

MÉTODOS PARA MANUFATURA ADITIVA DE METAIS A ARCO ELÉTRICO: UMA REVISÃO

André Luiz Brito Novelino

Guilherme Caribe de Carvalho

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

andre_novelino@hotmail.com

gccarval@unb.br

Ruham Pablo Reis

Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC, Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Santa Mônica, CEP 38400-902, Uberlândia-MG.

ruhamreis@ufu.br

Maksym Ziberov

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

mziberov@unb.br

Resumo. A manufatura aditiva de metais é um processo de fabricação muito estudado e introduzido por diversas instituições no mundo nos âmbitos acadêmico-científico e industrial. Este processo possui grande potencial de crescimento, sendo adotado por empresas pela possibilidade de confecção de peças complexas e com economia de material. Diversos métodos de manufatura aditiva de metais foram criados, onde o processo de deposição por arco elétrico o procedimento mais acessível dentre eles. Com isso, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão acerca das tecnologias disponíveis e os métodos de deposição de material por arco elétrico no campo da manufatura aditiva de metais. Através deste estudo, é possível concluir que há uma grande diversidade de processos e de uso de materiais variados. Além disso, observa-se também que o processo CMT-GMAW tem se destacado, devido a sua alta capacidade de controle na deposição.

Palavras chave: manufatura aditiva, WAAM, método de deposição, CMT-GMAW.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva de metais é um conceito relativamente recente comparado com outros processos tradicionais no mercado e de grande importância para economia no uso de materiais e para otimização dos produtos com a possibilidade de criação de modelos em larga escala com uma taxa de deposição alta e um menor custo de equipamento (Wu *et al.*, 2018). Nesta área, em crescente desenvolvimento tanto no campo acadêmico-científico quanto na indústria, diversos processos foram criados, entre eles a Manufatura Aditiva (MA) por Arco Elétrico, também tipicamente conhecida na nomenclatura em inglês como *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM). Abordagens acadêmicas começaram a ser desenvolvidas no final do século XX, como os trabalhos de Kruth, *et al.* (1998) e Kunieda, *et al.* (1998) e o tema começou a se expandir nos últimos 10 anos (Bai, *et al.*, 2013 e Colegrove, *et al.*, 2013).

De acordo com Vimal *et al.* (2020), a deposição de metal por WAAM é um processo bem estruturado e complexo, proveniente dos processos de soldagem a arco elétrico, em que se utiliza uma tocha com alimentação contínua de material na forma de arame, para a deposição de material, e uma fonte de alimentação de energia para geração do arco. Este pode ser gerado entre o arame eletrodo e o material de base, no caso do processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), ou entre um eletrodo não consumível e o material de base, no caso do processo GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), ou ainda entre um eletrodo não consumível e o bocal constritor, no caso do processo PAW (*Plasma Arc Welding*) com arco não transferido. O material é depositado camada por camada (Marinelli *et al.*, 2019) formando-se a geometria requerida ao final. Por ser um processo automatizado, todos esses componentes são administrados por um controlador e indicados em uma central, apresentando os valores de tensão e corrente, velocidade de deposição do material, assim como velocidade e trajetória da tocha. A análise destes parâmetros é importante para qualidade do cordão/camada e da deposição do material além do controle da quantidade de calor adicionado. Dentre os processos de soldagem a arco citados, o mais utilizado tem sido o GMAW, principalmente nos modos de transferência pulsada (P-GMAW) e *Cold Metal Transfer* (CMT-GMAW), por possuir um maior controle do aporte térmico, e com isso, da poça de fusão.

A composição da peça a ser manufaturada também influencia no processo escolhido, assim como os parâmetros utilizados nesse processo, uma vez que a condutividade elétrica, ponto de fusão e molhabilidade do material na poça de

fusão são alguns dos fatores que determinam as características de comportamento do material nas zonas termicamente afetadas (ZTA) durante a operação e na qualidade do cordão/camada.

Quanto ao procedimento de fabricação de peças por meio da manufatura aditiva, Vimal *et al.* (2020) descrevem a primeira etapa do processo como consistindo no planejamento da operação, com a geração de modelos CAD da peça para determinar a região de movimentação e geração do percurso da tocha e do fatiamento do modelo para o número de passes a serem feitos. Esta etapa também pode apresentar o auxílio de softwares de simulação, como abordado por Cadiou *et al.* (2020), para determinar os parâmetros a serem utilizados em cada etapa de deposição, além de também avaliar a influência de uma camada depositada sobre a outra, como, por exemplo, em possíveis deformações a serem ocasionadas devido à poça de fusão gerada pelo arco, durante a deposição de uma camada, agindo sobre a camada previamente posicionada naquela região. A simulação também pode indicar previamente o processo mais próspero para uma aplicação caso tenha disponibilidade de mais alternativas.

