



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. Quanto 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-circuito 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 interpasse 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 interpasse 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 sobrepasse 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.

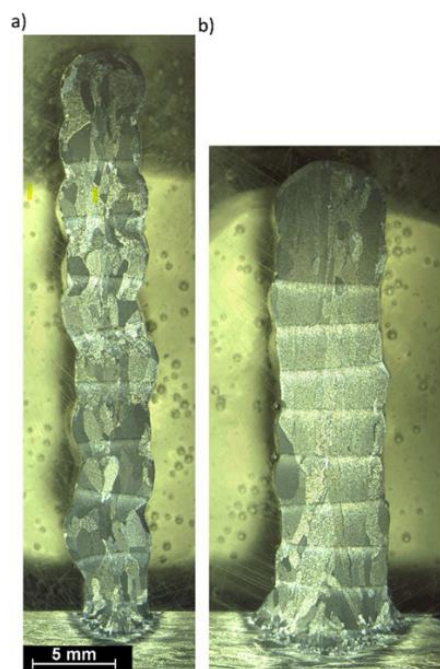


Figura 2. Análise da seção transversal das paredes depositadas pelos processos (a) CMT e (b) CMT-LBW (Pardal, *et al.*, 2019)

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 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.

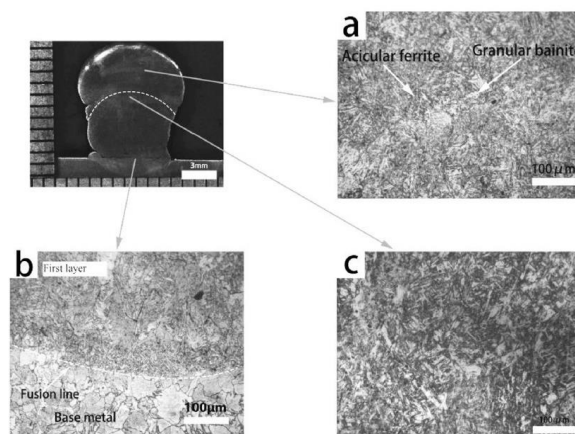


Figura 3. Microestrutura do material depositado (a) no cordão superior, (b) na região de contato com a base, e (c) na região entre camadas (Liu, *et al.*, 2019)

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.

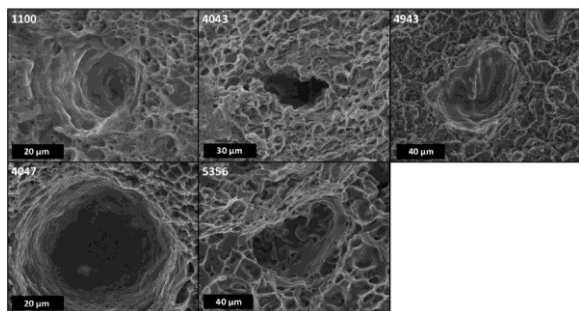


Figura 4. Grau de porosidade presente para cada as ligas ER1100, ER4043, ER4943, ER4047 e ER5356 (Haselhuhn, *et al.*, 2016).

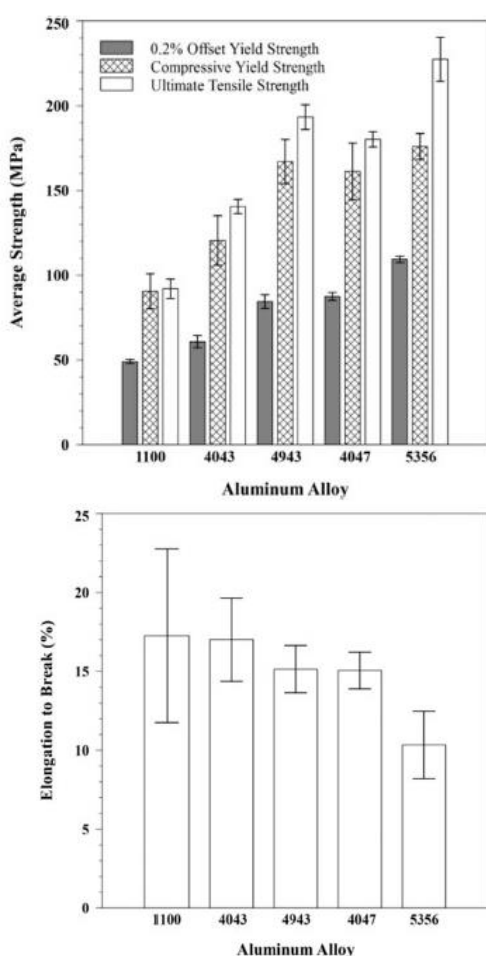


Figura 5. Limite de escoamento para tração e compressão, e limite de resistência a tração (superior); Alongamento para fratura (inferior) para as ligas de alumínio (Adaptado de Haselhuhn, *et al.*, 2016).

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.

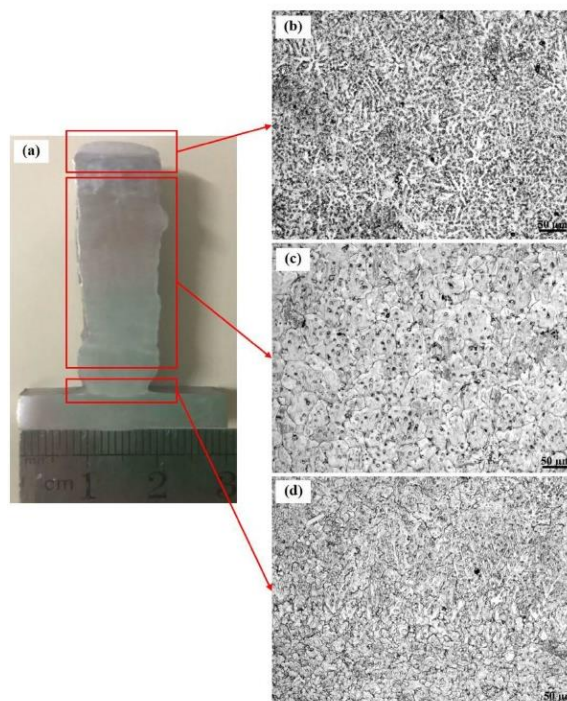


Figura 6. Microestrutura da liga AZ80M depositada pelo processo GTAW-MADA. (a) Seção de corte, (b) Zona Superior, (c) Zona intermediária, (d) Zona Inferior. (Guo, *et al.*, 2021)

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.jrmhm.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., Sevel, P., Solomon, I. J. and Tanushkumar, 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/microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V”. *Materials science & Engineering A*, 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 Manufacturing*, 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*.