

Análise do tratamento térmico de reaquecimento na evolução da fase eutética da liga AA356

Analysis of reheating heat treatment on the evolution of the eutectic phase of the AA356 alloy

¹Luis Vanderlei Torres

¹Doutor em Engenharia Mecânica – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo
(torres@ifsp.edu.br)

RESUMO: O processo de tixoconformação é uma das rotas mais promissoras do processamento de metais no estado semissólido, pois combina a precisão do processo de fundição e a integridade do processo de conformação, tendo como resultado a produção de peças com porosidade significativamente reduzida e propriedades mecânicas elevadas. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar o tratamento térmico de reaquecimento (globularização) na evolução da fase eutética da liga AA356 abrangendo duas rotas de produção, a saber: fundição convencional via estanque e fundição via refino de grão com agitação eletromagnética. Os resultados mais satisfatórios foram obtidos através da condição de fundição via refino de grão com agitação eletromagnética onde a condição fundida apresentou uma fase eutética de 30.2% e a condição tratada termicamente à temperatura semissólida 580 °C e tempo de espera de 0 s apresentou uma fase eutética de 20.9%, ou seja, uma redução de aproximadamente 30% nos valores da fase eutética após seu reaquecimento devido aos fenômenos de *Ostwald ripening* e de coalescência responsáveis pela transformação morfológica do material que atuam durante a temperatura semissólida.

Palavras Chave: Tixoconformação. Caracterização microestrutural. Liga de alumínio.

ABSTRACT: The thixoforming process is one of the most promising routes for semi-solid metal processing, combines the precision of the casting process and the integrity of the forming process, resulting in the production of parts with significantly reduced porosity and enhanced mechanical properties. Thus, this work aims to analyze of reheating heat treatment (globularization) on the evolution of the eutectic phase of the AA356 alloy, encompassing two production routes, namely: conventional casting and grain-refined with electromagnetic stirring casting. The most satisfactory results were obtained through the condition grain-refined with electromagnetic stirring casting, where the as-cast condition exhibited a eutectic phase of 30.2%, and the heat-treated condition at a semi-solid temperature of 580 °C and a holding time of 0 s exhibited a eutectic phase of 20.9%, meaning a reduction of approximately 30% in the eutectic phase values after reheating due to the phenomena of Ostwald ripening and coalescence responsible for the morphological transformation of the material that occur during the semisolid temperature.

Keywords: Thixoforming. Microstructural characterization. Aluminum alloy.

Recebido em:
12/09/2025
Revisado em:
17/03/2026
Publicado em:
27/04/2026

1. INTRODUÇÃO

A constante busca por maior eficiência, menor custo e melhoria na qualidade dos componentes metálicos tem impulsionado a inovação nos processos de fabricação. Dentro deste contexto, o processamento de metais no estado semissólido emergiu como uma tecnologia de ponta, tendo seu início na década de 70 (FLEMINGS, 1991; SPENCER *et al.*, 1972).

O processo de tixoconformação representa uma importante evolução em relação aos métodos tradicionais de fundição e conformação devido à tixotropia, ou seja, propriedade que certos fluidos não newtonianos exibem, onde a viscosidade diminui quando submetidos a uma tensão de cisalhamento ou agitação (estresse) por um período e retorna ao seu estado de alta

viscosidade (ou mesmo a um comportamento sólido) quando o estresse é removido (SPENCER, *et al.*, 1972; CHO e KANG, 2000; ATKINSON, 2005).

As etapas fundamentais do processo de tixoconformação incluem a obtenção de matéria-prima globular, reaquecimento controlado até a janela semissólida (*solidus-liquidus*) e conformação sob pressão; os equipamentos utilizados no processo de tixoconformação são as prensas hidráulicas para peças complexas e grandes e as prensas excêntricas para peças menos profundas e que requerem alta produtividade (FLEMINGS *et al.*, 1976).

O alumínio é o metal mais explorado no processo de tixoconformação devido ao seu equilíbrio entre leveza, resistência e versatilidade. A liga AA356 (Al-Si) é a mais empregada (95% das aplicações) devido à excelente fluidez proporcionada pelo silício, baixa temperatura de fusão e resposta a tratamentos térmicos; outras ligas de alumínio, como por exemplo, Al-Mg e Al-Zn (AA5XXX e AA7XXX) também são estudadas e utilizadas, especialmente quando busca-se uma resistência mecânica muito elevada (em ligas tratáveis termicamente) aproveitando o endurecimento por precipitação (ABAL, 2025).

