

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM PEÇAS IMPRESSAS: UMA REVISÃO

Rute Borges Miranda dos Santos, rute.borges@live.com
Rodrigo Souza Pimenta, souzapimentarodrigo@gmail.com
Maksym Ziberov, mzyberov@unb.br

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília-DF.

Resumo: A manufatura aditiva baseia-se na fabricação de peças através de camadas depositadas sucessivamente. Ao utilizar a manufatura aditiva para fabricação de peças e componentes, tem-se a otimização de etapas, economia de materiais, baixo custo de fabricação, baixo impacto ambiental e a possibilidade de construir objetos complexos. Os metais, as cerâmicas e os polímeros são exemplos de matérias primas que podem ser utilizadas na fabricação de peças por manufatura aditiva. Para alcançar produtos finais com a qualidade necessária para sua aplicação, os parâmetros utilizados no processo e as propriedades dos materiais utilizados tornam-se essenciais. Devido a isso, após a fabricação, um dos principais ensaios que se deve submeter a peça final é o ensaio de tração, que nos retorna parâmetros máximos de tensão antes da ruptura, tensão limite de escoamento e a resistência à deformação. Tais propriedades são relevantes para determinar se a peça que foi fabricada é adequada para a aplicação desejada, ou se é necessário realizar algum tratamento térmico posteriormente para que ela atinja as propriedades necessárias. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão dos estudos encontrados na literatura acerca das propriedades mecânicas de peças fabricadas por manufatura aditiva posteriormente submetidas ao ensaio de tração e por fim, analisar o melhor método de deposição utilizado que apresenta resultados mais satisfatórios nos ensaios de tração. Os métodos de deposição analisados foram baseados no método de fabricação WAAM que compreende os métodos de deposição GMAW, CMT e suas variações, GTAW, PAW e processos híbridos. Através da análise da literatura, foi possível relacionar os materiais utilizados e seus respectivos métodos de deposição com os resultados dos ensaios de tração. Portanto, foram identificadas as vantagens e limitações em cada método de deposição após as peças passarem pelo ensaio de tração.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, WAAM, CMT, Ensaio de Tração.

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) conhecida na nomenclatura em inglês como *Additive Manufacturing* (AM) permite a fabricação de peças inicialmente modeladas tridimensionalmente (3D), que passam por sucessivas impressões ao serem depositadas camada sobre camada de determinado material. O processo permite que geometrias complexas sejam fabricadas em uma única etapa sem as limitações que a fabricação convencional propicia. Além disso, o tempo e custo para fabricação apresentam-se reduzidos neste tipo de processo, desencadeando uma melhora em etapas posteriores como o abastecimento, armazenamento e distribuição da peça final. Diferentes tipos de materiais podem ser utilizados na fabricação, são eles: os polímeros, as cerâmicas e os metais, atualmente o metal é o grupo mais utilizado em setores industriais odontológicos, de construção e aeroespacial. A utilização desse material no processo impacta de forma positiva o meio ambiente e produz peças com boa qualidade (Vafadar *et al.*, 2021).

Os metais são aplicáveis em diversos campos da engenharia e sua crescente utilização se dá com base nos estudos sobre suas propriedades e comportamento sob diversas condições. As propriedades mecânicas do metal que são mais relevantes para estudos de engenharia se relacionam a resistência do material ao ser submetido a esforços. Expor o corpo de prova metálico a esforços de tração, permite que seja obtida a curva de tensão-deformação que fornece dados relevantes para que sejam determinadas suas características. Através do ensaio de tração, é possível obter a máxima tensão que o material suporta sem se deformar permanentemente, o quanto o material resiste à deformação e determina também quanto da tensão deixa de ser proporcional à deformação conforme o esforço aplicado (Chiaverini, 1986). A Fig. 1 demonstra as aplicações que a MA de metais possui em diversas áreas.

Assim, o trabalho tem como objetivo apresentar os métodos de deposição utilizados na manufatura aditiva de metais, como é o caso dos processos GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), CMT (*Cold Metal Transfer*), GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), PAW (*Plasma Arc Welding*) e processo híbrido. Além disso, destacar os pontos positivos e negativos encontrados das propriedades mecânicas das peças fabricadas pelos métodos descritos que foram submetidas a ensaios de tração.

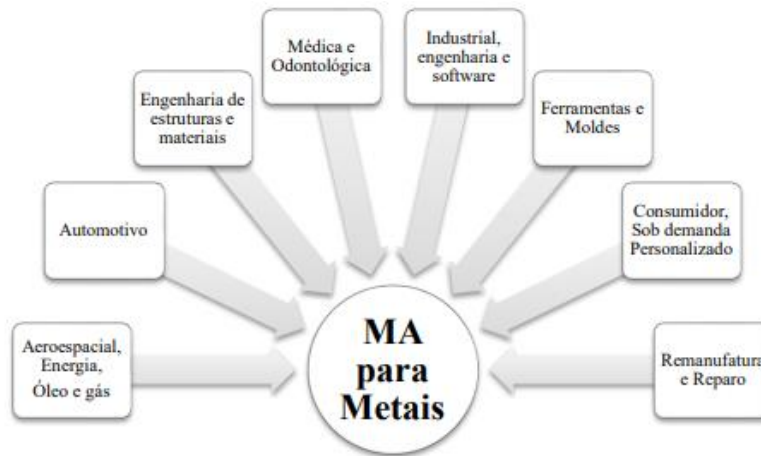


Figura 1. Aplicação da manufatura aditiva em metais (adaptado de Milewski, 2017).

