

MODELAGEM DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE PAREDES CONSTRUÍDAS POR MANUFATURA ADITIVA A ARCO DE ARAME (WAAM) VIA DEPOSIÇÃO METÁLICA CONTÍNUA PELO PROCESSO GMAW PULSADO COM O ARAME SFA/AWS A5.18: ER70S-6

Paula Andrea Peláez Vivanco
Guilherme Caribé de Carvalho
Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, FT-ENM, 70910-900 Brasília – DF, Brasil
paulipelaezv@gmail.com, gccarval@unb.br, mziberov@unb.br

Resumo: As tecnologias de manufatura aditiva (AM) têm o potencial de fabricar diretamente peças de engenharia com alta integridade estrutural, permitindo características unitárias e custos mais baixos em comparação aos métodos tradicionais de fabricação, como fundição, forjamento e usinagem. Uma das tecnologias que tem recebido atenção nos últimos anos é a chamada manufatura aditiva por deposição a arco ou, em uma tradução livre, manufatura aditiva a arco de arame (WAAM), que é uma tecnologia de manufatura aditiva que utiliza, como material de adição, metal na forma de um arame e um processo de soldagem a arco, como meio de fundir e depositar o material em uma trajetória pré-planejada, de modo a construir a parte metálica pela sobreposição de camadas de solda. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de modelos estatísticos com o objetivo de prever a altura da camada (passo) e a espessura da parede, resultantes da deposição contínua em camadas. Para este fim, realizaram-se deposições com trajetórias contínuas helicoidais, programadas em dois diâmetros distintos, com diferentes números de camadas superpostas, utilizando inicialmente um passo fixo, de modo a se estimar um passo de crescimento médio efetivo como função dos parâmetros de soldagem e do raio de deposição. Após a determinação dos passos efetivos resultantes dos diversos conjuntos de parâmetros testados, realizaram-se ensaios de deposição utilizando os passos médios encontrados para até 40 camadas e, após, mediram-se as espessuras efetivas das paredes resultantes. Os dados de saída do processo (passo médio e espessura efetiva) foram então utilizados, em conjunto com os respectivos parâmetros de soldagem, para o desenvolvimento de modelos estatísticos de regressão múltipla para fins de estimação das saídas esperadas como função dos parâmetros de soldagem utilizados para a deposição. Obtiveram-se modelos de estimação que apresentaram boa correlação com os valores medidos a partir dos resultados de ensaios de validação.

Palavras-chave: WAAM; Processo P-GMAW; Soldagem 3D; Modelagem estatística.

1. INTRODUÇÃO

Originalmente denominado “Prototipagem Rápida”, no início da década de 1990, o processo de construção de geometrias metálicas por meio da deposição de metal de solda em camadas sucessivas recebeu várias denominações ao longo de seu desenvolvimento, tais como: fabricação de sólidos de forma livre (*solid free form fabrication*) deposição de metal em forma pré-definida (*Shape Metal Deposition* – SMD) e Soldagem 3D (*3D welding*). Somente recentemente, com a publicação da norma ISO/ASTM 52900:2015, adotada no Brasil por meio da norma NBR ISO/ASTM 52900:2018 (ABNT, 2018), padronizou-se a terminologia a ser adotada ao se referir aos processos de manufatura aditiva (AM – *Additive Manufacturing*). Segundo essa norma, manufatura aditiva abrange as tecnologias pelas quais, por meio da adição de material, criam-se objetos físicos a partir de sua representação geométrica em três dimensões em ambiente computacional. Inicialmente restritos a materiais de origem polimérica, os processos de manufatura aditiva (AM) evoluíram para materiais metálicos, sendo então definidos como processos de Manufatura Aditiva em Metal (MAM).

A MAM mostrou-se uma opção interessante para desenvolver tanto protótipos metálicos como peças mecânicas, necessitando, entretanto, um banco de dados específico para cada material, de modo a possibilitar o emprego direto do processo. Segundo Liu et al. (2020) ainda há uma grande limitação na disponibilidade de dados para a maioria dos metais, o que ainda dificulta a disseminação do uso da tecnologia. A Figura 1 ilustra o processo de fabricação de peças metálicas por meio do processo WAAM partindo desde o modelo 3D, desenvolvido em um sistema de projeto auxiliado por computador (CAD) (Figura 1-a), até o processo de crescimento por deposição de metal em camadas (Figura 1-c).

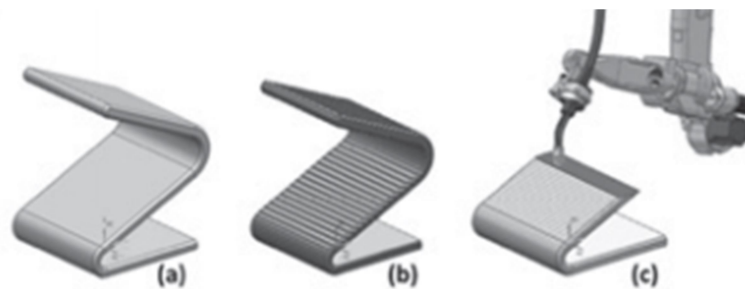


Figura 1. Esquema da AM: (a) modelo CAD 3D; (b) fatiamento do modelo em camadas (c) construção (Fonte: Alberti et al., 2014)

Todos os equipamentos de MA utilizados atualmente são baseados na abordagem “camada por camada”. A diferença entre estes equipamentos está tanto na fonte de energia quanto no material que pode ser processado. A habilidade de processar diferentes materiais nucleou uma nova abordagem denominada Manufatura Aditiva com Múltiplos Materiais (MMAM – *Multiple Materials Additive Manufacturing*) (Alberti et al., 2014).. Segundo Sequeira (2012), o MAM pode ser classificado em duas categorias principais, de acordo com o estado físico (ou forma) das matérias-primas utilizadas no processamento: pós ou arames metálicos.

