

ESTUDO DA GEOMETRIA DE PEÇAS DA LIGA ER 410NiMo DEPOSITADAS PELO WAAM-CMT

Matheus André de Araújo Soares

André Luiz Brito Novelino

Maksym Ziberov

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

matheus.aa.soares@gmail.com

andre_novelino@hotmail.com

mziberov@unb.br

Resumo. A manufatura aditiva é um processo que permite a criação de peças com geometrias livres e complexas. Utilizando esse processo para metais, é possível a obtenção de peças com geometrias que não podem ser replicadas através de métodos convencionais de manufatura. Dentro da manufatura aditiva metálica, o método Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) é um dos processos que apresenta grande interesse da indústria, baseando-se na deposição camada por camada através de processos adaptados da soldagem. Porém para que a peça atinja níveis de qualidade desejados, é preciso que se tenha conhecimento sobre o comportamento do processo e os parâmetros mais adequados para cada tipo de material e de processo de deposição. Para isso, este estudo tem como objetivo apresentar os melhores parâmetros de deposição da liga ER 410NiMo de aço inoxidável, utilizando do método WAAM, e mais especificamente o Cold Metal Transfer (CMT), tomando como comparação a análise da melhor geometria obtida. A geometria desejada em um processo de manufatura aditiva, é a com maior área efetiva, ou seja, com o maior aproveitamento de material, minimizando a quantidade que necessitará ser removida por um processo manufatura subtrativa, a fim de se alcançar as dimensões especificadas. Para isso foram realizadas deposições de cordões simples e com 5, 15 e 30 camadas, sendo uma de forma contínua e outra depositada em duas etapas com um tempo de resfriamento intermediário (15+15 camadas), variando os parâmetros entre elas, seguido de análise da altura e largura dos mesmos, além da medição do ângulo de molhabilidade obtido, a fim de obter a peça com melhores geometrias. Para as deposições dos cordões simples, foi possível obter amostras com ângulo de molhabilidade próximo de 90°. No caso das deposições das paredes, utilizando os parâmetros obtidos a partir da análise dos cordões simples, verificou-se que a geometria das peças variou de acordo ao longo das camadas depositadas, possivelmente causado pela baixa temperatura do substrato, fazendo com que o material fundido se solidifique mais rápido. Para as amostras com 30 camadas, as deposições sem interrupção do arco, com a deposição por etapas foram comparadas, sendo esta última a estratégia que apresentou uma maior altura, com largura mais estreita, gerando um melhor aproveitamento de material e geometria.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; WAAM; CMT; Aço inoxidável; ER 410NiMo

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento das tecnologias de fabricação, diversos processos que anteriormente eram complexos ou pouco viáveis economicamente passaram a se tornar viáveis para aplicações em diversos setores da indústria, seja pelo fator da automatização dos processos, como também a qualidade e precisão dos novos equipamentos. Dentre essas tecnologias, a manufatura aditiva metálica apresenta um aumento expressivo no mercado, com previsões para o mercado global alcançar a faixa de 11,45 bilhões de dólares em 2030 (Precedence Research, 2022). O processo também possibilita a fabricação de geometrias complexas, com uma redução expressiva no desperdício de material em comparação aos processos tradicionais, além de serem compatíveis para aplicações automatizadas propostas pela Indústria 4.0 (Paolini, et al., 2019).

Para a manufatura aditiva metálica, uma das tecnologias é a deposição por arco elétrico e arame, intitulada *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM). Esse processo utiliza conceitos e equipamentos aplicados originalmente na soldagem, com a utilização de uma fonte e uma alimentação de arame para o aporte térmico e deposição (Wu et al., 2018). Dentre as tecnologias de deposição que podem ser utilizadas no processo WAAM, a tecnologia mais usual atualmente é o *Cold Metal Transfer* (CMT), variante da tecnologia *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) desenvolvida pela FRONIUS International GmbH, que apresenta uma deposição por curto-circuito similar ao GMAW, porém com o uso

de um corte mecânico da gota fundida de material (Selvi, *et al.*, 2018). Esse processo resulta em uma maior estabilidade da deposição, facilitando a reprodutibilidade e aumentando a eficiência energética, por possuir um menor aporte térmico quando comparado com processos convencionais de deposição (Cornacchia *et al.*, 2017).

O processo WAAM pode ser aplicado para diferentes materiais, existem pesquisas em ligas mais usuais como o ER70S-6 (Novelino *et al.*, 2022) e também em outras ligas de aço, alumínio e titânio. Dentre os materiais compatíveis, os aços inoxidáveis apresentam grande foco nas pesquisas, como o aço inoxidável martensítico ER 410NiMo, material que possui alta resistência mecânica e a corrosão (Bruno, 2019). Porém a soldabilidade de tais aços pode ser um obstáculo no processo de fabricação, sendo necessário a determinação dos parâmetros ideais de deposição a fim de garantir a fusão adequada do material com o material base ou cordão depositado, e ainda garantir uma geometria adequada da peça fabricada.

