

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS FABRICADAS PELO PROCESSO WAAM: UMA REVISÃO

André Luis Silva da Costa, andr.luis27@hotmail.com
Maksym Ziberov, mziberov@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 (MA) permite a customização de peças, confecção de geometrias complexas e fabricação de componentes de alto desempenho. As principais tecnologias desenvolvidas para fabricação de peças em manufatura aditiva são: jato de aglutinante (binder jetting), fusão do leito de pó (power bead fusion), laminação de folhas (sheet lamination), deposição com energia direcionada (directed energy deposition), extrusão de material (material extrusion), jateamento de material (material jetting) e fotopolimerização em cuba (vat photopolymerization). Entre esses processos citados, quatro tem aplicação para fabricação de estruturas metálicas, sendo eles: binder jetting, power bead fusion, sheet lamination e directed energy deposition (DED), destacando o processo DED por causa da alta densidade de energia. Dentre os processos DED destaca-se a Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), processo que utiliza o arco elétrico como fonte de calor e arame na deposição camada por camada, o que oferece uma série de vantagens como, por exemplo, uma fonte de calor de maior eficiência. Há subdivisões do processo WAAM, como, por exemplo, o processo de deposição Cold Metal Transfer (CMT) que é considerado promissor para MA. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre a influência dos parâmetros de deposição do processo CMT nas propriedades mecânicas de materiais metálicos impressos, além disso, explorar quais parâmetros apresentam maior predomínio sobre as propriedades mecânicas e possíveis soluções para melhorar as propriedades mecânica em peças impressas que apresentem baixo rendimento. Conclui-se, através da análise da literatura, que o controle dos parâmetros de deposição é extremamente importante tanto para a qualidade geométrica das camadas quanto para a microestrutura do material impresso, que está diretamente relacionada com as propriedades mecânicas. Sendo assim, os principais parâmetros de deposição (direção de deposição, ângulo de deposição, velocidade de deslocamento, corrente, diâmetro do arame, taxa de deposição, vazão de gás e taxa de resfriamento) devem ser controlados para se obter propriedades estáticas e dinâmicas aceitáveis das peças obtidas via WAAM, assegurando a integridade mecânica das peças fabricadas. Dentre as principais correlações pode-se destacar que a direção de deposição tem influência no ciclo térmico, o ângulo da tocha possui influência dinâmica da poça de fusão e nas componentes das forças do arco, a velocidade de deslocamento é proporcional a taxa de resfriamento e a taxa de resfriamento influencia no aumento de tensões residuais e distorções. Além disso, os parâmetros que possuem maior predomínio são os parâmetros primários como a corrente e a taxa de resfriamento.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, WAAM, CMT, DED, Propriedades mecânicas.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, intensificou-se a necessidade de confeccionar componentes customizáveis, com alto desempenho e grande complexidade geométricas, o que os tornavam difíceis de fabricar utilizando as metodologias tradicionais. Neste sentido, entende-se o interesse crescente nos métodos de Manufatura Aditiva (MA), uma vez que este método é capaz de produzir essas geometrias com maior facilidade e para uma grande gama de materiais. A MA usa modelos tridimensionais (3D) criados em software de desenho auxiliado por computador (CAD) para produzir produtos (Kumar e Sathiy, 2021), onde são, geralmente, adicionadas camadas sucessivas do material para que uma sobre a outra formem a geometria do objeto final (Ngo, 2018).

Conforme a norma ISO/ASTM 52900 (ISO, 2015) há sete tecnologias MA desenvolvidas para fabricação componentes: Jato de Aglutinante (Binder Jetting - BJ), Fusão em Leito de Pó (Power Bead Fusion - PBF), Laminação de Folhas (Sheet Lamination - SL), Deposição com Energia Direcionada (Directed Energy Deposition - DED), Extrusão do Material (Material Extrusion - ME), Jateamento de Material (Material Jetting - MJ) e Fotopolimerização em Cuba (Vat Photopolymerization - VP). Dentre esses processos, destacam-se apenas quatro para fabricação de componentes metálicos: BJ, PBF, SL, e DED. O método DED, usa fontes de alta energia no material de trabalho e em um substrato

para fundi-lo e depositá-lo, tem sido amplamente utilizado para produzir materiais de alto desempenho, como metais compostos e superligas (Kumar e Sathiya, 2021). Existem diversos métodos para fazer a adição de metal por DED, dentre eles destaca-se o *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) que é uma abordagem DED baseada em arame e que usa um arco elétrico como fonte de calor para fundir o arame e depositá-lo em uma peça pré-formada, camada por camada, logo o uso do arco elétrico oferece uma série de vantagens de processamento como uma fonte de calor de maior eficiência (Cunningham *et al.*, 2018). Ainda em WAAM, existem subdivisões, considerando suas características, o processo de deposição *Cold Metal Transfer* (CMT), que foi desenvolvido, na Áustria, pela empresa Fronius, é considerado promissor para MA devido ao baixo aporte térmico, deposição controlada e altas taxas de deposição (Selvi *et al.*, 2018). Esse processo se diferencia, pois quando o arame entra em contato com a poça de fusão, uma alta corrente de curto-circuito flui para fundir o arame, e, logo após a formação da gota, ocorre a diminuição da corrente com retração do arame, garantido assim o desprendimento da gota (Balamurugan e Ranjith, 2018).

Com o avanço das tecnologias e o aumento do uso da manufatura aditiva de metais na fabricação de peças, o estudo da microestrutura resultante dos parâmetros desse processo e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas das peças fabricadas é de grande importância para atender aos requisitos industriais e garantir a segurança no controle de falhas mecânicas do material impresso (Herzog *et al.*, 2016). No entanto, a desvantagem e/ou desafio do MA é a presença de defeitos que estão inevitavelmente contidos no processo de fabricação ou o acabamento superficial (Musuo *et al.*, 2018). Dentre os defeitos mais comuns que surgem em MA estes são: porosidade devido à falta de fusão, altos níveis de tensão residuais devido aos elevados gradientes térmicos (Wu *et al.*, 2018) e, segundo Tian, *et al.* (2019), compostos intermetálicos frágeis que diminuem drasticamente as propriedades mecânicas do componente.

