



## 44° SENAFOR

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

# MANUFATURA ADITIVA POR ARCO ELÉTRICO: EFEITO DO FORJAMENTO A MORNO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAS EM UM CONSUMÍVEL DE ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Carlos Antônio Ferreira<sup>1</sup>  
Lirio Schaeffer<sup>2</sup>  
Anderson Daleffe<sup>3</sup>  
Henrique Cechinel Casagrande<sup>4</sup>  
Gilson De March<sup>5</sup>  
Pedro Henrique Menegaro Possamai<sup>6</sup>  
Joélson Vieira da Silva<sup>7</sup>

---

<sup>1</sup>Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). E-mail: carlos.ferreira@satc.edu.br

<sup>2</sup> Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: schaefer@ufrgs.br

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Criciúma, Santa Catarina, Brasil. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

<sup>4</sup> Doutorando em Engenharia Metalúrgica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. E-mail: henrique\_cechinel@hotmail.com

<sup>5</sup> Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). E-mail: gilson.march@satc.edu.br

<sup>6</sup> Mestrando em Engenharia Metalúrgica. Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (UniSATC). Criciúma, Santa Catarina, Brasil. E-mail: pedro.possamai@hotmail.com

<sup>7</sup> Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). E-mail: joelson.silva@satc.edu.br

## RESUMO

A manufatura aditiva por arco elétrico (WAAM – *Wire Arc Additive Manufacturing*) tem se destacado como uma alternativa promissora para a fabricação de componentes metálicos de grande porte, especialmente com ligas de alta resistência mecânica. Este trabalho investiga o efeito do forjamento a morno nas propriedades mecânicas e microestruturais de peças produzidas via WAAM utilizando um consumível de alta resistência. Foram fabricados corpos de prova por deposição em múltiplas camadas, seguidos por processos de forjamento a temperatura de 850 °C, com o objetivo de refinar a microestrutura e reduzir defeitos típicos do processo, como porosidade e crescimento direcional de grãos. Ensaio mecânicos, incluindo tração e dureza, além de análises microestruturais por microscopia óptica e eletrônica, foram conduzidos. Os resultados indicam que o forjamento a morno promove significativa homogeneização microestrutural, e melhora nas propriedades mecânicas, em especial o limite de escoamento e a tenacidade. Assim, a combinação de WAAM com forjamento térmico intermediário revela-se uma estratégia eficiente para elevar a qualidade e o desempenho de componentes críticos fabricados por manufatura aditiva com consumíveis de alta resistência.

### 1. Introdução

A manufatura aditiva, especialmente a impressão 3D aplicada a metais, tem se consolidado como uma das tecnologias de maior relevância dentro do conceito de Indústria 4.0. Em um cenário de elevada competitividade e busca constante pela redução de custos com o menor consumo possível de insumos, a adoção de soluções inovadoras tornou-se estratégica para a indústria.

Entre os principais diferenciais dessa tecnologia estão a possibilidade de integrar diferentes funções em um único componente, a produção de geometrias complexas sob medida, a redução da massa estrutural, o aproveitamento mais eficiente da matéria-prima e a diminuição significativa do tempo de fabricação [1,2,3]. Além disso, a manufatura aditiva é amplamente utilizada na prototipagem de peças com formatos não convencionais [4].

Quando combinada ao forjamento a quente em processos de caráter híbrido, a manufatura aditiva possibilita reduzir etapas de pré-forma e de operação, além de aumentar a eficiência no uso do material. Conforme destacado em [5], aproximadamente metade do custo de um componente forjado está diretamente relacionado ao gasto com matéria-prima, além do benefício da diminuição expressiva no tempo de setup, já que o processo requer apenas uma matriz.

Os resultados preliminares obtidos neste trabalho demonstram que a combinação entre manufatura aditiva e forjamento apresenta vantagens tanto econômicas quanto ambientais, principalmente pelo menor consumo de recursos. Nesse contexto, a técnica WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), que utiliza soldagem a arco com alimentação de arames metálicos, tem ganhado destaque. Embora esteja mais frequentemente associada ao processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), essa abordagem também pode ser implementada com GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e PAW (*Plasma Arc Welding*) [6].

