



ESTUDO TEÓRICO DA INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE DEPOSIÇÃO DO PROCESSO MADA NA MACRO/MICROESTRUTURA DOS MATERIAIS

André Luiz Brito Novelino, Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília-DF, Brasil (andre_novelino@hotmail.com)

Resumo: A manufatura aditiva é um conceito que vem ganhando cada vez mais força no meio acadêmico e na indústria, devido às inovações do processo quanto aos equipamentos e métodos de deposição, como também ao grande leque de possibilidades que a tecnologia permite. Dentre as diversas tecnologias, a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) é um processo de deposição metálica que se destaca entre os demais métodos devido a alta taxa deposição, a possibilidade de fabricação de peças em larga escala e a maior acessibilidade e compatibilidade dos equipamentos. Porém devido a complexidade física do processo, ainda é difícil uma previsão da composição microestrutural, e consequentemente, das propriedades mecânicas das peças fabricadas. Este trabalho apresenta uma revisão de diversos trabalhos na área, com os resultados obtidos da macro/microestrutura em diferentes materiais e os efeitos na presença de defeitos, propriedades mecânicas e geometria.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; MADA; macroestrutura; microestrutura.

INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia permitiu a implementação de ideias presentes e discutidas na sociedade por décadas. O alto grau de precisão dos sistemas automatizados, juntamente com o uso de novas tecnologias implementadas nas linhas de produção permitem que seja atendido as necessidades e qualidades exigidas em diversas áreas da indústria. Uma dessas tecnologias é a manufatura aditiva (MA), cujo segmento apresenta grande demanda e perspectiva de crescimento. De acordo com a Grand Review Research (2021), o segmento da manufatura aditiva movimentou 13.8 bilhões de dólares em 2021, com uma perspectiva de crescimento de 19,4% para 2030.

Dentre as diferentes metodologias aplicadas na MA, uma aplicada para a deposição metálica é a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), chamado também por *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM). O processo atrai muita atenção na indústria e no meio acadêmico por permitir a confecção de estruturas complexas e de larga escala, com uma alta taxa de deposição, como o exemplo o tanque de combustível, presente na Fig. 1, fabricado para o foguete Terran I e projetado pela Relativity Space.

Além disso, o método exige menor custo de maquinário comparado com outros processos da MA,

tornando-o mais acessível (Wu *et al.*, 2018a). O processo MADA já apresenta diversos estudos no meio acadêmico, com aplicações para aços ligas de alumínio (Vimal *et al.*, 2021) ligas de titânio (Wang *et al.*, 2019) aços inoxidáveis (Duarte *et al.*, 2020), entre outros materiais.



Figura 1. Tanque de combustível em alumínio para o foguete Terran I (Relativity Space *apud* ARS TECHNICA, 2019).



Porém pesquisas ainda estão sendo desenvolvidas em busca de compreender mais alguns efeitos presentes no processo de deposição e formular metodologias que apresentem um bom padrão de qualidade, permitindo a obtenção de características desejadas no produto. Com isso análises macroscópicas e microscópicas são realizadas para visualizar os efeitos gerados pelo uso de cada metodologia.

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão acerca das metodologias utilizadas no MADA e apresentar os efeitos gerados na estrutura do material depositado, comparando características para diferentes métodos de deposição, além de pontos abordados em pesquisas atualmente.

ESTRATÉGIAS E MÉTODOS DE DEPOSIÇÃO

No processo MADA, diferentes tipos e deposição podem ser definidos de acordo com a estratégia de deposição das camadas e a tecnologia utilizada no processo. Quantos as tecnologias utilizadas, o processo permite utilizar para os métodos *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) e a variante *Cold Metal Transfer* (CMT), o processo *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) e ainda o *Plasma Arc Welding* (PAW) (Wu, *et al.*, 2018a). Além desses, processos híbridos podem também ser utilizados, com o uso conjunto com o processo *Laser Beam Welding* (LBW), como utilizado por Pardal, *et al.* (2019) para aumentar o aporte térmico e permitir maior taxa de deposição.

Wu, *et al.* (2018a) apresentam uma comparação das tecnologias quanto a taxa de deposição de material permitida para cada método. Segundo o trabalho, a taxa de deposição do processo em GTAW está em torno de 1-2 kg/h, inferior aos processos GMAW, que apresenta de 3-4 kg/h no processo convencional e de 2-3 kg/h na variante CMT, e ainda o PAW permite 2-4 kg/h.

