

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PEÇA FABRICADA COM ARAME DE ALUMÍNIO ER5183 POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA)

Samuel Monteiro Couto Cruz¹ (IC), Bruno Silva Cota (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá - Campus de Itabira

Palavras-chave: Charpy. CMT. Liga de alumínio. MADA.

Introdução

Manufatura aditiva (MA) permite realizar a criação de peças complexas a partir de um modelo de desenho 3D, tem revolucionado a forma como os produtos são fabricados. A técnica de manufatura aditiva com arco a arame (MADA) permite criar peças com geometrias complexas e propriedades mecânicas únicas [1]. A estratégia de deposição na manufatura aditiva por arco é fundamental para determinar a precisão dimensional e a integridade estrutural das peças. A escolha correta pode minimizar defeitos como porosidade, distorções térmicas e garantir uma melhor adesão entre as camadas.

A transferência de metal a frio é um processo de soldagem avançado desenvolvido pela empresa Fronius, que combinou a soldagem MIG/MAG com controle preciso de transferência de metal ideal para fabricação aditiva de materiais como aços inoxidáveis, magnésio e alumínio devido a sua baixa entrada de calor, estabilidade do arco e sincronização entre pulso e corrente. O CMT possui inúmeras vantagens para trabalhar com alumínio, como baixo aporte térmico, menor formação de respingos, redução de porosidade e deposição de camadas homogêneas evitando presença de trincas principalmente em ligas compostas de magnésio e alumínio [2].

O alumínio e suas ligas têm sido amplamente utilizadas nas indústrias aeroespacial e automotiva devido à sua grande formabilidade dimensional e resistência à corrosão à água do mar. O arame 5183 (AlMg 4,5Mn0.7) foi selecionado como arame de soldagem GMAW pelas suas características de soldabilidade e propriedades mecânicas. A adição de magnésio ao alumínio melhora significativamente as propriedades da liga, conferindo excelente soldabilidade, alta resistência estrutural e baixa propensão a rachaduras a quente.

O presente estudo tem como objetivo avaliar e comparar os resultados dos ensaios mecânicos com trabalhos já realizados com arame da mesma liga de alumínio e

semelhantes por meio de caracterização das amostras que foram retiradas dessa peça por ensaios de microdureza Vickers, tração e impacto de Charpy.

Metodologia

O arame de alumínio AWS A5.10 ER5183 fornecido comercialmente pela empresa Voestalpine Bohler com 1,2 mm de diâmetro foi utilizado como arame consumível para produção de uma parede com 40 camadas em que foram retiradas amostras para ensaios mecânicos e metalográficos. Para o substrato foi utilizado alumínio 5083-H111 com tamanho nominal de 160 mm × 72 mm × 36 mm. A composição química do arame e do substrato são mostrados na tabela 1. As propriedades mecânicas mínimas de acordo com a folha de dados do fornecedor do fio são apresentadas na tabela 2.

Tabela 1 – Composição química do metal de adição e substrato (% em peso).

Elementos de Liga	Mn	Si	Cr	Fe	Ti	Mg	Al
Arame ER 5183	0,50 - 1,0	-	0,05 - 0,25	-	< 0,15	4,3 - 5,2	Rest.
Substrato 5083-H111	0,40 - 1,0	< 0,40	0,05 - 0,25	< 0,40	< 0,15	4,0 - 4,9	Rest.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do arame de deposição ER 5183.

Limite de escoamento [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Alogamento [%]
125	275	15

A parede de amostra de alumínio ER5183 fabricada pela MADA-CMT foi produzida no Instituto Belga de Soldagem (Belgian Welding Institute - BWI). O equipamento de deposição de material foi um robô Kuka K6, utilizando uma fonte de soldagem Fronius CMT Welding Source TPS500. A estratégia de deposição de

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

material utilizada foi trapezoidal, proporcionando uma peça com maior espessura e altura uniforme do início ao fim, pois as camadas consecutivas de material foram depositadas em direções opostas, demonstrado na figura 1. Os parâmetros de fabricação são apresentados na tabela 3.