As principais vantagens do WAAM incluem o baixo custo de implantação, a ampla disponibilidade de arames metálicos no mercado e as elevadas taxas de deposição, variando entre 5 e 6 kg/h, valores bem superiores aos obtidos em processos como SLM (*Selective Laser Melting*), com cerca de 0,1 kg/h, e LMD (*Laser Metal Deposition*), em torno de 1 kg/h.

O forjamento, por outro lado, é um método de conformação plástica de uso consolidado na indústria, especialmente na produção de carcaças, eixos e componentes automotivos, devido à sua capacidade de gerar peças com alta resistência mecânica e excelente tenacidade. O processo também é eficaz na

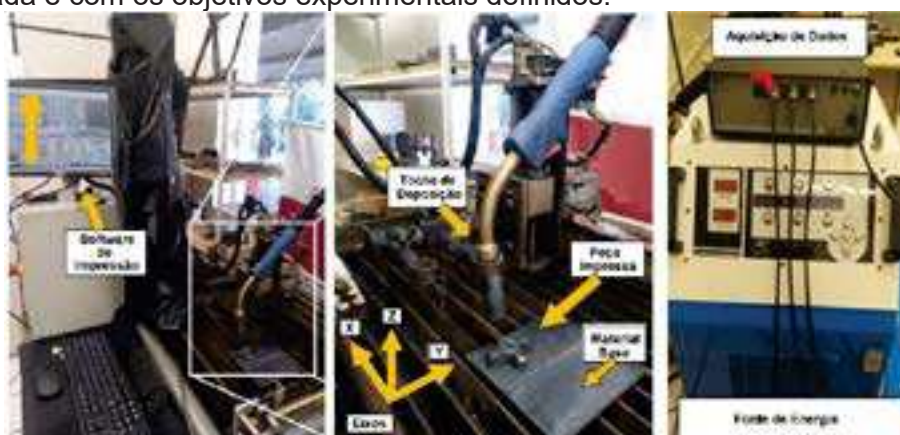
eliminação de defeitos internos e na melhoria das propriedades do material [7]. O uso de matrizes fechadas, típico dos setores automotivo e aeroespacial, é justificado pela necessidade de confiabilidade e precisão, especialmente em peças críticas como bielas e eixos [8].

Neste estudo, investigam-se os efeitos do forjamento a morno na microestrutura de martelos produzidos por WAAM com a liga de alta dureza UTP DUR 600. O propósito central é integrar de maneira otimizada essas duas tecnologias e avaliar a influência da orientação de impressão sobre as propriedades mecânicas. A sinergia entre a manufatura aditiva e o forjamento a morno busca elevar o desempenho e a qualidade dos componentes, favorecendo sua aplicação em diferentes setores industriais e ampliando os impactos positivos dessa abordagem.

## MATERIAIS E MÉTODOS

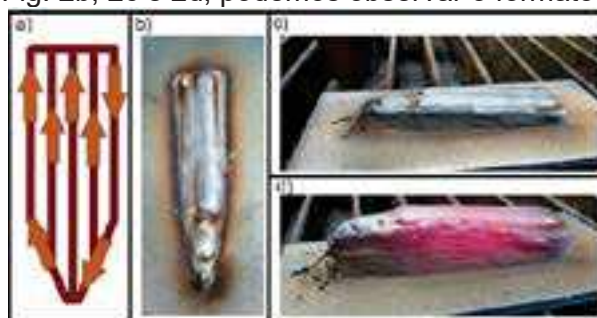
Na etapa de impressão das amostras, foi realizada primeiramente a análise da estratégia de deposição mais apropriada, levando em conta, como principal critério, os efeitos do escoamento do material fundido decorrentes da alta taxa de calor gerada durante o processo. As peças de teste foram fabricadas em um sistema de soldagem desenvolvido pela UniSATC, adaptado para permitir movimentação nos eixos X, Y e Z sobre uma base automatizada. Esse equipamento é controlado por comando numérico computadorizado, o que possibilita o ajuste linear da altura da tocha, garantindo maior precisão e regularidade na deposição sucessiva das camadas.

