



Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção - PPGE



MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RÔMULO PACHECO DE OLIVEIRA

**A INFLUÊNCIA DO REAQUECIMENTO DE CAMADAS NA
MICROESTRUTURA E NA DUREZA DE PRODUTOS DE
AÇO FABRICADOS COM MANUFATURA ADITIVA POR
DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA), COMPARANDO DOIS
TIPOS DE RESFRIAMENTO: A AR E A ÁGUA**

MANAUS

2022



Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção - PPGE



RÔMULO PACHECO DE OLIVEIRA

**A INFLUÊNCIA DO REAQUECIMENTO DE CAMADAS NA
MICROESTRUTURA E NA DUREZA DE PRODUTOS DE
AÇO FABRICADOS COM MANUFATURA ADITIVA POR
DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA), COMPARANDO DOIS
TIPOS DE RESFRIAMENTO: A AR E A ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção, na área de Tecnologias Emergentes.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Casanova Soeiro Júnior

MANAUS

2022

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

O48i Oliveira, Rômulo Pacheco de
A influência do reaquecimento de camadas na microestrutura e na dureza de produtos de aço fabricados com manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), comparando dois tipos de resfriamento: a ar e a água. / Rômulo Pacheco de Oliveira . 2022
66 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Jaime Casanova Soeiro Júnior
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. indústria 4.0. 2. manufatura aditiva por deposição a arco. 3. resfriamento a água. 4. manufatura aditiva. I. Soeiro Júnior, Jaime Casanova. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

“Quem te ver conquistar algo, talvez não saiba dos obstáculos que teve que superar no meio do caminho. Enquanto tiver força e fé para lutar, não existirão obstáculos insuperáveis”

DEDICATÓRIA

Dedico essa conquista a Deus que me dá vida e saúde para continuar a cada dia. Aos meus pais e irmãos que são o meu apoio nos momentos difíceis, à minha esposa Maria Socorro e aos meus dois filhos Renan Gabriel e Ruan Miguel e a minha enteada Ana Gabrielly.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus;

Aos meus pais e esposa;

Ao meu orientador, Dr. Jaime Casanova, por todo o conhecimento passado, pela paciência e confiança ao longo deste projeto;

À SUFRAMA que me proporcionou essa oportunidade;

Aos professores deste mestrado por todo o conhecimento transmitido;

Aos colegas de mestrado que lutaram comigo nesta caminhada.

RESUMO

As tecnologias de *Big Data*, Internet das Coisas, Manufatura Aditiva, entre outras, relacionadas à Quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0 já são uma realidade nos dias atuais. Dentre essas tecnologias, a Manufatura Aditiva tem um papel fundamental para o sucesso desta nova fase tecnológica, que exige mais flexibilidade e personalização nos processos produtivos. Um dos processos de fabricação que tem atraído bastante interesse da indústria é o processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), devido a possibilidade de fabricação de grandes peças metálicas com baixo custo de equipamento, baixo custo de material e baixo impacto ambiental. Entretanto, este processo exige um rígido controle do acúmulo de calor gerado pelo tipo de fonte de energia utilizado e pela alta taxa de deposição de material, o que pode ocasionar diversos defeitos nas peças fabricadas. Neste sentido, este trabalho analisa a influência do reaquecimento de camadas, na microestrutura e na dureza, de produtos de aço fabricados com MADA, considerando duas condições de resfriamento, uma a ar e outra a água. A metodologia adotada foi a construção de dois produtos planos com cinco camadas de material depositado, estudando, em primeiro momento, a microestrutura e a dureza da terceira camada, sem reaquecimento ocasionado pela deposição de outras camadas. Posteriormente, comparou-se a microestrutura e a dureza da terceira camada após ser reaquecida pela deposição da quarta e quinta camadas. Os resultados demonstraram que tanto para o resfriamento a ar quanto para o resfriamento a água, os ciclos térmicos da deposição de camadas superiores afetam a microestrutura de camadas inferiores, reduzindo a presença de ferrita acicular e conseqüentemente, aumentando a fração volumétrica de bainita. Em relação à propriedade mecânica de dureza, os resultados demonstraram que tanto para o produto plano construído com o resfriamento a ar quanto para o construído com resfriamento a água, a microdureza de camadas inferiores não é afetada significativamente pelos ciclos térmicos da deposição de camadas superiores. Contudo, verifica-se uma tendência na diminuição da microdureza de camadas inferiores com o aumento do número de camadas depositadas, ocasionado pela dificuldade de dissipação de calor das camadas mais elevadas.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. Resfriamento a água.

ABSTRACT

The technologies of Big Data, Internet of Things, Additive Manufacturing, among others, related to the Fourth Industrial Revolution or Industry 4.0 are already a reality nowadays. Among these technologies, Additive Manufacturing plays a key role in the success of this new technological phase that requires more flexibility and customization in production processes. One of the manufacturing processes that has attracted a lot of interest from the industry is the Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process, due to the possibility of manufacturing large metal parts with low equipment cost, low material cost and low environmental impact. However, this process requires strict control of the heat accumulation generated by the type of energy source used and the high rate of material deposition, which can cause several defects in the manufactured parts. In this sense, this work analyzes the influence of layer reheating, on the microstructure and hardness, of steel products manufactured with MADA, considering two cooling conditions, one in air and the other in water. The methodology adopted was the construction of two flat products with five layers of deposited material, studying, at first, the microstructure and hardness of the third layer, without reheating caused by the thermal cycles of other layers. Subsequently, the microstructure and hardness of the third layer were compared after being reheated by the thermal cycles of the deposition of the fourth and fifth layers. The results showed that for both air and water cooling, the thermal cycles of upper layers affect the microstructure of lower layers, reducing the presence of acicular ferrite and, consequently, increasing the volumetric fraction of bainite. Regarding the mechanical property of hardness, the results showed that both for the flat product built with air cooling and for the one built with water cooling, the microhardness of lower layers is not significantly affected by the thermal cycles of the deposition of upper layers. However, there is a tendency to decrease the microhardness of the lower layers with the increase in the number of layers deposited, caused by the difficulty in dissipating heat from the higher layers.

Keywords: Industry 4.0. Wire Arc Additive Manufacturing. Water Cooling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de uma fábrica inteligente.	19
Figura 2 - Principais tecnologias da indústria 4.0.	20
Figura 3 - Acontecimentos históricos de MA.	22
Figura 4 - Etapas básicas do processo de MA.	23
Figura 5 - Os 7 processos primários de MA.	25
Figura 6 - Strati da Local Motors, 2014.	26
Figura 7 - Motor Advanced Turboprop da GE Aviation.	27
Figura 8 - Pizza da BeeHex impressa em 3D.	28
Figura 9 - Hambúrgueres veganos impressos em 3D.	29
Figura 10 - Principais materiais utilizados nos processos de MA.	29
Figura 11 - Sistemas automáticos de MADA.	31
Figura 12 - Processo híbrido de MADA com usinagem.	31
Figura 13 - Tipos de soldagem a arco elétrico.	33
Figura 14 - Características dos processos de MADA.	33
Figura 15 - Defeito vs material utilizados em MADA.	35
Figura 16 - Fases do processo CMT.	35
Figura 17 - Resfriamento ativo próximo a imersão (NIAC).	36
Figura 18 - Sistema de resfriamento ativo por microventiladores.	37
Figura 19 - Resfriamento por água gelada.	38
Figura 20 – Sistemas utilizados no processo.	40
Figura 21 - Sistema de resfriamento a água.	41
Figura 22 - Identificação do local de coleta das amostras analisadas.	42
Figura 23 - Posicionamento das impressões de microdureza Vickers.	43
Figura 24 - Amostra A1, com três camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da terceira camada (3.3) e (c) micrografia eletrônica da terceira camada (3.3).	44
Figura 25 - Amostra A2, com quatro camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da quarta camada (4.4); (c) micrografia eletrônica da quarta camada (4.4); (d) micrografia óptica da terceira camada (3.4) e (e) micrografia eletrônica da terceira camada (3.4).	45

Figura 26 - Amostra A3 com cinco camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da quinta camada (5.5); (c) micrografia eletrônica da quinta camada (5.5); (d) micrografia óptica da quarta camada (4.5); (e) micrografia eletrônica da quarta camada (4.5); (f) micrografia óptica da terceira camada (3.5) e (g) micrografia eletrônica da terceira camada (3.5).	46
Figura 27 - Amostra A4 com três camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da terceira camada (3.3).	47
Figura 28 - Amostra A5 com quatro camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da quarta camada (4.4) e (c) micrografia óptica da terceira camada (3.4).	48
Figura 29 - Amostra A6 com cinco camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da quinta camada (5.5); (c) micrografia eletrônica da quinta camada (5.5); (d) micrografia óptica da quarta camada (4.5); (e) micrografia eletrônica da quarta camada (4.5); (f) micrografia óptica da terceira camada (3.5) e (e) micrografia eletrônica da terceira camada (3.5).	49
Figura 30 - Médias de microdureza das camadas resfriadas a ar.	50
Figura 31 - ANOVA para as médias das camadas resfriadas a ar.	51
Figura 32 - Diferença de médias entre camadas resfriadas a ar.	51
Figura 33 - Médias de microdureza das camadas resfriadas a água.	54
Figura 34 - ANOVA para as médias das camadas resfriadas a água.	54
Figura 35 - Diferença de médias entre as camadas resfriadas a água.	55
Figura 36 - Médias de microdureza por camada depositada com resfriamento a ar e a água.	56
Figura 37 - ANOVA entre as médias de microdureza dos dois tipos de resfriamento.	57
Figura 38 - Comparação de médias de microdureza entre camadas com resfriamento a ar e a água.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química (% em peso) dos materiais utilizados.	39
Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.	39
Tabela 3 - Parâmetros de processo.	42
Tabela 6 - Médias dos parâmetros de soldagem das camadas resfriadas a ar.	46
Tabela 7 - Médias dos parâmetros de soldagem das camadas resfriadas a água.	49
Tabela 8 - Microdureza Vickers (HV0,5) das camadas resfriadas a ar.	50
Tabela 9 - Microdureza Vickers (HV0,5) das camadas resfriadas a água.	53

LISTA DE SIGLAS

3DP	3D Printing
3SP	Scan, Spin, and Selectively Photocure
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
DLP	Digital Light Processing
DMD	Direct Metal Deposition (DM3D)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LMD	Laser Metal Deposition
LOM	Laminated Object Manufacture
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição à Arco
MJF	Multi-Jet Fusion
MJM	Multi-Jet Modeling
SCP	Smooth Curvatures Printing
SDL	Selective Deposition Lamination
SHS	Selective Heat Sintering
SLA	Stereolithography Apparatus
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing

WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
TIG	Tungsten Inert Gas
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAM	Gas Tungsten Arc Welding
PAW	Plasm Arc Welding
CMT	Cold Metal Transfer
NIAC	Near Imersion Active Cooling

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	15
2. OBJETIVO	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1. Relação da Manufatura Aditiva com a Indústria 4.0	19
3.2. Manufatura Aditiva (MA)	21
3.3. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1. Caracterização Microestrutural das Camadas Resfriadas a Ar	44
5.2. Caracterização Microestrutural das Camadas Resfriadas a Água	46
5.3. Análise de Microdureza Vickers das Camadas Resfriadas a Ar	50
5.4. Análise de Microdureza Vickers das Camadas Resfriadas a Água	53
5.5. Comparação de Microdureza entre os Dois Tipos de Resfriamento	56
6. CONCLUSÃO	59
7. CONTRIBUIÇÕES	61
7.1. Contribuições Acadêmicas	61
7.2. Contribuições Econômicas	61
7.3. Contribuições Sociais	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A indústria 4.0 refere-se à rede inteligente de máquinas e processos para a indústria com a ajuda da tecnologia da informação e comunicação (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0, 2021). É uma filosofia de fabricação que inclui modernos sistemas de automação com trocas de dados flexíveis e eficazes que permitem a implementação de tecnologias de produção de última geração, inovação em design, produtos personalizados e produção mais ágil (OZTEMEL; GURSEV, 2020). A quarta revolução industrial ou indústria 4.0 é caracterizada por tecnologias de informação e comunicação (TIC) modernizadas, produtos, máquinas e processos interligados, permitindo o estabelecimento do conceito de “fábrica inteligente” (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Ela combina tecnologias físicas e digitais como: (i) robôs autônomos; (ii) manufatura aditiva; (iii) realidade aumentada; (iv) simulação; (v) integração horizontal e vertical; (vi) internet das coisas; (vii) computação na nuvem; (viii) segurança da informação e (ix) grandes bancos de dados (RÜSSMANN M et al., 2015).

A parte física das fábricas inteligentes é limitada pela falta de flexibilidade e customização dos sistemas de manufatura existentes, sendo necessário desenvolver novos métodos de manufatura não tradicionais. Isso torna a manufatura aditiva (MA) um dos componentes vitais da indústria 4.0 (DILBEROGLU et al., 2017). A MA proporciona uma manufatura livre de complexidade, enquanto que na manufatura tradicional existe uma conexão direta entre complexidade e custo de fabricação (LINDEMANN et al., 2012).

Combinada com outras tecnologias como por exemplo a internet das coisas, realidade aumentada e *big data*, a MA traz enormes benefícios, ganhando eficiência na gestão da produção, melhorando o controle de estoques, de logística, de materiais e componentes (ROSIENKIEWICZ et al., 2018).

A manufatura aditiva produz peças adicionando materiais camada por camada com base em um modelo sólido 3D computadorizado. Diferente dos processos de manufatura convencionais, como a usinagem, que retiram material

para a formação da peça, a manufatura aditiva adiciona material. Diversos benefícios podem ser destacados para essa tecnologia, tais como: não requer ferramentas de corte, nem refrigerantes ou outros recursos auxiliares, permite a otimização do design, permite a produção de peças personalizadas e facilita a fabricação de produtos ecologicamente sustentáveis, dentre outros. Existem diferentes tipos de processos de MA, alguns usam fontes de energia a laser ou feixe de elétrons para fundir ou sinterizar metais ou pó de materiais cerâmicos ou poliméricos plásticos junto com metais, outros usam cabeças de impressão tipo jato de tinta para injetar, com precisão, aglutinante ou solvente sobre uma camada de cerâmica ou polímero em pó (HUANG et al., 2013).

Os processos de manufatura aditiva aplicados à materiais metálicos estão sendo cada vez mais usados nas indústrias aeroespacial, automotiva e médica devido a muitos atributos exclusivos, particularmente para a produção de componentes de valor agregado que não poderiam ser feitos facilmente pelos processos convencionais (DEBROY et al., 2018).

Um desses processos, chamado de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) apresenta várias vantagens competitivas em relação aos demais que utilizam fonte de energia a laser ou feixe de elétrons, como baixo investimento de capital e altas taxas de deposição (DING et al., 2015). O processo de MADA tem atraído a atenção do setor industrial devido a possibilidade de criar grandes componentes de metal com alta taxa de deposição, baixo custo de equipamento, economia de material e baixo impacto ambiental (DILBEROGLU et al., 2017).

Uma desvantagem do processo MADA é o acúmulo de calor gerado pelo tipo de fonte de energia e pela alta taxa de deposição (SCOTTI et al., 2020), que pode ocasionar diversos defeitos nas peças produzidas, como distorção e altas tensões residuais (DING et al., 2011), microestrutura grosseira (ZHANG et al., 2019), excesso de oxidação (WU et al., 2017) além de irregularidades geométricas (MARTINA et al., 2012). Nesse sentido, várias técnicas de resfriamento tem sido estudadas para mitigar o acúmulo de calor e lidar com as limitações relacionadas ao ciclo de deposição de cada camada (DA SILVA et al., 2020).

Algumas dessas técnicas utilizam água ou microventiladores para tentar diminuir o acúmulo de calor durante o processo. Assim, este trabalho apresenta um estudo sobre a influência do reaquecimento de camadas, na microestrutura e na dureza, de produtos de aço fabricados com MADA, considerando dois tipos de resfriamento, um a ar e outro a água. Apresenta-se neste trabalho, uma nova técnica de resfriamento ativo, através do jateamento de água na face oposta a deposição das camadas no substrato.

