



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPPE KAIQUE G. SILVA
LUAN XAVIER DA SILVA NASCIMENTO

**TRANSFORMANDO RESÍDUOS EM ENGENHARIA: SUSTENTABILIDADE E
INOVAÇÃO EM COMPONENTES MECÂNICOS**

TUCURUÍ-PA
2026

FELIPPE KAIQUE G. SILVA
LUAN XAVIER DA SILVA NASCIMENTO

**TRANSFORMANDO RESÍDUOS EM ENGENHARIA: SUSTENTABILIDADE E
INOVAÇÃO EM COMPONENTES MECÂNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva.

TUCURUÍ-PA
2026

FELIPPE KAIQUE G. SILVA
LUAN XAVIER DA SILVA NASCIMENTO

**TRANSFORMANDO RESÍDUOS EM ENGENHARIA: SUSTENTABILIDADE E
INOVAÇÃO EM COMPONENTES MECÂNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará.

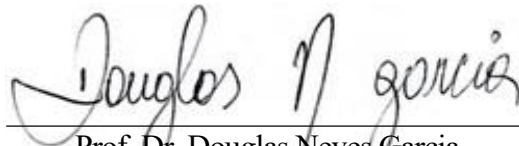
Orientador: Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva.

Data de aprovação: 11/02/2026

Conceito: EXCELENTE

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva
FEM/CAMTUC/UFPA



Prof. Dr. Douglas Neves Garcia
FEM/CAMTUC/UFPA

Eng. Me. Arthur dos Reis Lemos Fontana
PRODERNA/UFPA

RESUMO

O presente artigo analisa a viabilidade do uso de alumínio reciclado proveniente de latinhas na fabricação de componentes mecânicos, com foco no trem de pouso fixo para aeromodelos da competição SAE Brasil AeroDesign. A metodologia envolveu processos de fundição, usinagem, ensaio de tração, análise metalográfica e simulação computacional por elementos finitos. Os resultados mostraram que o alumínio reciclado apresenta propriedades mecânicas adequadas para aplicações estruturais leves, apesar da presença de porosidade e heterogeneidade microestrutural. Considerando os materiais trabalhados neste estudo, latas de bebidas AA3104 ou AA3004, para lata, e a 5182 para a mistura desse material com liga de roda automotiva A356. Com isso, observou-se que a condição que foi misturada apresentou microestrutura mais refinada e melhor ductilidade. A simulação estrutural permitiu identificar regiões críticas de tensão, confirmando a viabilidade do material quando adotados fatores de segurança adequados. Conclui-se que a reciclagem de alumínio é uma alternativa sustentável e tecnicamente aplicável em projetos aeronáuticos de pequeno porte.

Palavras-chave: Fundição de ligas de Al; Reciclagem; Aeronave rádio controlada; Trem de pouso; AeroDesign; Análise estrutural.

ABSTRACT

The present article analyzes the feasibility of using recycled aluminum from beverage cans in the manufacturing of mechanical components, with a focus on the fixed landing gear for model aircraft in the SAE Brazil AeroDesign competition. The methodology involved casting processes, machining, tensile testing, metallographic analysis, and finite element computational simulation. The results showed that the recycled aluminum exhibits mechanical properties suitable for light structural applications, despite the presence of porosity and microstructural heterogeneity. Considering the materials used in this study—AA3104 or AA3004 beverage cans for the can body, and AA5182 for the lid—mixed with the A356 automotive wheel alloy, it was observed that the mixed condition presented a more refined microstructure and better ductility. Structural simulation allowed the identification of critical stress regions, confirming the feasibility of the material when appropriate safety factors are applied. It is concluded that aluminum recycling is a sustainable and technically viable alternative for small-scale aeronautical projects.

Keywords: Aluminum alloy casting; Recycling; Radio-controlled aircraft; Landing gear; AeroDesign; Structural analysis.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 METODOLOGIA	8
2.1 Fundição	8
2.2 Usinagem	9
2.3 Metalografia e Microscopia Óptica	10
2.4 Ensaio de Tração	11
2.5 Simulação Computacional	12
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
3.1 Análise microestrutural	13
3.2 Ensaio de Tração	16
3.3 Determinação da Geometria do Trem de Pouso	17
3.4 Simulação Computacional	18
4 CONCLUSÃO	22
REFERÊNCIAS	24

1 INTRODUÇÃO

Desde o princípio da humanidade, o ser humano vem buscando maneiras eficientes de aproveitamento eficaz de materiais que atendem da melhor forma os seus interesses, necessidades e objetivos. Com o passar do tempo, essa busca se refletiu no aprimoramento de técnicas, tecnologias e processos que não apenas otimizam o uso de recursos naturais, mas também promovem a sustentabilidade e inovação. Isso levou ao desenvolvimento de sistemas complexos de produção, como a engenharia, que visam não só à maximização da produção, mas também à minimização de desperdícios e à criação de soluções que atendem às demandas do presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras.

Deste modo, um exemplo claro dessa busca por eficiência e inovação é o desenvolvimento na aviação, no qual, o avião é uma aeronave de asa fixa, mais pesada que o ar, propulsada por um mecanismo mecânico, que se mantém em voo graças à interação dinâmica do ar ao passar pelas suas asas. São projetados para uma grande variedade de propostas, porém todos possuem os mesmos componentes principais, dentre eles está o trem de pouso (BERTIN, 2014). Que é responsável por suportar o peso estático da aeronave e resistir a operação de pouso.

Há diversos tipos de trem de pouso, sendo os mais comuns o trem de pouso fixo, o trem de pouso retrátil e o trem de pouso com rodas duplas. O trem de pouso fixo é utilizado em aeronaves menores e mais leves, sendo mais simples e econômico, porém com maior resistência ao arrasto. Já o trem de pouso retrátil, presente em aeronaves de maior porte e desempenho, permite que as rodas sejam recolhidas durante o voo, reduzindo o arrasto e melhorando a aerodinâmica (ANDERSON, 2007). Por fim, o trem de pouso com rodas duplas é utilizado em aeronaves pesadas e de grande porte, garantindo maior distribuição de carga e maior estabilidade durante o pouso e decolagem.

Estes diferentes tipos de trem de pouso, com suas características distintas de desempenho e aplicabilidade, estão diretamente ligados ao desenvolvimento de tecnologias avançadas na área de engenharia aeronáutica, como demonstrado na competição AeroDesign da SAE Brasil. Ao participar desse desafio, os estudantes têm a oportunidade de aplicar seus conhecimentos teóricos na prática, projetando aeromodelos que precisam considerar aspectos técnicos, como a escolha do tipo de trem de pouso adequado para cada aeromodelo.