Para a execução da soldagem, empregou-se o modelo semiautomático SMASHWELD 250E, fabricado pela ESAB, ilustrado na Fig. 1. Esse dispositivo utiliza a tecnologia de soldagem MIG/MAG, sendo escolhido, neste estudo, o processo MAG (Metal Active Gas), por apresentar maior compatibilidade com as propriedades da liga utilizada e com os objetivos experimentais definidos.



**Figura 1:** Arranjo do equipamento durante a impressão das amostras.

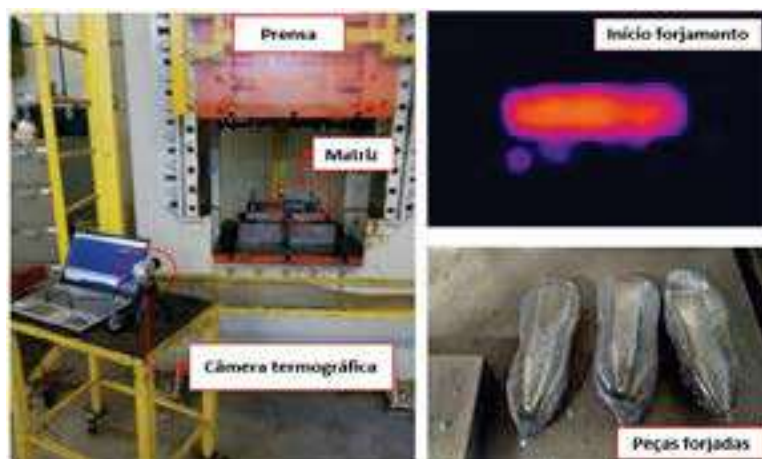
A impressão de material iniciou-se na periferia e, finalizou no centro da peça, conforme Fig. 2a. Nas Fig. 2b, 2c e 2d, podemos observar o formato da pré-forma.



**Figura 2:** Pré-forma impressa (a e b), camadas depositadas (c e d).

A etapa de conformação mecânica foi conduzida em uma prensa hidráulica,

modelo fabricado pela empresa FKL – Máquinas Hidráulicas, aplicando-se uma carga de 100 toneladas sobre o molde disponibilizado pela UNISATC, conforme mostrado na Fig. 3. Antes do início do forjamento, as amostras passaram por um aquecimento prévio até atingir 850 °C. Durante a operação, monitoraram-se continuamente as temperaturas tanto da peça quanto da matriz, possibilitando o registro em tempo real das variações térmicas e a coleta de informações mecânicas relevantes para a análise do comportamento do material ao longo do processo de conformação.



**Figura 3:** Forjamento a quente das pré-forma fabricadas em MA

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina universal INSTRON®, modelo 8801, apresentada na Fig. 4, e seguiram as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT ISO 6892:2024, com a execução dos testes a 850 °C ( $\pm 5$  °C) e tempo de encharque de 10 minutos. As amostras foram avaliadas em três orientações diferentes (0°, 45° e 90°), aplicando-se a carga com velocidade controlada de 5 mm/min.



**Figura 4:** Máquina de ensaio de tração a temperaturas elevadas

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise Química

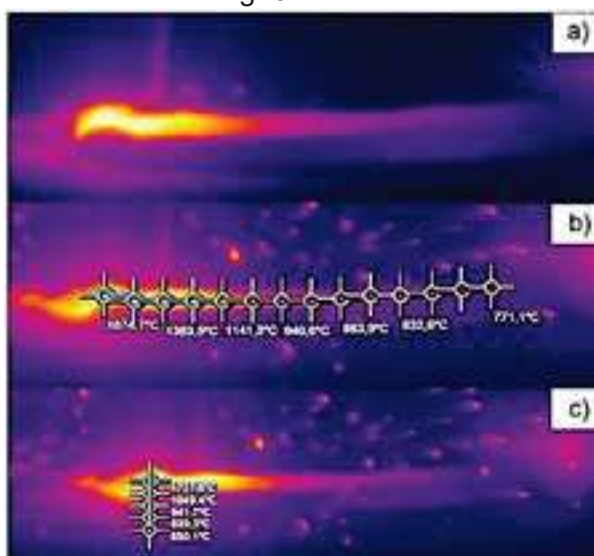
Após a fabricação das pré-formas pelo processo de manufatura aditiva (MA), uma amostra foi selecionada para análise por espectrometria de emissão óptica. Essa técnica possibilitou determinar a composição química do material em diferentes camadas depositadas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tab. 1, juntamente com os valores de referência disponibilizados pelo fabricante.