Quanto ao controle de deposição de material, o método CMT-GMAW apresenta uma maior precisão quando comparado com outros métodos, pela capacidade do processo de realizar um bom controle da poça de fusão, devido a tecnologia de retração do arame e corte mecânico da gota presente pelo processo, e ainda pelo baixo aporte térmico e maior estabilidade do arco comparado ao processo GMAW convencional. (Srinivasan, *et al.* 2022).

Também é possível aplicar alguns métodos de transferência de material utilizados na soldagem tradicional para uma melhoria na qualidade do cordão de acordo com o desejado. Scotti e Ponomarev, (2008) mencionam outros métodos além do curto-círcuito tradicional que reduzem o aporte térmico, sendo a transferência globular, spray ou ainda pulsado, como por exemplo a utilização GMAW duplo pulso por Ziberov e Scotti (2015).

Srinivasan, *et al.* (2022) também comenta a cerca do método pulsado utilizado no processo CMT, denominado CMT+P, além do método CMT-Advanced, que permite ajustes dinâmicos do arco elétrico para garantir estabilidade na deposição, ou ainda o processo CMT *pulse advanced*, que utiliza ambas as técnicas.

LIGA DE TITÂNIO Ti-6Al-4V

A liga de titânio Ti6Al4V é um dos materiais que apresenta maior foco de pesquisa atualmente para a manufatura aditiva, devido à alta resistência mecânica e aplicação das ligas do material em diversas áreas da indústria. Wang, *et al.* (2019) relatam a influência do tempo de interpasso e direção de deposição na formação de regiões de grãos β (cúbica de corpo centrado) e ferrita, ou fase α (hexagonal compacto), que podem afetar significativamente as propriedades mecânicas das peças fabricadas.

Wu, *et al.* (2018b) avaliaram no trabalho o efeito da microestrutura em diferentes pontos da parede depositada pelo processo GTAW e a influência no limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento. Dentre 8 regiões diferentes de análise, os autores constataram, entre as 4 regiões inferiores, uma variação de 844 MPa até 892 MPa, e para o limite de resistência a tração entre 958 MPa e 1049 MPa. Para as demais amostras na parte superior, devido ao aquecimento da peça tiveram uma temperatura de interpasso superior a 200°C, resultou em um aumento na formação da ferrita acicular, e consequentemente, uma queda na composição intersticial e distância entre os contornos de grãos para a ferrita lamelar. Essa mudança estrutural, de acordo com os autores, gera uma deterioração nas propriedades mecânicas do material (Wu, *et al.*, 2018).

Wang, *et al.* (2019) realizaram análises para peças depositadas pelo processo GTAW, constatando uma composição predominante de grãos colunares β com presença de grãos equiaxiais nas regiões de recristalização geradas pelo sobrepasso de material. Os autores e Martina, *et al.* (2012), que realizaram deposições da liga pelo processo PAW, ainda relatam a presença de um arranjo microestrutural nas regiões entre camadas chamado Widmanstätten, que consiste pequenas colônias da fase α nucleadas entre os grãos β formados.

A liga Ti-6Al-4V também foi abordada por Pardal, *et al.* (2019) utilizando um processo híbrido CMT-LBW em comparação com o CMT. Os autores constataram uma maior presença de grãos colunares no processo híbrido devido ao maior aporte térmico, além de aumentar a taxa de deposição e a precisão na deposição das camadas, sendo estas mais



homogêneas macroscopicamente, como presente na Fig. 2.

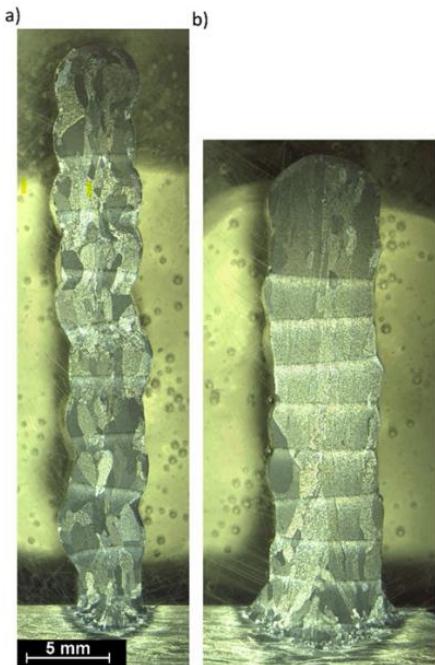


Figura 2. Análise da seção transversal das paredes depositadas pelos processos (a) CMT e (b) CMT-LBW (Pardal, *et al.*, 2019)