Classifica-se ainda a forma como o material é alimentado no processo. Dependendo da fonte de energia e da forma com que o material metálico é fornecido, definem-se os processos como (ABNT, 2018):

- fusão em leito de pó, com fonte de energia concentrada na forma de feixe laser ou feixe de elétrons (ex.: processo de fusão seletiva a laser – SLM);
- deposição por energia direcionada (DED - *directed energy deposition*) com material alimentado na forma de pó ou de arame, como por exemplo os processos de deposição de metal a laser (LMD), a Plasma e a arco, sendo este último restrito a material fornecido na forma de arame e denominado no Brasil como Manufatura Aditiva por Deposição a Arco – MADA e, mundialmente, como WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*) (Liu et al., 2020)

A WAAM é uma alternativa potencial à manufatura subtrativa tradicional, no caso da fabricação de grandes componentes de metais de alto custo e com geometrias complexas, uma vez que se utiliza de equipamentos de soldagem a arco e de materiais na forma de arame amplamente disponíveis na indústria, integrados a robôs manipuladores, responsáveis pelo transporte da tocha durante o processo de deposição.

Apesar de suas múltiplas vantagens, um dos problemas que ainda dificultam a aplicação comercial dessa tecnologia é o problema do planejamento do processo de deposição, uma vez que os parâmetros geométricos da deposição, que implicam na definição do caminho pelo qual a tocha de soldagem deve ser conduzida enquanto deposita o metal de solda, é muito dependente o balanço térmico que opera durante a deposição. Esse equilíbrio térmico influencia a taxa de solidificação da poça de fusão e, assim, define a geometria da camada (altura e largura). Isso depende não apenas do aporte térmico do processo de deposição, mas também da geometria da peça em construção, do tipo de metal usado e das características de dissipação de calor do dispositivo de fixação da base de deposição, sobre a qual a peça é construída.

1.1 Manufatura aditiva a arco de arame (WAAM)

De acordo com Cunningham (2018), a manufatura aditiva a arco de arame (*Wire and Arc Additive Manufacturing* - WAAM) é considerada a mais promissora tecnologia para fabricação de peças em metal. Tem como vantagens a alta taxa de deposição, o baixo custo e a segurança operacional. A taxa de deposição pode alcançar valores entre 50 a 130 g/min, maiores do que as taxas de deposição dos processos que utilizam Laser ou Feixe de Elétrons, que são da ordem de 2–10 g/min (Cunningham, 2018). Em função disso e do aporte térmico envolvido, o mesmo autor cita que o WAAM é promissor para a confecção de componentes de baixo volume de produção, como peças de uso aeroespacial ou peças de reposição, com médias ou grandes dimensões. Com o seu relativamente recente e contínuo desenvolvimento, a WAAM tem se tornado um potencial processo de fabricação para vários materiais de engenharia, como titânio, alumínio, ligas de níquel e de aço. Comparado à fabricação subtrativa tradicional, a WAAM pode reduzir o tempo de fabricação em 40 a 60% e o tempo de pós-usinagem em 15 a 20%, dependendo do tamanho do componente (Wu et al, 2018).

A fabricação de uma peça, estruturalmente sólida, livre de defeitos e confiável, requer um entendimento das opções de técnicas de fabricação disponíveis, incluindo seus processos físicos subjacentes, os materiais, os métodos de controle de processo e a apreciação das causas dos vários defeitos comuns e de suas remediações.

Os desafios do processamento de materiais na WAAM estão relacionados à obtenção de características de desempenho relativas às propriedades geométricas, físicas e mecânicas, como mostrado na Figura 2, com vários exemplos de possíveis requisitos apresentados. A taxa de deposição do processo é essencial para a viabilização comercial da WAAM (Cunningham, 2018).

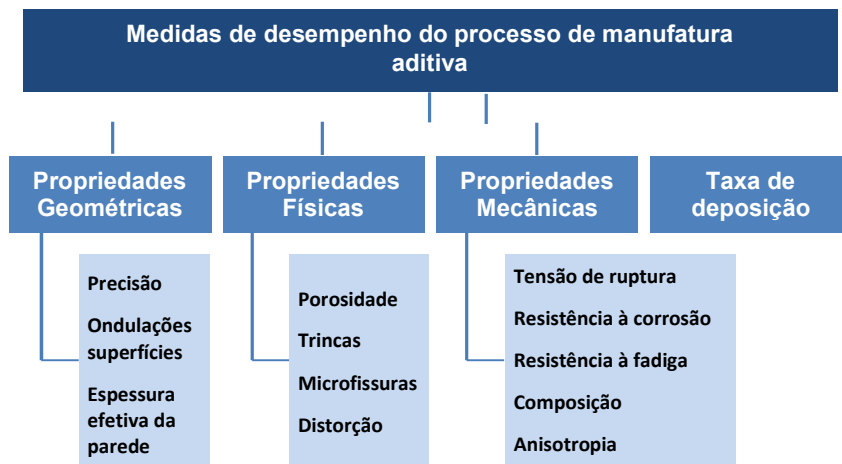


Figura 2. Medidas de desempenho relacionadas ao processo WAAM (Adaptado de Cunningham, 2018)

Para que se possam atingir características de desempenho como as elencadas na Figura 2, são necessários estudos relacionados à parametrização operacional dos processos de deposição. Esses estudos são de primordial importância para se entender e controlar o comportamento do metal, desde sua fusão, ainda na forma de arame, passando pela sua transferência para a poça de fusão e pela sua solidificação, ao ser depositado camada sobre camada.

