

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO: UMA ANÁLISE CRÍTICA DA
TECNOLOGIA E PERSPECTIVAS PARA O FUTURO

por

Filipi Giotti da Rosa

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2020

Rosa, Filipi Giotti da
Manufatura aditiva por deposição a arco: uma
análise crítica da tecnologia e perspectivas para o
futuro. / Filipi Giotti da Rosa. -- 2020.
27 f.
Orientador: José Antônio Esmerio Mazzaferro.

Coorientador: William Hackenhaar.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2020.

1. MADA. 2. Manufatura Aditiva. 3. Soldagem. I.
Mazzaferro, José Antônio Esmerio, orient. II.
Hackenhaar, William, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Filipi Giotti da Rosa

MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO: UMA ANÁLISE CRÍTICA DA
TECNOLOGIA E PERSPECTIVAS PARA O FUTURO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Áreas de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. José A. E. Mazzaferro

Coorientador: Eng. William Hackenhaar

Comissão de Avaliação:

Prof. Heraldo J. Amorim

Prof. José A. E. Mazzaferro

Prof. Ivan G. Machado

Porto Alegre, novembro de 2020

Para o meu sol, que ilumina meus dias nublados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Luiz e Tânia, que sempre foram uma base inabalável para mim durante a trajetória do curso. A minha noiva Amanda, que com todo apoio e parceria sempre me acalma e me deixa feliz. Ao meu amigo William, pela inestimável ajuda neste trabalho e em todo o período de iniciação científica. Aos meus amigos e familiares, que de alguma forma participaram desta caminhada. Aos professores da UFRGS por todos estes anos de conhecimento que contribuíram para minha formação. Aos professores, alunos e técnicos do LS&TC por todo aprendizado e por ter me permitido ter o primeiro contato com soldagem, área que hoje admiro e gosto tanto.

Se, a princípio , a ideia não é absurda, então não há esperança para ela.

Albert Einstein

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2020

MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO: UMA ANÁLISE
CRÍTICA DA TECNOLOGIA E PERSPECTIVAS PARA O FUTURO

Rosa, Filipi Giotti
figiotti@gmail.com

Resumo. *A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco é um processo de fabricação no qual o arco elétrico é utilizado como fonte de calor e material é depositado, camada por camada, para obtenção de um componente. Esta tecnologia foi proposta e vem sendo estudada a algum tempo, mas ganhou maior notoriedade com a popularização da impressão 3D e com a indústria 4.0. Realizada uma análise histórica e sobre estudos atuais sobre o assunto é possível observar que mesmo com a transição mais direta entre CAD e manufatura, otimização de recursos e exemplos de componentes obtidos como sucesso, ainda existem certos fatores que parecem ser limitantes para a maior aplicação do processo. Dentre eles a presença de anisotropia nas propriedades mecânicas, a reduzida precisão dimensional e produtividade.*

Palavras-chave: *MADA, Manufatura Aditiva, Soldagem.*

Wire Arc Additive Manufacturing: a critical analysis of technology and perspectives for the future

Abstract. *Wire Arc Additive Manufacturing is a manufacturing process in which the electric arc is used as a source of heat and material is deposited, layer by layer, to obtain a component. This technology was proposed and has been studied for some time, but has gained greater notoriety with the popularization of 3D printing and with industry 4.0. With a historical analysis and current studies on the subject, it is possible to observe that even with the most direct transition between CAD and manufacturing, resource optimization and examples of components obtained as success, there are still certain factors that seem to be limiting for the greater application of the process. Among them, the presence of anisotropy in mechanical properties, reduced dimensional accuracy and productivity.*

Keywords: *WAAM, Additive Manufacturing, Welding.*

NOMENCLATURA

MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
CMT	Cold Metal Transfer
CAD	Computer Aided Design
NIAC	Near-immersion Active Cooling
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungest Arc Welding
MIM	Metal Injection Molded
MIG	Metal Inert Gas

MAG	<i>Metal Active Gas</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
WLAAM	<i>Wire Laser Arc Additive Manufacture</i>

1. INTRODUÇÃO

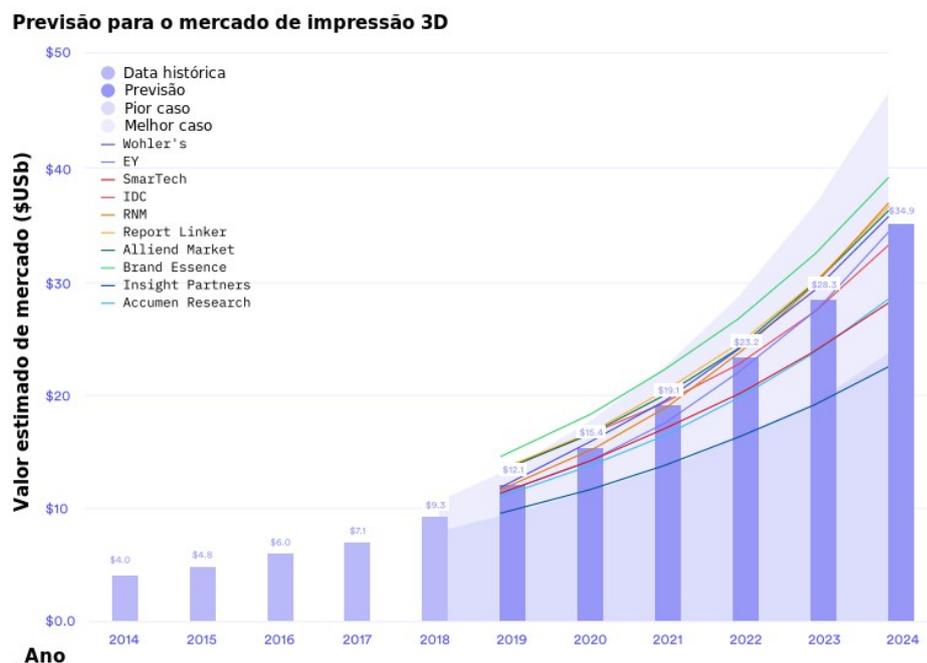
A fim de atender novas demandas, de tempos em tempos novas tecnologias são desenvolvidas. O advento e popularização da computação apresentam-se intimamente ligados a essa situação. Outro fator relevante é a saturação da produção em massa de componentes, oriunda de meados da década de 20, que dá origem a um mercado para componentes customizados em massa (KOTLER, 1989).

Estudos sobre novas técnicas de produção que abrangessem essa necessidade são realizadas há bastante tempo (WOHLERS; GORNET, 2017), dando origem aos processos de fabricação por manufatura aditiva originais, que incluem estereolitografia e impressão 3D(KRUTH, 1991). Técnicas as quais permitem a transição direta entre CAD e componente, permitindo maior liberdade de design. Proporcionam ainda uma produção ecologicamente mais correta, pois reduzem a geração de resíduos, como observado em outros processos. Com isso, nos últimos 30 anos a indústria vem demonstrado crescente interesse em utilizar técnicas de manufatura aditiva para produção de protótipos e componentes(DING *et al.*, 2015).

O processo de fabricação por manufatura aditiva pode ser definido como: um processo de união de material para obtenção de objetos a partir de um modelo 3D, normalmente camada por camada, ao contrário de processos com metodologia subtrativa(ASM INTERNATIONAL, 2013). Dentre as várias metodologias de manufatura aditiva, o presente trabalho estará interessado em analisar a técnica por deposição direta de energia, utilizando o arco elétrico como fonte de energia, a fim de realizar a fusão do material a ser depositado.

A produção através de manufatura aditiva apresentou crescimento nos últimos anos (Fig. 1). Segundo vários relatórios, estima-se que até 2024 este mercado ultrapasse os 30 bilhões de dólares(REPORT, 2020). Este mercado em ascensão demonstra tendência de crescimento para vários tipos de matérias-primas, inclusive para componentes metálicos (SCULPTEO, 2020).

