

Influência da Estratégia de Deposição de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco Via CMT na Geometria da Peça: uma Revisão da Literatura

Ruan Diego Amorim de Melo Vieira¹ , Olga Liskevych² , Maksym Ziberov¹ 

¹ Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, DF, Brasil.

² Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Vitória, ES, Brasil.

Como citar: Vieira RDM, Liskevych O, Ziberov M. Influência da estratégia de deposição de manufatura aditiva por deposição a arco via CMT na geometria da peça: uma revisão da literatura. Soldagem & Inspeção. 2024;29:e2910. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI29.10>

Resumo: A manufatura aditiva é uma tecnologia que permite a fabricação de peças através da adição sucessiva de material em camadas. Essa técnica permite a impressão de polímeros, metais, cerâmicas, biomateriais e materiais compósitos. Os materiais depositados podem ser arame, pó ou líquido. A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é uma técnica promissora no processamento de ligas metálicas, onde, o *Cold Metal Transfer* (CMT) é uma variação do processo MIG/MAG que proporciona menor aporte térmico durante a transferência de material, influenciando na qualidade final da peça. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica das estratégias de deposições e comparar os efeitos causados ao se utilizarem diferentes parâmetros, especificamente pela MADA. Com isso, foi possível identificar que o controle do aporte térmico é um fator decisivo para evitar defeitos e melhorar o acabamento superficial das peças. Diferentes estratégias e parâmetros alteram a microestrutura e, como consequência, as propriedades mecânicas da peça.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; MADA; CMT; Estratégia de deposição.

Influence of Deposition Strategy in CMT-Based Wire and Arc Additive Manufacturing on Part Geometry: a Literature Review

Abstract: Additive manufacturing is a technology that enables the production of parts through the successive addition of material in layers. This technique allows for the printing of polymers, metals, ceramics, glass, biomaterials, and composite materials. The deposited materials can be wire, powder, or liquid form. Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) is a promising technique in the processing of metal alloys, where Cold Metal Transfer (CMT) is a variation of the GMAW process that provides lower heat input during material transfer, having impact on the part quality. Therefore, this study aims to present a literature review of deposition strategies and to compare the effects caused by using different parameters, specifically in WAAM. As a result, it was possible to identify that controlling the heat input is a decisive factor in preventing defects and improving the surface finish of the parts. Different strategies and parameters alter the microstructure and, consequently, the mechanical properties of the part.

Key-words: Additive manufacturing; WAAM; CMT; Deposition strategy.

1. Introdução

A Manufatura Aditiva (MA) é uma tecnologia que permite a construção de uma estrutura tridimensional (3D) através da adição sucessiva de material, camada por camada. Essa técnica permite a impressão de polímeros, metais, cerâmicas, biomateriais e materiais compósitos em diferentes formas e técnicas específicas. Diferente dos métodos convencionais de fabricação, como usinagem, forjamento e fundição, a manufatura aditiva oferece maior customização, permitindo a produção de peças complexas em um curto período, reduzindo os custos na fabricação [1]. A primeira patente na área de MA de metais foi registrada em 1925 por Ralph Baker (US1533300A), que propôs um método que utiliza o arco elétrico para fabricação de objetos decorativos [2]. Em 1986, Charles W. Hull registrou uma patente (US4575330A) do processo de impressão 3D chamado de estereolitografia (SLA), posteriormente, ele fundou uma empresa chamada 3D Systems, responsável em desenvolver e fabricar impressoras 3D, atualmente essa é a empresa mais valiosa do mundo nesse ramo [3].

De acordo com Raju et al. [4], nos últimos anos, várias pesquisas foram desenvolvidas, como casas, pontes e peças impressas em 3D. Com o aumento da demanda nessa área, empresas estão investindo em máquinas que oferecem um custo acessível, esse custo varia conforme o processo e material. Os materiais processados podem ser em pó, líquido ou arame.

Recebido: 16 Set., 2023. Aceito: 12 Jun., 2024.

E-mail: mziberov@unb.br (MZ)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Segundo a norma ISO/ASTM 52900 [5], os processos de MA se enquadram em sete categorias: *binder jetting* (BJ), *powder bed fusion* (PBF), *sheet lamination* (SL), *directed energy deposition* (DED), *material extrusion* (ME), *material jetting* (MJ) e *vat photopolymerization* (VP).

Dentre as vantagens dessa técnica, tem-se a liberdade de design e a economia de material, e como limitações, pode-se citar a baixa produtividade, alto custo do equipamento e restrição no tamanho conforme o equipamento [6]. É importante considerar todo o ciclo de fabricação do componente, uma vez que podem ser necessárias operações adicionais de pós-processamento para garantir os requisitos de qualidade, tais como baixa rugosidade, tolerâncias dimensionais e melhoria das propriedades mecânicas [7]. Diversas técnicas podem ser aplicadas a depender do tipo de processo de deposição e da necessidade de acabamento. Exemplificando, o acabamento a laser é uma técnica aplicada nos processos de MA que utilizam o laser como fonte de energia para fundir as camadas de pó ou arame. O mesmo laser, com diferentes parâmetros, é utilizado para realizar o acabamento. Esse processo é aplicado em peças produzidas por DED, *selective laser melting* (SLM), *laser metal deposition* (LMD) e laser PBF [8].

Através da otimização mecânica e térmica é possível obter um melhor desempenho em comparação com os métodos convencionais, como a produção de canais de resfriamento interno em câmaras de combustão de motores de foguete. Na medida que essa tecnologia evolui, pode-se obter uma economia em relação a custo e tempo de fabricação, um exemplo disso pode ser visto na Figura 1, passando de uma câmara composta por duas peças soldadas, para uma única peça [9].



Figura 1. Comparação da fabricação convencional com a evolução da manufatura aditiva (custo em US\$, equivalente a 2020, créditos da NASA) [9].

Na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), também é possível a fabricação de canais internos, representando uma solução para que as peças possam ser aquecidas ou resfriadas. Isso é crucial devido às variações de temperatura que precisam ser compensadas para garantir a operação. O trabalho de Tokar [10] apresenta um estudo da formação de canais subsuperficiais de resfriamento/aquecimento em peças metálicas pela ação do arco voltaico, que teve sua patente (BR 102014012951-0) registrada em 2014 [11]. A formação do canal pelo processo TIG Pulsado (Figura 2a), ocorre através da expulsão do metal fundido. Durante o pulso (corrente elevada), tem-se maior fusão do metal de base, e por conta da maior pressão do arco, ocorre a expulsão do metal fundido da região dianteira da poça que se desloca para região traseira. Como resultado, surge uma cratera na região dianteira da poça. Na corrente de base, a pressão do arco diminui, ocorrendo o deslocamento do metal para a região da cratera. Nesse caminho de volta, as camadas inferiores da poça se solidificam antes das superiores, deixando no fundo, um canal subsuperficial, como pode-se observar na Figura 2b e Figura 2c, a aparência da superfície do cordão e a seção longitudinal. Essa técnica é bastante promissora devido à formação de canais longos com diâmetro razoável em diferentes trajetórias.

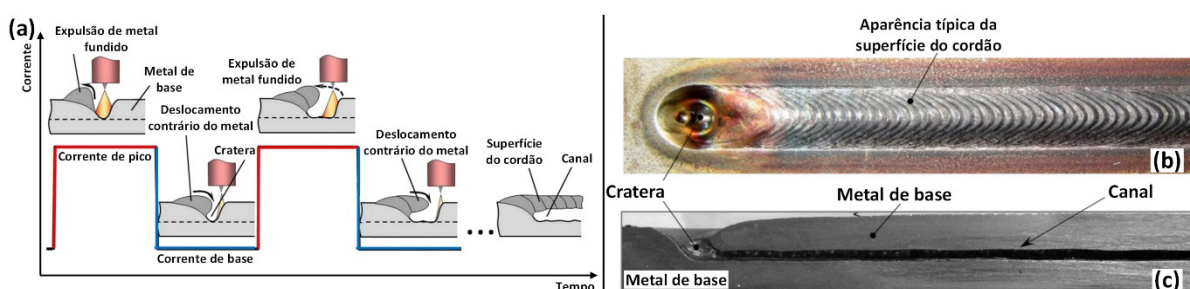


Figura 2. Peça metálica com canal subsuperficial feito pela ação do arco no processo TIG Pulsado: (a) Ilustração da formação dos canais; (b) aspecto superficial; e (c) seção longitudinal [10].