LIGA DE AÇO ER70S-6

Ligas de aço tradicionalmente usadas em processos de soldagem também podem ser utilizadas no processo MADA. Liu, *et al.* (2019) realiza o estudo da liga de aço AWS ER70S-G no processo chamado *Compulsively Constricted WAAM* (CC-WAAM) que utiliza o PAW. O experimento investigou a influência dos parâmetros na morfologia da superfície e na microestrutura do material. Foi determinado a melhor configuração dos parâmetros com base na morfologia do cordão e nessa configuração foi analisado a microestrutura de duas camadas sobrepostas, presentes na Fig. 3. Os autores enfatizam na Fig. 3a destaca a presença de grãos de bainita e a presença de ferritas aciculares na região superior. A Fig. 3b apresenta a região inferior de contato com a base, onde há formação de pequenos grãos de ferrita e perlita, devido ao contato inicial do material com a base fria. A Fig. 3c mostra que não há nenhuma distinção de microestrutura na região entre as camadas, mostrando que o material possui características homogêneas na região. Os autores concluíram que o processo apresentou uma consistência muito boa com a formação de uma estrutura predominantemente homogênea, um desafio para maioria dos processos MADA.

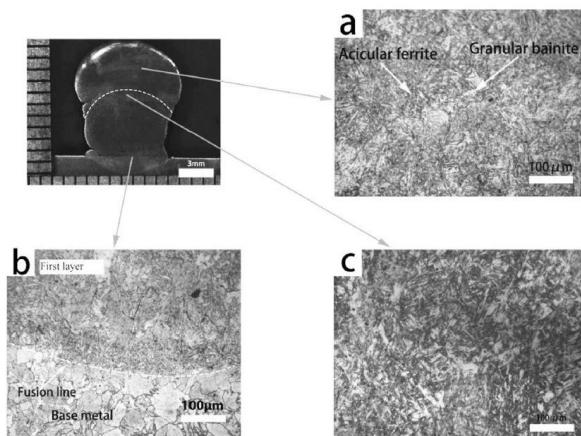


Figura 3. Microestrutura do material depositado (a) no cordão superior, (b) na região de contato com a base, e (c) na região entre camadas (Liu, *et al.*, 2019)

LIGAS DE ALUMÍNIO

Para ligas de alumínio, Vimal, *et al.* (2020) enfatizam alguns resultados obtidos na deposição MADA, sendo um deles a liga Al-5A06 depositada por um processo GTAW, que apresentou propriedades mecânicas isotrópicas tanto nas direções horizontal e vertical nos ensaios, o que indica a obtenção de uma microestrutura homogênea obtida na peça depositada. Com o processo GMAW, Haselhuhn, *et al.* (2016) realizaram uma análise das propriedades estruturais de algumas ligas de alumínio (ER1100, ER4043, ER4943, ER4047 e ER5356). Uma das propriedades analisadas foi a porosidade de cada material, com exemplos apresentados na Fig. 4 das regiões de fratura ocorrida pelos ensaios de tração. Poros de gás foram observados em todas as amostras, porém a amostra ER1100 apresentou poros de menor diâmetro. Na análise das propriedades mecânicas, os valores médios, baseados em medições no topo e na base dos blocos depositados, estão presentes na Fig. 5. Os autores consideraram que as ligas de classe 4000 apresentaram um melhor resultado quanto as análises de porosidade e de resistência a tração quando comparados com outros processos de fabricação.

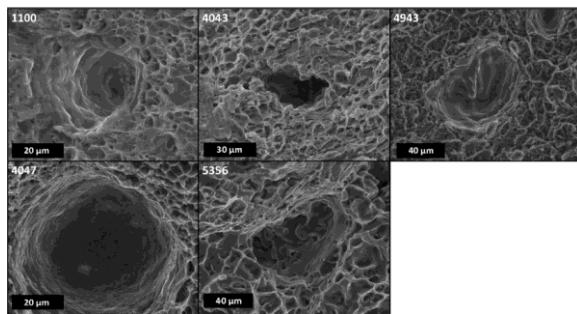


Figura 4. Grau de porosidade presente para cada as ligas ER1100, ER4043, ER4943, ER4047 e ER5356 (Haselhuhn, *et al.*, 2016).

