



44° SENAFOR

28th International Forging Conference
13th International Sheet Metal Forming Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies –
Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 1-3, 2025

EFEITO DO FORJAMENTO A MORNO SOBRE A LIGA AWS A5.28 E110C-G PRODUZIDA POR MANUFATURA ADITIVA

Joélson Vieira da Silva ⁽¹⁾

Lirio Schaeffer ⁽²⁾

Anderson Daleffe ⁽³⁾

Henrique Cechinel Casagrande ⁽⁴⁾

RESUMO

A manufatura aditiva por arco elétrico (WAAM) tem se mostrado como uma alternativa eficiente para a produção de peças metálicas para um gama variado de peças, especialmente utilizando ligas de alta resistência. Este estudo avalia o efeito do forjamento a morno sobre as propriedades mecânicas e a microestrutura da liga AWS A5.28 E110C-G, fabricada por WAAM. Corpos de prova foram produzidos por deposição multicamada e em três diferentes direções (0°, 45° e 90°) sendo posteriormente submetidos a forjamento a morno. As amostras foram caracterizadas por ensaios mecânicos (tração e dureza) e por análises microestruturais utilizando microscopia óptica e eletrônica de varredura. O forjamento a 800 °C alterou significativamente a microestrutura do aço de baixa liga, evidenciado por deformação dos grãos e inclusões, alinhamento microestrutural. Observou-se também uma melhora na anisotropia do material. A combinação entre WAAM e forjamento a morno mostrou-se uma rota promissora para a melhoria do desempenho estrutural de componentes fabricados com a liga E110C-G M, contribuindo para a confiabilidade e aplicação da manufatura aditiva em setores exigentes como a indústria automobilística e aeronáutica.

1. Introdução

A tecnologia de Manufatura Aditiva por Arame e Arco (WAAM, do inglês *Wire Arc Additive Manufacturing*) vem se consolidando como uma abordagem eficiente para a obtenção de peças metálicas, fundamentada no princípio da deposição sucessiva de camadas de material. Seu uso tem atraído crescente interesse, especialmente na

produção de componentes de grande porte, em virtude da elevada produtividade e dos custos relativamente reduzidos do processo [1,2,3,4]. Além disso, destaca-se por vantagens significativas em comparação a rotas convencionais de fabricação, como o aproveitamento mais racional da matéria-prima, a redução dos tempos de fabricação e a possibilidade de conceber estruturas de geometrias complexas [3,5,6].

O processo WAAM já demonstrou aplicabilidade em uma ampla gama de ligas metálicas, incluindo alumínio, aços ao carbono e aços inoxidáveis [4,7]. Apesar desse avanço, a técnica ainda enfrenta obstáculos relevantes, entre eles a limitação na precisão dimensional e geométrica [8,9], além da ocorrência de defeitos como porosidade, desenvolvimento de tensões residuais e comportamento anisotrópico tanto na microestrutura quanto nas propriedades mecânicas [4,8]. Para que seu uso seja plenamente consolidado em escala industrial, torna-se essencial aprofundar os estudos sobre aspectos metalúrgicos do processo, bem como avaliar de forma abrangente seu desempenho mecânico e sua resistência à corrosão [8].

Por outro lado, o processo de forjamento é amplamente reconhecido por garantir excelente precisão dimensional e baixo custo por unidade, sobretudo quando aplicado à produção em grande escala. Nesse contexto, surge a manufatura híbrida, que associa a manufatura aditiva a técnicas de conformação mecânica, como uma estratégia promissora para superar limitações do WAAM [10]. Essa integração de processos possibilita maior eficiência na cadeia de fabricação, além de contribuir para a redução de custos e tempos de produção. Outro ponto relevante é sua capacidade de minimizar falhas inerentes à manufatura aditiva, como imperfeições geométricas e a presença de descontinuidades metalúrgicas [11].

A manufatura híbrida pode ser entendida como a associação entre técnicas aditivas e subtrativas, concebida para atenuar as restrições impostas quando essas abordagens são empregadas isoladamente. Especificamente na integração do WAAM com o forjamento, o objetivo central é refinar a geometria e a qualidade das camadas depositadas por meio da aplicação de deformações plásticas controladas. Esse procedimento contribui para o aumento da rigidez estrutural e para a melhoria da resistência ao desgaste dos componentes produzidos [12].