Objetivando explorar a aplicabilidade e eficiência do processo WAAM para a fabricação de peças em aço inoxidável ER 410NiMo, este trabalho buscou realizar um estudo de paredes depositadas via WAAM-CMT. As amostras serão avaliadas baseado na geometria obtida, através de medições de altura e largura total e efetiva das amostras. Com isso, será determinado os parâmetros de deposição que resultaram em uma melhor geometria. O controle de temperatura também foi analisado, abordando as diferenças para cada estratégia de deposição utilizado para a deposição das paredes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a deposição das amostras foi utilizado um arame de 1,2 mm de diâmetro do arame AWS ER 410NiMo. A deposição foi feita com o método CMT sinérgico utilizando uma fonte Fronius Transpulse Synergic 5000 CMT, cujo parâmetros da fonte foram regulados por uma unidade de controle remoto RCU 5000i da própria fabricante. Um robô cartesiano da Schneider Eletric (modelo MAXR23-S42-C42) foi operado com a inserção de um programa baseado em código G, depositando em um substrato de aço carbono com 6,35 mm de espessura e 200×200 mm de área. O gás de proteção utilizado durante a deposição foi a mistura Ar+18%CO₂, com vazão de 15 l/min. Após o término da deposição todas as peças foram monitoradas por um termômetro infravermelho digital laser da marca KLX, com resolução de 0,10°C e precisão de $\pm 1,50^\circ\text{C}$, ajustada para emissividade de corpo negro. Todas as peças também foram resfriadas por convecção natural.

Quanto ao planejamento de deposição, foram fabricados inicialmente 7 cordões simples de 50 mm de comprimento, cada um utilizando uma configuração própria de deposição (apresentados na Figura 2 junto com as amostras) com o objetivo de determinar as melhores configurações a serem utilizadas na deposição das paredes. Com a definição dos parâmetros iniciais, foram depositadas as paredes de 5, 10 e 15 camadas com 100 mm de comprimento, sendo a fabricação de cada amostra de forma contínua (sem interrupção do arco). No caso das paredes, além da variação da corrente, velocidade de deslocamento da tocha e de alimentação do arame, a altura de subida da tocha entre passes também foi um parâmetro analisado.

Para as paredes de 30 camadas, foram aplicados três métodos de deposição: deposição sem interrupção do arco, a deposição em blocos, na qual se depositou 2 blocos de 15 camadas, com resfriamento intermediário para 100°C, e uma deposição com controle de temperatura de interpasse para cada camada na faixa de 45°C a 55°C. Estes diferentes métodos foram comparados, avaliando a influência de cada um na geometria final da peça.

Como parâmetro de comparação entre as amostras, foram realizadas medições de altura e largura de cada cordão e parede depositados de acordo com a Figura 1, representando os pontos de medição para as paredes, espaçados em 10 mm entre cada ponto. Para os cordões, a distância entre os pontos foi de 5 mm, devido a maior variação ao longo do comprimentos para essas amostras. Para cada ponto de medição, realizou-se 5 medições e calculou-se a média com desvio padrão (com intervalo de confiança de 99,70%). Após as medidas externas serem verificadas, realizou-se o corte no meio do cordão/parede, e foram medidas a largura total e efetiva na seção.

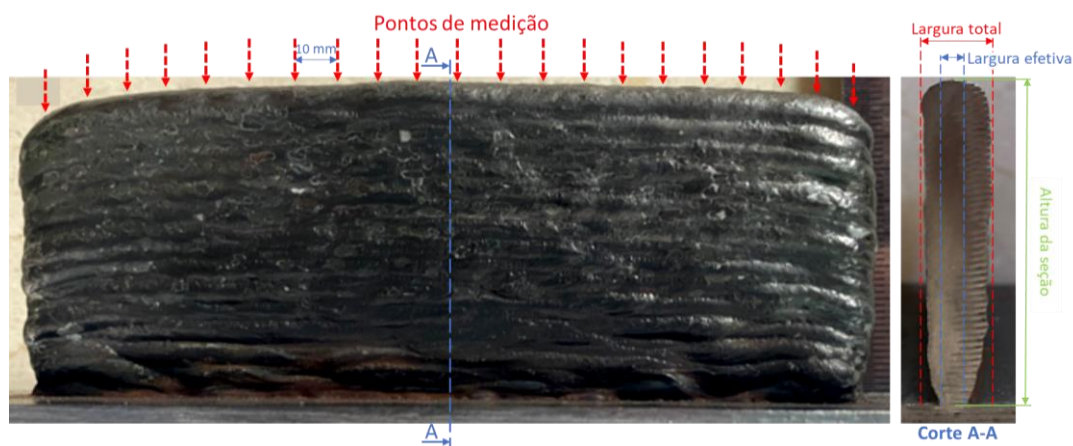


Figura 1. Esquema de medição das paredes depositadas, juntamente com as medidas realizadas na seção de corte no meio da amostra (corte A-A)

Com as medições, comparou-se as dimensões medidas entre as amostras, de forma a determinar a configuração utilizada para a deposição que resultasse na maior altura e menor largura do cordão. Avaliou-se também as áreas efetivas nas seções das amostras, buscando determinar aquelas que obtivessem o maior aproveitamento de material, além de realizar a comparação das paredes com amostras obtidas por deposição GMAW convencional (Santos, 2018), para verificar as melhorias obtidas pelo processo CMT na geometria. Além disso, foi feita uma inspeção visual seguindo a norma ISO 5817 (ISO, 2023) para análise das descontinuidade/defeito que fossem determinadas visualmente.

Os valores de energia também foram comparados entre os processos CMT e GMAW convencional, visto que de acordo com a Fronius (2022) o processo necessita de uma menor energia para gerar e estabilizar o arco comparado com os processos convencionais GMAW. Para isso, foram calculados os valores de potência das fontes e o aporte térmico efetivo aplicado na peça, corrigido por uma eficiência térmica para cada processo. Para a comparação, foram avaliadas as paredes de 15 e 30 camadas, e utilizou-se as paredes de 16 camadas fabricadas por Santos (2018) via GMAW convencional para a comparação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaios preliminares

Para a análise da geometria, foram depositados 7 cordões simples, com 3 destes presentes na Figura 2. O objetivo dos ensaios preliminares foi verificar a influência da variação dos parâmetros de deslocamento da tocha e alimentação do arame na geometria do cordão. Aplicando as configurações de 4 mm/s para a velocidade de deslocamento combinado com uma velocidade de alimentação de 1,7 m/min a 3 m/min, os cordões apresentaram o efeito de *humping* ou *pré-humping*. Yuan *et al.* (2020) associa esse efeito a uma elevada velocidade de deslocamento, ou ainda um aporte térmico inferior ao necessário para a estabilização da poça de fusão, a fim de obter um cordão com características geométricas constantes e sem descontinuidades.