A MADA é uma técnica promissora na fabricação de peças de grande porte, quando se objetiva o tempo de fabricação. No entanto, uma limitação é a determinação dos parâmetros e a estratégia utilizada, que devem ser otimizados de acordo com o material e a geometria. As peças fabricadas passam por resfriamento rápido, o que pode resultar em propriedades não homogêneas, afetando a rigidez e as propriedades mecânicas, bem como a formação de tensões residuais e distorções. Esses defeitos são influenciados pelos ciclos térmicos do processo, que podem ser minimizados quando se utilizam diferentes estratégias de deposição, como a otimização da trajetória e o controle do aporte térmico através do resfriamento da peça em cada camada [12]. Um exemplo dessa necessidade é relatado por Silva et al. [13], que desenvolveram um método de resfriamento por imersão utilizando um tanque com água, cujo processo consiste em elevar o nível de água à medida que as camadas são depositadas. Técnicas como a apresentada, permitem a deposição de uma peça com maior altura e largura mais constante ao longo de toda a sua seção, em comparação com peças depositadas com resfriamento natural.

Com isso, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão sobre a influência das estratégias de deposição em MADA via processo CMT, apresentando as pesquisas realizadas e os avanços da área, além disso, comparar os efeitos causados por diferentes parâmetros utilizados na deposição das peças.

2. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

Segundo a norma ISO/ASTM 52900 [5], a MADA se encaixa na categoria DED. De acordo com Rodrigues et al. [14], o processo possui uma precisão menor em comparação com outros métodos de deposição, utilizando o arco elétrico como fonte de calor e o arame como matéria-prima. Como é possível observar na Tabela 1, o processo SLM possui o feixe com tamanho menor em comparação com o feixe de elétrons, resultando na fabricação de peças com maior precisão. No processo *Electron Beam Melting* (EBM), utiliza-se um equipamento de alto desempenho para aquecimento, reduzindo as tensões residuais. O *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) é recomendado para deposição multimaterial, utilizando múltiplos bicos, enquanto no processo MADA a alta taxa de deposição possibilita a fabricação de grandes componentes. A MADA está sendo adotada por estudos acadêmicos e na indústria devido às vantagens técnicas oferecidas, sendo uma automatização dos processos *Tungsten Inert Gas* (TIG), plasma e *Metal Inert Gas/Metal Active Gas* (MIG/MAG).

Tabela 1. Técnicas de manufatura aditiva baseada em fusão e suas características [15].

Processo	SLM	EBM	LENS	MADA
Potência de saída (W)	100 - 600	500 - 3000	1000 - 3000	1000 - 5000
Tamanho da poça de fusão (mm)	~ 0,10	~ 0,10	~ 0,10	~ 1,00
Tamanho do feixe (mm)	0,04 - 0,50	0,40 – 1,00	1,00 – 3,00	-
Gradiente de temperatura (K/mm)	10 ³ - 10 ⁴	10 ² - 10 ³	10 ² - 10 ⁴	10 - 200
Resfriamento (K/s)	10 ⁵ - 10 ⁷	10 ³ - 10 ⁵	10 ³ - 10 ⁴	10 ² - 10 ³
Características	Alta precisão e ampla aplicabilidade	Baixa tensão residual	Impressão multimaterial	Alta taxa de deposição e fabricação de grandes peças
Referências	Hooper [16]	Al-Bermani et al. [17]	Griffith et al. [18]	Shamsaei et al. [19]

De acordo com Huang et al. [20], a MADA tornou-se um processo promissor com a utilização de várias matérias-primas, como, por exemplo, ligas de alumínio, magnésio, aço e titânio. Sendo um desafio na fabricação de camadas com alta qualidade, podendo variar dependendo dos parâmetros do processo, que podem afetar a qualidade da microestrutura e do acabamento. De acordo com Çam [21], entre as técnicas de MA, os sistemas que utilizam a alimentação de arame estão se tornando mais atraentes do que os sistemas que utilizam pó de metal, devido ao alto custo do pó metálico e à possibilidade de fabricação de peças em grandes dimensões utilizando arame, especialmente o processo MADA. Segundo Williams et al. [22], por meio da MADA, é possível fabricar componentes com mais de 10 kg em titânio, alumínio, aço e outros metais.

Na Figura 3a, pode-se observar a primeira ponte de metal impressa em 3D por meio do processo CMT convencional. A ponte passou por alguns testes, incluindo o teste de carga de 10 ton, que pode ser observado na Figura 3b. Como parte da verificação, também foi realizada a modelagem de elementos finitos, como pode ser observado na Figura 3c. A empresa responsável pela construção da ponte é a MX3D, que utilizou quatro peças principais impressas e quatro redemoinhos de cantos que foram soldados manualmente. A ponte possui uma massa total de 7,80 ton, das quais aproximadamente 4,60 ton foram impressas, sendo necessários mais de 1100 km de arame de aço inoxidável austenítico grau 308LSi [23].

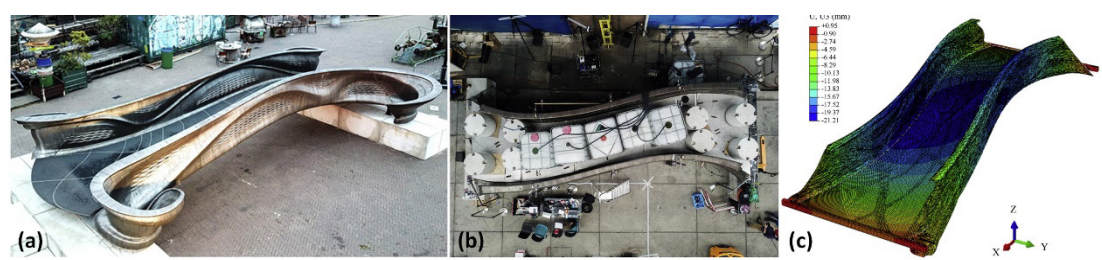


Figura 3. (a) Primeira ponte de metal impressa em 3D; (b) teste físico; e (c) simulação numérica [23].

Com o desenvolvimento de diversas técnicas na área de MA de metais, é crucial tomar decisões eficazes em relação à seleção do processo. Um fator a ser considerado é o custo final, conforme relatado por Cunningham et al. [24], que conduziram uma análise de custos comparando a fabricação de uma pá de turbina e uma peça em forma de X por diferentes processos. Através da análise de custos diretos e indiretos, tais como: custo do arame (£/kg), quantidade de peças por construção, custo do gás de proteção (£/cilindro), tempo de atividade do equipamento (horas), mão de obra, custo do equipamento (£) e depreciação anual, foram determinados os seguintes custos totais que estão apresentados na Tabela 2. Segundo os autores, de acordo com o modelo de custos desenvolvido, o processo MADA apresenta uma relação custo-benefício consideravelmente superior quando comparado aos processos EBM e *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), sem considerar a complexidade da peça. O custo com o gás de proteção teve um impacto maior no valor final em comparação com o custo da matéria-prima e do arame. No entanto, para definir as limitações do processo MADA em relação a outros processos, é necessário realizar uma análise que inclua uma variedade mais ampla de materiais e tamanhos da peça.

Tabela 2. Comparação do custo total de produção de dois componentes fabricados por diferentes processos (custo em £, equivalente a 2017) [24].

Processo	Custo da pá de turbina (£)	Custo da peça em forma de X (£)
MADA	18,359	1,703
EBM	33,362	2,123
DMLS	86,267	5,489

2.1. Processo CMT

O processo CMT é uma variação do processo MIG/MAG desenvolvido pela Fronius, na Áustria, em 2004. O processo de transferência ocorre por curto-circuito, e esse ciclo é dividido em três fases: corrente de pico, corrente de fundo e curto-circuito. Na corrente de pico, ilustrada na Figura 4, ocorre a abertura do arco e o aquecimento do arame para formação da gota. A corrente de fundo é a fase em que uma corrente mais baixa é aplicada, como mostra na Figura 4. A corrente é reduzida para evitar a transferência da gota líquida formada na ponta do arame. Essa fase pendura até o curto-circuito, no qual a tensão do arco se aproxima de “zero” e, ao mesmo tempo, o sinal de retorno é enviado ao alimentador de arame. Isso resulta na retração do arame, como pode-se observar na Figura 4. Nessa etapa, a gota se desprende da ponta do arame e é transferida para a poça de fusão. Após a conclusão da transferência, ocorre novamente a abertura do arco e a alimentação do arame com o fluxo de corrente, como pode-se observado na Figura 4 [26].

No MIG/MAG convencional, o comprimento do arco é ajustado através da tensão. Já no CMT, esse controle ocorre de forma mecânica, ou seja, o arco é extremamente estável, não respondendo às flutuações de tensão, condições da superfície da peça, velocidade do deslocamento da tocha ou mudança no comprimento do arame [27]. Essa técnica é normalmente utilizada com o auxílio de um robô e, no momento da retração do arame, a junta resfria até que o ciclo se repita para a próxima transferência por gota. Devido a esse resfriamento, esse processo é preciso, apresenta menor geração de respingos e proporciona uniões uniformes em comparação com o MIG/MAG convencional. Dentre as técnicas CMT, têm-se o CMT convencional, CMT Pulsado, CMT *Advanced* e CMT *Advanced* Pulsado [28].