A SAE Brasil (Sociedade de Engenheiros de Mobilidade), todos os anos reúne estudantes de todas as regiões do Brasil com a finalidade de desenvolver habilidades práticas e promover a troca de conhecimentos no campo da engenharia de mobilidade. Deste modo, a competição AeroDesign se destaca como uma das principais iniciativas, desafiando os

participantes a projetar e construir aeronaves que atendam a critérios rigorosos de desempenho, inovação e sustentabilidade, além de proporcionar uma experiência valiosa de aprendizado e integração entre os futuros engenheiros (SAE BRASIL, 2023).

Neste artigo, utilizaremos o trem de pouso fixo para aeromodelos, devido à sua simplicidade de construção, baixo custo e facilidade de manutenção. Além disso, o trem de pouso fixo oferece maior robustez para aeronaves de menor porte, características ideais para os projetos e testes realizados em modelos de AeroDesign, onde a praticidade e a resistência são aspectos essenciais para o sucesso da competição (ANDERSON, 2016, p. 312)). Será apresentado passo a passo para um dimensionado de um trem de pouso para modelos de aeronaves SAE Brasil.

Outrossim, será apresentado cada processo que ocorreu, desde a fundição das latinhas, usinagem, ensaio de tração, ensaio metalográfico e simulação em software do CAD do trem de pouso, com objetivo da fabricação do componente do aeromodelo. Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o processo de fundição de alumínio proveniente de latinhas e sua aplicação potencial em componentes estruturais, como trens de pouso para aeronaves rádio controladas

2 METODOLOGIA

2.1 Fundição

As latas de alumínio foram aquecidas até atingir o estado líquido, com monitoramento constante da temperatura para assegurar a homogeneidade do material, utilizando um forno de fundição aquecido com gás GLP (Gás liquefeito de petróleo) e carvão vegetal como fontes de energia térmica. Estudos comprovam que o alumínio de latas apresenta alta pureza química (99,7% Al) após reciclagem; entretanto, ocorre a formação de fases intermetálicas frágeis durante a solidificação (GAUSTAD *et al.*, 2012, p. 810). A escolha desses combustíveis foi baseada em sua disponibilidade local e eficiência no fornecimento de calor necessário para a fusão do alumínio.

O cadinho, com capacidade máxima de 5kg de material, foi posicionado no forno e aquecido gradualmente para garantir uma distribuição uniforme do calor. Segundo Gupta et al. (2019), o pré-tratamento (remoção de contaminantes) e o controle da fusão são etapas críticas na reciclagem de alumínio, variando em complexidade conforme diferentes fontes de sucata, como resíduos de embalagens e componentes automotivos. O gás foi utilizado como principal combustível devido ao seu alto poder calorífico e controle da temperatura, enquanto o carvão

de madeira foi empregado como complemento para manter a temperatura estável durante o processo de fusão. Essa combinação de combustíveis permitiu as condições para a fusão do alumínio, garantindo a completa fusão do material.

O alumínio líquido foi então despejado em formas cilíndricas de aço 1020 previamente preparadas, com diâmetro de 25,4 mm e comprimento de 210 mm, pois estas formas foram escolhidas para facilitar a produção de corpos de prova padronizados, que posteriormente foram submetidos a ensaios mecânicos e microestruturais.

O vazamento foi realizado em condições controladas, garantido a integridade dimensional a qualidade superficial dos corpos de prova. Para Gaustad *et al.* (2012), a classificação eficiente e a remoção de impurezas antes da fusão são etapas decisivas para garantir a qualidade do alumínio reciclado, especialmente em fluxos complexos, como sucatas de latinhas (contaminadas por orgânicos) e rodas automotivas (contaminadas por metais e resíduos).

2.2 Usinagem

O processo de usinagem foi realizado em um torno mecânico de marca WESS modelo CD6241x150 configurado para operar com um avanço de 1 mm e profundidade de corte de 0,5 a 1 mm durante as operações de corte. Essa faixa de avanço foi selecionada com base nas boas práticas de usinagem, visando garantir precisão dimensional e um acabamento superficial adequado aos corpos de prova cilíndricos fabricados.

Durante a usinagem, foi utilizado água como fluido de resfriamento para controlar a temperatura gerada pelo atrito entre a ferramenta de corte e o material. Segundo Liu *et al.* (2021), em comparação as ligas A356 e AA6061 apresenta maior facilidade de usinagem em processos de torneamento, graças à sua microestrutura homogênea e à ausência de inclusões grossas.

O resfriamento contínuo com água foi essencial para evitar o superaquecimento do alumínio, preservando suas propriedades mecânicas e microestruturais. Além disso, a água auxiliou na remoção eficiente de cavacos, contribuindo para um processo de usinagem mais segura e eficiente. Segundo Pereira *et al.* (2020) a usinagem do alumínio reciclado de latas exige ajustes específicos: altas velocidades de corte reduzem a adesão de material às ferramentas, enquanto técnicas de refrigeração avançadas, como MQL (*mínima quantidade de lubrificantes*), minimizam o desgaste causado por inclusões abrasivas (Fe, Mn).

Para Sreejith *et al.* (2019), ligas de alumínio-silício recicladas, como as de rodas automotivas, especialmente a liga A356, com teor de Si superior a 10%, causam desgaste

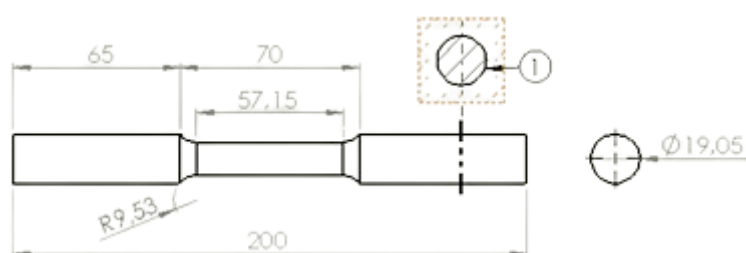
abrasivo acelerado em ferramentas de corte devido à presença de partículas de silício não homogêneas. Dessa forma, a ABNT NBR ISO 377:2020 estabelece critérios atualizados para seleção, preparação e inspeção de corpos de prova em ensaios mecânicos, assegurando a eliminação de trincas superficial, heterogeneidades microestruturais e defeitos dimensionais, garantindo assim curvas tensão-deformação confiáveis. Após a usinagem, a inspeção visual confirmou a conformidade das amostras com os requisitos de acabamento superficial prescritos pela norma.

2.3 Metalografia e Microscopia Óptica

Após a fabricação das peças e usinagem de acabamento, foram retiradas para análise microestrutural. Desse modo, o alumínio de lata (AA3104) mantém até 96% de suas propriedades mecânicas após reciclagem, sendo economicamente viável para reutilização em novas embalagens devido à baixa perda de qualidade durante o processo (ABREU; NEVES, 2022).