Pesquisas envolvendo a manufatura híbrida que combina WAAM e forjamento têm demonstrado que os componentes resultantes podem apresentar adequada continuidade metalúrgica na região de transição [13]. Apesar disso, ainda são escassas as informações a respeito do impacto do WAAM sobre a microestrutura da liga AWS A5.28 E 110C-G M, sobretudo quando esta é submetida a etapas posteriores de forjamento. Aspectos como o trajeto de deposição, a disposição das camadas e a presença de tensões residuais exercem influência direta sobre a morfologia dos grãos, a formação de estruturas dendríticas e os mecanismos de precipitação de fases.

A liga AWS A5.28 E 110C-G M, reconhecida por sua elevada resistência mecânica e frequentemente empregada em aplicações estruturais, já vem sendo explorada em rotas de manufatura aditiva. Entretanto, ainda há uma carência de investigações que avaliem seu desempenho quando submetida a etapas de forjamento a morno após a deposição via WAAM, o que limita a compreensão de seu comportamento microestrutural e mecânico nesse contexto.

Nesse contexto, o presente estudo propõe a produção de um componente híbrido obtido pela integração do processo WAAM com o forjamento. Para avaliar o desempenho do material resultante, foram realizados ensaios de tração e medições de dureza na região depositada. O objetivo central é investigar de que forma a estratégia híbrida afeta a resistência mecânica, em especial a tração, além de discutir a

influência dessa combinação de processos nas propriedades finais do componente fabricado.

2. Materiais e métodos

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

2.1. Impressão das pré-formas

Para a etapa de fabricação dos corpos de prova, foram utilizadas amostras produzidas com o equipamento de soldagem Lincoln Electric, modelo YRC1000 AR1440 Power Wave E600, da Yaskawa, instalado no Laboratório de Manufatura Aditiva da Unisatc. A deposição foi realizada em peça única, com geometria plana, a qual posteriormente foi destacada e usinada até atingir as dimensões especificadas, resultando em um total de nove amostras. O sistema robótico empregado na impressão encontra-se ilustrado na Fig. 1.



Figura 1: Braço robótico de soldagem automática.

A etapa de programação da manufatura aditiva foi conduzida por meio do software disponibilizado pelo fabricante do braço robótico, operando em ambiente de controle numérico computadorizado (CNC). O planejamento da trajetória de deposição considerou as dimensões da parede a ser impressa, adotando um deslocamento longitudinal aliado a um padrão circular de movimento, estratégia empregada para ampliar a largura do cordão de solda. Com esse procedimento, foi possível fabricar uma parede com dimensões de 300 × 180 × 15 mm (Fig. 2).



Figura 2: Parede impressa para remoção dos corpos de prova.

A coleta dos parâmetros de deposição foi realizada por meio da ferramenta SAP 3SR. O processo ocorreu com velocidade de 350 mm/min, adotando-se um incremento de 2,5 mm para cada camada depositada. Os valores utilizados no experimento estão apresentados na Tab. 1.

Tabela 1: Parametros de deposição.

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

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 processo de forjamento foi conduzido em etapa única para cada amostra, utilizando-se uma prensa hidráulica FN150, com capacidade de 150 toneladas, fabricada pela FKL Máquinas e disponível no Laboratório de Conformação Mecânica da Unisatc. As amostras foram previamente aquecidas a 1.150 °C, condição que permitiu a obtenção da forma final dos componentes analisados. A Fig. 3 apresenta a prensa empregada nos ensaios.



Figura 3: Prensa de forjamento.

3. Resultados e discussões

O ensaio de tração realizado em três orientações distintas em relação à direção de impressão (0° , 45° e 90°) revelou que o material antes do forjamento apresentava maior anisotropia, embora exibisse resistência à tração superior em comparação ao material pós-forjamento. Após o forjamento, os corpos de prova demonstraram menor deformação, sugerindo um aumento da dureza na condição pós-deformação.

