




# Caracterização de tarugos de alumínio reciclados da liga 6060 para o processo de extrusão

Ana Carolina Fernandes da Silva<sup>1</sup> 

Leonardo Contri Campanelli<sup>1</sup> 

Rebeca Cristina Cunha Martins<sup>2</sup> 

Paulo Soares Laureano<sup>2</sup> 

Danieli Aparecida Pereira Reis<sup>1\*</sup> 

## Resumo

Este trabalho apresenta a caracterização microestrutural e química de tarugos reciclados da liga de Al 6060, com o objetivo de verificar sua adequação para a produção de perfis extrudados. Foram analisados parâmetros críticos, como composição química, porosidade, segregação inversa, tamanho de grão, distribuição de precipitados  $Mg_2Si$  e transformação da fase  $\beta-Al_3Fe_2Si$  em  $\alpha-Al_3FeSi$ . Os tarugos, produzidos por refusão em planta industrial, foram submetidos a rigoroso controle das etapas de fusão, purificação e tratamento térmico. Os resultados indicaram microestrutura homogênea, baixa densidade de poros, distribuição adequada das fases e conformidade com os limites normativos. Esses achados indicam o potencial técnico do uso de material reciclado em aplicações de extrusão, contribuindo para práticas industriais mais sustentáveis no processamento de ligas de Al.

**Palavras-chave:** Alumínio; Tarugos reciclados; Liga 6060; Extrusão; Microestrutura.

## Characterization of recycled 6060 aluminum alloy billets for the extrusion process

### Abstract

This study presents the microstructural and chemical characterization of recycled billets of the 6060 Al alloy, aiming to verify their suitability for the production of extruded profiles. Critical parameters were analyzed, including chemical composition, porosity, inverse segregation, grain size, distribution of  $Mg_2Si$  precipitates, and the transformation of the  $\beta-Al_3Fe_2Si$  phase into  $\alpha-Al_3FeSi$ . The billets, produced by remelting in an industrial facility, underwent strict control of melting, purification, and heat treatment stages. The results indicated a homogeneous microstructure, low porosity, appropriate phase distribution, and compliance with normative limits. These findings highlight the technical potential of using recycled material in extrusion applications, contributing to more sustainable industrial practices in Al alloy processing.

**Keywords:** Aluminum; Recycled billets; 6060 alloy; Extrusion; Microstructure.

### 1 Introdução

As ligas de Al são classificadas em séries de acordo com os principais elementos de liga adicionados, destacando-se a série 6XXX, composta por Si e Mg, que é amplamente utilizada em processos de extrusão devido à combinação entre alta resistência e bom acabamento superficial. Entre as ligas disponíveis, a liga 6060 é amplamente empregada na fabricação de perfis para a indústria da construção civil. Os principais elementos de liga nessa composição são o Si

e o Mg, cuja interação resulta na formação do composto intermetálico  $Mg_2Si$ , responsável por conferir maior resistência mecânica e dureza ao produto final [1].

Um dos desafios atuais para a sustentabilidade da indústria do Al é o incremento do uso de material reciclado na produção das ligas. Embora as ligas à base de Al sejam consideradas 100% recicláveis, diversos fatores influenciam o desempenho do material reciclado, entre os quais se

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP, São José dos Campos, SP, Brasil.

<sup>2</sup>Prolind Alumínio LTDA, Manufatura, São José dos Campos, SP, Brasil.

\*Autor correspondente: danieli.reis@unifesp.br

E-mails: acfsilva@unifesp.br; leonardo.campanelli@unifesp.br; rebeca.martins@prolind.com.br; paulo.laureano@prolind.com.br



destaca o aumento do teor de Fe. O excesso de Fe pode comprometer o processo de extrusão, provocando defeitos como arrancamentos nos perfis, baixa qualidade de acabamento superficial e defeitos superficiais conhecidos como *pick ups*. A literatura aponta que, caso não sejam adotados sistemas de triagem aprimorados e estratégias de reciclagem mais eficientes, haverá um excedente significativo de sucata de Al nos próximos anos. Projeta-se que, em 2030, apenas cerca de 89% da sucata coletada e processada poderá ser utilizada para a fabricação de novas ligas laminadas e fundidas [2].