2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM PEÇAS IMPRESSAS

A manufatura aditiva possui métodos de deposição alternativos, como é o caso da técnica *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) que se apresenta como um método promissor na produção de grandes componentes metálicos e possui alta taxa de deposição com baixo custo de fabricação. Para que ocorra o processo é utilizada uma fonte de energia e um robô, que percorre os eixos pré-determinados no momento da deposição, o robô é alimentado por um arame de soldagem e a partir da fusão deste arame são depositadas camadas sobre camadas de metal para que seja produzida a peça. A Fig. 2 apresenta a representação da técnica com camadas depositadas e componentes para que ocorra o processo. Os tipos de deposições que podem ocorrer utilizando a técnica WAAM são: GMAW, GTAW e PAW (Wu, 2018).

O ensaio mecânico de tensão-deformação é realizado através da deformação do corpo de prova até que haja um rompimento na estrutura. Para que ocorra esse rompimento, uma carga é aplicada axialmente sob o corpo de prova que encontra-se fixado em suas extremidades na máquina de tração. Com esse ensaio é possível obter a tensão máxima suportável e alongamento até a ruptura (Callister, 2012). No caso das peças fabricadas através de manufatura aditiva, devem passar pelo processo de usinagem após a deposição de todos os cordões, para que as amostras sejam retiradas e submetidas ao ensaio de tração.

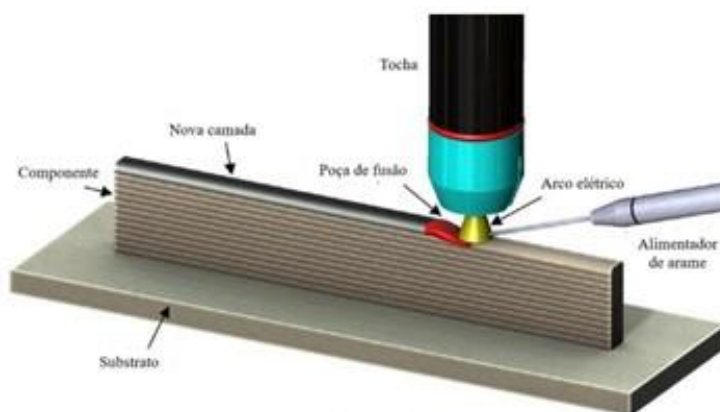


Figura 2. Processo de deposição utilizando a técnica WAAM (adaptado de McAndrew, et al. 2018).

2.1. Método de Deposição GMAW

O método de deposição GMAW consiste na fusão do arame consumível através de uma tocha. Essa tocha é alimentada através de uma fonte de energia, e durante o processo, um arco elétrico que é estabelecido entre a peça e o arame. Quando o arame é fundido, ele se deposita na base gerando uma poça de fusão e durante o processo, o arame é protegido das contaminações atmosféricas. Os gases mais utilizados são o argônio, hélio e dióxido de carbono (Planckaert, *et al.*, 2010 e Jeffus, 2012). A tocha é acoplada a um robô e possui bocal no qual o gás de proteção é eliminado. Para que o arame seja alimentado, há um alimentador de arame com diâmetros variados para que sejam utilizados diferentes tipos de matéria prima, as comumente aceitas são o alumínio, titânio, cobre e outros metais e ligas (Abe, *et al.*, 2020). O processo pode ser visualizado através da Fig. 3.

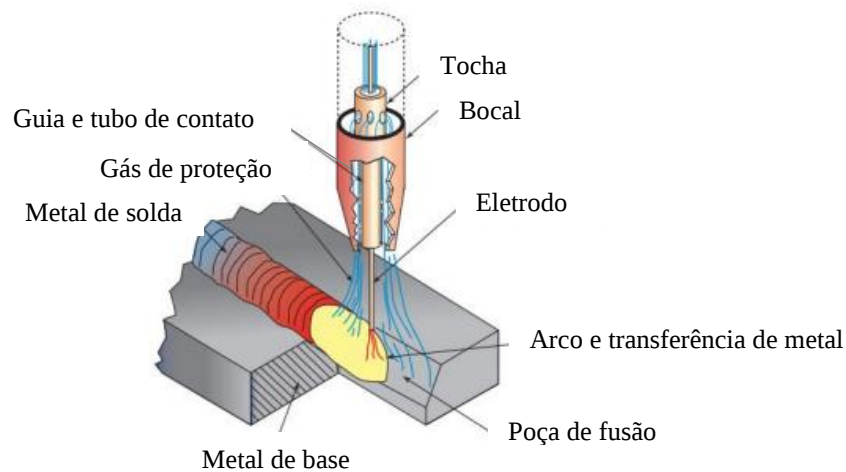
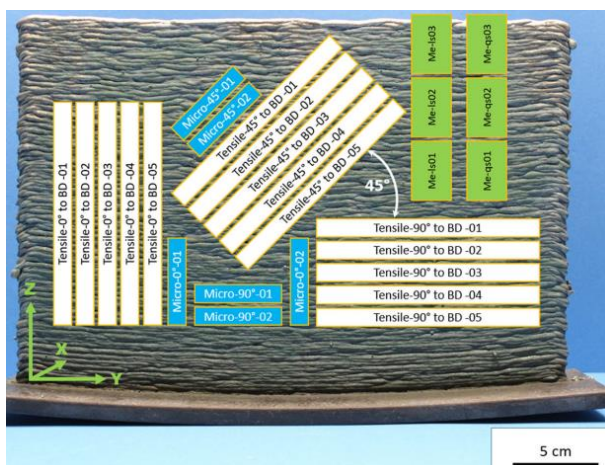
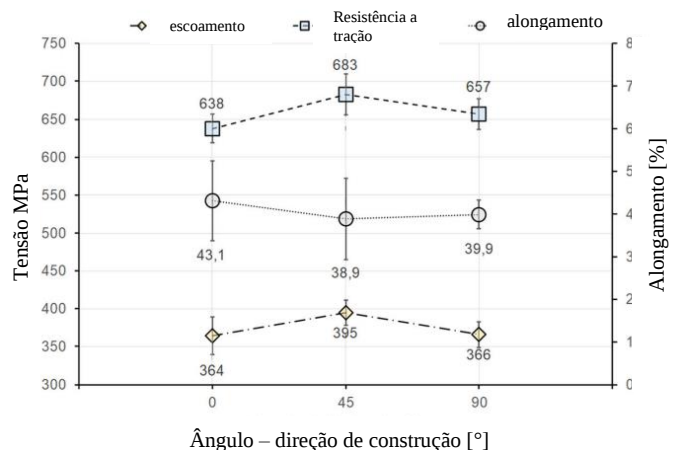


Figura 3. Representação de como ocorre o processo GMAW (Jeffus, 2012).

