



ANÁLISE DE FORJAMENTO REALIZADO EM UMA BIELA DE ALUMÍNIO

Ruan Venancio Martins ¹
Leticia da Rocha Silvano ²
Natan Damian Crozetta ³
Pedro Henrique Menegaro Possamai ⁴
Alexandre Milanez ⁵
Anderson Daleffe ⁶
Henrique Cechinel Casagrande ⁷
Joélson Vieira da Silva ⁸

Resumo: atualmente, o alumínio tem ganhado destaque em aplicações industriais devido à sua leveza e boa relação entre resistência e peso. A biela de alumínio, utilizada em diversos sistemas mecânicos, pode ter suas propriedades mecânicas otimizadas por meio de processos de forjamento, especialmente a quente. Esses processos visam melhorar as características microestruturais e a resistência mecânica da peça, adequando-a às exigências das aplicações. O presente estudo teve como objetivo analisar o processo de forjamento a quente em uma biela de alumínio, realizado durante uma aula prática. Para isso, foram conduzidos ensaios de forjamento a frio e a quente, sendo o foco principal no forjamento a quente. Após o processo, a biela foi submetida a uma análise das propriedades mecânicas e estruturais. Os resultados evidenciaram que o forjamento a quente promoveu melhorias significativas na resistência e na microestrutura da biela, destacando as vantagens desse método em comparação a outros processos.

Palavras-chave: Forjamento; Alumínio; Biela.

1 INTRODUÇÃO

O forjamento é um dos processos de conformação mais eficientes na fabricação de componentes metálicos, oferecendo benefícios como maior resistência mecânica, melhor integridade estrutural e redução de falhas internas. Ao refinar a estrutura granular do material, melhora suas propriedades físicas, tornando as peças mais duráveis e confiáveis. Além disso, esse método permite a produção de componentes com geometrias complexas e precisão dimensional, reduzindo desperdícios de material e otimizando os custos de fabricação [1, 2]. A indústria metal mecânica evolui a cada dia e se torna mais competitiva no mercado de trabalho que exige ao extremo produtos de qualidade, custo competitivo e sustentabilidade [3].

Os produtos forjados à base de liga de alumínio têm sido amplamente utilizados na aviação, aeroespacial, automotivo, armas, fabricação de máquinas, navios, indústria de bicicletas e outros campos devido à sua baixa densidade, alta resistência. Conhecimentos notáveis desse processo de fabricação foram estudados, como as qualidades mecânicas superiores que podem ser alcançadas porque os grãos podem ser consideravelmente refinados e linhas de fluxo de metal contínuas podem ser criadas durante o processo de forjamento a quente, mas em produtos de geometria complexa, as condições do processo e o fluxo de metal devem ser ajustados para linhas de fluxo e microestruturas ideais. No entanto, devido às características de deformação da liga de alumínio, como região estreita de temperatura forjável, rápida dissipação de calor para matrizes, forte adesão, alta sensibilidade à taxa de deformação e grande resistência ao fluxo, os macros e micro defeitos, como enchimento insuficiente, dobra, linha de fluxo quebrada, rachadura, grão grosso e outros são facilmente gerados durante o forjamento [4].

Foi realizada uma análise do processo de forjamento a quente de uma biela em alumínio, especialmente das regiões onde ocorrem acúmulos de tensões e efetuado cálculos de perdas de materiais pelo excesso de materiais retirados nas rebarbas, resultadas nas operações de forjamento de precisão em matrizes fechadas. Um forjamento deste tipo é usado como elemento-chave de um motor e é por isso que é necessário exibir qualidades de alto desempenho, que estão principalmente relacionadas ao fluxo adequado do material forjado durante a conformação, falta de defeitos superficiais ou internos e alta qualidade e precisão de forma dimensional [5].