Figura 1 - Tendência de mercado para impressão 3D. Adaptado de (SCULPTEO, 2020).



Essa tendência de crescimento só é possível devido a várias pesquisas que são realizadas neste setor, demonstrando exemplos de aplicações reais da tecnologia. Como utilização de Ligas de aço AISI 316L e cobre Cu-Al8Ni2Fe2 para fabricação de peças de grande porte, como componentes navais, utilizando a manufatura aditiva por deposição a arco (QUEGUINEUR *et al.*, 2018). Tem-se desenvolvido pesquisas com ligas avançadas, com aplicações aeroespaciais (WILLIAMS *et al.*, 2016). Utilização de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) para reforço de estrutura automotiva (JOSTEN; HÖFEMANN, 2020). E, ainda, estudos direcionados para utilização de MA na produção de componentes para aplicações biomédicas (LODHI *et al.*, 2019).

Existem ainda alguns exemplos de aplicação na fabricação de componentes de grande porte como a fabricação de um elemento do braço de retroescavadeira (GREER *et al.*, 2019). E a fabricação de uma ponte com mais de 4500 kg e cerca de 12,5 m de comprimento (BUCHANAN; GARDNER, 2019). Um exemplo de empresa que tem usado a MADA para produção de componentes de grande porte e complexidade, produzidos sob demanda é a Rotterdam Additive Manufacturing LAB (RAMLAB). Ela produziu um propulsor marítimo de grande porte, depositando uma liga de níquel, alumínio e bronze, totalizando 298 camadas depositadas. O componente obtido nessa fabricação pode ser observado na Fig. 2.

Figura 2 - Propulsor marítimo fabricado utilizando MADA. (RAMLAB, 2020)



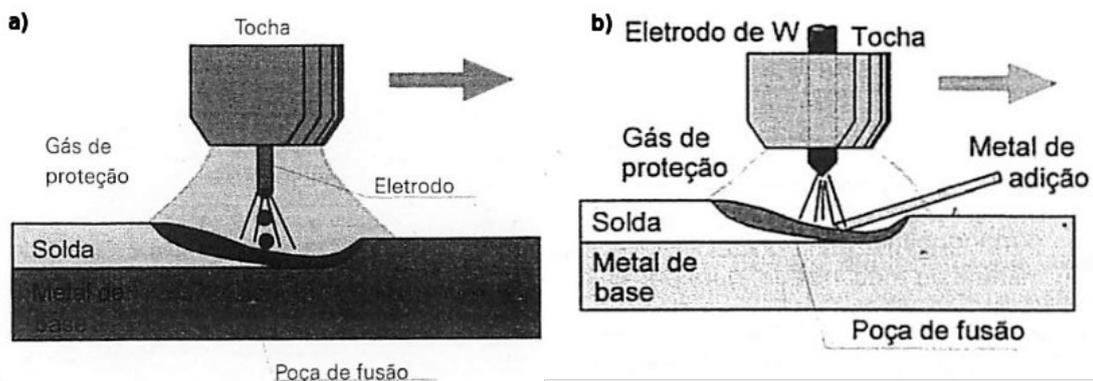
Como a tecnologia de manufatura aditiva foi proposta a algum tempo e desde seu surgimento apresenta potencial de aplicação e desenvolvimento industrial, alguns autores desenvolveram trabalhos que apresentam um histórico e uma revisão da tecnologia (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSOLOURIS, 2016; KUMAR *et al.*, 2017; MULLER, 2000), só que acabam omitindo MADA. Existem ainda outros autores (ALBERTI; SILVA; D'OLIVEIRA, 2014; DING *et al.*, 2015) que fazem uma revisão onde citam a MADA e tratam alguns pontos referentes a histórico e desenvolvimentos até o período em que foram escritos.

2. FUNDAMENTAÇÃO

O processo de fabricação de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) utiliza o arco elétrico como fonte de calor, podendo utilizar dois principais processos: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) e *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Ambos utilizam o arco elétrico como fonte de calor e proteção gasosa. Todavia, GMAW utiliza eletrodo consumível, o qual é aquecido por efeito Joule, que funde a ponta do eletrodo e inicia a transferência metálica através de gotas metálicas em estado líquido. Neste processo, há uma complexa interação entre forças, que são influenciadas pelos parâmetros de soldagem e resultam em três principais tipos de modo de transferência: curto-circuito, globular e aerossol (MACHADO, 1996), modos os quais são diretamente proporcionais a quantidade de energia utilizada, indo

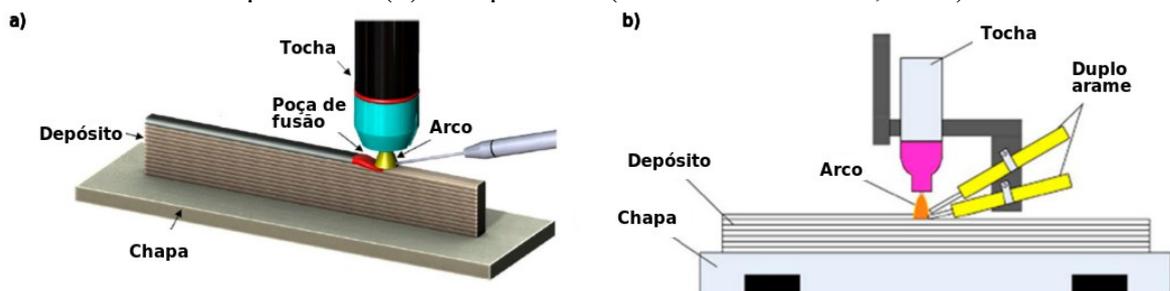
do curto-circuito, onde a energia utilizada no processo é menor, até o aerossol, o qual é obtido com maiores correntes de soldagem, resultando em um processo com maior aporte térmico. O processo GTAW utiliza eletrodo de tungstênio não consumível e pode ou não utilizar metal de adição, quando utilizado o metal de adição é adicionado direto na poça de fusão. Ambos podem utilizar gases inertes ou mistura destes para proteger a poça de fusão mas o processo GMAW pode utilizar misturas com gases ativos também. Na Fig. 3 pode-se observar esquematicamente estes processos, onde a) é o processo GMAW e b) GTAW.

Figura 3 – Representação esquemática do processo de soldagem MIG/MAG (a) e TIG (b). Adaptado de (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).



Para MADA utiliza-se destes processos tradicionais de soldagem realizando-se deposições sucessivas em camadas. Essa deposição pode ser realizada com a adição de um tipo de arame ou de mais de um tipo, dependendo das necessidades mecânicas do componente a ser produzido. Na Fig. 4 pode-se notar esquematicamente em a) aplicação com um arame e em b) com dois arames.

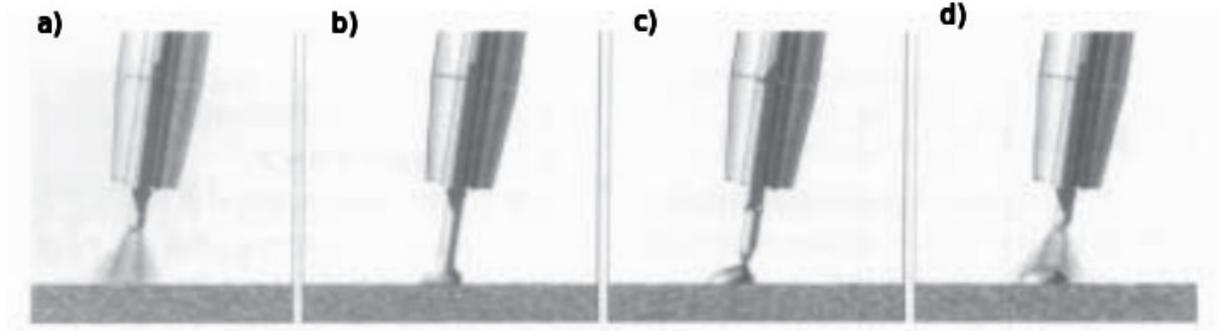
Figura 4 – Representação esquemática da MADA com deposição simples de arame (a) e duplo arame (b). Adaptado de (RODRIGUES *et al.*, 2019).