A direção de extração dos corpos de prova é uma característica relevante que deve ser considerada nos estudos de tração na manufatura aditiva devido à anisotropia do material que pode influenciar nos resultados. Hassel e Cartensen (2020) estudaram a resposta em tração de corpos de prova (CPs) extraídos de uma parede de liga de níquel depositada por GMAW, utilizando 3 angulações em relação à direção de construção: 0°, 45° e 90°. Na Fig. 4 observa-se os resultados obtidos, na Fig. 4 (a) tem-se as direções que os corpos de prova foram depositados, em cada direção tem-se um conjunto de 4 corpos de prova e na Fig. 4 (b) tem-se os valores de resistência a tração obtidos para os conjuntos de corpos de prova e com isso, observa-se que os corpos de prova posicionados na diagonal apresentaram uma maior resistência à tração. Além disso, ainda na Fig. 4 (b) é possível ver que para angulação de 45° e 90° houve uma redução do alongamento, permanecendo assim as propriedades mecânicas obtidas equivalentes. Segundo os autores, e melhor resistência à fadiga, encontrada no CP diagonal, ocorreu devido à existência de apenas um sistema de deslocamento na estrutura cristalina, ao contrário dos CPs horizontal e vertical onde, através de análise por microscópio eletrônico de varredura, foram verificados deslocamentos em duas direções.



(a)



(b)

Figura 4. Representação das direções de extração dos CPs e resultado para o ensaio de tração (adaptado de Hassel e Cartensen, 2020).

Nos estudos de Aldalur, *et al.*, (2020), foram depositadas três peças com material de deposição ER70S-6 fabricadas pelo método GMAW, conforme Fig. 5 e avaliadas por meio do crescimento por camada, aporte de calor, tempo de fabricação e propriedades mecânicas. O que difere essas peças foram os parâmetros de oscilação e de sobreposição, com isso, os autores concluíram que os valores obtidos de resistência a tração de cada peça e o tempo de fabricação foram semelhantes. A peça oscilante obteve um tempo menor de resfriamento de cada camada até a próxima deposição e portanto isso torna a peça fabricada com estratégia sobreposta menos atraente do ponto de vista de produtividade. As duas estratégias possuem valores próximos no ensaio de tração, a peça sobreposta apresentou resultados ligeiramente maiores para resistência ao escoamento e a tração, entretanto, menor valor de alongamento antes da ruptura. A direção de extração do corpo de prova afetou o valor obtido do alongamento e a parede com estratégia oscilatória apresentou valores mais homogêneos em todas as direções que foi extraído devido a homogeneidade dos grânulos. O ensaio de dureza mostrou grande variação na anisotropia da peça devido a direção de deposição e o teste de impacto apresentou resultados

semelhantes entre as duas estratégias. Na Fig. 5 (a) observa-se os valores obtidos de alongamento para as peças utilizadas em ambas as estratégias retiradas na posição horizontal, em azul por oscilação e em vermelho por sobreposição. E na Fig. 5 (b) observa-se os valores obtidos de alongamento das peças retiradas na posição vertical.

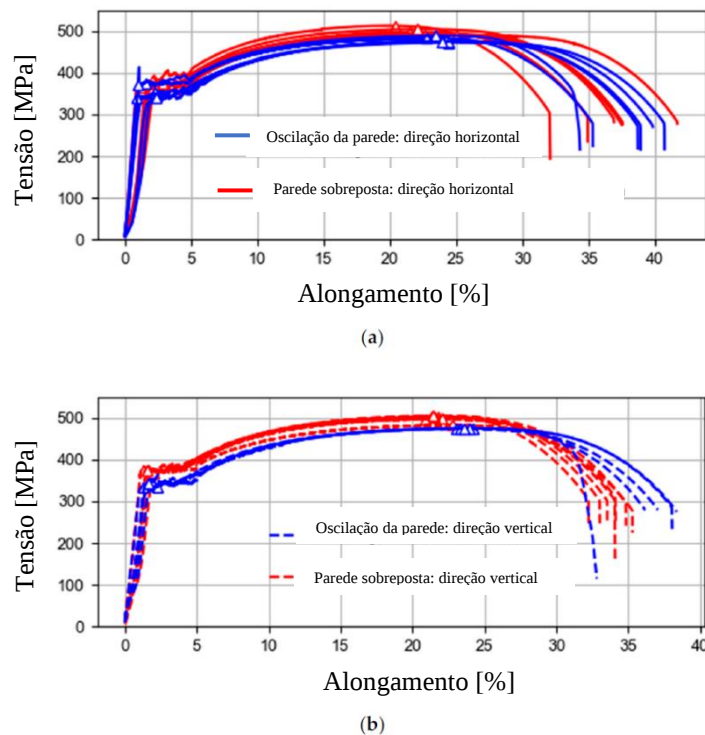


Figura 5. (a) Alongamento para as peças utilizadas em ambas as estratégias retiradas na posição horizontal e (b) alongamento das peças retiradas na posição vertical (Aldalur, et al., 2020)

2.2. Método de Deposição CMT

O processo CMT, desenvolvido pela empresa Fronius, consiste nos mesmos parâmetros do GMAW com exceção de se ter um controle maior durante o processo de deposição necessitando de menor valor de corrente durante o curto-circuito. Além disso, o arco elétrico durante a deposição é mais estável que o processo convencional GMAW (Cadiou *et al.*, 2020). O processo CMT possui baixo aporte térmico, menos respingos e aumento na qualidade final do cordão, mesmo com altas taxas de deposição. O processo CMT possui quatro diferentes modos, são eles: CMT convencional, CMT pulsado, CMT advanced e CMT pulsado advanced (Rault *et al.*, 2020).