Portanto, este trabalho tem como objetivo analisar o efeito do tratamento térmico de reaquecimento (globularização) na evolução da fase eutética da liga de alumínio AA356 abrangendo duas rotas de produção, a saber: fundição convencional em sistema estanque e fundição via refino de grão com agitação eletromagnética.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A matéria-prima utilizada neste trabalho foi a liga comercial de alumínio AA356 cuja composição química (*wt%* em peso) obtida por espectrometria de emissão óptica pode ser vista na Tabela 1. A escolha desta liga deve-se ao seu uso extensivo em componentes de manufatura para indústria automotiva e aeroespacial devido a suas propriedades físicas e mecânicas (SHIVKUMAR *et al.*, 1990; HERNÁNDEZ-PAZ *et al.*, 2004; HASKEL, 2009). A metodologia adotada possui as seguintes etapas: produção da matéria-prima, tratamento térmico de reaquecimento (globularização) e caracterização microestrutural.

Tabela 1 – Composição química da liga AA356 (*wt%* em peso) obtida via espectrometria de emissão óptica.

Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Ti	Al
6.96	0.38	0.19	0.08	0.02	<0.01	<0.01	Bal.

Fonte: Torres *et al.*, (2017).

A produção da matéria-prima ocorreu por duas rotas distintas: fundição convencional (FC) em sistema estanque (660 °C) e fundição com refino de grão e agitação eletromagnética (FRA), utilizando refinador Al5Ti1B e indutor eletromagnético de 8 kW (13 Gauss), produzindo lingotes com aproximadamente 250 mm de comprimento e 30 mm de diâmetro.

O tratamento térmico de reaquecimento (globularização) ocorreu em amostras (Ø30x25 mm) que foram reaquecidas em forno de indução (25 kW) a uma taxa de 80-100 °C/min até a temperatura semissólida de 580 °C (tempo de espera de 0 s), seguido de resfriamento em água; a escolha da temperatura semissólida e o tempo de espera deve-se aos resultados apresentados em trabalho anterior (TORRES e ZOQUI, 2021).

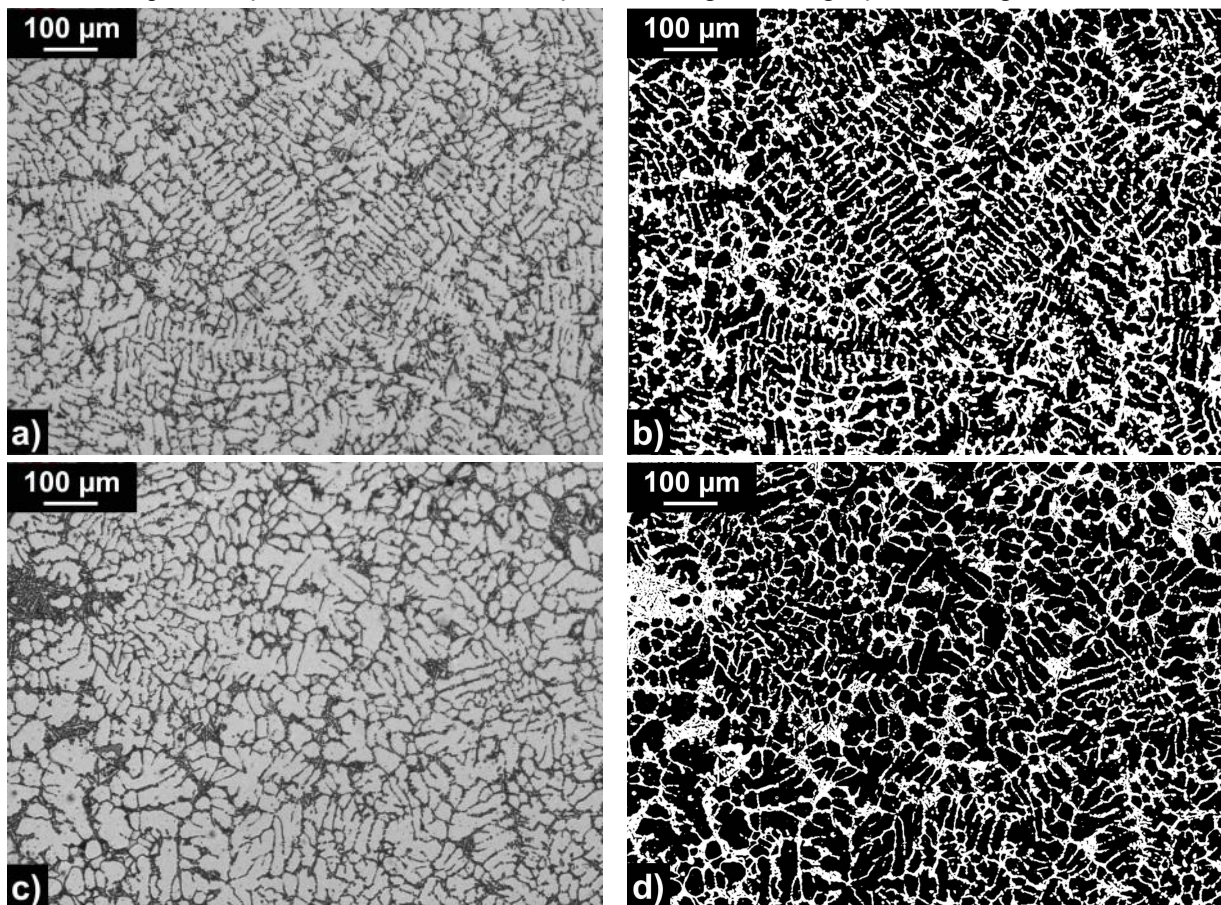
A microestrutura foi caracterizada via microscopia óptica, utilizando o método de interceptos de Heyn (ASTM E112) para o espaçamento dendrítico primário (λ_1) e o tamanho de glóbulo primário e o método de contagem manual de pontos (ASTM E562-19e1) via *software* ImageJ para a quantificação da fase eutética (ASTM, 1996; ASTM, 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo da microestrutura dos materiais é de grande relevância, visto que a partir do seu entendimento é possível obter correlações entre a microestrutura e as propriedades do material, assim, a utilização do *software* de processamento e análise de imagens ImageJ torna-se uma ferramenta eficaz para estes estudos (HANNICKEL *et al.*, 2012; TORRES e ZOQUI, 2021). Esta correlação pode ser mencionada com as propriedades mecânicas de resistência mecânica e ductilidade: (a) resistência mecânica (limite de resistência à tração) aumenta com o aumento da fração eutética (teor de silício), pois o silício é uma fase dura e frágil e sua presença em maior quantidade (maior fração eutética) aumenta a dureza do material; (b) ductilidade (alongamento) diminui com o aumento da fração eutética (teor de silício), pois o silício é frágil e uma maior quantidade de eutético cria um percurso mais fácil para a propagação de trincas, reduzindo a capacidade do material de se deformar plasticamente antes da fratura (CALLISTER, 2012).

