



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

TYSON CORRÊA BAIA

**EMPREGO DO PROCESSO GMA – CW NA MANUFATURA ADITIVA POR
DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) EM AÇO CARBONO**

TUCURUÍ
2026

TYSON CORRÊA BAIA

**EMPREGO DO PROCESSO GMA – CW NA MANUFATURA ADITIVA POR
DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) EM AÇO CARBONO**

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Neves Garcia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B152c Baia, Tyson Corrêa.
 EMPREGO DO PROCESSO GMAW – CW NA
 MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO
 (MADA) EM AÇO CARBONO / Tyson Corrêa Baia. — 2026.
 30 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Neves Garcia
 Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
 Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
 Mecânica, Tucuruí, 2026.

 1. Qualidade superficial. 2. Microestrutura de soldas. 3.
 microdureza Vickers. 4. taxa de deposição. I. Título.

CDD 620.1

TYSON CORRÊA BAIA

**EMPREGO DO PROCESSO GMA – CW NA MANUFATURA ADITIVA POR
DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) EM AÇO CARBONO**

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data da aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Douglas Neves Garcia
(FEM/CAMTUC/UFPA)

Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva
(FEM/CAMTUC/UFPA)

Eng. Dr. Felipe Ribeiro Teixeira
(FEM/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria para superar os desafios e concluir mais esta etapa da minha vida.

À minha família, pelo amor, apoio, incentivo e compreensão ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), pela formação acadêmica proporcionada, e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Grupo de Estudos e Pesquisas em Soldagem (GEPS), pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional.

Aos professores do Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC), pelos ensinamentos e dedicação à formação dos alunos. Em especial, ao Prof. Douglas e ao Rodimilson (Rodi Stark).

Ao Daniel Dominices Baia Gomes de Souza pelo suporte técnico e laboratorial.

A todos os membros do Laboratório de Engenharia Mecânica, pela convivência, amizade e colaboração ao longo desta jornada. Faço um agradecimento especial aos nossos mascotes, Baixinha e Tigrão, que fizeram parte do cotidiano do laboratório. Ao Tigrão, que infelizmente nos deixou, mas permanecerá em nossa memória.

Aos meus colegas de graduação, especialmente ao meu grupo de estudos, pela amizade, companheirismo e pelos momentos de aprendizado compartilhados.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho e para minha formação como engenheiro mecânico.

RESUMO

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) baseia-se na formação de peças por meio da deposição sucessiva de camadas metálicas, sendo o processo *Gas Metal Arc* (GMA) amplamente utilizado devido à sua alta taxa de deposição e capacidade de produzir componentes de grande porte. Uma alternativa para otimizar esse processo é o uso do arame frio (GMA-CW), que possibilita o aumento da taxa de deposição sem elevar o aporte térmico. Nesse processo, utilizam-se dois arames: um energizado, responsável pelo arco elétrico, e outro não energizado, que contribui para a deposição de material e auxilia na dissipação de calor, reduzindo a transferência térmica ao metal base. O estudo teve como objetivo comparar paredes depositadas pelos processos GMA e GMA-CW, avaliando qualidade e produtividade. Os resultados demonstraram que o uso do arame frio melhora a produtividade, tornando o processo uma alternativa viável e eficiente.

Palavras-chave: qualidade superficial, microestrutura, microdureza Vickers, taxa de deposição.

ABSTRACT

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is based on the fabrication of components through the successive deposition of metallic layers. Among the available processes, Gas Metal Arc (GMA) is widely used due to its high deposition rate and ability to produce large-scale components. An alternative approach to optimize this process is the use of the Cold Wire technique (GMA-CW), which increases the deposition rate without significantly increasing the heat input. In this process, two wires are employed: an energized wire responsible for generating the electric arc and a non-energized wire that contributes additional material to the deposit while assisting in heat dissipation, thereby reducing thermal transfer to the base metal. The aim of this study was to compare walls manufactured by the GMA and GMA-CW processes, evaluating their quality and productivity. The results demonstrated that the use of cold wire improves productivity, making the process a viable and efficient alternative for arc-based additive manufacturing.

Keywords: surface quality, microstructure, vickers microhardness, deposition rate.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 METODOLOGIA	10
2.1 Passes isolados depositados com o processo GMAW	12
2.2 Passes isolados depositados com o processo GMAW-CW	12
2.3 Manufatura aditiva	14
3 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS	16
3.1 Teste preliminar cordões de solda GMAW	16
3.2 Teste preliminar processo GMAW-CW	18
3.3 Paredes de Solda.....	21
3.3.1 Aspectos visuais das paredes de solda	21
3.3.2 Análise microestrutural das paredes de solda	24
3.3.3 Microdureza das paredes de solda.....	28
4 CONCLUSÃO	31
5 TRABALHOS FUTUROS.....	32
REFERÊNCIAS	33

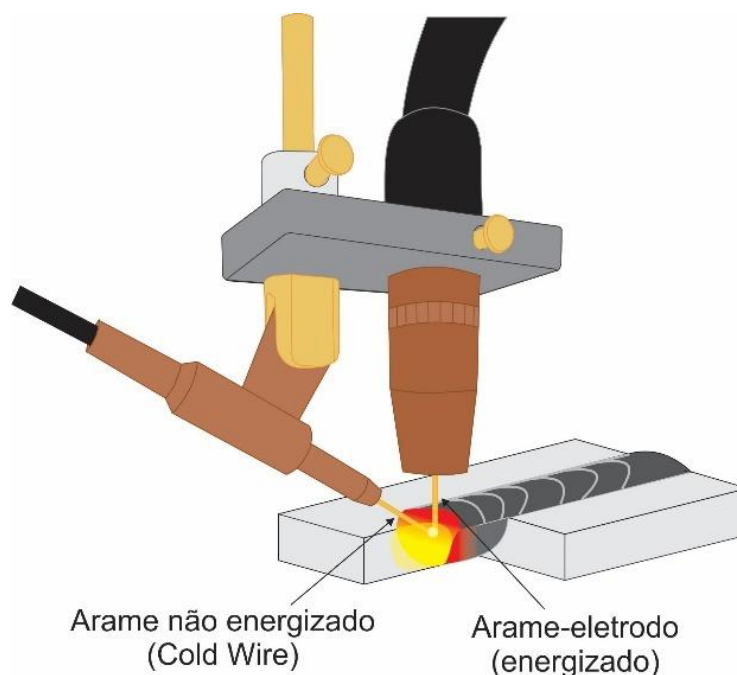
1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) é um processo de fabricação caracterizado pela produção de objetos por meio da adição de material, camada por camada, a partir de um modelo digital tridimensional (3D), geralmente obtido por sistemas CAD (*Computer Aided Design*). Diferentemente dos métodos convencionais, como a usinagem, em que a peça é obtida pela remoção de material, a MA baseia-se no conceito de fabricação por adição (Giordano, Zancul e Rodrigues *et al.*, 2016).

Devido à sua elevada versatilidade, a MA permite a aplicação com diferentes materiais, como polímeros e metais, além da integração com diversos processos de fabricação. No contexto de materiais metálicos, destaca-se a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), que utiliza processos baseados em arco elétrico, como o GMA (*Gas Metal Arc*) e o GTA (*Gas Tungsten Arc*). Neste trabalho, para as etapas de manufatura aditiva das paredes, adota-se a nomenclatura GMA em substituição a GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), em conformidade com a terminologia recomendada pela norma ISO/ASTM 52900 (2021), uma vez que o arco elétrico é empregado como fonte de energia para deposição de material e não exclusivamente para operações de soldagem. Entretanto, para os ensaios de cordões de passe isolado, será mantida a nomenclatura GMAW, por se tratar de uma aplicação convencional do processo de soldagem. O processo GMA apresenta relevância industrial devido à sua alta taxa de deposição e elevada produtividade.

Uma variação desse processo é o GMA-CW (*Cold Wire Gas Metal Arc*), Figura 1, no qual é introduzido um segundo arame não energizado diretamente na poça de fusão. Essa técnica promove o aumento da taxa de deposição, pois parte do calor gerado pelo arco elétrico é utilizada para fundir ambos os arames, estudos como os de Mota *et al.* (2016) e Mougo *et al.* (2020) demonstram que o uso do arame frio contribui para o aumento da produtividade e influencia diretamente na velocidade de resfriamento do material.

Figura 01 – Representação esquemática do processo GMA-CW.



Fonte - Autoria própria (2026).

Bentes Neto (2022) avaliou a aplicação do processo GMA-P com adição de arame frio na manufatura aditiva de ligas de alumínio utilizando arame AWS ER5356, verificando que as paredes produzidas com a técnica apresentaram maior altura por passe, menor volume de poros e microdureza ligeiramente superior em comparação às condições sem adição de arame frio, evidenciando o potencial da técnica para aplicações em manufatura aditiva baseada em processos de soldagem. Esses resultados sugerem que a técnica pode contribuir para o aumento da taxa de deposição e para o controle da qualidade geométrica dos componentes produzidos, aspectos também relevantes na fabricação de estruturas em aço carbono por MADA.

O controle térmico entre camadas é um fator crítico nos processos de MADA. A ausência de controle adequado da temperatura durante o resfriamento pode resultar em efeitos adversos, como deformações geométricas na parede construída. Por exemplo, a deposição de uma nova camada sobre uma anterior ainda em alta temperatura pode comprometer a estabilidade dimensional do cordão e, conseqüentemente, da estrutura final. Dessa forma, segundo Teixeira *et al.* (2023), o controle da temperatura entre camadas torna-se essencial para garantir a qualidade do componente

Teixeira *et al.* (2023) demonstraram que o aumento da temperatura intercamada influencia as características geométricas e o acabamento superficial de paredes de aço carbono produzidas por MADA. Corroborando esses resultados, Teixeira *et al.* (2022) ressaltam que o controle

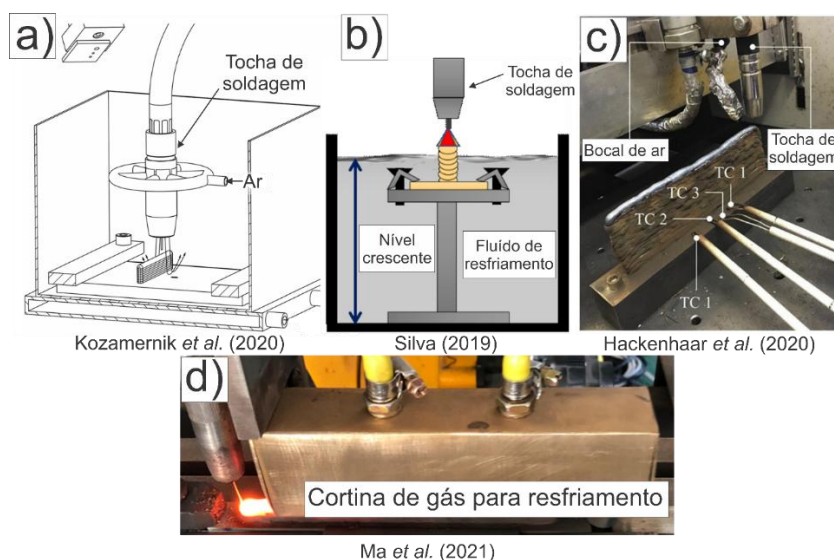
adequado dos parâmetros térmicos favorece a obtenção de melhor acabamento superficial e maior estabilidade geométrica das paredes fabricadas, evidenciando a importância do monitoramento da temperatura durante todo o processo de deposição.