No CMT Pulsado, é adicionado um ciclo pulsado ao processo, resultando na transferência de uma gota extra a cada ciclo. Isso significa maior entrada de calor e um aumento na taxa de deposição. O processo tem início de maneira similar ao CMT convencional. No entanto, quando o arame está prestes a emergir na poça de fusão, ocorre o desprendimento de gota extra, como mostrado na Figura 5a. Logo após, o arco é extinto e o ciclo continua. No CMT *Advanced*, o processo ocorre através da combinação de ciclos de polos positivos e negativos. Como pode-se observar na Figura 5b, no momento do curto-circuito, há uma reversão na polaridade da corrente. Isso resulta em um processo com menor entrada de calor em comparação com o CMT convencional. Durante o ciclo com polo negativo, ocorre uma maior taxa de deposição, enquanto no ciclo com polaridade positiva, há uma entrada direcionada de calor e transferência de gotas em um local específico. Quanto ao processo CMT *Advanced* Pulsado, ele é uma combinação dos processos anteriores. Como é possível observar na Figura 5c, quando o polo está negativo, o arame se move em direção à peça. Em seguida, o arame é retraído e ocorre a reversão da polaridade, onde os ciclos são realizados com arco pulsado no polo positivo [29].

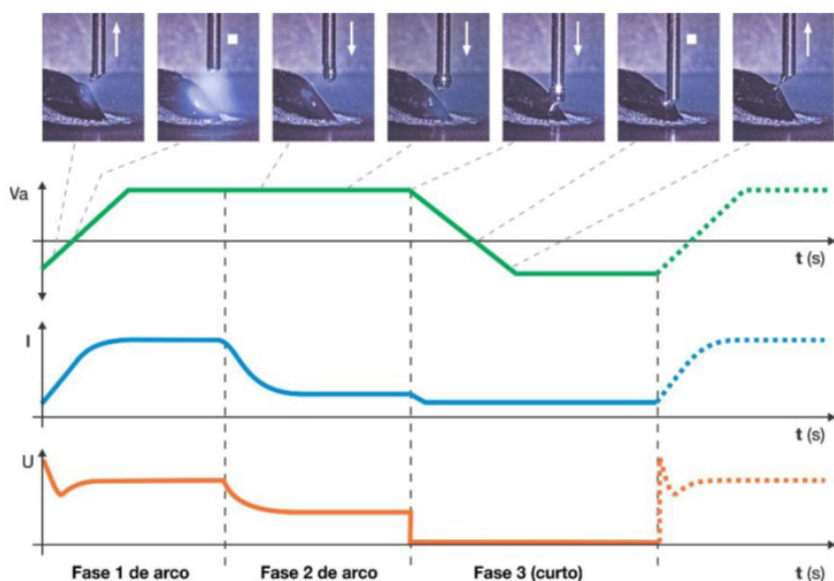


Figura 4. Princípio de operação do processo CMT [25].

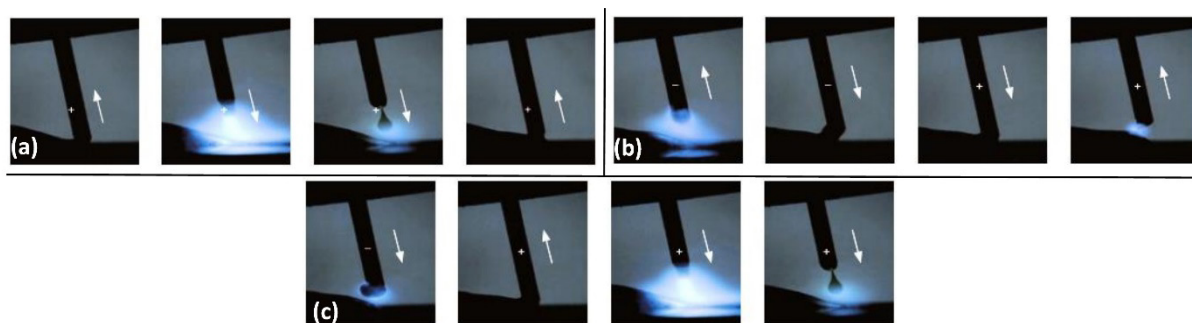


Figura 5. Ciclos do processo CMT: (a) Pulsado; (b) Advanced; e (c) Advanced Pulsado [29].

A entrada de calor utilizando diferentes processos foi estudada por Galeazzi et al. [30], que fabricaram paredes utilizando os processos MIG/MAG, CMT convencional, CMT *Advanced* e CMT Pulsado. A entrada de calor obtida nos processos foi de 20,68 kJ/cm, 22,68 kJ/cm, 19,74 kJ/cm e 26,45 kJ/cm, respectivamente. A parede fabricada pelo processo CMT *Advanced* apresentou grãos menores em relação aos demais, e esse resultado corrobora com os resultados encontrados do aporte térmico. Os autores concluíram que o CMT *Advanced* apresentou menor aporte térmico devido à reversão de polaridade. Isso ocorre porque a inversão de polaridade por um determinado período aliada ao recuo do eletrodo reduz a corrente necessária para a reabertura do arco. A polaridade negativa aumenta a taxa de fusão do arame, pois concentra a maior parte do calor no arame.

3. Estratégias de Deposição em Manufatura Aditiva

Para preencher as camadas na MA, muitos padrões de trajetórias foram desenvolvidos, como pode-se observar na Figura 6. Esses padrões devem ser selecionados de acordo com as limitações da geometria da peça e os padrões de contorno, podendo ser combinados ou variados ao longo da impressão. O contorno é frequentemente empregado em peças metálicas devido à preocupação com as propriedades mecânicas e para evitar os problemas anisotrópicos. Por outro lado, o padrão raster demanda que a peça seja rotacionada ao longo da impressão devido à construção unidirecional [31].

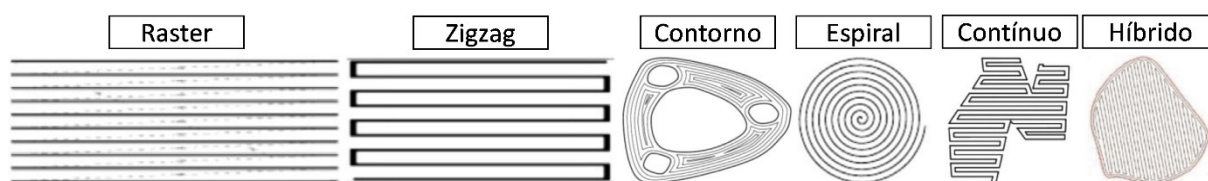


Figura 6. Resumo dos métodos de geração de caminho das camadas [31].

O ciclo térmico durante a fabricação de peças por MADA resulta em uma microestrutura heterogênea, onde o material é aquecido e resfriado continuamente. Essa microestrutura induz o comportamento anisotrópico do material [32]. Como relatado por Laghi et al. [33], que realizaram um estudo das propriedades mecânicas e da microestrutura em três orientações diferentes: transversal, longitudinal e diagonal, de uma parede fabricada de aço inoxidável 304L, como pode ser visualizado na Figura 7. Os autores relataram grãos colunares alinhados com a direção de deposição, da seção inferior até a superior. As tendências para as principais propriedades mecânicas foram semelhantes quando comparadas as orientações das amostras, conforme o posicionamento que pode ser observado na Figura 7, indicando um comportamento anisotrópico do material. Assim, as propriedades das amostras T foram inferiores às das amostras L, as quais, por sua vez, apresentaram-se inferiores em relação às amostras D. De forma mais específica, as amostras L e T exibiram resistência à tração de 513,14 MPa e 552,60 MPa, e alongamento até a ruptura de 21,41% e 22,71%. Por outro lado, as amostras D apresentaram propriedades mecânicas superiores, com uma resistência à tração de 585,03 MPa e 27% de alongamento. Este resultado está relacionado a diferentes texturas cristalográficas, dependendo da orientação.

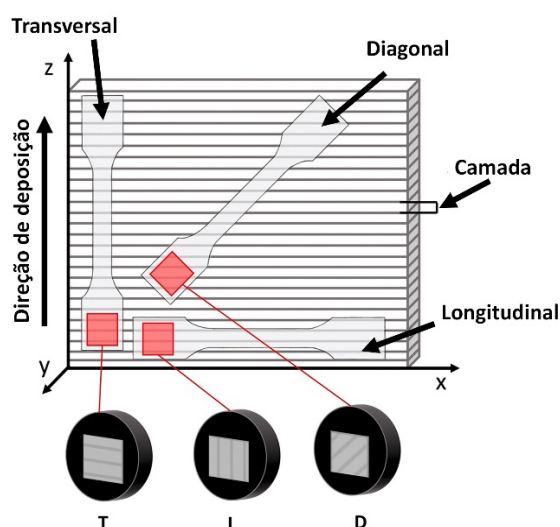


Figura 7. Orientação dos corpos de prova cortados da parede fabricada por MADA [33].