A manufatura de tarugos reciclados envolve três etapas principais: fusão do metal, vazamento em molde e tratamento térmico de homogeneização. Cada uma dessas etapas exige rigorosos controles para assegurar a composição química adequada, a ausência de inclusões e a minimização de fases indesejadas, garantindo, assim, o atendimento aos requisitos técnicos e a qualidade da matéria-prima [3].

O processo de conformação mecânica por extrusão a quente é amplamente empregado para a fabricação eficiente e econômica de peças com geometrias complexas. Esse processo consiste em forçar um tarugo previamente aquecido a atravessar uma matriz também aquecida, cuja cavidade possui o formato final desejado. Após a conformação, o perfil metálico passa por um tratamento térmico de envelhecimento, com o objetivo de aumentar a resistência do material por meio da precipitação de elementos e fases, como o composto intermetálico  $Mg_2Si$ . A presença desses precipitados eleva a energia necessária para a movimentação das discordâncias na estrutura cristalina, reduzindo a deformação plástica e, consequentemente, melhorando as propriedades mecânicas do produto final [4].

Neste trabalho, foi realizada uma avaliação microestrutural da liga 6060 obtida a partir de tarugos reciclados provenientes do processo de refusão, com o objetivo de verificar o atendimento aos requisitos da norma ABNT NBR 16266:2022 [5] para a produção de perfis de Al extrudados.

## 2 Materiais e métodos

Três amostras de tarugos homogeneizados da liga 6060, fornecidos pela planta de refusão da Prolind Alumínio LTDA, foram preparadas. O processo produtivo incluiu a adição de refinador de grão durante a fusão para garantir microestrutura fina e homogênea. As etapas de escumagem do forno e purificação do metal foram rigorosamente conduzidas antes do vazamento, assegurando a remoção eficiente de gases dissolvidos e inclusões não metálicas, essenciais para a qualidade final dos tarugos.

O material foi então seccionado através da cortadora metalográfica FORTEL presente na Prolind Alumínio LTDA em duas regiões distintas (meio raio e periferia) para possibilitar diferentes tipos de análises. A Amostra A foi retirada do meio raio e destinada à análise química por espectroscopia de emissão óptica em equipamento SPECTRO

MAXX pertencente à Prolind Alumínio LTDA; a Amostra B, também do meio raio, foi utilizada para caracterização microestrutural, incluindo a determinação do tamanho de grão, distribuição de precipitados, transformação da fase  $\beta-Al_8Fe_2Si$  em  $\alpha-Al_5FeSi$ , além da avaliação de porosidades e inclusões; já a Amostra C foi retirada da periferia do tarugo, sendo empregada na investigação da segregação inversa e na caracterização da camada de refusão.

A análise química da Amostra A foi realizada mediante fresamento e posterior análise em espectrômetro de emissão óptica, que quantifica os elementos por meio da excitação atômica e detecção dos comprimentos de onda correspondentes. Os resultados foram comparados com os limites estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 209:2010 [6]. As Amostras B e C foram submetidas a preparação metalográfica convencional.

Iniciou-se o preparo das amostras com o embutimento a frio das peças previamente seccionadas na cortadora metalográfica FORTEL. Em seguida, realizou-se o lixamento em lixas de granulação 220, 400 e 600, rotacionando a amostra em  $90^\circ$  a cada troca de lixa, utilizando uma politriz FORTEL. O polimento foi iniciado na mesma politriz, empregando pasta diamantada de  $6\ \mu m$  e uma solução 1:10 de álcool etílico e etileno glicol. Posteriormente, efetuou-se o polimento final com sílica coloidal.