A metodologia adotada foi a construção de dois produtos planos com cinco camadas de material depositado, de aço de baixa liga e alta resistência, um construído com resfriamento a ar e o outro com resfriamento a água. No primeiro produto plano, construído com resfriamento a ar, estudou-se a microestrutura e a dureza da terceira camada, sem sofrer reaquecimento da deposição de outras camadas. Posteriormente, comparou-se a microestrutura e a dureza da terceira camada, após ser reaquecida pela deposição da quarta e quinta camadas. Repetiu-se o mesmo procedimento para o segundo produto plano, construído com resfriamento a água, e ao final comparou-se os resultados para os dois tipos de resfriamento.

2. OBJETIVO

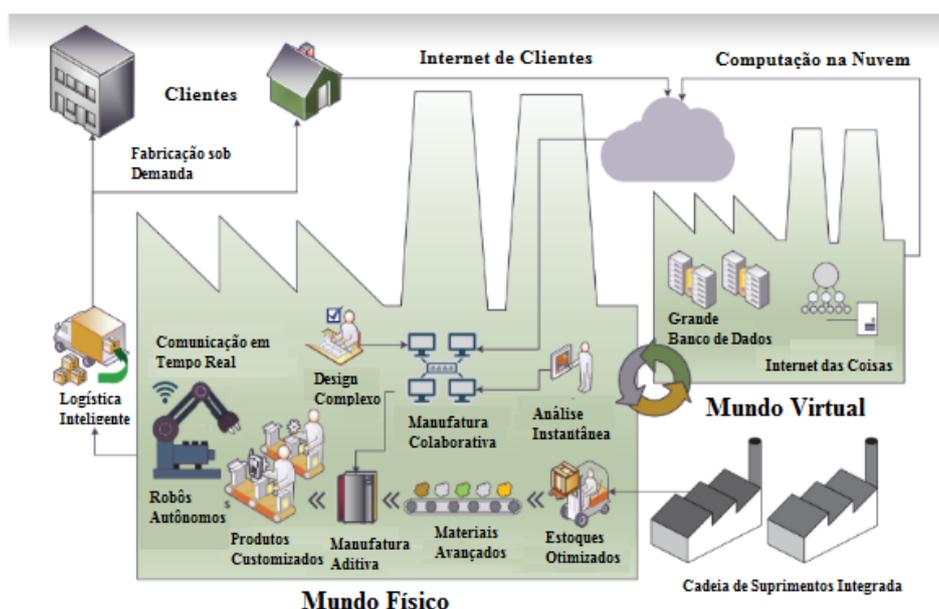
Realizar um estudo sobre a influência do reaquecimento de camadas, na microestrutura e na dureza, de produtos planos de aço de baixa liga e alta resistência fabricados pelo processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), comparando dois tipos de resfriamento: um a ar e outro a água.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Relação da Manufatura Aditiva com a Indústria 4.0

O termo indústria 4.0 foi introduzido pela primeira vez na Feira de Hannover, na Alemanha, em 2011. Era uma iniciativa para aumentar a competitividade da indústria alemã apoiada pelo Governo Federal Alemão que incluiu o projeto “Indústria 4.0” como parte integrante da “Estratégia de Alta Tecnologia para a Alemanha 2020” visando a liderança do país nas áreas de tecnologia e inovação (OZTEMEL; GURSEV, 2020). A indústria 4.0 refere-se à rede inteligente de máquinas e processos para a indústria com a ajuda da tecnologia da informação e comunicação. Parafusos que se comunicam com robôs de montagem, empilhadeiras autônomas que abastecem prateleiras com mercadorias, máquinas inteligentes coordenando processos de produção independentes – pessoas, máquinas e produtos diretamente conectados entre si (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0, 2021). Conforme ilustrado na Figura 1, a indústria 4.0 oferece sistemas cibernéticos e físicos cooperando de forma lucrativa, com o objetivo de construir fábricas inteligentes, redefinindo o papel dos seres humanos (DILBEROGLU et al., 2017).

Figura 1 - Esquema de uma fábrica inteligente.



Fonte: Adaptado de (DILBEROGLU et al., 2017).

As principais tecnologias aplicadas à uma indústria 4.0 são: (i) inteligência artificial (IA), que consiste em análise avançada de dados baseada em lógica, incluindo aprendizado de máquina, que interpreta eventos, analisa tendências e comportamentos de sistemas para apoiar a tomada de decisões; (ii) computação em nuvem, que é a distribuição de serviços de computação pela internet, como: servidores, armazenamento de dados, dentre outros, que evitam que as empresas façam altos investimentos em equipamentos e equipe de suporte; (iii) Grandes Bancos de Dados, *Big Data*, que são sistemas com maior capacidade de armazenamento e processamento de informações que utilizam técnicas estatísticas e de aprendizagem de máquina para extrair dados relevantes para os negócios; (iv) segurança cibernética, que são um conjunto de hardware e software voltados para a segurança e proteção dos ativos de informações; (v) Internet das Coisas (IoT), que consiste na interconexão de objetos que podem ser remotamente monitorados; (vi) robótica avançada, com robôs que agem de forma autônoma, interagindo com pessoas e com o ambiente; (vii) manufatura digital ou simulação, que é o uso de sistemas de computação para realizar simulações e análises de processos e produtos; (viii) manufatura aditiva, um tipo de processo de fabricação inovador que fabrica peças a partir de um desenho digital e uma impressora 3D; e por fim, (ix) a integração de sistemas, que é a união de sistemas de computação de diferentes áreas da empresa e também de fornecedores e clientes, atuando como um todo coordenado trocando informações em tempo real, possibilitando a tomada de decisões gerenciais mais rapidamente (RÜSSMANN M et al., 2015). A Figura 2 mostra as principais tecnologias aplicadas à indústria 4.0.

Figura 2 - Principais tecnologias da indústria 4.0.



Fonte: (LAÍS GRILLETTI, 2020)

Considerando que os ciclos de vida de produtos com alta tecnologia são cada vez menores e que é necessário que as indústrias tenham processos cada vez mais flexíveis às variações de demandas do mercado e que os produtos precisam ser cada vez mais customizados às necessidades dos clientes, estes fatores tornam alguns sistemas de fabricação tradicionais como por exemplo, a usinagem, um grande desafio para a implementação do conceito de fábrica inteligente, sendo necessário desenvolver novos métodos de manufatura. Isso torna a Manufatura Aditiva (MA) um dos componentes vitais da indústria 4.0 (DILBEROGLU et al., 2017), devido sua capacidade de otimizar o consumo de materiais, criando novas formas, customizando *designs* e encurtando tempos de produção (GODINA et al., 2020). Por proporcionar maior flexibilização da produção, a MA é decisiva para a eficiência do processo e redução de sua complexidade, permitindo a rápida prototipagem e processos altamente descentralizados (HORST; DUVOISIN; VIEIRA, 2018).

A manufatura aditiva cumpre diferentes requisitos da indústria 4.0, como a capacidade de customização, eficiência, rapidez de entrega e redução de resíduos, sendo vital para a implementação desta quarta revolução industrial. Com a implantação da MA na Indústria, a produção torna-se mais independente da fabricação de componentes individuais, também reduz o estoque e o custo de transporte (HALEEM; JAVAID, 2019). Contudo, a manufatura aditiva também possui algumas limitações, tais como: tamanho das peças, baixa padronização e baixa produtividade (SEPASGOZAR et al., 2020).

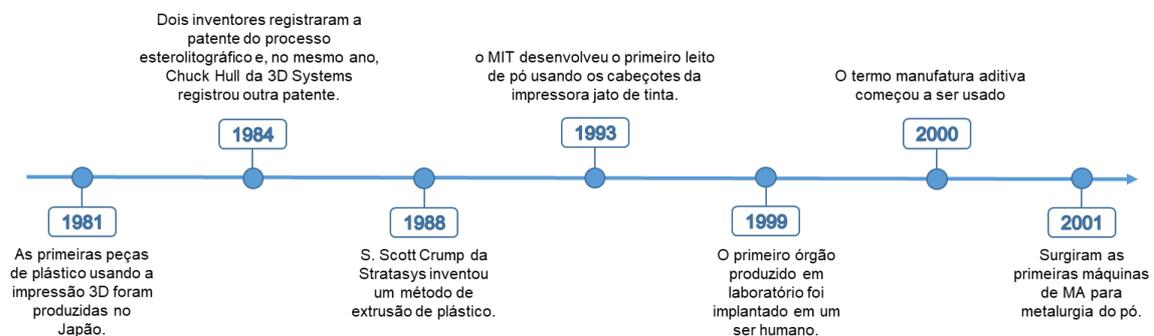
3.2. Manufatura Aditiva (MA)

A Manufatura Aditiva é a possibilidade de produção de peças a partir de uma impressora 3D (AIRES et al., 2019). É um processo de fabricação através da adição repetitiva de material na forma de camadas, primeiramente projetado em um modelo virtual (CAD) onde será realizado todo o dimensionamento do produto, em seguida inicia-se a produção através da adição da matéria prima para construção do produto (RODRIGUES et al., 2015).

A manufatura aditiva pode ser uma contrapartida aos processos tradicionais de remoção de material, que utilizam o torno ou fresa, pois possui a vantagem de obter formas mais complexas devido sua alta flexibilidade de modelagem (CERUTI et al., 2019). Mais que uma tendência, este tipo de manufatura já é uma realidade e um caminho sem volta para que se consiga atingir bons resultados de melhoria em produtos, além da obtenção de estruturas mais leves, eficientes e inovadoras (AIRES et al., 2019).

Em 1981, o japonês Hideo Kodama teve a ideia de fazer uma impressão tridimensional, com base numa tecnologia de polímero fotocurável. Contudo, sua ideia somente se tornou realidade 12 anos depois, quando um grupo do *Massachusetts Institute of Technology – MIT* desenvolveram o primeiro processo em leito de pó usando cabeçotes de um impressora de jato de tinta (OMNE, 2018). A Figura 3 mostra os acontecimentos históricos relacionados à MA.

Figura 3 - Acontecimentos históricos de MA.

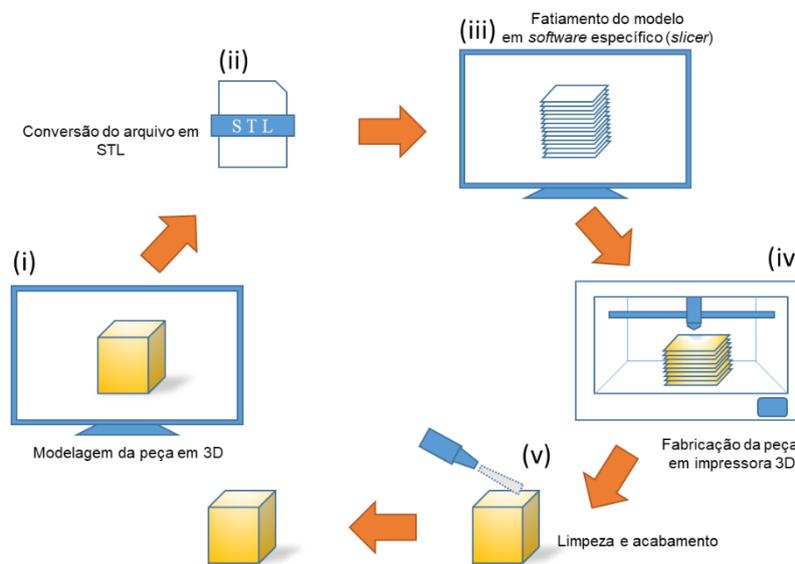


Fonte: Adaptado de (OMNE, 2018).

As técnicas de manufatura aditiva seguem basicamente o mesmo processo: (i) elaboração do modelo virtual da peça a ser produzido por *software* CAD; (ii) conversão do formato do modelo virtual para um formato reconhecido pelas impressoras, o STL (*Standard Tessellation Language* ou *Standard Triangulation Language*), onde o modelo da futura peça é fatiado, gerando informações para os traçados de cada camada; (iii) envio do arquivo STL para os softwares próprios das máquinas que vão manipular a quantidade de peças

à construir, configurar o tamanho correto e realizar a orientação de movimento e posicionamento; (iv) em seguida inicia-se a construção da peça, camada a camada, na impressora 3D; (v) e por fim é realizado o pós-processamento com o acabamento e limpeza da peça (KARAPATIS; VAN GRIETHUYSEN; GLARDON, 1998). A Figura 4 representa um esquema das etapas de fabricação de uma peça por manufatura aditiva.

Figura 4 - Etapas básicas do processo de MA.



Fonte: Autoria própria (2022)

A manufatura aditiva possui inúmeros benefícios, tais como: diminuição ou eliminação de restrições geométricas, e conseqüentemente possibilita a fabricação de componentes com alto grau de complexidade; customização de produtos que podem ser produzidos a partir de materiais nunca utilizados antes, como ligas de titânio, polímeros ou borracha (AIRES et al., 2019). Algumas das principais vantagens da manufatura aditiva é a maior capacidade em *design* e em desenvolvimento de produtos (LINDEMANN et al., 2012).

Outras vantagens da MA são a otimização de energia e matéria prima, o que resulta também em baixo desperdício de materiais; não há necessidade de mudanças de *setup* ou ferramentas; peças passam por um único equipamento, sendo o processo muito mais funcional; não usa cálculos complexos, esses não

são necessários, visto que, a criação do produto se baseia por camada onde utiliza-se de sistemas de planejamento de processos com a impressão gerada de forma automática e potencial para a diminuição no custo de produção de protótipos (VOLPATO, 2017).

As tecnologias de manufatura aditiva possuem algumas limitações, pois são lentas, ineficazes e o custo por peça ainda é muito alto para competir com os processos tradicionais. No entanto, a MA tem uma projeção muito ambiciosa para o futuro e muitos esforços são feitos em diferentes direções para tornar a manufatura aditiva viável econômica, social e ambientalmente (GODINA et al., 2020). Nesta revolução industrial, a MA é uma tecnologia crucial que se tornou o principal componente de inovação e desenvolvimento de produtos (HALEEM; JAVAID, 2019).

A manufatura aditiva possui diversos tipos de processos que podem ser aplicados a diferentes materiais (polímeros, metais, cerâmicos e compostos), diferentes técnicas de deposição e diferentes formas de junção, fusão ou solidificação.

A *American Society of Testing Materials – ASTM* e a *International Organisation for Standardization – ISO* se juntaram em 2015 e publicaram a norma ISO/ASTM 52900:2015 definindo 7 processos primários de manufatura aditiva:

(i) Foto polimerização em cuba, *vap photopolymerization* – também conhecido como estereolitografia, onde um líquido de polímero fotocurável é posto num recipiente (cuba), camada por camada, sendo curado pela exposição seletiva de luz;

(ii) Jato de material, *material jetting (MJ)* – um fotopolímero, como material de base e uma cera, como material secundário são depositados no local de construção da peça e posteriormente expostos a raios UV que realizam a cura dos materiais;

(iii) Jato de aglutinante, *binder jetting (BJ)* – líquido aglutinante fotocurável é jateado em cima do material em forma de pó, sendo curado através da exposição de raios UV;

(iv) Fusão em leito de pó, *powder bed fusion (PBF)* – partículas do material são fundidas através de laser ou feixe de elétrons, camada a camada, que após resfriada forma a peça;

(v) Extrusão de material, *material extrusion* – também conhecida como modelagem por deposição fundida (FDM), consiste na deposição de material sob forma de filamento através de um injetor que derrete o material sendo posteriormente solidificado formando a peça;

(vi) Deposição direta de energia, *direct energy deposition (DED)* – o material em forma de arame ou pó é fundido por energia térmica concentrada, similar aos processos de soldagem convencionais, sendo depositado camada por camada até formar a peça; e

(vii) Laminação em folha, *sheet lamination* – o material é depositado em forma de chapas sobrepostas as quais são cortadas e coladas formando a peça (ADDISPACE, 2016). A Figura 5 mostra os processos primários com as principais tecnologias relacionadas a estes processos e os principais materiais utilizados.