Na etapa pós-forjamento, observou-se comportamento similar nas direções de 45° e 90° , com resistência à tração em torno de 645 MPa. Já na direção longitudinal (0°), o material atingiu sua resistência máxima, aproximadamente 720 MPa, mantendo ductilidade próxima à das outras orientações, pouco acima de 6%. As curvas de tensão podem ser vistas na Fig. 4.

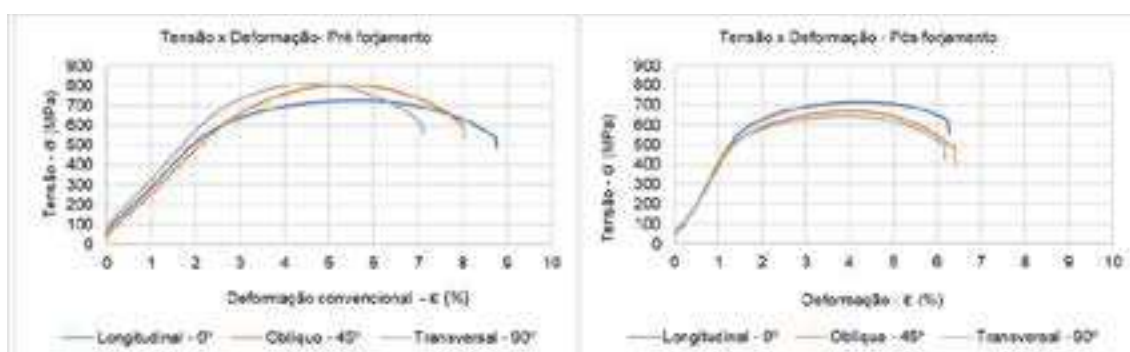


Figura 4: Gráficos de tensão x deformação antes e depois do forjamento.

Esses resultados indicam que a orientação da carga em relação ao sentido de deposição influencia significativamente as propriedades mecânicas, com o desempenho máximo observado na direção longitudinal, enquanto a ductilidade permaneceu praticamente constante entre as diferentes orientações.

Os valores dos ensaios de tração podem ser vistos na Tab. 3 e 4.

Tabela 3: Caracterização dos ensaios de resistência a tração antes do forjamento.

Sentido de Impressão [°]	Tensão máxima $\sigma_{\text{máx}}$ [Mpa]	Tensão de escoamento σ_e [Mpa]	Deformação ϵ [%]
0	724,47	604,00	8,83
45	799,95	714,36	8,20
90	810,25	695,82	7,17

Tabela 4: Caracterização dos ensaios de resistência a tração após o forjamento.

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

Observando-se o tipo de fratura na Fig. 5, constatou-se que o corpo de prova apresentou uma fratura do tipo dúctil, com estrição visível.

**Figura 5:** Fratura dúctil dos CPs, caracterizada pelo ângulo de ruptura (45° aprox.) e pela estrição visível.

As medições de microdureza indicaram que o aço manteve suas propriedades, sem evidência de alterações significativas na dureza ou a formação de uma zona de transição decorrente do forjamento. Em contraste, o alumínio apresentou redução expressiva nos valores de dureza após o forjamento, tanto nas regiões próximas quanto nas mais distantes da junta. Esse comportamento sugere que a baixa taxa de resfriamento favoreceu a precipitação durante o processo, comprometendo a efetividade do endurecimento pós-tratamento térmico. Resultado semelhante foi relatado por Huang [14]. Os valores das microdurezas podem ser conferidas na Fig. 5.

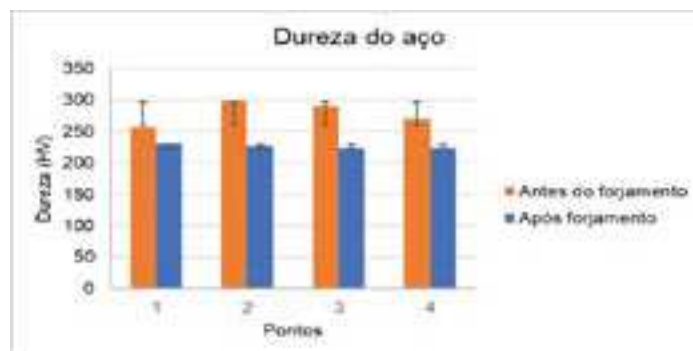


Figura 5: Dureza do aço antes e após forjamento.