Com a amostra polida, realizou-se a observação em microscópio óptico FORTEL, com aumento de  $100\times$ , visando identificar a presença de fases interdendríticas, segregação tipo escrita chinesa, inclusões e cavidades de contração. Para a determinação das demais propriedades microestruturais, procedeu-se ao ataque químico com solução contendo 1,8% de ácido fluobórico. Após 40 segundos de imersão, a amostra foi enxaguada em água corrente para remoção do reagente e seca com leves toques de papel. A amostra atacada foi analisada no microscópio óptico com aumento de  $400\times$ , a fim de avaliar a transformação de fase  $\beta$  para  $\alpha$ , bem como porosidade, macroporosidade e inclusões.

Por fim, a qualidade dos tarugos foi avaliada conforme os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 16266:2022 [5], considerando parâmetros como composição química, tamanho de grão, segregação inversa, camada de refusão, distribuição de precipitados, transformação das fases  $\beta-Al_8Fe_2Si$  em  $\alpha-Al_5FeSi$ , além da presença de porosidades e inclusões.

## 3 Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta os percentuais das composições químicas (% em peso) obtidas. Todos os elementos de liga encontram-se dentro das faixas especificadas pela norma ABNT NBR ISO 209:2010 [6], apresentando variações mínimas entre as amostras. A conformidade com a norma e a proximidade dos valores obtidos indicam a consistência das propriedades dos tarugos, o que favorece o processo de extrusão ao permitir a manutenção dos

**Tabela 1.** Composição química (% peso) das amostras e limites estabelecidos pela ABNT NBR ISO 209:2010 [6]

Amostra	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros	Al
1	0,46	0,26	0,05	0,05	0,40	0,01	0,03	0,02	0,01	98,7
2	0,47	0,26	0,05	0,06	0,39	0,02	0,06	0,02	0,01	98,6
3	0,48	0,28	0,05	0,10	0,45	0,02	0,06	0,01	0,01	98,5
Norma	0,30-0,60	0,10-0,30	0,10 máx.	0,10 máx.	0,35-0,60	0,05 máx.	0,15 máx.	0,10 máx.	0,15 máx.	Bal.

**Tabela 2.** Resultados de segregação inversa e camada de refusão expressos em porcentagem relativa aos limites máximos estabelecidos pela ABNT NBR 16266:2022 [5]

Amostra	Segregação inversa média	Camada de refusão
1	18%	40%
2	14%	33%
3	20%	27%
Norma	100% (300 $\mu\text{m}$ máx.)	100% (3 mm máx.)

parâmetros operacionais e garantir a qualidade dos perfis produzidos. Essa consistência química é fundamental para assegurar a repetibilidade do processo produtivo, minimizando variações indesejadas nas propriedades finais do material.

Os resultados referentes à segregação inversa e à camada de refusão encontram-se resumidos na Tabela 2. Os valores estão expressos em porcentagem, tomando-se como referência os limites máximos estabelecidos pela ABNT NBR 16266:2022 [5], considerados como 100%. Essa forma de apresentação permite uma avaliação relativa do desempenho em relação aos critérios normativos. Observa-se que os valores obtidos estão em conformidade com a norma, indicando que as impurezas presentes nos tarugos reciclados são eficientemente concentradas e segregadas na extremidade final do tarugo, região esta descartada durante o processo de extrusão (talão). Essa segregação controlada possibilita a otimização da remoção de contaminantes, permitindo o ajuste do volume de descarte e, conseqüentemente, o aumento do aproveitamento do tarugo. A segregação inversa, caracterizada pela concentração de elementos indesejáveis em regiões específicas do tarugo, influencia diretamente a qualidade do perfil extrudado, sendo seu controle fundamental para a integridade do produto final [7].

