



Associação Brasileira de Soldagem

XLVII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem
III CBMAdi – Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva
Joinville/SC Agosto de 2025

Análise das Características Mecânicas da Liga AWS A5.36 E 110C-G M Produzida por Manufatura Aditiva Forjada a Quente

(Analysis of the Mechanical Characteristics of AWS A5.36 E 110C-G M Alloy Produced by Hot Forged Additive Manufacturing)

Joélson Vieira da Silva¹, Lirio Schaeffer², Anderson Daleffe¹, Henrique Cechinel Casagrande¹, Gilson de March¹, Jovani Castelan¹, Daniel Fritzen¹, Jamile Thön Langbehn¹

¹Centro Universitário Unisatc, Departamento Manufatura Aditiva, Criciúma, Santa Catarina, Brasil, joelson.silva@satc.edu.br, anderson.daleffe@satc.edu.br, henrique_cechinel@hotmail.com, gilson.march@satc.edu.br, jovani.castelan@satc.edu.br, daniel.fritzen@satc.edu.br, jamile.thon@satc.edu.br

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Transformação Mecânica, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, schaefer@ufrgs.br

Resumo

Este estudo investiga o comportamento mecânico da liga AWS A5.36 E 110C-G M fabricada por Manufatura Aditiva por Arco com Arame (WAAM) e posteriormente submetida ao processo de forjamento a quente. O objetivo principal foi avaliar a influência da orientação de retirada dos corpos de prova — 0°, 45° e 90° em relação à direção de deposição da peça impressa — nas propriedades obtidas por ensaios de tração. A liga, amplamente utilizada em aplicações estruturais que exigem elevada resistência mecânica, foi analisada com foco na anisotropia induzida pelo processo aditivo e na possível homogeneização estrutural promovida pelo forjamento. Os resultados revelaram variações significativas nos limites de resistência e alongamento entre as diferentes orientações, indicando que o forjamento a quente contribui para a redução da anisotropia, embora não a elimine completamente. As análises mostraram ainda que a orientação dos corpos de prova exerce influência direta sobre o comportamento à tração, destacando a importância do controle do processo e da caracterização mecânica multidirecional em componentes híbridos.

Palavras-chave: Forjamento; Manufatura Aditiva; Aço Baixa Liga; Impressão 3D; Ensaio de Tração.

Abstract: *This study investigates the mechanical behavior of the AWS A5.36 E 110C-G M alloy manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) and subsequently subjected to the hot forging process. The main objective was to evaluate the influence of the specimen withdrawal orientation — 0°, 45° and 90° in relation to the deposition direction of the printed part — on the properties obtained by tensile tests. The alloy, widely used in structural applications that require high mechanical strength, was analyzed focusing on the anisotropy induced by the additive process and the possible structural homogenization promoted by forging. The results revealed significant variations in the yield strength and elongation limits between the different orientations, indicating that hot forging contributes to the reduction of anisotropy, although it does not eliminate it completely. The analyses also showed that the specimen orientation directly influences the tensile behavior, highlighting the importance of process control and multidirectional mechanical characterization in hybrid components*

Key-words: Forging; Additive Manufacturing; Low Alloy Steel; 3D Printing; Tensile Testing.

1. Introdução

A Manufatura Aditiva por Arco com Arame (WAAM) é uma tecnologia que permite a fabricação de peças metálicas por meio da deposição camada a camada de grandes volumes de material [1,2]. Essa técnica tem ganhado destaque como uma alternativa promissora para a produção de componentes metálicos de grande porte, principalmente por sua elevada taxa de deposição e baixo custo operacional [3,4]. Entre as principais vantagens do WAAM em relação aos métodos convencionais estão a redução do desperdício de material, a diminuição dos prazos de entrega e fabricação de peças metálicas com geometrias mais complexas [3, 5].

O processo tem sido aplicado com sucesso em diversos materiais, como ligas de alumínio, aço carbono e aços inoxidáveis [4,6]. No entanto, desafios importantes ainda persistem, incluindo baixa precisão dimensional e geométrica [7,8], além de problemas como porosidade, tensões residuais e anisotropia na microestrutura e nas propriedades mecânicas [4,7]. Para tornar o WAAM mais viável em aplicações industriais, são necessárias investigações adicionais sobre seu desempenho mecânico, comportamento frente à corrosão e os mecanismos metalúrgicos subjacentes [7].