Para o ensaio de metalografia, as amostras fundidas foram seccionadas transversalmente utilizando a cortadora metalográfica, com refrigeração a fluxo contínuo de água para mitigar alterações térmicas indesejáveis. Logo após, o processo de corte dos corpos de prova, as amostras de alumínio reciclado foram submetidas a um rigoroso processo de preparação superficial para análise metalográfica, seguindo uma sequência padronizada de lixamento e polimento. As amostras foram submetidas ao lixamento com lixa d'água de 120, 180, 200, 400 e 600 mesh. Desse modo, o alumínio das latas de bebidas (AA3104) mantém até 96% de suas propriedades mecânicas após reciclagem, sendo economicamente viável para reutilização em novas embalagens devido à baixa perda de qualidade durante o processo (ABREU; NEVES, 2022). A figura 1 apresenta a geometria do corpo de prova.

Figura 1 – Detalhe 1, local de remoção do corpo de prova, dimensões em mm.



Fonte: Autoria própria.

O protocolo de polimento metalográfico empregou três panos distintos (tecido sintético de veludo, fibras não tecidas de poliéster e microfibras de nylon), cada um otimizado para uma etapa específica de refinamento superficial com pastas de diamante policristalino de granulometria decrescente: 9 μm , 3 μm e 1 μm , conforme ABNT NBR ISO 17781:2022 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022b).

Após o polimento as amostras foram submetidas a um processo de ataque químico seletivo, visando a revelação de contornos de grão, fases secundárias e defeitos microestruturais. Desse modo, os procedimentos para análise de micrografia de metais, descritos na ABNT NBR ISO 17781:2022, envolve protocolos sistemáticos de ataque químico e observação microscópica para a caracterização de microestruturas, garantindo a reprodutibilidade nos resultados (ABNT, 2022), com adaptações para mitigar a interferência de impurezas típicas de matérias-primas recicladas.

A solução de ataque foi formulada com 25% de ácido HNO_3 e 75% de água destilada, homogeneizada em béquer sob agitação constante com barra magnética. Para potencializar a cinética de reação, a temperatura foi elevada para $70 \pm 2^\circ\text{C}$, e esta foi medida usando o Termômetro Laser Digital Industrial Infravermelho. Em seguida, os corpos de prova foram imersos individualmente, com tempo de exposição de aproximadamente de 40 segundos. Em seguida, a interrupção da reação química foi realizada por lavagem com água destilada e logo após o corpo de prova foi secado.

2.4 Ensaio de Tração

Um dos testes mais eficazes quando se quer obter as propriedades mecânicas dos materiais é o ensaio de tração. Acontece durante o ensaio onde uma amostra é submetida a uma carga de tração crescente até à sua ruptura, esse ensaio permite determinar sua resistência e ductilidade. Com isso pode-se entender o desempenho do material para a sua atividade aplicada ou na escolha do uso industrial.

Foram preparados 14 corpos de prova, sendo sete de latas da liga AA3104 e sete misturado com ligas (A356 + AA3104), todos com dimensões de 200 mm de comprimento, 22 mm de largura e 13 mm de espessura no centro. Estes foram usinados de acordo com as especificações da norma ASTM E8 (American Society for Testing and Materials) para garantir uniformidade e precisão nos testes (figura 1).

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina de ensaio universal da EMIC DL10.000, o ensaio foi conduzido em temperatura ambiente. O corpo de prova foi fixado nas garras da máquina de ensaio, e a carga foi aplicada de forma contínua com uma velocidade de

2 mm/min até que o material atingisse a fratura. Durante o ensaio, a força aplicada e a deformação foram registradas automaticamente pelo software TESC – Software de Controle e Análise de Ensaio (EMIC) – de controle da máquina. Com isso pode-se obter características como: limite de resistência à tração, limite de escoamento, alongamento total, Módulo de elasticidade.

2.5 Simulação Computacional

A etapa de simulação computacional foi conduzida no SolidWorks Simulation, com o objetivo de avaliar a resposta estrutural do trem de pouso sob carregamentos representativos de operação, em alinhamento com o contexto de projeto da classe Micro da Competição SAE Brasil AeroDesign. Para a definição dos carregamentos aplicados no modelo, utilizaram-se os parâmetros calculados em planilha eletrônica: $V_r = 78,15 \text{ N}$ e $D_r = 26,16 \text{ N}$, obtidos a partir do peso adotado $W = 39,24 \text{ N}$ e do fator de inércia mínimo $n = 2,667$, com base nas hipóteses de cargas em solo do 14 CFR Part 23, §23.473 (ESTADOS UNIDOS, s.d.). Nesse contexto, W representa o peso (força gravitacional) adotado no cálculo, V_r a reação vertical equivalente no trem de pouso e D_r a parcela de carga associada à componente considerada no modelo.

A obtenção das forças aplicadas na simulação foi estruturada por analogia conservativa às hipóteses de cargas em solo do 14 CFR Part 23, que corresponde ao conjunto de padrões de aeronavegabilidade (airworthiness standards) da FAA para aeronaves de pequeno porte, incluindo premissas de carregamento em condições de pouso e operação em solo. Em particular, adotou-se como referência o 23.473 (Ground load conditions and assumptions), seção que estabelece hipóteses para determinação de fatores de carga em solo e permite considerar o chamado alívio de sustentação (lift relief) durante o impacto de pouso. Nessa abordagem, utilizou-se a razão $L = 2/3 = 0,667$, em que L representa a razão entre a sustentação assumida e o peso da aeronave ($L = \text{Lift}/W$), limitada normativamente a no máximo dois terços do peso durante o impacto. Adicionalmente, adotou-se o fator mínimo de inércia vertical $n = 2,67$, conforme o 23.473(g), que estabelece que o fator de inércia utilizado para projeto não deve ser inferior a esse valor.

Com base nessas hipóteses, considerou-se o peso adotado no cálculo $W = 39,24 \text{ N}$ (força peso equivalente), e determinaram-se as forças utilizadas no modelo como: $V_r = (n - L) W$ e $D_r = L W$, em que V_r é a reação vertical equivalente aplicada ao trem de pouso e D_r representa a parcela de sustentação assumida (termo $L \cdot W$) associada ao alívio de sustentação previsto em 23.473(e). Assim, foram obtidos $V_r = 78,15 \text{ N}$ e $D_r = 26,16 \text{ N}$,

valores posteriormente aplicados no SolidWorks Simulation conforme o esquema de carregamento do modelo.