Figura 5 - Os 7 processos primários de MA.

	FOTOPOLIMERIZAÇÃO	JATO DE MATERIAL	JATO DE AGLUTINANTE	FUSÃO EM LEITO DE PÓ (PBF)	EXTRUSÃO DE MATERIAL	DEPOSIÇÃO DIRETA DE ENERGIA (DED)	LAMINAÇÃO EM FOLHA
PROCESSOS PRIMÁRIOS							
TECNOLOGIAS	SLA™ DLP™ 3SP™ CLIP™	Polyjet™ SCP™ MJM™ Project™	3DP™ ExOne Voxeljet	SLS™ DMLS™ SLM™ EBM™ SHS™ MJM™	FFF™ FDM™	LMD™ LENS™ DMD™ DLD™ CLAD™ DPM™ WAAM™ PTA	LOM™ SDL™ UAM™
MATERIAIS	Resina curável por fotopolimerização	Fotopolímeros, polímeros e ceras.	Plásticos em pó, metal, cerâmicos, vidro e areia.	Plásticos, areia, pó metálico ou pó cerâmico.	Filamentos termoplásticos, (FFF), líquidos e pastas.	Metal em arame ou pó.	Papel, folhas de plástico e folhas metálicas.

Fonte: Adaptado de (HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES, 2020).

Uma tecnologia que vem crescendo e mostrando seu potencial ao longo do tempo, a MA vem se destacando em diversas áreas como indústria automobilística e aeroespacial, saúde (médica e odontológica), bens de consumo e também de alimentos (CIMATECJR, 2020).

Na indústria automobilística, exceto o motor, já é possível produzir um carro inteiro através de MA. Em 2014, na *International Manufacturing Technology Show (IMTS)*, a montadora americana *Local Motors* apresentou o *Strati* (Figura 6), considerado o primeiro carro funcional impresso em 3D (O GLOBO, 2014).

Figura 6 - *Strati* da *Local Motors*, 2014.



Fonte: (O GLOBO, 2014)

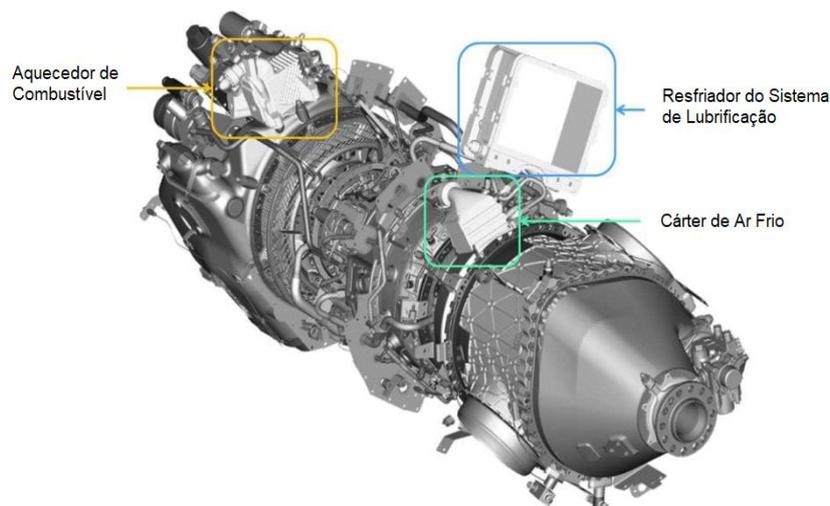
No setor aeroespacial, a MA permite a fabricação de peças complexas com propriedades aerodinâmicas definidas, com estruturas leves chegando a pesar 60% menos, o que contribui na redução do consumo de combustível e consequentemente, redução na emissão de CO₂ (AMS BRASIL, 2021). A empresa *GE Aviation* utilizou a tecnologia aditiva para reduzir de 855 componentes convencionais para apenas 12 (sendo 3 com alta tecnologia e recursos térmicos), em seu motor aeroespacial, *Advanced Turboprop* (Figura 7), fabricado para a empresa de aviação *Textron* (THE GE AVIATION BLOG, 2017).

Na área de saúde, a MA permite a impressão de aparelhos auditivos, próteses ortopédicas e dentárias (CIMATECJR, 2020). A expectativa para o futuro é a possibilidade de impressão de tecidos humanos contribuindo na

produção de órgãos para a realização de transplantes (TOTVS, 2020). O Hospital Beneficência Portuguesa, em São Paulo, criou um laboratório clínico de impressão 3D para desenvolver órgãos humanos em resina que servirão para aprimorar cirurgias complexas, como as cranianas e de coração (GUIMARÃES, 2022).

Em 2019, cientistas da Universidade de *Tel Aviv*, em Jerusalém apresentaram uma miniatura de 3 cm de um coração feito a partir de tecidos humanos numa impressora 3D. É a primeira vez que alguém conseguiu projetar e imprimir um coração inteiro com vasos sanguíneos, ventrículos e câmaras (WELLE, 2019).

Figura 7 - *Motor Advanced Turboprop da GE Aviation.*



Fonte: (WELLE, 2019)

Um dos setores em que a tecnologia aditiva tem se tornado cada vez mais promissora é o setor de alimentos. A impressão 3D de alimentos tem relação direta com as viagens espaciais. Em 2013, a *National Aeronautics and Space Administration* – NASA assinou um contrato de Pesquisa de Inovação em Pequenas Empresas (*Small Business Innovation Research* – SBIR) com a *Systems and Materials Research Corporation* - SMRC. A proposta era a construção de alimentos do zero com uma impressora 3D que pudesse fornecer

amido, proteína e gordura, criando estruturas comestíveis que seriam posteriormente complementadas com sabor e aroma fornecidos por tecnologia de jato de tinta. Em 2016, o engenheiro sênior do projeto Anjan Contractor fundou sua própria empresa, chamada *BeeHex*. Ele começou a trabalhar em uma impressora 3D que podia montar pizzas personalizadas (Figura 8), com massa tradicional, molho, queijo e cobertura (TECHNOLOGY, 2019).

Figura 8 - Pizza da *BeeHex* impressa em 3D.



Fonte: (TECHNOLOGY, 2019)

Outra novidade foi apresentada recentemente, ainda no setor de alimentos. A *startup* israelense *SavorEat* lançou novos produtos que incluem *hambúrgueres* de carne de porco e peru veganos (Figura 9) fabricados à base de impressoras 3D. A empresa já produz *hambúrgueres* veganos de carne bovina e seu principal foco é atender o mercado norte americano (BEN - DAVID, 2022).

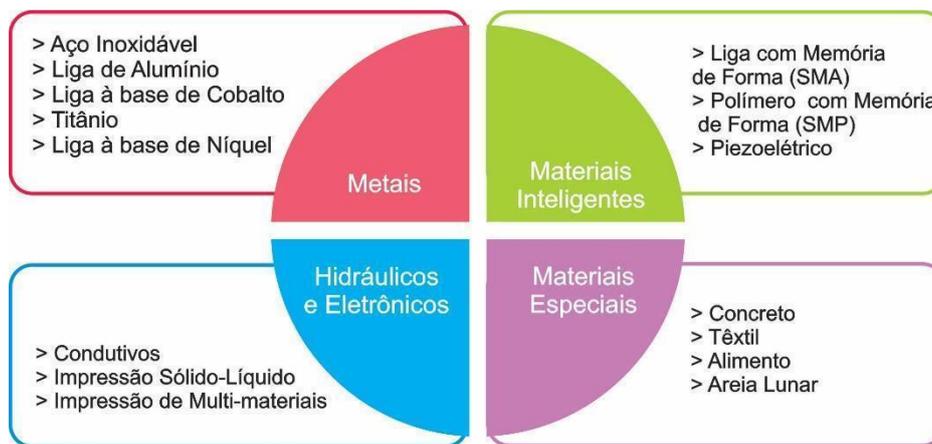
Figura 9 - Hambúrgueres veganos impressos em 3D.



Fonte: (BEN-DAVID, 2022)

A ciência dos materiais é fundamental para a compreensão do desenvolvimento das tecnologias de MA. Embora muitos polímeros estejam disponíveis para a MA, alguns materiais específicos atraem o interesse da indústria (DILBEROGLU et al., 2017). A Figura 10 apresenta os principais materiais aplicados na manufatura aditiva.

Figura 10 - Principais materiais utilizados nos processos de MA.



Fonte: Adaptado de (DILBEROGLU et al., 2017).

Os materiais metálicos são os mais comuns em engenharia, devido suas características mecânicas favoráveis como: dureza, tenacidade, resistência à tração, elasticidade dentre outras. Como consequência, a indústria busca na MA novas soluções para produzir peças metálicas em complementação ou

substituição aos processos subtrativos convencionais. Muitos componentes metálicos podem ser fabricados por processos de MA usando ligas de alumínio, ligas de titânio, aço inoxidável e outros tipos de materiais metálicos como principal constituinte do processo (HERZOG et al., 2016).

Os principais processos de MA aplicados aos materiais metálicos são: i) fusão em leito de pó, *powder bed fusion (PBF)*, ii) deposição direta de energia, *direct energy deposition (DED)*, iii) jato de aglutinante, *binder jetting (BJ)* e iv) laminação em folha, *sheet lamination* (LI; SU; ZHU, 2022). Destes, o processo de deposição direta de energia (DED) é considerado o mais vantajoso para a fabricação de grandes peças, devido à sua alta taxa de deposição (LEE et al., 2018).

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) é um processo do tipo DED que envolve a fusão de um arame usando um arco elétrico como fonte de calor. Comparado aos métodos à base de pó, causa menos defeitos de porosidade, permitindo a realização de produtos com melhor qualidade (BISWAL et al., 2019). Além disso, a maioria dos equipamentos de fonte de calor utilizados em MADA são mais baratos em comparação aos equipamentos de laser ou feixe de elétrons, pois utilizam uma máquina de solda convencional (ZIĘTALA et al., 2016).

3.3. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)

O processo de MADA (ou *wire arc additive manufacturing – WAAM*) é uma abordagem que utiliza técnicas convencionais de soldagem a arco elétrico (MIG/MAG ou TIG) para a deposição, em camadas, de materiais metálicos com uso de diferentes diâmetros de arames (SILVA, 2020).

A soldagem pode ser automatizada com o uso de sistemas robóticos, Figura 11(a), ou pórticos controlados por computador. A Figura 11(b) mostra uma máquina controlada por computador equipada com um sistema de soldagem do tipo MIG (WILLIAMS et al., 2016).

Figura 11 - Sistemas automáticos de MADA.



Fonte: (WILLIAMS et al., 2016)

Para peças de baixa a média complexidade, a MADA tem se tornando 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 e equipamentos e boa integridade estrutural (WILLIAMS et al., 2016).

Uma das principais desvantagens da MADA é a baixa precisão dimensional das peças, contudo uma possível solução para este problema é a combinação do processo de manufatura aditiva (MA) com os processos tradicionais subtrativos, melhorando a precisão e a qualidade das peças (LEE et al., 2018). A Figura 12 mostra uma peça que passou pelo processo de MADA e posterior usinagem.

Figura 12 - Processo híbrido de MADA com usinagem.



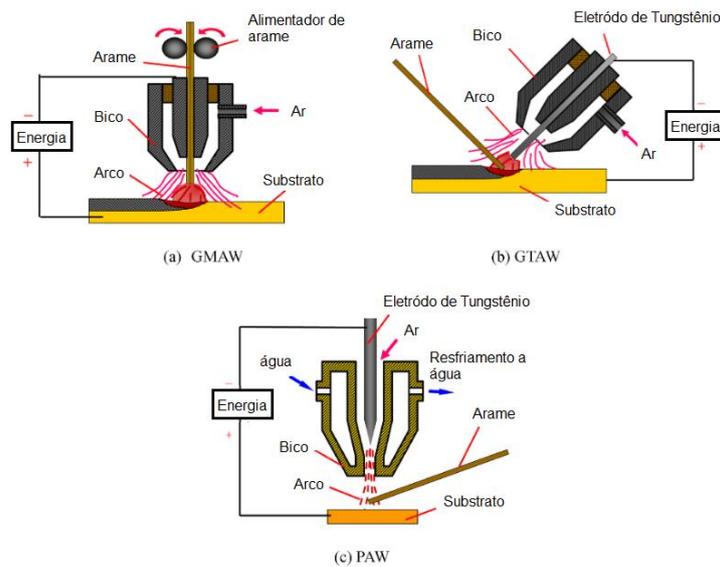
Fonte: (FRONIUS, 2019).

Os processos de MADA são classificados em função do tipo de processo de soldagem utilizado, podendo ser: soldagem a arco elétrico MIG/MAG (*gas metal arc welding* – GMAW), soldagem a arco TIG (*gas tungstein arc melting* – GTAW) e soldagem a arco de plasma (*plasm arc welding* – PAW). A Figura 13 mostra o esquema dos três principais tipos de soldagem a arco (LEE et al., 2018).

Cada processo de soldagem possui características específicas. A taxa de deposição do processo GMAW é 2 a 3 vezes maior do que o GTAW ou PAW. 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., 2018b). A Figura 14 especifica as características de cada processo de soldagem aplicados à 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 o deposição (WU et al., 2018a).

Figura 13 - Tipos de soldagem a arco elétrico.



Fonte: (LEE et al., 2018).

Figura 14 - Características dos processos de MADA.

MADA	Processos de Soldagem	Características
Baseado em GTAW	GTAW	<ul style="list-style-type: none"> > Eletrodo não consumível; > Processo de alimentação de arame separado; > Taxa de deposição típica: 1-2 kg / hora; > A movimentação do arame e da tocha é necessária;
Baseado em GMAW	GMAW	<ul style="list-style-type: none"> > Eletrodo de fio consumível; > Taxa de deposição típica 3-4 kg / hora; > Baixa estabilidade do arco, respingos;
	<i>Cold Metal Transfer (CMT®)</i>	<ul style="list-style-type: none"> > Eletrodo de fio consumível alternativo; > Taxa de deposição típica: 2-3 kg / hora; > Processo de baixa entrada de calor com zero respingos, alta tolerância de processo;
	<i>Tandem GMAW</i>	<ul style="list-style-type: none"> > Eletrodos na forma de arame maciço contínuo duplos; > Taxa de deposição típica: 6-8 kg / hora; > Fácil mistura para controlar a composição para fabricação de materiais intermetálicos;
Baseado em PAW	Plasma	<ul style="list-style-type: none"> > Eletrodo não consumível; > Processo de alimentação de arame separado; > Taxa de deposição típica 2-4 kg / hora; > A movimentação do arame e da tocha é necessária;

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

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).

A porosidade é outro defeito muito comum em processos de MADA e deve ser minimizado devido ao seu impacto nas propriedades mecânicas da peça (EDWARDS; O'CONNER; RAMULU, 2013). No geral, este tipo de defeito é ocasionado por matéria prima (BUSACHI et al., 2015) ou processo (SAMES et al., 2014). 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. Portanto, a limpeza da matéria prima é crítica principalmente para as ligas de alumínio, que apresentam como característica a alta porosidade no metal depositado (WU et al., 2018b).