A deposição que apresentou o efeito de forma mais acentuada foi o cordão representado na Figura 3a, cuja geometria apresentou uma discreta melhoria no fluxo de material ao final do comprimento devido ao aquecimento do substrato. A amostra presente na Figura 2b também apresentou o efeito inicial (*pré-humping*), indicado pelas setas vermelhas.

Efeito similar foi relatado por Chaudhari *et al.* (2022) em sua deposição com aço inoxidável 316L, onde o autor verificou que a escolha de um valor elevado de velocidade de deslocamento da tocha foi o responsável por tal acontecimento. Portanto para evitar esse efeito na deposição das paredes, optou-se em utilizar uma maior velocidade de alimentação do arame, juntamente com uma velocidade de deslocamento da tocha inferior, com o objetivo de aumentar o aporte térmico do processo.

Outra característica presente em 3 das 7 deposições de cordões simples realizadas nos ensaios preliminares, foi o rechupe de cratera caracterizado pela norma ISO 5817-1 (ISO, 2023), circulado em vermelho na amostra da Figura 2b. Esse efeito é ocasionado pela falta de preenchimento após a solidificação e retração do material durante o resfriamento do cordão. Contudo, não foi observado trincas superficiais na região do rechupe e, de acordo com a norma, o efeito presente nessas amostras não pode ser considerado como uma descontinuidade.

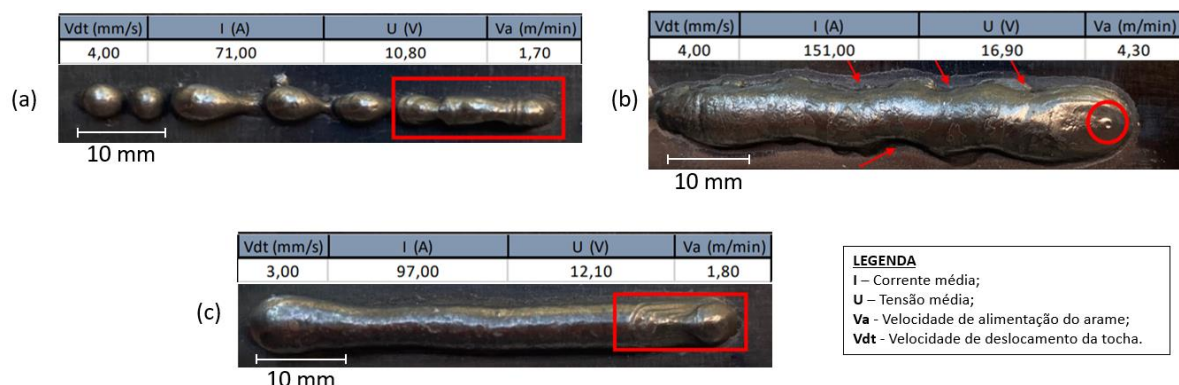


Figura 2. Cordões depositados: (a) apresentando efeito de *humping* com melhora ao final (retângulo vermelho); (b) apresentando ponto com rechupe de cratera (círculo vermelho) e ondulações indicadas pelas setas vermelhas e (c) apresentando uma retração explicitada pelo retângulo vermelho

O cordão que apresentou as melhores características geométricas está presente na Figura 2c, cuja deposição utilizou uma velocidade de deslocamento de 3 mm/s e velocidade de alimentação do arame de 1,8 m/min. Esses parâmetros permitiram obter uma deposição livre de defeitos e com largura de $3,57 \pm 0,05$ mm e $5,07 \pm 0,05$ mm de altura. Ao final da deposição foi possível verificar uma retração do material durante o resfriamento (indicado pelo retângulo vermelho

na Figura 2c), porém concluiu-se que esse efeito não se mostraria relevante para deposições com mais camadas, devido ao reaquecimento a cada camada depositada. A configuração utilizada nesta amostra foi utilizada como base para o início das deposições das paredes com 5 camadas.

3.2 Deposição das paredes

Essa etapa consistiu na deposição das paredes de 5, 15 e 30 camadas, onde cada grupo baseou-se nos resultados anteriores para as definições dos parâmetros de deposição. Primeiramente quatro paredes de 5 camadas foram depositadas, baseando-se nos parâmetros da amostra da Figura 2c, que apresentou as melhores características geométricas. Além dos parâmetros de fonte e da velocidade de deslocamento da tocha, acrescentou-se na análise das paredes a altura de elevação da tocha entre os passes, ou seja, a altura variada da tocha para a deposição de cada camada. Para se obter um parâmetro de comparação entre as deposições, foi medido a distância bico de contato-peça (DBCP) após o término de cada parede, sendo o valor base utilizado de 12 mm, recomendado por Borovkov *et al.* (2021) para o processo CMT-WAAM. Os autores determinaram que a DBCP de 12 mm apresentou resultado satisfatório em relação a estabilidade do arco para as deposições. Uma das características resultantes nas amostras com 5 camadas foi a significativa diferença de altura nas bordas, variando em até 30% a altura das extremidades em relação ao centro da amostra, como exemplificado na Figura 3. De acordo com Zhang, *et al.* (2003), um dos métodos que pode ser utilizado para reduzir essa variação ao longo da parede é a interrupção do arco entre camadas, apresentando assim um maior controle da viscosidade do material ao longo do comprimento, além de evitar a concentração de calor nas extremidades devido a trajetória da tocha.