Para tanto, o *software* de processamento e análise de imagens ImageJ 1.40g transforma a imagem obtida via microscopia óptica para uma imagem de 8 bits (níveis de cinza) para então obter a imagem binária e após a binarização da imagem, gera-se uma nova imagem que após segmentada, ocorre automaticamente o cálculo da área (em *pixels*) ocupada pela fase eutética e a divide pela área total da imagem, obtendo assim, a medida quantitativa da fase eutética, conforme visto nas Figuras 1(b, d) e 2(b, d). Salientando que o *software* de processamento e análise de imagens apresenta a fase eutética com a coloração branca e a fase primária α -Al com a coloração preta.

Figura 1 – Microestrutura da liga de alumínio AA356 - (a) fundição convencional, (b) quantificação da fase eutética via fundição convencional, (c) fundição via refino de grão com agitação eletromagnética e (d) quantificação da fase eutética via fundição refino de grão com agitação eletromagnética.



A microestrutura fundida da liga de alumínio AA356 (contendo cerca de 7wt% de silício) apresenta dendritas da fase primária α -Al (solução sólida rica em alumínio - coloração clara) e uma rede interdendrítica constituída pelo eutético Al-Si (fase eutética - coloração escura), conforme visto nas Figuras 1(a, c). Na condição fundida, as partículas de silício na fase eutética apresentam uma morfologia acicular (em forma de agulha ou placas finas e longas) de característica frágil e que pode prejudicar as propriedades mecânicas da liga; tem-se, que a fase eutética da liga de alumínio AA356 é o eutético Al-Si que se forma nos contornos das dendritas do alumínio.

Como visto no item materiais e métodos, para as contagens do espaçamento dendrítico primário e do tamanho de glóbulo primário foi utilizado o método dos interceptos de Heyn contabilizando vinte e cinco contagens para cada amostra, já para a quantificação da fase eutética foi utilizado o método de contagem manual de pontos, utilizando cinco micrografias de diferentes áreas da amostra.

Apesar da Tabela 2 apresentar diferenças relativamente pequenas entre os valores médios de espaçamento dendrítico primário, observa-se que a condição fundida convencionalmente Figura 1(a) apresenta uma microestrutura dendrítica muito fina, porém a condição fundida via refino de grão com agitação eletromagnética Figura 1(c) apresenta crescimento dendrítico, devido à utilização conjunta das duas técnicas de refino de grãos. Fato este é evidenciado por uma redução da fase eutética da liga de alumínio AA356 de 37.8% (FC) para 30.2% (FRA).