Nos estudos feitos por Gierth, *et al.*, (2020), foi realizada a deposição a arco utilizando o processo CMT convencional, CMT advanced e o CMT pulsado advanced e posteriormente, foi realizado ensaio de tração nos corpos de prova retirados. Como o desvio padrão dos resultados obtidos foi pequeno, os autores concluíram que as peças obtidas com deposição na direção horizontal possuem propriedades de resistência à tração homogêneas, os autores também observaram que nas deposições realizadas na direção vertical, os valores de resistência à tração são menores para o processo CMT convencional e CMT advanced. Além disso, não houve diminuição no diagrama tensão-deformação antes de ocorrer a falha e, portanto, a capacidade de deformação na direção vertical dos corpos de prova fabricados com CMT convencional e CMT advanced é reduzida indicando que a direção do carregamento tem influência na força ou tensão máxima suportável. A Fig. 6 apresenta um exemplo de deposições utilizando o processo CMT convencional e os locais que os corpos de prova foram retirados.

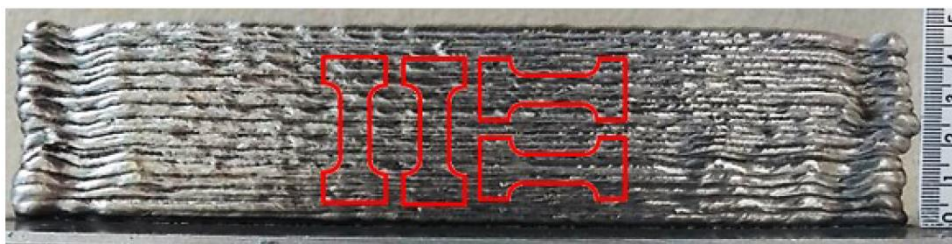


Figura 6. Corpo de prova padrão para realização do ensaio de tração (Silva *et al.*, 2018).

Assim como Hassel e Cartensen (2020), em seu trabalho, Tonelli, *et al.*, (2021) avaliaram a influência do posicionamento dos CPs em uma parede da liga AA5083 (Al-Mg) depositada pelo método CMT convencional. Na Fig. 7 (a) observa-se as direções de deposição das camadas e as direções de retirada dos corpos de prova, tal característica foi evidenciada com intuito de demonstrar a influência da direção de deposição da camada com a direção de retirada do corpo de prova. Na Fig. 7 (b) observa-se os dados de limite de resistência à tração dos corpos de prova após serem retirados na direção informada. Os resultados apontaram para o CP “L”, longitudinal à direção de deposição, uma maior resistência à tração e para o CP “T”, transversal à direção de deposição, uma menor resistência. Segundo os autores, isso ocorre devido ao fato de que as descontinuidades microestruturais se concentram nas regiões entre camadas, logo, o CP “T” apresenta maiores níveis de descontinuidades e, conseqüentemente, uma pior resposta à tração. A discordância entre os resultados dos dois trabalhos mostra como a manufatura aditiva ainda é uma área muito recente, que necessita de estudos para a definição de propriedades padrões, sendo que fatores como material e métodos de deposição apresentam grande influência.

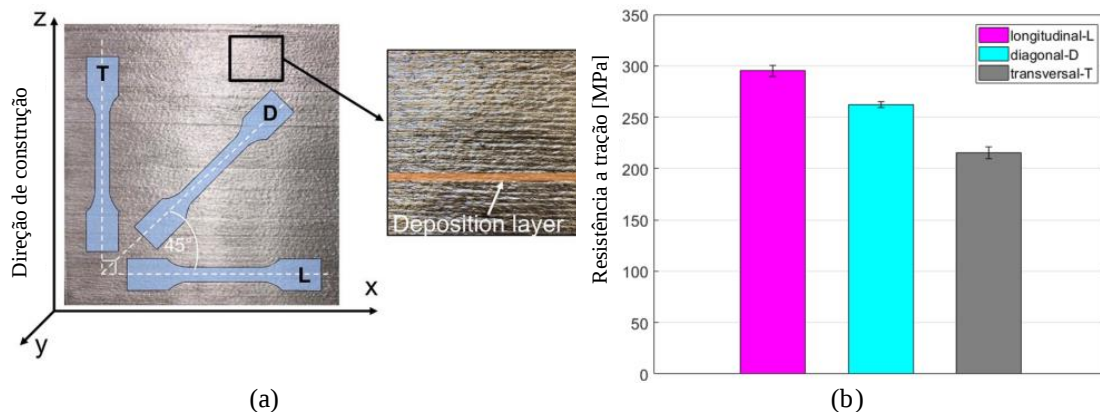


Figura 7. Representação das direções de extração dos CPs e resultado para o limite de resistência à tração (adaptado de Tonelli, *et al.*, 2021).

Outro fator de grande relevância na resposta à tração dos materiais é a utilização de tratamento térmico, e na manufatura aditiva não é diferente. Em seu trabalho, Gu *et al.*, (2020) avaliaram a influência do tratamento térmico T6 na resposta à tração em corpos de prova da liga Al-Cu4.3-Mg1.5 fabricados pelo método CMT convencional. Como apresentado pela Fig. 8, o tratamento térmico (HT - *heat treatment*) otimizou o comportamento do material quando comparado às amostras sem tratamento (AS - *as-deposited*), tanto na direção horizontal quanto na vertical, o que demonstra importância e o potencial que este pós-processamento possui.