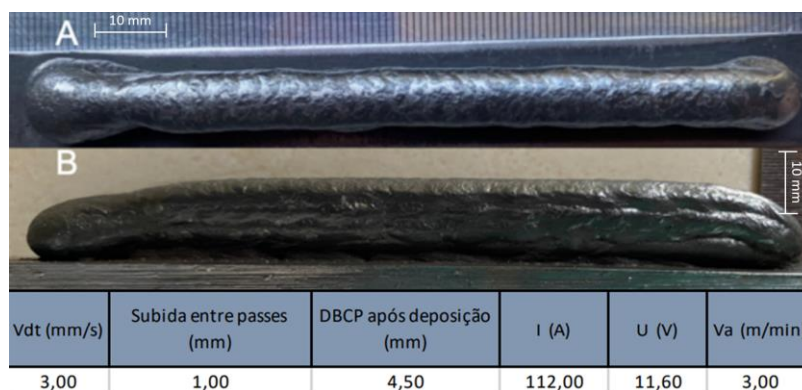


Figura 3. Parede de 5 camadas com rebaixo do centro para bordas e seus valores de deposição, vista superior (A) e vista lateral (B)

Além da proposição de Zhang, *et al.* (2003), outra alternativa para atenuação do declínio de material nas extremidades foi a utilização de uma maior velocidade de deslocamento da tocha para reduzir do aporte térmico nas regiões. Com a variação da velocidade de deslocamento da tocha entre 4 mm/s e 6mm/s, a largura das extremidades, que era maior devido a concentração de material, reduziu cerca de 13% com a mudança.

Outro fator para a concentração de calor em uma parede é a redução do DBCP ao longo do processo, gerando um arco menor e consequentemente maior concentração do calor na região de abertura. Esse efeito foi visualizado ao final das duas primeiras paredes depositadas, que utilizaram 1 mm de subida entre camadas, apresentando 4,50 mm e 6 mm de DBCP ao final do processo. Portanto, as outras duas amostras do grupo de 5 camadas utilizaram uma altura de subida entre camadas de 2 mm, uma com velocidade de deslocamento da tocha de 4 mm/s e outra com 6 mm/s, resultando em um DBCP final mais próximo do valor base, sendo de 10 mm e 11 mm, respectivamente.

Uma dessas amostras está presente na Figura 4, apresentando as melhores características geométricas do grupo, com uma largura média reduzida, indicando um maior controle da poça de fusão na região, e com uma altura média de $8,89 \pm 0,07$ mm. Apesar de ser a parede com menor variação entre extremidades e centro, a diferença de altura entre os pontos foi de 22%.

Para o teste com as paredes de 15 camadas, foi utilizado inicialmente o valor de subida entre passes de 2 mm inicialmente aplicado na parede de 5 camadas da Figura 4. Porém tal parâmetro resultou em um aumento do DBCP o final da deposição de 20 mm, sendo prejudicial para estabilidade do arco especialmente em deposições com maior número de camadas. Portanto, para as demais deposições, foi utilizado de um parâmetro de subida de 1,5 mm para a segunda parede de 15 camadas, resultando em uma DBCP final de 13 mm, próximo do valor base, para a amostra 2 da Figura 5, reduzindo também a inclinação nas extremidades.

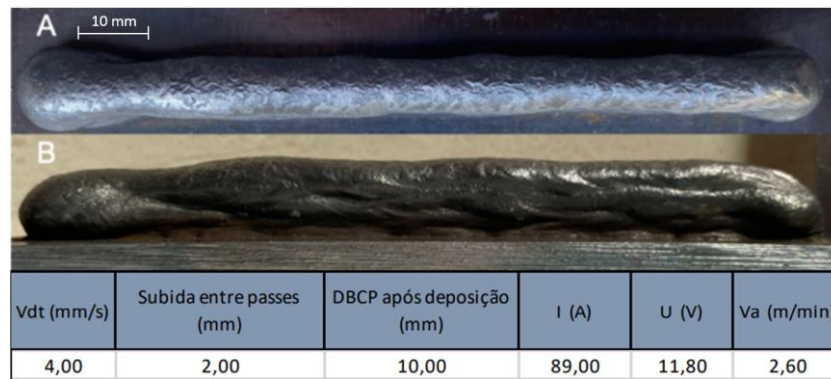


Figura 4. Parede com as melhores características geométricas de 5 camadas e seus valores de deposição, vista superior (A) e vista lateral (B)

Notou-se também para as amostras da Figura 5 uma inclinação nas extremidades, mais expressivo para a amostra 1, devido ao alto DBCP o que aumenta a instabilidade do arco elétrico, evidente pela tensão média registrada, bem maior que o registrado para a segunda parede. Essa inclinação é causada pelo fluxo de material devido ao aumento da poça de fusão ao longo do processo e ocasionando um acúmulo de material nas laterais. A parede com o DBCP ajustado, obteve uma largura média de $7,46 \pm 0,07$ mm, enquanto a primeira parede obteve uma largura média de $8,29 \pm 0,13$ mm. Além disso, a variação de altura ficou abaixo de 5% em toda a segunda parede, enquanto a primeira deposição apresentou uma variação próxima de 10%, influenciado pela inclinação das extremidades da parede.