Figura 1 - **a)** Peça fabricada por MADA com arame ER 5183; **b)** padrão de deposição de material em estilo trapezoidal, camadas com deflexão de 12 mm e comprimento de 6 mm.

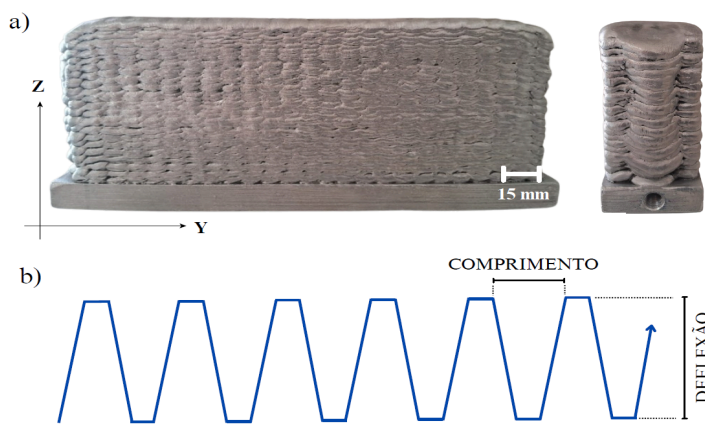
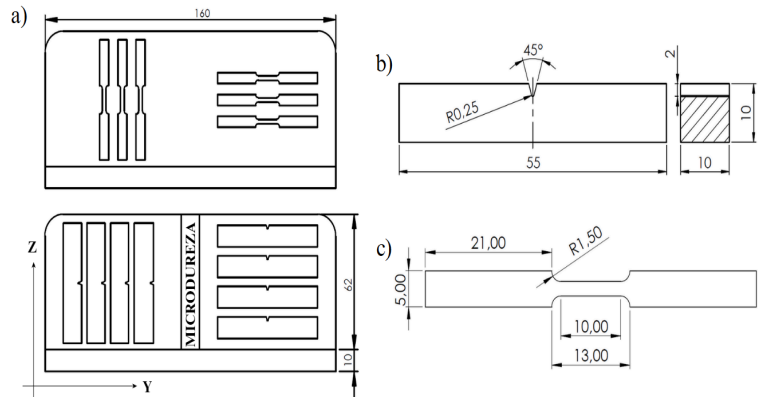


Tabela 3 - Parâmetros do processo MADA para fabricação da parede de amostra.

	Velocidade soldagem (m/min)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Corrente (A)	Voltagem (V)
Camada 1, 2 e 3	240	10.5	185	20
Camada 4 - 40	240	9.7	171	19.5

A peça de amostra fabricada de ER 5183 por MADA (160 mm × 72 mm × 32 mm) foi dividida em duas partes para retiradas de corpos de provas para realização de ensaios mecânicos e metalúrgicos. figura 2 mostra o esquema de retirada dos corpos de prova.

Figura 2 - **a)** Esquema de retirada de corpos de prova; **b)** corpo de prova de impacto de Charpy; **c)** corpo de prova de tração. (todas as dimensões em mm).



O ensaio de microdureza Vickers (HV) é realizado para avaliar a resistência ao desgaste e a durabilidade do material. A dureza do material foi avaliada conforme a norma ASTM E384 [3] que estabelece métodos para padrão de dureza em materiais metálicos. Foi retirada uma amostra verticalmente da peça fabricada, as amostras foram submetidas a uma carga de 0,1 N durante um tempo de 10 segundos em um espaço de 0,50 mm entre os pontos para determinar o perfil de dureza nas diferentes áreas que receberam calor do processo CMT via MADA representadas graficamente na figura 2, resfriaram em intervalos diferentes devido a altura de construção da amostra e análise camada por camada.