Diante das novidades constantemente apresentadas para WAAM, o objetivo deste artigo é realizar uma revisão das tecnologias empregadas na manufatura aditiva de metais no campo de deposição por arco elétrico, apresentando as metodologias e o controle dos parâmetros para cada método, além de mostrar o processo de criação dos modelos de simulação, com algumas abordagens adotadas no meio acadêmico-científico e na indústria para esta finalidade.

2. MÉTODOS PARA DEPOSIÇÃO DE MATERIAL POR WAAM

Os processos apresentados a seguir são todos realizados com equipamentos que possuem sistemas de controle, permitindo o ajuste fino das componentes de deslocamento, velocidade de deposição e direção de deposição.

2.1. Processo GMAW

A manufatura aditiva utilizando o processo GMAW, também conhecido como MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gás*), utiliza um gás de proteção para a região do arco elétrico, evitando a oxidação e contaminação da poça de fusão (Planckaert *et al.*, 2010). Para aplicações utilizando esse método, sistemas similares ao mostrado na Fig. 1 são utilizados para controle do processo com a tocha acoplada a um braço robótico ou a uma mesa de coordenadas.

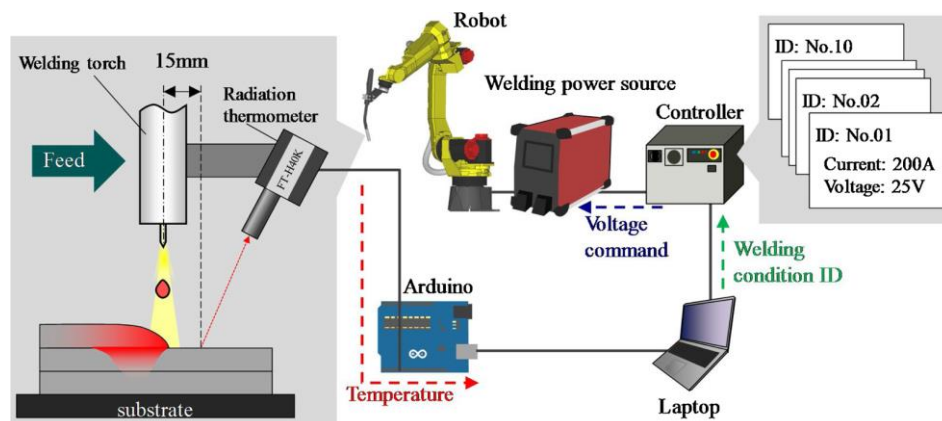


Figura 1. Sistema automatizado utilizado para deposição de material pelo processo GMAW (Abe, *et al.*, 2020)

O processo necessita de um alimentador de arame consumível, possuindo uma alimentação concêntrica, que facilita a geração de trajetórias. Permite também o uso de diâmetros variados e compostos por diferentes materiais como alumínio, cobre, titânio, bem como outros metais e suas ligas. A tocha possui um bocal pelo qual há saída do gás de proteção, selecionado de acordo com o material utilizado, podendo ser inerte ou ativo ao meio. Argônio e Hélio são utilizados, podendo ser misturados com oxigênio ou CO₂ em proporções e vazões diferentes para cada aplicação e ambiente. O controlador do sistema também permite o controle dos parâmetros de tensão e de corrente de soldagem (Abe *et al.*, 2020). Para a transferência de material, o processo GMAW permite utilizar métodos diferentes, sendo por curto-circuito, globular, goticular/spray ou ainda pulsado (Scotti e Ponomarev, 2008).

Um exemplo de aplicação apresentado por Abe *et al.* (2020) consiste em um processo de manufatura aditiva utilizando o aço JIS Z 3312 YGW16, onde a deposição de material foi feita camada por camada, utilizando para gás de proteção uma mistura de Ar+20%CO₂. O objetivo foi determinar um valor ótimo dos parâmetros de soldagem a serem utilizados durante o processo, baseando-se em dados térmicos e do material obtidos em uma simulação numérica. O procedimento permite a redução do número de experimentos necessários para se obterem os melhores parâmetros para o processo de manufatura aditiva.

O processo CMT é um processo desenvolvido pela Fronius International GmbH, variante do processo GMAW, muito utilizado na pesquisa em manufatura aditiva a arco elétrico de metais, permitindo um maior controle na deposição de material com uma menor necessidade de aporte de calor e redução de corrente durante o curto-circuito gerado pelo contato

do material com a poça de fusão (Cadiou, *et al.*, 2020). Lehmann *et al.* (2020) também enfatizam a estabilidade do arco elétrico e uma deposição de material contínua como vantagens do processo. A Figura 2 apresenta um sistema automatizado utilizando o processo CMT-GMAW e um braço mecânico para direcionamento da deposição.