Em contrapartida, o forjamento se destaca por proporcionar alta precisão dimensional e custos unitários reduzidos, especialmente em produções de grande escala. Nesse contexto, a manufatura híbrida — que combina processos aditivos com técnicas de conformação — tem despertado grande interesse, tanto por integrar de forma eficiente a cadeia de produção quanto por oferecer soluções para as limitações do WAAM [9]. A integração entre a manufatura aditiva e a conformação metálica promete, ainda, reduzir o tempo de fabricação e os custos por peça, ao mesmo tempo em que mitiga deficiências comuns da AM, como baixa precisão e defeitos metalúrgicos [10].

O conceito de manufatura híbrida refere-se à combinação de processos aditivos e subtrativos, com o objetivo de superar as limitações individuais de cada técnica [11]. No caso da junção entre AM e conformação, busca-se melhorar a forma e as características das camadas depositadas por meio de deformações plásticas localizadas, conferindo às peças maior rigidez e resistência ao desgaste [11].

Estudos que investigam a manufatura híbrida com a aplicação de WAAM e forjamento indicam que as peças produzidas apresentam boa união metalúrgica na zona de transição [12]. Ainda assim, o conhecimento sobre os efeitos do WAAM na microestrutura da liga AWS A5.36 E 110C-G M — especialmente quando submetida ao forjamento subsequente — é limitado. Fatores como o padrão de deposição, a orientação das camadas e as tensões residuais podem influenciar significativamente a formação de grãos, a estrutura dendrítica e a precipitação de fases.

A liga AWS A5.36 E 110C-G M, amplamente empregada em aplicações estruturais que exigem alta resistência mecânica, já tem sido explorada em processos de manufatura aditiva. No entanto, estudos que analisem seu comportamento quando submetida ao forjamento a quente após a deposição por WAAM ainda são escassos.

Diante disso, este trabalho propõe a combinação do forjamento com a deposição por WAAM para a fabricação de uma peça híbrida. As propriedades mecânicas dessa peça são avaliadas por meio de ensaios de tração e medições de dureza na região depositada. A pesquisa investiga o impacto da abordagem híbrida na resistência à tração, bem como os efeitos globais da combinação de processos sobre as propriedades finais da peça produzida.

2. Matérias e Métodos

Todos os recursos e equipamentos descritos a seguir, necessários à execução dos testes foram disponibilizados pelo Centro Universitário UniSATC

2.1 Impressão da pré-forma

Para a fabricação das peças de teste, foram confeccionadas amostras, utilizando a máquina de solda Lincoln Electric, modelo YRC1000 AR1440 Power Wave E600, do fabricante Yaskawa, disponível no Laboratório de Manufatura Aditiva da Unisatc. As amostras foram impressas em uma peça única de forma plana e posteriormente removidas e usinadas nas medidas desejadas, totalizando 9 corpos de prova. O braço robótico de impressão pode ser visto na Fig. 1



Figura 1. Braço robótico de soldagem automática.

A programação da manufatura aditiva foi realizada por meio do software fornecido pelo fabricante do braço robótico (Fig. 2a), utilizando controle numérico computadorizado (CNC). A trajetória de deposição foi planejada com base nas dimensões da parede de impressão, seguindo um percurso longitudinal e adotando um padrão de movimento circular, com o objetivo de obter um cordão de solda mais largo. Foi fabricada uma parede com altura de 300 x 180 x 15 mm (Fig. 2b).

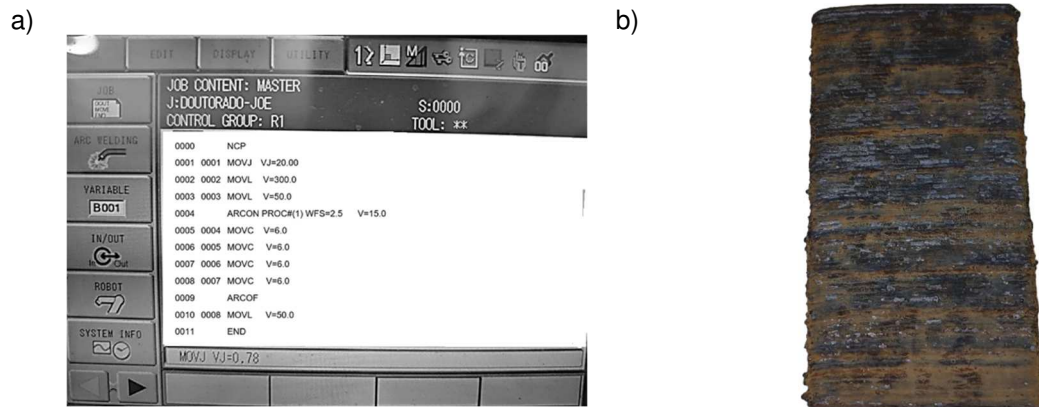


Figura 2. (a) programa de manufatura (b) e parede impressa.