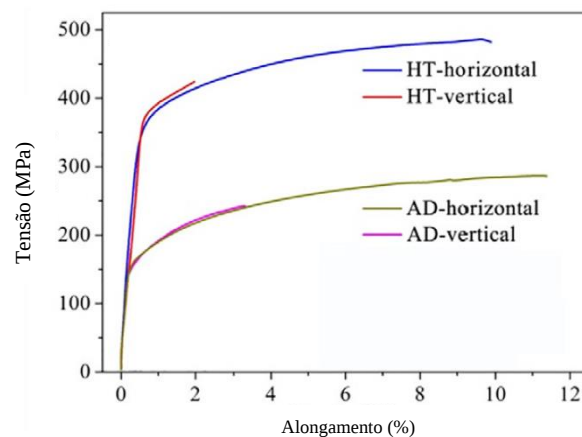


Figura 8. Curvas tensão-deformação comparativa entre os CPs com tratamento térmico (HT) e sem tratamento térmico (AD) (adaptado de Gu *et al.*, 2020).

2.3. Método de Deposição GTAW

O processo GTAW ocorre com a fusão de um eletrodo não consumível de tungstênio a partir da utilização do arco elétrico estabelecido entre o eletrodo e a peça. A alimentação do arame é feita através de um alimentador que localiza-se na lateral da tocha, que tem como propósito ter um maior controle durante a deposição, já que o processo é bastante suscetível a ruídos. A corrente utilizada é constante e na saída seu valor pode se alterar dependendo da aplicação, podendo ser então contínua, alternada ou pulsada. A vantagem em relação ao processo GMAW é a de ajuste de corrente com

valores menores e, os gases utilizados nesse processo devem ter um nível alto de pureza com teores mínimos de 99,99%, esse fator afeta a qualidade do cordão. Além disso, apresenta ampla aplicabilidade para diferentes tipos de espessuras e ligas, entretanto, é um processo caro e lento que não se aplica para produção em massa (Marques *et al.*, 2005).

Nos estudos de Qi, *et al.*, (2018), foi realizada a deposição GTAW utilizando dois eletrodos para serem os metais de adição são eles o ER2319 e ER5087 lavados em água alcalina e secos ao ar livre, logo após, foram limpos com acetona antes de ser realizada a deposição. Após preparo dos metais, foi realizado teste de tração e com isso, os autores obtiveram resultados de resistência à tração e alongamento para as deposições realizadas na horizontal superiores aos da deposição feita na direção vertical, como é possível ver na Fig. 9, em que a resistência à tração é representada por (UTS), a resistência ao escoamento por (YS) e *elongation* representa o alongamento do CP. As propriedades de resistência são melhoradas devido à adição da quantidade ideal de magnésio, entretanto a plasticidade foi reduzida, a fratura que ocorreu em ambas as direções foi a fratura frágil, ocorrendo também trincas secundárias na superfície fraturada.

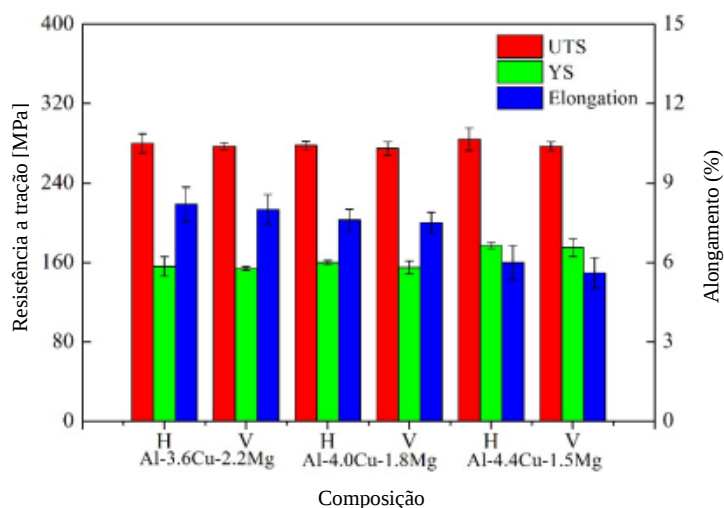


Figura 9. Propriedades de tração da liga Al-Cu-Mg (Qi, *et al.*, 2018).

2.4. Método de Deposição PAW

No processo PAW, demonstrado na Fig. 10, também é utilizado um eletrodo não consumível de tungstênio como matéria prima e a partir da constrição do arco através de um bocal o arco de plasma é direcionado à região de deposição. Este processo possui aporte de calor menor e precisão na deposição. O arco produz alta densidade de energia que aumenta a estabilidade e diminui a contaminação atmosférica, a alimentação de matéria prima ocorre dentro do bocal quando o plasma já encontra-se formado (Jia, *et al.*, 2020).

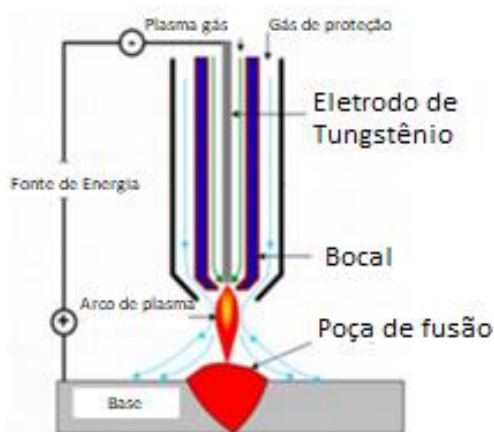


Figura 10. Representação do processo PAW (adaptado de Ding, *et al.*, 2015).