Portanto, o objetivo deste artigo é realizar uma revisão sobre a influência dos parâmetros de deposição do processo CMT nas propriedades mecânicas dos materiais metálicos impressos, além disso, pretende-se apresentar quais parâmetros têm maior predomínio sobre as propriedades mecânicas e possíveis soluções para comportamento mecânico inferior quando comparado a peças obtidas tradicionalmente.

2. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.1. Direção de deposição

Alberti, *et al.* (2014) relataram que a trajetória de deposição tem influência no ciclo térmico durante a deposição o que pode modificar as características finais da peça. Desta forma, é necessário conhecer as principais trajetórias de construção: unidirecional sem retrocesso, nesse método a deposição ocorre sempre em um único sentido, unidirecional com retrocesso, metodologia em que a deposição ocorre em duplo sentido de deposição, além de bidirecional sem retrocesso e bidirecional com retrocesso (Fig. 1). Além disso, a direção de crescimento dos grãos segue o fluxo de calor com o gradiente máximo de temperatura crescendo perpendicularmente à interface da poça de fusão (Safarzade *et al.*, 2020). Sendo assim, estruturas geradas com sentido unidirecional sem retrocesso tendem a ser mais homogêneas com direção de solidificação constate em todas as camadas, entretanto, nas deposições sentido unidirecional com retrocesso, a direção de crescimento muda a cada camada, interrompendo o crescimento das dendritas o que torna as camadas menos homogêneas. O sentido com retrocesso tende a ter tensões residuais menores na parte central devido ao menor gradiente térmico (Alberti *et al.*, 2014).

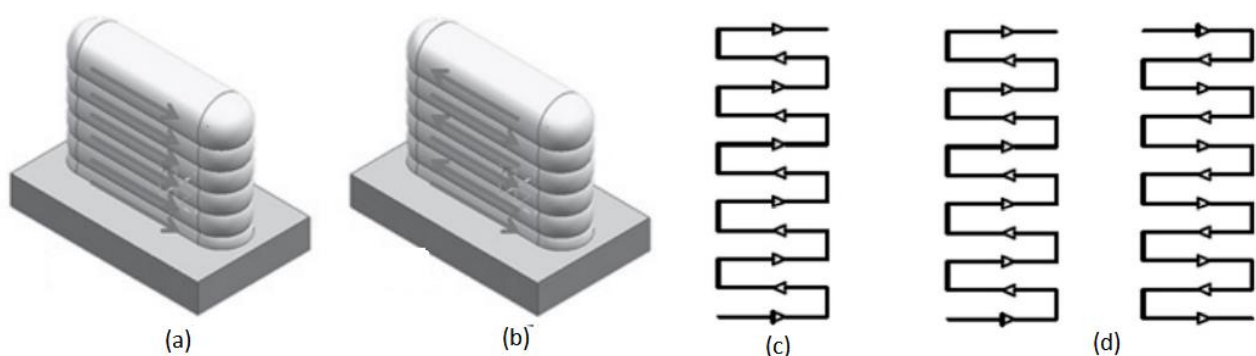


Figura 1. Direção de deposição: (a) unidirecional sem retrocesso; (b) unidirecional com retrocesso (Alberti *et al.*, 2014); (c) bidirecional sem retrocesso e (d) bidirecional com retrocesso (Chandrasekaran *et al.*, 2020).

Chandrasekaran, *et al.* (2020) investigaram o desempenho das propriedades estruturais de materiais com graduação funcional na indústria naval. Assim, os autores produziram uma liga de aço inoxidável duplex revestido com aço carbono-manganês a qual foi aplicada em *risers* marinhos, atuando assim em ambiente corrosivo. O processo utilizado foi o CMT convencional adotando programação CNC com código G, conforme a Fig. 2. A deposição selecionada foi bidirecional com retrocesso (Fig. 1 (d)). Segundo os autores, esta estratégia foi selecionada pois leva ao rompimento da formação do grão colunar durante o processo de solidificação. Portanto, ocorreu uma variação na microestrutura do corpo de prova por causa da variação do gradiente térmico das sucessivas camadas.

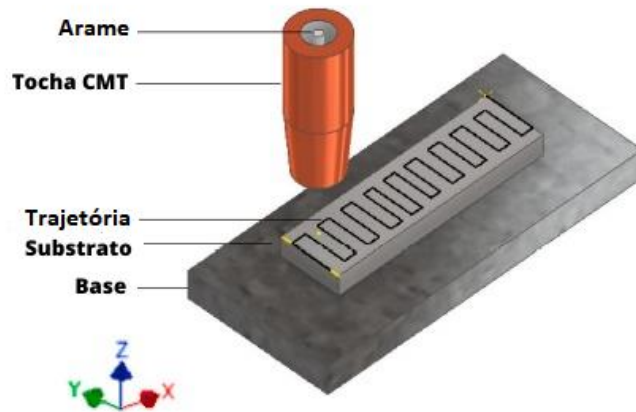


Figura 2. Trajetória de deposição da liga (Chandrasekaran *et al.*, 2020).