A Figura 1 apresenta micrografias representativas da segregação inversa observada em dois pontos distintos de cada amostra. As imagens evidenciam claramente a presença da segregação inversa ao longo das regiões próximas à superfície dos tarugos, caracterizada por variações na intensidade do contraste que refletem a distribuição desigual dos elementos de liga e impurezas. Nota-se que, nas áreas próximas à interface com o material descartado (talão), as micrografias revelam uma maior concentração de inclusões e segregados, indicativos da segregação inversa, enquanto a região central das amostras apresenta uma microestrutura mais homogênea.

A diferença na escala das imagens (50  $\mu\text{m}$  para a amostra 1 e 100  $\mu\text{m}$  para as amostras 2 e 3) indica variações na microestrutura e no grau de segregação entre

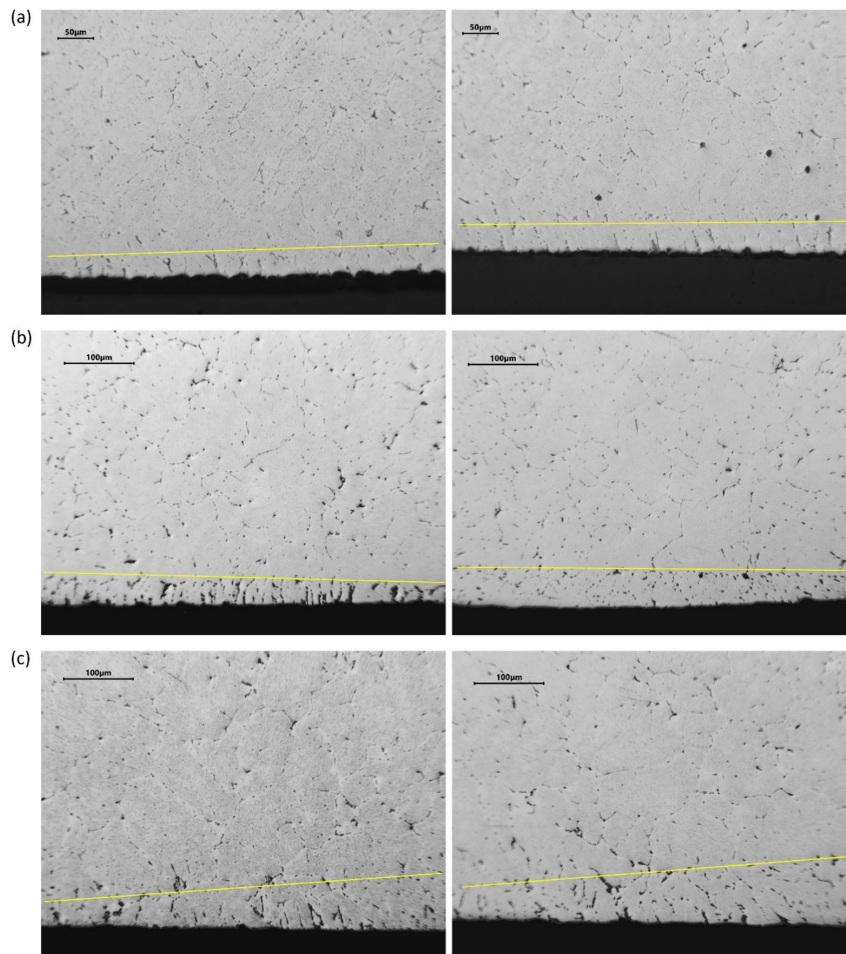
as amostras, possivelmente relacionadas às condições específicas de solidificação e resfriamento, que se encontra abaixo da linha em destaque nas imagens, é consistente com os fenômenos metalúrgicos observados durante a solidificação de ligas de alumínio, nos quais elementos como Si e Mg tendem a se concentrar nas regiões interdendríticas. Seo et al. [8] relataram que a severidade da segregação em ligas da série 6000, como a 6061, aumenta com a taxa de crescimento, sendo mais acentuada nas regiões interdendríticas formadas sob determinadas condições de solidificação.