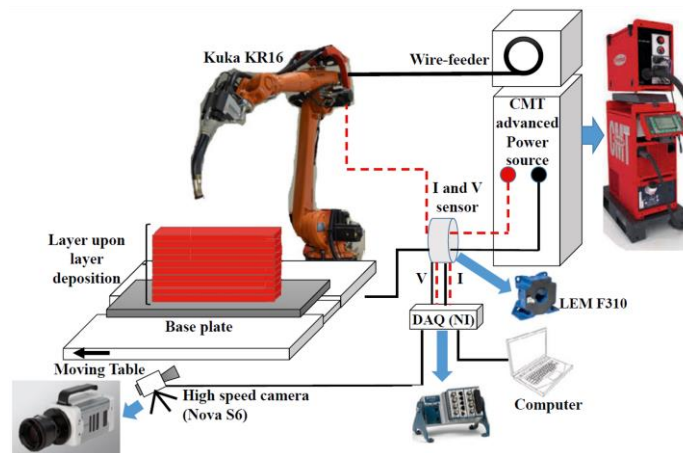


Figura 2. Sistema automatizado para deposição de material e controle do processo CMT (Shukla, *et al.*, 2020)

O trabalho de Lehmann, *et al.*, (2020) ainda avalia a influência do percurso da tocha durante o processo de deposição do arame AWS ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm, analisando o trajeto da tocha em duas configurações diferentes, sendo uma com direção de deposição unidirecional e o outro com a deposição bidirecional das camadas. Além dessa análise prévia, a parte experimental foi dividida na confecção de 15 amostras, sendo 5 amostras para cada valor de velocidade de deslocamento da tocha (0,41, 0,36, 0,30 m/min). Cada amostra se diferenciava quanto a velocidade de alimentação do arame, tensão e corrente de soldagem. Os resultados indicaram que o processo obteve melhores resultados para uma velocidade de deslocamento da tocha de 0,30 m/min, com uma velocidade de alimentação de arame de 1,52 m/min, com uma tensão de 10,1 V e corrente de 66 A, utilizando o método de deposição unidirecional.

Outro exemplo de aplicação deste processo foi estudado por Zhang, *et al.*, (2019), em que se utilizou um arame de cromo-manganês com altas concentrações de nitrogênio para confecção de uma parede por deposição camada por camada. Através deste processo, construíram-se duas paredes de deposição diferentes, sendo que uma permaneceu com a estrutura “as built” (da maneira que foi depositado o material), enquanto a outra foi dividida em duas, sendo estas partes submetidas a tratamentos térmicos a 1050°C e 1100°C, mantidos por 5 min e 30 min respectivamente, e resfriados na água posteriormente. Os resultados mostraram uma melhoria, em relação ao processo sem tratamento térmico, nos valores para o limite de escoamento e para o limite de resistência à tração, além de reduzir a anisotropia do material, para a amostra submetida ao tratamento térmico de curto prazo (1050°C por 5 min). Já a amostra submetida ao tratamento térmico de longo prazo (1100°C por 30 min) apresentou efeitos deletérios devido a inclusões de Cr₂N, comprometendo a estrutura granular e reduzindo os valores de resistência ao escoamento e ruptura. Ambas as amostras submetidas ao tratamento térmico também tiveram uma redução no alongamento, se tornando materiais mais frágeis.

2.2. Processo TIG

O processo de manufatura aditiva utilizando o processo GTAW, também denominado como TIG (*Tungsten Inert Gas*), utiliza o tungstênio como eletrodo não consumível, posicionado na tocha, com alimentação de material na forma de arame realizada por um alimentador na sua lateral, separada da fonte de energia, possibilitando um maior controle na deposição do processo. Um gás de proteção inerte é utilizado, sendo de grande importância uma vez que o processo TIG é mais sensível a distúrbios e contaminação pelo ambiente. Sistemas similares ao apresentado na Fig. 3 são utilizados para automatização do processo, com ajustes de posicionamento e regulação do ângulo de deposição pelo alimentador de material, com mesa de coordenadas XYZ e o uso de sensores, como no caso apresentado que inclui uma câmera, que está conectada a um software para aquisição de dados durante o processo.

Um trabalho publicado recentemente (Benakis, *et al.* 2020) realiza a análise de geometria e de qualidade dos cordões/camadas produzidos por TIG a partir da liga Ti-6Al-4V e do Inconel 718, utilizando diferentes frequências para a corrente pulsada durante o processo de deposição do material. Os comparativos abordaram a análise dimensional e análise da metalografia dos cordões nas configurações com corrente contínua, com corrente pulsada a baixa frequência, com corrente pulsada a alta frequência e um modo intercalado entre alta e baixa frequência, e, para cada configuração de corrente, determinou-se a zona termicamente afetada resultante na deposição.

Em outra publicação a utilizar o processo TIG para WAAM (Wang, *et al.* 2020), utilizaram-se duas alimentações de material, uma com o arame de titânio TA1 e em outra com o arame de níquel com 99,9% de pureza. O trabalho consistiu em analisar a composição gerada no cordão para valores de corrente entre a faixa de 80 A a 120 A por meio da metalografia. O trabalho também realizou análises mecânicas com o objetivo de determinar os parâmetros adequados a fim de adquirir uma liga com características mecânicas favoráveis.