Nos estudos feitos por Artaza, *et al.* (2019), foram fabricadas peças utilizando o método PAW e o método GMAW. Os parâmetros utilizados foram os mesmos e após fabricação foi realizado ensaio de tração em ambas as peças, com isso, foram analisados os resultados de cada método e realizadas comparações. Observa-se que as peças fabricadas pelo método PAW com deposições na direção vertical apresentou bons resultados de limite de escoamento e de resistência a tração. Já as peças fabricadas pelo GMAW obtiveram melhores resultados para deposições na direção horizontal, os valores de tração diminuíram ligeiramente para as peças fabricadas em GMAW o que resultou em um aumento no alongamento,

porém as amostras com deposições na vertical apresentaram diminuição no alongamento. Isso ocorreu devido a pequenos defeitos encontrados nas amostras que influenciam na variabilidade do alongamento.

A Fig. 11 representa os resultados de alongamento, resistência à tração e impacto dos corpos de prova. Observa-se que os CPs fabricados por PAW apresentam maiores valores de resistência à tração para ambas as tiragens horizontal e vertical, enquanto o GMAW apresenta baixa resistência à tração. Entretanto, isso muda ao observar o alongamento do CP, os CPs retirados na horizontal fabricados por GMAW apresentam valor maior, apesar disso, os CPs fabricados por PAW apresentam valores próximos. Na resistência ao impacto observa-se que o processo PAW com retirada do CP na vertical e GMAW na vertical apresentam valores próximos. No geral ao comparar os resultados dos corpos de prova, os fabricados por PAW e GMAW retirados na horizontal apresentaram bons resultados, pois ficaram acima do limite estabelecido na figura. O GMAW vertical ficou abaixo do limite para a resistência a tração e alongamento, entretanto, apresentou ótimos resultados para impacto.

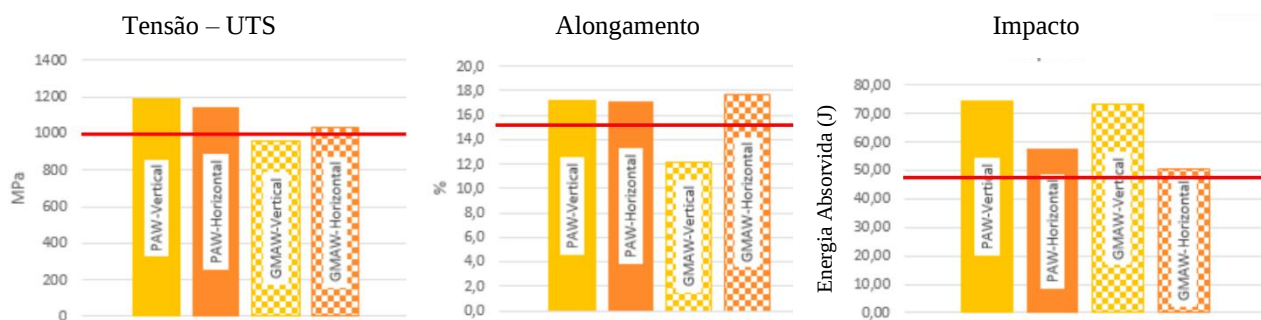


Figura 11. Representação do processo PAW e GMAW (adaptado Artaza, *et al.*, 2019).

2.5. Método de Deposição Híbrido

Além dos métodos de deposições já citados, é possível realizar a deposição do metal utilizando a combinação de mais de um método, forma conhecida como deposição híbrida. Pardal *et al.* (2019) explicam em seu trabalho que o estudo feito por eles consiste em deposição de material utilizando o método CMT-Laser. Na Fig. 12 observa-se os resultados obtidos durante a deposição, na Fig. 12 (a) e (c) tem-se a parede depositada pelo método CMT convencional e a vista da seção transversal. Nestas, observa-se a irregularidade dos cordões e a diminuição da largura efetiva da parede, já na Fig. 12 (b) e (d) tem-se a parede depositada pelo método híbrido de CMT-Laser e é possível observar que não houve a mesma diminuição da largura efetiva da parede e os cordões apresentaram melhor regularidade na deposição.

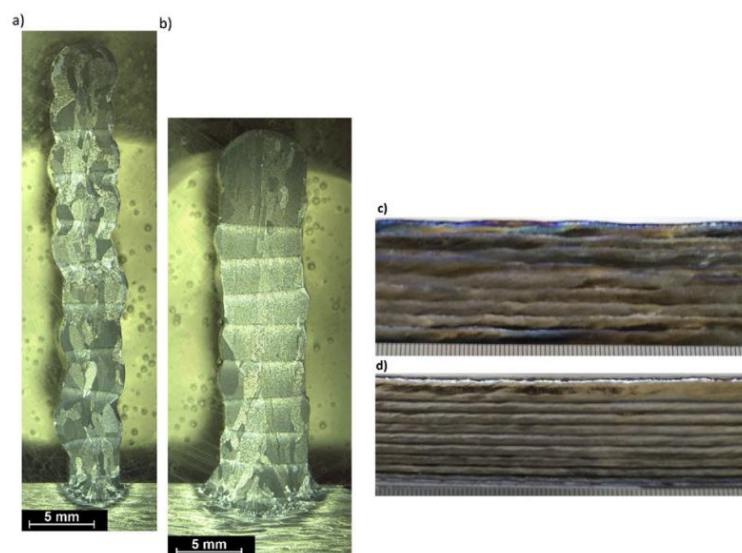


Figura 12. Corte transversal e vista lateral das amostras: a) e c) deposição CMT convencional e b) e d) deposição híbrida de CMT-Laser (Pardal *et al.*, 2019)

Além dos métodos de deposição convencionais, a utilização de processos híbridos na manufatura aditiva também apresenta grande destaque devido às melhorias que podem gerar nas propriedades finais dos produtos. Em seu trabalho,

Miao *et al.*, (2020) demonstram a melhoria na resposta à tração do método LAHAM (*Laser-Arc Hybrid Additive Manufacturing*) em relação ao arco elétrico convencional através de ensaios de tração, cujo resultado é apresentado pela Fig. 13. Com a melhoria, o limite de resistência à tração e o limite de escoamento tiveram um aumento de 7,56% e 8,45% respectivamente.