Ainda que pareça simples, o WAAM não é um processo fácil de usar. Enquanto as principais variáveis controláveis são as mesmas da soldagem robotizada, a AM é um processo diferente. Todas as variáveis de processo, assim como as condições de contorno, combinam-se para produzir a geometria do cordão depositado. A manipulação desse cordão resulta no formato do componente desejado. Infelizmente e diferentemente da soldagem, a geometria do cordão é afetada por mais do que apenas os parâmetros de deposição: o calor residual acumulado à medida que a peça é construída resulta em um campo térmico em constante mudança, que deve ser considerado para que uma camada depositada seja precisa e isenta de defeitos (Derekar, 2018).

Pode-se, então, dizer que os resultados na manufatura aditiva pelo processo WAAM estão intimamente ligados aos materiais, aos equipamentos e aos parâmetros de deposição utilizados no processo, assim como às condições de contorno vigentes na transferência de calor que ocorre durante a deposição do metal.

Do ponto de vista do planejamento do processo, para que um robô de soldagem possa ser programado para realizar a manufatura aditiva, deve-se conhecer o caminho pelo qual a tocha deve ser movimentada enquanto deposita o metal em camadas. No processo aqui estudado (WAAM), a peça é construída a partir da sobreposição de camadas sucessivas de metal. As alturas relativas entre as camadas fornecem as distâncias entre os planos paralelos que são utilizados no processo de fatiamento do modelo geométrico (Andrade, 2013) e na geração dos pontos que definem o caminho a ser percorrido pelo robô durante a deposição. Dessa forma, o conhecimento prévio da altura das camadas resultantes da deposição de metal a partir de determinados parâmetros de deposição é de suma importância para o processo de fatiamento e, consequentemente, para o planejamento do processo como um todo. Além da altura de camada depositada, outro parâmetro também importante é a largura efetiva, que pode ser definida como a largura resultante da deposição após realização do acabamento superficial por meio de técnicas subtrativas.

A Figura 3 ilustra a seção transversal típica de uma parede formada pela sobreposição de camadas de metal resultantes da deposição de cordões singelos (Ding, 2012). Pode-se observar a rugosidade que deve ser retirada em etapas de pós-processamento (usinagem) para obter as dimensões definitivas. Pela figura, considerando taxa de deposição constante, fica evidente que a primeira camada depositada é sempre a mais alta, resultando em menor largura nas primeiras camadas. Isto se deve ao fato de a deposição da primeira camada ser feita sobre uma superfície plana e as camadas subsequentes são depositadas sobre cordões anteriores, que são curvos, e estão a temperaturas também superiores. Pode-se esperar um tempo maior para a solidificação da poça em função do menor gradiente de temperatura, possibilitando mais tempo para o escoamento lateral da poça (transbordamento). Consequentemente, a chamada largura efetiva da parede depositada corresponde à menor largura ao longo da altura da parede depositada.

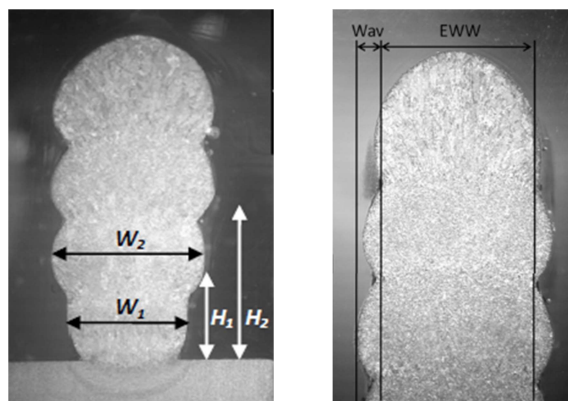


Figura 3. Caracterização geométrica de cordões superpostos (Fonte: Ding, 2012)

Considerando o problema do planejamento do processo, este trabalho apresenta o desenvolvimento de modelos estatísticos com o objetivo de prever a altura da camada e a espessura da parede, resultantes da sobreposição de várias camadas de um cordão de solda, depositado continuamente em uma trajetória helicoidal.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Equipamentos e Materiais

Neste trabalho experimental o eletrodo consumível utilizado foi o arame sólido cobreado tipo manganês-silício com diâmetro de 1,2 mm (classificações ER70S-6 e G3Si1); o gás de proteção foi uma mistura gasosa industrial constituída nominalmente 82%Ar+18%CO₂. Utilizaram-se, como bases de deposição, peças quadradas (200 x 200 mm) recortadas de uma chapa plana de aço carbono AISI 1020, com espessura de 6,35 mm (1/4"). Antes de cada processo de deposição, procedeu-se a limpeza das chapas, mediante esmerilhamento para remoção de óxidos e aplicação de álcool para remoção de restos de graxa ou óleo, de modo a garantir melhor contato elétrico com a mesa onde se conectou o cabo de retorno da fonte (terminal negativo). Após a limpeza, tanto da base de deposição (chapa de 200x200x6,35mm) quanto da mesa de soldagem, aquela era fixada sobre esta por meio de 4 fixadores. A Figura 4(a) mostra a mesa de soldagem e a Figura 4(b) mostra a base de deposição fixada à primeira. O número de fixadores utilizados, 4, deveu-se à necessidade de se evitar a deformação da base de deposição durante o longo processo de deposição, em que se atingem temperaturas elevadas. Utilizaram-se para isso, parafusos UNC com diâmetro de 3/8" e rosca de 16 fios por polegada (FPP).



(a)



(b)

Figura 4. (a) Mesa de soldagem (b) fixação da base de deposição sobre a mesa de soldagem

O equipamento experimental utilizado para realizar a deposição de metal é composto pela integração de dois sistemas diferentes: o sistema de posicionamento robotizado da tocha e o sistema de soldagem.