No estudo de Seow, *et al.* (2020) foi realizada uma investigação das características microestruturais de defeitos semelhantes a trincas formados na liga de Inconel 718 pelo processo *Plasma Arc Welding* (PAW). Uma parede foi depositada com trajetória de deposição igual à que pode ser observada na Fig. 3 (a). Os autores atribuem os defeitos presentes nas camadas depositadas ao caminho oscilante da tocha no eixo X (Fig. 3 (a)), pois as trincas, conforme a Fig. 3 (b), são fortemente afetados pelas condições térmicas durante a deposição. A Figura 3 (c) representa esquematicamente esses defeitos, que alternam acima e abaixo da linha central, e provavelmente são iniciados na passagem de retorno, onde a poça de fusão é aumentada a partir do calor residual da passagem anterior. Neste caso, os autores obtiveram no corpo de prova paralelo à deposição, tenacidade à fratura menor do que na amostra perpendicular à deposição, enfatizando, assim, a anisotropia da liga causada pela presença de trincas na direção X que pode ser amenizado ao reduzir o aporte térmico. Logo, o controle da entrada de calor pode ser obtido adaptando-se a estratégia de deposição, como o uso de caminhos de tocha paralelos sem retrocesso em vez de oscilantes.

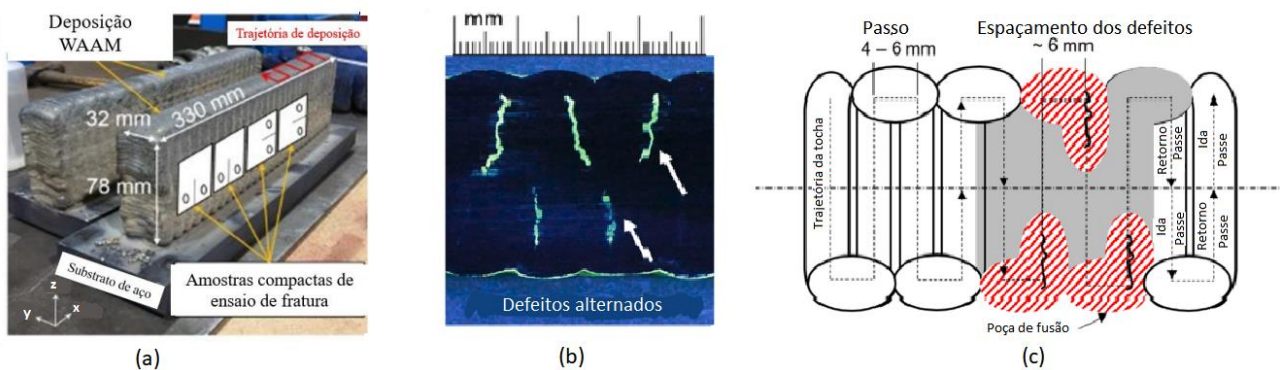


Figura 3. (a) Paredes depositadas pela trajetória oscilatória da tocha e amostras de corpo de prova; (b) Defeitos alternados e (c) Esquema de possíveis zonas quentes e frias que leva a um padrão de defeito alternado (adaptado de Chandrasekaran *et al.*, 2020).

2.2. Ângulo da tocha

Su e Chen (2019) realizaram o estudo sobre o impacto de diferentes ângulos da tocha na qualidade do cordão depositado no processo CMT convencional, pois, segundo esses autores, o ângulo da tocha tem um efeito significativo na dinâmica da poça de fusão, geometria do cordão depositado e defeitos na formação de materiais obtidos por MA. Os ângulos da tocha são especificados como ângulo de trabalho α e ângulo de deslocamento β , como é apresentado na Fig. 4. Os ângulos estão especificados na Fig. 4 (b).

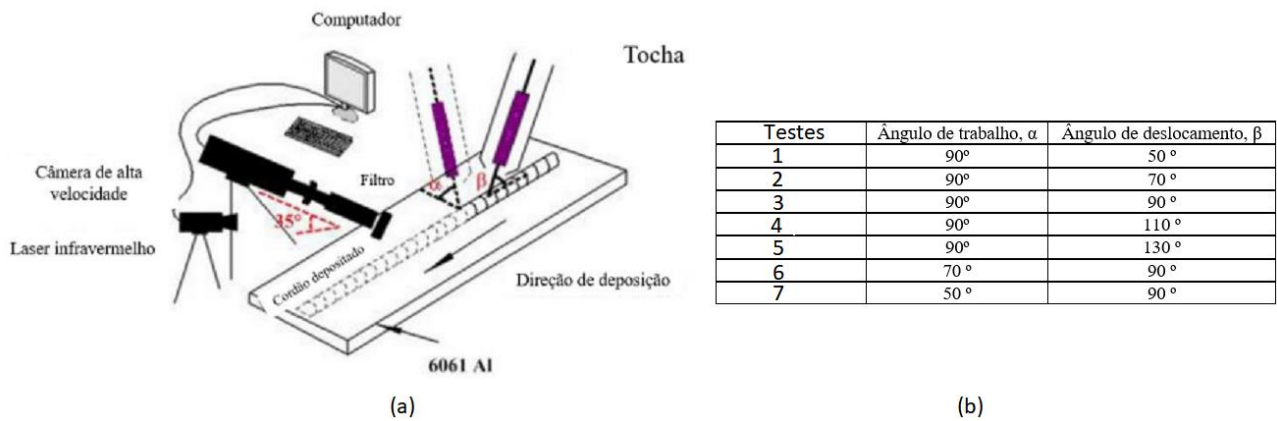


Figura 4. (a) Representação dos ângulos de trabalho α e de deslocamento β e (b) Variação dos ângulos de trabalho e de deslocamento (adaptado de Su e Chen, 2019).

Assim, a mudança do ângulo da tocha altera tanto o efeito do arco sobre a poça de fusão como as componentes da força de impacto, que agem na poça de fusão, o que pode levar a possíveis defeitos. Logo, quando $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 90^\circ$ (Fig. 5 (a)), o cordão depositado apresentou alta porosidade atribuída à força do arco (F_v) que é mais forte e à força de flutuação (F_h) que é mais fraca na poça de fusão o que reduz a velocidade de escape dos gases e consequentemente a formação de poros. Além disso, a mudança no ângulo α afeta o fluxo do metal fundido na poça de fusão e o ângulo β melhora a faixa de flutuação e a estabilidade da poça de fusão. Em relação a α e β , quando $\alpha = 90^\circ$, $\beta < 90^\circ$ ou $\alpha = 90^\circ$, $\beta > 90^\circ$ ou $\alpha < 90^\circ$, $\beta = 90^\circ$ há redução da probabilidade de formação de poros nos grânulos depositados. De fato, a força F_v na superfície da poça de fusão é relativamente fraca, a força de flutuação, F_h , da poça de fusão é relativamente grande, e a poça de fusão na direção de deposição é mais volátil, o que aumenta a velocidade de escape da bolha (Su e Chen, 2019).