Em relação ao comportamento térmico na manufatura aditiva, Silva (2019) destaca que a elevada entrada de calor na poça de fusão pode ocasionar alterações significativas nas condições de resfriamento do material. Quando esse resfriamento não é adequadamente controlado, podem ocorrer modificações microestruturais distintas daquelas normalmente observadas nos processos convencionais de soldagem.

Para minimizar esse efeito, diferentes estratégias de controle térmico podem ser empregadas durante o processo, incluindo o resfriamento natural e métodos de resfriamento ativo, como a aplicação de jatos de ar e a técnica de quase imersão (*Near-Immersion Active Cooling – NIAC*).

Estudos desenvolvidos por Hackenhaar (2020), Kozamernik et al. (2020) e Ma et al. (2021) utilizando resfriamento por jato de ar com monitoramento da temperatura entre camadas demonstraram que essa técnica é eficaz na redução do acúmulo térmico ao longo da fabricação. De forma semelhante, Silva (2019) investigou o resfriamento por quase imersão, no qual a parede depositada permanece parcialmente submersa em um fluido refrigerante com controle do nível do líquido em um reservatório. Os resultados obtidos evidenciaram maior eficiência no controle da temperatura entre camadas, atribuída à elevada capacidade de dissipação térmica do meio de resfriamento. A Figura 02 apresenta diferentes configurações de sistemas de resfriamento ativo por ar (a), (c) e (d), bem como por quase imersão em água (b).

Figura 02 – Dispositivos de resfriamento ativo de paredes de solda.



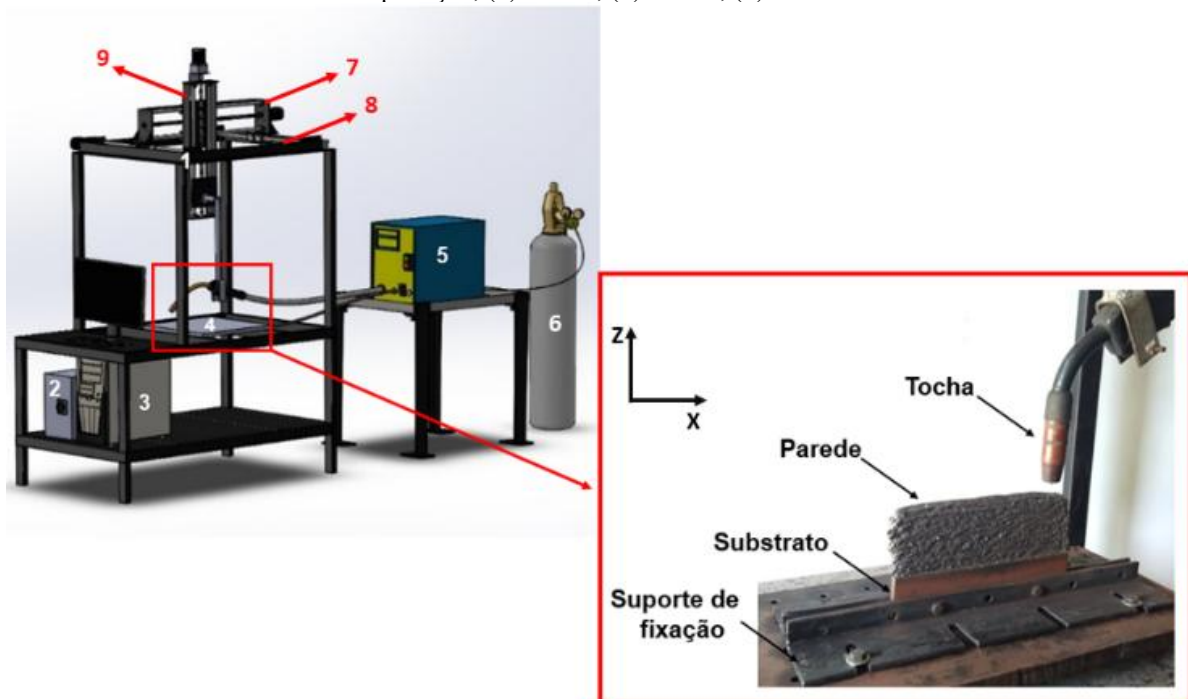
Fonte: Adaptado de Kozamernik et al. (2020); Silva (2019); Hackenhaar et al. (2020) e Ma et al. (2021)

Tendo em vista o aumento dos interesses industrial e acadêmico acerca da manufatura aditiva por deposição a arco, bem como pelos encorajadores resultados obtidos com o uso da adição de arame frio, aplicadas à soldagem GMA, essa pesquisa tem como objetivo, avaliar a influência da adição de arame frio na produtividade da MADA comparativamente ao processo GMA convencional utilizando como critério de avaliação a quantidade de camadas necessárias para atingir uma mesma altura de deposição.

2 METODOLOGIA

A fabricação das paredes foi realizada em uma mesa de trabalho com três eixos de movimentação Controle Numérico Computadorizado (*Computer Numeric Control – CNC*), Figura 03. Adicionalmente foram empregados uma fonte de soldagem Minitec IMC configurada em CC+, um alimentador de arame frio, um sistema de aquisição SAP V4.28s utilizado para monitorar os sinais elétricos de corrente e tensão.

Figura 03 - Esquema da bancada de trabalho: (1) mesa de coordenada CNC; (2) controle CNC; (3) processador CNC; (4) plataforma de construção; (5) fonte de soldagem e cabeçote de alimentação; (6) cilindro com gás de proteção; (7) eixo X; (8) eixo Y; (9) eixo Z



Fonte - Autoria própria (2026).

A metodologia do processo de soldagem foi dividida em duas etapas: deposição de passes isolados e deposição de paredes.

Na etapa de fabricação dos cordões de passe isolado, foram depositados 9 cordões sobre chapas de aço SAE 1020 (130 mm × 12,5 mm × 6,4 mm). Inicialmente, cinco cordões foram produzidos para definir a tensão de soldagem a ser adotada nos experimentos. Em seguida, outros quatro cordões foram depositados para avaliar diferentes taxas de alimentação do arame frio, visando selecionar a condição de deposição mais adequada para a fabricação das paredes. Já as paredes de solda foram depositadas em duas chapas de aço SAE 1020 (200 mm x 51 mm x 9,53 mm), com a face lateral para cima (Figura 04), para evitar as distorções térmicas do substrato e das paredes, além de favorecer um melhor controle térmico do processo.

Figura 04 - Suporte de fixação e posicionamento das chapas.



Fonte - Autoria própria (2026).

Foram fabricadas duas paredes sobre chapas de aço SAE 1020, sendo uma utilizando o processo GMA convencional e a outra o processo GMA-CW. Em ambos os casos, a deposição foi realizada até que as paredes atingissem aproximadamente 60 mm de altura.

Para todas as deposições, foi utilizado um arame de aço de baixo carbono AWS ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm, em conjunto com gás de proteção CO₂ comercial, empregando-se uma vazão de 14 l/min. A composição química da chapa de aço utilizada como metal de base e do metal de adição é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química nominal (% em peso) do metal de base e do metal de adição.

Elementos	C	Mn	Si	P	S	Fe
Metal de base (SAE 1020)	0,18	0,46	-	0,03	0,03	Bal
Metal de adição (ER70S-6)	0,06	0,45	0,90	0,02	0,03	Bal

Fonte - Gerdau (2024).

2.1 Passes isolados depositados com o processo GMAW

Na etapa de fabricação dos cordões de passe isolado pelo processo GMAW, foram utilizados os parâmetros de soldagem indicados na Tabela 2. Todos os cordões foram depositados no sentido A → B, conforme ilustrado na Figura 8. Inicialmente, foram depositados cinco cordões variando-se a tensão de soldagem entre 20 V, 21 V, 22 V, 23 V e 24 V, com o objetivo de definir a tensão a ser empregada nas etapas subsequentes do estudo. Após a seleção da tensão de trabalho, foram fabricados os demais cordões para avaliação da influência da taxa de alimentação do arame frio.

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem constantes no GMAW e GMAW-CW.

Parâmetro	VALOR
Gás de proteção	CO ₂
Vazão de gás (CO ₂)	14 l/min
Velocidade de soldagem	350 mm/min
Inclinação da tocha	0°
Distância bico de contato peça (DBCP)	13 mm
Velocidade de alimentação do arame-eletrodo	4 m/min

Fonte - Autoria própria (2026).

Após deposição dos passes isolados, foram avaliadas as características geométricas dos cordões de solda, reforço e largura (a partir da média de cinco medições realizadas em cada amostra) e regularidade geométrica superficial.