- Sistema de posicionamento: Uma vez definida a trajetória, o movimento da tocha era propiciado por um robô cartesiano de três graus de liberdade, programado em código-G. A tocha foi fixada no órgão terminal do robô, com orientação fixa com alimentação do arame na direção do vetor aceleração gravitacional (eixo Z), como se pode observar na Figura 5. O robô foi programado para produzir movimento em trajetória helicoidal, com velocidade tangencial constante igual à velocidade de deposição desejada. Essa trajetória era obtida pela interpolação circular dos eixos X e Y e pela interpolação linear do eixo Z, de acordo com a taxa de elevação do braço do robô nessa direção, compatível com o passo desejado na trajetória helicoidal.

- Sistema de Soldagem: composto pela fonte de soldagem Fronius TransPuls Synergic 5000 CMT (TPS-5000 CMT) (vide Figura 6), integrada com o controlador do robô via sinais de entradas e de saídas digitais (em nível de 24Vdc), por meio da interface Fronius ROB-5000®. A TPS-5000 CMT foi utilizada em seu modo sinérgico pulsado e os sinais elétricos provenientes do processo de soldagem (corrente média e tensão média de soldagem), durante o processo de deposição, foram capturados diretamente da fonte, por meio de um conversor de rede LocalNet® para serial RS232, utilizando o software Fronius Explorer®.

Para se obter sincronismo entre o início do movimento do robô e o disparo do processo pela fonte, utilizaram-se sinais de entrada e de saída digitais provenientes tanto do controlador do robô quanto da interface Fronius ROB5000®. Os sinais utilizados são descritos no trabalho de Gonçalves (2019).

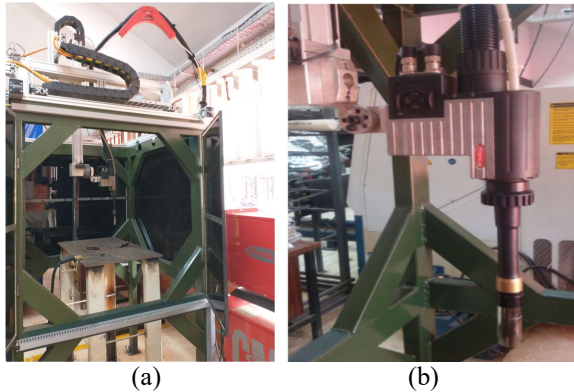


Figura 5. Robô cartesiano (a) com tocha acoplada (b)



Figura 6. Fonte Fronius TPS 5000 CMT

2.2 Planejamento Experimental

A qualidade nas características geométricas de soldas obtidas pelo processo GMAW requer que os parâmetros de soldagem estejam bem ajustados. A fonte utilizada neste trabalho apresenta em sua programação a possibilidade de operação no modo sinérgico, dispondo em seu banco de dados de curvas sinérgicas previamente desenvolvidas pelo fabricante para algumas combinações de arames e gases de proteção. Essas curvas estão disponíveis, tanto para o processo GMAW convencional como para suas derivações disponíveis na fonte (GMAW pulsado e CMT). A vantagem de se utilizar o modo sinérgico do processo reside no fato de que todas as variáveis essenciais, como corrente média de soldagem (decorrente principalmente da velocidade de alimentação do eletrodo e definida pela combinação da corrente de pico, do tempo de pico, da corrente de base e da frequência de pulso, dentre outros parâmetros), tensão de soldagem (regulando o comprimento do arco), tipo de material do arame e tipo de gás de proteção sejam interligadas, produzindo uma curva operacional ou curva sinérgica. Dessa maneira, quando o equipamento opera em modo sinérgico, a variação de uma dessas variáveis gera a variação automática das demais para manter o ponto operacional determinado.

Para facilitar a seleção de parâmetros de soldagem para o processo GMAW pulsado, utilizaram-se os conjuntos de parâmetros que definem os pontos da curva sinérgica pré-programada na fonte, para a combinação de arame tipo G3Si1 (ER70-S6) e gás de proteção Ar+18%CO₂. Inicialmente, vários cordões foram depositados sobre chapa (Figura 7), na posição plana, de modo a se selecionarem os conjuntos de parâmetros de soldagem (combinações entre os pontos selecionados na curva sinérgica da fonte e diferentes velocidades de deslocamento da tocha) que produzissem cordões com boa aparência e livres de falhas. A Figura 7 mostra os cordões depositados com velocidades de deslocamento da tocha (Vs) fixados em 10 mm/s e em 12mm/s, variando a velocidade de alimentação de arame (Va). Os 6 cordões mais à esquerda foram depositados com Vs = 10 mm/s e com as velocidades de alimentação de arame (Va) indicadas abaixo de cada cordão em m/min. Já os 6 cordões mais à direita foram depositados com Vs = 12 mm/s e com as velocidades de alimentação de arame indicadas, também em m/min. Os retângulos vermelhos indicam os cordões, considerados com boa aparência, cujos parâmetros foram selecionados para a deposição em camadas seguindo as trajetórias helicoidais.

Os conjuntos de parâmetros selecionados a partir dos cordões simples depositados sobre chapa foram então testados para a construção de cilindros, inicialmente utilizando um passo fixo na trajetória helicoidal, de modo a se avaliar sua influência nas características de construção tanto do ponto de vista geométrico (altura efetiva de camada depositada) quanto de estabilidade do processo de deposição, com base no aporte contínuo de material e de energia.