Peças de formas complexas ou de precisão não podem ser obtidas por técnicas de forjamento livre, exigindo matrizes especialmente preparadas que contenham o negativo (ou contorno) da peça a ser produzida. Tais matrizes são caras, exigindo na maioria das vezes, alta produção para justificar seu custo. A obtenção de um formato complexo normalmente não é possível com uma única etapa de trabalho, exigindo uma ou mais etapas de pré-forjamento. As etapas de pré-forjamento podem ser efetuadas com o auxílio de superfícies especialmente usinadas no próprio bloco das matrizes, ou em equipamento separado, ou mesmo por meio de outros processos como a laminção. Diante da dificuldade para se distribuir precisamente o material nas etapas de operações unitárias, utiliza-se na maioria dos casos um certo excesso de material, que já na etapa de forjamento se permite escapar por entre as duas

matrizes, formando uma rebarba que por vezes é removida (cortada) no forjamento final nas matrizes de acabamento [6].

Os ensaios para caracterização de amostras são fundamentais para avaliar suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, garantindo a adequação aos requisitos de projeto e aplicação. No caso de amostras metálicas, esses ensaios permitem identificar a composição química, microestrutura, resistência mecânica, dureza, tenacidade e outras características essenciais para o desempenho em diferentes condições operacionais [7, 8].

O objetivo deste trabalho é realizar o forjamento da liga de alumínio, analisando detalhadamente os dados do processo. Serão avaliados aspectos como o material residual, a comparação da massa antes e após o forjamento, o preenchimento da matriz, a dureza obtida no material e eventuais dificuldades enfrentadas durante a execução do processo, com o intuito de identificar oportunidades de melhoria e compreender as particularidades do comportamento da liga no forjamento. O forjamento foi feito em uma etapa, a partir de um tarugo com diâmetro de 25mm e comprimento de 100 mm e aquecido a uma temperatura 550 °C.

2 MATERIAIS E METODOS

Para realização do estudo utilizou-se uma liga de alumínio com silício (liga do tipo Al-Si), conforme observa-se na tabela 1.

Tabela 01 – Dados de espectrometria

| Elemento | Teor em massa (%) |
|----------|--------------------|
| Si | 1,643 |
| Fe | 0,162 |
| Cu | 0,013 |
| Mn | 0,398 |
| Mg | 0,350 |
| Ti | 0,015 |
| Pb | 0,191 |
| Al | Sobra para balanço |

Fonte: Do autor (2025)

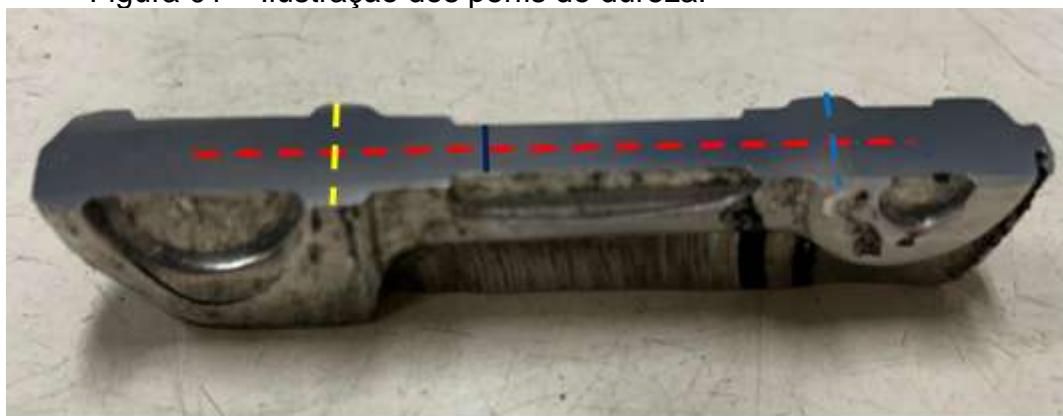
Considerando a predominância do alumínio (97%), essa liga pode ser uma variação do Al-Si (liga de alumínio e silício), com pequenas quantidades de outros elementos para otimizar as propriedades desejadas. A presença do manganês

também sugere que ela pode ser usada em aplicações que exigem resistência adicional a fatores mecânicos e ambientais. O silício (Si) em quantidades dessa magnitude é frequentemente adicionado para melhorar a fluidez durante a fundição e aumentar a resistência à abrasão. O ferro (Fe) e o manganês (Mn) são normalmente aditivos usados para melhorar as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão da liga.