**Table 1:** Composição química do material estudado e indicado pelo fabricante.

Material	C	Mg	Si	Cr	Mo	Mn	Ni
DIN 8555 E6-UM-60	0,60		0,60	6,80	0,50	0,70	
Amostra	0.562	1.084	0,966	5.714	0,597		0,047

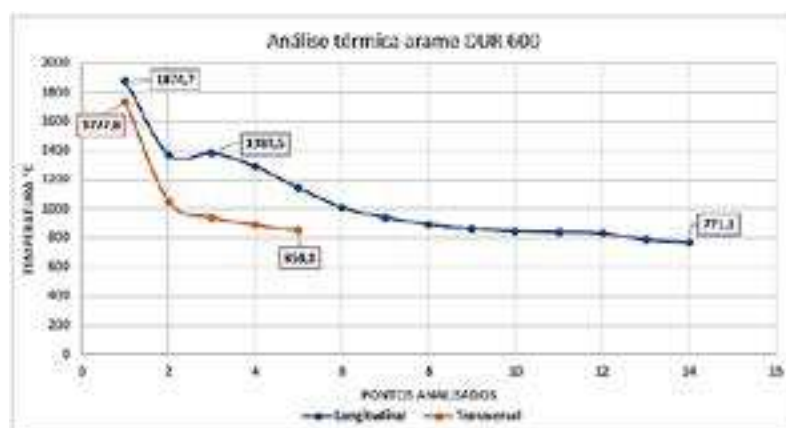
### 3.2 Análise Térmica

O monitoramento térmico no processo de forjamento foi conduzido nas direções longitudinal, oblíqua e transversal das amostras. Os valores de temperatura registrados nas pré-formas produzidas por manufatura aditiva, assim como os pontos específicos de medição, estão apresentados a seguir. A média de temperatura obtida foi de 766 °C, conforme ilustrado na Fig. 5.



**Figura 5:** Análise termográfica da pré-forma

No decorrer da manufatura aditiva, foi realizada a análise térmica durante a deposição sucessiva das camadas. Para esse monitoramento, foram estabelecidos 14 pontos distribuídos ao longo da direção longitudinal, com espaçamento de 10 mm entre eles, e outros 5 pontos na direção transversal, separados por intervalos de 5 mm. A Fig. 6 apresenta as curvas características obtidas em cada ponto, evidenciando a variação de temperatura ao longo da formação dos cordões de solda que compõem a pré-forma.



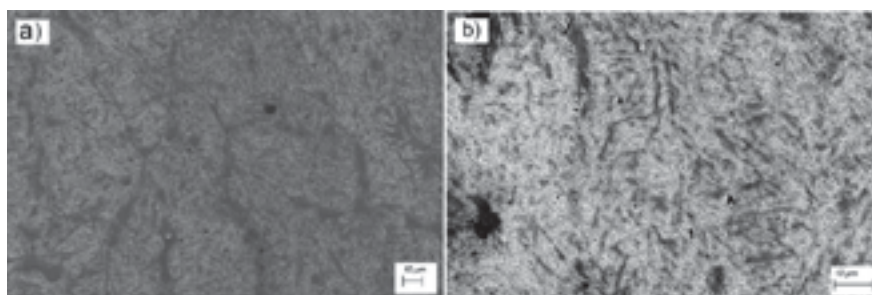
**Figura 6:** Temperaturas na deposição – Longitudinal x transversal

O arame de solda UTP DUR 600, empregado na fabricação aditiva da pré-forma, apresentou um perfil térmico característico ao longo da deposição das camadas. Verificou-se que, na direção transversal, a variação de temperatura foi mais intensa, acompanhada por um resfriamento acelerado. Esse comportamento está relacionado à maior exposição das extremidades do cordão de solda à atmosfera, favorecendo a dissipação de calor. Já na direção longitudinal, a queda de temperatura ocorreu de

maneira mais lenta, uma vez que a maior distância entre o centro do cordão e o meio externo reduziu a taxa de troca térmica. Esses resultados destacam a influência da geometria e da orientação do cordão de solda na distribuição de calor durante o processo.