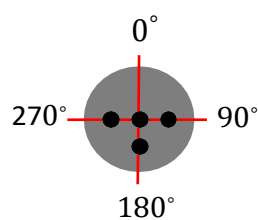
No modelo de elementos finitos, a condição de contorno de fixação foi representada pela restrição de deslocamentos na região dos furos de montagem do trem de pouso, que correspondem à interface real de ligação da peça à estrutura. Em seguida, as forças calculadas foram aplicadas nas regiões indicadas no desenho do carregamento, respeitando suas direções de atuação: V_r como componente vertical e D_r como componente adotada no modelo. Ressalta-se que, do ponto de vista normativo, o valor numérico de 26,16 N decorre diretamente do termo $L \cdot W$ (parcela de sustentação assumida) previsto em 23.473, quando se deseja justificar especificamente uma componente horizontal de “arrasto” associada a *spin-up/spring-back*, o texto pertinente encontra-se em 23.479 (b), que trata explicitamente de “*drag components*” e impõe limites mínimos relativos à reação vertical máxima (sem alívio de sustentação).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise microestrutural

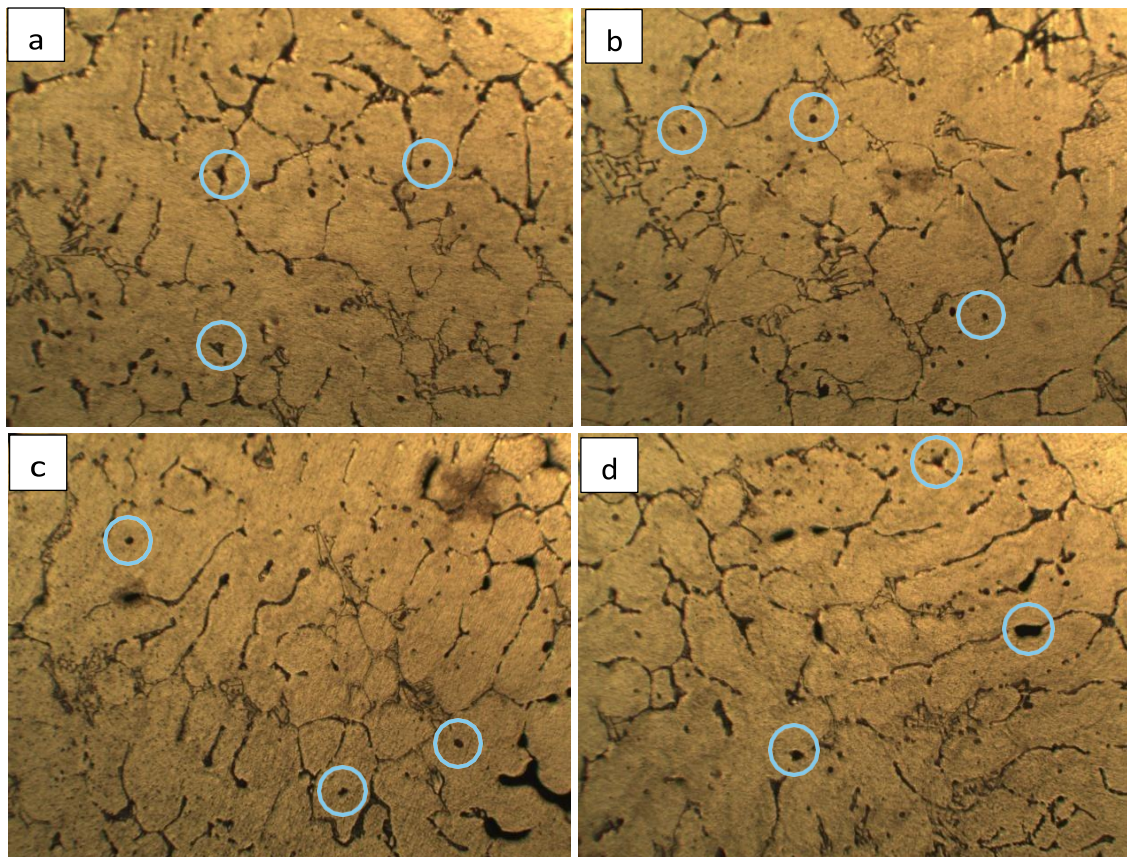
A Figura 2 apresenta os sistemas de coordenadas correspondentes às imagens metalográficas do corpo de prova. A partir dessas imagens, a análise microestrutural das amostras obtidas exclusivamente da liga AA3104 proveniente de latas (Fig. 3a–3b) revelou uma matriz α -Al contendo uma rede interdendrítica composta por intermetálicos férricos, principalmente β -AlFeSi e α -Al(Fe,Mn)Si, além de porosidade fina distribuída ao longo da microestrutura. Essa morfologia é característica de ligas secundárias da série AA 3xxx, como a AA3104, amplamente utilizadas em embalagens. Durante o processo de reciclagem, ocorre acúmulo de ferro que precipita na forma de placas alongadas (fase β) e, quando há Mn suficiente para promover a modificação de fase, em partículas ramificadas da fase α , conforme descrito por George e Magidi-Chicuba (2024) e Luo et al. (2024).

Figura 2 – Localização/posição de obtenção das imagens em relação ao corpo de prova



Fonte: Autoria própria.

Figura 3 – Microscopia óptica da liga AA3104 - (a) posição 90°, (b) posição 180°. (c) posição 270°, (d) posição centro do corpo de prova, utilizando lente de aumento 100x,