2.2 DUREZA

Dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito está relacionado à resistência que um material apresenta ao risco ou à deformação permanente quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados. A dureza Vickers (HV), método escolhido para o ensaio, utiliza um único tipo de penetrador que consiste em uma pirâmide regular de diamante com base quadrada e ângulo entre as faces opostas iguais a 136°. O valor da HV é determinado pela razão entre a carga aplicada (kgf) e a área superficial da impressão (mm²). Análise foi realizada com o equipamento SHIMADZU HMV-G e software HMV-G. Sendo efetuadas medições para obter perfil de dureza das áreas analisadas, para o estudo foram elaborados 4 perfis de dureza, conforme ilustrados na Fig. 01, com o intuito de analisar possíveis áreas de encruamento resultantes da conformação.

Figura 01 – Ilustração dos perfis de dureza.



Fonte: Do autor (2025)

2.3 METALOGRAFIA

Com o objetivo de garantir que as propriedades dos corpos de prova estivessem em conformidade, foram conduzidos ensaios metalográficos para

complemento dos ensaios de dureza. A análise de microestrutura e caracterização de metais e ligas foi realizada através da técnica de Microscopia Óptica, utilizando um microscópio Olympus BX51M. A preparação das amostras seguiu os procedimentos estabelecidos na norma ASTM E3-11, e ataque químico com reagente de Keller.

3 ANÁLISE DOS DADOS

As amostras após seus devidos preparos foram testadas quanto à resistência dureza. Para o ensaio de dureza Vickers foi utilizado uma carga de 4,903 N. Como é possível perceber na tabela 2, que mostra o perfil de dureza da biela de furo a furo, conforme ilustrado na Fig. 1.

Tabela 02 – Dados de dureza.

| No. | Posição (mm) | Dureza (HV) |
|-----|--------------|-------------|
| 1 | 2.5 | 54.2 |
| 2 | 5 | 58.3 |
| 3 | 7.5 | 56.5 |
| 4 | 10 | 59.0 |
| 5 | 12.5 | 54.9 |
| 6 | 15 | 60.8 |
| 7 | 17.5 | 56.9 |
| 8 | 20 | 55.2 |
| 9 | 22.5 | 57.6 |
| 10 | 25 | 57.9 |
| 11 | 27.5 | 56.5 |
| 12 | 30 | 53.6 |
| 13 | 32.5 | 56.5 |
| 14 | 35 | 55.5 |
| 15 | 37.5 | 54.6 |
| 16 | 40 | 63.1 |
| 17 | 42.5 | 58.3 |
| 18 | 45 | 59.3 |
| 19 | 47.5 | 60.4 |
| 20 | 50 | 57.6 |
| 21 | 52.5 | 57.9 |
| 22 | 55 | 57.9 |
| 23 | 57.5 | 57.6 |
| 24 | 60 | 58.3 |
| 25 | 62.5 | 58.3 |
| 26 | 65 | 57.6 |
| 27 | 67.5 | 56.9 |
| 28 | 70 | 55.9 |
| 29 | 72.5 | 54.9 |

| | | |
|-----------|------|------|
| 30 | 75 | 55.5 |
| 31 | 77.5 | 55.9 |
| 32 | 80 | 56.2 |
| 33 | 82.5 | 55.5 |

Fonte: Do autor (2025)

As tabelas 03, 04 e 05, apresentam perfis de dureza transversal da base, do corpo e da cabeça da biela, respectivamente.