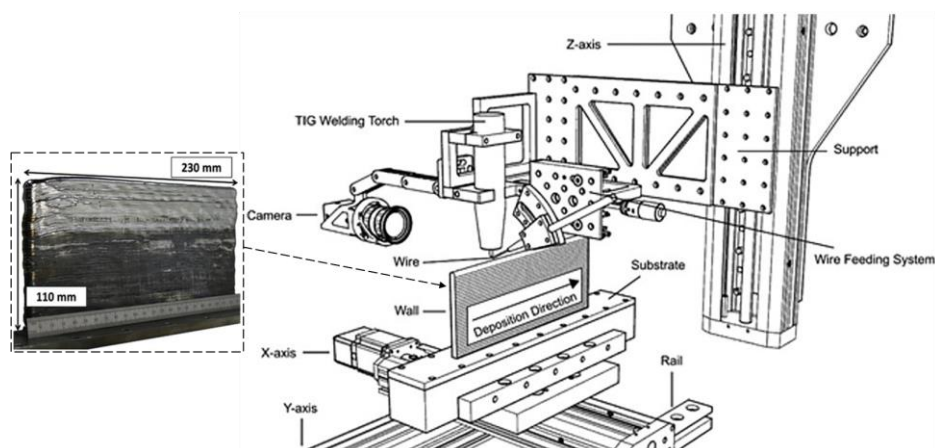


Figura 3. Sistema automatizado para a deposição de material pelo processo TIG (adaptado de Marinelli, *et al.*, 2019)

2.3 Processo Plasma

A soldagem a plasma, conhecida como PAW, pode ser implementada na manufatura aditiva como uma alternativa para a deposição de material. A aplicação deste processo está relacionada a uma constrição do arco, inclusive dando base para o processo de manufatura aditiva denominado *Compulsively Constricted WAAM* (CC-WAAM). Neste caso o arco do plasma é fechado com a região de deposição através do uso de um bocal de cerâmica, auxiliando no direcionamento do plasma e gotas, reduzindo o aporte de calor aplicado na região, devido a expansão do plasma na saída do bocal e o resfriamento com o ar antes do contato com o substrato, e aumentando a precisão de deposição (Jia, *et al.*, 2020). O material é adicionado dentro do bocal onde já é formado o plasma com o fechamento do arco elétrico, como apresentado na Fig. 4.

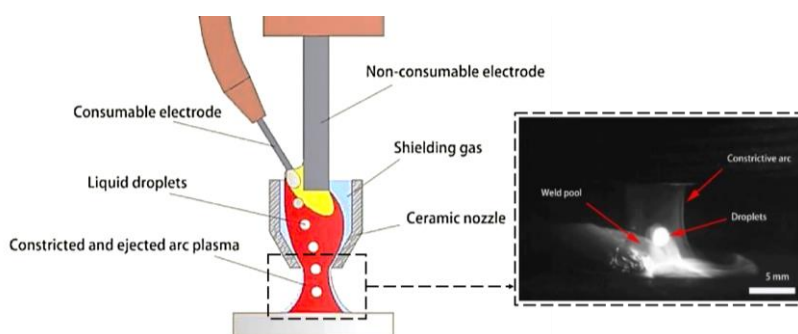


Figura 4. Descrição esquemática do processo CC-WAAM (adaptado de Liu, *et al.* 2019)

Jia *et al.* (2020) apresentam o comportamento do arco do plasma durante a deposição do arame ER70S-G para diferentes valores de tensão e de corrente com base em registros através de uma câmera de alta velocidade. As capturas mostram a formação de um arco mais divergente após a saída do bocal para valores de tensão e de corrente de 18,4 V e 180 A, respectivamente. Com o aumento de tais parâmetros, o arco tende a se concentrar em uma região mantendo um formato do jato cilíndrico. Também é possível observar que a deposição de material é realizada em alguns casos através do gotejamento, com a transferência pelo fluxo do jato de plasma, que também mantém as gotas em altas temperaturas. Deduziu-se a partir desse trabalho o comportamento do arco durante a constrição, produzindo um aumento na densidade de calor no bocal de saída, forçando o direcionamento do jato de plasma e fazendo com que passe pela região com uma alta velocidade e produzindo uma alta emissividade de radiação, mostrando que o processo CC-WAAM possui um grande potencial para melhoria da precisão na deposição de camadas durante o processo de manufatura aditiva.

Artaza, *et al.* (2020) exploram o uso do PAW de forma similar a Fig. 4, direcionando os estudos para a deposição de Ti-6Al-4V e o efeito do ambiente na qualidade da estrutura gerada pela deposição. Foram analisadas 3 condições diferentes: o processo de deposição sendo realizado no vácuo, com argônio e com ar ambiente. Dentro destas condições, retiraram-se amostras e foram feitos ensaios de dureza, análise da microestrutura e identificação das fases, bem como ensaios de tração para determinar a resistência em função da direção. Porém, os resultados mostraram que não houve um efeito significativo nas propriedades mecânicas e químicas das amostras de cada ambiente, com todas as amostras obtendo resultados satisfatórios com a norma AMS4928, considerando as amostras obtidas na direção horizontal da parede. As amostras na direção de deposição (vertical) ficaram abaixo dos valores de referência. As amostras produzidas em meio ao argônio e ao ar ambiente tiveram a presença de regiões de concentração de óxido superficiais, que foram removidas durante o processo de usinagem para produção dos corpos de prova.