Na MADA, uma peça pode ser fabricada utilizando a estratégia de trajetória bidirecional ou unidirecional, com ou sem o Controle da Temperatura de Interpasse (CTI). O CTI é utilizado para evitar o superaquecimento na deposição, onde a camada subsequente é depositada somente após o resfriamento da camada previamente depositada, até atingir uma temperatura específica. Como relatado por Singh et al. [34] na deposição de três paredes com quinze camadas cada, utilizando o arame NiTi e o processo CMT convencional. Uma parede foi depositada sem o CTI, e as outras duas com CTI de 200 °C e 400 °C. Na análise geométrica, foi observada uma diminuição da altura e aumento da largura da parede à medida que o CTI aumenta. Segundo os autores, isso ocorreu devido à diminuição da viscosidade da poça de fusão à medida que ocorre a deposição, resultante do aumento da temperatura de pré-aquecimento, o que leva ao aumento da largura nas camadas superiores. Também foi relatado que a poça de fusão nas primeiras camadas é menor quando se utiliza um CTI mais baixo, devido à maior dissipação de calor no substrato, causada pela diferença de temperatura entre a poça de fusão e o substrato. Conforme Kou [35], a taxa de resfriamento é reduzida pelo pré-aquecimento, sendo uma prática comum para diminuir tensões quando se utiliza uma temperatura adequada de pré-aquecimento. A análise das propriedades mecânicas realizada por Singh et al. [34] demonstrou uma resistência à tração de 910 MPa (para 200 °C), 620 MPa (para 400 °C) e 400 MPa (sem CTI). Observou-se que as propriedades mecânicas da amostra com menor CTI (200 °C) apresentaram aumento devido ao refinamento do grão.

Os mesmos resultados foram relatados por Soares et al. [36], que realizaram o estudo da geometria de peças depositadas da liga 410NiMo por CMT convencional. Os autores fabricaram paredes com 30 camadas utilizando três estratégias diferentes: deposição por blocos (15 camadas + 15 camadas), deposição contínua (30 camadas) e deposição com CTI (30 camadas), como pode ser observado na Figura 8a, Figura 8b e Figura 8c, respectivamente. A deposição por blocos consiste no resfriamento até 100 °C após a deposição de 15 camadas. Através dos resultados obtidos, foi observado que a deposição por blocos resultou em uma largura efetiva reduzida devido ao resfriamento após 15 camadas, e uma altura 1,6% maior em comparação com a amostra depositada de forma contínua. A deposição com CTI, onde foi utilizado o resfriamento natural com uma faixa de temperatura de 45 °C até 55 °C, resultou em uma amostra linear com melhor acabamento superficial e com uma altura 25% maior que as demais. Isso ocorre devido à menor entrada de calor na deposição com CTI, aumentando a viscosidade da poça de fusão e gerando camadas com menor largura e maior altura.

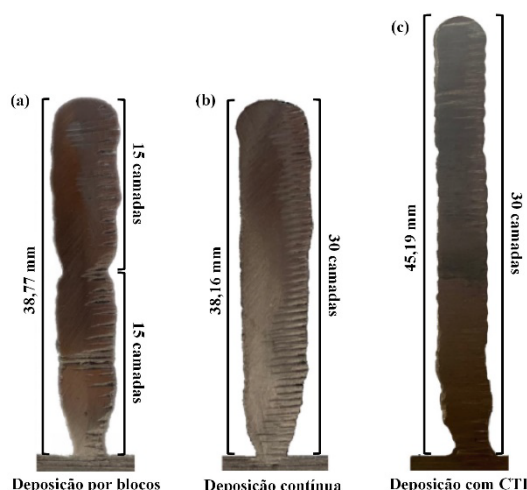


Figura 8. Paredes depositadas utilizando três estratégias diferentes [36].

De acordo com Motwani et al. [37], a necessidade de propriedades específicas em locais determinados de uma peça favorece a utilização da deposição por blocos, que envolve a combinação de diferentes materiais, possibilitando a redução dos custos de fabricação em comparação com a utilização de apenas um material de alto custo. Motwani et al. [37] conduziram uma análise microestrutural em uma parede fabricada em dois blocos por meio da técnica CMT convencional. O primeiro bloco era composto por 30 camadas do arame ER316LSi, enquanto o segundo bloco continha 30 camadas do arame ERNiCrMo-3. Os resultados da análise da macroestrutura e da microestrutura na interface dos dois blocos revelaram uma conexão sólida, sem apresentar quaisquer defeitos visíveis, demonstrando a viabilidade da fabricação de uma peça utilizando diferentes ligas. O teste realizado na interface resultou em uma falha na amostra de ER316LSi, com uma resistência à tração média de 660 MPa, limite de escoamento de 412 MPa e alongamento de 49,30%. Esses resultados estavam em conformidade com o esperado, dado que o material tinha propriedades mecânicas inferiores, e os valores se aproximaram das propriedades do arame ER316LSi.

Novelino et al. [38] realizaram um estudo referente à influência dos parâmetros de deposição na geometria de peças fabricadas pelo processo CMT convencional utilizando o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Nesse estudo, os autores utilizaram o CTI de 30 °C, o que resultou em uma altura estável ao longo do comprimento da parede. Também foi observado que ambas as paredes depositadas de forma bidirecional e unidirecional, conforme pode ser observado na Figura 9a, apresentam um decaimento no ponto final de deposição em cada camada. Isso ocorre devido ao aumento da temperatura durante o processo, o que leva à expansão da poça de fusão e à redução da altura efetiva nesse ponto. Outro fator importante é o comprimento da parede. As paredes com comprimento de 160,0 mm, como mostrado na Figura 9b, obtiveram uma melhor qualidade na geometria devido à eficiência do resfriamento, que reduz a concentração de calor observada nas amostras com 70,0 mm de comprimento, como ilustrado na Figura 9a. Os autores concluíram que, na deposição bidirecional, ocorre a uniformidade na entrada de calor ao longo de toda a camada, em comparação com a direção unidirecional. Isso resulta em paredes com geometria homogênea de altura e largura, como pode-se observar na Figura 9b. Os melhores resultados foram obtidos utilizando corrente média de 62 A e velocidade de deslocamento da tocha (V_d) de 8,0 mm/s, considerando as condições de resfriamento natural.

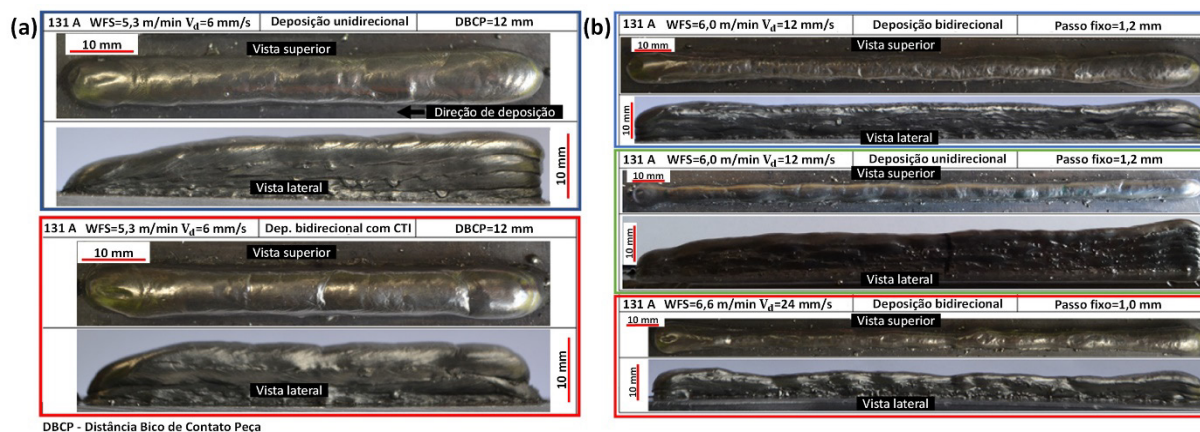


Figura 9. Amostras depositadas com: (a) 5 camadas e 70,0 mm de comprimento; e (b) 10 camadas e 160,0 mm de comprimento [38].