O ensaio de tração foi realizado conforme a norma ASTM E8 [4], extraídos da peça de amostra nas direções transversal e longitudinal com 3 amostras para cada lado conforme a figura 2. O ensaio foi realizado em temperatura ambiente, a velocidade estabelecida foi de 0,020 mm/s e análise do gráfico de força [kN] x alongamento [mm]. O ensaio de tração uniaxial foi realizado em uma máquina MC WDW-100E equipada com uma célula de capacidade total de 100 kN. Para o ensaio, foram removidos 3 corpos de provas na direção vertical e 3 na direção horizontal com dimensões especificadas na norma ASTM E8 com espessura de 5 mm. O fator de anisotropia (A) da resistência ao escoamento foi estimada de acordo com a Eq.1, onde Ph (MPa) e Pv (MPa) representam a resistência ao escoamento máxima para amostras longitudinais e transversais.

$$A = \left| \frac{Ph - Pv}{Pv} \right| \cdot 100 \quad (1)$$

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Para fabricação dos corpos de prova e realização de ensaio de impacto de Charpy, foi utilizada a norma ASTM E23-24 [5], para corpo de prova com entalhe em forma de “V” com ângulo de abertura de 45°. Os testes foram realizados em temperatura ambiente em uma máquina de pêndulo de Charpy convencional Wolpert modelo PW30 com capacidade 300J. As amostras possuem dimensões de 55 mm x 10 mm conforme a norma utilizada, foram retirados quatro corpos de prova na direção transversal e quatro na direção longitudinal.

Resultados e discussão

Ensaio de tração

As amostras retiradas na orientação longitudinal são mais resistentes em comparação com as transversais. O limite de escoamento médio foi de $167,82 \pm 2,48$ MPa e o limite de resistência foi de $281,26 \pm 0,94$ MPa na direção longitudinal. Para a orientação transversal, os valores foram de $153,82 \pm 4,69$ MPa e $268,66 \pm 12,69$ MPa, respectivamente. Dessa forma, demonstrando uma melhor distribuição de carga entre as camadas na direção longitudinal. No entanto, o módulo de elasticidade média da orientação transversal foi 33,75% maior do que na orientação longitudinal, indicando uma maior rigidez devido à orientação das camadas em relação a carga de tração aplicada.

Impacto de Charpy

Os resultados do ensaio de impacto de Charpy são utilizados para comparar a capacidade de absorção de energia (Joule) dos metais de maneira comparativa. Na tabela 4 são mostrados os valores obtidos através do ensaio.

Tabela 4 - Resultado do ensaio de Impacto de Charpy.

Amostra	Orientação	Energia Absorvida [J]	Expansão Lateral [%]
02	Transversal	24	8.8
03	Transversal	24	8.9
05	Transversal	24	11.4
07	Transversal	18	8.8
Média	Transversal	22,5 ± 2,60	9,48 ± 1,11
01	Longitudinal	22	8.8
06	Longitudinal	22	11.5
04	Longitudinal	22	11.4
08	Longitudinal	22	8.8
Média	Longitudinal	22 ± 0	10.13 ± 1,33

Os valores de absorção de energia média foram levemente superiores na direção transversal (z) $22,5 \pm 2,60$ e longitudinal (y) 22 ± 0 , uma diferença de 2,27%. Com base nos anexos da norma ASTM 23 também foi medido a deformação lateral dos corpos de prova após o impacto de Charpy, as amostras coletadas na direção longitudinal obtiveram 6,86% de expansão em comparação às outras amostras da direção transversal. A tenacidade ao impacto do material é diretamente influenciada pela orientação microestrutural, uma consequência da anisotropia induzida pelo processo MADA. A estratégia de deposição trapezoidal impõe uma solidificação direcional, resultando no crescimento de grãos colunares alinhados. Devido a isso, o comportamento mecânico sob impacto é governado pela interação entre o plano de fratura e essa microestrutura orientada. Embora a energia de impacto absorvida tenha exibido uma variação marginal de 2,27% entre as direções avaliadas, a expansão lateral apresentou uma discrepância mais pronunciada, sendo 6,86% superior na direção longitudinal. O resultado indica que a ductilidade e a resistência à propagação da fratura são