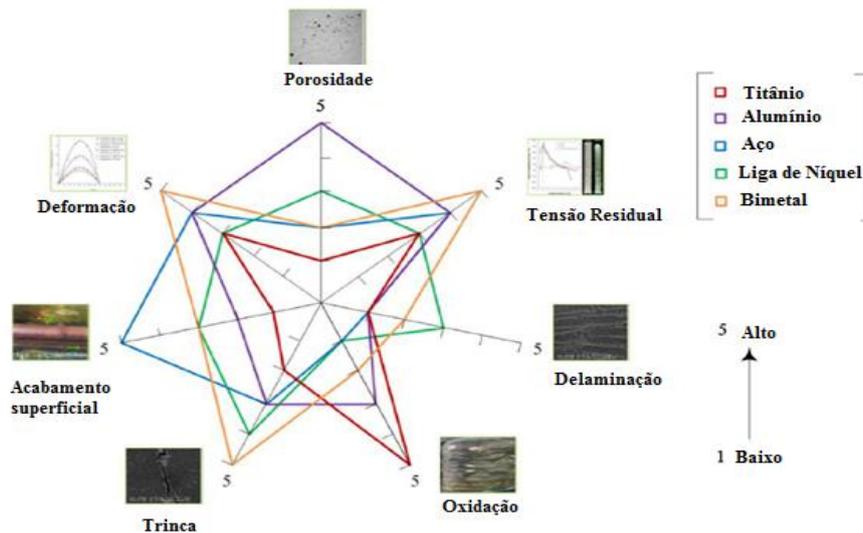
As trincas e as delaminações não tem relação apenas com a temperatura, mas também com as características do material utilizado. As trincas dependem principalmente da natureza de solidificação do material e é geralmente causada pela obstrução do fluxo de grãos solidificados ou alta tensão na poça de fusão (M. ADINARAYANAPPA; SIMHAMBHATLA, 2017). Já a delaminação ocorre devido à fusão incompleta ou insuficiente da solidificação adjacente entre camadas (WU et al., 2018b). A Figura 15 correlaciona os principais defeitos com os materiais utilizados no processo de MADA.

O excesso de calor não ocasiona apenas irregularidades geométricas (MARTINA et al., 2012), 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 tem sido estudadas para mitigar o acúmulo de calor.

Em 2005, a empresa austríaca *Fronius* desenvolveu um formato de onda de corrente elétrica para processos de soldagem GMAW chamado *cold metal transfer* – CMT[®], que consiste em um processo de transferência de material devido ao curto-circuito de baixa corrente (JÜRGEN BRUCKNER, 2005). Ao tocar a poça de solda, o arame é retraído ocasionando o desprendimento da gota de material fundido na ponta do arame. Esta tecnologia gera significativa redução

de energia e conseqüentemente baixo aporte de calor e menos respingo (WILDEN,J. et al., 2006).

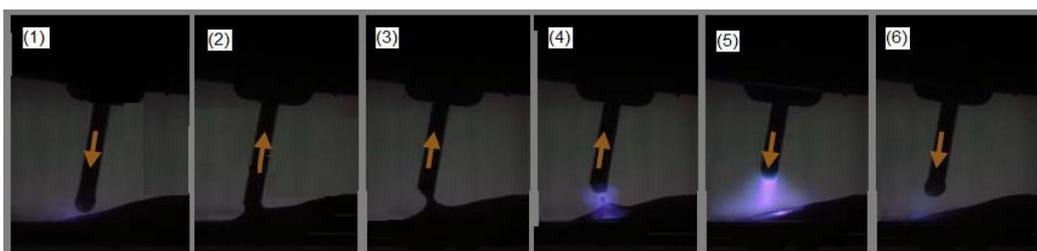
Figura 15 - Defeito vs material utilizados em MADA.



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

A Figura 16 representa as fases do formato de onda CMT[®] conforme segue: (1) o arame é movido até a poça de solda; (2) quando o arame penetra a poça de solda, o arco é extinguido e o arame é retraído devido um sinal enviado ao controlador digital; (3) e (4) a retração do arame faz com que a gota de material fundido se desprenda durante um curto-circuito a baixa corrente; (5) e (6) a corrente é elevada, aumentando a energia do arco elétrico, então o ciclo reinicia.

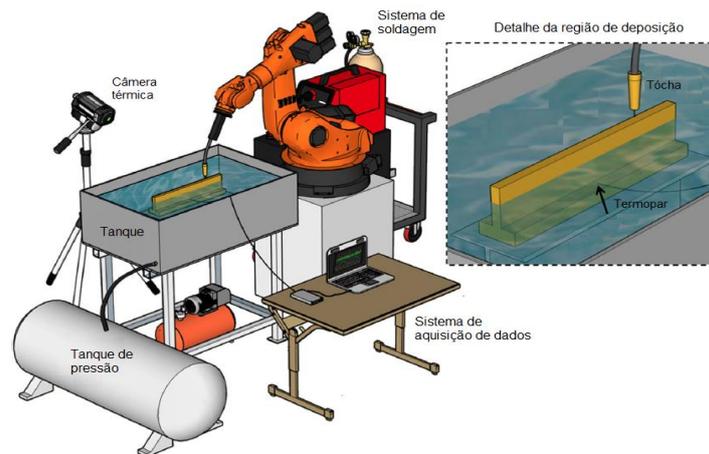
Figura 16 - Fases do processo CMT.



Fonte: (JÜRGEN BRUCKNER, 2005).

A técnica de resfriamento ativo próximo a imersão (ou *near-immersion active cooling* – NIAC) é a regulação do fluxo de água envolvendo o produto para evitar o acúmulo de calor. A deposição do material é realizada dentro de um tanque onde o nível de líquido (geralmente água), é aumentado conforme a pré-forma aumenta. O principal parâmetro controlado é a distância entre a lâmina de líquido de resfriamento e o nível de material depositado. Os resultados mostraram uma redução significativa na temperatura da pré-forma durante a deposição e a temperatura entre camada mantém baixa e praticamente inalterada. Isso melhora a produtividade e impacta positivamente na geometria e qualidade mecânica da peça (DA SILVA et al., 2020). A Figura 17 ilustra o processo de deposição de material com resfriamento ativo através da técnica NIAC.

Figura 17 - Resfriamento ativo próximo a imersão (NIAC).



Fonte: Adaptado de (DA SILVA et al., 2020).

Shi *et al.*, (2018) estudaram uma técnica de resfriamento ativo em MADA com processo de soldagem do tipo GMAW com dois arames de alimentação (TG-WAAM). O resfriamento consistia no uso de microventiladores e dissipadores de calor nas laterais do substrato com a maior superfície posicionada de forma lateral. Os pesquisadores utilizaram borrachas térmicas para melhorar a eficiência da dissipação. A Figura 18 detalha o posicionamento do sistema de resfriamento. Os resultados mostraram que o resfriamento adicional próximo a poça de fusão compensa a entrada excessiva de calor, o

que permite não apenas aumentar a velocidade máxima de alimentação do arame entre 9% a 15%, mas também reduzir o tempo de permanência entre as camadas em 42% a 54%, mantendo a qualidade desejada (SHI et al., 2019).

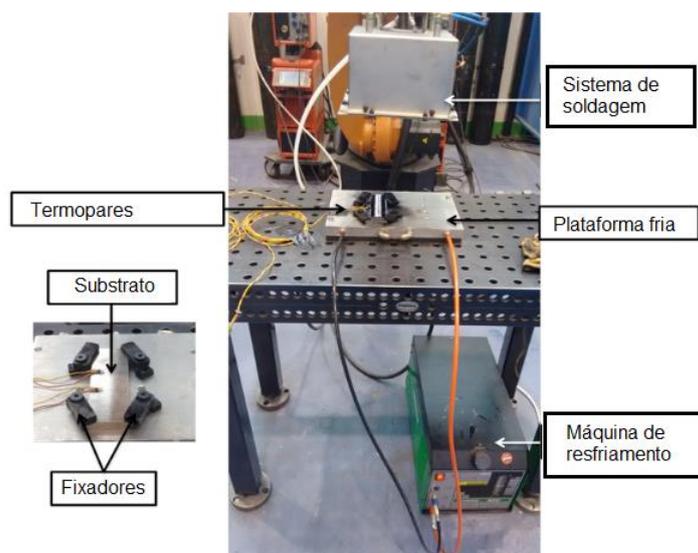
Figura 18 - Sistema de resfriamento ativo por microventiladores.



Fonte: Adaptado de (SHI et al., 2019).

Vázquez *et al.*, (2020) estudaram a influência das condições de resfriamento entre camadas na microestrutura e nas propriedades mecânicas de uma pré-forma de liga de titânio (Ti-6Al-4V) construída por MADA. Eles criaram um sistema de resfriamento forçado usando uma plataforma refrigerada a água sob o substrato. A Figura 19 detalha o sistema de resfriamento utilizado com base em água gelada. Os resultados demonstraram que o controle da temperatura entre camadas e as condições gerais de resfriamento entre camadas permitem a obtenção de uma altura de camada constante, a construção com paredes mais finas e nenhuma oxidação. O resfriamento forçado se mostrou eficaz para a obtenção de propriedades mecânicas apropriadas para a liga Ti-6Al-4V (VÁZQUEZ et al., 2020).

Figura 19 - Resfriamento por água gelada.



Fonte: Adaptado de (VÁZQUEZ et al., 2020).

Observa-se que várias pesquisas têm sido feitas para mitigar o acúmulo de calor gerado durante o processo de MADA. Neste sentido, este trabalho estuda a influência do reaquecimento de camadas, na microestrutura e na dureza, de produtos planos de aço de baixa liga e alta resistência fabricados pelo processo de MADA considerando dois tipos de resfriamento, um a ar e outro com água na base do substrato.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho utilizou-se um aço do tipo ASTM A36 como substrato, medindo 210 mm de comprimento, 150 mm de largura e 6,35 mm de espessura. O metal de adição utilizado no experimento foi o arame maciço ER110S-1, com diâmetro de 1,20 mm. A Tabela 1 contém a composição química dos materiais utilizados e a Tabela 2 mostra suas propriedades mecânicas.

Tabela 1 - Composição química (% em peso) dos materiais utilizados.

Material	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Zr	Al	Cu
ASTM A36	0,29	1,20	0,40	0,04	0,05	-	-	-	-	-	-	-	0,20
ER110S-1	0,03	1,61	0,36	0,01	0,01	2,46	0,28	0,31	0,01	0,01	0,01	0,01	0,50

Fonte: ASTM A36 – Norma ASTM A36 e ER110S-1 - Certificado de qualidade do fabricante.

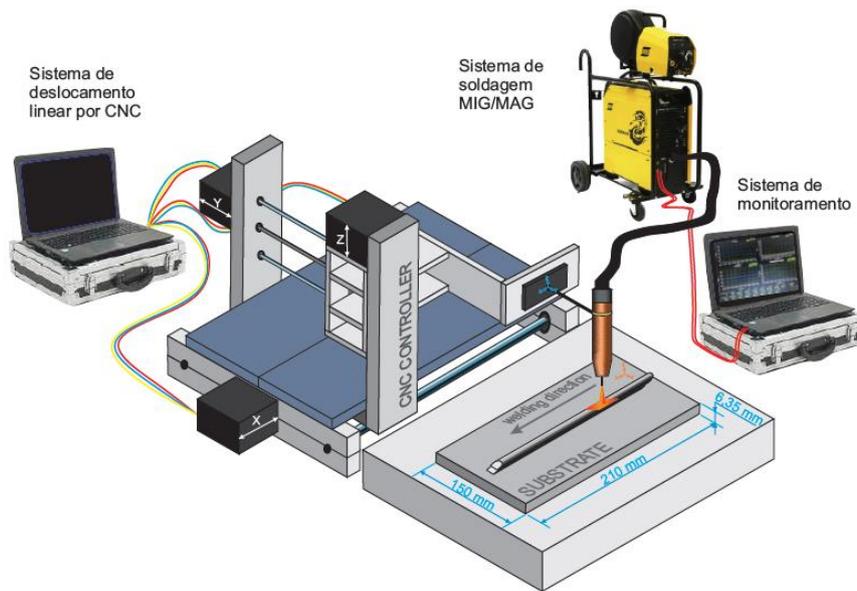
Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.

Propriedades Mecânicas	ASTM A36	ER110S 1
Resistência à Tração Mín. [MPa]	400	760
Limite de Escoamento Mín. [MPa]	250	660
Alongamento Mín. (% em 50 mm)	23	15

Fonte: ASTM A36 – Norma ASTM A36 e ER110S-1 - Certificado de qualidade do fabricante.

A deposição das camadas foi realizada através de um equipamento de soldagem convencional MIG/MAG (Figura 20), com pistola de soldagem fixa em um sistema de deslocamento linear nos eixos X, Y e Z com movimentos controlados por CNC, com precisão de deslocamento de 0,02 mm (Figura 20). Os parâmetros de soldagem (tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame) foram monitorados por um sistema de monitoramento específico com taxa de aquisição de 5 kHz (Figura 20).

Figura 20 – Sistemas utilizados no processo.



Fonte: Autoria própria (2022)

A energia de soldagem do sistema MIG/MAG foi calculada através da Equação 1, onde, nesse caso, não foi utilizado o fator de eficiência do processo, por não ter um valor fixo estabelecido, devendo ser calculado para cada caso específico, sendo necessário mensurar a quantidade de energia obtida que é de difícil medição.

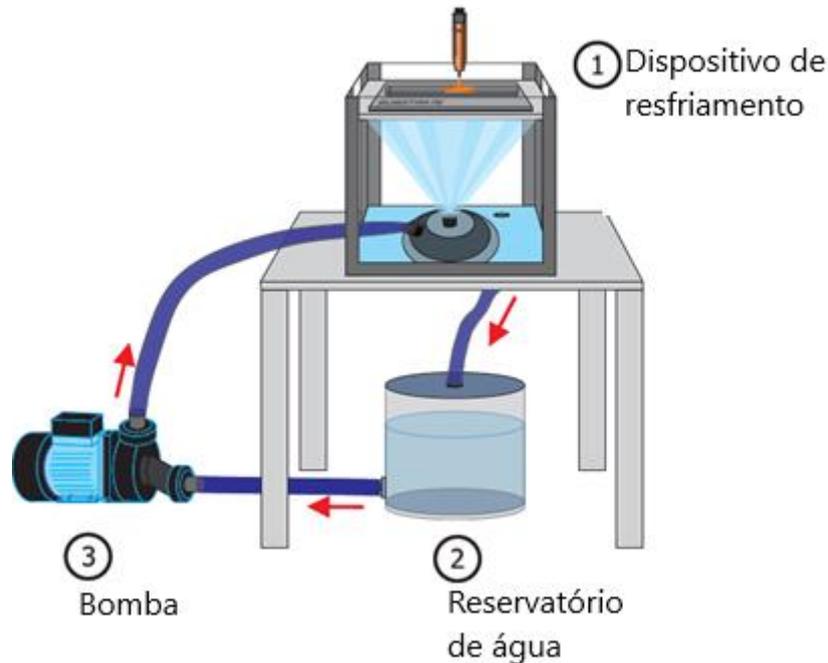
$$Energia\ de\ Soldagem = \frac{Tensão * Corrente}{Velocidade\ de\ Soldagem} \quad (1)$$

O sistema de resfriamento utilizado visa retirar calor do material depositado através de um fluxo constante de água na face oposta do substrato onde as camadas serão depositadas. Ele consiste em um dispositivo de resfriamento composto de uma caixa metálica, responsável pelo apoio do substrato e um mecanismo de jateamento de água, do tipo utilizado em jardins. O sistema também contém um reservatório utilizado para a recirculação de água e por fim uma bomba de água FAMAC™ monoestágio XKm, responsável pela circulação da água, obtendo um resfriamento contínuo.

O substrato onde será depositado o material para a construção do produto plano foi fixado na parte superior do dispositivo de resfriamento, sendo

devidamente vedado, evitando o contato da área de soldagem com a água do sistema de resfriamento. A Figura 21 esquematiza os componentes do sistema de resfriamento.

Figura 21 - Sistema de resfriamento a água.



Fonte: Adaptado de (VASCONCELOS; CASANOVA, 2019).

O experimento foi realizado com a construção de dois produtos planos com cinco camadas depositadas. O primeiro produto plano foi construído através de MADA com resfriamento a ar e o segundo com MADA e resfriamento a água. Foram produzidas um total de seis amostras, sendo A1, A2 e A3 com resfriamento a ar, e as amostras A4, A5 e A6 com resfriamento a água. As duas primeiras camadas depositadas não foram consideradas no experimento com o objetivo de eliminar a influência da composição química do substrato nas camadas analisadas.

Nas amostras A1 e A4 foram analisadas a microestrutura e a dureza da terceira camada (3.3), sem efeitos de ciclos térmicos de outras camadas. Nas amostras A2 e A5 foram analisadas a microestrutura e a dureza da terceira camada (3.4), após ser reaquecida pelos ciclos térmicos da deposição da quarta camada (4.4) e nas amostras A3 e A6 foram analisadas a microestrutura e a

dureza da terceira camada (3.5), após ser reaquecida pelos ciclos térmicos da deposição da quinta camada (5.5).