Um defeito típico no processo MADA é a formação de *humping*, que ocorre normalmente quando se utiliza uma velocidade de deslocamento alta. Esse defeito é caracterizado por uma série de ondulações periódicas ao longo da camada e, caso se propague, pode gerar diversos defeitos nas camadas posteriores [39]. Como mencionado por Yuan et al. [39] no processo CMT *advanced*, na deposição multidirecional utilizando o arame ER70S-6. Além da análise do defeito, os autores forneceram algumas diretrizes em relação à seleção de parâmetros adequados. Para evitar o *humping*, a escolha da velocidade de deslocamento da tocha e a direção de deposição são parâmetros críticos. Na Figura 10a, é possível observar o mapa de *humping*, que descreve a ocorrência desse efeito com base nos resultados experimentais. Quando a deposição é realizada na posição vertical para cima, é considerado 0°; direção horizontal, 90°; e na vertical para baixo, 180°. Pode-se notar que a velocidade de deslocamento máxima aumenta com o aumento do ângulo da direção de deposição. Adebayo et al. [40] investigaram o *humping* no processo CMT convencional, utilizando o arame ER70S-6 com diâmetro de 0,8 mm e 1,2 mm. Os autores utilizaram diferentes valores para a relação entre a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de deslocamento da tocha (V_a/V_d). Conforme ilustrado na Figura 10b, nas condições estudadas, a ocorrência desse efeito foi identificada a partir de uma velocidade de 600,0 mm/min.

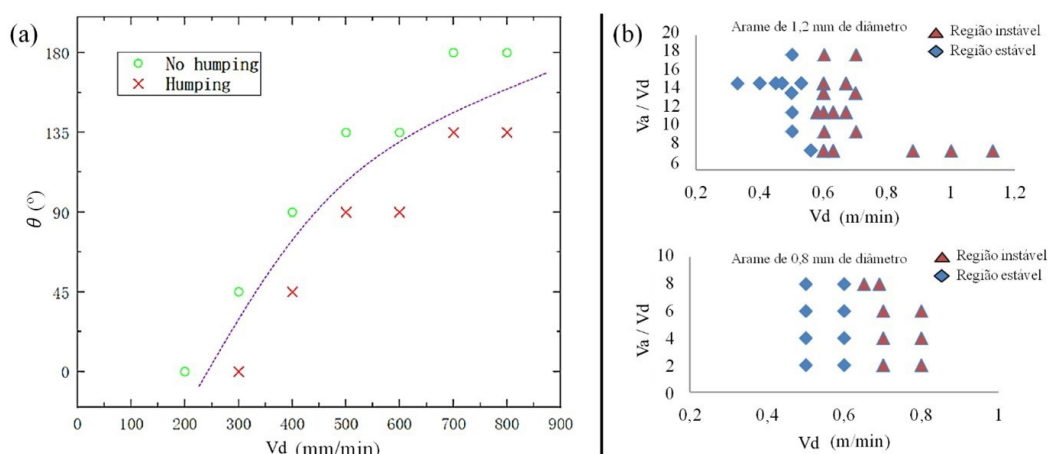


Figura 10. (a) Mapa de *humping* proposto da V_d em função da inclinação da direção de deposição (θ) [39]; e (b) gráfico da incidência de *humping* em função da V_d [40].

No processo CMT, outro fator que pode causar defeito e afetar a resistência da peça, de acordo com a estratégia de deposição utilizada, são as tensões residuais. Liskevych et al. [41] realizaram um estudo da análise experimental de Tensões Residuais (TR) em peças fabricadas por MADA via CMT convencional. Neste estudo, os autores realizaram a deposição de paredes com 10, 25, 50 e 100 camadas, como pode-se observar na Figura 11a, utilizando o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e a estratégia de deposição bidirecional com arco contínuo. Para medir as tensões residuais, foi utilizada a técnica semidestrutiva da *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI). Foram realizados furos de 0,8 mm de diâmetro e 0,4 mm de profundidade no substrato e na superfície das camadas, espaçados aproximadamente a cada 8,5 mm ao longo da altura das paredes. O software do equipamento fornece as tensões longitudinais e transversais.

A partir dos resultados obtidos, os autores Liskevych et al. [41] afirmaram que independentemente da quantidade de camadas, a magnitude das tensões residuais tende a diminuir com a profundidade da medição. Também foi observado que as tensões no substrato são dependentes da quantidade de camadas depositadas, como ilustrado na Figura 11b. Na parede de 10 camadas, as tensões começam como trativas no substrato (41,1 MPa) e evoluem para compressivas com maior magnitude nas camadas inferiores (-65,5 MPa). A parede de 25 camadas apresenta tensões compressivas no substrato (-73,4 MPa), na interface entre o substrato e da parede observam-se tensões nulas e evoluem para trativas em aproximadamente 22% da tensão de escoamento do material. Na metade de sua altura, as tensões mudam e apresentam tensões compressivas até as últimas camadas (-75,9 MPa). Por sua vez, a parede de 50 camadas apresenta tensões compressivas no substrato (-223,0 MPa), evoluem para trativas nas camadas intermediárias e para compressivas na superfície (-20,6 MPa). Por fim, a parede de 100 camadas apresenta tensões compressivas no substrato (-71,6 MPa), na interface e nas camadas inferiores, evoluem para tensões trativas nas camadas intermediárias e mudam para compressivas na superfície (-29,8 MPa). Portanto, exceto na amostra com 10 camadas, foi relatada a tendência de tensões compressivas no substrato, trativas nas camadas intermediárias e compressivas nas camadas superficiais. Os autores concluíram que esse estudo é importante para indicar a possibilidade de fadiga do material onde ocorrem tensões trativas e que deformações nos componentes podem ocorrer onde há incidência de tensões compressivas.

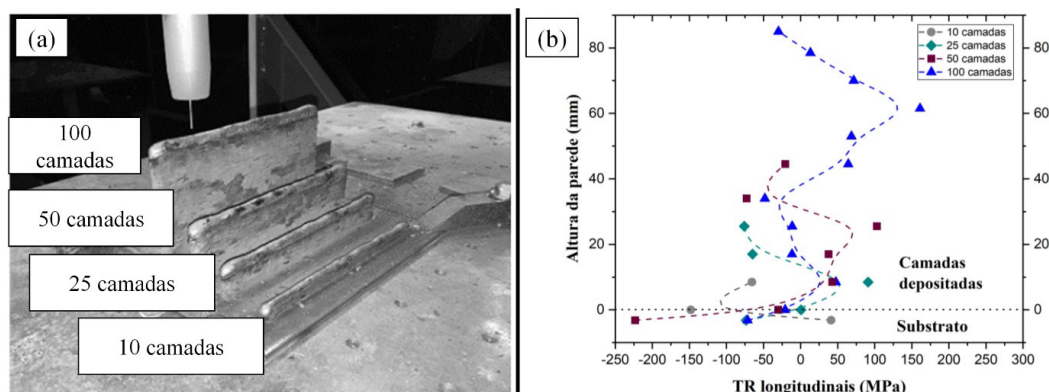


Figura 11. (a) Paredes fabricadas; e (b) TR longitudinais medidas nos corpos de prova fabricados com diferentes quantidades de camadas [41].

Nagasai et al. [42] realizaram um estudo sobre o efeito da entrada de calor nas propriedades mecânicas de peças cilíndricas fabricadas pelos processos MIG/MAG convencional e CMT convencional. O material utilizado foi o ER70S-6, com diâmetro de 1,20 mm. Devido à alta entrada de calor (0,502 kJ/mm) no processo MIG/MAG convencional, a penetração foi aumentada e observando-se que o componente apresentou menor altura média de camada. No processo CMT convencional, a entrada de calor foi de 0,384 kJ/mm; portanto, a superfície do componente é mais consistente devido ao menor aporte térmico e dispersão térmica. Os autores confeccionaram 6 corpos de prova (3 da região inferior e 3 da região superior). No processo MIG/MAG convencional, os resultados demonstraram que a região superior possui maior resistência e menor ductilidade (dureza de 166 ± 5 HV_{0,5}) do que a inferior (dureza de 156 ± 5 HV_{0,5}). No processo CMT convencional, a região superior também apresentou maior resistência e menor ductilidade (dureza de 181 ± 3 HV_{0,5}) em relação à região inferior (dureza de 169 ± 2 HV_{0,5}). Portanto, a dureza da região superior do componente fabricado pelo CMT convencional é 9,03% maior do que a do componente fabricado pelo MIG/MAG convencional. Da mesma forma, a dureza da região inferior do componente CMT convencional é 8,33% maior do que a do componente MIG/MAG convencional. A resistência do componente fabricado pelo processo CMT convencional é 14,68% maior na região inferior e 21,70% maior na região superior, em comparação com o componente fabricado pelo processo MIG/MAG convencional.