Tabela 03 – Dados de dureza da base da biela.

| No. | Posição (mm) | Dureza (HV) |
|-----|--------------|-------------|
| 1 | 0.5 | 59.7 |
| 2 | 1 | 55.2 |
| 3 | 1.5 | 53.0 |
| 4 | 2 | 53.6 |
| 5 | 3 | 53.3 |
| 6 | 4 | 54.2 |
| 7 | 5 | 54.9 |
| 8 | 6 | 56.2 |
| 9 | 7 | 54.2 |
| 10 | 8 | 53.0 |
| 11 | 9 | 53.0 |
| 12 | 10 | 53.0 |
| 13 | 11 | 53.6 |
| 14 | 12 | 56.2 |
| 15 | 12.5 | 59.7 |
| 16 | 13 | 56.9 |
| 17 | 13.5 | 59.3 |

Fonte: Do autor (2025)

Tabela 04 – Dados de dureza do corpo da biela.

| No. | Posição (mm) | Dureza (HV) |
|-----|--------------|-------------|
| 1 | 1 | 58.6 |
| 2 | 2 | 54.6 |
| 3 | 3 | 57.2 |
| 4 | 4 | 56.9 |
| 5 | 5 | 55.9 |
| 6 | 6 | 59.3 |

Fonte: Do autor (2025)

Tabela 05 – Dados de dureza da cabeça da biela.

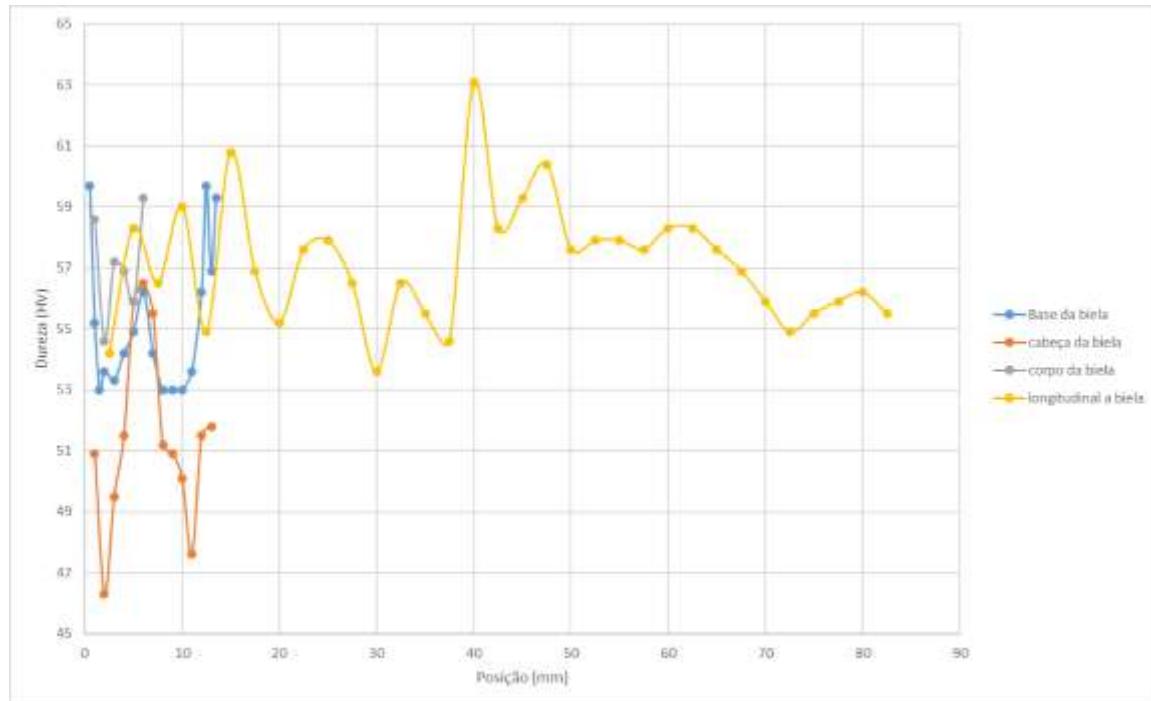
| No. | Posição (mm) | Dureza (HV) |
|-----|--------------|-------------|
| 1 | 1 | 50.9 |
| 2 | 2 | 46.3 |
| 3 | 3 | 49.5 |

| | | |
|----|----|------|
| 4 | 4 | 51.5 |
| 5 | 5 | 55.9 |
| 6 | 6 | 56.5 |
| 7 | 7 | 55.5 |
| 8 | 8 | 51.2 |
| 9 | 9 | 50.9 |
| 10 | 10 | 50.1 |
| 11 | 11 | 47.6 |
| 12 | 12 | 51.5 |
| 13 | 13 | 51.8 |

Fonte: Do autor (2025)

Observando as tabelas 02, 03, 04 e 05 que originam o gráfico 01, observasse que a biela apresenta pouca variação de dureza, não destacando regiões com encruamento referente ao processo.