Existe ainda uma variante do processo GMAW que é recorrentemente utilizada em MADA, o CMT do inglês “Cold Metal Transfer” traduzido livremente como transferência de metal frio. Nele a transferência metálica ocorre de forma semelhante a um curto-circuito só que quando ocorre contato do metal de adição com a poça de fusão (curto-circuito) o sentido da alimentação de arame é revertido por um processo digital de controle e com isso é possível diminuir a corrente neste período de contato e por consequência a quantidade de calor fornecida para o componente (SELVI; VISHVAKSENAN; RAJASEKAR, 2018). Na Fig. 5 pode-se observar este processo CMT, na qual a) é o momento em que o arco está estabelecido e o arame avançando, em b) há o contato arame e poça de fusão, extinguindo o arco e fazendo com que a corrente aumente abruptamente, em c) o arame é recolhido, promovendo o

destacamento da gota e mantendo a corrente de curto-circuito baixa, em d) o arco é novamente estabelecido e o processo reinicia.

Figura 5 – Representação esquemática das fases da deposição do processo CMT. Adaptado de (FURUKAWA, 2006)



Para simulação numérica da fonte de calor do arco elétrico um modelo amplamente utilizado é o do duplo elipsoide de Goldak (GOLDAK; CHAKRAVARTI; BIBBY, 1984), no qual a distribuição do calor é dividida em duas elipses, que quando combinadas tentam estimar o comportamento do calor fornecido pelo arco elétrico, conforme Eq. 1 .

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x \geq 0$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x < 0 \quad (1)$$

$$f_f + f_r = 2, \quad Q = \eta UI$$

Onde q_f e q_r são o fluxo de calor na parte da frente e traseira do elipsoide, respectivamente, η é a eficiência do arco, U é a tensão, I a corrente, a_f é o comprimento do elipsoide da frente, a_r é o comprimento do elipsoide traseiro, b é metade da largura, c é a profundidade, f_f e f_r são as frações de calor depositadas na região frontal e traseira do modelo, respectivamente.

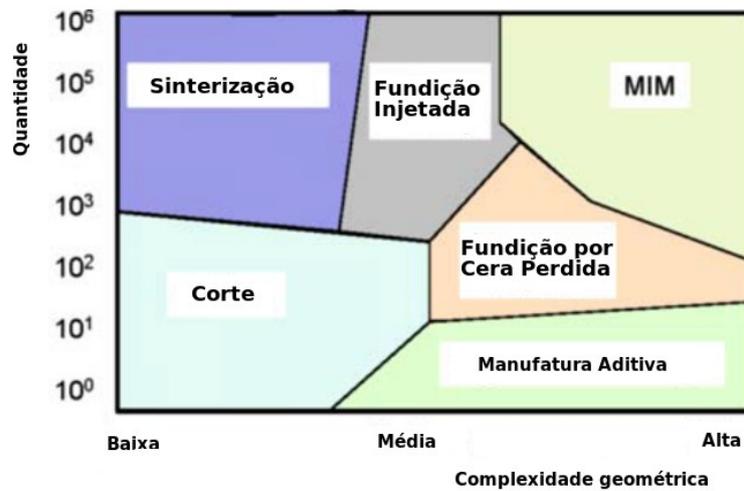
3. PRÉ-PROCESSAMENTO

3.1 Seleção

Antes de produzir um componente deve-se determinar o processo de fabricação, levando em conta as suas características, como limitações de tecnologia, produtividade e preço. Uma limitação ainda pode ser as dimensões do componente que se quer produzir, pois o maquinário tem uma capacidade finita quanto as dimensões geométricas que pode abranger.

Inicialmente a MA foi tratada como um processo de fabricação mais voltado para prototipagem (MULLER, 2000), tendo demonstrado relevância neste tipo de abordagem. Para esse tipo de utilização a MADA acaba sendo indicada para situações onde faz-se necessário produzir componentes com elevada complexidade e para itens produzidos em baixa quantidade (Fig. 6).

Figura 6 – Seleção de MA conforme a quantidade de componentes a serem produzidos e complexidade da geometria. Adaptado de (LEVY; SCHINDEL; KRUTH, 2003) .



Esse tipo abordagem de certa forma evolui com avanço da tecnologia e o surgimento da demanda por customização em massa. Com isso, a MA passa a ser estudada para aplicações de produção de componentes, na qual há certa liberdade de escolha das geometrias a serem produzidas e a possibilidade de, com o mesmo maquinário, produzir itens com muitas diferenças entre si.

A MADA geralmente tem sido utilizada para produção de componentes de grande porte a fim de aproveitar-se da taxa de deposição mais elevada observado neste método de MA (GREER *et al.*, 2019). Embora mais comum, a manufatura de componentes de grande porte não é algo obrigatório, também há interesse na utilização de MADA para confecção de componentes com dimensões reduzidas, fazendo-se o uso de técnicas de deposição como o CMT (KOZAMERNIK; BRAČUN; KLOBČAR, 2020), processo o qual permite um aporte de calor reduzido, contribuindo para menores tensões residuais (PICKIN; YOUNG, 2006).

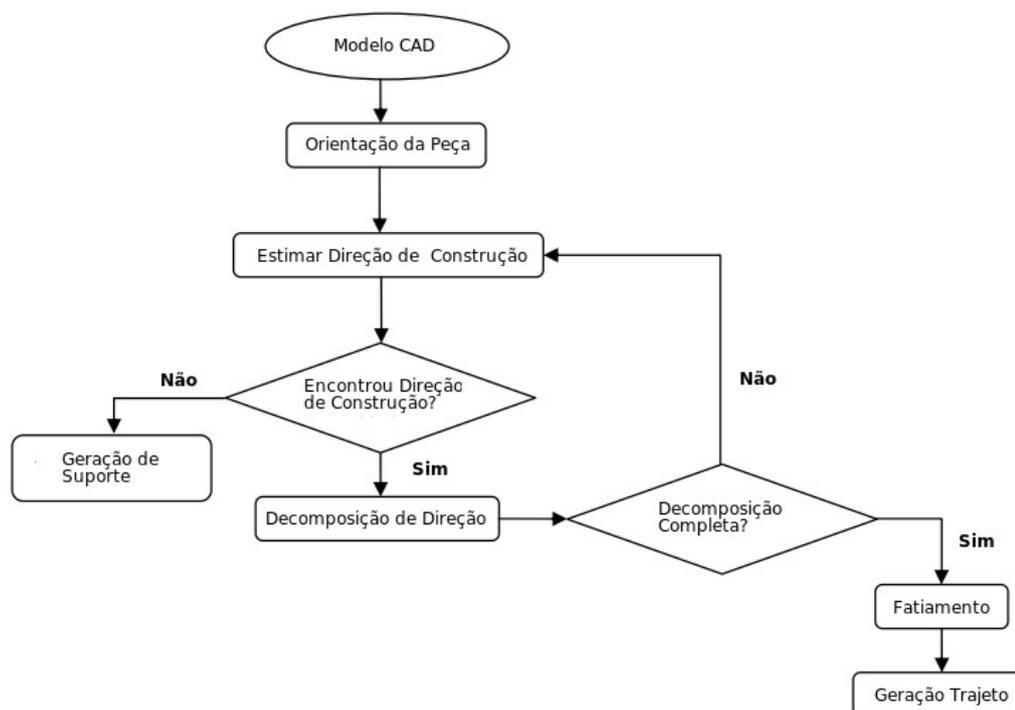
3.2 Fabricação

Um das grandes vantagens citadas tratando-se da produção utilizando MA é a transição de forma mais direta entre a modelagem 3D em software e a produção (RODRIGUES *et al.*, 2019). Normalmente em MA a estratégia inicial consiste em transicionar o componente 3D obtido no CAD para componentes 2D através do fatiamento, dividindo-o em camadas e assim podendo realizar a deposição (DING; PAN, 2014). Entretanto, dependendo da complexidade da geometria do componente esse processo de fatiamento pode não ser tão direto e faz-se necessário a análise mais aprofundada e um planejamento mais refinado do fatiamento do modelo.