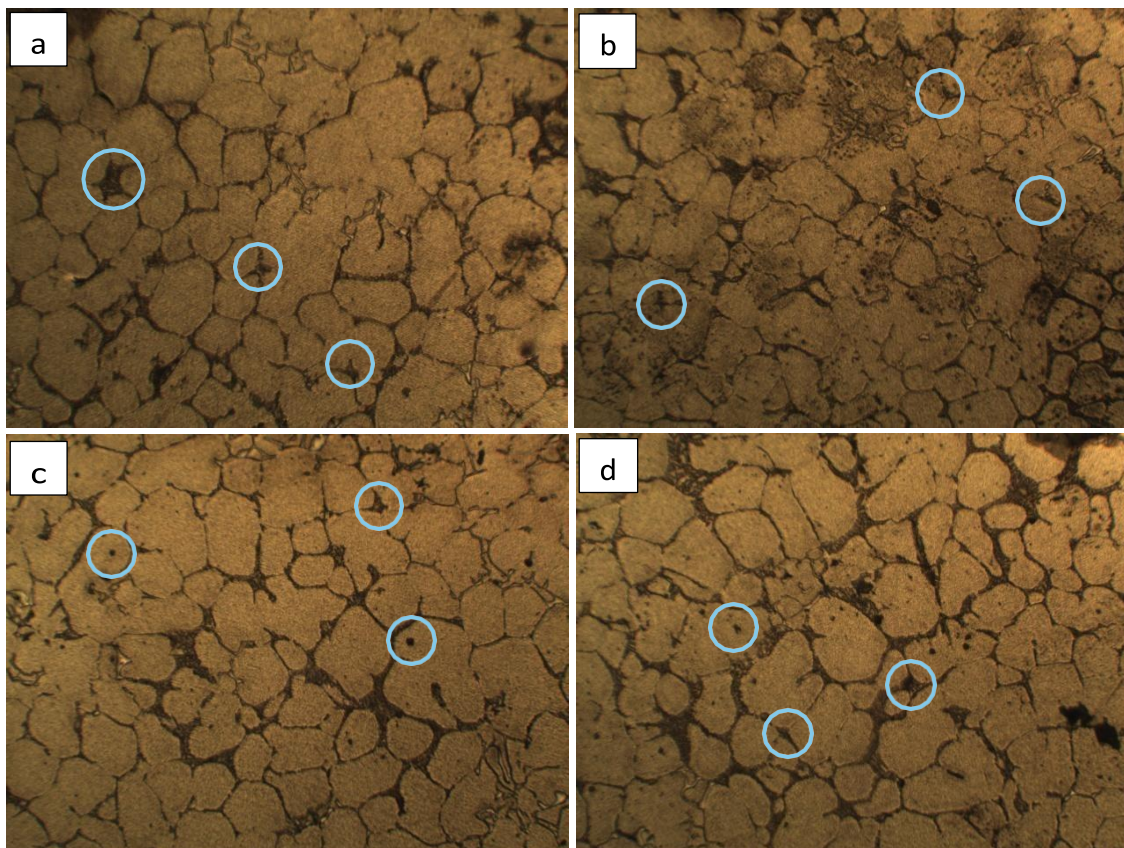


Fonte: Autoria própria.

As posições 0° e 270° apresentam maior conectividade entre compostos intermetálicos (IMCs, do inglês intermetallic compounds) e poros alongados, sugerindo solidificação mais lenta e maior SDAS (secondary dendrite arm spacing — espaçamento secundário entre braços dendríticos), enquanto a posição 180° (Figura 3b) apresenta estrutura mais refinada, com menor espessura de veios e menor porosidade, indicando melhor alimentação interdendrítica (HESS; WANG, 2019; ANVALEBECHI, 2004). A presença de porosidade, mesmo quando discreta, é coerente com os mecanismos de precipitação de hidrogênio e de contração volumétrica descritos para ligas de alumínio fundido (SAMUEL et al., 2023; CARLSON et al., 2006).

Por outro lado, as amostras do material misto das ligas A356 + AA 3104 (roda + latas), nas posições 90° e 180° (Figuras 4a e 4b) conforma a figura 2, exibiram diferenças significativas. Conforme George e Magidi-Chicuba (2024) e Luo *et al.* (2024), a microestrutura apresentou grãos α -Al mais equiaxiais e contornos delineados por eutético Al-Si contínuo, além de partículas férricas curtas e fragmentadas, predominando a fase α -Al(Fe,Mn)Si.

Figura 4 – Microscopia óptica das ligas A356 + AA3104 - (a) posição 90°, (b) posição 180°. (c) posição 270°, (d) posição centro do corpo de prova, utilizando lente de aumento 100x.



Fonte: Autoria própria.

A maior presença de Si, proveniente da liga A356 de rodas (composição Al-Si-Mg), favoreceu a formação do eutético e reduziu a ocorrência de placas β , resultando em morfologias menos nocivas e mais homogêneas (KCHARIKOVÁ *et al.*, 2021; PANDEE *et al.*, 2025). As micrografias da figura 4 revelaram a melhora na redução de porosidade visível (FANKHÄNEL *et al.*, 2021). Essa configuração está alinhada a estudos que demonstram que o aumento do teor de Si e ajustes na relação Fe/Mn reduzem a conectividade dos compostos intermetálicos e melhoram as propriedades mecânicas (YANG *et al.*, 2025; GALINDO AGUILAR *et al.*, 2022).

Comparativamente, o material apenas da liga AA3104 latas apresentou maior heterogeneidade com redes intermetálicas mais espessas e porosidade fina, enquanto o misto das ligas A356 + AA3104 (roda + latas) mostrou estrutura mais refinada, eutético Al-Si bem distribuído e compostos intermetálicos menos conectados. Os resultados demonstram que a combinação de materiais pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade microestrutural e reduzir defeitos internos, melhorando as propriedades mecânicas. Para aplicações que exigem maior confiabilidade, recomenda-se, no caso de materiais constituídos apenas pela liga AA3104 (latas), controlar a relação Fe/Mn e aplicar tratamentos térmicos de

homogeneização para promover a transformação $\beta \rightarrow \alpha$; além disso, realizar desgaseificação e filtração do banho — práticas amplamente documentadas para minimizar a fragilidade e a porosidade (SHAKIBA *et al.*, 2014; SAMUEL *et al.*, 2023).

Para George e Magidi-Chicuba (2024) e Luo *et al.* (2025), a composição química e a taxa de solidificação influenciam a formação de intermetálicos e porosidade, e estratégias de modificação e refino são decisivas para assegurar propriedades adequadas. A qualificação futura de SDAS, fração de área de IMCs e porosidade nas duas ligas permitirá estabelecer correlações robustas com propriedades mecânicas, consolidando diretrizes para otimização do processo.

3.2 Ensaio de Tração

Os resultados indicaram diferenças significativas entre as duas ligas. O material fundido de latas apresentou módulo de elasticidade $5,53 \pm 2,86$ GPa e limite de escoamento médio $57,86 \pm 28,38$ MPa, porém menor deformação $3,4 \pm 1,26$ %. Já a liga A356 + AA3104 exibiu ductilidade maior $4,55 \pm 1,27$ % e escoamento inferior $30,87 \pm 42,33$ MPa (Tabela 1). Essa tendência está associada à microestrutura: AA3104, a presença de placas da fase β -Al₃FeSi e porosidade favorece concentração de tensão, elevando rigidez, mas reduzindo alongamento (BJURENSTEDT *et al.*, 2016; KISHOR *et al.*, 2024). Na mistura, o eutético Al-Si contínuo e IMCs fragmentados retardam nucleação de trincas, aumentando ductilidade (LUO *et al.*, 2024; PANDEE *et al.*, 2025).

Tabela 1 – Resultado do ensaio de tração

Propriedades	Liga AA3104	Liga A356
Módulo de elasticidade (GPa)	$5,53 \pm 2,28$	$3,07 \pm 1,20$
Limite de escoamento (MPa)	$57,86 \pm 28,38$	$30,87 \pm 42,33$
Deformação até a força máxima (%)	$3,44 \pm 1,26$	$4,55 \pm 1,27$
Limite de ruptura	$107,84 \pm 25,48$	$128,5 \pm 18,66$

Fonte: Autoria própria

Os valores absolutos são inferiores aos típicos de ligas Al fundidas, como A356 ~124 MPa e 6061-O ~55 MPa, refletindo defeitos internos e ausência de tratamentos térmicos (SHAKIBA *et al.*, 2014; ZYSKA *et al.*, 2021). Estudos confirmam que porosidade e SDAS elevado reduzem resistência e alongamento (SAMUEL *et al.*, 2023; CARLSON *et al.*, 2006).