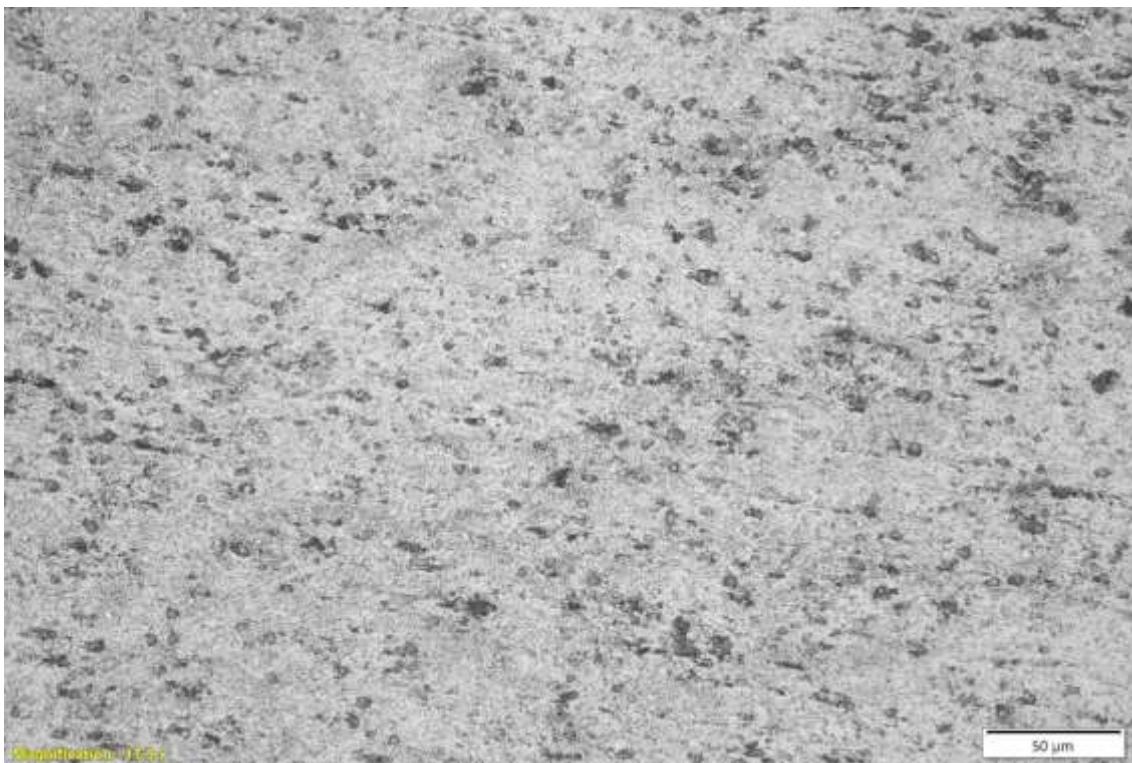
Gráfico 01 – Perfis de dureza da biela.