Objetos com maior complexidade necessitam desta análise mais detalhada (SINGH; DUTTA; ARBOR, 2009), começando pela orientação do componente sobre a chapa, a escolha correta desta posição pode facilitar a deposição e otimizar o trajeto. Depois de determinada a posição do componente, parte-se para duas etapas de análise computacional, a primeira para determinar o volume que pode ser depositado em certa direção, posteriormente caso não seja possível completar o depósito em uma só direção, determina-se mais uma direção de deposição. Há casos em que não haverá uma posição viável para deposição, nestes casos utiliza-se um suporte, que consiste em desenhar a peça juntamente com uma base de sacrifício com o objetivo de viabilizar sua fabricação. Uma vez que essa decomposição esteja

completa, avança-se para a etapa de fatiamento e posteriormente para o planejamento do trajeto do depósito. Um esquema proposto destas etapas citadas pode ser observado na (Fig. 7).

Figura 7 – Esquematização do planejamento da produção de um componente complexo com MA. Adaptado de (SINGH; DUTTA; ARBOR, 2009).



A etapa de planejamento do trajeto é outro ponto crítico para MADA. Uma das estratégias sugeridas é a utilização de algoritmos para otimizar o trajeto. Um exemplo destes algoritmos consiste em dividir o componente em polígonos e em cada um deles utilizar técnicas de zig/zag e contorno, preenchendo cada um destes polígonos (DING; PAN, 2014). Mas este modelo não considera os desvios inerentes do processo de soldagem, como as distorções e inconsistências nas deposições.

Em muitos casos são utilizados robôs com vários graus de liberdade. Se por um lado a escolha deste tipo de ferramenta possibilita um fatiamento mais avançado, em direções diferentes, por outro lado isso torna todo o processo mais complexo, exigindo um algoritmo mais sofisticado e que muitas vezes pode ter um custo elevado. Uma alternativa para isso é a utilização de um movimentador com três graus de liberdade, o que o torna mais semelhante a outros sistemas de MA mais difundidos (KOZAMERNIK; BRACUN; KLOBČAR, 2020).

Há relatos ainda de utilização de estruturas em formatos celulares, com o objetivo de redução de massa do componente obtido, embora muitos dos estudos sobre esse tipo de aplicação em metálicos careça de análises mais aprofundadas de propriedades mecânicas. Além disso, a maioria dos componentes acabam necessitando de pós-processamento e a real viabilidade desta abordagem em MADA ainda precisa ser avaliada (NAZIR *et al.*, 2019), mas em casos bastante especiais e com ligas de elevada nobreza, este tipo de abordagem pode acabar tornando-se viável, justificando assim o investimento.

4. RESULTADOS DA MADA

Quando uma tecnologia é proposta para fabricação de componentes metálicos alguns itens devem ser avaliados a fim de determinar a viabilidade de utilização da mesma. Depois de mais de três décadas de estudos realizados pela comunidade, existem algumas características dos componentes fabricados com MADA que podem ser relevantes para posicioná-la no estado atual de desenvolvimento. Essas características, quando analisadas em conjunto podem indicar vantagens e também desvantagens do processo em questão, fornecendo embasamento para seleção do processo de fabricação para determinado componente.

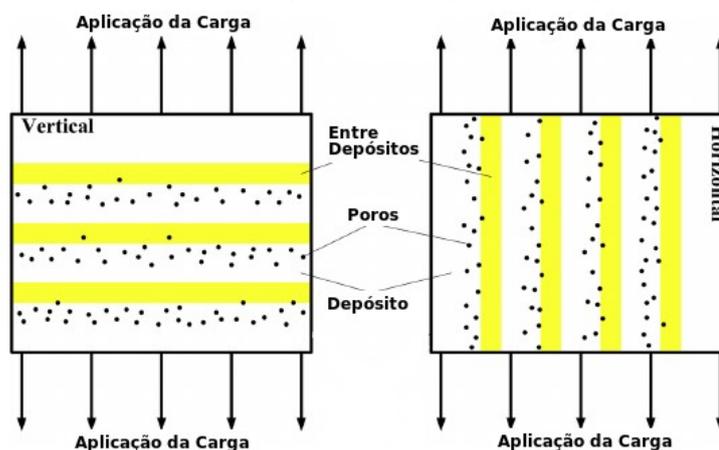
4.1. Propriedades Mecânicas

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

Para determinadas aplicações a presença de anisotropias pode ser um fator que invalida a utilização de certos componentes. Existem casos onde componentes depositados em ligas de alumínio apresentam certa anisotropia em relação a deformação máxima que podem sofrer (KÖHLER *et al.*, 2019; QI *et al.*, 2019). Em outros estudos (BAI *et al.*, 2016; QI *et al.*, 2018) as propriedades apresentaram comportamento praticamente isotrópico, inclusive a deformação.

Um fator que é determinante para alterações nas propriedades de tensão é a presença de porosidade nos componentes depositados em alumínio. Na Fig. 8 pode-se observar esquematicamente a disposição dos poros no componente.

Figura 8 – Diagrama esquemático da posição dos testes de tração em relação as posições vertical e horizontal dos depósitos. Adaptado de (QI *et al.*, 2019).



Como a perda de capacidade de resistir ao esforço devido à presença de porosidade está intimamente ligada a redução da seção resistente causada pelos poros (RUDY JF; RUPERT EJ, 1970). Podemos perceber que presença de poros acumulados na região superior do depósito pode ser um fator relevante para redução da capacidade de tração do componente na região transversal. Para melhorar essas propriedades alguns autores sugerem estratégias de tratamentos térmicos para alívio de tensão, os quais podem melhorar significativamente as propriedades mecânicas (YANG *et al.*, 2019). Foram observadas melhoras significativas nas propriedades de tração aquecendo as amostras de 30 °C até 498 °C a uma taxa de 300 °C/h, deixadas por 90 min e posteriormente temperando em água fria. Em seguida realizando

envelhecimento em temperatura ambiente por 48 h e em forno a 190 °C por 6 h (QI *et al.*, 2019), todavia a aplicação destes tratamentos apesar de trazer melhoras para as propriedades de tensão acabou inserindo certo grau de anisotropia nos depósitos citados no estudo. Como a anisotropia foi ampliada no tratamento térmico, ela provavelmente está intimamente ligada com a microestrutura resultante. Para depósitos com ligas de alumínio 4047 e 5356 também foi detectado comportamento anisotrópico (KÖHLER *et al.*, 2019), mesmo essas ligas sendo consideradas como não tratáveis termicamente, algo que pode indicar que este tipo de comportamento não depende necessariamente da realização de tratamento térmico no componente depositado.