2.2 Passes isolados depositados com o processo GMAW-CW

Para a condução desta etapa experimental, foi empregado um sistema independente de alimentação para o arame frio (Figura 05). Para a deposição, empregaram-se os parâmetros de soldagem apresentados na Tabela 2, acrescidos dos parâmetros específicos de alimentação do arame frio, apresentados na Tabela 3. Durante a deposição, o arame frio foi posicionado com inclinação de 29° em relação ao plano horizontal e mantido a 2 mm de Distância Arame-Frio do Arame-Eletrodo (D_{AF-AE}), configuração adotada para evitar interferências no arco elétrico e garantir sua correta inserção na poça de fusão. O valor da distância entre o arame frio e o arame-eletrodo foi definido com base no estudo de Jorge (2020), que identificou essa condição como

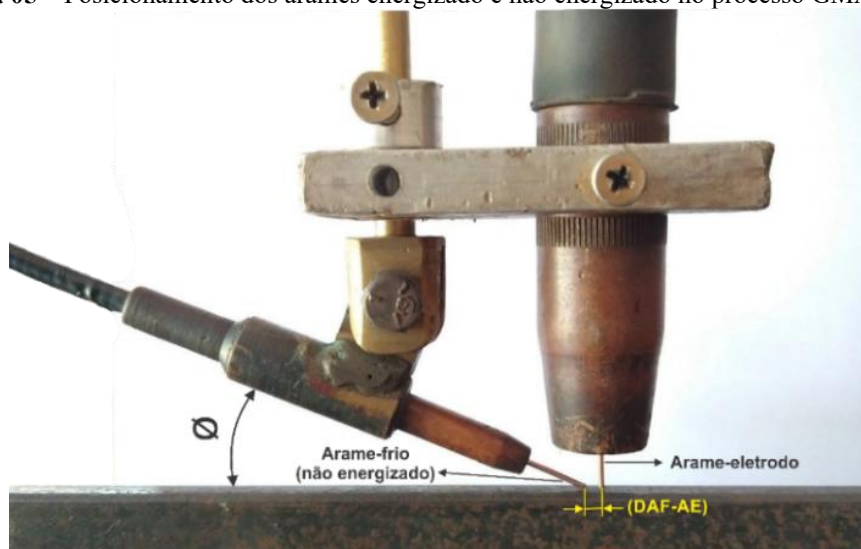
adequada para a garantir que o arame entre na poça de fusão, em não interfira na estabilidade do processo eficiente do arame frio. Já a inclinação de 29° do arame frio, foi definida após testes preliminares, que garantia a inserção do arame na poça de fusão.

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem para GMAW-CW.

Parâmetro	VALOR
Inclinação arame frio	29°
DAF-AE (Distância arame-frio arame-eletrodo)	2 mm

Fonte - Autoria própria (2026).

Figura 05 – Posicionamento dos arames energizado e não energizado no processo GMAW-CW.



Fonte - Autoria própria (2026).

Foram produzidos quatro cordões de passe isolados, cada um utilizando um valor distinto de alimentação do arame frio, conforme indicado na Tabela 4, enquanto a velocidade do arame-eletrodo e a distância entre os arames foram mantidas constantes. Após a fabricação, realizou-se uma análise visual dos cordões a respeito da ausência de descontinuidades, além de considerar os aspectos geométricos como reforço e largura e regularidade geométrica superficial. Para determinar as características de largura e reforço, realizou-se cinco medições realizadas ao longo da região central do cordão, desconsiderando-se 25,4 mm em cada extremidade, resultando em uma área útil de aproximadamente 50 mm para avaliação.

Tabela 4 – Velocidade de alimentação dos cordões de passe isolado com o processo GMAW-CW.

Cordão	Velocidade do arame (m/min)
A	1
B	2
C	3
D	4

Fonte - Autoria própria (2026).

Após as análises visual e geométrica dos cordões isolados, foram executados os procedimentos metalográficos, incluindo corte, embutimento, lixamento, polimento. O ataque químico com Nital 10% foi realizado visando às análises macrográficas, por meio de escaneamento 2D (scanner Epson *Perfection V39 ii.*) e o *software* Image J.

2.3 Manufatura aditiva

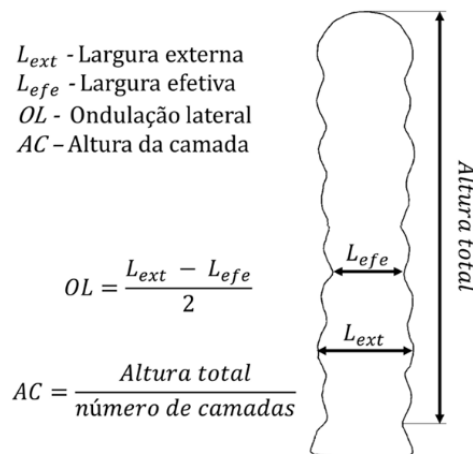
Ao início do processo de fabricação das paredes estabeleceu-se como temperatura intercamada o valor de 100 °C, checada com um termômetro infravermelho mediante medições na região central de cada camada, visando reduzir variações térmicas ao longo da deposição e garantir maior repetibilidade do processo.

O processo de aplicação das sucessivas camadas se deu até que as paredes apresentassem 60 mm de altura para as duas condições de deposição, mantendo-se constante o ponto de início da soldagem em todas as camadas, de modo que cada passe fosse iniciado na mesma extremidade da parede.

Em cada parede, a primeira camada foi depositada sobre a face superior das barras de aço (Figura 3) servindo como base para a deposição das camadas subsequentes. Ao final do processo, foram avaliadas características geométricas, como: largura externa da parede (L_{ext}), que corresponde a maior distância entre as laterais da parede, a largura efetiva da parede (L_{efe}), que corresponde a menor distância entre as laterais da parede, e a ondulação da superfície lateral (OL), que se trata da subtração entre as larguras externa e efetiva dividido por dois, conforme a metodologia de Teixeira (2023), Figura 06. Além desses parâmetros, foi determinada a área útil de deposição, utilizada como indicador da eficiência do processo e da qualidade geométrica das paredes produzidas. Ambas as medidas estão determinadas em milímetro (mm).

Com base nessa metodologia, as alturas das camadas (AC) foram quantificadas medindo-se as alturas totais da parede com um paquímetro analógico (resolução de 0,05 mm), em cinco distâncias diferentes, e dividindo-se pelo número de camadas depositadas.

Figura 06 - Esquema das características geométricas avaliadas, considerando uma seção Transversal (onde: L_{ext} e L_{efe} são considerados os valores máximos e mínimos, respectivamente, das larguras encontradas ao longo do comprimento avaliado).



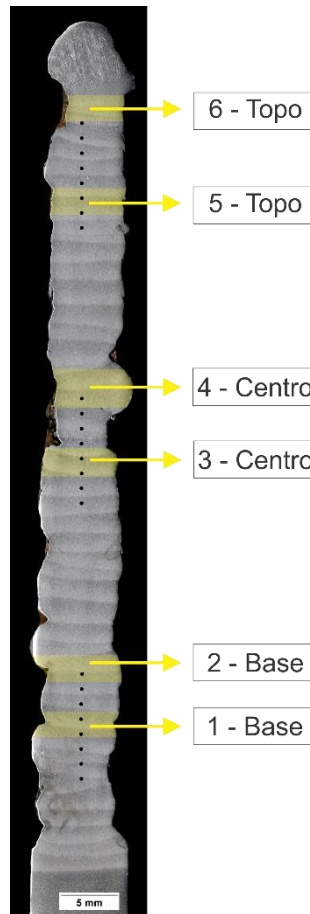
Fonte - Teixeira (2023).

Para a avaliação do efeito da sobreposição de ciclos térmicos na microestrutura e na microdureza foram retiradas seções transversais das paredes de solda. As amostras foram submetidas à mesma preparação metalográfica dos cordões de passe isolados. O ataque químico com Nital foi realizado com duas concentrações, com 10% visando às análises macrográficas, por meio de escaneamento 2D (scanner Epson *Perfection V39 ii.*) e o *software* Image J, e com 2% com o objetivo de capturar as microestruturas das paredes fabricadas utilizando um microscópio óptico Option TNM-08T-PL. A análise microestrutural das paredes também foi realizada por microscopia eletrônica de Varredura (MEV), além da caracterização da composição química por meio da técnica de Espectroscopia por Dispersão de Energia (*Energy Dispersive Spectroscopy* – EDS).

A caracterização estrutural das paredes foi realizada em três regiões distintas: base, centro e topo das paredes, conforme ilustrado na Figura 07. Nas regiões da base, centro e topo, a propriedade mecânica foi avaliada por meio do ensaio de microdureza Vickers, utilizando carga de 250 gf e tempo de aplicação de 15 s.

As indentações foram distribuídas ao longo de uma linha vertical, com espaçamento de 0,25 mm entre pontos consecutivos, conforme ilustrado na Figura 06 e em conformidade com as recomendações da norma ASTM E384 (2022).

Figura 07 Representação das regiões para análise microestrutural e de microdureza.



Fonte - Autoria própria (2026).

3 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS

3.1 Teste preliminar cordões de solda GMAW

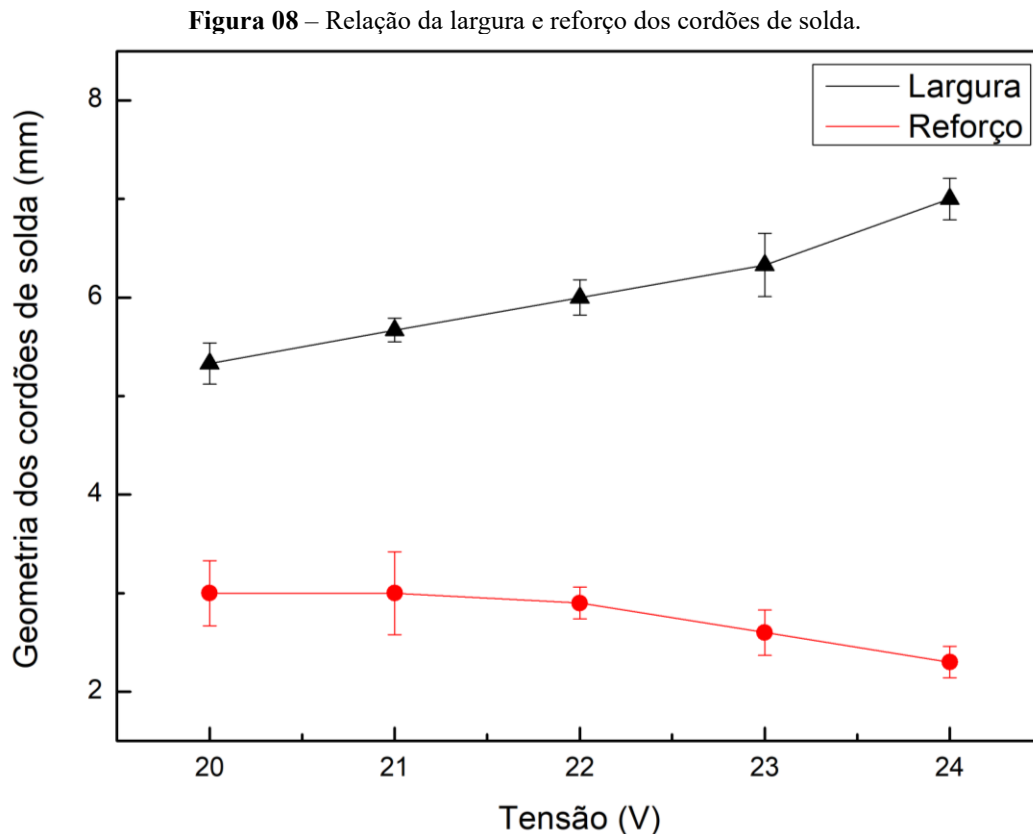
A análise superficial foi realizada para avaliar a regularidade e a ausência de descontinuidades, e caracterizar as geometrias dos cordões de solda (largura e reforço). Os valores de largura e reforço dos cordões isolados GMAW são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Características geométricas dos cordões de solda GMAW

Tensão (V)	Largura (mm)	Reforço (mm)
20	$5,33 \pm 0,21$	$3,00 \pm 0,33$
21	$5,67 \pm 0,12$	$3,00 \pm 0,42$
22	$6,00 \pm 0,18$	$2,90 \pm 0,16$
23	$6,33 \pm 0,32$	$2,60 \pm 0,23$
24	$7,00 \pm 0,21$	$2,30 \pm 0,16$

Fonte - Autoria própria (2026).