Os autores Nagasai et al. [42] concluíram que os componentes apresentaram microestruturas semelhantes na região inferior. No entanto, os parâmetros utilizados no processo MIG/MAG aumentaram o aporte térmico, elevando o tempo de solidificação e de resfriamento, revelando grãos maiores (12,63 µm). No processo CMT convencional, o baixo aporte térmico devido aos parâmetros utilizados revelaram grãos finos (8,94 µm), devido à diminuição do tempo de solidificação e o tempo de resfriamento. Na Figura 12, é possível observar os componentes cilíndricos fabricados. A superfície do componente fabricado por MIG/MAG convencional apresenta superfície áspera e nódulos evidentes, enquanto a superfície do componente confeccionado pelo método CMT convencional apresenta-se clara e homogênea, sem desenvolvimento de nódulos.

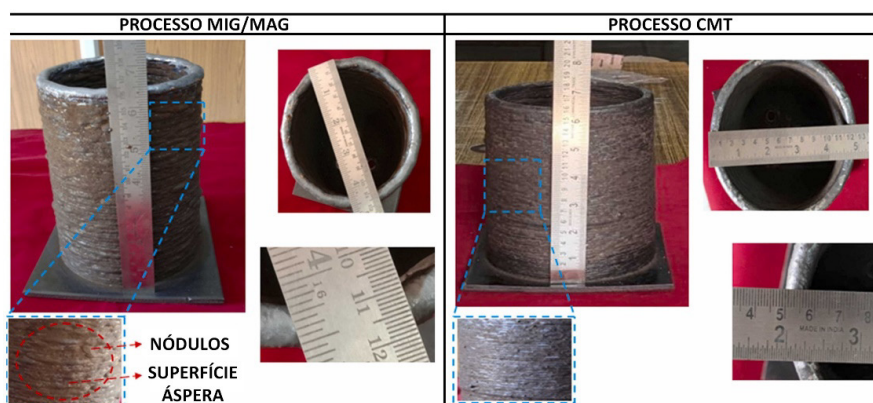


Figura 12. Fotografias dos componentes cilíndricos de aço carbono fabricados [42].

Na MADA, a deposição das camadas é normalmente realizada na direção vertical, ou seja, a tocha é posicionada de forma perpendicular à mesa de trabalho. Um desafio surge quando há a necessidade de construir peças com estruturas que possuam saliências quase horizontais, que podem exigir um tipo de suporte temporário. Yuan et al. [43] estudaram a fabricação de peças metálicas com estruturas salientes através do processo CMT advanced. O material utilizado foi o arame ER70S-6, com diâmetro de 0,9 mm, e o gás de proteção utilizado foi Ar+20CO₂ com uma vazão 18,0 l/min. Os parâmetros investigados no processo foram: velocidade de alimentação do arame (V_a), velocidade de deslocamento da tocha (V_d), distância bico de contato peça (DBCP) e inclinação da tocha. Para garantir uma variação controlada na altura do cordão ao longo do percurso, foi empregada a deposição bidirecional. Na análise da velocidade de deslocamento da tocha, como pode ser observado na Figura 13a, os autores

variaram V_a de 1,0 e 5,0 m/min, mantendo V_d constante em 0,1 m/min. Resultados favoráveis foram obtidos para baixos valores de V_a , enquanto geometrias irregulares foram observadas em 5 m/min. Isso ocorre devido à diminuição da tensão superficial causada pelo aumento da temperatura, o que compromete a estabilidade da poça de fusão. Ao analisar o efeito da velocidade de alimentação do arame, como pode-se observar na Figura 13b, os autores variaram a velocidade de deslocamento da tocha de 0,1 m/min a 0,6 m/min, com a V_a mantida constante em 4 m/min.

Segundo os autores Yuan et al. [43], o aumento da V_d resulta em uma redução do volume depositado e da entrada de calor, contribuindo para o aumento da tensão superficial. Entretanto, quando a V_d atinge 0,4 m/min, o cordão se deteriora. Na análise da DBCP, como ilustrado na Figura 13c, onde a distância bico de contato peça foi variada de 5,0 mm a 21,0 mm, os resultados revelaram que o aumento do DBCP resulta em cordões irregulares, por conta do aumento da entrada de calor. E por fim, os autores estudaram os efeitos da variação da inclinação da tocha de 45° até 90°, conforme ilustrado na Figura 13d. O metal fundido cede à medida que o ângulo aumenta, indicando que uma geometria mais precisa é alcançada com ângulos menores. Para avaliar o melhor desempenho dos parâmetros propostos, três cenários foram empregados na fabricação de peças complexas com saliências. O primeiro cenário, como ilustrado na Figura 13e, envolve uma parede com curvatura depositada inclinadamente sobre outra parede. No segundo cenário, como pode-se observar na Figura 13f, uma parede horizontal curvada é depositada em um cilindro. No terceiro cenário, como ilustrado na Figura 13g, um cilindro é depositado sobre um cubo.

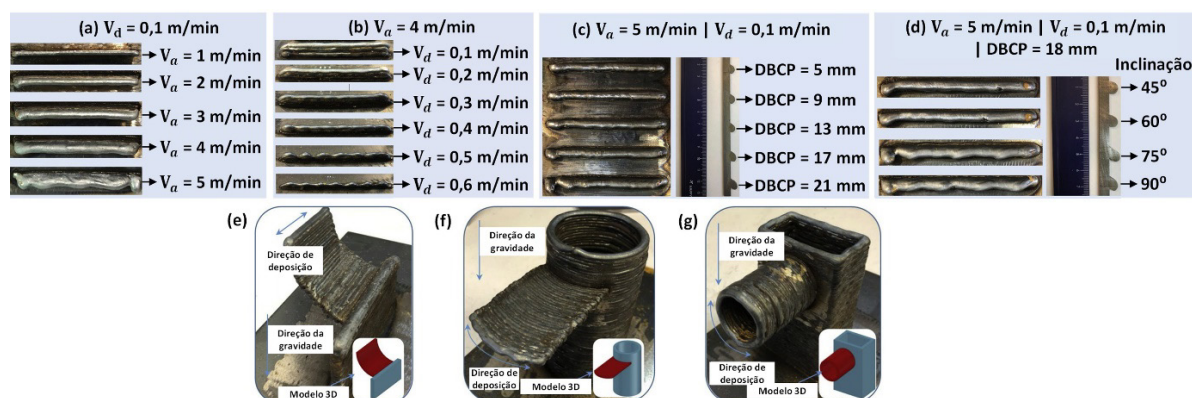


Figura 13. Geometria das camadas depositadas variando: (a) V_a ; (b) V_d ; (c) DBCP; e (d) inclinação da tocha [43].

Xiong et al. [44] conduziram um estudo sobre a fabricação de peças inclinadas utilizando o processo MIG/MAG convencional. Durante o processo, a tocha foi mantida perpendicular à mesa, e vários parâmetros foram discutidos, incluindo a distância de deslocamento, a taxa de alimentação do arame e a velocidade de deslocamento. O arame empregado foi o H08Mn2Si com um diâmetro de 1,20 mm. Na Figura 14, é possível visualizar um diagrama esquemático da deposição em uma peça inclinada. O eixo Z corresponde à altura de deposição, o eixo X representa a distância de deslocamento da tocha e o eixo Y é o comprimento da deposição. Ao analisar o efeito da distância bico de contato peça, os autores variaram essa distância entre 0 mm, 0,50 mm e 1,00 mm. A taxa de alimentação do arame foi mantida em 3,73 m/min, e a velocidade de deslocamento foi fixada em 5,00 mm/s. Nesse contexto, aumentar a distância bico de contato peça possibilita a obtenção de ângulos de inclinação maiores. Com uma distância de 1,00 mm, o ângulo máximo de inclinação atingiu 35°. Na análise da taxa de alimentação do arame, como pode-se observar na Figura 15a, mantendo a velocidade de deslocamento em 5,00 mm/s, a alimentação do arame variou de 2,12 m/min para 4,67 m/min. Os autores concluíram que o aumento na taxa de alimentação do arame resulta em uma diminuição do ângulo máximo de inclinação, variando de 75° a 27°, conforme observado nesse experimento. Quanto à análise da velocidade de deslocamento da tocha, como ilustrado na Figura 15b, em que a velocidade variou de 2,50 mm/s para 10,00 mm/s, enquanto a taxa de alimentação do arame foi mantida constante em 3,73 m/min, os autores constataram que o ângulo de inclinação é diretamente proporcional à velocidade de deslocamento. Nesse caso, os ângulos variaram de 31° a 50°.