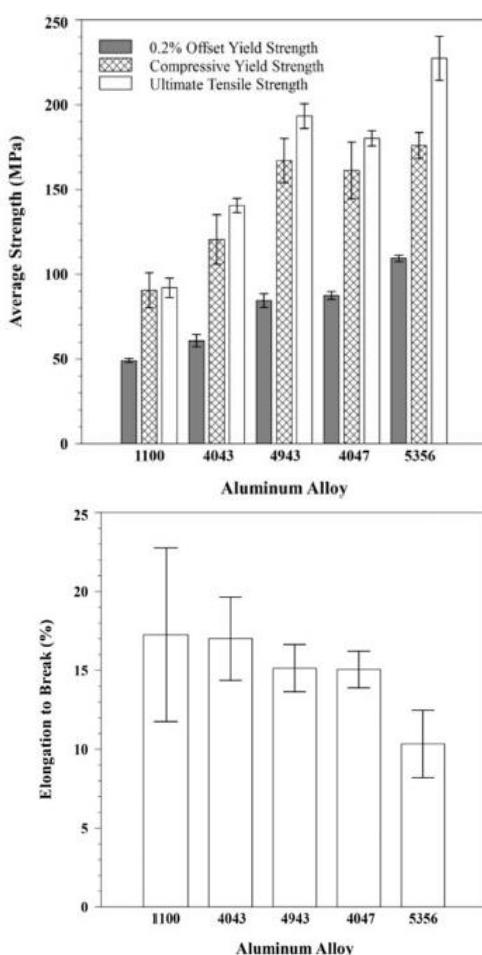


Figura 5. Limite de escoamento para tração e compressão, e limite de resistência a tração (superior); Alongamento para fratura (inferior) para as ligas de alumínio (Adaptado de Haselhuhn, *et al.*, 2016).

LIGA DE MAGNÉSIO AZ80M

Ligas de magnésio também podem ser utilizadas pelo processo MADA, onde Guo, *et al.* (2021) realizaram uma análise na liga AZ80M utilizando o processo

GTAW como base. Foi analisado a microestrutura em diferentes regiões da parede de deposição, para avaliar o efeito do aporte térmico entre as camadas inferiores e superiores, além de registrar a variação de temperatura nas regiões ao longo do tempo. A macroestrutura da parede e as diferentes regiões de microestruturas obtidas para a deposição de uma parede de 50 camadas podem ser visualizadas na Fig. 6. Os autores comentam que a variação constante do arco na região de trabalho ocasiona um ciclo térmico complexo na peça, levando as variações microestruturais, como os cristais equiaxiais e dendríticos na zona superior, uma segregação dendrítica mais evidente na região intermediária, e uma estrutura típica colunar dendrítica na região inferior, por se tratar de uma região que apresentou um alto gradiente de temperatura entre o substrato e a poça de fusão durante a deposição.

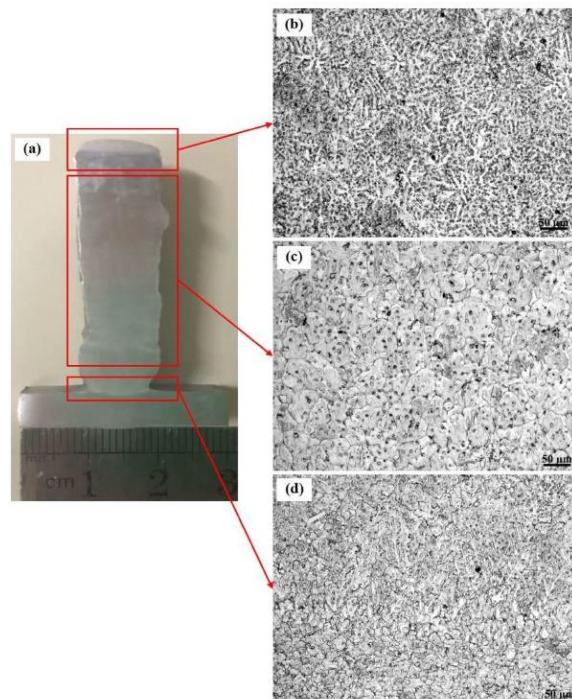


Figura 6. Microestrutura da liga AZ80M depositada pelo processo GTAW-MADA. (a) Seção de corte, (b) Zona Superior, (c) Zona intermediária, (d) Zona Inferior. (Guo, *et al.*, 2021)

CONCLUSÃO

Grandes avanços foram realizados no processo MADA, com grande prospecção de mercado e margem para implementação de novas tecnologias. Baseado nos trabalhos apresentados, conclui-se que:

- A versatilidade do processo MADA, com a possibilidade de uso de diversos processos e materiais, como titânio, alumínio e magnésio abre grande espaço para a tecnologia em diversos setores da indústria.