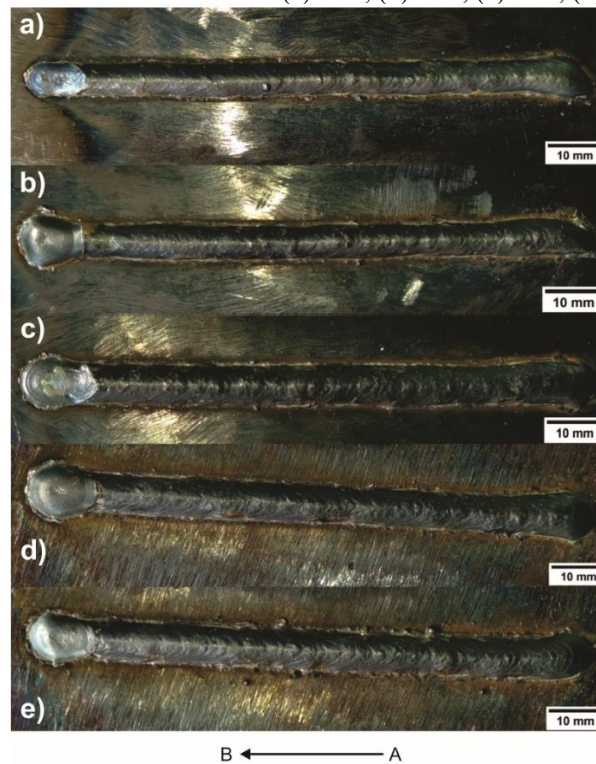
A Figura 08 ilustra a influência da tensão de soldagem nas características geométricas dos cordões de solda GMAW. O aumento da tensão eleva o comprimento do arco elétrico, resultando em maior largura do cordão. Em contrapartida, há uma redução do reforço. Os resultados confirmam que o aumento da tensão favorece o espalhamento do metal depositado, produzindo cordões mais largos e com menor reforço.



Fonte - Autoria própria (2026).

A Figura 09 apresenta os cordões de solda GMAW obtidos nos testes preliminares, realizados no sentido A–B. De modo geral, os cordões apresentaram boa regularidade geométrica e baixa incidência de respingos. A exceção foi o cordão produzido com tensão de 24 V (e), que apresentou maior quantidade de respingos. Esse comportamento está associado à proximidade da região de transição entre os modos de transferência metálica por curto-circuito e globular. Nessa condição, os maiores tempos de arco aberto favorecem uma maior fusão do material e a formação de gotas de maior volume, aumentando a ocorrência de respingos durante o processo.

Figura 09 – Cordões de solda GMAW. (a) 20V; (b) 21V; (c) 22V; (d) 23V e (e) 24V.



Fonte - Autoria própria (2026).

Com base nas características observadas nos cinco cordões avaliados, foi selecionada a tensão de 22 V para a despoição dos cordões e das paredes para os dois modos de soldagem. Essa condição apresentou transferência metálica estável, boa regularidade geométrica e baixa incidência de respingos.

3.2 Teste preliminar processo GMAW-CW

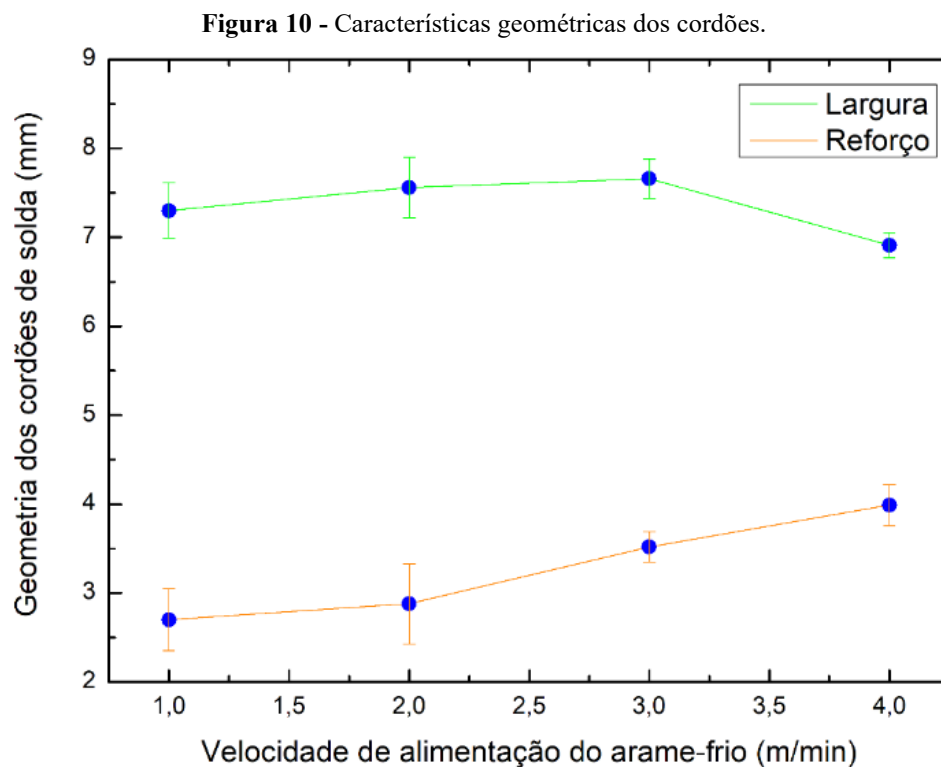
A partir da análise geométrica, Tabela 6, observou-se que o aumento da taxa de alimentação do arame frio influenciou diretamente o reforço dos cordões, enquanto exerceu pouca influência sobre a largura.

Tabela 6 – Características geométricas dos cordões de solda GMAW-CW.

Cordão	Largura (mm)	Reforço (mm)
A	$7,30 \pm 0,31$	$2,70 \pm 0,35$
B	$7,56 \pm 0,34$	$2,88 \pm 0,45$
C	$7,66 \pm 0,22$	$3,52 \pm 0,17$
D	$6,91 \pm 0,14$	$3,99 \pm 0,23$

Fonte - Autoria própria (2026).

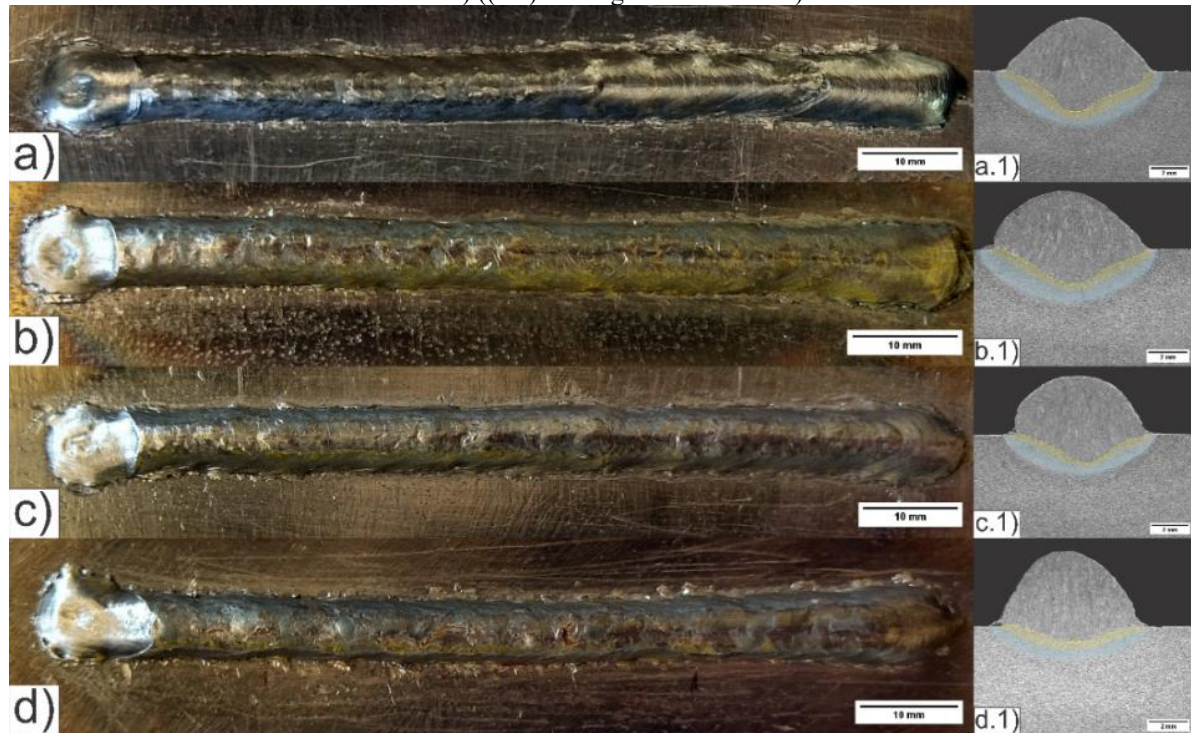
A análise da Figura 10 evidencia que o aumento da taxa de alimentação do arame frio resulta em reforço e larguras próximos, pois tem faixas que se interceptam e seriam estatisticamente iguais. Segundo Jorge *et al.* 2020, esse comportamento revela que o aumento da alimentação de arame frio leva a redução da molhabilidade da poça de fusão, devido ao aumento da massa de metal depositado submetida à mesma energia fornecida pela fonte de calor. Adicionalmente, a introdução do arame frio pode contribuir para o aumento da taxa de resfriamento da poça de fusão, o que resulta em menor penetração do cordão de solda.