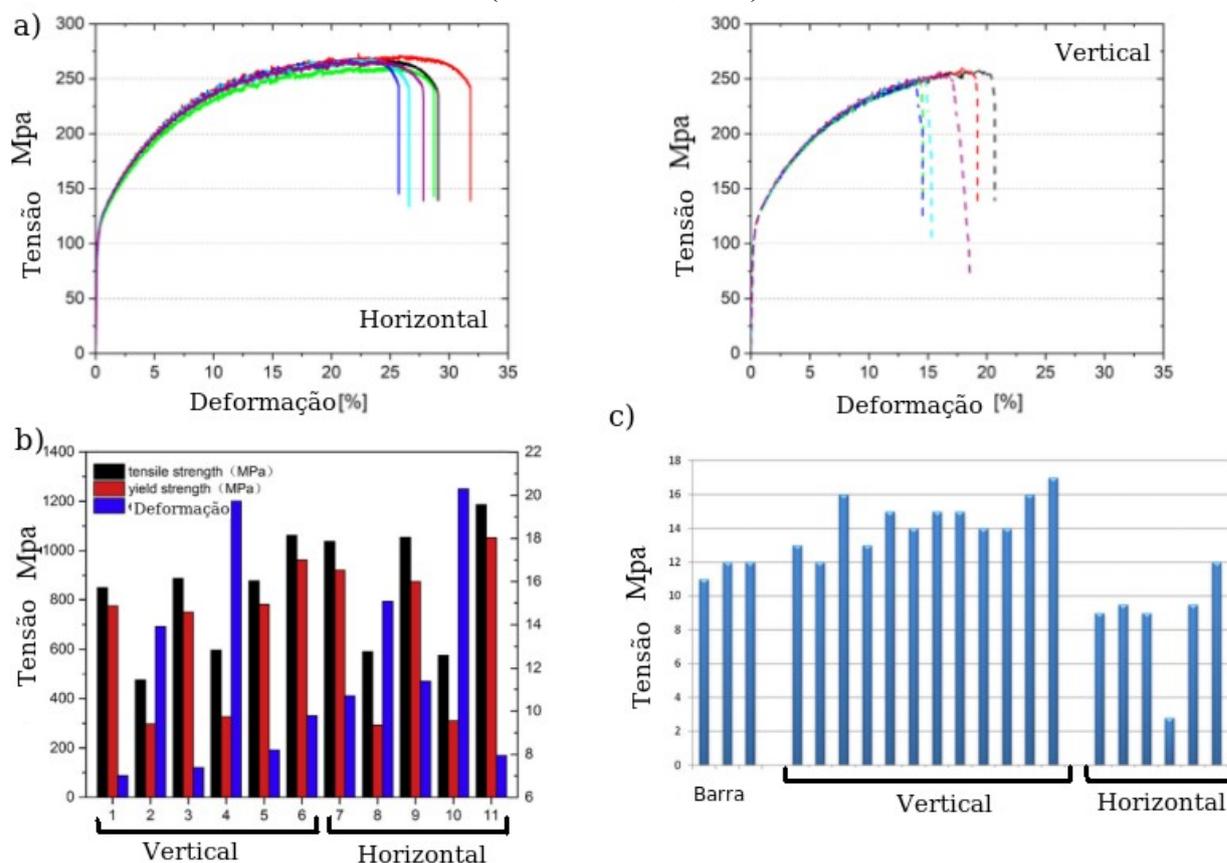
Uma estratégia utilizada para melhorar as propriedades mecânicas do depósito é a utilização de camadas com metais diferentes (LEICHER *et al.*, 2020), na qual é possível combinar efeitos e se obter um depósito com qualidade superior aos materiais de forma isolada.

O comportamento anisotrópico da deformação ainda pode ser observado em depósitos de Ti-6Al-4V, enquanto para tensão isto ocorre de forma mais uniforme, com valores mais próximos para corpos de prova retirados da direção horizontal e vertical (WANG *et al.*, 2013). Para depósitos realizados com arame de aço H13 houve relato de grandes quantidades de anisotropia, com valores inferiores de propriedades na direção vertical aos depósitos (WANG *et al.*, 2018). Para aços do tipo 316L fabricados com CMT também houve uma quantidade relevante de anisotropia, principalmente na deformação (WANG *et al.*, 2020).

Quando comparado com materiais semelhantes produzidos por outros processos de fabricação os componentes produzidos utilizando MADA muitas vezes apresentam propriedades mecânicas reduzidas. Uma liga de alumínio 2219-Al depositada apresentou apenas 57% da resistência máxima da 2219-T62 (BAI *et al.*, 2016). A MADA 2024 também apresentou propriedades reduzidas quando comparada a chapa AA2024-T4 (QI *et al.*, 2019). Para liga de titânio Ti-6Al-4V a capacidade de resistir ao esforço foi menor do que a de uma barra de mesmo material extrudada (WANG *et al.*, 2013). A liga de alumínio-silício AA4047 apresentou propriedades superiores a liga Al-12 Si fundida (LANGELANDSVIK *et al.*, 2020), embora já tenha sido observado resultado divergente em outro estudo (HASELHUHN *et al.*, 2016), no qual a mesma apresentou resultado significativamente inferior (em torno de 230MPa contra 180MPa). Em ligas de alumínio com quantidades de cobre e manganês, observou-se aumento da tensão de escoamentos dos depósitos com o aumento da razão Cu/Mg, assim como aumento da dureza (QI *et al.*, 2018). Em superligas como o Inconel 625 o tratamento térmico posterior dos depósitos resultou em melhora na tensão de escoamento, sem alterar de forma significativa a média de microdureza, apenas com variações locais da mesma (TANVIR *et al.*, 2020).

Tratamentos térmicos podem melhorar significativamente as propriedades e uniformizar as porosidades no caso do alumínio. Porém, aplicar tratamento térmico agrega um custo a produção do componente. Outro ponto é o fato de certos estudos indicarem o aumento da anisotropia após o tratamento. Mas independente disso, há diversos relatos de anisotropia com relação a componentes depositados, resultado que pode ser observado na Fig. 9.

Figura 9 - a) Tensão e deformação em liga de Al (KÖHLER *et al.*, 2019), b) Tensão e deformação em aço H13 (WANG *et al.*, 2018), c) Tensão e deformação em liga de Titânio (WANG *et al.*, 2013)



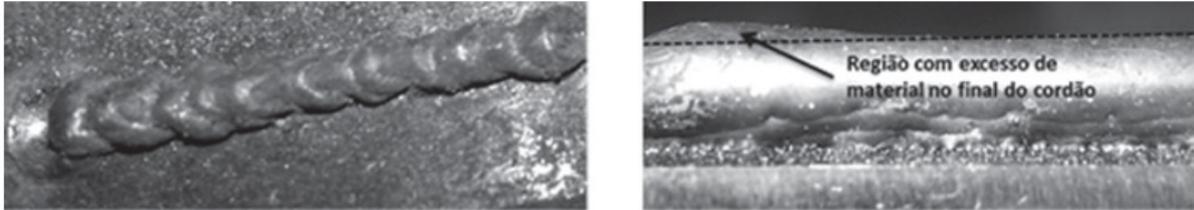
Como pode-se notar, no exemplo de liga de alumínio a deformação foi consideravelmente menor na direção vertical. No aço H13 percebe-se variações significativas nos valores obtidos para deformação, tendo as amostras 2, 4, 8 e 10 passado por tratamento térmico, algo que causou elevação na sua capacidade de resistir a deformação. Já no exemplo de liga de titânio, os valores menores de deformação foram observados na direção horizontal, demonstrando comportamento em desacordo com as outras ligas, mas reforçando a anisotropia.

4.2. Defeitos

Componentes fabricados com o processo MADA estão sujeitos a defeitos típicos dos processos de soldagem como trincas, porosidade, oxidação, entre outros. Todavia, existem alguns outros pontos que aparecem como empecilhos para o avanço da tecnologia que são a inconsistência geométrica dos cordões e a tensão residual causada pelo excessivo aporte térmico.

Quando um cordão de solda é depositado não raramente podem ser observadas pequenas variações geométricas, tanto na sua altura, quanto na largura do cordão (Fig. 10). Em muitos casos há uma tolerância aceitável para essas variações. Todavia, quando a finalidade do cordão é a construção de um componente camada por camada, essas pequenas variações podem impactar nas dimensões do componente final, fazendo com que o mesmo fique fora do especificado.