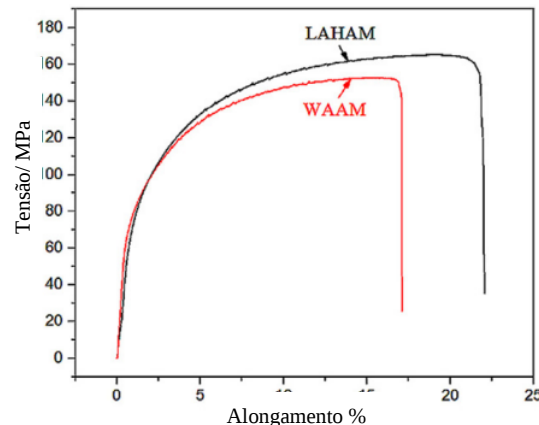


Figura 13. Curva tensão deformação para os métodos híbrido e convencional (Miao *et al.*, 2020).

Duarte *et al.*, (2020) comparam a utilização do processo híbrido de WAAM com forjamento a quente com o método WAAM convencional. Dentre os parâmetros analisados, foi feito um estudo sobre o comportamento à tração e os resultados mostraram que, utilizando o método híbrido houve um aumento de 25% na tensão de escoamento e de 8,4% no limite de resistência à tração. A curva tensão deformação está apresentada na Fig. 14.

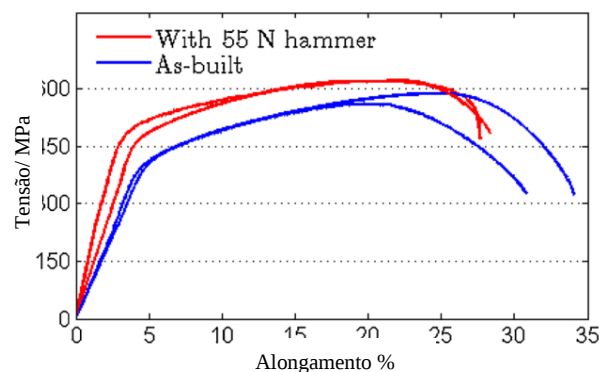


Figura 14. Curva tensão deformação para os métodos híbrido (em vermelho) e convencional (em azul) (Duarte *et al.*, 2020).

3. CONCLUSÃO

De acordo com a literatura, observa-se que a direção em que o corpo de prova é extraído possui grande relevância para os dados de resistência à tração e de anisotropia da peça. Além disso, o pós-processamento, como é o caso de tratamentos térmicos realizados no corpo de prova anterior ao ensaio de tração influencia nas propriedades finais da peça. Em geral, os CPs submetidos a tratamento térmico apresentam resistência à tração maior quando comparados a CPs que não passaram pelo procedimento.

Os estudos mostraram que a resistência à tração de peças retiradas na horizontal apresentou valores iguais ou maiores quando comparados com os das peças retiradas na direção vertical para as deposições GMAW, CMT e GTAW. Apenas o método de deposição PAW obteve valores satisfatórios de resistência à tração e limite de escoamento para CPs retirados na vertical. Observa-se que a utilização do tratamento térmico favorece que esse valor de resistência a tração seja maior nos métodos CMT e GTAW, porém, ao realizar um procedimento para obter a melhora de uma propriedade, outras apresentam valores menores como é o caso da plasticidade e do aparecimento de trincas no CP fabricado pelo método GTAW após sofrer adição de componentes, como por exemplo, o magnésio.

O método híbrido possui destaque devido aos valores obtidos para tensão de escoamento e resistência a tração. Nos CPs estudados, com o método híbrido houve obtenção de melhores resultados ao utilizar dois métodos de deposição simultaneamente, diferente dos estudos realizados para os métodos isolados. Os CPs fabricados com métodos de deposição isolados apresentam pontos positivos e negativos, diferente do método híbrido que após passar pelo tratamento

térmico apresentou aumento em todas as propriedades mecânicas analisadas de tensão de escoamento e resistência à tração.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento da Engenharia Mecânica (ENM), Faculdade de Tecnologia (FT), Universidade de Brasília (UnB), Decanato de Ensino de Graduação (DEG) pelo apoio e suporte laboratorial/financeiro para participação do congresso.