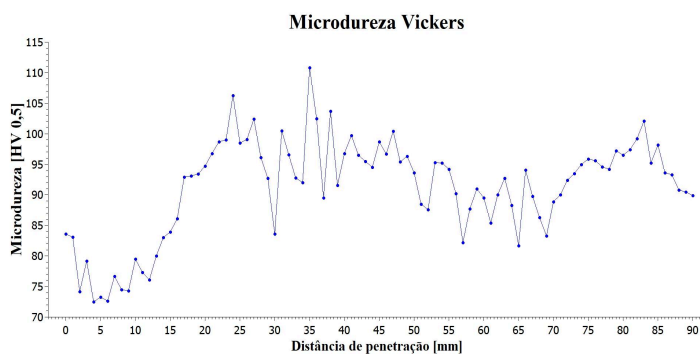
“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

dependentes da direção, ratificando a influência da anisotropia microestrutural sobre a tenacidade do componente. Posteriormente, a superfície das fraturas será submetida à microscopia eletrônica por varredura (MEV) para confirmação da presença de características dúcteis ou frágeis para embasamento da discussão.

Microdureza Vickers

O perfil de dureza Vickers da parede fabricada em MADA foi analisado e os dados apresentados na figura 3.

Figura 3 – Gráfico de microdureza da amostra retirada verticalmente.



O resultado do perfil de dureza analisado revela uma dureza média de 91.3 HV, dureza superior a outras analisadas em literaturas de amostras fabricadas pelo mesmo processo MADA e arame de composição química similar. A dureza baixa é resultado do efeito de recozimento imposto pelas camadas subsequentes que impedem o efeito de resfriamento rápido contra o substrato. A partir da quarta camada a redução de aporte térmico minimiza o efeito de reaquecimento. Consequentemente, a região intermediária da peça apresentou maiores picos de dureza, ocorrido devido ao balanço entre a taxa de resfriamento e menor ciclo de reaquecimento. Os testes de metalografia que serão realizados posteriormente vão auxiliar nessa validação.

Conclusões

Este trabalho avaliou as propriedades mecânicas do arame ER 5183 produzido pelo processo MADA. Por meio de ensaios destrutivos e resultados obtidos foi possível identificar e analisar as propriedades anisotrópicas dos corpos de provas em diferentes orientações. A partir dos

resultados e discussões apresentados neste trabalho, tem-se como conclusões:

1. O teste de microdureza Vickers indicou uma variação ao longo da altura da peça, com valores médios superiores aos do arame ER 5183, a maior dureza se concentra no meio da peça, devido ao menor aporte de calor e diminuição da velocidade após a 4ª camada da peça;
2. O teste de impacto de Charpy indicou uma pequena diferença de energia absorvida entre as direções longitudinal e transversal, já em relação à expansão lateral dos corpos de prova, indicou uma diferença significativa em relação à orientação.
3. Os parâmetros de processo MADA e o estilo de deposição escolhido atenderam às expectativas em relação aos resultados obtidos, gerando uma peça uniforme e resultados de ensaios condizentes com outros trabalhos da literatura.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao professor Dr. Bruno Cota pela oportunidade de realização pesquisa e orientação ao longo desse período.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro para realização da pesquisa.

A Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira pela disponibilização dos técnicos e equipamentos utilizados na realização dos ensaios.

Referências

- [1] GIBSON, I.; STUCKER, B.; ROSEN, D. W. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York: Springer, 2015.
- [2] A. Horgar, H. Fostervoll, B. Nyhus, X. Ren, M. Eriksson, O.M. Akselsen, Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire, J. Mater. Process. Technol. 259 (2018) 68–74.
- [3] ASTM INTERNATIONAL. E384: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009.
- [4] ASTM E8 / E8M-22, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022
- [5] ASTM E23-24, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024.