- O controle preciso dos parâmetros de deposição com a automação e o uso de tecnologias variantes híbridas, como o CMT-LBW, permitem um controle bem preciso da deposição do material, e contribui com a melhoria de qualidade das peças.
- Para peças fabricadas com sobreposição de camadas, devido a concentração de calor ao longo da deposição das camadas, nota-se a presença de 3 regiões com microestrutura distintas, sendo a região inferior próxima ao substrato, a região central e a região da última camada depositada, submetida a um menor aporte térmico.
- A liga de titânio Ti-6Al-4V mostrou-se mais sensível a mudança de microestrutura e propriedades mecânicas com a variação do aporte térmico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento da Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas (PCMEC) da UnB e CAPES.

REFERÊNCIAS

ARS TECHNICA, 2019. “Relativity Space to launch from historic Florida site” por Eric Berger. Disponível em <https://arstechnica.com/science/2019/01/relativity-space-to-launch-from-historic-florida-site/>. Acesso em 03 de Maio de 2021.

Duarte, V.R., Rodrigues, T.A., Schell, N., Miranda, R.M., Oliveira, J.P. and Santos, T.G. 2020. “Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM)”. *Additive Manufacturing*, Vol. 35, p. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101193>.

Grand View Research. 2021. “Additive Manufacturing Market Size Report 2022-2030”. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/additive-manufacturing-market>. Acessado em 01 de Junho de 2022.

Guo, Y., Quan, G., Jiang, Y., Ren, L., Fan, L. and Pan, H. 2021. “Formability, microstructure evolution and mechanical properties of wire arc additively manufactured AZ80M magnesium alloy using gas tungsten arc welding”. *Journal of Magnesium and Alloys*, Vol. 9, p. 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.01.003>.

Haselhuhn, A. S., Buhr, M., Wijnen, B., Sanders, P. G. 2016. “Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing”. *Materials Science & Engineering A*, Vol. 673, p. 511-523. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.099>.

Liu, W., Jia, C., Guo, M., Gao, J. and Wu, C. 2019. “Compulsively constricted WAAM with arc plasma and droplets ejected from a narrow space”. *Additive Manufacturing*, Vol. 27, p. 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.003>.

Marinelli, G., Martina, F., Ganguly, S. and Williams, S. 2019. “Microstructure, hardness and mechanical properties of two different unalloyed tantalum wires deposited via wire + arc additive manufacture”. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 83, p. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.104974>.

Martina, F., Mehnen, J., Williams, S.W., Colegrove, P., Wang, F. 2012. “Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, p. 1377-1386. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>.

Pardal, G., Martina, F. and Williams, S. 2019. “Laser stabilization of GMAW additive manufacturing of Ti-6Al-4V components”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 272, p. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.036>.

Srinivasan, D., Sevvel, P., Solomon, I. J. and Tanushkumaar, P. 2022. “A review on Cold Metal Transfer (CMT) technology of welding”. *Materials Today: Proceedings*, ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.016>.

Vimal, K.E., Naveen Srinivas, M., and Rajak, S. 2020. “Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review”. *Materials Today: Proceedings*, p. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.153>.

Wang, J., Lin, X., Li, J., Hu, Y., Zhou, Y., Wang, C., Li, Q. and Huang, W. 2019. “Effects of deposition strategies on macro/microestruture and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V”. *Materials science & Engineering AI*, Vol. 754, p. 735-749. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.001>.

Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J. and Norrish, J. 2018a. “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement”. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 35, p. 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>.

Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., 2018b. “Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire and arc additive manufacturing”. *Additive Manufacturng*, Vol. 23, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.004>.



Ziberov, M. e Scotti, A. 2015. “Mecanismo de formação do cordão em MIG/MAG duplo pulso”. *POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia Mecânica UFU*.