Fonte: Do autor (2025)

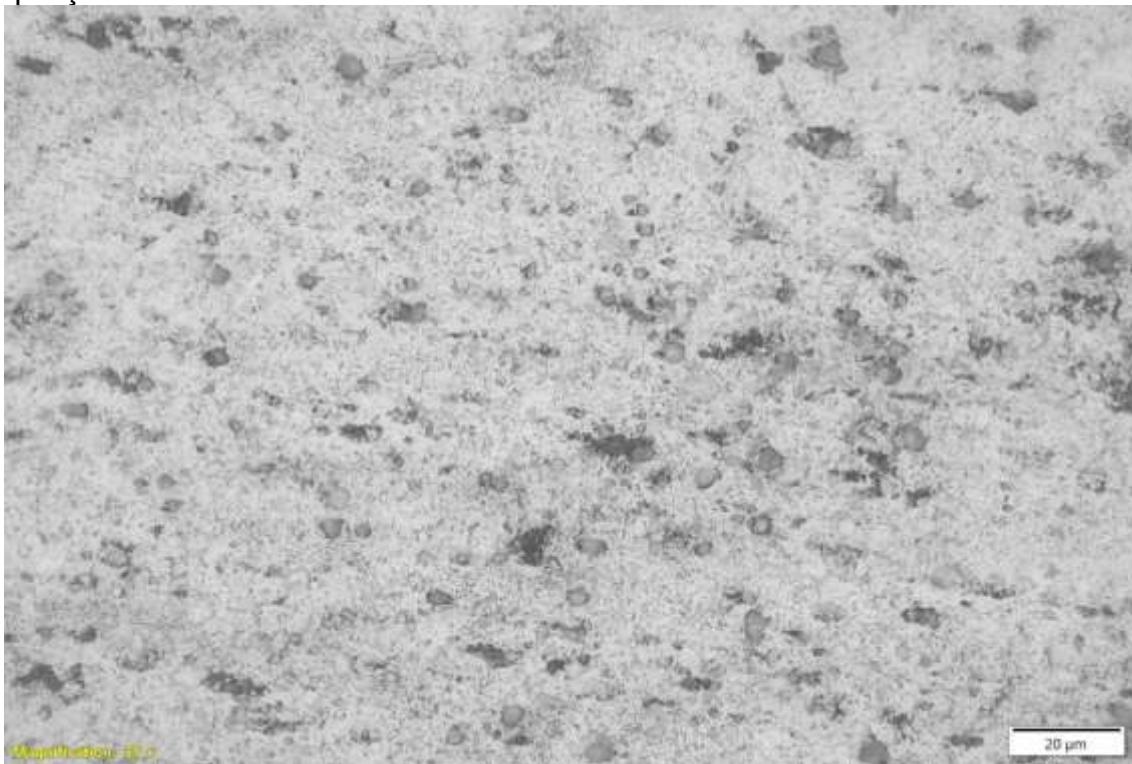
A metalografia do alumínio é uma técnica utilizada para estudar a microestrutura desse metal e suas ligas, com o objetivo de compreender suas propriedades mecânicas, térmicas e químicas.

Figura 02 – Metalografia da biela de alumínio após conformação, com ampliação de 500x.



Fonte: Dos autores (2025)

Figura 03 – Metalografia da biela de alumínio após conformação, com ampliação de 1000x.



Fonte: Dos autores (2025)

Analizando as figuras 02 e 03 que apresentam a metalografia da biela de alumínio após a conformação, elas apresentam no processo inicial de forjamento a

quente, a recristalização inicial ocorre no material do tarugo sob as matrizes e, em seguida, se propaga diretamente para o material interno. Com base nos resultados e a alta deformação, a tensão residual mais compressiva e a área de superfície de contato próximo, de modo que essa área experimentou uma fração maior de recristalização. Esta condição de microestrutura indica um aumento da resistência à tração do material.

As peças após o forjamento e dado o acabamento, conforme mostradas nas Fig. 04 e 05, respectivamente, foram pesadas e analisadas em relação a suas perdas.

Figura 04 – Imagem da biela forjada sem a retirada da rebarba.



Fonte: Dos autores (2025)

Figura 05 – Imagem da biela forjada com a retirada da rebarba.