Dentre os diversos parâmetros reguláveis no processo, selecionaram-se os que apresentavam grande influência na taxa de deposição para fins de escolha de pontos operacionais para os testes de deposição em camadas sucessivas:

- **Velocidade de alimentação do arame (Va):** configurada na fonte por meio da interface remota Fronius RCU 5000i®.
- **Velocidade de deslocamento da tocha (Vs):** definida na programação da movimentação do robô.

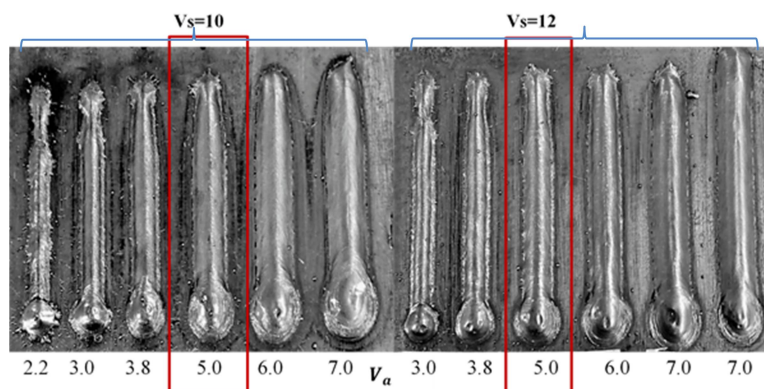


Figura 7. Amostra com os cordões de solda depositados para algumas combinações de velocidade de alimentação de arame (V_a) e de velocidade de deslocamento da tocha (V_s).

A Tabela 1 mostra os parâmetros usados para os 4 conjuntos de ensaios com diferentes valores de V_a , para distintos valores de V_s , lembrando que as deposições foram realizadas com a tocha sendo movimentada ao longo de trajetórias contínuas helicoidais.

Tabela 1. Configuração de parâmetros do processo no estudo

	V_a [m/min]	V_s [mm/s]
1	2,2	8,0 - 9,0
2	3,0	8,0 - 10,0 - 12,0
3	3,8	8,0 - 10,0 - 12,0
4	5,0	10,0 - 12,0

A primeira etapa dos testes de deposição consistiu em uma caracterização geométrica do primeiro cordão, a partir da medição da altura do reforço (H) e da sua largura (W). A ideia por trás dessa caracterização era verificar posteriormente se haveria alguma correlação entre a altura do primeiro cordão e a altura média das camadas resultantes da deposição de cordões subsequentes sobrepostos ao primeiro, de modo a se estabelecer uma maneira de se prever a altura esperada para cada camada a partir de um valor percentual aplicado à altura medida do reforço no primeiro cordão depositado sobre chapa. A Figura 8 mostra as medidas usadas neste trabalho, conforme definidas por Ding (2012) para caracterização geométrica de cordões de solda depositados sobre chapa. As seções transversais avaliadas foram obtidas a partir de cordões selecionados e cortados na posição de comprimento médio, desconsiderando, portanto, as posições próximas às bordas (início e fim do cordão).

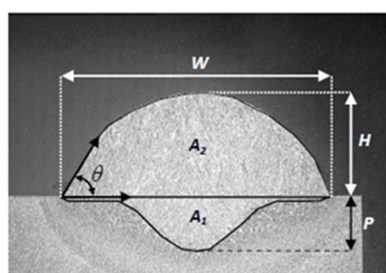


Figura 8. Análise geométrica da seção transversal para um cordão único: W = Largura do cordão, H = Altura do reforço, P = penetração, A_1 = Área de penetração e A_2 = Área de reforço (Fonte: Ding, 2012)

A partir do conjunto de parâmetros expostos na Tabela 1, realizaram-se ensaios com camadas sobrepostas em trajetórias helicoidais com dois diâmetros distintos: 100 mm e 160 mm, utilizando altura de camada inicialmente fixada em 1,4 mm e variando apenas a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de deslocamento. Os parâmetros de deposição correspondentes a cada valor de velocidade de alimentação de arame utilizado eram obtidos a partir da curva sinérgica da fonte. Ao longo dos processos de deposição, observaram-se aspectos como: (a) estabilidade do processo, (b) acúmulo de calor visível, (c) uniformidade das camadas subsequentes e (d) presença de respingos. Variou-se, também, o número de camadas para determinar se havia variação na taxa de crescimento (altura de cada camada) ao longo da altura do sólido depositado. Depositaram-se cilindros com dois raios diferentes, com o intuito de se avaliar a influência do comprimento do perímetro na altura efetiva de cada camada depositada.

Algumas combinações de parâmetros resultaram em instabilidade na formação das camadas. Por exemplo, a Figura 9 expõe uma das falhas observadas na deposição, caracterizada pelo aparecimento de ondulações (aqui denominada como *humping*) na superfície superior da camada depositada. Neste caso, a geometria depositada era retangular, com perímetro equivalente ao da trajetória helicoidal de diâmetro 160 mm.



Figura 9. Deposição de solda para 20 camadas sobrepostas, utilizando $V_a=2.2$ m/min e $V_s=9$ mm/s em uma geometria retangular

Após a construção de cilindros com até 20 camadas, mediram-se as alturas efetivamente atingidas e calcularam-se as alturas médias das camadas realizadas para cada conjunto V_a - V_s . Observou-se que processos com maior aporte térmico resultaram em diferença visível na taxa de crescimento entre os cilindros de maior e de menor diâmetro. O cilindro de menor diâmetro tendeu a crescer menos (menor altura média de camada) e a apresentar maior largura de camada. Isso pode ser explicado pela menor área de dissipação térmica no cilindro de menor diâmetro, assim como pela maior frequência dos ciclos térmicos decorrentes da passagem da tocha a cada circunferência completa. No caso do cilindro de maior diâmetro e, conseqüentemente, com maior perímetro, o período entre as passagens do arco sobre a mesma posição angular em diferentes alturas era maior, resultando em menor frequência de reaquecimento quando comparado ao caso do cilindro de menor diâmetro. A maior frequência de reaquecimento aliada à menor área de dissipação térmica, tanto por condução para a base quanto por convecção e por radiação pelas faces interna e externa do cilindro em construção implica em maior concentração de calor no cilindro de menor diâmetro (considerando as mesmas velocidades de deslocamento usadas em ambos os cilindros), resultando em menor taxa de resfriamento da poça de fusão e em maior possibilidade de escorrimento para suas laterais. Desta forma, para a mesma taxa de deposição (proporcional à razão V_a/V_s), a altura média de camada do cilindro de menor diâmetro foi menor que a obtida para o cilindro de maior diâmetro.