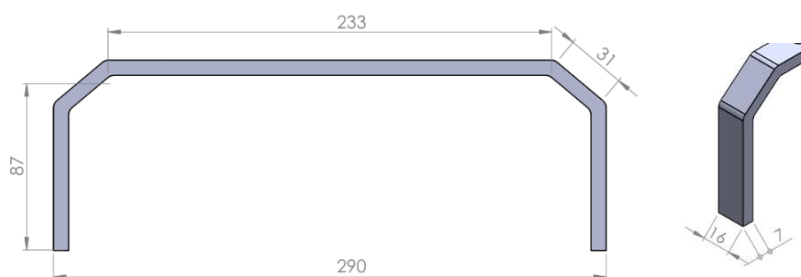
Para melhorar desempenho, recomenda-se desgaseificação, filtração, controle Fe/Mn e solidificação sob pressão, práticas que reduzem poros e refinam microestrutura (FANKHÄNEL *et al.*, 2021; KISHOR *et al.*, 2024).

A dispersão elevada nos valores de escoamento e módulo indica forte influência da heterogeneidade microestrutural e da presença de defeitos internos, como poros e bifilmes, que atuam como iniciadores de trinca. Trabalhos como os de Samuel *et al.* (2023) e Carlson *et al.* (2006) demonstram que a área de poros na superfície de fratura correlaciona-se diretamente com a redução da resistência e da ductilidade. Além disso, a literatura aponta que o refino do SDAS e a transformação da fase β para α por adição de Mn ou tratamentos térmicos podem melhorar significativamente a repetibilidade e o desempenho mecânico (KISHOR *et al.*, 2024; PANDEE *et al.*, 2025).

3.3 Determinação da Geometria do Trem de Pouso

O dimensionamento estrutural do trem de pouso foi feito a partir da definição da geometria do esboço (Figura 5) e do caso crítico de carregamento. As cargas foram consideradas para a condição mais severa (pouso crítico), e a peça foi discretizada em seções para obter os esforços internos (momento fletor, cortante e força normal), identificando a região mais solicitada. Com base na seção crítica, adotou-se seção transversal constante por simplicidade construtiva e dimensionou-se o componente verificando tensões normais e cisalhantes com fator de segurança mínimo. Por fim, os resultados analíticos foram comparados com a simulação em elementos finitos (SolidWorks), confirmando a concentração de tensões próxima às fixações e a adequação do dimensionamento.

Figura 5 – Esboço do trem de pouso, unidade em mm.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a norma FAR Part 23 (Regulamentação Federal de Aviação, 2002), as condições de carga no solo durante o pouso são avaliadas com base em três situações distintas:

pouso com as três rodas no solo, pouso com apenas as duas rodas do trem principal, e pouso com uma única roda do trem principal, sendo esta última considerada a situação mais crítica entre as três (Figura 6).

Figura 6 – Forças atuantes em aeronaves durante situação de pouso.



Fonte: adaptada de Fahor 2016.

Dados as condições de pousos apresentadas, no presente artigo será abordado esses carregamentos são detalhados como forças verticais (causadas na aterrissagem/pouso em uma roda que, segundo NIU (1995) é o pouso mais, longitudinais (causadas na frenagem) e fricção (causadas pelos ventos laterais).

Quanto ao fator de segurança a ser aplicado em estruturas, a norma FARPART 25 (2005), no parágrafo 303, estabelece que: caso não especificado, o fator de segurança de 1,5 deve ser aplicado no fator de carga prescrito no qual considera-se cargas externas na estrutura.

3.4 Simulação Computacional

A simulação no SolidWorks Simulation permitiu avaliar a resposta estrutural do trem de pouso sob carregamentos equivalentes definidos como $V_r = 78,15$ N (reação vertical total) e $D_r = 26,16$ N (força de arrasto), aplicados conforme o arranjo do modelo e com restrição de deslocamentos na região dos furos de fixação (Figura 7). Esses termos V_r e D_r seguem a convenção do Apêndice C do Part 23 legado para as condições básicas de pouso. (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2011). Os valores foram obtidos da Tabela 2 e estruturados por analogia conservativa às hipóteses de cargas em solo do 14 CFR Part 23 — Airworthiness Standards: Normal Category Airplanes, que reúne os padrões de aeronavegabilidade para aviões de categoria normal. (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2025). Em especial, adotaram-se as premissas do 23.473 — Ground load conditions and assumptions: (i) considerar alívio de sustentação de até 2/3 do peso durante o impacto do pouso e (ii) utilizar fator de carga inercial mínimo $n \geq 2,67$ (sendo n adimensional). (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2011). Além disso, seguiu-se o 23.479 — Level landing conditions, que

define as condições de pouso em nível e a combinação das reações verticais com componentes horizontais associadas ao spin-up/spring-back das rodas. (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2011).

Tabela 2 – Parâmetros para encontrar os vetores de forças aplicadas no trem de pouso.

W	4Kg
W	181437 lb
V	9,71 Nós
N	1
Ke	7,59 lb.ft
Distância	50 ft
Força	0,15 lb
L	0,67 N
n	2,66
W	39,24 N
V_r	78,15 N
D_r	26,16 N

Fonte: Autoria própria.

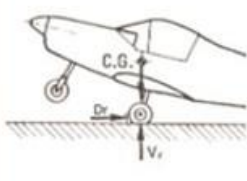
Os resultados numéricos evidenciaram concentração de tensões equivalentes principalmente nas transições geométricas (curvaturas/mudanças de direção) e na proximidade das regiões de vínculo (furos), comportamento típico de trens de pouso do tipo “mola” utilizados em aeronaves leves e UAVs, em que descontinuidades geométricas e condições de contorno rígidas elevam gradientes de tensão e definem regiões críticas (MORAES; SILVA, 2019; MORRISON; NEFF; ZAHRAEE, 1995).

Apesar da análise estática fornecer um mapeamento robusto das regiões mais solicitadas, a literatura ressalta que a aterrissagem envolve efeitos dinâmicos e transientes, podendo elevar picos de tensão em relação a um carregamento estático equivalente; por isso, recomenda-se complementar a verificação com abordagem dinâmica e/ou ensaios de queda (*drop test*) quando o objetivo inclui validação de margens estruturais sob impacto (LYLE; JACKSON; FASANELLA, 2000; YANG *et al.*, 2023).