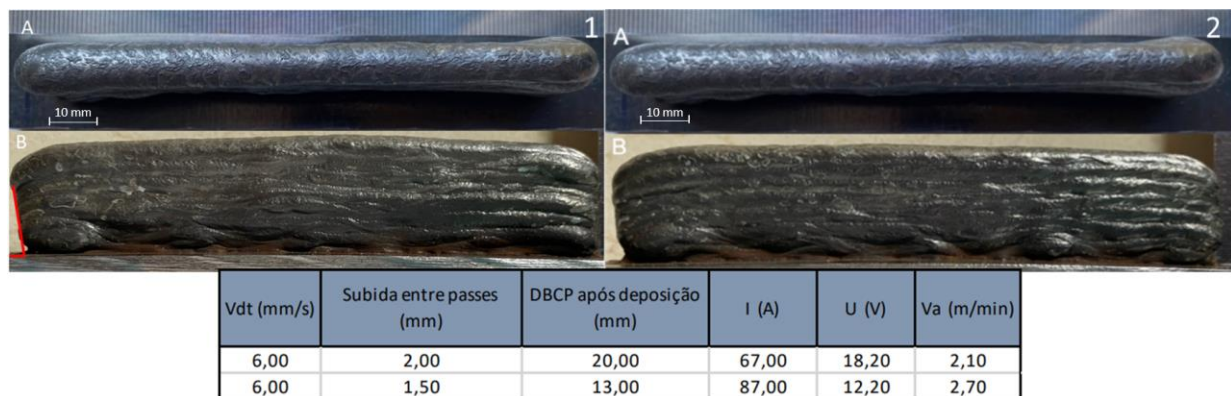


Figura 5. Paredes de 15 camadas, em destaque inclinação da parede 1 não visível na parede 2, e seus valores de deposição

Essa inclinação lateral da parede pode ser solucionada com o controle da temperatura de interpasse ou pelo uso de métodos de controle da deposição de material, como o método de oscilação magnética do arco abordado por Corradi *et al.* (2020), onde bobinas e amplificadores foram utilizados para controle do fluxo de material através do controle das forças de Lorentz que atuam sobre o material fundido, obtendo resultados favoráveis para a geometria da peça depositada.

Para as paredes de 30 camadas, divididas em deposição em etapas com resfriamento (15+15 camadas, até atingir 100°C), deposição contínua (sem interrupção do arco), e deposição com controle de temperatura de interpasse (esperando atingir de 45°C a 55°C), foram comparados a geometria final obtida por cada estratégia, utilizando convecção natural e resfriamento à temperatura ambiente para as medições, como ocorrido para deposições de peças em larga escala onde o período de interpasse é muito alto, como por exemplo da ponte construída através do processo GMAW pela empresa MX3D (2020).

A parede de 30 camadas depositada em duas etapas com resfriamento (15+15 camadas) não apresentou descontinuidades ou defeitos visíveis, exceto na região intermediária, onde ocorreu a parada para resfriamento. Nessa região, foi visível a redução da largura na região (Figura 6), resultando em uma diminuição na largura efetiva e consequentemente na área efetiva. De acordo com Lehmann *et al.* (2020) a utilização do controle de interpasse entre camadas minimiza a variação da espessura do cordão, uma vez que o resfriamento ocorre de forma homogênea para cada camada, controlando o aporte térmico e em consequência a poça de fusão. Porém para o resfriamento por convecção natural, o processo com controle de interpasse também gera um aumento expressivo no tempo de produção, reduzindo excessivamente a produtividade de fabricação da peça.

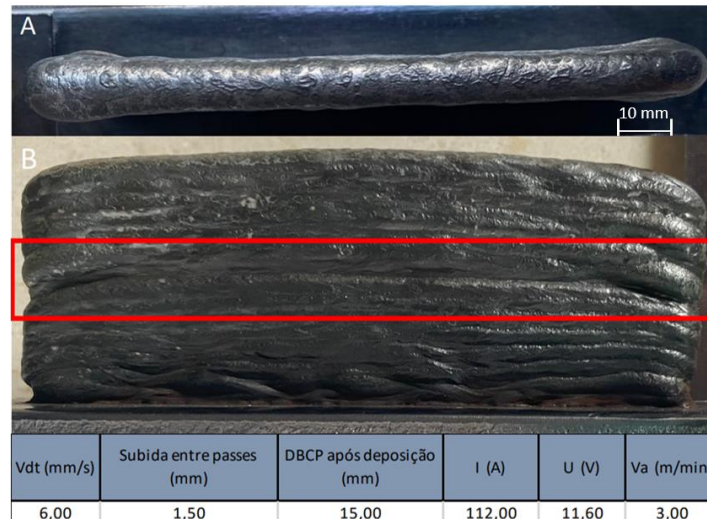


Figura 6. Parede de 30 camadas depositada em etapas (15+15 camadas) com variação aparente na largura da camada intermediária (indicado pelo retângulo vermelho) e seus valores de deposição

A parede depositada de forma contínua apresentou uma geometria regular, sem variações expressivas e com uma largura efetiva próxima da largura total. Quando comparada com a deposição em blocos a altura média de ambas as amostras foi próxima, sendo de $36,84 \pm 0,53$ mm para a contínua, e $37,16 \pm 0,66$ mm na deposição em etapas. O mesmo ocorreu com a largura média das duas paredes, sendo aproximadamente $8,42 \pm 0,10$ e $8,76 \pm 0,10$ respectivamente.