Fonte: Dos autores (2025)

Depois de realizado o forjamento e dado acabamento, verificamos um alto nível de sobra de rebarbas. Para este forjamento foi utilizado um material bruto com peso total de 158 gramas, que após o acabamento resultou em uma biela de 61 gramas. Sendo descartado aproximadamente 61% de material.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo convencional de forjamento a quente para montagem de bielas empregando um tarugo de barra redonda é estudado, uma vez que os defeitos foram encontrados no produto pós-forjado. Por meio de um processo de análise envolvendo design de pré-formas e utilização de materiais, o processo de forjamento a quente apropriado que produz um produto pós-forjado que pode atender aos padrões de qualidade esperados é alcançado com sucesso. As principais conclusões deste estudo são destacadas a seguir:

Os resultados dos ensaios de dureza não apresentaram grande variações, não destacando regiões com encruamento, salvo a cabeça da biela onde ela apresentou uma variação maior de dureza.

O projeto de pré-formas é uma fase importante no desenvolvimento do processo de forjamento a quente. A forma ideal da pré-forma deve garantir o preenchimento completo da matriz com pouca rebarba e baixa carga de conformação, minimizando os defeitos de fluxo.

O objetivo de o pré-forjamento é redistribuir o metal para posições mais adequadas ao forjamento subsequente. A pré-forma assim obtida pode ser conformada para uma configuração mais próxima da final em uma matriz de esboço, que assegura uma distribuição adequada de metal, mas ainda não na forma final.

As microestruturas foram examinadas nas duas áreas com alto valor de eficiência de dissipação de energia, que indicam alta fração de recristalização e uma tensão efetiva de alto valor, mas de tipo diferente (uma é compressiva e a outra é de alta tensão de cisalhamento).

REFERÊNCIAS

- [1] Ferreira, C. A., Schaeffer, L., Daleffe, A., Castelan, J., Casagrande, H. C., De March, G. Processo de fabricação híbrida M.A. e forjamento a quente: confecção de

pré-forma através da deposição de materiais por fusão localizada utilizando arame UTP AF DUR 600. Rev. De Gestão Social e Ambiental, Miami, vol. 19, n. 5, p. 1-13, 2025.

[2] Hawryluk, M., Lachowicz, M., Zwierzchowski, M., Janik, M., Gronostajski, Z., Filipiak, J. Influence of the grade of hot work tool steels and its microstructural features on the durability of punches used in the closed die precision forging of valve forgings made of nickel-chrome steel. Rev. Wear, vol. 528-529, 2023.

[3] Bonifacio, D. C., Milanez, A., Daleffe, A., Possamai, P. H. M., Casagrande, H. C., De March, G. Determinação de lote mínimo para viabilização de uma célula para soldagem robotizada em uma indústria de implementos agrícolas. Rev. Vincci, vol. 9, n. 2, p. 205-225, 2024.

[4] Fuh, Y., Shih, J., Saputro, I. E., Chen, C., Huang, C., Ku, H., Chan, C. Preform design with increased materials utilization and processing map analysis for aluminum hot forging process. Journal of manufacturing processes, vol. 90, p. 14-27, 2023.

[5] Yamakami, W. J., Button, S. Forjamento a quente de precisão: uma proposta para flexibilização. 1º congresso brasileiro de engenharia de fabricação, COBEF, 2001.

[6] Forjamento em Matriz - 2025. Disponível em: <www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6494>

[7] Possamai, P. H. M., Daleffe, A., Casagrande, H. C., Ferreira, C. A., Schaeffer, L., Bilessimo, L. D. Estudo do processo de manufatura aditiva por fusão localizada para ligas E71T-1 E ER70S-6. Rev. De Gestão Social e Ambiental, Miami, vol. 19, n. 7, p. 1-14, 2025.

[8] Casagrande, H. C., Daleffe, A., Martins, H., De March, G., Milanez, A., Possamai, P. H. M., Langbehn, J. T. Caracterização microestrutural e de micro dureza para o arame tubular UTP AF LEDURIT 60 impressos através da técnica de manufatura aditiva por arco elétrico. Rev. Vincci, vol. 9, n. 2, p. 622-638, 2024.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Centro Universitário - UNISATC pelo apoio à pesquisa por meio do uso de suas instalações laboratoriais e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina - FAPESC pelo apoio financeiro para a compra de equipamentos e suprimentos de pesquisa.