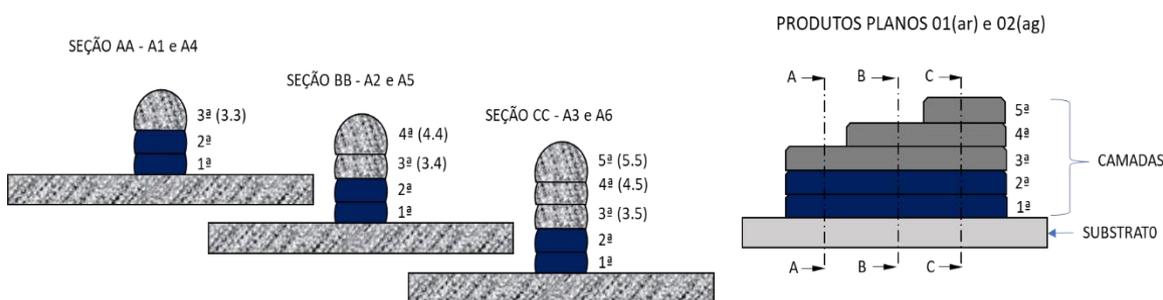
Os parâmetros de processo estão estabelecidos na Tabela 3 e a Figura 22 identifica os locais onde foram coletadas as amostras através das seções AA, BB e CC, tanto para o resfriamento a ar quanto para o resfriamento a água.

Tabela 3 - Parâmetros de processo.

Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Distância do bico a peça (mm)	Gás de Proteção
17,50	200	5	10	100% Argônio

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 22 - Identificação do local de coleta das amostras analisadas.



Fonte: Autoria própria (2022)

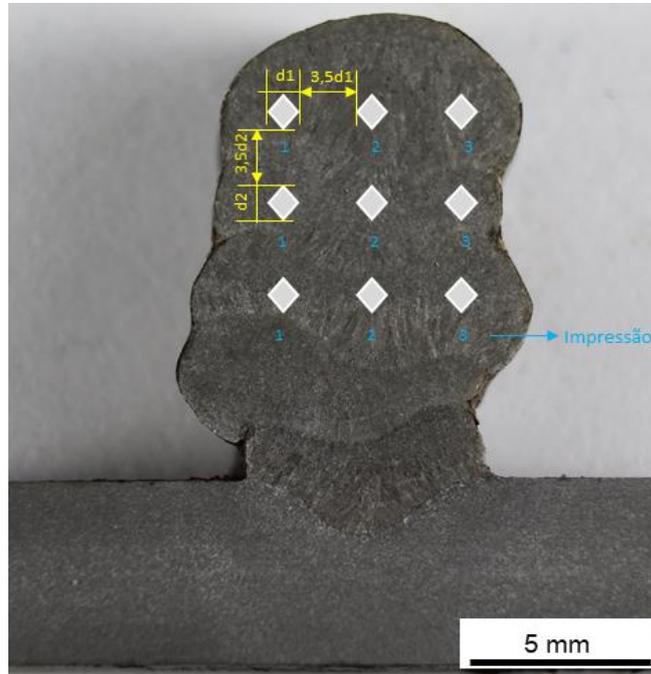
A Macrografia foi realizada com o reagente Nital com concentração de 15% e a caracterização microestrutural foi realizada por meio de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com reagente Nital com concentração de 2%.

A verificação dos impactos na propriedade mecânica das camadas depositadas foi realizada através de ensaios de microdureza Vickers, utilizando um microdurômetro com penetrador piramidal e força de 0,5 kgf.

Foram executadas três impressões de microdureza Vickers em cada camada de cada amostra, conforme estabelecido na Figura 23. Em seguida foi calculada a média das impressões por camada, e para verificar se as médias de microdureza possuíam diferença significativa foi feita uma análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Tukey para identificar qual ou quais as médias se

diferenciavam das demais. O espaçamento entre impressões foi de três vezes e meia do comprimento da diagonal de impressão ($3,5 d_1$ e $3,5 d_2$).

Figura 23 - Posicionamento das impressões de microdureza Vickers.



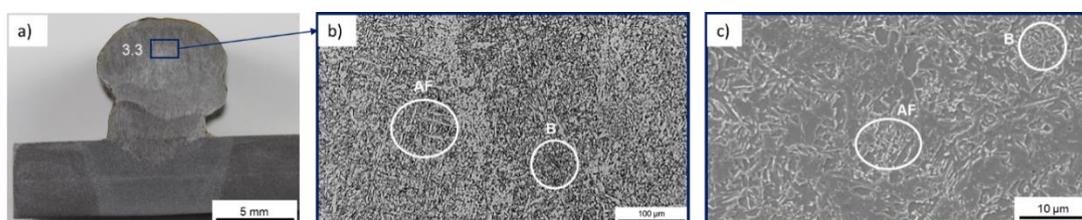
Fonte: Autoria própria (2022)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização Microestrutural das Camadas Resfriadas a Ar

Nota-se na amostra A1, com três camadas (Figura 24), que a deposição da terceira camada pelo processo de MADA gerou uma microestrutura composta por ferrita acicular (AF) e de bainita (B). A deposição dessa camada contou com uma energia de soldagem de 1.091,8 J/mm (Tabela 6).

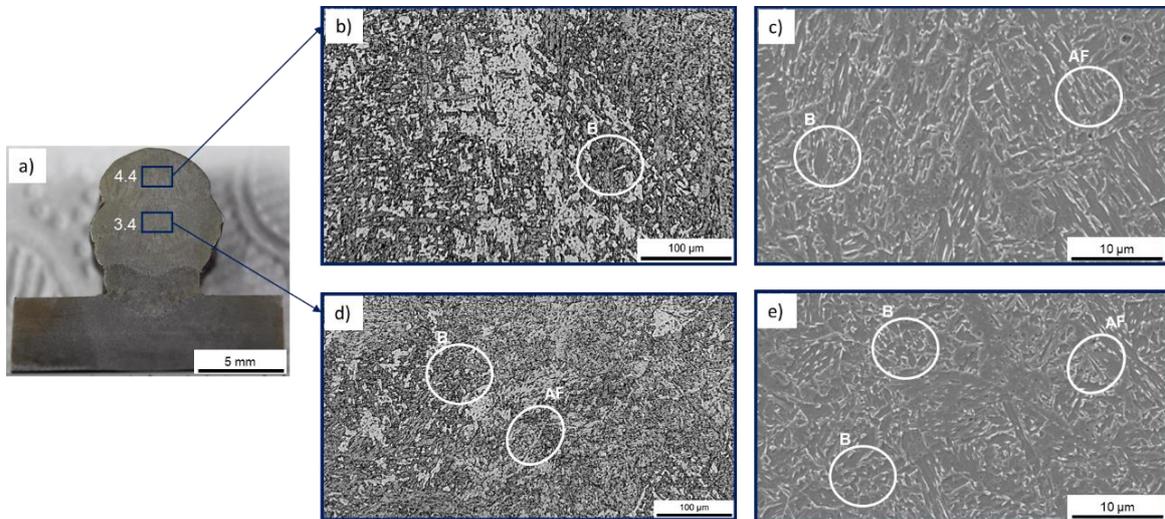
Figura 24 - Amostra A1, com três camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da terceira camada (3.3) e (c) micrografia eletrônica da terceira camada (3.3).



Fonte: Autoria própria (2022)

Na amostra A2, com quatro camadas depositadas (Figura 25), observa-se que tanto a terceira quanto a quarta camada apresentam uma maior fração volumétrica de placas de bainita (B), quando comparado com a amostra A1, mas ainda apresentam a ferrita acicular (AF). A terceira camada (3.4) apresenta placas de bainita menores quando comparadas com a quarta camada (4.4). Foi utilizado 992,8 J/mm (Tabela 6) de energia para depositar a quarta camada, essa energia gerou ciclos térmicos (de aquecimento e resfriamento) sobre a terceira camada que ocasionaram as modificações microestruturais identificadas.

Figura 25 - Amostra A2, com quatro camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da quarta camada (4.4); (c) micrografia eletrônica da quarta camada (4.4); (d) micrografia óptica da terceira camada (3.4) e (e) micrografia eletrônica da terceira camada (3.4).

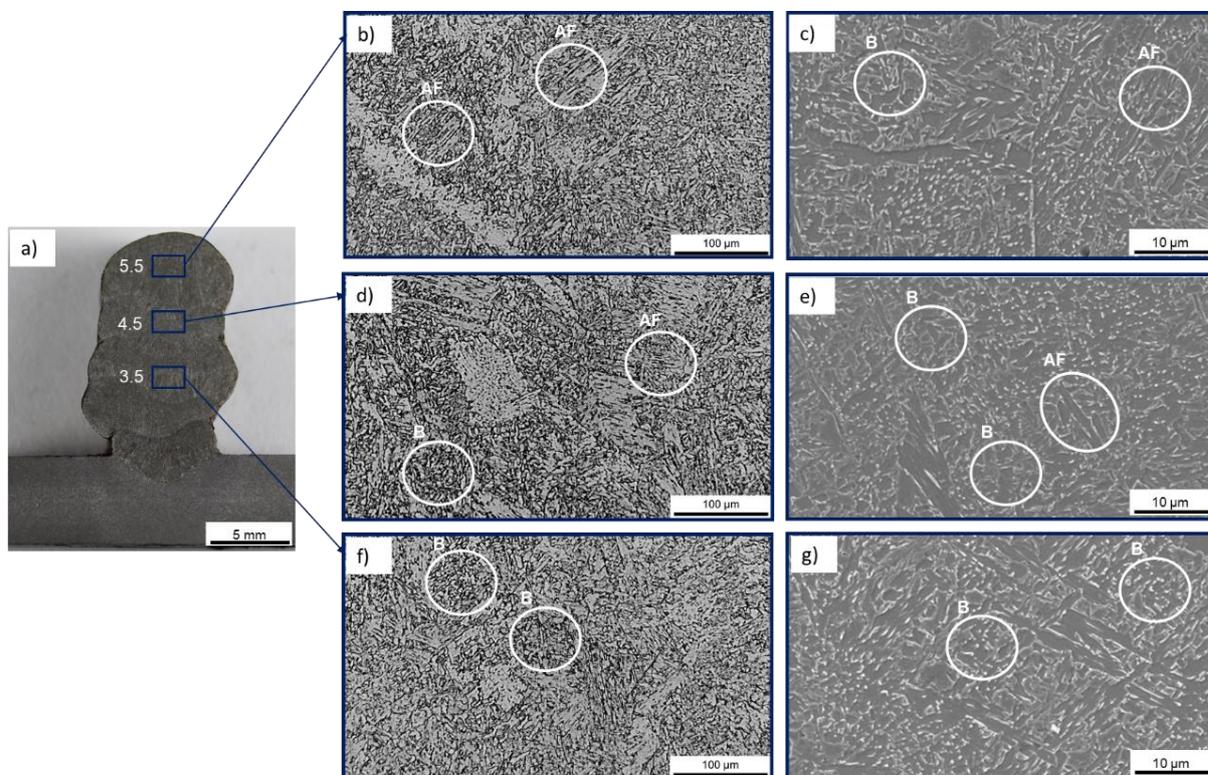


Fonte: Autoria própria (2022)

Na amostra A3, com cinco camadas (Figura 26), nota-se que a microestrutura das camadas depositadas é composta por ferrita acicular (AF) e bainita (B). A terceira camada (3.5) apresenta uma menor fração volumétrica de ferrita acicular (AF) quando comparada com a quarta camada (4.5) e a quinta camada (5.5) da amostra A3. A terceira camada (3.5) da amostra A3 também apresenta uma menor fração volumétrica de ferrita acicular quando comparada com a terceira camada (3.3) da amostra A1. Assim, os ciclos térmicos utilizados na deposição das camadas apresentam uma tendência de reduzir a fração volumétrica de ferrita acicular e conseqüentemente, aumentar a fração volumétrica de bainita. A deposição dessa camada contou com uma energia de soldagem de 1.207,4 J/mm (Tabela 6).

A quarta camada (4.5) apresenta uma menor fração volumétrica de ferrita acicular quando comparada com a quinta camada (5.5) da amostra A3. Ao compara-se com a quarta camada (4.4) da amostra A2, nota-se que ambas apresentam bainita com maior fração volumétrica. Observa-se que todas as amostras A1, A2 e A3 apresentam tanto ferrita acicular quanto bainita.

Figura 26 - Amostra A3 com cinco camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da quinta camada (5.5); (c) micrografia eletrônica da quinta camada (5.5); (d) micrografia óptica da quarta camada (4.5); (e) micrografia eletrônica da quarta camada (4.5); (f) micrografia óptica da terceira camada (3.5) e (g) micrografia eletrônica da terceira camada (3.5).



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 4 - Médias dos parâmetros de soldagem das camadas resfriadas a ar.

Camada	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Velocidade de alimentação do arame (mm/s)	Energia de soldagem (J/mm)
3°	200,8	17,4	3,2	19,5	1.091,8
4°	188,3	17,4	3,3	52,5	992,8
5°	194,3	17,4	2,8	17,1	1.207,4

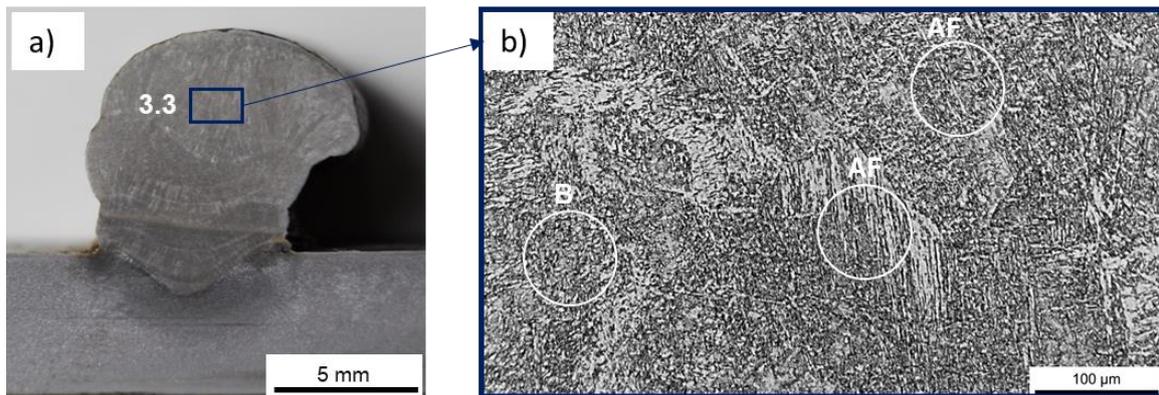
Fonte: Autoria própria (2022)

5.2. Caracterização Microestrutural das Camadas Resfriadas a Água

Na amostra A4, com três camadas (Figura 27), nota-se que a deposição da terceira camada pelo processo de MADA com resfriamento a água gerou uma microestrutura composta por ferrita acicular (AF) e bainita (B), sendo a maior fração volumétrica de ferrita acicular. A terceira camada da amostra A4 possui

maior fração volumétrica de ferrita acicular em relação à terceira camada da amostra A1. Assim, conclui-se que as camadas depositadas submetidas a um resfriamento mais acelerado, tendem a possuir uma maior fração volumétrica de ferrita acicular. A deposição dessa camada contou com uma energia de 1.083,5 J/mm (Tabela 7).