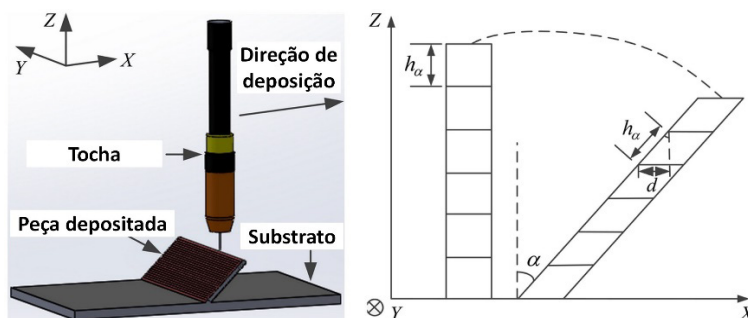


Figura 14. Diagrama esquemático de deposição da peça inclinada, onde α é o ângulo de inclinação, d é a distância de deslocamento e h_α é a altura da camada da parede inclinada [44].

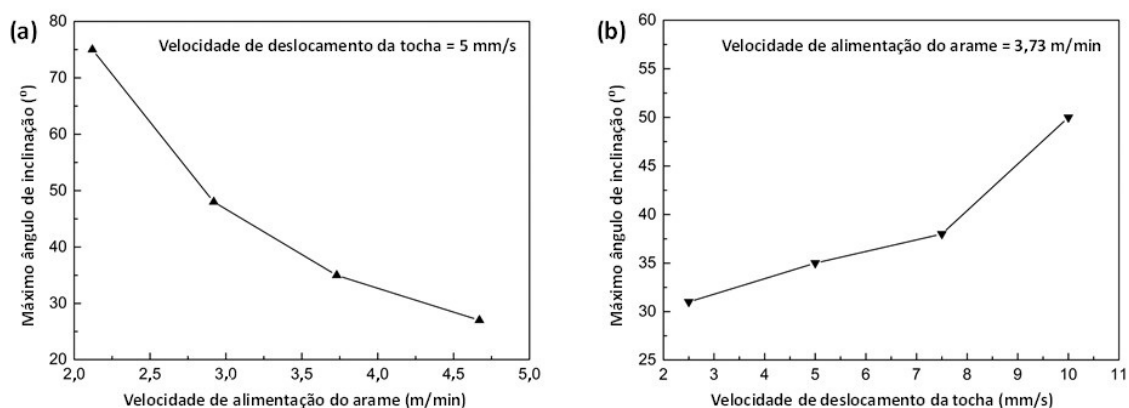


Figura 15. Variação do ângulo máximo de inclinação em função da: (a) Velocidade de alimentação do arame; e (b) velocidade de deslocamento da tocha [44].

O processo MADA permite a deposição em camadas de uma estrutura inclinada sem a necessidade de manipulação da peça, como descrito por Kazanas et al. [45]. Eles realizaram a impressão de paredes em diversos ângulos utilizando a tocha na posição inclinada, como pode ser observado na Figura 16a. Os autores, utilizaram o arame ER70S-6 com diâmetro de 0,8 mm, produzindo 4 paredes, conforme apresentado na Figura 16b. As paredes tinham tamanhos de 200,0 mm de comprimento, 60,0 mm de altura e espessura variando entre 4,0 mm e 5,0 mm, com ângulos de inclinação de 15°, 30°, 45° e 60°. Na deposição de ângulos menores, ocorre a formação de protuberâncias devido à distância entre a base e a parede. Além disso, o ângulo agudo atua como um gerador de tensões. Para resolver esse problema, os autores depositaram a primeira camada com 3 deposições subsequentes, a segunda com 2 e, a partir da terceira, com apenas 1, conforme ilustrado na Figura 16c. Essa técnica permitiu eliminar o efeito *hump*, criar um raio no lugar do ângulo agudo e aumentar a possibilidade de usinagem no acabamento. Os resultados da pesquisa de Kazanas et al. [45] levaram à conclusão de que o processo MIG/MAG convencional permite a deposição de paredes inclinadas na faixa de 15° até 90°.

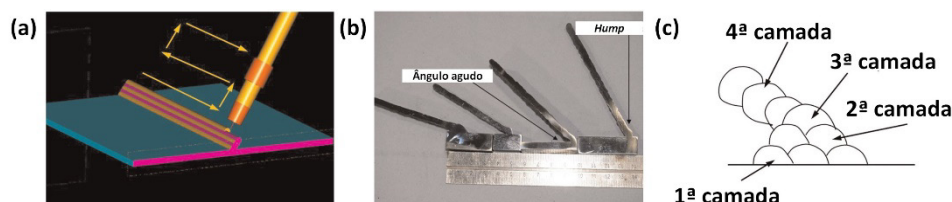


Figura 16. (a) Posição de deposição; (b) paredes depositadas; e (c) modelo esquemático da técnica utilizada [45].

Além disso, a fabricação de peças metálicas inclinadas pode ser realizada utilizando uma mesa de trabalho com eixos rotativos e inclináveis, os quais são responsáveis pela geração das peças com saliência. Esse processo foi descrito por Panchagnula e Simhambhatla [46], os quais realizaram a deposição de cones com ângulos variando de 10° a 35° via CMT convencional, conforme ilustrado na Figura 17a. Para depositar esses componentes, a tocha foi mantida em posição plana enquanto a mesa foi inclinada em um ângulo equivalente ao da parede do cone, conforme evidenciado na Figura 17b. Após a inclinação da mesa, o componente foi submetido a um movimento giratório de 0° a 360° para depositar cada camada. Os autores concluíram que essa técnica se mostra eficiente na fabricação de peças complexas com inclinação, eliminando a necessidade de estruturas de suporte.

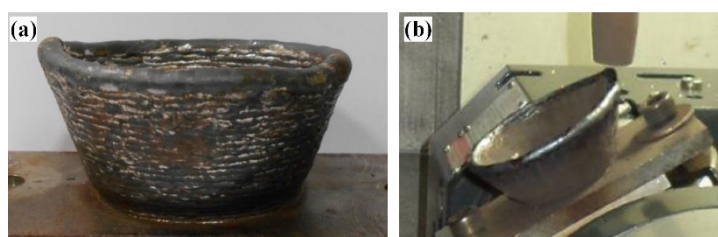


Figura 17. (a) Componente depositado com 20°; e (b) substrato inclinado no ângulo necessário para alinhar o componente com a tocha [46].

4. Conclusão

Este artigo apresentou uma revisão da influência da estratégia de deposição na geometria de peças fabricadas por MADA. Diversos estudos têm sido realizados, utilizando diferentes parâmetros e estratégias, proporcionando melhorias e inovações em estudos subsequentes. Através dos estudos apresentados, foi possível concluir que:

- i. Em peças metálicas utilizando a MADA, a trajetória bidirecional resulta em deposições uniformes ao longo da camada devido ao controle do aporte térmico, em comparação com a trajetória unidirecional;
- ii. O controle da entrada de calor é um fator decisivo nas deposições, onde se pode utilizar o resfriamento da camada previamente depositada para realizar a deposição da camada seguinte;
- iii. Na MADA, o efeito de *humping* foi observado quando não se utiliza uma relação adequada entre a velocidade de deslocamento da tocha e a velocidade de alimentação do arame;
- iv. Na deposição de peças utilizando a tocha inclinada a 90° no processo CMT *advanced*, observou-se o escorrimento do material com o aumento da velocidade de alimentação do arame;
- v. O aumento da distância bico de contato peça resulta em uma maior entrada de calor e na deposição de camadas irregulares;
- vi. Pode-se obter peças inclinadas sem a utilização de suporte, utilizando diferentes estratégias. Uma abordagem consiste em usar a tocha na posição plana, enquanto a inclinação é alcançada pelo avanço da tocha durante a deposição das camadas subsequentes. Outra estratégia envolve a utilização da tocha inclinada com o ângulo desejado.

Financiamento

CNPq projetos 405499/2022-1 e 402730/2023-2.

Contribuição dos autores

RDAMV: metodologia, investigação e redação – versão original. OL: metodologia e redação – revisão e edição. MZ: conceitualização, redação – revisão e edição e supervisão.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Faculdade de Tecnologia, ao Departamento de Engenharia Mecânica e à Universidade de Brasília pelo apoio. Os autores agradecem ao CNPq projetos 405499/2022-1 e 402730/2023-2.