5. REFERÊNCIAS

- Abe, T., Kaneko, J. and Sasahara, H. 2020. "Thermal sensing and heat input control for thin-walled structure building based on numerical simulation for wire and arc additive manufacturing". *Additive Manufacturing*, Vol. 35, p. 1-8.
- Aldalur, E. Veiga, F. Suárez. A., Bilbao, J. Lamikiz, A. 2020. "Analysis of the Wall Geometry with Different Strategies for High Deposition Wire Arc Additive Manufacturing of Mild Steel". *Metals*, 10, 892; doi:10.3390/met10070892.
- Artaza, T. Suárez, A. Murua, M. García, J.C. Tabernero, I. Lamikiz, A. 2019. "Wire Arc Additive Manufacturing of Mn4Ni2CrMo Steel: Comparison of Mechanical and Metallographic Properties of PAW and GMAW". *Procedia Manufacturing*. Vol. 41, p 1071–1078
- Cadiou, S., Courtouis, M., Carin, M., Berckmans, W. and Le masson, P. 2020. "3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (CmtWaam)". *Additive Manufacturing*, Vol. 36, p. 1-11.
- Callister, W.D. Rethwisch, D.G. 2012. *Ciência e Engenharia de Materiais*. Editora LTC, 8ª Ed. ISBN 978-85-216-2124-9.
- Chiaverini, V. 1986. *Tecnologia Mecânica – Estrutura e Propriedades de Ligas Metálicas*. Editora McGraw-Hill Ltda, Vol. 1, 2.
- Ding, D. et al. 2015. "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 81, n. 1, p. 465–481.
- Duarte, V. R., Rodrigues, T. A., Schell, N., Miranda, R. M., Oliveira, J. P., & Santos, T. G. 2020. "Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM)". *Additive Manufacturing*, 35, 101193.
- Gierth, M. Henckell, P. Ali, Y. Scholl, J. Bergmann, J. P. 2020. "Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminium Alloy AlMg5Mn with Energy-Reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW)". *Materials*. Vol. 13, p-2671. <https://doi.org/10.3390/ma13122671>
- Gu, J., Gao, M., Yang, S., Bai, J., Zhai, Y., & Ding, J. 2020. "Microstructure, defects, and mechanical properties of wire+ arc additively manufactured AlCu4. 3-Mg1. 5 alloy". *Materials & Design*, 186, 108357.
- Hassel, T. Carstensen, T. 2020. "Properties and anisotropy behaviour of a nickel base alloy material produced by robot-based wire and arc additive manufacturing". *Welding in the World*, 64(11), 1921-1931.
- Jeffus, L. 2012. *Welding Principles and Applications*. DELMAR CENGAGE Learning Ed.70th. 962p.
- Jia, C.; Liu, W.; Chen, M.; Guo, M.; Wu, S.; Wu, C. 2020. "Investigation on arc plasma, droplet, and molten pool behaviours in compulsively constricted WAAM". *Addit. Manuf.* 34, 101235.
- Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q. 2005. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. UFM, 362p. ISBN:8570414374.
- McAndrew, A., Rosales, M., Colegrove, P., Honnige, J., Ho, A., Fayolle, R., Eyitayo, K., Stan, L., Sukrongpang, P., Crochemore, A. and Pinter, Z. 2018. "Interpass Rolling of Ti-6Al-4V Wire + Arc Additively Manufactured Features for Microstructural Refinement". *Additive Manufacturing*, Vol. 21, p. 340-349. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.006>.
- Miao, Q., Wu, D., Chai, D., Zhan, Y., Bi, G., Niu, F., & Ma, G. 2020. "Comparative study of microstructure evaluation and mechanical properties of 4043 aluminum alloy fabricated by wire-based additive manufacturing". *Materials & Design*, 186, 108205.
- Milewski, J. O. 2017. *Additive Manufacturing of Metals*. Springer, ISBN: 978-3-319-58205-4.
- 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.
- Planckaert, J., Djermoune, E., Brie, D., Briand, F. and Richard, F. 2010. "Modeling of MIG/MAG welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies". *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, Issue 4, p. 1004-1020. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.07.011>
- Qi, Z.; Cong, B.; Qi, B.; Sun, H.; Zhao, G.; Ding, J. 2018. "Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys". *J. Mater. Process. Tech.* 2018, 255, 347–353.
- Raut, L.P., Taiwade, R, V. 2020. "Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions". *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 30 p. 7. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05871-5>
- Silva, L. J. Souza, D.M. Araujo, D.B. Saad, N.S. Reis, R.P. Scotti, A. 2018. "Gerenciamento Térmico via Resfriamento Ativo por Quase-imersão Aplicado à Manufatura Aditiva por Fusão-Deposição a Arco". *Associação Brasileira de Soldagem*. XLIV CONSOLDA.

- Tonelli, L., Laghi, V., Palermo, M., Trombetti, T., & Ceschini, L. 2021. "AA5083 (Al–Mg) plates produced by wire-and-arc additive manufacturing: effect of specimen orientation on microstructure and tensile properties". *Progress in Additive Manufacturing*, 6(3), 479-494.
- Vafadar, A. 2021. "Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges". *Applied Sciences, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 11, n. 3, p. 1213.
- Wu, B. Pan, Zengxi. Ding, D. Cuiuri, D. Li, H. Xu, J. Norrish, J. 2018. "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement". *Journal of Manufacturing Processes*, v. 35, p. 127–139, 2018.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

TENSION STRENGTH IN PRINTED PARTS: A REVIEW

Rute Borges Miranda dos Santos, rute.borges@live.com
Rodrigo Souza Pimenta, souzapimentarodrigo@gmail.com
Maksym Ziberov, mziberov@unb.br

University of Brasilia, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Zip code 70910-900, Brasilia-DF, Brazil

Abstract: Additive manufacturing is based on the manufacture of parts through successively deposited layers. By using additive manufacturing to manufacture parts and components, there is the optimization of steps, material savings, low manufacturing cost, low environmental impact and the possibility of building complex objects. Metals, ceramics and polymers are examples of raw materials that can be used in additive manufacturing. To achieve final products with the quality required for their application, the parameters used in the process and the properties of the materials used become essential. Due to this, after manufacturing, one of the main tests that the final part must undergo is the tensile test, which returns maximum parameters of stress before rupture, yield strength and resistance to deformation. Such properties are relevant to determine if the part that has been manufactured is suitable for the desired application, or if it is necessary to carry out some heat treatment afterwards in order to reach the necessary properties. Thus, this work aims to present a review of the studies found in the literature about the mechanical properties of additive manufactured parts that were latter submitted to the tensile test and, finally, to analyze the best deposition method used that presents most satisfactory results in the tensile tests. The deposition methods analyzed were based on the WAAM manufacturing method which comprises the GMAW-CMT deposition methods and their variations, GTAW, PAW and hybrid processes. Through the analysis of the literature, it was possible to relate the materials used and their respective deposition methods and the results of the tensile tests. In addition, they were identified as advantages and limitations of each method of deposition after tensile test.

Keywords: Additive manufacturing, WAAM, CMT, Tensile Test.