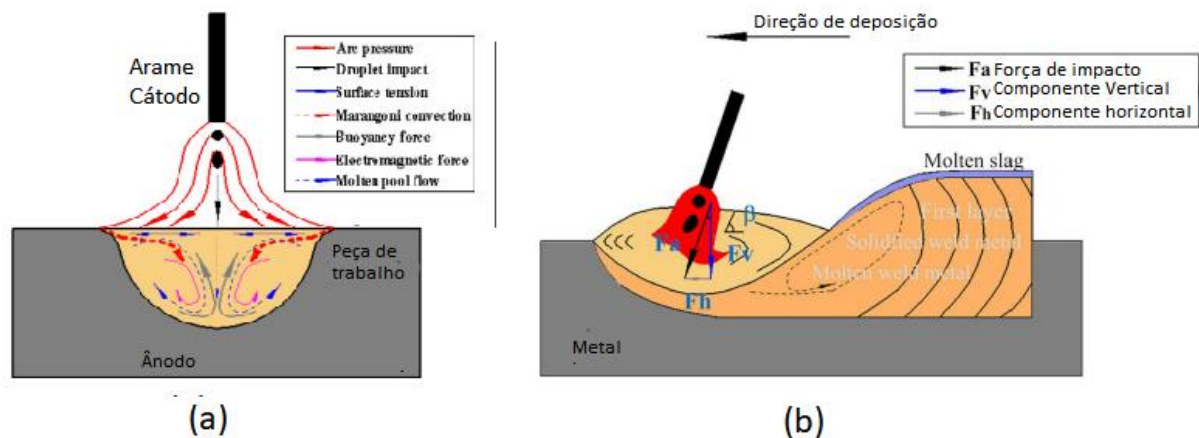


Figura 5. (a) Esquema de transferencial de fluxo na poça de fusão $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 90^\circ$ e (b) Diagrama esquemático da poça de fusão sob a ação da força de impacto (Su e Chen, 2019).

2.3. Velocidade de deslocamento

A fabricação da liga Inconel 625 utilizando CMT convencional foi realizada por Yangfan, *et al.* (2019) com objetivo de obter a relação entre diferentes velocidades de deslocamentos com as propriedades mecânicas, como dureza e resistência à tração, da liga fabricada. Posto isto, os autores obtiveram que há uma variação da microdureza entre as alturas de cada camada, isso ocorre devido as diferentes microestruturas presentes nas camadas depositadas sucessivas em virtude da dissipação de calor e das diferentes taxas de resfriamento, conforme apresenta a Fig. 6. Além disso, a Fig. 6 apresenta também que com o aumento da velocidade de deslocamento que varia entre 8, 9 e 10 mm/s, os valores médios da microdureza aumentam ligeiramente. Isso ocorre porque a taxa de resfriamento é proporcional à velocidade de deslocamento o que faz com que o calor acumulado seja menor, levando ao refinamento do grão. Logo, para a amostra com maior velocidade 10 mm/s sua microestrutura é mais fina consequentemente apresenta maior microdureza. Ademais, como a microestrutura está intimamente ligada às propriedades do material, então, de acordo com Rosli, *et al.* (2021), variando a velocidade de deslocamento e permanecendo os outros parâmetros constantes, obtém-se diminuição do aporte térmico com uma solidificação mais rápida o que causa uma desaceleração da taxa de crescimento do grão.

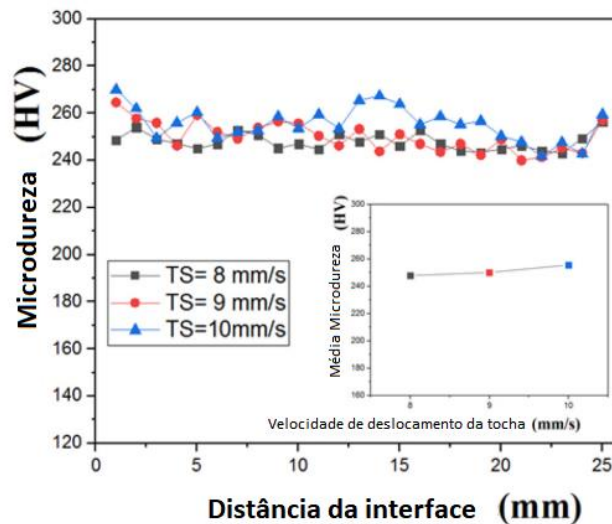


Figura 6. Microdureza para diferentes velocidades de deslocamento (Yangfan *et al.*, 2019).

2.4. Taxa de resfriamento

Com o aumento do número de camadas depositadas, o acúmulo de calor torna-se significativo o que pode ocorrer distorções e tensões residuais na liga depositada. Silva, *et al.* (2020) investigaram o acúmulo de calor em ligas de alumínio, no processo CMT convencional, utilizando três técnicas de resfriamento durante o experimento (Fig. 7). As técnicas de resfriamento eram: resfriamento natural, Fig. 7 (a), resfriamento passivo, Fig. 7 (b), resfriamento ativo de imersão próxima (NIAC), Fig. 7 (c). No fim do processo de deposição, os autores compararam as três abordagens de resfriamento, investigando os efeitos deletérios nas ligas de alumínio produzidas por cada uma das técnicas citadas e como isso influência nas propriedades das ligas fabricadas.