Fonte - Autoria própria (2026).

Os cordões produzidos com a adição de arame frio (Figura 11) apresentaram boa regularidade geométrica e acabamento superficial satisfatório. As macrografias evidenciam uma tendência de aumento do reforço, corroborando os resultados apresentados na Figura 09, além de indicarem redução da penetração à medida que se eleva a taxa de alimentação do arame frio.

Figura 11 - Cordões de solda GMAW-CW. (a) cordão A (1 m/min) ((a.1) macrografia transversal); (b) cordão B (2 m/min) ((b.1) macrografia transversal); (c) cordão C (3 m/min) ((c.1) macrografia transversal); (d) cordão D (4 m/min) ((d.1) macrografia transversal).



B ←————— A

Fonte: Autoria própria (2026).

Considerando a influência do reforço na dinâmica de sobreposição dos cordões em superfícies não planas, bem como a importância da penetração para a integridade metalúrgica entre o metal depositado e o metal de base, o cordão D foi desconsiderado devido à sua reduzida penetração. Embora o cordão B tenha apresentado geometria satisfatória, optou-se por concentrar a análise nos cordões A e C, por representarem condições extremas dentre os parâmetros avaliados. A partir da avaliação macrográfica, o cordão A foi selecionado para a continuidade dos experimentos, uma vez que apresentou, visualmente, a maior penetração. Embora a utilização do arame frio tenha como objetivo reduzir o aporte térmico do processo de deposição, é fundamental que o cordão apresente penetração suficiente para garantir a adequada ancoragem metalúrgica entre o substrato e a primeira camada depositada, bem como entre as camadas subsequentes durante a fabricação aditiva. Em processos de MADA, essa característica é fundamental para assegurar a integridade estrutural, a estabilidade da construção e a continuidade metalúrgica da parede produzida.

3.3 Paredes de Solda

3.3.1 Aspectos visuais das paredes de solda

A parede produzida por GMA (Figura 12) foi construída com 45 camadas, resultando em uma área útil aproximada de 9848 mm². A determinação dessa área foi realizada por meio do *software ImageJ*, utilizando-se as medidas de base e altura da parede obtidas a partir da análise da imagem, conforme ilustrado na Figura 12. As larguras externas e interna da parede foram de 9,13 mm e 3,66 mm (Figura 14), respectivamente também medidas pelo *ImageJ*.

Figura 12 – Parede de solda GMA (medidas em mm).

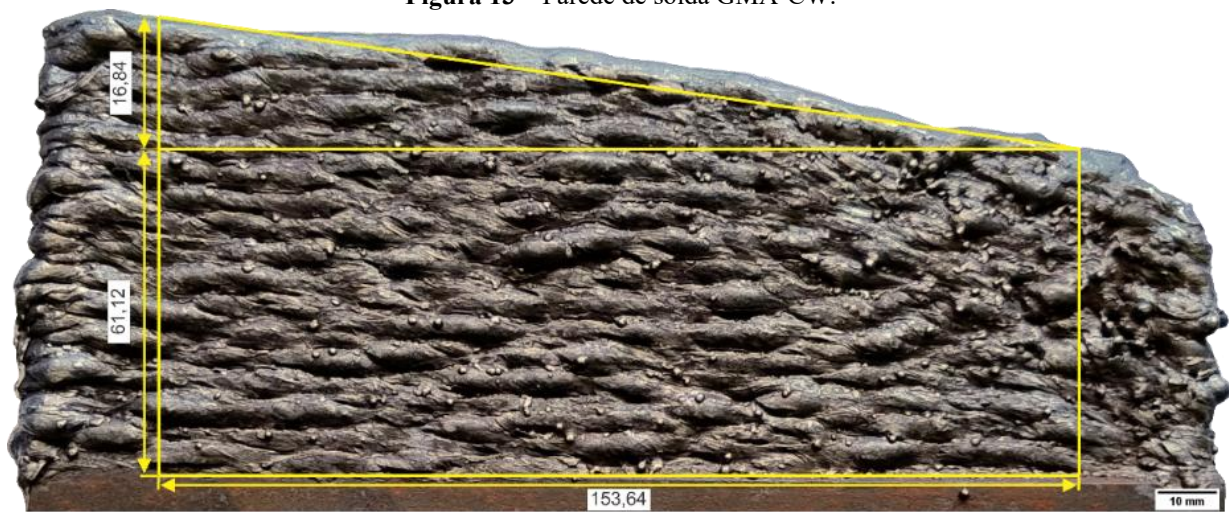


Fonte: Autoria própria (2026).

Observam-se irregularidades superficiais nas laterais e no topo da parede, atribuídas à estratégia de deposição bidirecional adotada. Essa estratégia resultou em pouco acúmulo de material excedente nas extremidades. Observa-se irregularidade em formato de ondulações na parede e uniformidade nas laterais e topo da parede sendo consequência do modo bidirecional de deposição.

Para a fabricação da parede com GMA-CW, Figura 13, foi necessário a deposição de 33 camadas. A parede apresentou área útil próxima de 10961 mm², largura externa de 9,82 mm e largura interna de 4,80 mm. Os valores de largura externa e interna estão indicados na Figura 11.

Figura 13 – Parede de solda GMA-CW.



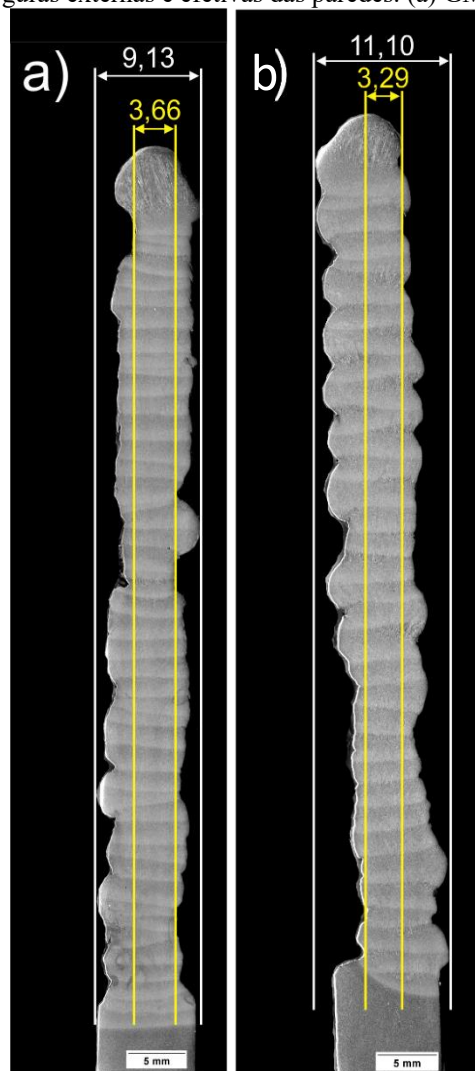
Fonte - Autoria própria (2026).

O deslocamento da tocha de soldagem foi realizado em sentido unidirecional, em função das configurações do processo GMA-CW, especialmente do posicionamento do arame não energizado. Analisando a Figura 13, vê-se que há irregularidade na parede tanto e maior aparência de ondulações, como nas extremidades.

O acúmulo de material na região de início de cada camada e na formação de uma rampa descendente ao final da deposição, comprometendo a uniformidade geométrica e a regularidade da altura da parede fabricada.

A protuberância observada no início das camadas está associada ao gradiente térmico estabelecido ao longo da parede durante o processo. Enquanto a extremidade final da camada apresenta temperaturas mais elevadas devido ao acúmulo de calor, a região inicial permanece relativamente mais fria em função da maior dissipação térmica para o substrato e para o ambiente. Essa diferença de temperatura influencia a molhabilidade da poça de fusão, favorecendo o acúmulo de material no início da deposição e contribuindo para a irregularidade geométrica observada.

Figura 14 – Larguras externas e efetivas das paredes. (a) GMA; (b) GMA-CW.

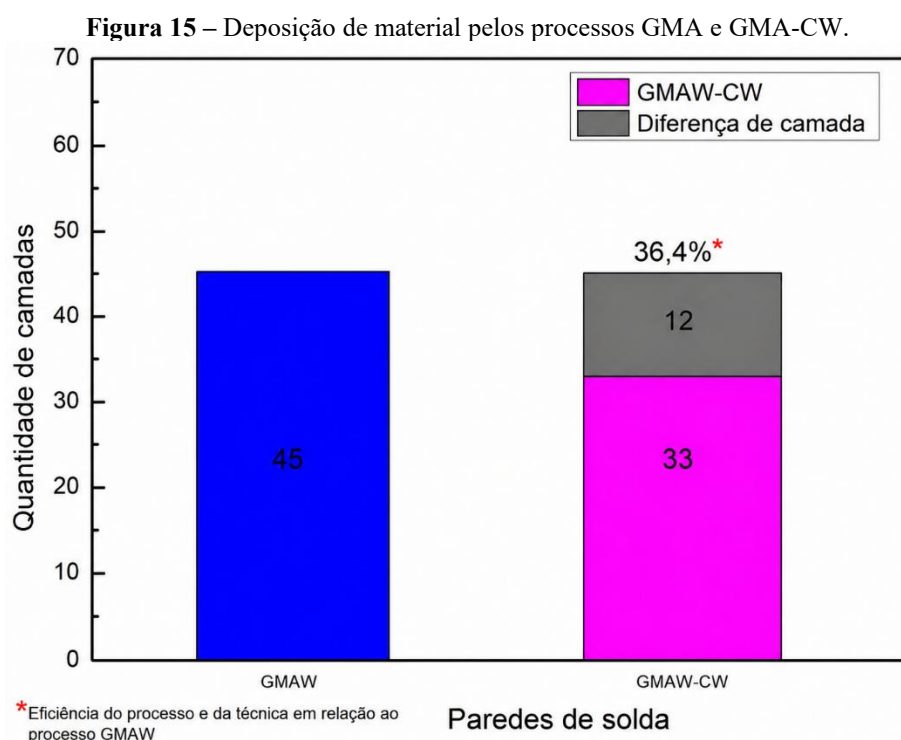


Fonte - Autoria própria (2026).