A análise metalográfica do aço na condição anterior ao forjamento (Fig. 6a) revelou grãos equiaxiais relativamente homogêneos, característicos de um estado de recozimento. Observou-se ainda a presença de partículas escuras finamente dispersas, possivelmente carbonetos ou óxidos, distribuídas de forma uniforme na matriz metálica. Essa microestrutura apresentou aspecto estável e pouco deformado, evidenciando que o material não havia sido submetido a solicitações mecânicas significativas. Já na condição pós-forjamento (Fig. 6b), verificou-se a formação de uma estrutura alongada e orientada, típica do processo de conformação plástica.

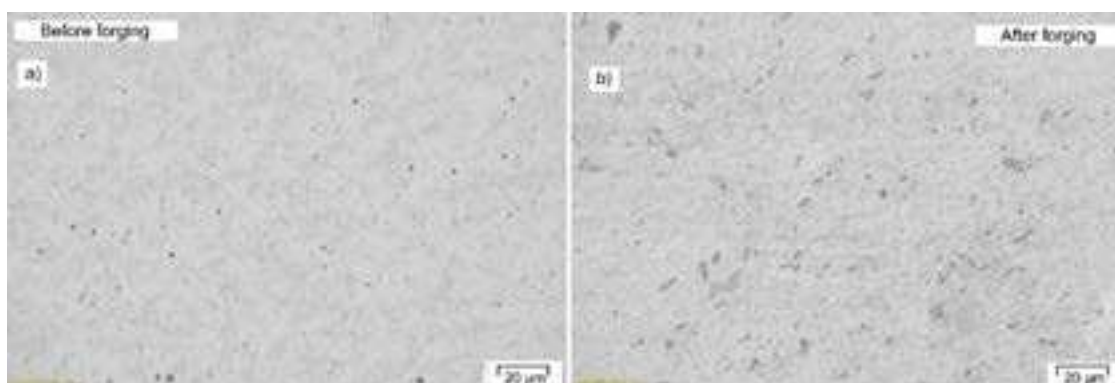


Figura 6: Aço depositado, a) antes do forjamento e b) após o forjamento. Sem ataque.

4. Conclusões

O presente estudo demonstrou a viabilidade da aplicação do forjamento em conjunto com a Manufatura Aditiva por Arco com Arame (WAAM) para a produção de componentes em aços de baixa liga, destacando a influência da direção de impressão sobre as propriedades mecânicas.

A utilização do arame AWS A5.36 E110C-G M evidenciou que tanto a orientação da deposição quanto a etapa de forjamento afetam diretamente a resistência e a ductilidade das peças, possivelmente em função do aumento de dureza promovido pelo processo de deformação.

Nesse sentido, a WAAM se apresenta como uma alternativa promissora para a fabricação de peças metálicas complexas, sobretudo em aplicações que exigem altas taxas de deposição aliadas a boa integridade estrutural. Para ampliar seu uso em escala industrial, torna-se fundamental o controle rigoroso dos parâmetros de deposição, com o objetivo de reduzir a anisotropia microestrutural e otimizar o desempenho mecânico. Além disso, avanços na mitigação de defeitos, como inclusões

e porosidades, são cruciais para elevar a confiabilidade do processo.

Este trabalho constitui uma investigação preliminar, recomendando-se o aprofundamento em pesquisas futuras, incluindo variações de temperatura e a exploração do forjamento a quente.

References

- [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] SILVA, J. V. D., SCHAEFFER, L., DALEFFE, A., MILANEZ, A., CASAGRANDE, H. C., & MARCH, G. D. (2025). Analysis of the Bimetallic Joint of a Hot-Forged Crosshead Composed of ASTM B221 6060 Aluminum and AWS A5. 36 E110C-G M Low Alloy Steel Obtained by Localized Fusion Additive Manufacturing. *Materials Research*, 28, e20250347.
- [7] 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.
- [8] JIN, W. et al. Wire Arc Additive Manufacturing of Stainless Steels: A Review. **Applied Sciences**, v. 10, n. 5, p. 1563, 1 jan. 2020.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] ABNT NBR-6892. **Materiais metálicos** – Ensaio de tração à temperatura ambiente. ABNT. Rio de Janeiro. 2019