Com as alturas médias de camada calculadas para cada conjunto de V_a - V_s , realizaram-se novos testes, agora com o robô programado para depositar até 40 camadas em uma trajetória helicoidal com passo igual aos valores calculados na etapa anterior. Para fins de estimativa da geometria das paredes depositadas, consideraram-se os seguintes parâmetros:

- Largura efetiva da parede (EWW: *Effective Wall Width*), definida aqui como o menor valor medido na seção transversal da parede depositada ou, em outras palavras, o resultado do pós processamento, por meio de algum processo de usinagem, para conseguir um bom acabamento.
- Largura média máxima (WAW) que representa a máxima espessura medida em vários pontos ao longo da trajetória depositada.
- Altura média da camada (ALH: *Average Layer Height*).

Aporte térmico (HI: *Heat Input*) e Potência Média (P), também foram incluídas como entradas do processo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Dados coletados e modelagem estatística

A hipótese originalmente lançada, de que haveria uma correlação entre a altura do cordão inicial e a altura média das camadas subsequentes não se configurou verdadeira. Observou-se que a altura média das camadas variava em função do número de camadas assim como do perímetro do caminho seguido pela tocha. Além da altura, este estudo visa também encontrar um possível modelo da largura efetiva (EWW) final da parede, em função dos parâmetros de deposição.

A caracterização geométrica das paredes foi feita a partir do corte transversal das amostras depositadas, como se pode observar na Figura 10. Nesta, mostram-se os conceitos das medidas extraídas dos cortes transversais para fins de modelagem estatística.

Experimentalmente, a partir das medições de largura e altura das deposições com 20 camadas, observou-se que tanto a velocidade de alimentação de arame (V_a) quanto a velocidade de deslocamento da tocha (V_s) afetam de forma similar o perfil do cordão de solda, conforme esperado pelo conhecimento convencional em soldagem. Estes resultados são expressos graficamente na Figura 11.

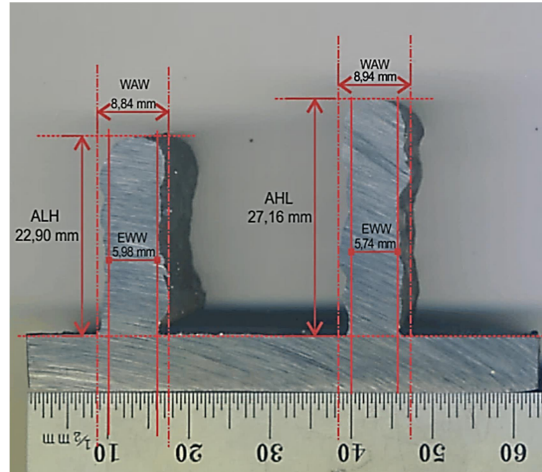


Figura 10. Caracterização geométrica das paredes cilíndricas

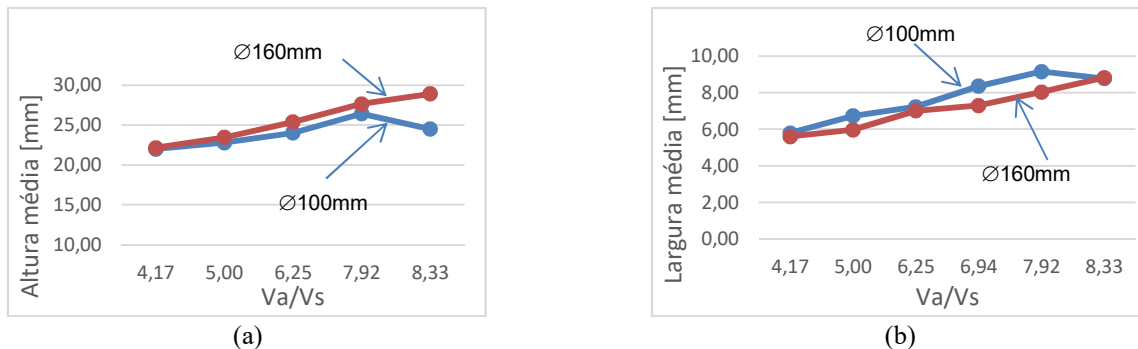


Figura 11. Medições de largura e altura das deposições com 20 camadas (a) Altura (b) Largura

Desenvolveram-se modelos estatísticos de regressão múltipla para altura média da camada (ALH), largura máxima da camada (WAW) e percentual de altura média baseado na altura do primeiro cordão (% HBPC) como funções dos parâmetros de entrada, V_a , V_s , raio da trajetória helicoidal (r) e HPC (altura do primeiro cordão). A modelagem foi executada várias vezes, até se encontrarem os modelos em que todos os fatores relacionados às variáveis independentes e suas respectivas interações atingissem valores estatisticamente significativos. Os termos com baixa significância nos modelos resultantes foram removidos manualmente e obtiveram-se novos modelos com menor número de fatores até que todos os termos considerados apresentassem a significância estatística adequada. A verificação da adequação dos modelos individuais e a qualidade do ajuste foram determinadas por meio da análise de variância (ANOVA) com um nível de confiança de 95%. Realizaram-se as análises de resíduos, de normalidade dos erros, de correlação das variáveis principais e do gráfico de resíduos versus previsão.