2.5 Processos alternativos para WAAM

2.5.1 Processo WAAM de alta temperatura

O processo *Hot WAAM* (HWAAM) é um procedimento onde a deposição de material é exposta a uma geração de calor por resistência maior, reduzindo o arco elétrico gerado no processo e melhorando a superfície do cordão, como descrito por Fu *et al.* (2021). O trabalho utilizou o equipamento TIG, e diferente do processo WAAM, o HWAAM utiliza um módulo auxiliar, no caso do trabalho sendo o equipamento Autai HW-200, acoplado na alimentação do arame para gerar o aumento da geração de calor por resistência além da resistência gerada pela fonte.

O objetivo dos ensaios de Fu *et al.* (2021) foi reduzir a porosidade para altas taxas de deposição de material focada na liga de alumínio 2024, sendo realizado para isso, a análise das paredes depositadas a partir quatro configurações diferentes de corrente (0, 60, 100 e 120 A), determinando qual corrente deve ser usada no aquecimento do arame é a mais adequada para a redução da porosidade, uma vez que o aquecimento leva a evaporação dos contaminantes antes que adentrem a poça de fusão, reduzindo em consequência a geração de poros de gás. A análise envolveu inspeções macroscópicas e microscópicas do material, com mapeamento da estrutura de grãos, ensaios de tração e análise da morfologia das fraturas dos corpos de prova, identificando a presença de poros na região de rompimento. Determinou-se que o processo realizado com uma corrente de 100 A obteve a maior densidade dentre as amostras, de aproximadamente 99,646% de preenchimento de material no volume da peça, com a porosidade com maior distribuição no interior das camadas. Obteve-se também com uso do HWAAM que o gasto de energia por volume decaiu de 84 J/mm³ para 40 J/mm³, além disso, a taxa de deposição aumentou exponencialmente de 86 cm³/h para 301 cm³/h, porém isso levou a macroestrutura e a superfície do cordão apresentarem uma pior qualidade.

2.5.2 Processo WAAM com forjamento a quente

O processo WAAM com forjamento a quente, denominado *Hot Forging WAAM* (HF-WAAM), consiste em uma deposição do cordão realizado pela tocha seguida por um martelo com um movimento vibracional e oscilatório aplicando uma carga nominal definida pelo usuário no material previamente depositado (Duarte *et al.*, 2020). A Figura 5 apresenta uma representação do maquinário adotado para o procedimento.

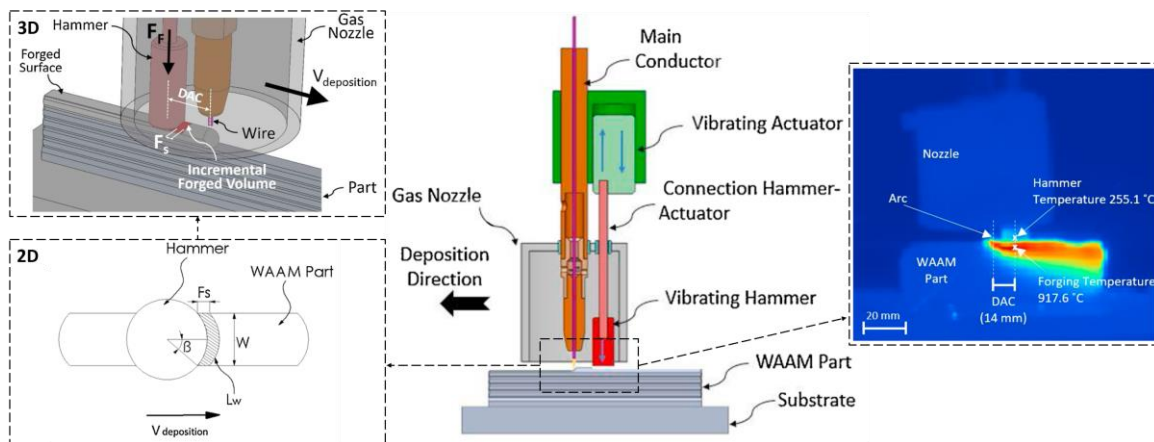


Figura 5. Componentes do equipamento utilizado para o processo HF-WAAM (adaptado de Duarte *et al.*, 2020)