### 3.3 Análise por MEV

A análise por MEV, mostrada na Fig. 7, revela uma superfície irregular, com grãos pouco deformados e regiões de concentração elementar localizada. Esse padrão está associado ao método de deposição, no qual o material atinge a fase austenítica antes de passar por um resfriamento controlado, resultando em uma microestrutura com variação no tamanho dos grãos. Conforme estudos recentes, incluindo Chen *et al.* (2023) [9] e Albannai e León-Henao, esse processo de aquecimento e resfriamento gradual, somado aos ciclos térmicos das camadas posteriores, promove um efeito de recozimento que favorece o crescimento dos grãos.

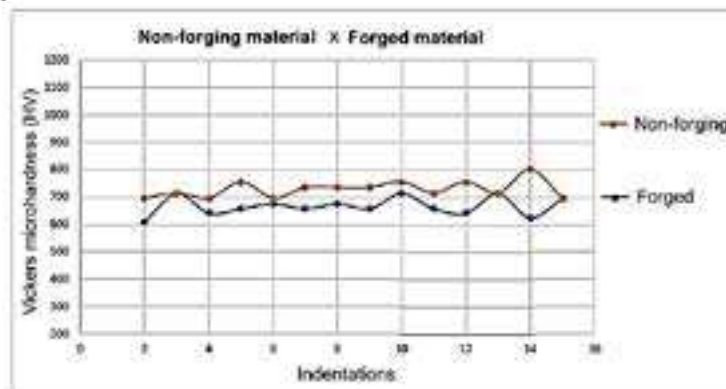


**Figura 7:** Análise por MEV antes (a) e depois do forjamento (b)

Foram identificadas trincas no material, relacionadas à presença de elementos de liga no arame, em especial o cromo, cuja concentração foi de 5,714% em peso, conforme determinado pela análise de espectrometria. Tais discontinuidades funcionam como mecanismos de alívio das tensões geradas no material durante o processo de soldagem.

### 3.4 Análise de Microdureza

A Fig. 8 mostra os resultados da análise de microdureza das pré-formas produzidas por manufatura aditiva, antes do forjamento, e das peças após a realização do processo de forjamento. Esses dados permitem caracterizar o comportamento do material ao longo do processo híbrido que combina manufatura aditiva e forjamento.



**Figura 8:** Microdureza Material forjado vs manufatura aditiva.

As amostras obtidas antes do forjamento apresentaram valores de dureza mais

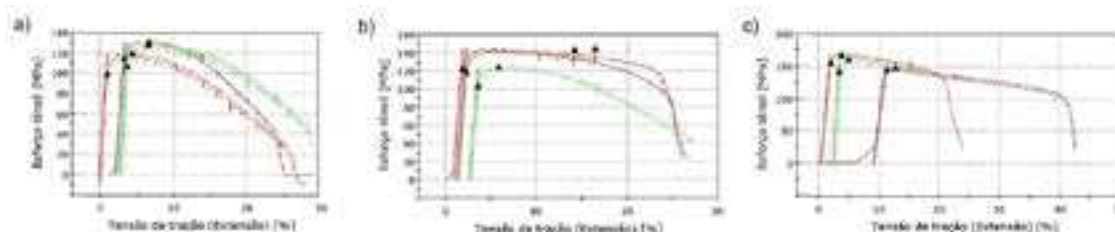
elevados, atribuídos à presença de elementos de liga e ao intenso aporte térmico típico do processo de manufatura aditiva. Durante a deposição, não foram observadas fissuras características da impressão 3D. Com a aplicação do forjamento, a microestrutura evoluiu para uma configuração martensítica clássica, explicando a manutenção de alta dureza.