Referências

- [1] Liu G, Zhang X, Chen X, He Y, Cheng L, Huo M, et al. Additive manufacturing of structural materials. *Materials Science and Engineering R Reports*. 2021;145:100596. <http://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596>.
- [2] Ralph B. Method of making decorative articles. United States patent US 1533300A. 1925 Apr 14.
- [3] Hull CW. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. United States patent US 4575330A. 1986 Mar 11.
- [4] Raju R, Manikandan N, Palanisamy D, Arulkirubakaran D, Binoj JS, Thejasree P, et al. A review of challenges and opportunities in additive manufacturing. Cham: Springer; 2022. p. 23-29. (Lecture Notes in Mechanical Engineering). http://doi.org/10.1007/978-981-19-0244-4_3.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO/ASTM 52900: manufatura aditiva - princípios gerais - terminologia. Rio de Janeiro: ABNT; 2018.
- [6] Bandyopadhyay A, Bose S. Additive manufacturing. New York: CRC Press; 2015. <http://doi.org/10.1201/b18893>.
- [7] Gomes MC, Santos AG, Oliveira D, Figueiredo GV, Ribeiro KSB, de Los Rios GAB, et al. Micro-machining of additively manufactured metals: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;118(7-8):2059-2078. <http://doi.org/10.1007/s00170-021-08112-0>.
- [8] Oliveira D, Gomes MC, dos Santos AG, Ribeiro KSB, Vasques IJ, Coelho RTC, et al. Abrasive and non-conventional post-processing techniques to improve surface finish of additively manufactured metals: a review. *Progress in Additive Manufacturing*. 2023;8(2):223-240. <http://doi.org/10.1007/s40964-022-00325-3>.
- [9] Kerstens F, Cervone A, Gradl P. End to end process evaluation for additively manufactured liquid rocket engine thrust chambers. *Acta Astronautica*. 2021;182:454-465. <http://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.02.034>.
- [10] Tokar A. Confecção de canais subsuperficiais de resfriamento/aquecimento em peças metálicas pela ação de um arco de soldagem [tese de doutorado]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2015.
- [11] Ponomarov V, Reis RP. Técnicas de confecção de canais superficiais e subsuperficiais em peças metálicas utilizando processos de soldagem. Brazil patent BR 102014012951-0. 2014 May 29.

- [12] Tankova T, Andrade D, Branco R, Zhu C, Rodrigues D, Silva LS. Characterization of robotized CMT-WAAM carbon steel. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022;199:107624. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107624>.
- [13] Silva LJ, Souza DM, de Araújo DB, Reis RP, Scotti A. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;107(5-6):2513-2523. <http://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4>.
- [14] Rodrigues TA, Duarte V, Miranda RM, Santos TG, Oliveira JP. Current status and perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials*. 2019;12(7):1121. <http://doi.org/10.3390/ma12071121>. PMID:30987382.
- [15] Liu Z, Zhao D, Wang P, Yan M, Yang C, Chen Z, et al. Additive manufacturing of metals: microstructure evolution and multistage control. *Journal of Materials Science and Technology*. 2022;100:224-236. <http://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.06.011>.
- [16] Hooper PA. Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*. 2018;22:548-559. <http://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.032>.
- [17] Al-Bermani SS, Blackmore ML, Zhang W, Todd I. The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science*. 2010;41(13):3422-3434. <http://doi.org/10.1007/s11661-010-0397-x>.
- [18] Griffith ML, Ensz MT, Puskar JD, Robino CV, Brooks JA, Philliber JA, et al. Understanding the microstructure and properties of components fabricated by Laser Engineered Net Shaping (LENS). *Proceedings of the Materials Research Society*. 2000;625:9. <http://doi.org/10.1557/PROC-625-9>.
- [19] Shamsaei N, Yadollahi A, Bian L, Thompson SM. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing. Part II: mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing*. 2015;8:12-35. <http://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.002>.
- [20] Huang L, Chen X, Konovalov S, Su C, Fan P, Wang Y, et al. A review of challenges for Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2023;76(5):1123-1139. <http://doi.org/10.1007/s12666-022-02823-y>.
- [21] Çam G. Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM). *Materials Today: Proceedings*. 2022;62:77-85. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.137>.
- [22] Williams SW, Martina F, Addison AC, Ding J, Pardal G, Colegrove P. Wire + arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*. 2016;32(7):641-647. <http://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.
- [23] Gardner L, Kyvelou P, Herbert G, Buchanan C. Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;172:106233. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106233>.
- [24] Cunningham CR, Wikshaland S, Xu F, Kemakolam N, Shokrani A, Dhokia V, et al. Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*. 2017;11:650-657. <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.163>.
- [25] Marques C. Análise de técnicas e efeitos físicos da alimentação dinâmica do arame no processo de soldagem MIG/MAG com vistas ao desenvolvimento de um sistema flexível nacional [tese de doutorado]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2017.
- [26] Selvi S, Vishvakshen A, Rajasekar E. Cold metal transfer (CMT) technology: an overview. *Defence Technology*. 2018;14(1):28-44. <http://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002>.
- [27] Furukawa K. New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets. *Welding International*. 2006;20(6):440-445. <http://doi.org/10.1533/wint.2006.3598>.
- [28] Srinivasan D, Sevel P, Solomon IJ, Tanushkumaar P. A review on Cold Metal Transfer (CMT) technology of welding. *Materials Today: Proceedings*. 2022;64:108-115. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.016>.
- [29] Tapiola J. Cold Metal Transfer cladding of wear and corrosion resistant coatings in engine applications [dissertação de mestrado]. Tampere: Tampere University of Technology; 2017.
- [30] Galeazzi D, Silva RHG, Viviani AB, Jaeger PR, Schwedersky MB. Evaluation of thermal and geometric properties of martensitic stainless steel thin walls built by additive manufacturing cold metal transfer (CMT) processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;120(3-4):2151-2165. <http://doi.org/10.1007/s00170-022-08921-x>.
- [31] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2015;34:8-19. <http://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.01.003>.
- [32] Belotti LP, van Nuland TFW, Geers MGD, Hoefnagels JPM, van Dommelen JAW. On the anisotropy of thick-walled wire arc additively manufactured stainless steel parts. *Materials Science and Engineering A*. 2023;863:144538. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144538>.
- [33] Laghi V, Palermo M, Tonelli L, Gasparini G, Ceschini L, Trombetti T. Tensile properties and microstructural features of 304L austenitic stainless steel produced by wire-and-arc additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;106(9-10):3693-3705. <http://doi.org/10.1007/s00170-019-04868-8>.
- [34] Singh S, Palani IA, Dehgahi S, Paul CP, Prashanth KG, Qureshi AJ. Influence of the interlayer temperature on structure and properties of CMT wire arc additive manufactured NiTi structures. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;966:171447. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171447>.

- [35] Kou S. *Welding metallurgy*. New Jersey: John Wiley & Sons; 2003.
- [36] Soares MAA, Novelino ALB, Ziberov M. Geometry study on 410NiMo alloy parts printed by WAAM-CMT. In: 12th Brazilian Manufacturing Engineering Congress (COBEF); 2023; Brasília, DF. Cham: Springer; 2024. p. 114-125. (Lecture Notes in Mechanical Engineering). http://doi.org/10.1007/978-3-031-43555-3_11.
- [37] Motwani A, Kumar A, Puri Y, Lautre NK. Mechanical characteristics and microstructural investigation of CMT deposited bimetallic SS316LSi-IN625 thin wall for WAAM. *Welding in the World*. 2023;67(4):967-980. <http://doi.org/10.1007/s40194-022-01403-4>.
- [38] Novelino ALB, Carvalho GC, Ziberov M. Influence of WAAM-CMT deposition parameters on wall geometry. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2022;5:100105. <http://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100105>.
- [39] Yuan L, Pan Z, Ding D, He F, van Duin S, Li H, et al. Investigation of humping phenomenon for the multi-directional robotic wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2020;63:101916. <http://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101916>.
- [40] Adebayo A, Mehnen J, Tonnellier X. Limiting travel speed in additive layer manufacturing. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Trends in Welding Research*; 2012 June 4-8; Chicago, IL, USA. Detroit: ASM International; 2012.
- [41] Liskevych O, Carli PS, Santos LF, Almeida EM, Novelino ALB, Ziberov M. Análise experimental de tensões residuais em peças produzidas por manufatura aditiva a arco. In: *Anais do 12º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*; 2023 Maio 10-12; Brasília, Brasil. Rio de Janeiro: ABCM; 2023. <http://doi.org/10.26678/ABCM.COBEF2023.COF23-0083>
- [42] Nagasai BP, Malarvizhi S, Balasubramanian V. Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2022;36:100-116. <http://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.11.005>.
- [43] Yuan L, Pan Z, Ding D, Yu Z, van Duin S, Li H, et al. Fabrication of metallic parts with overhanging structures using the robotic wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;63:24-34. <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.018>.
- [44] Xiong J, Lei Y, Chen H, Zhang G. Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;240:397-403. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.10.019>.
- [45] Kazanas P, Deherkar P, Almeida P, Lockett H, Williams S. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture*. 2012;226(6):1042-1051. <http://doi.org/10.1177/0954405412437126>.
- [46] Panchagnula JS, Simhambhatla S. Manufacture of complex thin-walled metallic objects using weld-deposition based additive manufacturing. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2018;49:194-203. <http://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.003>.