A Figura 2 apresenta micrografias representativas da macroporosidade das amostras, nas quais se observa a presença de poros dispersos e de dimensões micrométricas. A amostra 1 exibe maior concentração de poros em relação às amostras 2 e 3, indicados pelas setas nas imagens, que apresentam microestruturas mais homogêneas e menos porosas. A avaliação da porosidade seguiu o padrão visual da norma ABNT NBR 16266:2022 [5], que classifica as amostras em diferentes classes qualitativas.

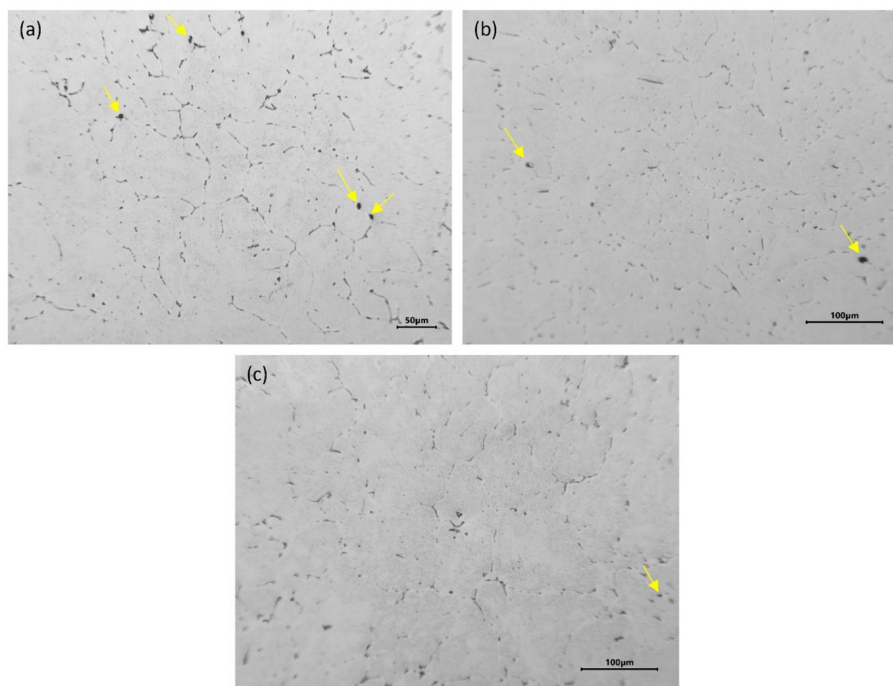
Conforme a norma, a amostra 1 situa-se na classe intermediária, correspondendo a cerca de 33% da porosidade máxima permitida (aqui considerada como 100%), enquanto as amostras 2 e 3 enquadram-se em uma melhor classe, com cerca de 17% de porosidade.

Esses resultados indicam que o processo de vazamento e desgaseificação utilizado é eficaz na minimização dos poros, contribuindo para a integridade estrutural dos tarugos. A baixa porosidade é fundamental para garantir propriedades mecânicas superiores, como resistência e ductilidade, além de assegurar uma extrudabilidade adequada, livre de defeitos superficiais e rupturas. Neste sentido, Zhao et al. [9] demonstram em ligas de Al-Si-Cu que o processo de extrusão reduz significativamente a porosidade, aumentando a densidade e melhorando as propriedades mecânicas das ligas em comparação aos métodos convencionais de fundição.

A taxa de solidificação e a eficiência do processo de desgaseificação antes do vazamento estão, portanto, bem



**Figura 1.** Micrografias evidenciando a segregação inversa em dois pontos: (a) amostra 1; (b) amostra 2; (c) amostra 3.