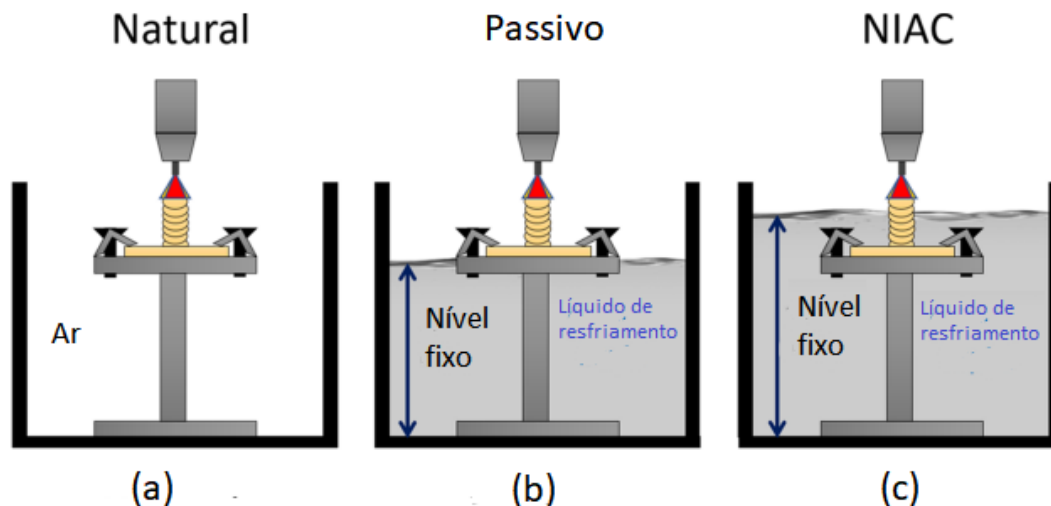


Figura 7. Técnicas de resfriamento: (a) Natural; (b) Passiva e (c) Método de NIAC (adaptado de Silva *et al.*, 2020).

No resfriamento natural a dissipação de calor via de condução, através das camadas depositadas e do substrato, convecção, entre o ar e a pré-forma, e a radiação, entre a pré-forma e o ambiente, seria insuficiente devido ao acúmulo de calor entre as camadas, já no método passivo a dissipação foi impulsionada pela convecção e condução de água ao redor do substrato, todavia este método só é eficiente apenas para as dez primeiras camadas, após isso a dissipação de calor torna-se ineficiente. A temperatura na técnica NIAC permanece inalterada durante todo o tempo de deposição, uma vez que o nível d'água sobe à medida que as camadas são depositadas, assim não ocorre acumulação de calor (Silva *et al.*, 2020).

Observa-se na Figura 8, o ensaio de tração das diferentes abordagens de resfriamento um duas direções (direção vertical-Z e longitudinal-X), assim é notável que as três condições exibiram, estatisticamente, um valor de resistência à tração final média igual, independente da direção. No entanto, a ductilidade, para os casos passivo e natural, apresenta

diferença entre a direção vertical e horizontal (Fig. 8 (a) e 8 (b)). Já o caso NIAC tende a equalizar as propriedades mecânicas, principalmente a ductilidade, a respeito da direção da pré-forma. Logo, o método NIAC possui propriedades mecânicas menos anisotrópicas (Fig. 8 (c)).

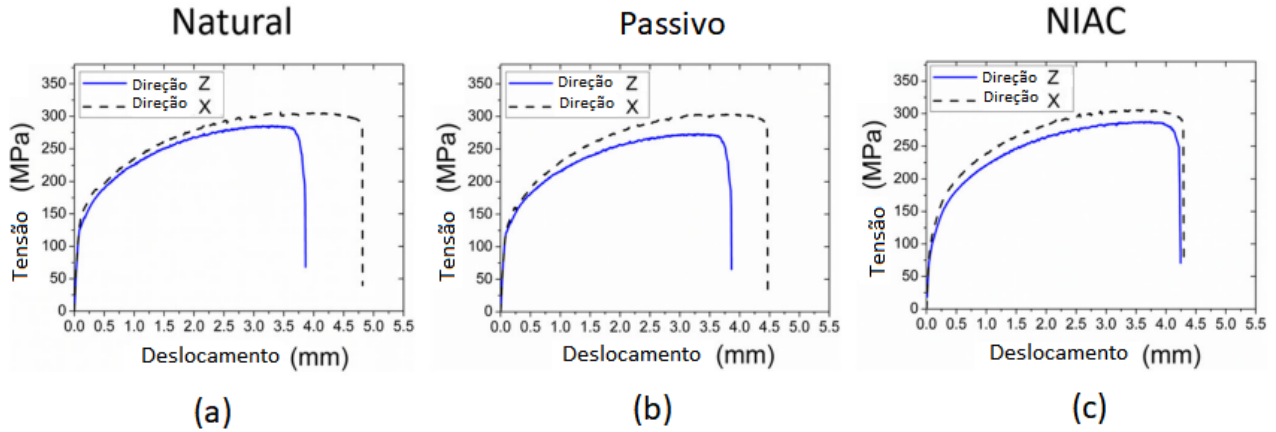


Figura 8. Curvas tensão-deformação (a) Ensaio no resfriamento natural; (b) Ensaio no resfriamento passivo e (c) Ensaio no resfriamento NIAC (adaptado de Silva *et al.*, 2020).

Há ainda outros métodos que podem reduzir o aporte térmico nas deposições de camadas como, por exemplo, arco pulsado e resfriamento de interpasse. No arco pulsado há uma variação da corrente, cuja corrente de pico atua para transferência de metal e a corrente de base atua para manter o arco estável, logo há maior controle de entrada de calor. No entanto, Derekar, *et al.* (2020), utilizando processos de CMT convencional e MIG pulsado, obtiveram que o método MIG pulsado, mesmo com baixa entrada de calor, contribui demasiadamente para a formação de porosidade na liga de alumínio enquanto o processo CMT, mesmo com alta entrada de calor, formou menos porosidade devido à sucessibilidade de absorção de hidrogênio.