Figura 10 – Defeitos em soldagem que causam variações na geometria dos depósitos.
(ALBERTI; SILVA; D'OLIVEIRA, 2014).



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

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

Além das inconsistências geométricas ainda existem os problemas de tensões residuais e as grandes distorções causadas pelo aporte térmico excessivo (Fig. 11) que é outro problema tradicional quando trata-se com deposição a arco elétrico.

Figura 11 – Defeito comum em processos de soldagem: empenamento devido as tensões residuais (RODRIGUES *et al.*, 2019).



Para solucionar este problema, várias pesquisas estão sendo realizadas e publicadas pela comunidade com alternativas e possíveis soluções. Para contornar este problema, o componente deve receber menor quantidade de calor, para isso pode-se utilizar o processo CMT e ainda realizar intervalos de arrefecimento entre os depósitos, a fim de se obter temperaturas na média, menores (E SILVA *et al.*, 2020). Além dos intervalos controlados, pode-se forçar a troca de calor utilizando resfriamento forçado a ar sobre os depósitos, além de utilizar fluxo de água na região inferior da base do depósito. Isso sem se observar mudanças relevantes da microestrutura e nas propriedades mecânicas (KOZAMERNIK; BRACUN; KLOBČAR, 2020). Em ligas de titânio há relatos de utilização de CO₂ para arrefecimento durante o tempo de interpasse (WU *et al.*, 2018). Ainda é possível utilizar a

técnica NIAC, na qual os depósitos são realizados com os componentes parcialmente submerso na água. Utilizando Al5052 e NIAC foi possível realizar os depósitos mantendo a temperatura mais baixa, com menos distorções, reduzindo a anisotropia e sem aumentar o nível de porosidade (JOÃO *et al.*, 2020). Das técnicas de arrefecimento utilizadas em MADA a que é mais efetiva é a NIAC, embora a utilização de convecção forçada a ar também tenha seu grau de efetividade (REISGEN, 2020), técnica com a qual é possível obter-se temperaturas reduzidas com intervalos de inatividade menores (HACKENHAAR *et al.*, 2020).

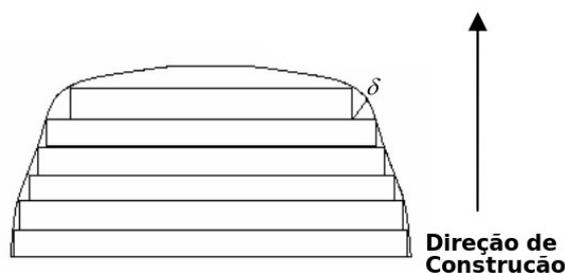
Os defeitos observados em processos de soldagem são compartilhados com o processo de fabricação MADA. Embora várias sejam as estratégias para contornar estes comportamentos adversos os problemas referentes ao aporte excessivo de calor ainda são uma realidade para MADA e devem ser melhores estudados nos próximos anos, para que a tecnologia possa avançar e ser aplicada em maior escala.

4.3. Precisão Dimensional

Algo que agrega valor para um processo de fabricação é a capacidade do mesmo em produzir componentes com certo nível de precisão dimensional. Em geral, quanto maior a precisão e a dimensão do componente, maior o valor agregado ao processo.

Componentes produzidos por MADA, assim como os produzidos por outros tipos de manufatura aditiva, possuem certa limitação quanto a precisão que conseguem produzir em relação ao CAD que os originou. Certas geometrias são menos adequadas para produção através de MA pois como no pré-processamento ocorre o fatiamento, gerando as camadas que serão depositadas, isso limita a produção de certos tipos de curva, devido ao efeito de escada que acaba sendo gerado (Fig. 12).

Figura 12 – Representação do efeito de escada observado na produção de componentes por MA (SINGH; DUTTA; ARBOR, 2009).



Esse tipo de abordagem é limitante quanto ao tipo de geometria e a qualidade da superfície que pode ser obtida com essa técnica. Por exemplo, superfícies inclinadas podem ser um desafio, embora existam casos onde realizando a deposição com baixo aporte térmico, controlando a temperatura de interpasso e realizando arrefecimento forçado do depósito e da base foi possível obter um componente com diferenças geométricas entre CAD e depositado na casa dos 2% (KOZAMERNIK; BRAČUN; KLOBČAR, 2020).

Conforme a complexidade dos componentes a serem fabricados aumenta, as limitações do processo acabam inviabilizando o simples fatiamento e deposição. Uma estratégia para contornar isto pode ser a divisão em blocos para deposição, nos quais os parâmetros de soldagem possam ser alterados a fim de adaptar-se a necessidades diferentes das peças (ZHAO *et al.*, 2019).

Para que seja possível se obter um componente com dimensões mais próximas do modelo CAD é necessário que a qualidade do depósito seja o mais próximo possível do ideal. A qualidade da superfície parece ter uma ligação com a escolha correta dos parâmetros de soldagem (KLEIN; SCHNALL, 2020), os quais alteram diretamente a transferência metálica, algo que aparenta ser determinante para obtenção de uma superfície lisa e uniforme (KÖHLER *et al.*, 2019). O comportamento deste fenômeno tende a ser fortemente influenciado pela relação entre tensão e corrente (LIANG *et al.*, 2018), e ainda pela velocidade de soldagem, que parece influenciar as inconsistências presentes no início e no final do cordão, como tratado anteriormente e que também causam impacto na qualidade e precisão geométrica do depósito (HU *et al.*, 2018).

Para obtenção de qualidade adequada do depósito e dimensões desejadas do componente final faz-se necessário além da seleção correta de parâmetros a fim de se obter uma superfície lisa e livre de imperfeições, o controle da temperatura de interpasse, pois ele será determinante para que as dimensões finais estejam dentro do esperado. Nota-se na Tab. 1 abaixo um exemplo do que a falta de controle da temperatura de interpasse pode causar.

Tab. 1 - Exemplo de desvio da altura relacionado com a falta de controle da temperatura no intervalo de interpasse. Adaptado de (KOZAMERNIK; BRACUN; KLOBČAR, 2020).

Tempo de Espera	Arrefecimento	Desvio na Altura
3s	Natural	-10,0%
Controlado p/ Temp.	Forçado	0,0%
120s	Forçado	5,2%

Os valores de desvio sugerem que o controle apenas pelo tempo de arrefecimento podem causar desvios geométricos maiores, indicando a importância do controle da temperatura de interpasse. Este tipo de necessidade de controle agrega complexidade no processo como um todo e pode contribuir para dificultar a implantação do processo em larga escala.

4.4. Modelos

A MADA é uma tecnologia de fabricação que, como citado anteriormente, foi proposta e é estudada a pelo menos três décadas. Isso indica que ela origina-se em uma época próxima a popularização da computação. Essa combinação proporciona que vários estudos utilizando simulações numéricas sejam realizados, a fim de tentar prever comportamentos de vários fenômenos que envolvem este processo.

Conforme abordado anteriormente, a quantidade de calor é fator determinante para MADA, por esse motivo as simulações de transferência de calor são bastante recorrentes na academia. Com elas é possível, além de estimar o ciclo térmico que o componente estará exposto, como as tensões residuais e outros comportamentos metalúrgicos. Um modelo bastante difundido para simular a fonte de calor do arco elétrico é o duplo elipsoide. (GOLDAK; CHAKRAVARTI; BIBBY, 1984). Embora este modelo tenha sido proposto para deposições simples sobre chapa, ele vem sendo aplicado e demonstrando resultados relevantes em MADA (HU *et al.*, 2018). Ainda há estudos sobre possíveis melhoras sobre o modelo proposto originalmente, utilizando uma abordagem estacionária para a análise térmica, proporcionando resultado semelhante e economia em cerca de 80% do tempo computacional (DING *et al.*, 2011). Ainda há estudos sobre um modelo matemático para estimar o tempo de arrefecimento no interpasse, algo que pode contribuir para melhora na performance da MADA (MONTEVECCHI *et al.*, 2018).