**Figura 2.** Micrografias evidenciando a macroporosidade: (a) amostra 1; (b) amostra 2; (c) amostra 3.

controladas, resultando em tarugos com baixa densidade de poros e melhor qualidade superficial. A microestrutura final, incluindo a distribuição de precipitados, tamanho médio de grão e transformação das fases, é fortemente influenciada pelo tratamento térmico aplicado. Esses fatores inter-relacionados são decisivos para o desempenho do material durante as etapas subsequentes de conformação e uso final.

Os resultados do tamanho médio de grão, apresentados na Tabela 3, indicam valores finos e uniformemente distribuídos para todas as amostras, em conformidade com a norma.

Assim como nos dados da Tabela 2, os dados foram aqui expressos em porcentagem relativa ao intervalo especificado, facilitando a comparação com os limites normativos. Essa estrutura refinada proporciona elevada densidade de contornos de grão, que atuam como barreiras à movimentação de discordâncias, conferindo resistência mecânica adequada durante a conformação e prevenindo a ocorrência de rupturas e defeitos superficiais.

A análise da distribuição de precipitados e da transformação das fases presentes nas amostras, comparada aos limites normativos, é apresentada na Tabela 4. A distribuição dos precipitados confirma a eficácia do tratamento térmico, garantindo a solubilização da fase  $Mg_2Si$ , principal responsável pelo endurecimento da liga 6060. Isso facilita o processo de extrusão, pois o material ainda não atingiu sua resistência final. A transformação da fase  $\beta-Al_8Fe_2Si$  em  $\alpha-Al_3FeSi$  secundária indica que a fase ferrosa predominante está fragmentada e esferoidizada, minimizando seus efeitos negativos durante a conformação mecânica. De fato, Gao et al. [10] mostraram que a modificação da morfologia e composição das fases ricas em ferro, como a evolução da fase  $\beta-Al_3FeSi$  em outras fases mais estáveis e fragmentadas durante processos térmicos, contribui para a melhoria das propriedades mecânicas e facilita o processamento da liga.

A Figura 3 ilustra o aspecto geral das microestruturas das amostras, permitindo a visualização clara das fases mencionadas. Observa-se a morfologia característica das fases intermetálicas, com partículas fragmentadas e esferoidizadas distribuídas uniformemente, o que contribui para a melhora das propriedades mecânicas e facilita o processo de extrusão. As micrografias também confirmam a homogeneidade microestrutural entre as amostras, reforçando o controle eficiente do processo de fabricação e do tratamento térmico. Em suma, a análise microestrutural evidencia que o controle adequado dos processos de solidificação, tratamento térmico e desgaseificação resulta em tarugos com microestrutura otimizada, baixa porosidade, segregação controlada e distribuição adequada das fases, favorecendo a extrudabilidade e a qualidade dos perfis produzidos.

#### 4 Conclusão

Os tarugos reciclados da liga 6060 demonstraram atender aos requisitos normativos e apresentam características microestruturais e químicas compatíveis com a produção de perfis por extrusão de alta qualidade. Em suma, foi observado que:

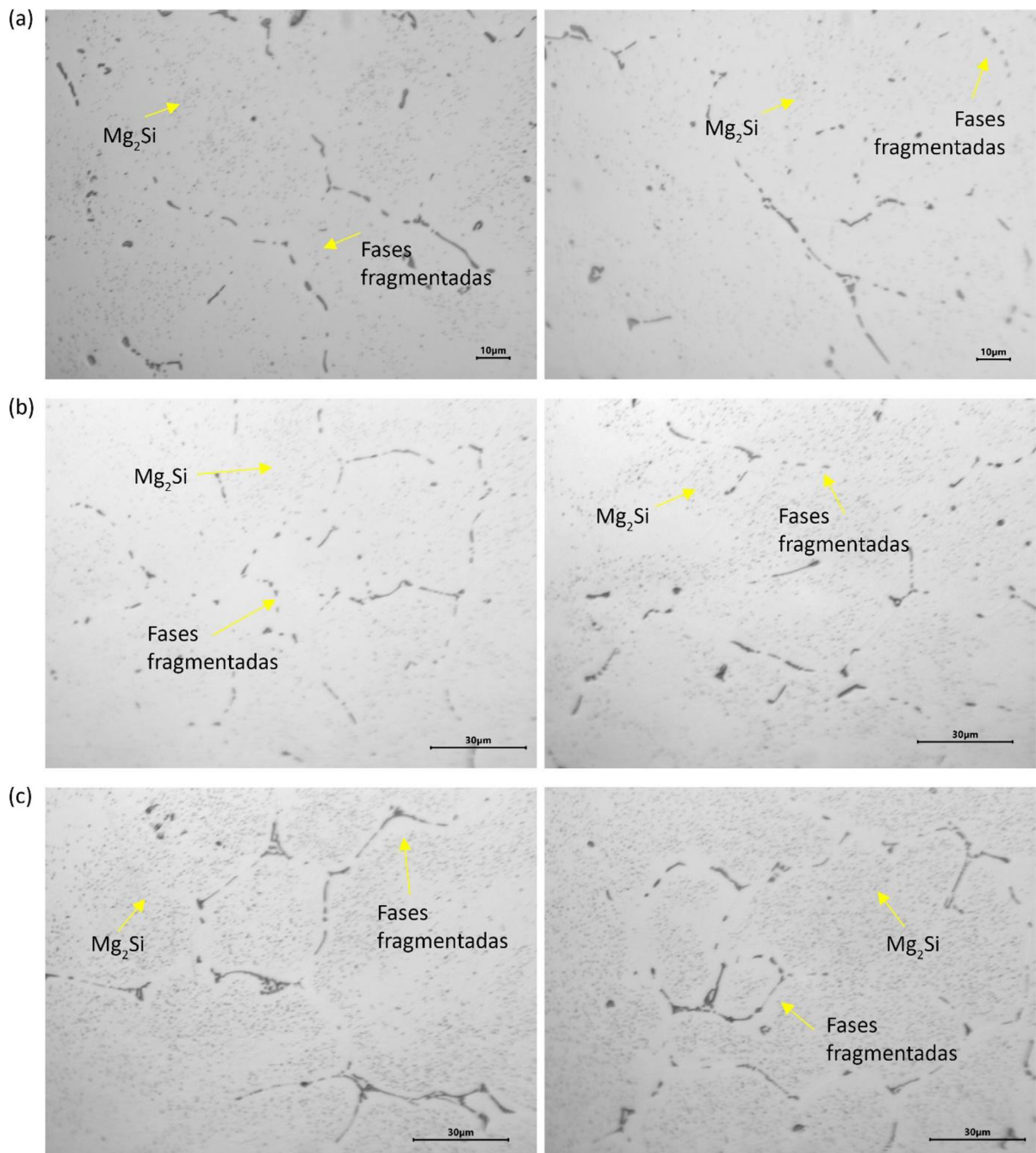
- A composição química manteve-se dentro dos limites especificados, garantindo estabilidade do material;
- A segregação inversa foi controlada de forma eficaz, concentrando impurezas no talão descartado, o que otimizou o aproveitamento do tarugo;
- A microestrutura apresentou homogeneidade, baixa porosidade e refinamento do tamanho de grão, reflexo do desempenho eficiente do refinador de grão aplicado;

**Tabela 3.** Resultados de tamanho de grão e diâmetro médio expressos em porcentagem relativa ao intervalo estabelecido pela ABNT NBR 16266:2022 [5]

Amostra	Tamanho de grão	Diâmetro médio
1	78%	70%
2	80%	68%
3	70%	72%
Norma	60% (64 $\mu m$ mín.) a 100% (130 $\mu m$ máx.)	60% (64 $\mu m$ mín.) a 100% (130 $\mu m$ máx.)