Para aquisição dos dados de deposição, foi utilizada a ferramenta SAP 3SR. A deposição de material ocorreu na velocidade de 350 mm/min, com incremento de 2,5 mm por camada. Os parâmetros adotados podem ser observados na Tab. 10.

Tabela 1. Parâmetros de deposição.

| Parâmetro: | Valor: |
|------------------------------|--------|
| Corrente (A) | 110 |
| Tensão (V) | 15 |
| Vazão do gás (L/min.) | 12,5 |
| Velocidade do arame (m/min.) | 5,5 |
| Argônio (%) | 75 |
| Dióxido de carbono (%) | 25 |
| Deslocamento tocha (mm/min.) | 300 |

Com o objetivo de obter um controle rigoroso das temperaturas envolvidas durante a deposição do material — e, assim, compreender os fatores que podem influenciar as propriedades mecânicas — foi realizado o monitoramento térmico por meio de uma câmera termográfica Optris, modelo PI 08M. Esse equipamento é capaz de capturar imagens térmicas na faixa de 575 a 1.900 °C. Durante o processo de impressão, a temperatura da poça de fusão foi registrada em 1.401,5 °C, conforme indicado pela imagem térmica capturada pela câmera durante a fabricação da parede, apresentada na Fig.3:

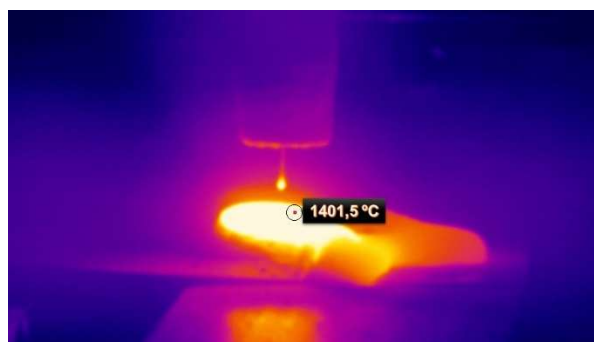


Figura 3: Imagem térmica da poça de fusão durante a impressão.

A remoção dos corpos de prova da parede impressa seguiu a disposição que pode ser observada na Fig.4.



Figura 4. Disposição de corte dos corpos de prova para ensaio de tração

A análise química do material depositado pode ser conferida na Tab. 2:

Tabela 2: Composição química do aço depositado

| Elemento | C | Mn | Si | P | S | Ni | Mo |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| % | 0,07 | 1,57 | 0,42 | 0,01 | 0,01 | 1,49 | 0,34 |

2.2 Forjamento

O forjamento foi efetuado em uma única etapa, para cada amostra, utilizando uma prensa hidráulica FN150 com capacidade de 150 toneladas, do fabricante FKL Máquinas, pertencente ao laboratório de conformação mecânica da Unisatc, possibilitando dar forma final ao componente a ser estudado. As amostras foram aquecidas a temperatura de 1.150 °C. A imagem da prensa utilizada pode ser vista na Fig. 5.



Figura 5. Prensa de forjamento

2.3 Ensaios

Foram confeccionados corpos de prova com espessura de 5 mm para a realização do ensaio de tração. No total, foram retirados nove corpos de prova: três orientados paralelamente ao sentido de impressão (0°), três em orientação oblíqua (45°) e três transversalmente ao sentido de impressão (90°). O formato dos corpos de prova segue as especificações da norma ABNT NBR ISO 6892 (2019) [12], com dimensões conforme Fig.6a.

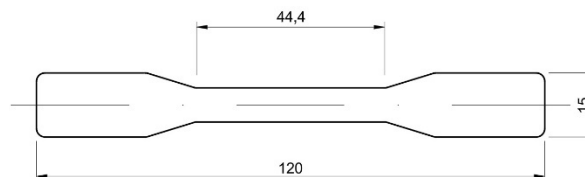


Figura 6. Dimensões padronizadas do corpo de prova para o ensaio de tração

3. Resultados e Discussões

3.1 Ensaio de tração

Após realizados os ensaios, foram geradas as curvas tensão-deformação convencionais para cada CP, considerando a situação antes e depois do forjamento (Fig. 7 e 8).