Os modelos estatísticos finais simplificados para a deposição de multicamadas, derivados da análise de regressão realizada, foram:

$$ALH [mm] = 1,161 + 0,00638 \times V_a - 0,02922 \times V_s \quad (1)$$

$$WAW [mm] = 8,585 + 0,07121 \times V_a - 0,4504 \times V_s - 0,01838 \times r \quad (2)$$

$$\% HBPC = 1,0640 - 0,1981 \times HPC \quad (3)$$

Nos modelos acima, a velocidade de alimentação de arame (V_a) e a velocidade de deslocamento da tocha (V_s) foram consideradas em mm/s. Já a altura média de camada (ALH) e a largura máxima (WAW) foram consideradas em milímetros.

3.2. Validação dos resultados

Realizou-se a validação, a adaptação de dois modelos individuais e a qualificação de ajuste diagnóstico por meio do diagnóstico de análise de variância (ANOVA). A Tabela 2 mostra os coeficientes utilizados para estimar o desempenho e avaliar o ajuste do modelo.

Tabela 2. Resumo estatístico para os modelos de regressão

Teste Estatístico*	ALH	WAV	%HBPC
R^2	0,8162	0,9426	0,6323
Valor-p	<0,0001	<0,0001	<0,0001
MAE	0,04152	0,2241	

Obs: R^2 : coeficiente de determinação múltipla
Valor-p: probabilidade de significância
MAE: erro absoluto médio

Os modelos de dispersão validaram a hipótese de normalidade para todos os modelos já que os pontos ficaram situados, em sua maioria sobre a linha de tendência. Por outro lado, no teste de correspondência os valores de resposta previstos pelos modelos (linha azul) versus os reais (pontos) foram para a maioria dos modelos pontos localizados principalmente em uma disposição adjacente à linha de 45°, portanto seguem a tendência do modelo. No entanto, uma dispersão relativamente grande é observada no preditor %HBPC (Figura 12).

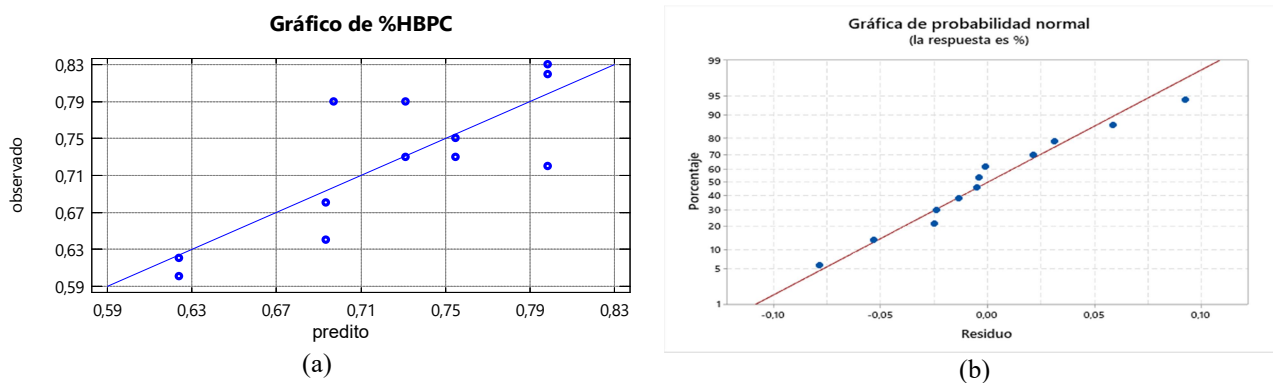


Figura 12. Gráficos de dispersão (a) e normalidade (b) para %HBPC

No intuito de verificar a validade dos modelos propostos, foram realizados experimentos de validação para valores intermediários de parâmetros de deposição, comparando-se os valores reais das variáveis de saída versus os calculados pelos modelos de predição. A Tabela 3 apresenta os valores preditos e os medidos para a altura de camada em função dos parâmetros de deposição.

Tabela 3. Valores obtidos da validação experimental do modelo de altura de camada (ALH)

Va (m/min)	Vs (mm/s)	ALH Medida (mm)	ALH Modelo (mm)	Erro absoluto (mm)	Erro Relativo (%)
3,0	9,0	1,21	1,22	0,01	0,58
3,8	9,0	1,32	1,30	-0,02	-1,36
5,0	9,0	1,64	1,43	-0,21	-12,82

Tabela 4. Valores obtidos da validação experimental do modelo de largura média máxima (WAW)

Va (m/min)	Vs (mm/s)	r (mm)	WAW Medida (mm)	WAW Modelo (mm)	Erro absoluto (mm)	Erro Relativo (%)
3,8	9,0	50	7,58	8,12	0,54	7,16%
3,8	9,0	80	6,92	7,57	0,65	9,41%

Tabela 5. Valores obtidos da validação experimental do modelo de %HBPC

HPC	%HBPC medido	%HBPC predito	Erro absoluto
1,34	0,83	0,80	-0,03
1,66	0,73	0,74	0,01
1,81	0,76	0,71	-0,05
2,22	0,62	0,62	0,00

4.CONCLUSÕES

Os resultados obtidos corroboram a importância de obter um modelo que consiga prever as características na medida da precisão que requerem as peças para seu uso e funcionamento adequado.

