, 2003.

ZHAO, Y. et al. **Process planning strategy for wire-arc additive manufacturing: Thermal behavior considerations**, Additive Manufacturing, 32, 2020.