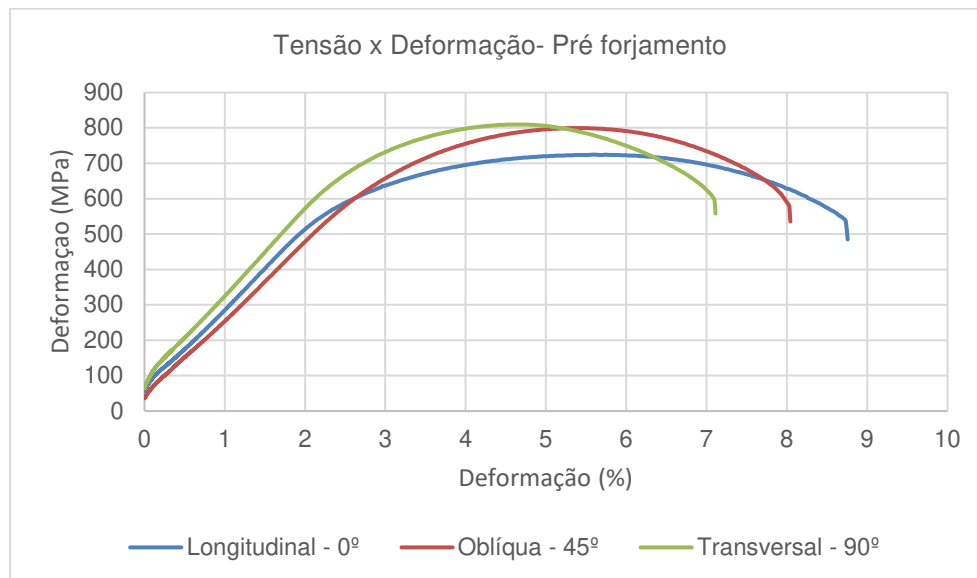


Figura 7: Curva convencional σ X ϵ dos corpos de prova antes do forjamento

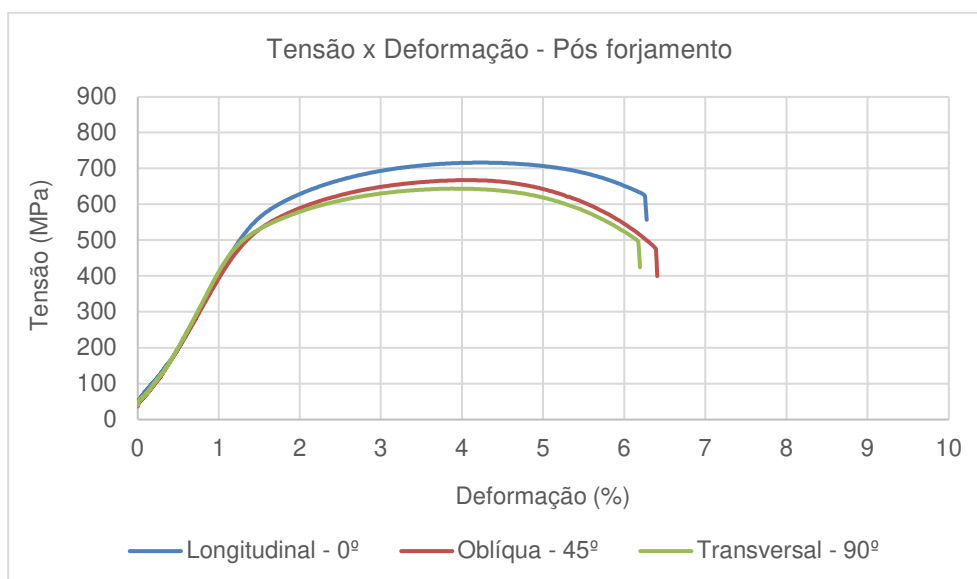


Figura 7: Curva convencional σ X ϵ dos corpos de prova após o forjamento

O gráfico de tensão x deformação, ensaiado em três orientações diferentes (0°, 45° e 90°) em relação à impressão mostrou que o material antes do forjamento apresentou maior anisotropia, mas com uma resistência a tração maior que o material forjado. Os corpos de prova também apresentaram menor deformação após o forjamento. Essa condição pode revelar um aumento de dureza na condição de pós forjamento.

Na condição de pós forjamento, pode-se observar um comportamento similar nas direções 45 e 90°, com resistência a tração atingindo cerca de 645 Mpa. Na direção de 0° (longitudinalmente), o material atingiu sua resistência máxima, em torno de 720 MPA, e praticamente a mesma ductilidade das outras duas orientações, com pouco mais de 6 %.

Esse comportamento indica que a orientação de carga em relação ao sentido de deposição, tem influência nas propriedades mecânicas do material, com resistência máxima no sentido longitudinal, mesmo que não tenha sido encontrada diferença em suas ductilidades.

Na tabela 3 estão indicados os valores encontrados no ensaio de resistência a tração no modo forjado.