Em sua pesquisa, Duarte *et al.* (2020) tiveram como objetivo apresentar os fundamentos do processo, assim como analisar o efeito do forjamento a quente na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico AISI 316L. O forjamento a quente foi escolhido por não necessitar um tempo de espera para o resfriamento, podendo ser implementado continuamente sem que o processo de deposição pare. Uma tocha GMAW foi utilizada, com um modo de transferência curto-circuito convencional, e o martelo pôde ser acionado por um atuador eletromagnético solenoide ou um atuador mecânico pneumático. As forças aplicadas pelo martelo foram de 17 N e 55 N durante os ensaios a uma frequência de 10 Hz e dois formatos de martelo foram utilizados, um cilíndrico e outro no formato de paralelepípedo. Análises foram realizadas para as três configurações de forjamento em comparativo com o processo sem forjamento. As microestruturas das amostras foram comparadas identificando discontinuidades nas amostras forjadas nas direções de forjamento e comparando tamanhos de grão, indicando grãos relativamente menores que a amostra original, além das porosidades das amostras forjadas serem menores, o que beneficia as características mecânicas do produto manufaturado. Ensaios de tração também foram realizados, constatando melhorias nos valores de tensão de escoamento com o forjamento, de 360 MPa para 450 MPa, e do limite de resistência a tração, de 574 MPa para 622 MPa. Por último constatou-se uma redução da ductilidade do material, com a taxa de deformação reduzindo de 32% para 28%.

2.5.3 Processo WAAM híbrido

Processos híbridos de deposição de material também podem ser utilizados, como por exemplo a deposição Laser-CMT utilizado no trabalho de Pardal *et al.* (2019). O processo consiste na deposição de material pelo processo CMT e todo o equipamento GMAW necessário, complementado com uma fonte de laser de fibra CW IPG com a finalidade de estabilizar a deposição de Ti-6Al-4V em busca de melhorias nos aspectos geométricos das camadas. Essa estabilização ocorre devido a energia concentrada do laser na região do arco aumentar o campo de temperatura, principalmente no centro da poça de fusão, concentrando cátodos na região e diminuindo as oscilações laterais do arco. Além do laser, os autores utilizaram como método de deposição o CMT pulsado, com pulsos de alta corrente e de baixa corrente que favorecem a estabilização da poça de fusão do material. A Figura 6 exemplifica o processo utilizado no trabalho, onde a potência máxima do laser foi de 8 kW com um foco de feixe na faixa de 5 mm de diâmetro, concêntrico e alinhado com o centro do arco de deposição. O arame de Ti-6Al-4V utilizado foi de 1,2 mm e como gás de proteção utilizou-se o argônio puro, com uma taxa de fluxo de 40 L/min. Analisando as seções transversais dos cordões depositados, a velocidade de alimentação de arame foi aumentada devido ao acrescimento de calor do laser permitir maior fusão de material, e com isso, a taxa de deposição do processo CMT aumentou em 27%, indo de 1,53 kg/h para 1,95 kg/h no processo híbrido.

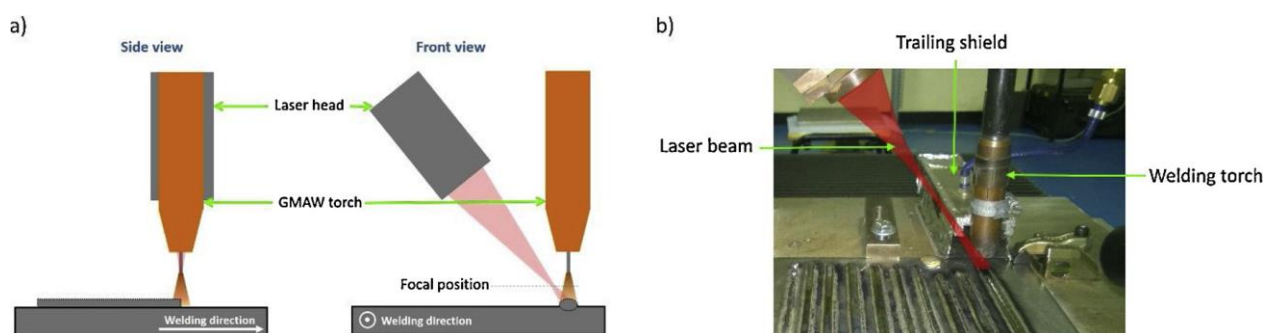


Figura 6. Processo de deposição Laser-CMT (a) e equipamento na configuração do experimento (b) (Pardal *et al.*, 2019)

Outra abordagem do processo híbrido Laser-CMT é mostrada no trabalho de Gong *et al.* (2020), onde os autores estudaram a manufatura aditiva do arame de aço inoxidável ER316L de 1 mm de diâmetro por meio do processo de deposição Laser-CMT, utilizando uma máquina Fronius TPS4000 e o laser de fibra através do equipamento IPG YLS-6000 com o comprimento de onda do feixe de 1070 nm, com a deposição sendo guiada por um robô industrial Fanuc M-710iC, presentes no sistema apresentado na Fig. 7. O objetivo do trabalho foi estudar a influência do laser em um método de oscilação de alta potência no processo de manufatura aditiva, analisando a precisão superficial atingida, as características microestruturais resultantes do processo e as propriedades mecânicas das amostras depositadas em comparação aos processos de feixe laser constante e o processo CMT individualmente (CMT-WAAM) na manufatura aditiva.