As paredes fabricadas apresentaram ondulações superficiais, característica comum em processos que utilizam o arame AWS ER70S-6 associado ao gás CO₂ como proteção. Essas irregularidades são típicas da deposição com transferência curto-circuito e influenciam o acabamento superficial das paredes. Observou-se ainda a presença de ondulações laterais com deposições pontuais mais afastadas da geometria principal das paredes (*outliers*), comportamento semelhante ao reportado por Le (2019), Thao *et al.* (2020) e Badoniya (2024).

A Figura 15 apresenta a comparação da produtividade dos processos utilizados na fabricação das paredes. A produtividade foi avaliada com base no número de camadas necessárias para atingir a altura de referência de 60 mm, na largura efetiva da seção transversal e na área útil produzida. Em comparação ao processo GMA convencional, a condição com arame-frio apresentou a maior produtividade, com ganho de 36,4%. Esse aumento está diretamente relacionado à redução do número de camadas necessárias para atingir a altura final da parede, uma

vez que o processo GMA convencional demandou 45 camadas, enquanto a condição com adição de arame frio necessitou de apenas 33 camadas. Dessa forma, a utilização do arame frio proporcionou maior altura depositada por camada, reduzindo a quantidade de passes requeridos para a fabricação da parede e, conseqüentemente, aumentando a produtividade do processo. Resultado semelhante foi observado por Assunção *et al.* (2017) que atribuíram esse desempenho ao aumento da taxa de deposição, permitindo maior quantidade de material depositado sem elevação do aporte térmico.



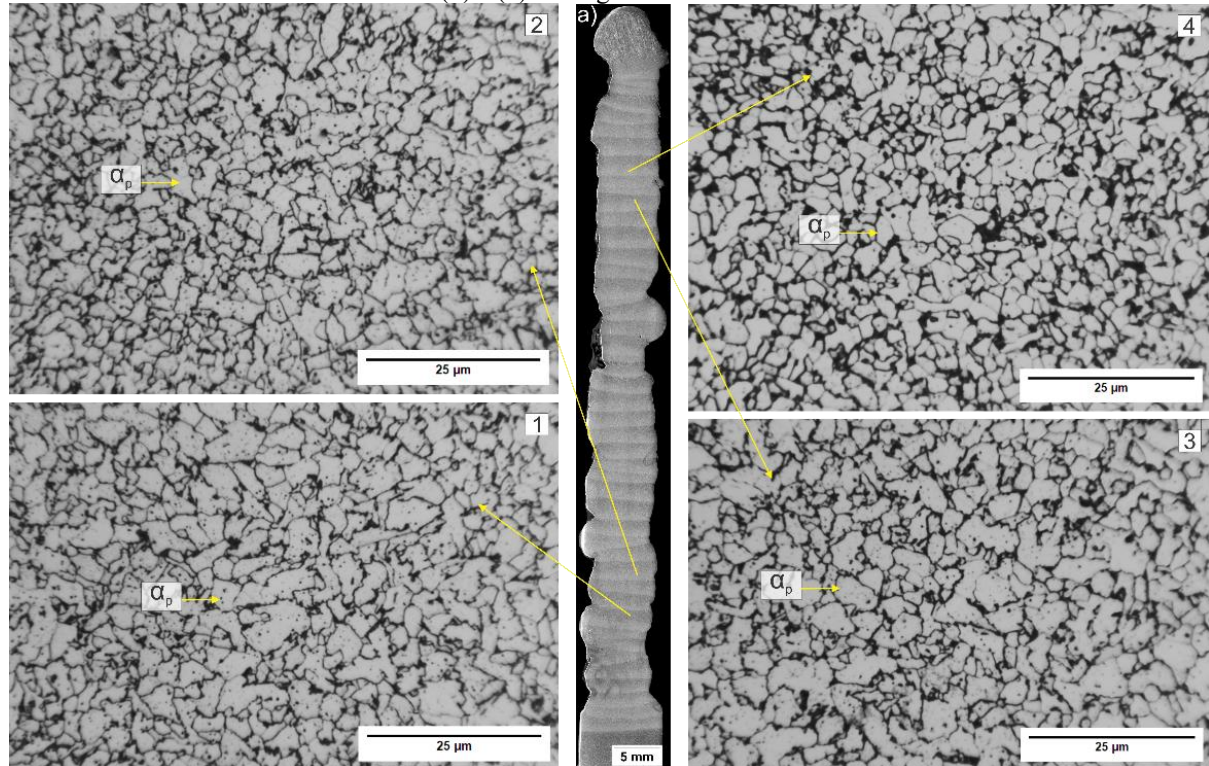
Fonte - Autoria própria (2026).

3.3.2 Análise microestrutural das paredes de solda

A Figura 16 apresenta a macro e microestruturas da parede produzida por GMA. As microestruturas são constituídas predominantemente por ferrita poligonal (α_p), com pequenas regiões de perlita nos contornos de grão. As regiões 2 e 4, situadas próximas à zona afetada pelo calor (ZAC) e as regiões 1 e 3, localizadas no centro das camadas depositadas, apresentaram características microestruturais semelhantes, não sendo observadas alterações significativas de na morfologia ou no refinamento dos grãos de ferrita poligonal ao longo da seção analisada. A semelhança observada na morfologia microestrutural das regiões analisadas pode ser atribuída ao baixo teor de carbono do aço SAE 1020, que favorece a formação predominante de ferrita poligonal e perlita mesmo após a exposição aos ciclos térmicos do processo. Adicionalmente, o reaquecimento promovido pela deposição das camadas subsequentes contribui para a

homogeneização microestrutural ao longo da parede, minimizando diferenças entre as regiões centrais dos cordões e aquelas próximas à zona afetada pelo calor. Dessa forma, não foram observadas alterações significativas na morfologia dos grãos entre as regiões avaliadas. Os resultados obtidos são consistentes com os observados por Thao *et al.* (2020).

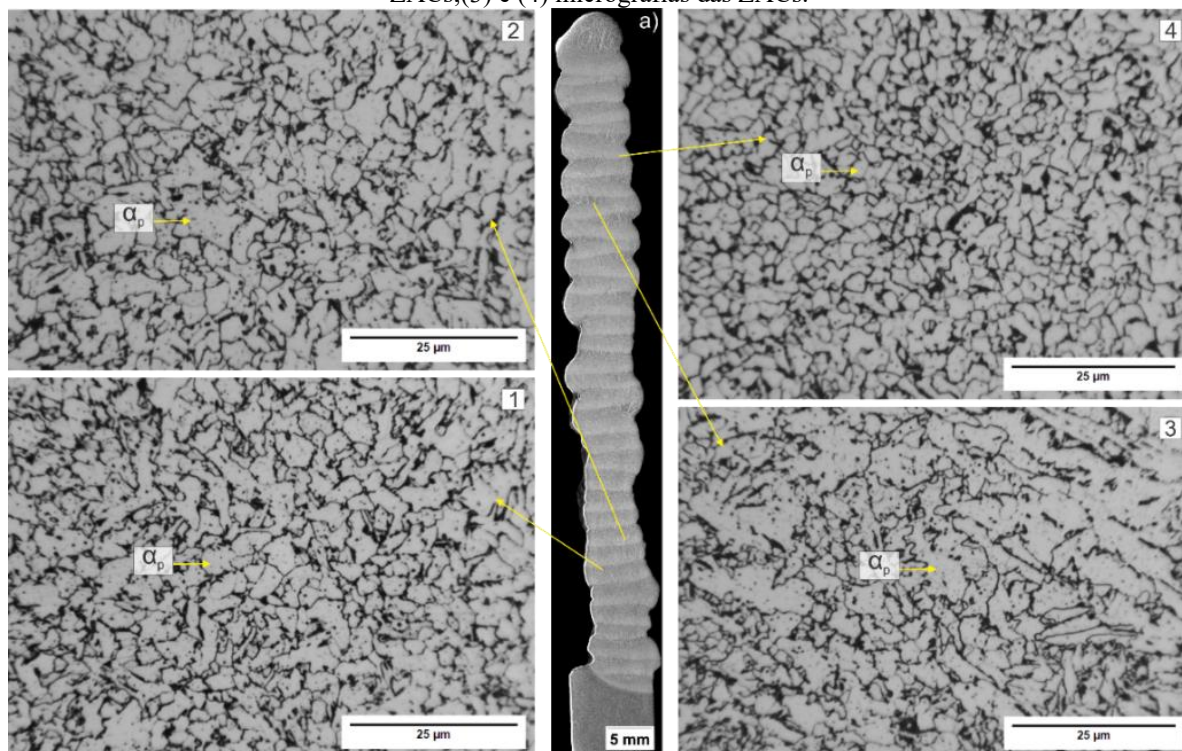
Figura 16 – Macro e micrografias da parede GMA. (a) macrografia. (1) e (2) micrografias da região entre as ZACs; (3) e (4) micrografias das ZACs



Fonte - Autoria própria (2026).

Em relação as microestruturas presentes na parede GMA-CW (Figura 17), foram analisadas quatro regiões distintas: as regiões 1 e 2 localizadas na base, e as regiões 3 e 4 no topo. As regiões 1 e 3 correspondem ao centro das camadas, onde se observam grãos grosseiros de ferrita poligonal (α_p), resultantes de uma menor taxa de resfriamento. Já as regiões 2 e 4 situam-se na Zona Afetada pelo Calor (ZAC), caracterizadas pelo refinamento dos grãos de ferrita.

Figura 17 - Macro e micrografias da parede GMA-CW. (a) macrografia. (1) e (2) micrografias da região entre as ZACs; (3) e (4) micrografias das ZACs.



Fonte - Autoria própria (2026).

Observa-se que os grãos da região 3 da Figura 17 apresentam maiores tamanhos em comparação com as demais regiões 4. Esse comportamento pode ser atribuído à maior influência térmica nas camadas inferiores, decorrente do calor acumulado durante o processo de fabricação, o que favorece o crescimento dos grãos.