Para a deposição com controle de temperatura interpasse, utilizando os mesmos parâmetros de deposição utilizados nas outras duas paredes de 30 camadas, a amostra apresentou uma altura média 25% maior, com $45,88 \pm 0,39$ mm, além de uma largura média 30% menor quando comparado com as outras duas paredes de 30 camadas, com $6,16 \pm 0,08$ mm, com a amostra presente na Figura 7. Essa configuração de resfriamento resultou em uma variação menor entre camadas, como estudado por Lehmann *et al.* (2020), gerando uma largura efetiva mais próxima da largura total se comparado com a deposição em etapas.



Figura 7. Parede obtida com controle de temperatura por interpasse entre 45°C e 55°C

3.3 Análise dos cortes

Após a deposição das amostras, foi realizado cortes ao longo do comprimento médio das deposições para evitar distorções da borda, com a finalidade de verificar a área efetiva, largura e altura efetiva das paredes, e reforço, largura e ângulo de molhabilidade para os cordões. As seções dos cordões simples e das amostras de 5, 15 e 30 camadas estão representados na Figura 8.

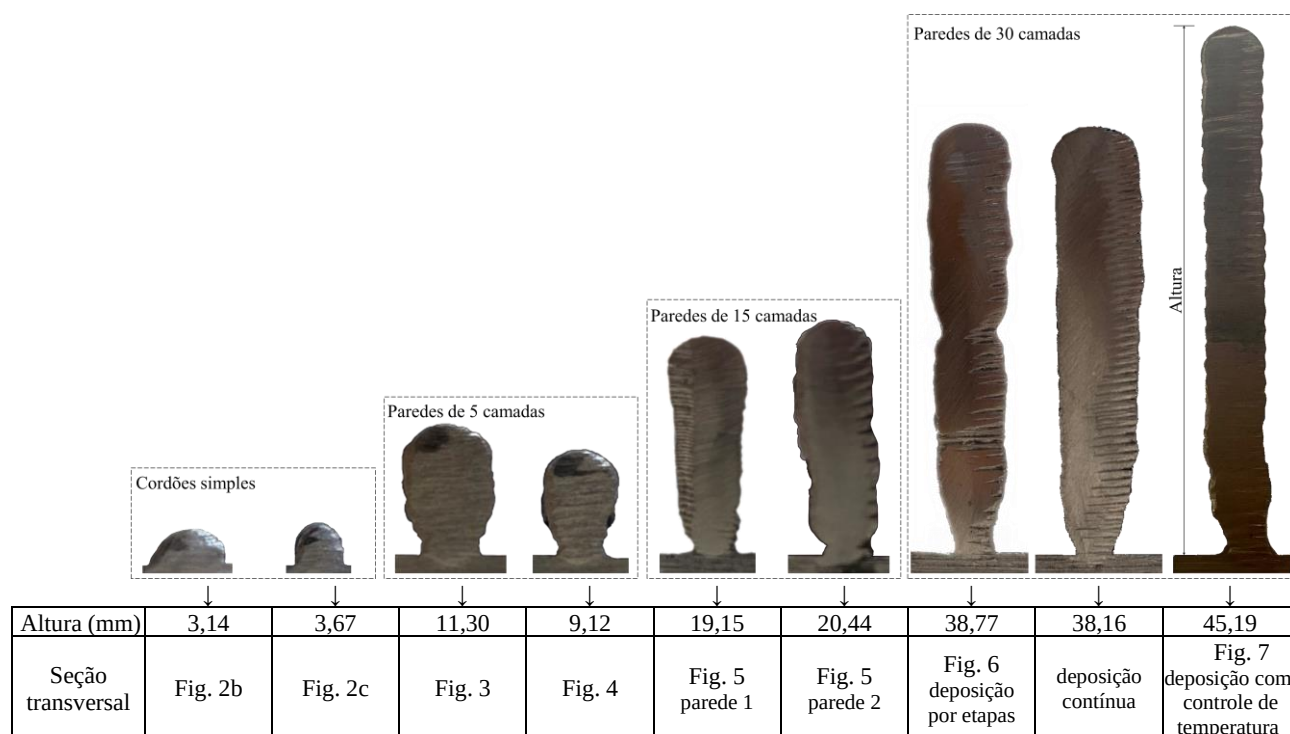


Figura 8. Comparação da seção transversal das Figuras 2 a 7

Para os cordões simples foi possível verificar que o cordão da Figura 2c apresentou ângulo de molhabilidade de 80,95°, sendo o mais próximo do ângulo reto desejado para deposições de camadas, com largura na média em 4,68 mm e reforço de 3,67 mm, maior reforço para um ângulo de molhabilidade menor que 90°. Para as paredes de 5 camadas, foi possível verificar que uma maior velocidade de deslocamento da tocha, reduziu a área efetiva da deposição, apresentando também a menor razão de área total e efetiva entre essas paredes. A parede da Figura 4 apresentou a maior razão entre as deposições, com 87% da área efetiva, enquanto a outra amostra apresentou 83% de área efetiva.

No caso das paredes com 15 camadas, foi possível observar que a parede 2 da Figura 5 apresentou uma variação na linearidade das camadas depositadas, podendo gerar um colapso da parede no caso de deposições com mais camadas, apesar disso a parede apresentou razão de 87%, 5% maior que a primeira. A variação na retidão da parede também foi estudada por Arana *et al.* (2022) que atribuiu o efeito a um aporte térmico elevado, causando uma menor viscosidade do material levando ao escorregamento e possível colapso da parede ou de parte da mesma.