No resfriamento de interpasse, as próximas camadas a serem depositadas devem aguardar um intervalo de tempo para que a camada anterior atinja uma temperatura menor, evitando assim o colapso da poça de fusão. Vásquez, *et al.* (2020) produziram peças com Ti-6Al-4V, com CMT convencional, e observou-se que na confecção das camadas com temperatura de interpasse mais alta e com tempo de permanência extremamente baixo o perfil adquire formato em V podendo ocorrer o colapso da poça de fusão. Além disso, os autores mostraram a disparidade entre os tempos de permanência entre o resfriamento força e o resfriamento a ar para alcançar propriedades mecânicas ideais, desse modo, o tempo de permanência para o resfriamento a ar foi de 9 min *versus* o tempo de permanência de 1 min para o resfriamento forçado.

2.5. Corrente, Diâmetro do arame, Taxa de deposição e Vazão de gás

A corrente é o parâmetro de entrada primária do processo WAAM, logo esse parâmetro determina a força do arco, a entrada de calor, conforme a Eq. (1), densidade de energia, como é demonstrado na Eq. (2), e a viscosidade da poça de fusão (Yu e Kim, 2017).

$$\text{Entrada de calor (J/mm)} = \frac{\text{Corrente} \times \text{Voltagem}}{\text{Velocidade de deslocamento}} \quad (1)$$

$$\text{Densidade de energia (J/mm}^3\text{)} = \frac{\text{Corrente} \times \text{Voltagem}}{\text{Area do eletrodo} \times \text{Velocidade de alimentação}} \quad (2)$$

Assim, tanto a geometria do cordão depositado como a microestrutura serão influenciados pela quantidade de entrada de calor (Seow *et al.*, 2020). Ahsan, *et al.* (2021) realizaram experimentos com liga de alta entropia, com processo *Tungsten Inert Gas* (TIG), os autores variaram as condições de entrada em de forma a resultar em alto aporte térmico com amperagem com valores de 200 A e com baixo aporte térmico utilizando 150 A. Os autores obtiveram maior ductilidade para a corrente de 200 A, devido ao tamanho do grão ser maior (Fig. 9 (a)). Como a densidade de energia é um fator primário que governa a continuidade do cordão (Fig. 9 (b)), então um aumento adicional na taxa de deposição (velocidade de alimentação) pode resultar em uma densidade de energia muito baixa para sustentar a taxa de fusão do arame o que leva um cordão descontínuo como apresenta a Fig. 9 (c) (Ahsan *et al.*, 2021).

Sabe-se então que podem ocorrer deformações causadas por tensões residuais. Como forma de reduzi-las Wu, *et al.* (2018) afirmam que o tratamento térmico pós-processamento é o mais indicado. Para os defeitos presentes na microestrutura causados pela porosidade a solução, segundo Vimal, *et al.* (2021), seria a laminação a frio entre passes,

cujo processo será realizado imediatamente após a deposição de cada camada, assim, essa solução proporciona a homogeneização do material e refino da microestrutura do material depositado.

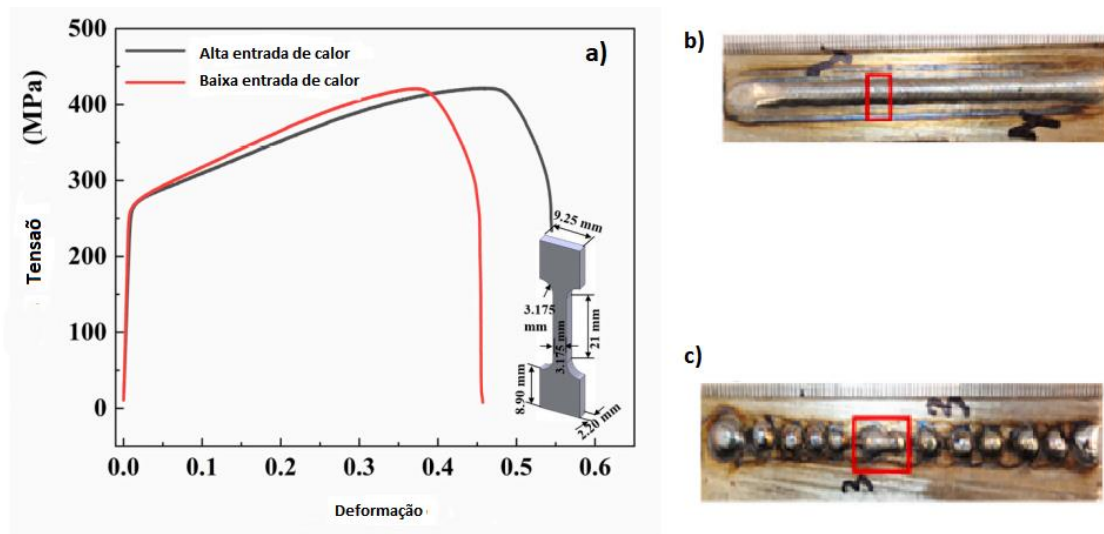


Figura 9. (a) Ensaio de tração com duas condições de entrada de calor; (b) Cordão contínuo e (c) Cordão descontinuo (adaptado de Ahsan *et al.*, 2021).

Apesar de haver pouco estudo sobre a influência do diâmetro do arame nas propriedades mecânicas, ele está intimamente ligado a escolha da corrente, logo um arame maior requer uma corrente maior. Esse parâmetro influencia a configuração do cordão de deposição e na densidade de energia.