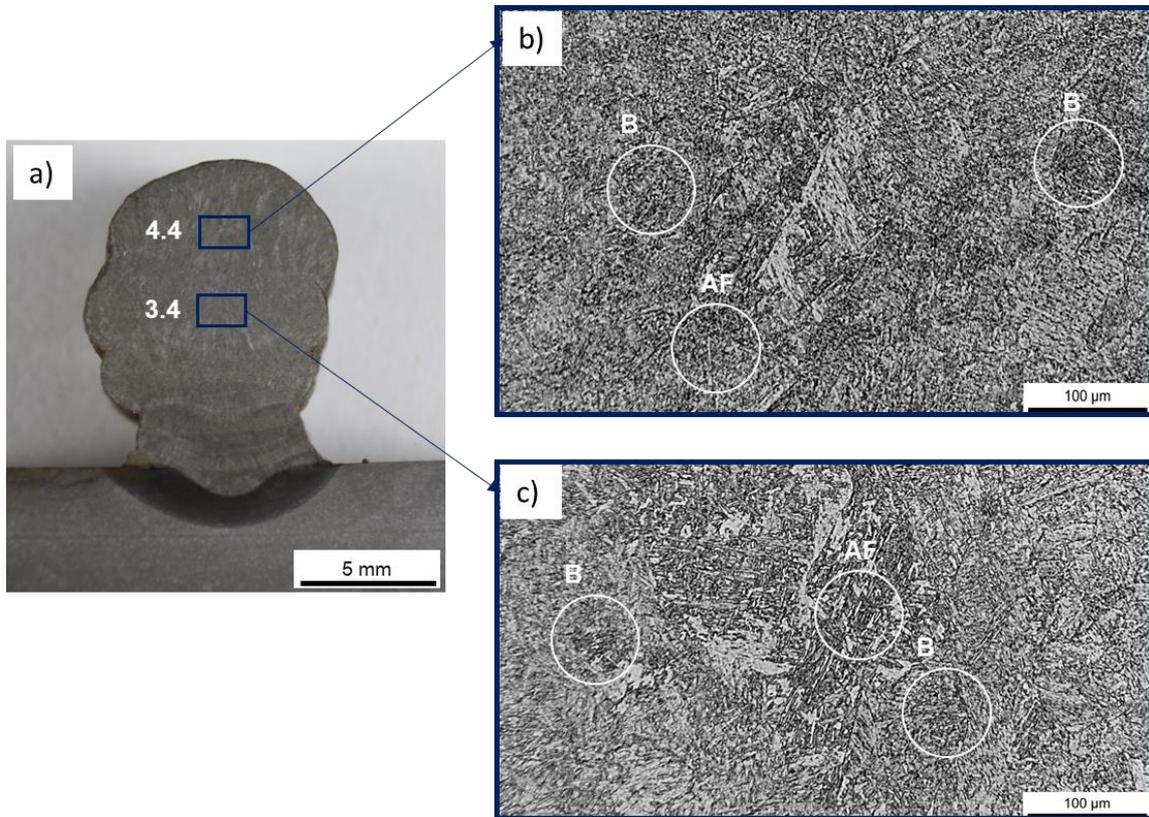
Figura 27 - Amostra A4 com três camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da terceira camada (3.3).



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 28, amostra A5 com quatro camadas, observa-se que tanto a terceira quanto a quarta camadas apresentam uma maior fração volumétrica de bainita (B), quando comparado com a terceira camada da amostra A4. Nota-se também que a quarta camada (4.4) da amostra A5 tem maior fração volumétrica de ferrita acicular (AF) comparada à terceira camada (3.4) da amostra A5. Isso significa que também no resfriamento a água ocorre a diminuição da fração volumétrica de ferrita acicular (AF) e em consequência, o aumento da fração volumétrica de bainita (B). Comparando-se com a terceira e quarta camadas da amostra A2, resfriadas a ar, verifica-se que a terceira e quarta camadas da amostra A5, resfriadas a água, apresentam uma maior fração volumétrica de ferrita acicular (AF), fenômeno ocasionado pelo resfriamento acelerado durante o processo de deposição.

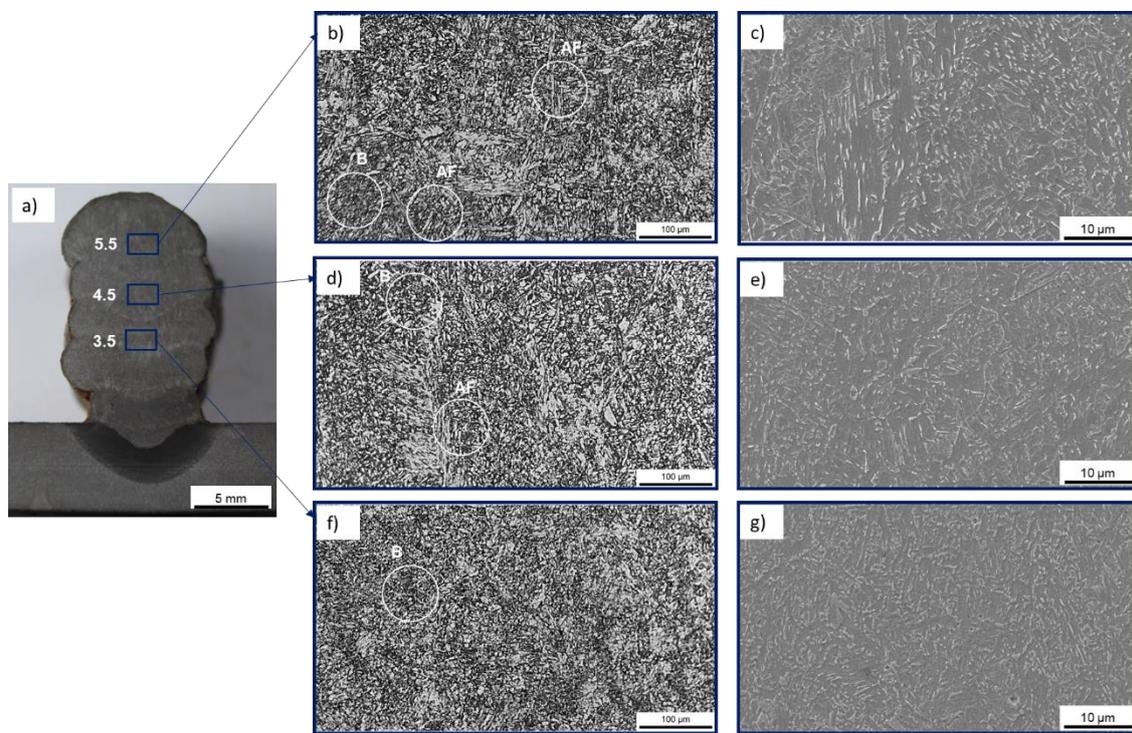
Figura 28 - Amostra A5 com quatro camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da quarta camada (4.4) e (c) micrografia óptica da terceira camada (3.4).



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 29, amostra A6 com cinco camadas, nota-se que a microestrutura das camadas depositadas apresenta ferrita acicular (AF) e bainita (B). A terceira camada (3.5) da amostra A6 apresenta uma maior fração volumétrica de bainita (B) quando comparada com a quarta camada (4.5) e a quinta camada (5.5) da amostra A6. Em comparação com as camadas da amostra A3, com cinco camadas depositadas, resfriadas a ar, observa-se que as camadas da amostra A6, com cinco camadas depositadas, resfriadas a água, apresentam maior fração volumétrica de ferrita acicular (AF). Assim, os ciclos térmicos utilizados na deposição das camadas com resfriamento a água tendem a reduzir a fração volumétrica de ferrita acicular e conseqüentemente, aumentar a fração volumétrica de bainita.

Figura 29 - Amostra A6 com cinco camadas depositadas, detalhando a (a) macrografia; (b) micrografia óptica da quinta camada (5.5); (c) micrografia eletrônica da quinta camada (5.5); (d) micrografia óptica da quarta camada (4.5); (e) micrografia eletrônica da quarta camada (4.5); (f) micrografia óptica da terceira camada (3.5) e (e) micrografia eletrônica da terceira camada (3.5).



Fonte: Autoria própria (2022)

No resfriamento a água, as camadas mais próximas ao substrato tendem a apresentar maior fração volumétrica de ferrita acicular quando comparado com as camadas construídas com resfriamento ao ar, devido a influência do resfriamento acelerado, enquanto as camadas mais distantes do substrato tendem a apresentar maior fração volumétrica de bainita quando comparado com as camadas mais distantes do substrato, resfriadas a ar. A deposição dessa camada contou com uma energia de soldagem de 520,6 J/mm (Tabela 7).

Tabela 5 - Médias dos parâmetros de soldagem das camadas resfriadas a água.

Camada	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Velocidade de alimentação de arame (mm/s)	Energia de soldagem (J/mm)
3°	205,5	17,4	3,3	88,0	1.083,5
4°	-	-	-	-	-
5°	202,3	17,5	6,8	88,0	520,6

Fonte: Autoria própria (2022)

5.3. Análise de Microdureza Vickers das Camadas Resfriadas a Ar

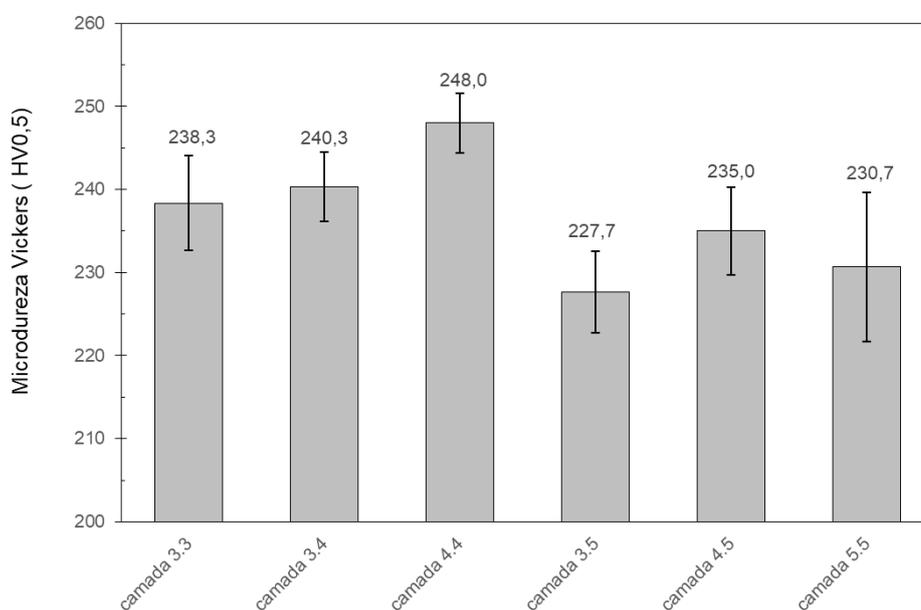
Nota-se na Tabela 8, os valores de microdureza Vickers obtidos para as amostras A1, A2 e A3. A fim de identificar se as médias de microdureza (Figura 30) apresentam ou não diferença significativa foi realizado uma análise de variância (ANOVA) com índice de confiança de 95%.

Tabela 6 - Microdureza Vickers (HV0,5) das camadas resfriadas a ar.

Impressão	Amostra A1	Amostra A2		Amostra A3		
	Camada 3.3	Camada 3.4	Camada 4.4	Camada 3.5	Camada 4.5	Camada 5.5
1°	232,0	245,0	251,0	231,0	231,0	241,0
2°	240,0	239,0	249,0	222,0	233,0	226,0
3°	243,0	237,0	244,0	230,0	241,0	225,0
Média	238,3	240,3	248,0	227,7	235,0	230,7
Desv. Pad.	± 5,7	± 4,2	± 3,6	± 4,9	± 5,3	± 9,0

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 30 - Médias de microdureza das camadas resfriadas a ar.



Fonte: Autoria própria (2022)

Quando o fator F é maior que o fator crítico, significa que existe pelo menos uma das médias com diferença significativa. Conforme apresentado na

Figura 31, o valor do fator F encontrado foi igual 4,87, maior que o fator crítico de 3,11. Portanto, existe diferença significativa em pelo menos uma das médias de microdureza.

Figura 31 - ANOVA para as médias das camadas resfriadas a ar.

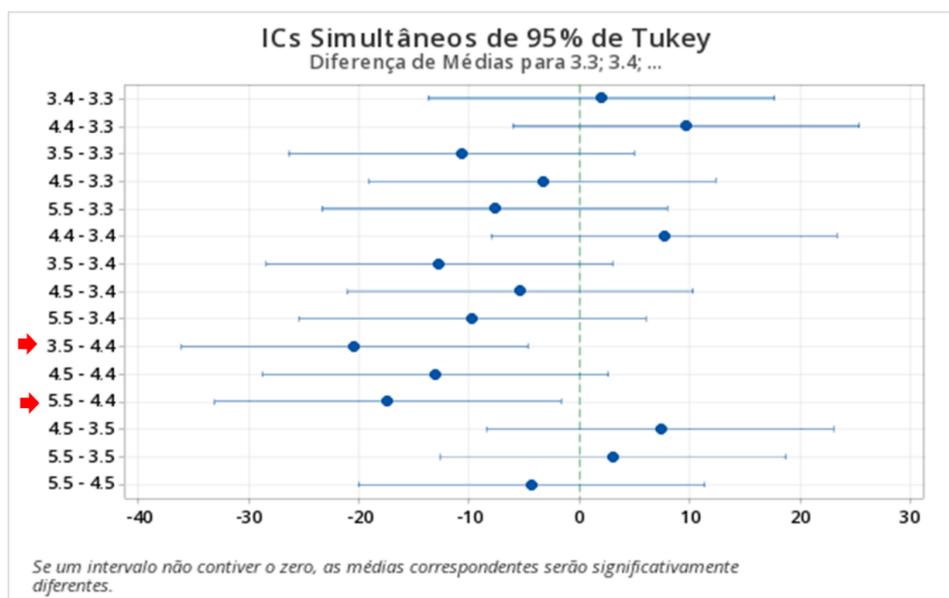
Anova: fator único				
RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
camada 3.0	3	715	238,33	32,3
camada 3.4	3	721	240,33	17,3
camada 4.4	3	744	248,00	13,0
camada 3.5	3	683	227,67	24,3
camada 4.5	3	705	235,00	28,0
camada 5.5	3	692	230,67	80,3

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	793,3	5	158,67	4,87	0,012	3,11
Dentro dos grupos	390,7	12	32,56			
Total	1184,0	17				

Fonte: Autoria própria (2022)

Para identificar qual ou quais as médias possuíam diferença significativa de microdureza foi realizado o teste de Tukey, conforme apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Diferença de médias entre camadas resfriadas a ar.



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 32, ao analisar a comparação entre as médias de microdureza da terceira camada (3.3) da amostra A1, sem a deposição de outras camadas, com a terceira camada (3.4) da amostra A2, com a deposição da quarta camada, observa-se que não há diferença significativa entre as mesmas. Assim, a deposição da quarta camada não alterou a dureza da terceira camada. Quando se compara a terceira camada (3.3), com a quarta camada (4.4) da amostra A2, verifica-se também, que não há diferença significativa entre as médias de microdureza.

Analisando-se a terceira camada (3.3), com a terceira camada (3.5) da amostra A3, com a deposição da quarta e quinta camadas, verifica-se que não há diferença significativa entre as médias de microdureza. Contudo, nota-se que a microdureza da camada (3.5) diminuiu 4,4% (238,3 HV \rightarrow 227,7 HV; Figura 30). Assim, a deposição da quinta camada não alterou significativamente, a dureza da terceira camada, mas a deposição de camadas superiores tende a diminuir a microdureza de camadas inferiores.

Comparando-se também, as médias de microdureza entre a terceira camada (3.3), com a quarta camada (4.5) da amostra A3, após a deposição da quinta camada, observa-se que não há diferença significativa de microdureza. Ainda, comparando-se a terceira camada (3.3), com a quinta camada (5.5) da amostra A3, também não se verifica alteração significativa de microdureza. Portanto, para o primeiro experimento construído com cinco camadas por MADA e resfriamento a ar, a modificação da altura da amostra não influencia a dureza da última camada.

Observa-se que não houve alteração significativa de dureza da comparação entre médias de microdureza da terceira camada (3.4), após deposição da quarta camada, com a quarta camada (4.4), ambas da amostra A2. Comparando-se também a terceira camada (3.4) com a terceira camada (3.5) da amostra A3, após deposição da quarta e quinta camadas, verifica-se que não houve diferença significativa. Ainda, comparando-se a terceira camada (3.4), com a quarta camada (4.5), após deposição da quinta camada e ainda com a quinta camada (5.5), também não se verifica diferença significativa de dureza entre as médias de microdureza.