**Tabela 4.** Resultados de distribuição de precipitados  $Mg_2Si$  e transformação de fase  $\beta-Al_8Fe_2Si$  em  $\alpha-Al_3FeSi$  expressos em porcentagem relativa aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 16266:2022 [5]

Amostra	Distribuição de precipitados $Mg_2Si$	Transformação de fase $\beta-Al_8Fe_2Si$ em $\alpha-Al_3FeSi$
1	100%	99,0%
2	100%	99,4%
3	100%	99,3%
Norma	100% (distribuição uniforme)	90% mín.



**Figura 3.** Aspecto geral das microestruturas: (a) amostra 1; (b) amostra 2; (c) amostra 3.

- As etapas de escumagem do forno e purificação do metal até o vazamento foram conduzidas com sucesso, resultando em baixos níveis de porosidade e inclusões;
- O tratamento térmico promoveu a solubilização do Mg<sub>2</sub>Si e a transformação da fase β-Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si em α-Al<sub>5</sub>FeSi esferoidizada, contribuindo para melhores propriedades mecânicas e extrudabilidade..

Esses resultados confirmaram a eficácia do processo produtivo e a viabilidade do uso de tarugos reciclados na fabricação de perfis com desempenho confiável.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Prolind Alumínio LTDA pela disponibilização do material utilizado no experimento, bem como às agências de fomento CAPES, CNPq, FAPESP e FINEP pelo apoio financeiro.

## Referências

- 1 Saldanha F, Albuquerque Sousa S, Gouveia GL, Dwek M, Spinelli JE. Evaluation of 6000 Al alloys for application in chassis of electric vehicles. *Materials Research*. 2022;25:e20220275. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2022-0275>.
- 2 van den Eynde S, Bracquené E, Diaz-Romero D, Zaplana I, Engelen B, Duflou JR, et al. Forecasting global aluminium flows to demonstrate the need for improved sorting and recycling methods. *Waste Management*. 2021;137:231-240. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.019>.
- 3 Gomes COC. Processo de fabricação de tarugos pelo método Hot Top de ligas de alumínio da série 6XXX e as não conformidades desse processamento [trabalho de conclusão de curso]. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”; 2013.
- 4 Corrêa RD. Influência da redução do tempo de tratamento térmico de homogeneização contínua na microestrutura e qualidade metalúrgica de tarugos de alumínio, liga 6063 e diâmetro de 6” [dissertação]. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos; 2014.
- 5 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 16266: ligas de alumínio: tarugos homogeneizados das ligas da série 6xxx para produção de produtos extrudados: requisitos. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2022.
- 6 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 209: alumínio e suas ligas: composição química. Rio de Janeiro: ABNT; 2010.
- 7 Kato H, Cahoon JR. Inverse segregation in directionally solidified Al-Cu-Ti alloys with equiaxed grains. *Metallurgical Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science*. 1985;16(4):579-587. <https://doi.org/10.1007/BF02814231>.
- 8 Seo H, Gu J, Park K, Jung Y, Lee J, Chung W. Solidification and segregation behaviors in 6061 aluminum alloy. *Metals and Materials International*. 2013;19(3):433-438. <https://doi.org/10.1007/s12540-013-3008-8>.
- 9 Zhao X, Meng J, Zhang C, Wei W, Wu F, Zhang G. A novel method for improving the microstructure and the properties of Al-Si-Cu alloys prepared using rapid solidification/powder metallurgy. *Materials Today. Communications*. 2023;35:105802. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105802>.
- 10 Gao T, Li Z, Zhang Y, Qin J, Liu X. Phase evolution of  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi during recycling of Al-Si-Fe alloys by Mg melt. *International Journal of Metalcasting*. 2019;13(4):473-478. <https://doi.org/10.1007/s40962-018-0279-3>.

**Recebido em:** 1 Out. 2025

**Aceito em:** 21 Abr. 2026

**Editor responsável:**

Sabrina Arcaro 