O gás de proteção protege a poça de fusão das impurezas presentes na atmosfera evitando, assim, a contaminação. Além disso, cada tipo de gás possui propriedades diferentes (condutividade térmica, calor específico, intensidade de calor e reatividade) o que ocasiona diferentes efeitos na deposição. Logo, a seleção do gás de proteção deve ser considerada no processo MA (Sathiya *et al.*, 2012). Kim, *et al.* (2020) investigaram o efeito dos gases de proteção na MA do aço ferramenta, os experimentos foram conduzidos com dois gases de proteção diferentes um com Ar+18%CO₂ e outro com 100%CO₂. Com isso, os autores obtiveram como conclusão de que os valores da microdureza Vickers eram similares quando variaram os gases, logo os gases de proteção não tiveram muito impacto na evolução microestrutural para esse ensaio não destrutivo. Todavia, no ensaio de cisalhamento constatou-se que a resistência à tração final das amostras foram 1270 MPa, para mistura de gases Ar+18%CO₂, e 1450 MPa, para gás 100%CO₂, evidenciando, na análise fractográfica, que na amostra com mistura de gases são formados precipitados prejudiciais para a resistência.

3. CONCLUSÕES

O controle e qualidade das peças metálicas impressas no processo CMT são de grande importância para atender aos requisitos industriais, sendo assim, a presença de defeitos, e o menor desempenho mecânico, torna-se um problema. Além disso, os parâmetros de deposição têm forte influência nas propriedades mecânicas e na qualidade da liga depositada, com isso, seu controle é de suma importância. Assim, após o desenvolvimento deste trabalho, pôde-se constatar com a revisão e análise da literatura que:

- Durante a deposição, a direção de deposição tem influência no ciclo térmico, logo a escolha da trajetória de deposição influencia na microestrutura da peça por causa da variação do gradiente térmico. Sendo assim, para o melhor controle de entrada de calor, utiliza-se o sentido de deposição paralelo e sem retrocesso. No entanto, para obter peças com baixas tensões residuais na parte central, utiliza-se o sentido oscilatório com retrocesso.
- O ângulo da tocha possui influência dinâmica da poça de fusão, no efeito do arco e nas componentes de forças que agem na poça fusão. Portanto, a força de impacto está associada à probabilidade de formação de poros nos grânulos depositados.
- A velocidade de deslocamento é proporcional a taxa de resfriamento, com isso, o calor acumulado é menor o que leva uma desaceleração da taxa de crescimento dos grãos, ou seja, ao refinamento dos grãos. Isso gera amostra com microdureza elevada.
- A taxa de resfriamento influencia no aumento de tensões residuais e distorções. Logo, dependendo do método utilizado no resfriamento, a dissipação de calor poderá ser mais efetiva do que outros métodos citados.
- A corrente determina a força do arco, a entrada de calor, densidade de energia e a viscosidade da poça de fusão. Portanto, a ductilidade tende a ser maior quando a corrente for elevada, devido ao tamanho do grão.
- Aumento da taxa de alimentação pode resultar em uma diminuição da densidade de energia o que causa um cordão descontinuo e com defeito.

- O diâmetro do arame está ligado a escolha da corrente, consequentemente quanto maior a corrente maior o diâmetro.
- O gás de proteção provoca diferentes efeitos na deposição devido as suas diferentes propriedades.
- Os parâmetros que possuem maior predomínio sobre as propriedades mecânicas são os fatores primários, ou seja, a corrente e a taxa de resfriamento.
- As possíveis soluções para o baixo desempenho mecânico seriam: tratamento térmico pós-processo e laminação a frio entre passes.

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), Programa de Iniciação Científica (ProIC) pelo apoio e suporte laboratorial/financeiro para participação do congresso.

5. REFERÊNCIAS

- Ahsan, Md.R.U, Seo, Gi-Jeong, Fan, Xuesong, Liaw, Peter K., Motaman, S., Haase, Christian and Kim, Duck B., 2021. "Effects of process parameters on bead shape, microstructure, and mechanical properties in wire + arc additive manufacturing of Al0.1CoCrFeNi high-entropy alloy", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 68, pp. 1314-1327.
- Alberti, Eduardo A., Silva, L. J., d'Oliveira, A. S., 2014. "Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade". *Soldagem & Inspeção*, Vol. 19, pp. 190-198.
- Balamurugan, S. and Ranjith, R., 2018. "Cold metal transfer (CMT) technology - A review". *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol. 119, pp. 2185-2196.
- Bourlet, Clément, Chevret, S. Z., Pesci, Raphaël, Bigot, Régis, Robineau, Aurélien and Scandella, Fabrice, 2020. "Microstructure and mechanical properties of high strength steel deposits obtained by Wire-Arc Additive Manufacturing". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 285, pp. 116759.
- Chandrasekaran, Srinivasan, Hari, S. and Amirthalingam, Murugaiyan, 2020. "Wire arc additive manufacturing of functionally graded material for marine risers". *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 792, pp. 139530.
- Cunningham, C.R, Flynn, J.M, Shokrani, A., Dhokia, V. and Newman, S.T, 2018. "Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing". *Additive Manufacturing*, Vol. 22, pp. 672-686.
- Derekar, K.S., Addison, A., Joshi, S.S., Zhang, X., Lawrence, J., Xu, L., Melton, G. and Griffiths, D., 2020. "Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium", *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 107, pp. 311-331.
- Herzog, Dirk, Seyda, Vanessa, Wycisk, Eric and Emmelmann, Claus, 2016. "Additive manufacturing of metals". *Acta Materialia*, Vol. 117, pp. 371-392.
- ISO/ASTM 52900, 2015. "Additive manufacturing, General principles, Terminology". *International Standard*, Ed. 1, pp. 1-19.
- Kim, Jae-Deuk, Ji, Changwook, Kim, Jae Won, 2020. "Effect of Shielding Gases on the Wire Arc Additive Manufacturability of 5 Cr – 4 Mo Tool Steel for Die Casting Mold Making", *Korean Journal of Metals and Materials*, Vol. 58, pp. 852-862.
- Kumar, Bhuvanesh M. and Sathiya, P., 2021. "Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges". *Thin-walled Structures*, Vol. 159, pp. 107228.
- Li, J. Zhong, Alkahari, M. Rizal, Rosli, N. Ana and Hasan, Rafidah, 2019. "Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing". *International Journal of Automation Technology*, Vol. 13, p. 346-353.
- Masuo, H., Tanaka, Y., Morokoshi, S., Yagura, H., Uchida, T., Yamamoto and Y., Murakami, Y., 2018. "Influence of defects, surface roughness and HIP on the fatigue strength of Ti-6Al-4V manufactured by additive manufacturing". *International Journal of Fatigue*, Vol. 117, pp. 163-179.
- Ngo, Tuan D., Kashani, Alireza, Imbalzano, Gabriele, Nguyen, Kate T.Q. and Hui, David, 2018. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges". *Composites Part B: Engineering*, Vol. 143, pp. 172-196.
- Rosli, N. A., Alkahari, M. R., Abdollah, M. F. bin, Maidin, S., Ramli, F. R., Herawan, S. G., 2021. "Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process". *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 11, pp. 2127-2145.
- Safarzade, Abolfazi, Sharifitabar, Mahmood and Afarani, Mahdi S., 2020. "Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy fabricated by wire arc additive manufacturing process". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 30, pp. 3016-3030.
- Sathiya, P., Mishra, M. Kumar, Shanmugarajan, B., 2012. "Effect of shielding gases on microstructure and mechanical properties of super austenitic stainless steel by hybrid welding", *Materials & Design*, Vol. 33, pp. 203-212.
- Selvi, S., Vishvakshan, A. and Rajasekar, E., 2018. "Cold metal transfer (CMT) technology - An overview", *Defence Technology*, Vol.14, pp. 1-17.