No entanto, ao comparar a quarta camada (4.4) da amostra A2, sem deposição da quinta camada, com a terceira camada (3.5) da amostra A3, após deposição da quarta e quinta camadas, observa-se uma diferença significativa de microdureza, onde a camada (3.5) obteve uma diminuição de dureza de 8,2% (248,0 HV \Rightarrow 227,7 HV; Figura 30), em relação à quarta camada (4.4). Comparando-se a quarta camada (4.4) da amostra A2, com a quarta camada (4.5) da amostra A3, nota-se que não há diferença significativa. Contudo, observa-se uma diferença significativa de dureza quando se compara a quarta camada (4.4), com a quinta camada (5.5), verificando-se uma diminuição de 7% (248,0 HV \Rightarrow 230,7 HV; Figura 30), na dureza da quinta camada. Assim, apesar da deposição da quarta e quinta camadas não ter afetado a microdureza da terceira camada, observa-se que aumento da altura das camadas depositadas tende a diminuir os valores de microdureza de camadas inferiores. Esse fenômeno ocorre por conta da dificuldade de dissipação de calor das camadas mais elevadas.

5.4. Análise de Microdureza Vickers das Camadas Resfriadas a Água

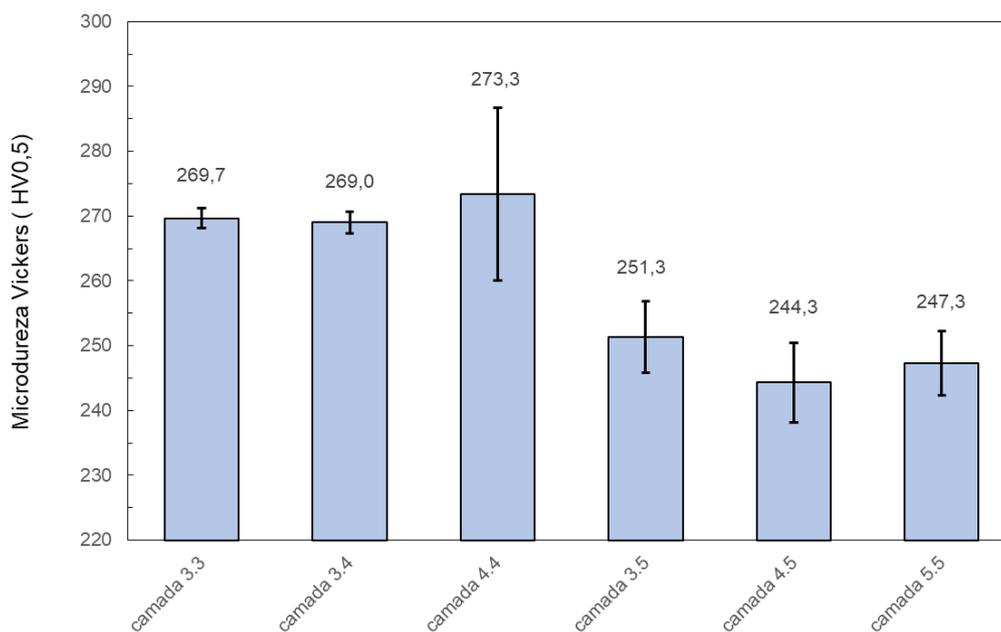
Nota-se na Tabela 7, os valores de microdureza Vickers obtidos para as amostras A4, A5 e A6. Para identificar se as médias de microdureza (Figura 33) apresentam ou não diferença significativa foi realizado uma análise de variância (ANOVA), com índice de confiança de 95%.

Tabela 7 - Microdureza Vickers (HV0,5) das camadas resfriadas a água.

Impressões	Amostra A4	Amostra A5		Amostra A6		
	Camada 3.3	Camada 3.4	Camada 4.4	Camada 3.5	Camada 4.5	Camada 5.5
1º	268,0	267,0	270,0	257,0	243,0	244,0
2º	270,0	270,0	288,0	251,0	239,0	245,0
3º	271,0	270,0	262,0	246,0	251,0	253,0
Média	269,7	269,0	273,3	251,3	244,3	247,3
Desv. Pad.	$\pm 1,5$	$\pm 1,7$	$\pm 13,3$	$\pm 5,5$	$\pm 6,1$	$\pm 4,9$

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 33 - Médias de microdureza das camadas resfriadas a água.



Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se na Figura 34 que o valor de F foi 10,87, superior ao F crítico de 3,11. Portanto, também existe pelos menos uma média de microdureza com diferença significativa.

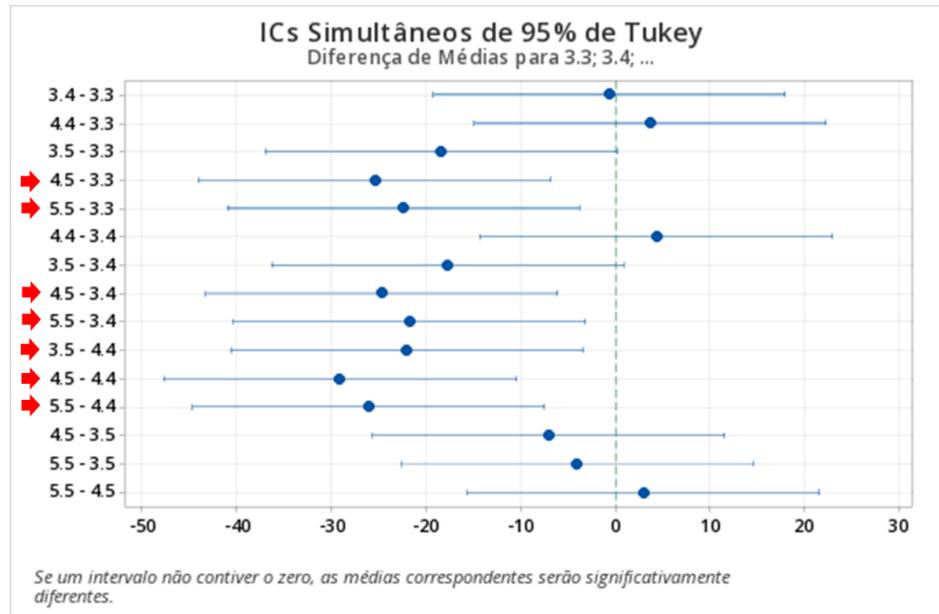
Figura 34 - ANOVA para as médias das camadas resfriadas a água.

Anova: fator único						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
camada 3.0	3	809	269,7	2,3		
camada 3.4	3	807	269,0	3,0		
camada 4.4	3	820	273,3	177,3		
camada 3.5	3	754	251,3	30,3		
camada 4.5	3	733	244,3	37,3		
camada 5.5	3	742	247,3	24,3		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2487,2	5	497,43	10,87	0,0004	3,11
Dentro dos grupos	549,3	12	45,78			
Total	3036,5	17				

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 35 identifica qual ou quais médias de microdureza apresentam diferenças significativa através do teste de Tukey.

Figura 35 - Diferença de médias entre as camadas resfriadas a água.



Fonte: Autoria própria (2022)

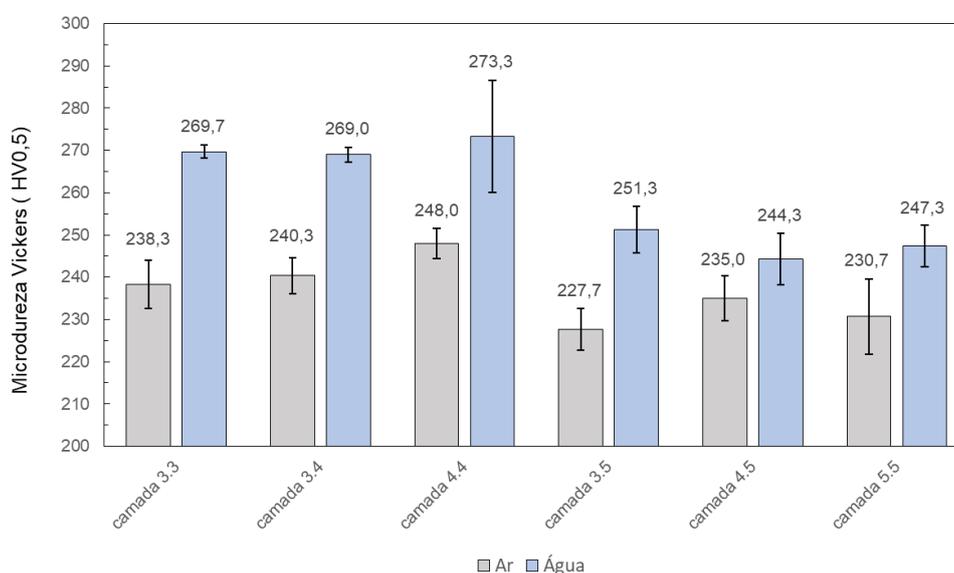
Na Figura 35, a comparação entre a média de microdureza da terceira camada (3.3) da amostra A4, sem a deposição de outras camadas, com a terceira camada (3.4) da amostra A5, após a deposição da quarta camada, observa-se que não há diferença significativa de microdureza entre as mesmas. Assim, não houve alteração significativa de dureza na terceira camada após a deposição da quarta camada, com resfriamento a água.

Analisando-se a média de microdureza da terceira camada (3.3) da amostra A4, com a terceira camada (3.5) da amostra A6, após a deposição da quarta e quinta camadas, também verifica-se que não há diferença significativa de microdureza. Contudo, nota-se que a microdureza da camada (3.5) diminuiu 6,8% (269,7 HV \Rightarrow 251,3 HV; Figura 32). Portanto, os ciclos térmicos da deposição da quinta camada não alteraram a dureza da terceira camada, mas há uma tendência em diminuir a microdureza das camadas inferiores, a partir da deposição da quinta camada, ou seja, quanto maior a altura das camadas, maior o acúmulo de calor e conseqüentemente, menor será a média de microdureza.

5.5. Comparação de Microdureza entre os Dois Tipos de Resfriamento

A Figura 36 apresenta uma comparação entre as médias de microdureza por camada depositada, com resfriamento a ar e a água. Nota-se que as médias de microdureza das camadas resfriadas a água são superiores às médias de microdureza das camadas resfriadas a ar.

Figura 36 - Médias de microdureza por camada depositada com resfriamento a ar e a água.



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 36, observa-se que a média de microdureza da terceira camada (3.3), resfriada a água apresenta um aumento de 13,2% (238,3 HV \Rightarrow 269,7 HV), em relação à média de microdureza da terceira camada (3.3), resfriada a ar. A média de microdureza da terceira camada (3.4), após a deposição da quarta camada, resfriada a água, apresenta um aumento de 11,9% (240,3 HV \Rightarrow 269,0 HV), em relação à média de microdureza da terceira camada (3.4), resfriada a ar. Por fim, comparando-se a média de microdureza da terceira camada (3.5), após a deposição da quarta e quinta camadas, resfriada a água, com a terceira camada (3.5), após a deposição da

quarta e quinta camadas, resfriada a ar, verifica-se que a terceira camada (3.5), resfriada a água apresenta um aumento de 10,4% (227,7 HV \Rightarrow 251,3 HV).

Portanto, no geral, verifica-se um aumento médio de 11,8% na microdureza das camadas depositadas com resfriamento a água, em relação às camadas depositadas com resfriamento a ar. Isso significa que o resfriamento a água reduz o acúmulo de calor durante o processo de deposição de camadas, melhorando a resistência mecânica das camadas, através do aumento significativo na microdureza.

A fim de confirmar se essas diferenças são significativas foi realizado uma análise de variância (ANOVA), com índice de confiança de 95% (Figura 37).

Figura 37 - ANOVA entre as médias de microdureza dos dois tipos de resfriamento.

Anova: fator único						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
3.3(ar)	3	715	238,3	32,3		
3.3(ag)	3	809	269,7	2,3		
3.4(ar)	3	721	240,3	17,3		
3.4(ag)	3	807	269,0	3,0		
4.4(ar)	3	744	248,0	13,0		
4.4(ag)	3	820	273,3	177,3		
3.5(ar)	3	683	227,7	24,3		
3.5(ag)	3	754	251,3	30,3		
4.5(ar)	3	705	235,0	28,0		
4.5(ag)	3	733	244,3	37,3		
5.5(ar)	3	692	230,7	80,3		
5.5(ag)	3	742	247,3	24,3		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7836,75	11	712,4318	18,18975	4,87E-09	2,216309
Dentro dos grupos	940	24	39,16667			
Total	8776,75	35				

Nota-se que o fator F foi de 18,18, superior ao fator crítico de 2,21. Portanto, existe pelo menos uma média com diferença significativa na comparação entre as médias de microdureza das camadas resfriadas a ar e a água.

Para identificar qual ou quais as médias de microdureza apresentam diferença significativa foi realizado o teste de Tukey, conforme apresentado na Figura 38. Nota-se que a média de microdureza da terceira camada 3.3(ag), resfriada a água é significativamente diferente em relação à média de microdureza da terceira camada 3.3(ar), resfriada a ar. Comparando-se a terceira camada 3.4(ag), após a deposição da quarta camada, resfriada a água, com a terceira camada 3.4(ar), após a deposição da quarta camada, resfriada a ar, verifica-se que também existe uma diferença significativa. Por fim, comparando-se a média de microdureza da terceira camada 3.5(ag), após a deposição da quarta e quinta camadas, resfriada a água, com a terceira camada 3.5(ar), após a deposição da quarta e quinta camadas, resfriada a ar, verifica-se que há uma diferença significativa entre as mesmas.

Figura 388 - Comparação de médias de microdureza entre camadas com resfriamento a ar e a água.

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança.				
Fator	N	Média	Agrupamento	
4.4(ag)	3	273,3	A	
3.3(ag)	3	269,7	A	B
3.4(ag)	3	269,0	A	B
3.5(ag)	3	251,3	B	C
4.4(ar)	3	248,0	C D	
5.5(ag)	3	247,3	C D	
4.5(ag)	3	244,3	C D E	
3.4(ar)	3	240,3	C D E	
3.3(ar)	3	238,3	C D E	
4.5(ar)	3	235,0	C D E	
5.5(ar)	3	230,7	D E	
3.5(ar)	3	227,7	E	

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Fonte: Autoria própria (2022)

6. CONCLUSÃO

Com base nos materiais e métodos utilizados nesse trabalho, pode-se concluir que:

Os resultados para o primeiro experimento, construção de um produto plano com cinco camadas depositadas por MADA com resfriamento a ar, demonstraram que os ciclos térmicos de camadas superiores afetam a microestrutura de camadas inferiores, reduzindo a fração volumétrica de ferrita acicular e conseqüentemente, aumentando a fração volumétrica de bainita. Também, verifica-se que a microdureza das camadas inferiores, até a deposição da quinta camada, não é afetada pelos ciclos térmicos de camadas superiores. Contudo, a microdureza de camadas inferiores tende a diminuir com o aumento do número de camadas depositadas, devido a dificuldade de dissipação de calor das camadas mais elevadas.

Para o segundo experimento, construção de um produto plano com cinco camadas depositadas por MADA com resfriamento a água, os resultados demonstraram que os ciclos térmicos de camadas superiores afetam a microestrutura de camadas inferiores, reduzindo a fração volumétrica de ferrita acicular e conseqüentemente, aumentando a fração volumétrica de bainita, da mesma forma que o primeiro experimento. Também, verifica-se que a microdureza das camadas inferiores, até a deposição da quarta camada, não é afetada pelos ciclos térmicos de camadas superiores. Porém, a partir da deposição da quinta camada, observa-se uma diferença significativa na microdureza entre as camadas. A microdureza de camadas inferiores tende a diminuir com o aumento da altura das camadas, pois mesmo com o resfriamento a água na base das camadas, verifica-se uma dificuldade de dissipação de calor nas camadas mais elevadas.