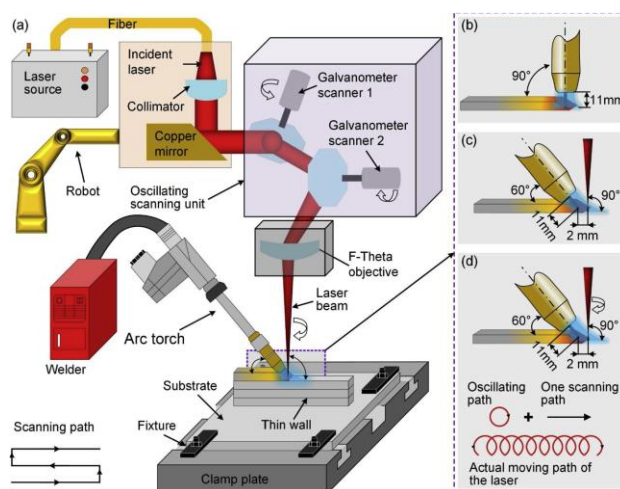


Figura 7. Esquema do sistema utilizado para o experimento de deposição do aço inoxidável ER316L (Gong *et al.*, 2020)

Nos resultados do trabalho de Gong *et al.* (2020), os valores dimensionais de contorno da superfície da parede depositada pelo processo de MA com feixe laser oscilatório flutuaram na faixa de -280 μm e +170 μm , obtendo uma flutuação dos valores de contorno menor em comparação com o processo com feixe laser contínuo (-960 μm e +270 μm) e o CMT-WAAM (-2440 μm e 170 μm), mostrando que o feixe oscilatório possui uma precisão maior. A análise das microestruturas constatou as fases γ , com grãos mais refinados, e δ , com uma configuração granular mais grosseira, presentes na composição do material. Identificando as características e concentração destas para cada processo analisado, constatou-se que o processo com feixe laser oscilatório apresenta uma estrutura granular da fase δ de 3,4%, sendo um

indicador que o refinamento maior ocorre neste processo, sendo que no CMT-WAAM e no feixe laser contínuo as concentrações dessa fase são de, respectivamente, 6,8% e 8,6%. Na análise das propriedades mecânicas, os processos a laser, contínuo e oscilatório, tiveram um aumento no limite de resistência a tração (LRT), com valores entre 570 e 580 MPa, comparado ao processo CMT-WAAM, que obteve um valor de LRT em 536 MPa. No processo com feixe laser contínuo, a tensão de escoamento obtida foi de 330 MPa com os corpos de prova horizontais e 347 MPa com os corpos de prova verticais. O processo CMT-WAAM obteve um limite de escoamento de 299 MPa (horizontal) e 321 MPa (vertical). Por último, o processo CMT-WAAM laser oscilatório obteve um limite de escoamento de 344 MPa (horizontal) e 348 MPa (vertical). Assim, o processo de WAAM híbrido com feixe laser oscilatório beneficia a redução da anisotropia do material, melhorando assim, as propriedades mecânicas e de resistência e também mantendo a taxa de deformação em 30%.

3. CONCLUSÕES

O processo de manufatura aditiva de metais com deposição por arco elétrico possui grandes oportunidades de melhoria e inovação, explorados através de diferentes métodos. Analisando os métodos abordados no trabalho conclui-se que:

- Em uma comparação dos processos, recomenda-se o uso daqueles que permitam o maior controle na deposição de material, como o processo CMT e os processos pulsados. Dentre os processos pulsados, o GMAW é mais utilizado por permitir maior taxa de deposição e GTAW é selecionado pois permite maior controle, porém tendo o ônus de possuir equipamento mais complexo e menor taxa de deposição. O uso de processos híbridos apresenta, em geral, melhorias em comparação aos convencionais, porém com maior complexidade de operação e custo mais alto.
- O processo CMT é um dos processos mais abordados nas pesquisas mais recentes, o que está relacionado à alta capacidade de controle na deposição de material devido à estabilidade do arco e ao baixo aporte de calor. Tais características tornam este método atrativo para o estudo e desenvolvimento da tecnologia para futuras implementações em processos de fabricação.
- O potencial do processo para altas taxas de produção, com sistemas automatizados de produção e com economia no uso de recursos, mostra a compatibilidade com tendências de mercado e questões de economia de recursos. A diversidade de processos e a possibilidade do uso de diversos materiais também amplia o campo de aplicação da tecnologia.
- Um dos principais desafios que envolvem os estudos está na redução da anisotropia nas características estruturais do produto final, aumentando a confiabilidade do processo, além da busca pela otimização dos processos e equipamentos visando atingir o padrão de qualidade exigido em linhas de produção e consolidar o processo no meio industrial.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Departamento da Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB), a FEMEC da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e o CNPq (processo 315092/2018-1).