Assim, a simulação cumpriu o papel de localizar regiões críticas do componente e apoiar decisões de projeto, indicando a necessidade de atenção a raios internos, espessuras e qualidade geométrica nas áreas de transição e nos pontos de fixação. Esse uso do MEF como ferramenta

de triagem e aprimoramento do projeto está em linha com estudos que combinam simulação e validação experimental em trens de pouso para UAVs e aeronaves leves, mostrando que a representação adequada das condições de contorno e do carregamento é determinante para a confiabilidade dos resultados (LANCEA *et al.*, 2022; DAYANANDA; VARUGHESE; RAO, 2007).

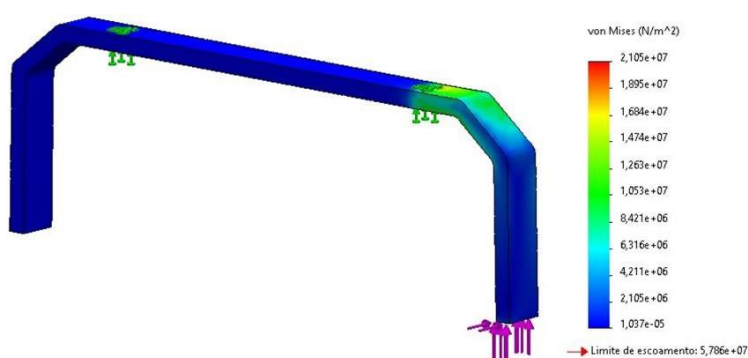
Figura 7 - Forças atuantes na aeronave durante o pouso.

	$V_n = (n - L) \cdot W$	$V_n = (2.667 - 0.67547) \cdot 39,24$	$V_n = \mathbf{78.15 \text{ N}}$
	$D_r = K \cdot n \cdot W$	$D_r = 25 \cdot 2.667 \cdot 39,24$	$D_r = \mathbf{26.16 \text{ N}}$

Fonte: adaptada de CONTECO 2016.

A Figura 8 apresenta o campo de tensões equivalentes de von Mises, evidenciando a distribuição das tensões ao longo do componente e as regiões mais solicitadas estruturalmente.

Figura 8 – Simulação do alumínio AA3104 (latas).



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que grande parte da estrutura opera sob níveis de tensão significativamente inferiores ao valor máximo, permanecendo em faixas reduzidas da escala de von Mises. Isso indica uma distribuição global adequada das tensões, com solicitação estrutural concentrada

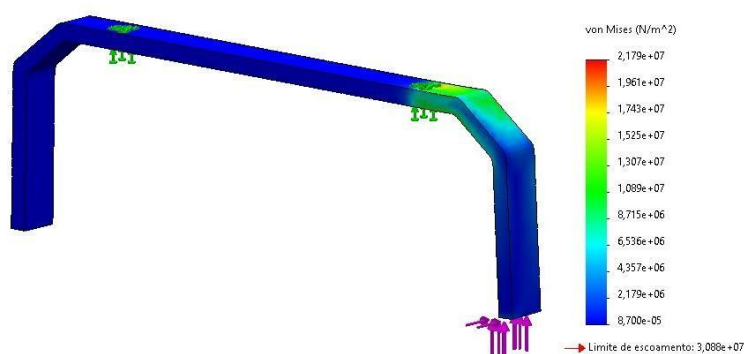
apenas em regiões específicas, o que é esperado para trens de pouso do tipo “mola” utilizados em aeronaves leves e aeromodelos.

A análise dos resultados demonstra que, para o carregamento considerado, o componente apresenta comportamento estrutural satisfatório, com fator de segurança de 2,75, sem indícios de instabilidade ou concentração excessiva de tensões fora das regiões críticas. A simulação permitiu, ainda, identificar pontos estratégicos para possíveis otimizações geométricas, como o aumento de raios de curvatura ou ajustes locais de seção, visando a redução adicional dos picos de tensão.

Dessa forma, a simulação computacional mostrou-se uma ferramenta eficiente para a verificação preliminar do desempenho estrutural do trem de pouso, fornecendo subsídios técnicos para a validação do projeto e para eventuais aprimoramentos antes da fabricação e dos ensaios experimentais.

Observa-se que as tensões máximas se concentram predominantemente nas regiões de transição geométrica, especialmente nas curvaturas do trem de pouso, comportamento característico de estruturas submetidas à flexão. Os valores máximos de tensão atingem aproximadamente 21,8 MPa, (Figura 9) enquanto a maior parte da estrutura permanece sob níveis de tensão significativamente inferiores, indicando uma distribuição global adequada das solicitações mecânicas.

Figura 9 - Simulação das ligas A356 + AA3104 (mistura).



Fonte: Autoria própria.

As regiões próximas aos pontos de fixação e às mudanças abruptas de geometria apresentaram elevação localizada das tensões em função das restrições impostas pelas condições de contorno e da concentração de esforços. Ainda assim, essas tensões permanecem

bem distribuídas e restritas a áreas específicas do componente, não indicando sobrecarga estrutural generalizada.

Considerando o limite de escoamento da liga misturada, indicado na simulação como aproximadamente 30,88 MPa, é possível determinar o fator de segurança estrutural a partir da razão entre o limite de escoamento do material e a tensão máxima obtida. Dessa forma, o fator de segurança calculado é 1,42.

Esse valor indica que o trem de pouso fabricado em alumínio misturado que opera no regime elástico, porém com uma margem de segurança inferior à observada para a liga de latas de bebida. Embora o fator de segurança obtido seja suficiente para aplicações de aeromodelos, ele evidencia uma menor tolerância a variações de carga, imperfeições geométricas ou incertezas do modelo numérico.

Os resultados da simulação demonstram que o alumínio A356 + AA3104 (mistura) atende aos requisitos estruturais mínimos para a condição analisada, porém apresenta menor robustez estrutural quando comparado a ligas com maior limite de escoamento. Assim, eventuais otimizações geométricas, como o aumento dos raios de curvatura nas regiões críticas ou o reforço local de seção, podem ser adotadas para elevar o fator de segurança sem acréscimo significativo de massa.

Dessa forma, a simulação computacional mostrou-se fundamental para a avaliação comparativa do desempenho estrutural do trem de pouso em alumínio misturado, fornecendo subsídios técnicos para a validação do projeto e para a tomada de decisões quanto à escolha do material e ao aprimoramento geométrico do componente.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que o reaproveitamento de alumínio proveniente de latas de bebidas é uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável para a fabricação de componentes mecânicos de aplicação estrutural leve, como o trem de pouso fixo utilizado em aeromodelos da competição SAE Brasil AeroDesign. A metodologia adotada, envolvendo fundição, usinagem, ensaios mecânicos, análise metalográfica e simulação computacional, permitiu uma avaliação abrangente do comportamento do material reciclado sob diferentes perspectivas.