Além dos modelos matemáticos para simulação de comportamentos físicos dos fenômenos que envolvem a MADA, que estimam as propriedades físicas, outro fator que pode ser analisado é o econômico. Quando pesquisado sobre os modelos de custos dos últimos 30 anos, identificou-se que até o presente momento, nenhum modelo que estima os custos de MA consegue atender completamente todas as tecnologias deste segmento (KADIR; YUSOF; WAHAB, 2020). Isso pode ser um fator de relevância para este mercado, pois estimar os custos de produção é um fator relevante para se determinar viabilidades e precificação.

Os modelos matemáticos para simulação de ciclos térmicos e propriedades físicas parecem estar bem estabelecidos e fornecer resultados sólidos para utilização em MADA. Quanto a falta de modelos para estimar custos de produção, isso pode ser um empecilho para utilização deste processo de fabricação pela indústria de produção em massa a curto prazo.

4.5. Produtividade

Além das propriedades mecânicas, um fator que tem grande influência na viabilidade de utilização de um processo de fabricação é a produtividade. Ela está ligada aos custos de produção e pode ser fator determinante para que a utilização de MA seja aplicada em escala industrial. Quando comparado com outros processos de MA, a MADA possui taxa de deposição mais alta, podendo atingir valores em torno de 10 kg/h em casos onde a precisão dimensional não é muito alta, mas ficando em torno de 1 kg/h para ligas de titânio e alumínio e 3 kg/h para aço (WILLIAMS *et al.*, 2016). Esses números são elevados para manufatura aditiva, todavia ainda são mais lentos que processos de fundição, embora resultem em componentes com propriedades mecânicas mais elevadas (LANGELANDSVIK *et al.*, 2020).

O principal fator que causa a redução da produtividade na MADA é o tempo de arrefecimento de interpasse. Há relatos de que se ele fosse removido do processo a produtividade poderia até dobrar (LANGELANDSVIK *et al.*, 2020). Como o controle da temperatura entre as deposições é um fator determinante para obtenção de propriedades mecânicas e geometria dos depósitos com dimensões adequadas, esse intervalo de arrefecimento, com o estado atual de desenvolvimento da tecnologia, não seria possível eliminá-lo do processo. O que se tem feito, como citado nos estudos anteriores, é a utilização de técnicas de arrefecimento dos depósitos a fim de que eles não atinjam temperaturas muito elevadas, além de utilização de processos de soldagem com modos de transferência do metal avançados, que transfiram menos calor para o componente.

Quando cita-se taxas de deposição em torno dos kg/h isso não significa necessariamente que atualmente seja possível se obter um componente de 1 kg em uma hora, visto que a produtividade fica comprometida pela necessidade de intervalos entre deposições. Com o avanço das pesquisas tentando diminuir este intervalo utilizando técnicas de arrefecimento, a produtividade real de componentes por MADA tende a aumentar. Quanto menor for o tempo de arrefecimento entre cordões, maior taxa de deposição real que teremos, aumentando assim a produtividade.

Mesmo que ocorra redução nos tempos de arrefecimento entre deposições, ainda espera-se que a construção de componentes por MA leve algumas horas para ser concluída, como é comum em outros processos de MA (BAUMERS *et al.*, 2011). Esse tempo elevado de produção tem sido um dos fatores que tem favorecido a utilização de MA para aplicações que necessitem de baixa produtividade e com matéria-prima de custo elevado (FRAZIER, 2014). Embora sejam realizados estudos tentando avaliar a melhor técnica de MA de acordo com o custo (WAY *et al.*, 2009), e ainda com relatos de sistemas *open source* para depósitos em polímero que podem trazer retorno financeiro em até 2 anos (WITTBRODT *et al.*, 2013), quando trata-se de deposição com metais, e mais especificamente o caso da MADA, a estimativa de custo ainda é dificultado pela falta de modelos de custos mais fiéis, o custo de

materiais e as limitações de tamanho, ainda podem ser considerados empecilhos para o desenvolvimento do mercado nesta área.

5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho se realizou uma análise crítica sobre o estado de desenvolvimento da manufatura aditiva por deposição a arco. Se avaliou seu potencial de aplicação e a presença de desafios atrelados a ela. Busca obter uma resposta para indagação de por que a tecnologia não é aplicada em larga escala.

Mesmo sendo estudada a muitos anos e com muito potencial inexplorado, a MADA ainda possui alguns fatores que precisam ser avaliados a fim de viabilizar sua utilização em escala industrial e potencializar seu crescimento. Se por um lado a tecnologia permite a transição mais direta entre CAD e manufatura, por outro esse processo não é algo necessariamente simples. O planejamento da trajetória pode ser complexo e a produção de certos tipos de componentes pode ser até inviável, dependendo de fatores como inclinação e necessidade de precisão dimensional.

Como visto nos exemplos, existem estudos de aplicação do processo em materiais especiais, nos quais o uso deve ser o mais otimizado possível. Para esse tipo de aplicação a MADA pode ser uma opção válida, visto que não trabalha com remoção de material, algo que pode aumentar o aproveitamento do material utilizado.

Embora tenha-se exemplos de aplicação em componentes reais, eles são poucos e em aplicações específicas, geralmente sob demanda e muitas vezes com materiais nobres. Esses componentes são geralmente de grande porte e isso pode ser relacionado aos problemas de variações geométricas observadas, tanto em relação a dimensão final do componente quanto a inconsistências nos próprios depósitos.

Os modelos matemáticos para fonte de calor parecem estar bem estabelecidos e fornecer valores sólidos. A falta de um modelo para estimar custos de forma mais eficiente pode ser um fator limitante, juntamente com a questão de custos e produtividade atrelados a tecnologia.

A temperatura de interpasse parece ser um fator de elevado impacto na tecnologia, influenciando tanto na qualidade do componente obtido (propriedades mecânicas e precisão dimensional) como na produtividade (tempo de arrefecimento). Há certa inconsistência sobre as propriedades mecânicas obtidas com MADA, principalmente sobre a deformação. A presença de anisotropia em certos estudos e comportamentos diferentes dependendo do material depositado precisa ser melhor avaliada, algo que pode ser realizado em trabalhos futuros. Ainda faz-se necessário a melhor avaliação do efeito da presença porosidade em ligas de alumínio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTI, Eduardo André; SILVA, Leandro João da; D'OLIVEIRA, Ana Sofia C. M. Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. **Soldagem & Inspeção**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 190–198, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0104-9224/si1902.11>>

ASTM INTERNATIONAL. F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. **Rapid Manufacturing Association**, [S. l.], p. 10–12, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/F2792-12A.2>>

BAI, J. Y. *et al.* Mechanical properties of 2219-Al components produced by additive manufacturing with TIG. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 86, n. 1–4, p. 479–485, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-015-8168-x>>

BAUMERS, M. *et al.* Sustainability of additive manufacturing: Measuring the energy consumption of the laser sintering process. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [S. l.], v. 225, n. 12, p. 2228–2239, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0954405411406044>>

BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 83, n. 1–4, p. 389–405, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>>

BUCHANAN, C.; GARDNER, L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. **Engineering Structures**, [S. l.], v. 180, n. March 2018, p. 332–348, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>>

DING, Donghong *et al.* Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 81, n. 1–4, p. 465–481, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>>

DING, Donghong; PAN, Zengxi Stephen. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. [S. l.], p. 173–183, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-014-5808-5>>