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.
- Artaza, T., Suárez, A., Veiga, F., Bracerias, I., Tabernero, I., Larrañaga, O. and Lamikiz, A. 2020. "Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres". *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, No. 6, p. 15454-15466.
- Bai, X., Zhang, H. and Wang, G. 2013. "Improving prediction accuracy of thermal analysis for weld-based additive manufacturing by calibrating input parameters using IR imaging". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 69, p. 1087-1095.
- Benakis, M., Costanzo, D. and Patran, A. 2020. "Current mode effects on weld bead geometry and heat affected zone in pulsed wire arc additive manufacturing of Ti-6-4 and Inconel 718". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 60.
- Cadiou, S., Courtouis, M., Carin, M., Berckmans, W., Le Masson, P. 2020. "3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam)". *Additive Manufacturing*, Vol.36, p. 1-11.
- Colegrove, P.A., Coules, H.E., Fairman J., Martina, F., Kashoob, T., Mamash, H. and Cozzolino, L.D. 2013. "Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, I. 10, p. 1782-1791.
- 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.
- Fu, R., Tang, S., Lu, J., Cui, Y., Li, Z., Zhang, H., Xu, T., Chen, Z. and Liu, C. 2021. "Hot-wire arc additive manufacturing of aluminum alloy with reduced porosity and high deposition rate". *Materials & Design*, Vol. 199, p. 1-13.
- Gong, M., Meng, Y., Zhang, S., Zhang, Y., Zeng, X. and Gao, M. 2020. "Laser-arc hybrid additive manufacturing of stainless steel with beam oscillation". *Additive Manufacturing*, Vol. 33, p. 1-11.
- Jia, C., Liu, W., Chen, M., Guo, M., Wu, S. and Wu, C. 2020. "Investigation on arc plasma, droplet, and molten pool behaviours in compulsively constricted WAAM". *Additive Manufacturing*, Vol. 34, p. 1-12.
- Kruth, J. P., Leu, M. C., Nakagawa, T. 1998. "Progress in Additive Manufacturing and rapid prototyping". *CIRP Annals*, Vol. 47, Issue 2, p. 525-540.

- Kunieda, M., Katoh, R., Mori, Y. 1998. "Rapid Prototyping by Selective Electrodeposition using electrolyte Jet". *CIRP Annals*, Vol. 47, Issue 1, p. 161-164.
- Lehmann, T., Jain, A., Jain, Y., Stainer, H., Wolfe, T., Henein, H. and Qureshi, A.J. 2020. "Concurrent geometry- and material-based process identification and optimization for robotic CMT-based wire arc additive manufacturing". *Materials & Design*, Vol. 194, p. 1-15.
- 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.
- 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.
- 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.
- Scotti, A. e Ponomarev, V. 2008. "Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho". São Paulo.
- Shukla, P., Dash, B., Kiran, D.V. and Bukkapatnam, S. 2020. "Arc Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing Process". *Procedia Manufacturing*, Vol. 48, p. 725-729.
- 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.
- Wang, J., Pan, Z., Wang, Y., Wang, L., Su, L., Cuiuri, D., Zhao, Y. and Li, H. 2020. "Evolution of crystallographic orientation, precipitation, phase transformation and mechanical properties realized by enhancing deposition current for dual-wire arc additive manufactured Ni-rich NiTi alloy". *Additive Manufacturing*, Vol. 34, p. 1-13.
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J. and Norrish, J. 2018. "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 35, p. 127-139.
- Zhang, X., Zhou, Q., Wang, K., Peng, Y., Ding, J., Kong, J. and Williams, S. 2019. "Study on microstructure and tensile properties of high nitrogen Cr-Mn steel processed by CMT wire and arc additive manufacturing". *Materials & Design*, Vol. 166, p. 1-15.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

METHODS FOR WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING OF METALS: A REVIEW

André Luiz Brito Novelino

Guilherme Caribe de Carvalho

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

andre_novelino@hotmail.com

gccarval@unb.br

Ruham Pablo Reis

Federal University of Uberlandia, FEMEC, Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Santa Mônica, Zip code 38400-902, Uberlandia-MG.

ruhamreis@ufu.br

Maksym Ziberov

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

mziberov@unb.br

Abstract. The additive manufacture of metals is a recent manufacturing process, being studied and introduced by several institutions in the world, in the academic-scientific and industrial fields. This process has great development potential, being adopted by companies due to its ability of making complex shape parts and saving material. Several methods of additive manufacturing of metals were created, with the electric arc deposition process being the most accessible procedure among them. Therefore, this work aims at reviewing the available technologies and the methods of depositing material by wire and arc in the field of additive manufacturing of metals. This review outlines that there is a great diversity of processes and use of varied materials. In addition, the CMT stands out due to its high capacity to control the deposition.

Keywords: additive manufacturing, WAAM, deposition method, CMT-GMAW.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.