- Seow, Cui E., Zhang, Jie, Coules, Harry E., Wu, Guiyi, Jones, Christopher, Ding, Jialuo and Williams, Stewart, 2020. "Effect of crack-like defects on the fracture behaviour of Wire + Arc Additively Manufactured nickel-base Alloy 718". *Additive Manufacturing*, Vol. 36, pp. 101578.
- Silva, L. J., Souza, D. M., Araújo, D. B., Reis, R. P. and Scotti, Américo, 2020. "Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 107, pp. 2513-2523.
- Su, Chuanchu and Chen, Xizhang, 2019. "Effect of depositing torch angle on the first layer of wire arc additive manufacture using cold metal transfer (CMT)", *Industrial Robot*, Vol. 46, pp. 259-266.
- Tian, Yinbao, Shen, Junqi, Hu, Shengsun, Wang, Zhijiang and Gou, Jian, 2019. "Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V and AlSi5 dissimilar alloys using cold metal transfer welding". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 46, pp. 337-344.
- Vásquez, L., Rodríguez, N., Rodríguez, I., Alberdi, E., Álvarez, P., 2020. "Influence of interpass cooling conditions on microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V parts manufactured by WAAM". *Welding in the world*, Vol. 64, pp. 1377-1388.
- Vimal, K.E.K, Srinivas, M. N. and Rajak, S., 2021. "Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 41, pp. 1139-1145.
- Wu, Binta, Pan, Zengxi, Ding, Donghong, Cuiuri, Dominic, Li, Huijun, Xu, Jing and Norrish, John, 2018. "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement", *Journal of manufacturing processes*, Vol. 35, pp. 127-139.
- Wu, Q., Mukherjee, T., De, A. and DebRoy, T., 2020. "Residual stresses in wire-arc additive manufacturing – Hierarchy of influential variables". *Additive Manufacturing*, Vol. 35, pp. 101355.
- Yakout, Mostafa, Elbestawi, Mohamed and Veldhuis, S.C., 2018. "A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies". *Solid State Phenomena*, Vol. 278, pp. 1-14.
- Yangfan, Wang, Xizhang, Chen and Chuanchu, Su, 2019. "Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 374, pp. 116-123.
- Yu, Jiyoung and Kim, Dooyoung, 2017. "Effects of welding current and torch position parameters on minimizing the weld porosity of zinc-coated steel", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 95, pp. 551-567.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

INFLUENCE OF DEPOSITIONS PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PARTS MANUFACTURED BY THE WAAM PROCESS: A REVIEW

André Luis Silva da Costa, andr.luis27@hotmail.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 (AM) allows customizing parts, making geometries and manufacturing high-performance components. The main technologies produced for manufacturing parts in additive manufacturing are: binder jet (binder jet), powder bed melting (energy melting), sheet lamination (sheet lamination), directed energy deposition (energy deposition directed), material extrusion (material extrusion), material blasting (material jetting) and vat photopolymerization. Among these processes, four have application for the manufacture of metallic structures, namely: binder jetting, power bead fusion, sheet lamination and direct energy deposition (DED), highlighting the DED process because of its high energy density. Among the DED processes, the Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is a process that uses the electric arc as a heat source and wire in the layer-by-layer deposition, which offers a series of advantages such as, for example, a higher heat source. efficiency. There are subdivisions of the WAAM process, such as the Cold Metal Transfer (CMT) deposition process, which is considered promising for AM. Thus, this objective aims to carry out a review of the parameters of the literature on the CMT process in the mechanical properties of printed materials, in addition to the work properties that have a greater predominance over mechanical properties and possible solutions for how to improve mechanics in printed parts that present low Yield. It is concluded, through the analysis of the literature, that the quality control of composition is extremely important both for the appearance of the layers of the material and for the printed microstructure, which is directly related to the mechanical properties. Therefore, the main position parameters (displacement position diameter, current velocity, diameter, deposition rate, gas flow and cooling rate) must be controlled to obtain acceptable static and dynamic properties of the parts prepared via WAAM, providing the repair of parts. Among the main correlations, it should be noted that the position direction in the thermal cycle, the adjustment of the fusion force and in the components of the arc forces, the displacement speed is proportional to the cooling rate and the heating rate in the increase of Residual goods and distortions Furthermore, the parameters that have the greatest predominance are the primary parameters such as the current cooling rate.

Keywords: Additive Manufacturing, WAAM, CMT, DED, Mechanical Properties