Tabela 3: Caracterização dos ensaios de resistência a tração

| Sentido de Impressão [°] | Tensão máxima $\sigma_{\text{máx}}$ [Mpa] | Tensão de escoamento σ_e [Mpa] | Deformação ϵ [%] |
|--------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------|
| 0 | 716,67 | 597,20 | 6,23 |
| 45 | 646,24 | 530,38 | 6,30 |
| 90 | 644,54 | 545,88 | 6,17 |

Os dados da Tab. 3 comprovam o comportamento anisotrópico, no estado forjado, com pequenas variações no sentido de 45° e 90°. A orientação a 0° oferece maior resistência a tração, enquanto a 45° permite maior deformação antes da ruptura, comprovando que a orientação da impressão do material é crucial para aplicações que exigem otimização das propriedades mecânicas do material. A amostra analisada a 45° apresentou equilíbrio entre resistência mecânica e ductilidade, mostrando-se uma opção para aplicações que requerem ambas as propriedades.

Observando-se o tipo de fratura nas Fig. 8, constatou-se que os corpos de provas forjados apresentaram uma fratura do tipo dúctil, com estricção visível, independente da direção de deposição.



Figura 8: Fratura dúctil do CP, caracterizada pelo ângulo de ruptura (45° aprox.) e pela estricção visível

4. Conclusões

Este trabalho evidenciou a possibilidade de aplicar o forjamento na Manufatura Aditiva por Arco de Arame (WAAM) na fabricação de componentes em aço de baixa liga, ressaltando as análises das propriedades mecânicas em relação à direção da impressão.

Utilizando o arame AWS A5.36 E110C-G M, foi possível constatar que a orientação da impressão e o forjamento tem influência na resistência e ductilidade das peças, que pode ser consequência do aumento de dureza no material após o forjamento.

Dessa forma, a abordagem da Fabricação Aditiva por Arco de Fio (WAAM) surge como uma alternativa promissora para produzir peças metálicas com formas complexas, especialmente em situações que demandam altas taxas de deposição e grande integridade estrutural. Para permitir sua utilização em ambientes industriais, é essencial ter um controle rigoroso dos parâmetros de deposição, visando minimizar a anisotropia microestrutural e melhorar as propriedades mecânicas das peças fabricadas. Pesquisas futuras focadas na redução de inclusões e porosidades são cruciais para elevar ainda mais a qualidade e a confiabilidade do material gerado através desse método.

Este trabalho apresentado é uma pesquisa inicial e recomenda-se a realização de estudos futuros, com variações na temperatura, ou adoção do forjamento a quente.

5. Referências Bibliográficas

- [1] WILLIAMS, S. W. et al. Wire + Arc Additive Manufacturing. **Materials Science and Technology**, v. 32, n. 7, p. 641–647, 9 fev. 2016.
- [2] DEBROY, T. et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112–224, mar. 2018.
- [3] SHAH, A. et al. A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 7, n. 3, p. 97, 1 jun. 2023.

- [4] VIMAL, K. E. K.; NAVEEN SRINIVAS, M.; RAJAK, S. Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review. **Materials Today: Proceedings**, out. 2020.
- [5] SATURNO, et. al. Avaliação do Processo de Manufatura Aditiva Baseado na Técnica WAAM a Partir do HL 85 MC-B. *Revista Vincci - Periódico Científico do UniSATC*, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 258–278, 2023.
- [6] ALDALUR, E. et al. High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 58, p. 615–626, out. 2020.
- [7] JIN, W. et al. Wire Arc Additive Manufacturing of Stainless Steels: A Review. **Applied Sciences**, v. 10, n. 5, p. 1563, 1 jan. 2020.
- [8] GAO, L. et al. An operando synchrotron study on the effect of wire melting state on solidification microstructures of Inconel 718 in wire-laser directed energy deposition. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 194, p. 104089, 9 nov. 2023.
- [9] LI, H. et al. Effect of Cold Pressing Deformation on Microstructure and Residual Stress of 7050 Aluminum Alloy Die Forgings. **Materials**, v. 16, n. 14, p. 5129–5129, 20 jul. 2023.
- [10] HAFENECKER, J. et al. Hybrid process chains combining metal additive manufacturing and forming – A review. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 46, p. 98–115, 15 ago. 2023.
- [11] PRAGANA, J. P. M. et al. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. **Advances in Industrial and Manufacturing Engineering**, v. 2, n. 100032, p. 100032, 2021.
- [12] BAMBACH, M. et al. Hybrid manufacturing of components from Ti-6Al-4V by metal forming and wire-arc additive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 282, p. 116689, ago. 2020.
- [13] ABNT NBR-6892. **Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**. ABNT. Rio de Janeiro. 2019