Os modelos retornaram previsões próximas aos valores medidos sendo que o modelo de predição da altura esperada para as camadas apresentou menor erro para menores velocidades de alimentação de arame e, consequentemente, menor aporte térmico. Prever o crescimento real auxilia no planejamento da construção do modelo, uma vez que fornece parâmetros geométricos necessários ao processo de fatiamento e de geração de trajetórias para o robô que realizará a deposição. As peças construídas apresentaram boa homogeneidade no material depositado, resultando em peças com estrutura única, uniforme e maciça. Não se observaram porosidades visíveis a olho nu nos cortes transversais às paredes construídas. Entretanto, como já reportado por outros autores, observou-se elevada rugosidade superficial nas superfícies interna e externa dos cilindros construídos, implicando na necessidade de se realizarem operações de acabamento por técnicas subtrativas para obtenção de melhor qualidade superficial das peças construídas.

Observou-se, também, que o raio do caminho helicoidal afetou a geometria de deposição das camadas, uma vez que peças produzidas com o raio de 50 mm apresentaram menor altura total e maior largura de parede, quando comparados às mesmas grandezas medidas nas peças produzidas com raio de 80 mm, para o mesmo número de camadas depositadas e mesmas condições de deposição. Considerando que as peças foram depositadas em um caminho contínuo helicoidal, ambas as peças foram construídas sob mesmas condições de aporte térmico contínuo e constante. As diferenças nos diâmetros afetam o balanço térmico de duas formas principais: (a) devido à redução da área de transferência de calor por condução térmica para a base de deposição, no caso do cilindro de raio 50 mm, o que também implica em redução de área superficial para perda de calor por convecção e por radiação pelas paredes; e (b) aumento da frequência dos ciclos térmicos resultantes de cada passagem da tocha ao longo do perímetro de cada camada, considerando a mesma velocidade de deslocamento da fonte de calor para os dois perímetros diferentes. Ambas as condições explicitadas acima resultam em maior acúmulo de calor, implicando em maior temperatura do substrato previamente depositado com menor diâmetro. A maior temperatura do substrato implica em menor gradiente térmico próximo à poça de fusão, o que resulta em maior tempo necessário para sua solidificação e, consequentemente, em maior escoamento do metal líquido, produzindo a menor altura de camada depositada. Essa observação indica a necessidade de se controlar o gradiente térmico e a temperatura do substrato durante a deposição, de modo a se atingir a previsibilidade da geometria de camada tão necessária ao processo de planejamento da deposição

5.AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FAP-DF, que financiou a construção do robô cartesiano utilizado.

6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, 2018, *NBR ISO/ASTM 52900:2018 Manufatura aditiva – princípios gerais – terminologia*. ABNT: Rio de Janeiro.
- Alberti, E. A., Silva, L. J. D., & d'Oliveira, A. S. , 2014. Manufatura aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. *Soldagem & Inspeção*, Vol. 19, No 2, p. 190-198.
- Andrade, R. C., 2013. Desenvolvimento de software de fatiamento de sólidos tipo casca e geração de trajetórias para fabricação de peças por deposição de metal em camadas sucessivas utilizando o processo GMAW. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., and Newman, S. T. , 2018. Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, Vol. 22, p. 672-686.
- Derekar, K. S. , 2018. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium. *Materials science and technology*, Vol. 34, No. 8, p. 895-916.
- Gonçalves, G.C., 2019. *Integração do processo GMAW ao robô cartesiano MAXR23-S42-H42-C42*. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Liu, J., Xu, Y., Ge, Y. et al. , 2020. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.111, p.149–198. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>
- Sequeira Almeida, P. M. , 2012. *Process control and development in wire and arc additive manufacturing*. PhD Thesis Cranfield University, UK.

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.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

MODELLING OF THE GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF WALLS BUILT BY WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM) THROUGH THE PULSED GMAW CONTINUOUS METAL DEPOSITION WITH THE SFA/AWS A5.18: ER70S-6 WIRE

Paula Andrea Peláez Vivanco

Guilherme Caribé de Carvalho

Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, FT-ENM, 70910-900 Brasília – DF, Brasil
paulipelaezv@gmail.com, gccarval@unb.br, mzimmerov@unb.br

Abstract. Additive manufacturing (AM) technologies have the potential to directly manufacture engineering parts with high structural integrity, enabling unitary characteristics, high production rate and, therefore, lower cost compared to traditional manufacturing methods such as casting, forging and machining. One of the technologies that have received attention in the recent years is the so called Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), which is a metal additive manufacturing technology that uses metal in the form of a wire, as the building material, and an arc welding process, as the means of melting and depositing the material in a pre-planned trajectory, so as to build the metallic part by superimposing weld metal layers. This work presents the development of statistical models with the aim of forecasting the layer height and the effective wall width that result from the layered deposition. Weld metal deposition was carried out following pre-programmed continuous helical paths, programmed in two different diameters and depositing different numbers of superimposed layers. Initially, a fixed layer height (helix pitch) was chosen as a means of estimating the effective average layer height as a function of the deposition parameters and the helix diameter. After determining the effective average layer height for each set of tested parameters, some new depositions were carried out, using the values of average layer height previously determined, superimposing up to 40 layers. The so deposited cylinders were then cut and their effective wall widths were measured. The output deposition process data (average layer height and effective wall width), together with the respective deposition parameters, were used for developing multiple regression statistical models for predicting the expected layer height and width as functions of the input deposition process parameters. The resulting layer geometry estimation models presented good correlation with the values measured from the parts obtained in the validation trials.

Keywords: WAAM, Pulsed GMAW, 3D Welding, Statistical Modelling

RESPONSIBILITY NOTICE

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