Os resultados dos ensaios de tração evidenciaram que o alumínio reciclado apresenta propriedades mecânicas compatíveis com aplicações aeronáuticas de pequeno porte, embora inferiores às ligas comerciais fundidas, principalmente em razão da presença de porosidade e

heterogeneidade microestrutural. Observou-se que a utilização de sucata mista (AA3104 + A356) promoveu significativa melhoria microestrutural, com redução de fases intermetálicas nocivas, menor porosidade e aumento da ductilidade, indicando que a mistura controlada de ligas recicladas é uma estratégia eficiente para otimização das propriedades mecânicas.

A análise microestrutural corroborou os resultados mecânicos, evidenciando a influência direta da composição química e das condições de solidificação na formação de intermetálicos e no desempenho do material. Já a simulação computacional por meio do método dos elementos finitos permitiu identificar regiões críticas de concentração de tensões no trem de pouso, especialmente nas transições geométricas e pontos de fixação, validando o modelo estrutural e auxiliando no aprimoramento do projeto.

Dessa forma, conclui-se que o alumínio reaproveitado de sucata, quando adequadamente processado e dimensionado com fatores de segurança apropriados, pode ser empregado com sucesso em componentes estruturais de aeromodelos, contribuindo para a redução de custos, reaproveitamento de materiais e diminuição dos impactos ambientais. Por fim, recomenda-se para trabalhos futuros a aplicação de tratamentos térmicos, técnicas de desgaseificação e ensaios dinâmicos, a fim de ampliar a confiabilidade estrutural e o campo de aplicação do material reciclado na engenharia mecânica e aeronáutica.

REFERÊNCIAS

- ABELING, A. **Dimensionamento de um conjunto trem de pouso para Aerodesign**. [S.l.]: [s.n.], 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina (FAHOR), Horizontina, 2016.
- ABREU, T. O.; NEVES, R. F. Caracterização de alumínio reciclado de latas de bebidas: propriedades mecânicas e microestrutura. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. e20220015, 2020.
- ALAZMI, S.; KRAWCZYK, C.; REBER, J. SAE Aero Design West – Micro Class: Flap Jacks #329. [S.l.]: Northern Arizona University, 2019. Relatório técnico apresentado à Society of Automotive Engineers (SAE).
- ANDERSON, John D. **Introduction to flight**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- ANDERSON, John D. **Introduction to flight**. 8. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15900**: Alumínio e suas ligas – Lingotamento – Composição química e propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 17781**: Ensaios metalográficos – Preparação de amostras metálicas e cerâmicas. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 377**: Materiais metálicos – Seleção e preparação de amostras e corpos de prova para ensaios mecânicos. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6344-2**: Revestimentos de abrasivos – Determinação da distribuição de tamanho de grão – Parte 2: Granulação de microgrãos F230 a F2000. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM ISO 6344-2:2022**: Revestimentos de abrasivos — Determinação da distribuição de tamanho de grão — Parte 2: Granulação de microgrãos F230 a F2000. Rio de Janeiro, 2022.
- BERTIN, C. R. **Desenvolvimento de um trem de pouso estruturalmente otimizado para um veículo aéreo não tripulado**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.
- DAYANANDA, G. N.; VARUGHESE, B.; RAO, M. S. Shape memory alloy based smart landing gear for an airship. **Journal of Aircraft**, v. 44, n. 5, p. 1469–1477, 2007.
- ESTADOS UNIDOS. Code of Federal Regulations. Title 14—Aeronautics and Space. Part 23—Airworthiness Standards: Normal, Utility, Acrobatic, and Commuter Category Airplanes. § 23.473 (Ground load conditions and assumptions). Washington, DC: Federal Aviation Administration.

GAUSTAD, G. *et al.* Improving aluminum recycling: a survey of sorting and impurity removal technologies. **Resources, Conservation and Recycling**, New York, v. 58, p. 79–87, 2012.

GAUSTAD, G.; OLIVETTI, E.; KIRCHAIN, R. Design for recycling: evaluating the effectiveness of pre-processing for aluminum scrap streams. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 58, p. 79–87, 2012.

GUPTA, N. K. *et al.* Recovery of aluminium from multi-layered packaging wastes: challenges in pretreatment and smelting control. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Tóquio, v. 21, n. 5, p. 1123–1134, 2019.

LANCEA, C.; CHICOS, L.-A.; ZAHARIA, S.-M. *et al.* Simulation, fabrication and testing of UAV composite landing gear. **Applied Sciences**, v. 12, n. 17, p. 8598, 2022.

LIU, Y. *et al.* Comparative study on machinability of cast A356 and wrought AA6061 aluminum alloys in dry turning process. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.l.], v. 297, p. 117265, 2021.

LYLE, K. H.; JACKSON, K. E.; FASANELLA, E. L. Simulation of aircraft landing gears with a nonlinear dynamic finite element code. In: **AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit**. [S.l.]: AIAA, 2000. (AIAA-2000-4090).

MORAES, F. A. B. D.; SILVA, C. L. Etapas de dimensionamento de trem de pouso triciclo para aeronaves rádio controladas SAE AeroDesign. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 5, n. 4, p. 379–385, 2019. DOI: 10.18540/jcecv15iss4pp0379-0385.

MORRISON, D.; NEFF, G.; ZAHRAEE, M. Aircraft landing gear simulation and analysis. In: **Proceedings of the American Society for Engineering Education (ASEE)**. [S.l.]: ASEE, 1995.

PAZMANY, L. **Landing gear design for light aircraft**. 1. ed. Burlington: Pazmany Aircraft Corporation, 1963.

PEREIRA, R. B. *et al.* Otimização de parâmetros de usinagem para alumínio reciclado de embalagens: efeito de inclusões abrasivas. **Journal of Manufacturing Processes**, [S.l.], v. 58, p. 1235–1246, 2020.

RAYMER, D. P. **Aircraft design: a conceptual approach**. 2. ed. Washington: AIAA Education Series, 1989.

SAE BRASIL. **Tendências e tecnologias aplicadas à engenharia aeronáutica**. São Paulo: SAE Brasil, 2023. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/>. Acesso em: 3 fev. 2026.

SREJITH, P. S.; KRISHNAMURTHY, R.; NARAYANASWAMI, R. Effect of recycled Al-Si alloy composition on tool wear during dry machining. **Journal of Materials Research and Technology**, [S.l.], v. 8, n. 5, p. 3981–3990, 2019.

YANG, H.; WANG, Y.; DONG, J.; WANG, H. Dynamic analysis of skid landing gear of UAV under ground contact condition based on finite element method. In: CHEN, M. *et al.* (eds.). **Materials Science**. [S.l.]: [s.n.], 2023.