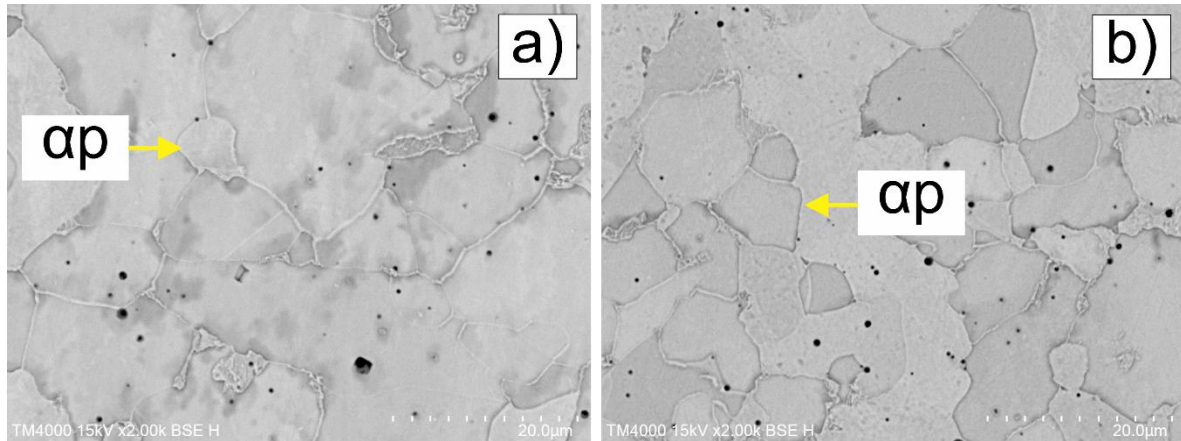
As alterações microestruturais observadas estão associadas à evolução do histórico térmico intrínseco ao processo de deposição por multicamadas. Esse comportamento é influenciado por diversos fatores, como a quantidade de calor introduzida, o gerenciamento térmico e o ciclo térmico. Em particular, o ciclo térmico exerce papel fundamental, uma vez que as camadas previamente depositadas são submetidas a novos ciclos de aquecimento e resfriamento à medida que novas camadas são adicionadas. Esse fenômeno pode promover efeitos semelhantes a tratamentos térmicos, como normalização e recozimento, resultando no crescimento de grãos e, eventualmente, em transformações de fase.

Além disso, a solidificação sob resfriamento lento (natural) contribui para o aumento do tamanho dos grãos e favorece a formação de ferrita e perlita. As diferenças microestruturais observadas neste estudo são consistentes com os resultados reportados por Thao *et al.* (2020).

A análise microestrutural das paredes, Figura 18, evidencia que as regiões centrais das paredes produzidas pelos processos GMA e GMA-CW apresentaram microestruturas semelhantes, não sendo observadas diferenças microestruturais significativas entre elas. Esses resultados

corroboram as observações obtidas por microscopia óptica (Figura 13 e Figura 14), indicando que a utilização do arame frio não promoveu alterações relevantes na microestrutura da parede fabricada com GMA-CW.

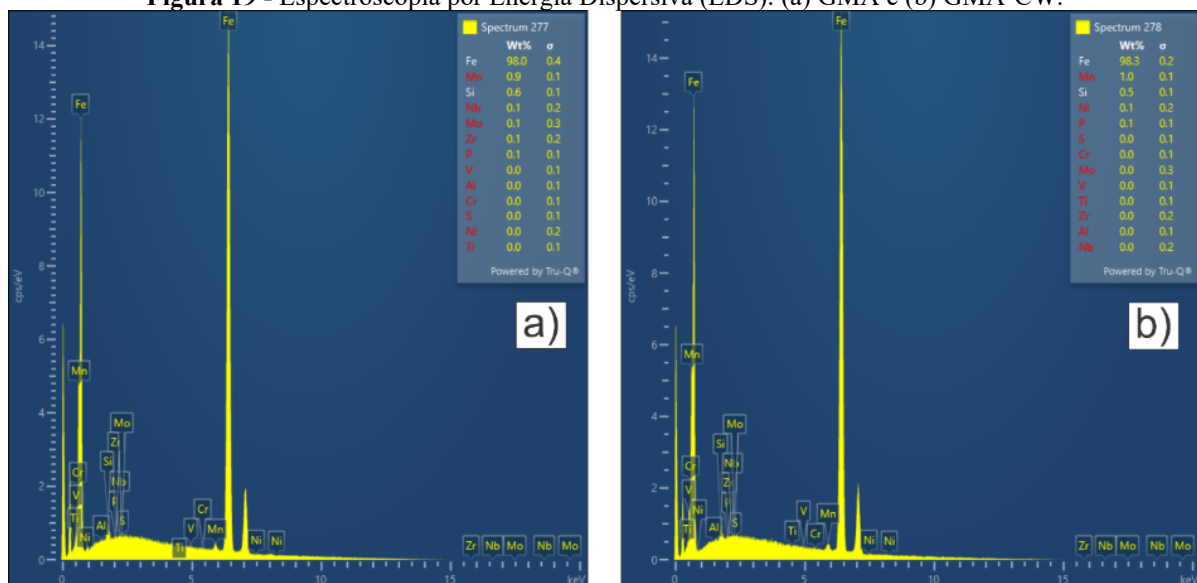
Figura 18 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). (a) GMA e (b) GMA-CW.



Fonte - Autoria própria (2026).

As análises de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), Figura 19, revelaram que a composição química das paredes de soldas permaneceu inalteradas, para os processos GMA e GMA-CW, indicando que não houve influência significativa do processo na composição química da parede de solda.

Figura 19 - Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS). (a) GMA e (b) GMA-CW.

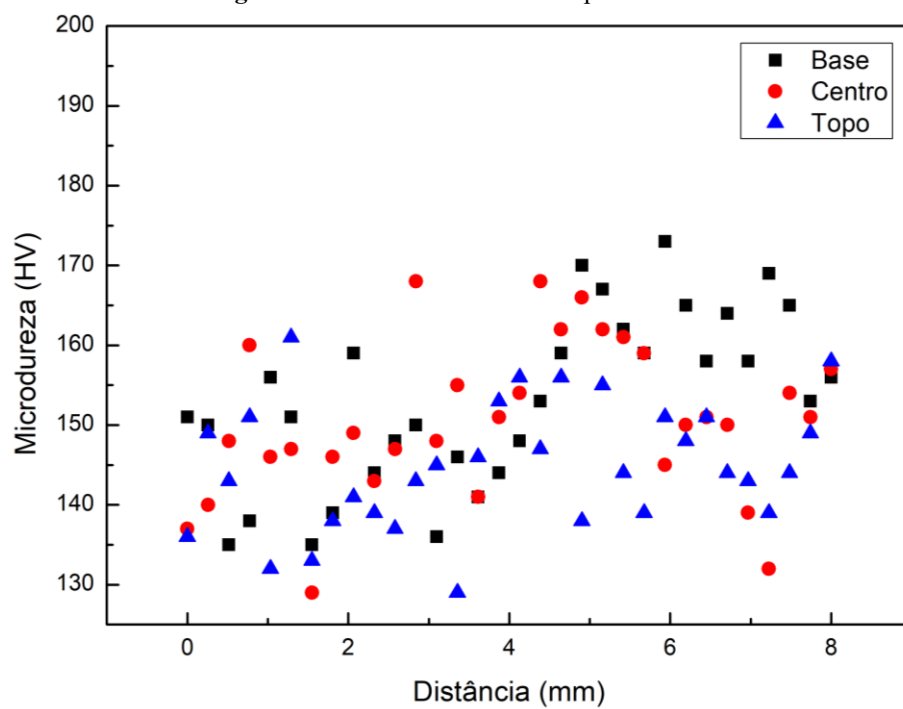


Fonte - Autoria própria (2026).

3.3.3 Microdureza das paredes de solda

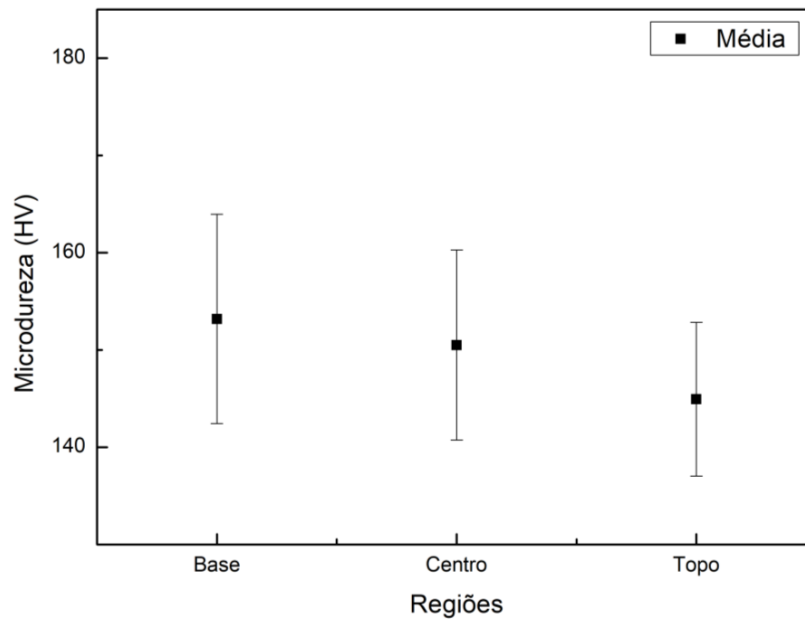
A Figura 20 apresenta a distribuição dos valores de microdureza Vickers medidos ao longo da parede produzida pelo processo GMA convencional, enquanto a Figura 21 reúne os valores médios obtidos para as regiões da base, centro e topo. De maneira análoga, as Figuras 22 e 23 apresentam, respectivamente, a distribuição dos valores de microdureza e os valores médios correspondentes para a parede fabricada pelo processo GMA-CW.

Figura 20 - Perfis de microdureza parede GMA.



Fonte - Autoria própria (2026).