No processo de manufatura aditiva isolado, a dureza média registrada foi de 729 HV, com desvio padrão de 31 HV. Já no processo híbrido, que integra manufatura aditiva e forjamento, a dureza média foi menor, alcançando 668 HV, com desvio padrão de 33 HV.

### 3.5 Ensaio de tração a quente

Os ensaios de tração revelaram uma tensão média de 127 MPa para os corpos de prova avaliados na orientação de 0° (Fig. 10a). Na direção de 45°, a tensão média foi de 138 MPa (Fig. 10b), enquanto na orientação de 90° foi registrada a maior resistência, com média de 160 MPa (Fig. 10c).

Quanto à deformação, a direção de impressão mostrou pouca influência, apresentando valores semelhantes nas três orientações, conforme evidenciado na Fig. 9.



**Figura 9:** Curvas de tensão x deformação

Com base nos resultados do ensaio, verificou-se que os corpos de prova impressos na direção de 0° apresentaram o melhor desempenho mecânico, combinando elevada resistência à tração com boa ductilidade. Na orientação de 45°, o comportamento foi intermediário, com resistência reduzida, indicando uma anisotropia moderada no material. Por sua vez, na direção de 90°, apesar da maior resistência à tração, o material apresentou comportamento mais frágil, com falhas súbitas observadas em alguns casos.

## 4. CONCLUSÕES

- A análise da amostra submetida ao forjamento demonstrou uniformidade microestrutural, com distribuição controlada de perlita.
- O processo de forjamento mostrou eficácia na mitigação de imperfeições como poros, trincas e segregações originárias da impressão 3D, além de promover um refinamento da matriz metálica.
- Observou-se redução nos valores de dureza no material processado, atribuível à formação de martensita e à redistribuição dos carbonetos de cromo e molibdênio.
- Detectaram-se traços residuais de fósforo e enxofre, cujas inclusões, mesmo em quantidades reduzidas, podem influenciar propriedades mecânicas como tenacidade conforme o uso final do componente.

- Os testes mecânicos em condições térmicas elevadas evidenciaram variação nas propriedades conforme a orientação de fabricação aditiva, indicando anisotropia.
- Este estudo configura uma primeira abordagem investigativa, sendo sugeridas pesquisas complementares para avaliar diferentes parâmetros térmicos e suas combinações.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS pelo apoio através do acesso a rede de pesquisadores, e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.

### REFERÊNCIAS

- [1] CODAMA, H., 'Usinagem Brasil'. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/13122-um-pouco-da-história-da-manufatura-aditiva/pa-5/>> Acesso em: 14 agosto 2023.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] JACOB, Pedro. Manufatura aditiva de metal, um novo passo para o mercado. LWT sistemas, 2019. Disponível em: <<https://www.lwtsistemas.com.br/2019/08/28/manufatura-aditiva-de-metal>>. Acesso em: 10 jul. 2023
- [5] DOUGLAS, R.; KUHLMANN, D. Guidelines for precision hot forging with applications. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v.98, p.182-188, 2000.
- [6] TABERNERO, Iván; PASKUALA, Amagoia; ÁLVAREZB, Pedro; SUÁREZCB, Alfredo. Study on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturin. CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machinin. Spain.V.68, p.358-362, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117310363>>. Acesso em: 13 jul. 2023.
- [7] ALTAN, T.; NGAILE, G.; SHEN, G. Cold and hot Forging: Fundamentals and Applications. ASM International. Ohio. 2005.
- [8] GROOVER, M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. John Wiley & Sons. 2010SCHÄFER, D.; HIRT, G. Phenomenological microstructure simulation of incremental bulk metal forming using a multi mesh method. Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes – Numiform 2010. Korea, 2010.
- [9] Chen, Y., Hao, Z., Li, Y., Liu, C., Liu, Y., Luo, Z., & Ao, S. (2023). Enhancing Mechanical Properties: Exploring the Effect of Annealing Temperature on Wire Arc Additively Manufactured High-Strength Steel. *Materials*, 16(21), 6969