As paredes de 30 camadas em etapas e com deposição contínua apresentaram seção similares em relação à altura e largura, com diferenças abaixo de 5% de variação, mesmo considerando a redução da largura da parede na camada intermediária, reduzindo a largura efetiva por consequência. Quando comparado com a parede com controle de temperatura de interpasse, a variação na altura do corte foi de aproximadamente 20%, enquanto a largura total foi de 5,12 mm ao passo que as outras duas paredes ficaram acima de 7 mm. A razão obtida com o controle de temperatura entre camadas foi de 86% sendo 6% maior que a deposição em etapas e 14% maior que a deposição de forma contínua.

Um dos fatores que inviabilizam a utilização do controle de temperatura por interpasse é o tempo de espera até o resfriamento de forma natural. Uma alternativa para contornar isso é a utilização de um método de resfriamento ativo. Da Silva *et al.* (2020) desenvolveram um método de resfriamento ativo no qual se utiliza de uma mesa em uma cuba de água denominado *Near Immersion Active Cooling*, descendo a mesa à medida que as camadas são depositadas resfriando de forma quase instantânea, a camada depositada. Essa variação permitiu que a deposição de 29 camadas em 11 min para os autores, enquanto para a deposição das 30 camadas de forma passiva foi de aproximadamente 4 h, representando uma redução de 95% no tempo gasto de deposição com controle de temperatura de interpasse.

3.4 Aporte térmico

Para comparação dos processos CMT e GMAW convencional na deposição do material ER 410NiMo, as deposições realizadas neste trabalho foram comparadas com o trabalho de Santos (2018). Para as amostras fabricadas via CMT, foi determinado o aporte térmico médio considerando os valores médios aferidos pelo controlador RCU 5000i da *Fronius*, com uma eficiência térmica de 0,85, recomendado por Lee (2020). O aporte de energia determinado para as paredes de 15 camadas, utilizando a velocidade de deslocamento de 6 mm/s, foi de 0,161 kJ/mm. Santos (2018), utilizando uma velocidade de deposição de 12 mm/s e uma eficiência térmica de 0,78, determinou um aporte térmico de 0,165 kJ/mm para a deposição das paredes de 16 camadas. Considerando a mesma potência da fonte GMAW convencional aplicado para a velocidade de deposição de 6 mm/s, o aporte térmico passaria para 0,330 kJ/mm, cerca de 104,96% maior.

A Tabela 1 apresenta as médias do aporte térmico e potência elétrica para os grupos de 15 e 30 camadas, além das amostras depositadas pelo processo GMAW convencional.

Tabela 1. Valores médios de potência e aporte térmico para a deposição das amostras fabricadas via CMT e GMAW convencional

Deposições	Paredes de 15 camadas	Paredes de 30 camadas	Média das deposições por CMT	Média das deposições por GMAW convencional para Vdt = 12 mm/s (Santos, 2018)	Média das deposições por GMAW convencional para Vdt = 6 mm/s (Santos, 2018)
Eficiência térmica	0,85			0,78	
Potência elétrica (kW)	1,14	1,25	1,19	2,53	
Aporte térmico (kJ/mm)	0,161	0,180	0,171	0,165	0,330

4. CONCLUSÕES

O estudo da geometria de cordões simples e paredes do aço inoxidável da liga 410NiMo com variados métodos de deposição, permitiram obter as seguintes contribuições da pesquisa:

- O efeito de *humping* foi presente em cordões simples com velocidades de alimentação do arame de 1,7 m/min a 3 m/min, para uma velocidade de deslocamento de tocha de 5 mm/s.
- O cordão escolhido com melhores parâmetros apresentou ângulo de molhabilidade próximo de 90° e seu reforço 16% maior que o segundo mais elevado. Ocorrendo com 3 mm/s de velocidade de deslocamento da tocha e 1,8 m/min de velocidade de alimentação do arame.
- Utilizando a velocidade de deslocamento da tocha de 6 mm/s para as paredes de 5 camadas com velocidade de alimentação de 3 m/min, gerou uma redução de 22% na largura da parede e com a subida entre passe de 2 mm, foi responsável pela redução na variação de altura do centro as bordas da deposição.
- A distância de subida entre passe foi um dos fatores críticos para o controle da linearidade e geometria das paredes, por conta do aporte térmico alterado com essa altura, esse efeito foi visível nas paredes de 15 camadas reduzindo o efeito de rebaixamento das bordas.
- A deposição com interrupção do arco e temperatura de interpasse de 100°C apresentou uma altura 1,6% maior que a de arco contínuo, porém apresentou uma camada com largura reduzida por conta do resfriamento da peça, gerando uma região sem acúmulo de calor das anteriores, reduzindo a largura efetiva.
- A parede com controle de temperatura de interpasse apresentou a maior área efetiva entre as deposições além de uma razão de 86% entre a área total e área efetiva, tendo o maior aproveitamento de material por precisar de menos usinagem para chegar à geometria final. Além disso a temperatura de resfriamento próxima do ambiente resultou em um cordão linear com altura 25% maior e largura de 6,16±0,08 mm de média.
- O aporte térmico para a deposição de uma amostra via CMT foi 51,21% menor que uma deposição GMAW convencional mediante a mesma velocidade de deslocamento da tocha, além apresentar paredes com geometrias mais regulares.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento da Engenharia Mecânica (ENM), Faculdade de Tecnologia (FT), Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas (PCMEC) da Universidade de Brasília (UnB), a Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) e CAPES pelo apoio e suporte laboratorial/financeiro. CNPq (processo 405499/2022-1).