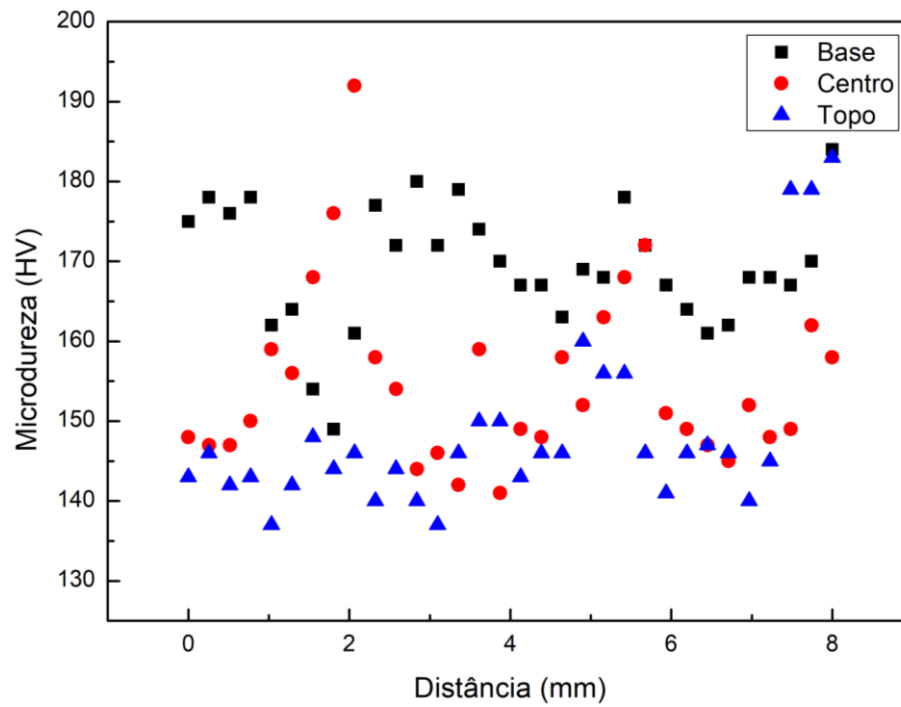
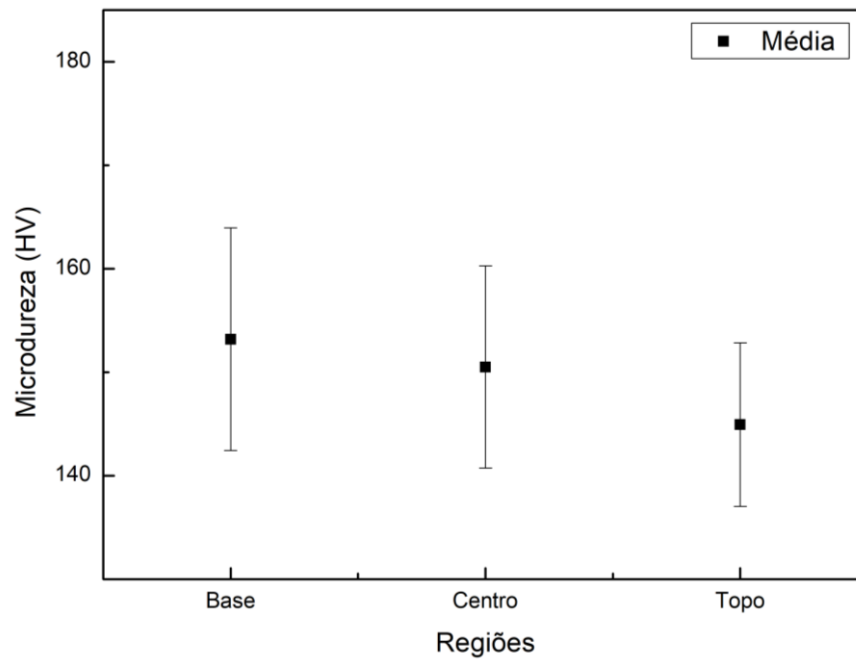
Figura 21 – Valores médios e desvio-padrões dos perfis de microdureza parede GMA.



Fonte - Autoria própria (2026).

Para a parede obtida por GMA observa-se uma distribuição relativamente homogênea dos valores de dureza entre as regiões da base, centro e topo, indicando que os ciclos térmicos sucessivos promoveram uma resposta mecânica semelhante ao longo da parede. Apesar de pequenas oscilações pontuais, verifica-se uma discreta tendência de maiores valores de dureza na região da base, como ilustrado na Figura 18, atribuída à maior extração de calor pelo substrato durante as primeiras deposições e ao refinamento microestrutural.

A parede GMA-CW apresenta uma separação mais evidente dos valores de microdureza entre as regiões analisadas, com maiores valores na base, intermediários no centro e menores no topo (Figura 22 e Figura 23). Esse comportamento indica que a adição de arame frio alterou o histórico térmico do processo, intensificando a extração de calor nas camadas iniciais e favorecendo maiores taxas de resfriamento, o que contribuiu para o refinamento de grãos que pode levar a um aumento da microdureza na região.

Figura 22 - Perfis de microdureza parede GMA-CW.**Figura 23** - Valores médios e desvio-padrões dos perfis de microdureza parede GMA-CW.

4 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da técnica de adição de arame frio na produtividade da MADA, comparativamente ao processo GMA convencional, considerando como parâmetro de avaliação a quantidade de camadas necessárias para atingir uma mesma altura de deposição. Os resultados demonstraram que:

- A adição do arame frio na poça de fusão pelo processo GMA-CW não levou a perturbação significativa na estabilidade do arco elétrico, não levando a aumento de respingos nos cordões depositados pelo processo.
- O processo GMA-CW permite um aumento da deposição de material para um mesmo valor de aporte térmico quando comparado ao processo GMA. Entretanto, esse aumento do volume da poça de fusão pode ocasionar uma diminuição da molhabilidade da poça de fusão em função da maior quantidade de material a ser fundido sob o mesmo aporte térmico, promovendo o aumento do reforço e redução da largura dos cordões.
- As análises por microscopia óptica e por microscopia eletrônica de varredura indicaram que o aumento da taxa de resfriamento da poça de fusão pela utilização do arame frio não promoveu alterações microestruturais significativas quando comparada ao processo GMA. Entretanto, os ensaios de microdureza revelaram um leve aumento na distribuição da microdureza ao longo da altura das paredes GMA-CW.
- Dessa forma, conclui-se que a utilização do arame frio constitui uma alternativa tecnicamente viável para aplicação em processos de MADA para aço carbono, permitindo um aumento da taxa de deposição sem afetar de forma significativa a microestrutura e a propriedade mecânica da parede fabricada.

5 TRABALHOS FUTUROS

De forma complementar a esta pesquisa e visando ampliar a compreensão dos efeitos do processo GMA-CW no desempenho estrutural de componentes produzidos por MADA, recomenda-se:

- Investigar a influência da alimentação do arame frio em diferentes materiais metálicos e faixas de aporte térmico;
- Avaliar outros parâmetros operacionais, como velocidade de soldagem, temperatura entre camadas e estratégias de deposição;
- Realizar a confecção de diferentes geometrias e componentes com maior complexidade geométrica, a fim de avaliar a aplicabilidade do processo em condições mais próximas às demandas industriais;
- Realizar ensaios mecânicos complementares, como tração, impacto e fadiga, associados à avaliação de tensões residuais e deformações.

REFERÊNCIAS

ASSUNÇÃO PDC; RIBEIRO RA; DOS SANTOS EBF; GERLICH AP; BRAGA em (2017). **Feasibility of narrow gap welding using the cold-wire gas metal arc welding (CW-GMAW) process**). Soldar Mundo 61:659–666.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. West Conshohocken, PA, 2022.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

BADONIYA, Pushkal; SRIVASTAVA, Manu; JAIN, Prashant K.; RATHEE, Rathee. **Parametric investigation on wire arc additive manufacturing of ER70S-6 low-carbon steel for fabrication of thick-walled parts**. Journal of Adhesion Science and Technology, v. 38, n. 11, p. 1925-1952, 2024.

BENTES NETO, Francisco Machado de Assis. **Manufatura aditiva de alumínio utilizando soldagem GMAW-P com técnica switchback e adição de arame frio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

GIORDANO, Caio Mezzeti; ZANCUL, Eduardo de Senzi; RODRIGUES, Vinícius Picanço. **Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais**. Revista Produção Online, Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 499-523, abr./jun. 2016.

HACKENHAAR, W.; MAZZAFERRO, J. A. E.; MONTEVECCHI, F.; CAMPATELLI, G. **An experimentalnumerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing**. Journal of Manufacturing Processes, v. 52, p. 5865, 2020.

JORGE, Vinicius Lemes. **Concepção e Avaliação de uma Técnica de Pulsção da Alimentação de Arame Baseada em um "Pulmão Ativo" para Soldagem MIG/MAG**. Tese (doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

JORGE, Vinicius Lemes; SCOTTI, Fernando Matos; REIS, Ruham Pablo; SCOTTI, Américo. **The Effect of Pulsed Cold-Wire Feeding on the Performance of Spray GMAW**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020.

KOZAMERNIK, N.; BRAČUN, D.; KLOBČAR, D. **WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for nearnetshape printing of small metal components.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.110, p. 1955–1968, 2020.

LE, Van Thao. **A preliminary study on gas metal arc welding-based additive manufacturing of metal parts.** Science & Technology Development Journal, v. 23, n. 1, p. 422-429, 2019.

MOUGO, A. L.; BENTES, F. M. S. N.; GARCIA, D. N.; MOTA, C. A. M. **Effect of a cold wire on the metallurgical characteristics of nickel-based welds deposited by GMAW-CW.** Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020.

MOTA, C. A. M.; NASCIMENTO, A. S.; GARCIA, D. N.; SILVA, D. A. S.; TEIXEIRA, F. R.; FERRARESI, V. A. **Revestimento de níquel depositado pela soldagem MIG e MIG com arame frio.** Soldagem & Inspeção, v. 21, n. 4, 2016.

TEIXEIRA, Felipe Ribeiro. **Um estudo holístico da parametrização eficaz e eficiente da manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) de paredes finas.** Tese (doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

TEIXEIRA, F. R.; SCOTTI, F. M.; JORGE, V. L.; SCOTTI, A. **Combined effect of the interlayer temperature with travel speed on features of thin wall WAAM under two cooling approaches.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 126, p. 273–289, 2023.

TEIXEIRA, F. R.; SCOTTI, F. M.; VILARINHO, L. O.; MOTA, C. A. M.; SCOTTI, A. **Transferability of the working envelope approach for parameter selection and optimization in thin wall WAAM.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 119, p. 969–989, 2022.

THAO, O. Van; HUY, Hoang Quang; CHAU, Tran Van; SI, Mai Dinh; MANH, Dinh Duc; KHOA, Doan Tat. **Effects of welding current on the shape and microstructure evolution of thin-walled low-carbon parts built by wire arc additive manufacturing.** Vietnam Journal of Science and Technology, 2020.

SILVA, Leandro João da. **Resfriamento Ativo de Quase Imersão para Fabricação Aditiva de Fio+Arco: do Conceito à Aplicação.** Tese (doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia – MG, 2019.