DING, J. *et al.* Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. **Computational Materials Science**, [S. l.], v. 50, n. 12, p. 3315–3322, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.06.023>>

E SILVA, Régis Henrique Gonçalves *et al.* Analysis of interlayer idle time as a temperature control technique in additive manufacturing of thick walls by means of cmt and cmt pulse

welding processes. **Soldagem e Inspecao**, [S. l.], v. 25, p. 1–9, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.01>>

EIMER, E. *et al.* Wire Laser Arc Additive Manufacture of aluminium zinc alloys. **Welding in the World**, [S. l.], v. 64, n. 8, p. 1313–1319, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40194-020-00872-9>>

FRAZIER, William E. Metal additive manufacturing: A review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [S. l.], v. 23, n. 6, p. 1917–1928, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>>

FURUKAWA, K. New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets. **Welding International**, [S. l.], v. 20, n. 6, p. 440–445, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1533/wint.2006.3598>>

GOLDAK, JOHN; CHAKRAVARTI, ADITYA; BIBBY, MALCOLM. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. **Metallurgical Transactions B**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 299–305, 1984. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/21681805.2017.1363816>>

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

HACKENHAAR, William *et al.* An experimental-numerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, [S. l.], v. 52, p. 58–65, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.051>>

HASELHUHN, Amberlee S. *et al.* Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing. **Materials Science and Engineering A**, [S. l.], v. 673, p. 511–523, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.099>>

HU, Zeqi *et al.* Understanding and overcoming of abnormality at start and end of the weld bead in additive manufacturing with GMAW. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 95, n. 5–8, p. 2357–2368, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-017-1392-9>>

JOÃO, Leandro *et al.* Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. [S. l.], p. 2513–2523, 2020.

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

KADIR, Aini Zuhra Abdul; YUSOF, Yusri; WAHAB, Md Saidin. Additive manufacturing cost estimation models—a classification review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 107, n. 9–10, p. 4033–4053, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05262-5>>

- KLEIN, Thomas; SCHNALL, Martin. Control of macro-/microstructure and mechanical properties of a wire-arc additive manufactured aluminum alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 108, n. 1–2, p. 235–244, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05396-6>>
- KÖHLER, Markus *et al.* Wire and arc additive manufacturing of aluminum components. **Metals**, [S. l.], v. 9, n. 5, p. 1–9, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/met9050608>>
- KOTLER, Philip. From Mass Marketing to Mass Customization. **Planning Review**, [S. l.], v. 17, n. 5, p. 10–13, 1989.
- KOZAMERNIK, Nejc; BRAČUN, Drago; KLOBČAR, Damjan. WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], p. 1955–1968, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05958-8>>
- KRUTH, J. P. Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 40, n. 2, p. 603–614, 1991. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61136-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61136-6)>
- KUMAR, Lalit *et al.* Rapid Manufacturing: Classification and Recent Development. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 29–40, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.22161/ijaers.4.3.5>>
- LANGELANDSVIK, Geir *et al.* Comparative study of eutectic Al-Si alloys manufactured by WAAM and casting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 110, n. 3–4, p. 935–947, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05735-7>>
- LEICHER, M. *et al.* Multi-material design in additive manufacturing — feasibility validation. [S. l.], p. 1341–1347, 2020.
- LEVY, Gideon N.; SCHINDEL, Ralf; KRUTH, J. P. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 52, n. 2, p. 589–609, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60206-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60206-6)>
- LIANG, Zhu *et al.* Characteristics of metal droplet transfer in wire-arc additive manufacturing of aluminum alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 99, n. 5–8, p. 1521–1530, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2604-7>>
- LODHI, M. J. K. *et al.* Additively manufactured 316L stainless steel with improved corrosion resistance and biological response for biomedical applications. **Additive Manufacturing**, [S. l.], v. 27, n. January, p. 8–19, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.005>>

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

MARQUES, Paulo Vilani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. [S. l.: s. n.]

MONTEVECCHI, Filippo *et al.* Idle time selection for wire-arc additive manufacturing : A finite element- based technique. **Additive Manufacturing**, [S. l.], v. 21, n. April, p. 479–486, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.007>>

MULLER, D. H. EXPERIENCES USING RAPID PROTOTYPING TECHNIQUES TO MANUFACTURE SHEET METAL BIBA (Bremer Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft an der Universität Bremen , Germany). [S. l.], p. 25–27, 2000.

NAZIR, Aamer *et al.* A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 104, n. 9–12, p. 3489–3510, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04085-3>>

PICKIN, C. G.; YOUNG, K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy. **Science and Technology of Welding and Joining**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. 583–585, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/174329306X120886>>

QI, Zewu *et al.* Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 255, n. December 2017, p. 347–353, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.019>>

QI, Zewu *et al.* Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2024 aluminum alloy components: As-deposited and post heat-treated. **Journal of Manufacturing Processes**, [S. l.], v. 40, n. March, p. 27–36, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.03.003>>

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

RAMLAB. Rotterdam Additive Manufacturing LAB. Rotterdam. Página inicial. Disponível em: <<https://ramlab.com/>>. Acesso em: 26 de out. 2020.

REISGEN, Uwe. Increasing the manufacturing efficiency of WAAM by advanced cooling strategies. [S. l.], p. 1409–1416, 2020.

REPORT, Trend. **Printing trends Paper, Film and Foil Converter**. [S. l.: s. n.].

RODRIGUES, Tiago A. *et al.* Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). [S. l.], 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma12071121>>

RUDY JF; RUPERT EJ. Effects of Porosity on Mechanical Properties of Aluminum Welds. **Weld J (NY)**, [S. l.], v. 49, n. 7, 1970.

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

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

SINGH, Prabhjot; DUTTA, Debasish; ARBOR, Ann. Multi-Direction Layered Deposition – An Overview of Process Planning Methodologies. [S. l.], p. 279–288, 2009.

TANVIR, A. N. M. *et al.* Heat treatment effects on Inconel 625 components fabricated by wire + arc additively manufacturing (WAAM)—part 2: mechanical properties. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 110, n. 7–8, p. 1709–1721, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05980-w>>

WANG, C. *et al.* Study on microstructure and tensile properties of 316L stainless steel fabricated by CMT wire and arc additive manufacturing. **Materials Science and Engineering A**, [S. l.], v. 796, n. July, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140006>>

WANG, Fude *et al.* Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, [S. l.], v. 44, n. 2, p. 968–977, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6>>

WANG, Tingting *et al.* Microstructure and properties of die steel fabricated by WAAM using H13 wire. **Vacuum**, [S. l.], v. 149, p. 185–189, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.12.034>>

WAY, Yusoff *et al.* Benchmarking the rapid prototyping machines (RPM) for education purpose using quality function deployment (QFD). **International Conference on Advances in Materials & Processing Technology (AMPT 2009)**, [S. l.], p. 1–17, 2009. Disponível em: <<http://irep.iium.edu.my/id/eprint/5957>>

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

WITTBRODT, B. T. *et al.* Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers. **Mechatronics**, [S. l.], v. 23, n. 6, p. 713–726, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.06.002>>

WOHLERS, Terry; GORNET, Tim. **History of Additive Manufacturing**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <<https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2289-8.ch001>>

WU, Bintaο *et al.* The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. **Journal of Materials Processing Tech.**, [S. l.],

v. 258, n. October 2017, p. 97–105, 2018. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.024>>

YANG, Qingfeng *et al.* Microstructure and mechanical properties of AlSi7Mg0.6 aluminum alloy fabricated by wire and arc additive manufacturing based on cold metal transfer (WAAM-CMT). **Materials**, [S. l.], v. 12, n. 16, 2019. Disponível em:
<<https://doi.org/10.3390/ma12162525>>

ZHAO, Yun *et al.* Unit block–based process planning strategy of WAAM for complex shell–shaped component. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 104, n. 9–12, p. 3915–3927, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04141-y>>