6. REFERÊNCIAS

- Arana, M., Ukar, E., Rodriguez, I., Aguliar, D. and Alvares, P., 2022. Influence of deposition strategy and heat treatment on mechanical properties and microstructure of 2319 aluminium WAAM components. *Materials & design*, Vol. 221, 110974.
- Borovkov, H., Yedra, A.G., Zurutuza, X., Angulo, X., Alvarez, P., Pereira, J.C. and Cortes, F., 2021. In-Line Height Measurement Technique for Directed Energy Deposition Processes. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 5, 85.
- Bruno, J.M.A., 2019. "WAAM processing of AISI 410 stainless steel for part building. *Instituto Superior Técnico*. Universidade de Lisboa, Portugal.
- Chaudhari, R., Parmar, H., Vora, J. and Patel, V., 2022. Parametric Study and Investigations of Bead Geometries of GMAW-Based Wire–Arc Additive Manufacturing of 316L Stainless Steels. *Metals*, Vol. 12(7).

- Cornacchia, G, Cecchel, S. and Panvini, A., 2017. A comparative study of mechanical properties of metal inert gas (MIG)-cold metal transfer (CMT) and fiber laser-MIG hybrid welds for 6005A T6 extruded sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, p. 2017-2030.
- Corradi, D., Bracarense, A., Wu, B., Cuiuri, D., Pan, Z. and Li, H., 2020. Effect of Magnetic Arc Oscillation on the geometry of single-pass multi-layer walls and the process stability in wire and arc additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 283, 116723.
- Da Silva, L.J., Souza, D.M., de Araújo, D.B., Reis, R.P. and Scotti, A., 2020. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 107, 2513-2523.
- ISO, 2023. Welding - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections. *International Standard*, p. 1-32.
- Lee, S., 2020. CMT-Based Wire Arc Additive Manufacturing Using 316L Stainless Steel: Effect of Heat Accumulation on the Multi-Layer Deposits. *Metals*, Vol. 10, No. 2: 278.
- Lehmann, T., Jain, A., Jain, Y., Stainer, H., Wolfe, T., Henein, H. and Qureshi, A., 2020. Concurrent geometry- and material-based process identification and optimization for robotic CMT-based wire arc additive manufacturing. *Materials & Design*, Vol. 194, 108841.
- MX3D, MX3D bridge, 2020. Disponível em <<https://mx3d.com/industries/infrastructure/mx3d-bridge/>>.
- Novelino, A.L.B., Carvalho, G.C. and Ziberov, M., 2022. Influence of WAAM-CMT deposition parameters on wall geometry. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, Vol. 5, 100105, ISSN 2666-9129, <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100105>.
- Paolini, A., Kollmansberger, S. and Rank, E., 2019. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive Manufacturing*, Vol. 30.
- Precedence Research, 2023. Metal Additive Manufacturing Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook and Forecast 2022-2030. *Precedence Research*. Disponível em: <<https://www.precedenceresearch.com/metal-additive-manufacturing-market>>.
- Santos, M., 2018. Estudo do Efeito da Temperatura de Interpasse e de Pré-aquecimento no Processo de Soldagem por Múltiplos Passos no Reparo de Pás de Turbina Hidráulicas. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Brasília.
- Selvi, S., Vishvakshan, A. and Rajasekar, E., 2018. Cold Metal Transfer (CMT) technology – An overview. *Defence Technology*, Vol. 14, p. 28-44.
- 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. *J. Manuf. Process.* 35 p. 127-139.
- Yuan, L., Pan, Z., Ding, D., He, F., van Duin, S., Li, H. and Li, W., 2020. Investigation of humping phenomenon for the multi-directional robotic wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 63, 101916.
- Zhang, Y., Chen, Y., Li, P. and Male, A., 2003. Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 135, p. 347-357.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

GEOMETRY STUDY ON ALLOY 410NiMo PARTS PRINTED BY WAAM-CMT

Matheus André de Araújo Soares

André Luiz Brito Novelino

Maksym Ziberov

University of Brasilia, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Zip code 70910-900, Brasilia-DF, Brazil
matheus.aa.soares@gmail.com
andre_novelino@hotmail.com
mziberov@unb.br

Abstract. *Additive manufacturing is a process that allows the creation of parts with free and complex geometries. Using the lesser need for metal fabrication, it is possible to produce parts through the shortest manufacturing time, with the advantage of a lower need for material removal, being then a better process, the Wire Arc Additive Manufacture method is used (WAAM), however for the purpose of depositing material layer by layer. However, for the desired quality part to be needed, whatever is needed for the process and knowledge about the most suitable quality parameters for each type of material position. For this, it is able to present the best study parameters to define the best geometry, using the WAAM method, and more specifically the Cold Transfer (CMT), comparing the analysis of the best designed geometry. The desired manufacturing geometry is a process of greater manufacturing efficiency, that is, the greatest use of material, minimizing the amount that will need to be projected, by a subaltern manufacturing process, in order to make greater use according to the specified dimensions. For this, positions of simple cords and with 30 layers were presented, being one of direct form or deposition by steps (15+15 layers), varying the patterns between them and followed by analysis of the height and width of the same, in addition to the configuration of the Wetting design obtained in order to obtain the best geometries. It was observed that for single strand depositions it was possible to reach wetting angles close to 90°. In the case of layers with layers, the best single cords were used, in order to obtain pieces (pairs) with greater effective height of the pieces, sometimes with greater thickness of pieces of variable positions according to the deposit, probably due to the lower temperature of the substrate, causing the material to be faster, possibly with the intention of preheating the plate, in order to reduce this effect. It stops with 30 layers, comparing the one deposited without arc contour, with a deposit in height of position in presented for the step deposition, with narrower width and larger part, generating a better use of geometry material.*

Keywords: Additive Manufacture; WAAM; CMT; Stainless Steel; 410NiMo.

RESPONSIBILITY NOTICE

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