Comparando-se os resultados dos dois experimentos, nota-se que ambos os produtos planos possuem predominância dos mesmos microconstituintes, ferrita acicular e bainita. Contudo, verifica-se que o produto plano construído com resfriamento a água tende a uma maior concentração de ferrita acicular nas camadas mais próximas ao substrato, fenômeno atribuído ao resfriamento acelerado durante o processo de deposição das camadas. Observa-se também,

que as médias de microdureza das camadas do produto plano com resfriamento a água aumentam em cerca de 11,8% em relação às médias de microdureza das camadas do produto plano construído com resfriamento a ar, proporcionando uma maior resistência mecânica. Este fenômeno também é atribuído ao resfriamento acelerado durante o processo de deposição das camadas.

7. CONTRIBUIÇÕES

7.1. Contribuições Acadêmicas

Este trabalho contribui com a comunidade acadêmica na medida que acrescenta novas informações relativas à influência dos ciclos térmicos relacionados à deposição de camadas de material metálico pelo processo de manufatura aditiva por deposição a arco. Além de apresentar uma nova técnica de resfriamento à água, a qual poderá ser utilizada em outras pesquisas similares.

7.2. Contribuições Econômicas

O processo de manufatura aditiva representa um grande potencial econômico para as indústrias e o setor de serviços. Ele é fundamental para essa fase de tecnologias ligadas à fábrica inteligente ou indústria 4.0. Portanto, pesquisas como esta, principalmente por agregar informações ao processo de manufatura aditiva de materiais metálicos, sempre representará uma valiosa contribuição ao setor econômico.

7.3. Contribuições Sociais

O avanço tecnológico traz muitos impactos sociais, pois atinge diretamente a geração de emprego e renda. Quanto mais automatizados forem os processos industriais, menos empregos diretos serão necessários. Nesse sentido, a manufatura aditiva poderá representar uma solução para a geração de renda para a parcela da população que estiver desocupada, pois com a popularização do acesso às impressoras 3D, um cidadão poderá gerar sua própria renda sem sair da sua casa. Portanto, é fundamental que sejam realizados muitos estudos nessa área contribuindo para o seu aperfeiçoamento e desenvolvimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISPACE. Study of the Art of Additive Manufacturing Technologies, Trends, Opportunities, Challenges and Applications for the Aerospace Sector. [S. l.], 2016. Disponível em: www.addispace.eu.

AIRES, Matheus de Oliveira; ROSA, Adriano Carlos Morais; GYORI, Carlos André Mattei; REIS, Clara Regina Gabi; BUTTIGNON, Karina. Indústria 4.0: A Manufatura Aditiva como Ferramenta de Inovação e Otimização. In: (FATEC GUARULHOS, Org.)X FATECLOG - LOGÍSTICA 4.0 & A SOCIEDADE DO CONHECIMENTO 2019, GUARULHOS/SP. **Anais [...]**. GUARULHOS/SP: ISSN 2357-9684, 2019.

AMS BRASIL. **Manufatura Aditiva no setor aeroespacial: Produza peças de alta tecnologia com eficiência e sustentabilidade**. 2021. Disponível em: <https://amsbrasil.com.br/manufatura-aditiva-no-setor-aeroespacial-produza-pecas-de-alta-tecnologia-com-eficiencia-e-sustentabilidade/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

BEN-DAVID, RICKY. **Israeli startup SavorEat serves up 3D-printed kosher pork patties, turkey burgers**. 2022. Disponível em: <https://www.timesofisrael.com/israeli-food-tech-startup-savoreat-serves-up-3d-printed-pork-turkey-burgers/>. Acesso em: 2 ago. 2022.

BISWAL, Romali; ZHANG, Xiang; SYED, Abdul Khadar; AWD, Mustafa; DING, Jialuo; WALTHER, Frank; WILLIAMS, Stewart. Criticality of porosity defects on the fatigue performance of wire + arc additive manufactured titanium alloy. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 122, p. 208–217, 2019. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.01.017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142112319300295>.

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. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.085. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827115009397>.

CERUTI, Alessandro; MARZOCCA, Pier; LIVERANI, Alfredo; BIL, Cees. Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. **Journal of Computational Design and Engineering**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 516–526, 2019. DOI: 10.1016/j.jcde.2019.02.001. Disponível em: <https://academic.oup.com/jcde/article/6/4/516/5732347>.

CIMATECJR. **Aplicações da Manufatura aditiva na Indústria 4.0**. 2020. Disponível em: <https://www.cimatecjr.com.br/aplicacoes-da-manufatura-aditiva-na-industria-40-45>. Acesso em: 22 ago. 2021.

DA SILVA, Leandro João; SOUZA, Danielle Monteiro; DE ARAÚJO, Douglas Bezerra; REIS, Ruham Pablo; SCOTTI, Américo. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 107, n. 5–6, p. 2513–2523, 2020. DOI: 10.1007/s00170-020-05201-4.

DEBROY, T. et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, [S. l.], v. 92, p. 112–224, 2018. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079642517301172>.

DILBEROGLU, Ugur M.; GHAREHPAPAGH, Bahar; YAMAN, Ulas; DOLEN, Melik. The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, [S. l.], v. 11, p. 545–554, 2017. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.148. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978917303529>.

DING, Donghong; PAN, Zengxi; CUIURI, Dominic; LI, Huijun. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 81, n. 1–4, p. 465–481, 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-7077-3>.

DING, J.; COLEGROVE, P.; MEHNEN, J.; GANGULY, S.; SEQUEIRA ALMEIDA, P. M.; WANG, F.; WILLIAMS, S. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. **Computational Materials Science**, [S. l.], 2011. DOI: 10.1016/j.commatsci.2011.06.023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092702561100365X>.

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. DOI: 10.1115/1.4025773. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/doi/10.1115/1.4025773/375746/Electron-Beam-Additive-Manufacturing-of-Titanium>.

FRONIUS. **Fabricação econômica de componentes metálicos - wire arc additive manufacturing**. 2019. Disponível em: <https://www.fronius.com/pt-br/brasil/tecnologia-de-soldagem/centro-de-informcoes/revista/2019/waam>. Acesso em: 7 ago. 2022.

GODINA, Radu; RIBEIRO, Inês; MATOS, Florinda; T. FERREIRA, Bruna; CARVALHO, Helena; PEÇAS, Paulo. Impact Assessment of Additive Manufacturing on Sustainable Business Models in Industry 4.0 Context. **Sustainability**, [S. l.], v. 12, n. 17, p. 7066, 2020. DOI: 10.3390/su12177066. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/17/7066>.

GUIMARÃES, Thayz. **São Paulo cria laboratório clínico de impressão 3D para desenvolver órgãos humanos**. 2022. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/saude/medicina/noticia/2022/07/sao-paulo-cria-laboratorio-clinico-de-impressao-3d-para-desenvolver-orgaos-humanos.ghtml>. Acesso em: 31 jul. 2022.

HALEEM, Abid; JAVAID, Mohd. Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review. **Journal of Industrial Integration and Management**, [S. l.], v. 04, n. 04, p. 1930001, 2019. DOI: 10.1142/S2424862219300011. Disponível em: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S2424862219300011>.

HERZOG, Dirk; SEYDA, Vanessa; WYCISK, Eric; EMMELMANN, Claus. Additive manufacturing of metals. **Acta Materialia**, [S. l.], v. 117, p. 371–392, 2016. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645416305158>.

HORST, Diogo José; DUVOISIN, Charles Adriano; VIEIRA, Rogério de Almeida. Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review. **International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)**. ISSN: 2321-0869(O) 2454-4698(P), [S. l.], v. 8, n. 8, 2018.

HUANG, Samuel H.; LIU, Peng; MOKASDAR, Abhiram; HOU, Liang. Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 67, n. 5–8, p. 1191–1203, 2013. DOI: 10.1007/s00170-012-4558-5.

HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES. **7 Families of Additive Manufacturing**. 2020. Disponível em: www.hybridmanutech.com. Acesso em: 24 jul. 2022.

JÜRGEN BRUCKNER. **Cold Metal Transfer (CMT) – Ein neuer Prozess in der Fügechnik**. 2005. Disponível em: https://www.graepel.de/fileadmin/user_upload/produkt-pdfs/Allgemein/CMT-Prozess_FH.pdf. Acesso em: 31 jul. 2022.

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industry 4.0. Final report of the industry 4.0 working group**. 2013. Disponível em: <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2022.

KARAPATIS, N. P.; VAN GRIETHUYSEN, J. P. S.; GLARDON, R. Direct rapid tooling: a review of current research. **Rapid Prototyping Journal**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 77–89, 1998. DOI: 10.1108/13552549810210248. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13552549810210248/full/html>.

LAÍS GRILLETI. **Indústria 4.0: as oportunidades de negócio de uma revolução que está em curso**. 2020.

LEE, Y. S.; KIRKA, M. M.; DINWIDDIE, R. B.; RAGHAVAN, N.; TURNER, J.; DEHOFF, R. R.; BABU, S. S. Role of scan strategies on thermal gradient and solidification rate in electron beam powder bed fusion. **Additive Manufacturing**, [S. l.], v. 22, p. 516–527, 2018. DOI: 10.1016/j.addma.2018.04.038. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860417302439>.

LI, Yan; SU, Chen; ZHU, Jianjun. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects. **Results in Engineering**, [S. l.], v. 13, p. 100330, 2022. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590123021001316>.

LINDEMANN, Christian; JAHNKE, Ulrich; MOI, Matthias; KOCH, Rainer. Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing. In: (At. Austin, Org.) CONFERENCE: SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM - AN ADDITIVE MANUFACTURING CONFERENCE 2012, Texas, USA. **Anais [...]**. Texas, USA. p. 177–238.

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. DOI: 10.1108/RPJ-09-2015-0126. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-09-2015-0126/full/html>.

MARTINA, F.; MEHNEN, J.; WILLIAMS, S. W.; COLEGROVE, P.; WANG, F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 212, n. 6, p. 1377–1386, 2012. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013612000532>.

O GLOBO. **Conheça o Strati, o carro impresso em 3D**. 2014. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/conheca-strati-carro-impresso-em-3d-14068507>. Acesso em: 31 jul. 2022.

OMNE, Oskar. **Redefinindo o projeto com a manufatura aditiva**. 2018. Disponível em: https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/mww/pages/inn_amcenter.aspx. Acesso em: 31 jul. 2022.

OZTEMEL, Ercan; GURSEV, Samet. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, [S. l.], v. 31, n. 1, p. 127–182, 2020. DOI: 10.1007/s10845-018-1433-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>.

PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. **What is Industrie 4.0?** 2021. Disponível em: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/EN/Industrie40/WhatsIndustrie40/what-is-industrie40.html>. Acesso em: 15 jun. 2021.

RODRIGUES, Alessandro Roger; SOUZA, Adriano Fagali De; JUNIOR, Aldo Braghini; BRANDÃO, Lincoln Cardoso; SILVEIRA, Zilda de Castro. **Desenho Técnico Mecânico: do planejamento do produto ao controle de qualidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2015.

ROSIENKIEWICZ, Maria; GABKA, Joanna; HELMAN, Joanna; KOWALSKI, Arkadiusz; SUSZ, Slawomir. Additive Manufacturing Technologies Cost Calculation as a Crucial Factor in Industry 4.0. *In*: [s.l.: s.n.]. p. 171–183. DOI: 10.1007/978-3-319-68619-6_17. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-68619-6_17.

RÜSSMANN M; M, Lorenz; P, Gerbert; M, Waldner; J, Justus; P, Engel; M, Harnisch. **Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries**. 2015. Disponível em: https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries. Acesso em: 10 ago. 2022.

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. DOI: 10.1002/9781119016854.ch32. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119016854.ch32>.

SCOTTI, Fernando Matos; TEIXEIRA, Felipe Ribeiro; SILVA, Leandro João Da; DE ARAÚJO, Douglas Bezerra; REIS, Ruham Pablo; SCOTTI, Américo. Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. **Journal of Manufacturing Processes**, [S. l.], v. 57, n. March, p. 23–35, 2020. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.06.007.

SEPASGOZAR, Samad M. E.; SHI, Anqi; YANG, Liming; SHIROWZHAN, Sara; EDWARDS, David J. Additive Manufacturing Applications for Industry 4.0: A Systematic Critical Review. **Buildings**, [S. l.], v. 10, n. 12, p. 231, 2020. DOI: 10.3390/buildings10120231. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/10/12/231>.

SHI, Junbiao; LI, Fang; CHEN, Shujun; ZHAO, Yun; TIAN, Hongyu. Effect of in-process active cooling on forming quality and efficiency of tandem GMAW–based additive manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 101, n. 5–8, p. 1349–1356, 2019. DOI: 10.1007/s00170-018-2927-4.

SILVA, Bruno Henrique Souza. **Avaliação e Aplicabilidade de Arame Ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)**. 2020. Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2020.

TECHNOLOGY, NASA. **Deep-Space Food Science Research Improves 3D-Printing Capabilities**. 2019. Disponível em: https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2019/ip_2.html. Acesso em: 31 jul. 2022.

THE GE AVIATION BLOG. **GE's Advanced Turboprop gets cool**. 2017. Disponível em: <https://blog.geaviation.com/technology/ges-advanced-turboprop-gets-cool/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

TOTVS. **As principais aplicações da manufatura aditiva**. 2020. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/manufatura-aditiva/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

VASCONCELOS, Caio; CASANOVA, Jaime. **Desenvolvimento de um dispositivo para simular fisicamente a soldagem de manutenção em cascos de embarcações**. MANAUS.

VÁZQUEZ, L.; RODRÍGUEZ, N.; RODRÍGUEZ, I.; ALBERDI, E.; ÁLVAREZ, P. Influence of interpass cooling conditions on microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V parts manufactured by WAAM. **Welding in the World**, [S. l.], v. 64, n. 8, p. 1377–1388, 2020. DOI: 10.1007/s40194-020-00921-3.

VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2017.

WANG, Fude; WILLIAMS, Stewart; COLEGROVE, Paul; ANTONYSAMY, Alphons A. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V. **Metallurgical and Materials Transactions A**, [S. l.], v. 44, n. 2, p. 968–977, 2013. DOI: 10.1007/s11661-012-1444-6. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11661-012-1444-6>.

WELLE, Deutsche. **Coração é impresso em 3D a partir de tecido humano**. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2019/04/15/coracao-e-impresso-em-3d-a-partir-de-tecido-humano.ghtml>. Acesso em: 31 jul. 2022.

WILDEN, J.; BERGMANN, J.P.; DOLLES, M.; REICH, S.; FERNANDEZ, S. International Brazing and Soldering Conference, April 24–26. In: LOW TEMPERATURE BRAZING OF ZINC COATED STEEL AND STEEL/ALUMINIUM JOINTS BY SETTING ZN-ALLOYS AS BRAZING MATERIAL. BRAZING AND SOLDERING 2006, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.]

WILLIAMS, S. W.; MARTINA, F.; ADDISON, A. C.; DING, J.; PARDAL, G.; COLEGROVE, P. Wire + Arc additive manufacturing. **Materials Science and Technology (United Kingdom)**, [S. l.], v. 32, n. 7, p. 641–647, 2016. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073.

WU, Bintao; DING, Donghong; PAN, Zengxi; CUIURI, Dominic; LI, Huijun; HAN, Jian; FEI, Zhenyu. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 250, p. 304–312, 2017. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013617303370>.

WU, Bintao; 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, p. 151–160, 2018. a. DOI: 10.1016/j.addma.2018.08.004.

WU, Bintao; PAN, Zengxi; DING, Donghong; CUIURI, Dominic; LI, Huijun; XU, Jing; NORRISH, John. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. **Journal of Manufacturing Processes**, [S. l.], v. 35, n. February, p. 127–139, 2018. b. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

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. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.12.011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013618305466>.

ZIĘTALA, Michał et al. The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping. **Materials Science and Engineering: A**, [S. l.], v. 677, p. 1–10, 2016. DOI: 10.1016/j.msea.2016.09.028. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509316310917>.