Assim, tem-se que a técnica via refino de grão (liga refinadora Al5Ti1B) acrescentada na fusão da matéria-prima auxilia no refinamento da liga, porém quando acrescentada a técnica via agitação eletromagnética o refinamento da liga torna-se muito mais eficaz, pois com a formação dos campos eletromagnéticos, as correntes elétricas induzidas pelo campo promovem uma forte agitação rompendo a estrutura em formação e estimulando a multiplicação cristalina, ocorrendo à diminuição da mesma, ou seja, somente com a escolha da rota de produção há uma queda de aproximadamente 20% da fase eutética para a condição fundida da liga de alumínio AA356.

Tabela 2 – Valores médios de tamanho de espaçamento dendrítico primário e da fase eutética para as condições fundidas.

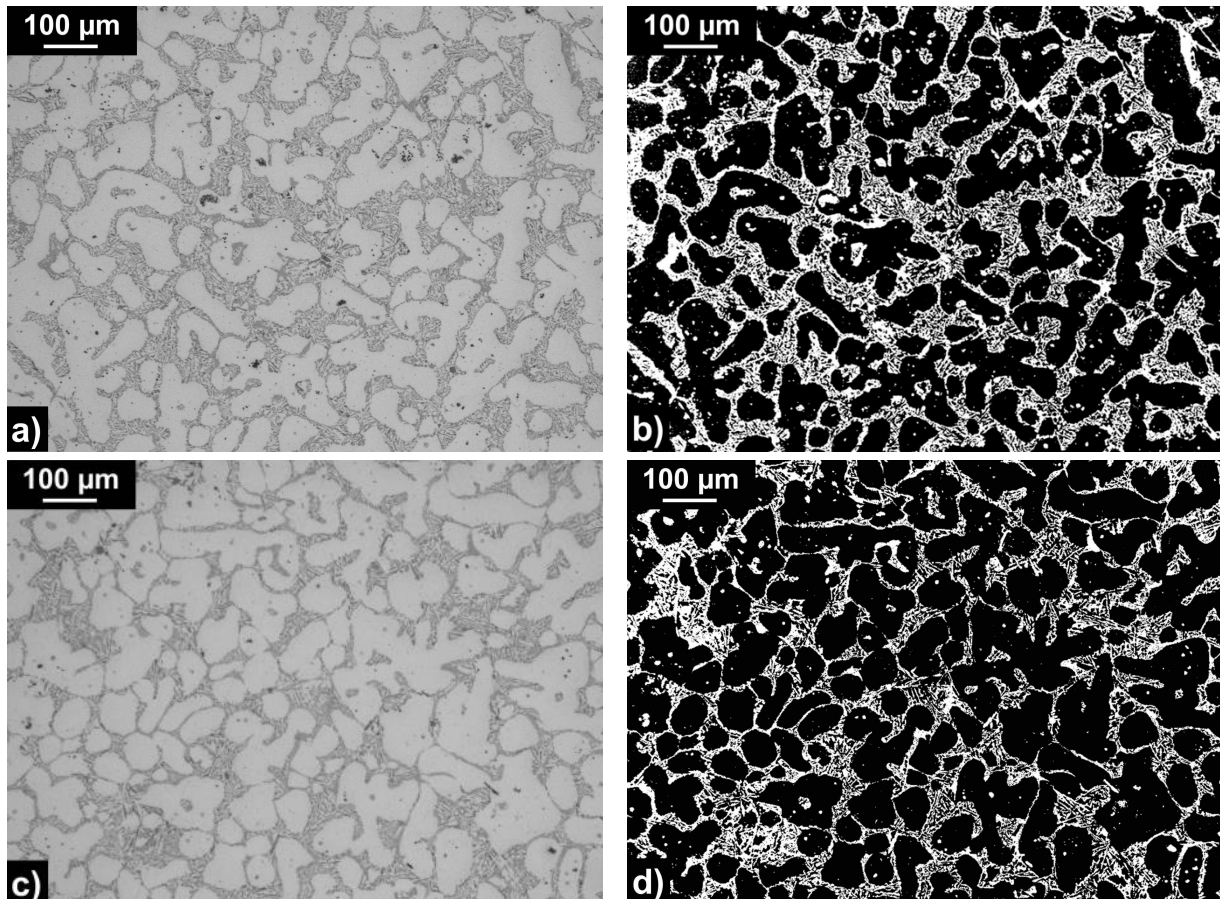
Condições	Espaçamento dendrítico primário (μm)	Fase eutética (%)
FC – fundida	31 ± 3	37.8 ± 2.4
FRA – fundida	34 ± 3	30.2 ± 1.9

Observa-se nas Figuras 2(a, c) que para o reaquecimento à temperatura semissólida de 580 °C e tempo de espera de 0 s a liga apresentou características propícias ao processamento semissólido, ou seja, não houve a necessidade de um tempo de espera prolongado, ocorrendo formação de glóbulos primários esféricos com tamanho médio de 111 μm para a condição de fundição convencional (FC) e 87 μm para a condição fundição via refino de grão com agitação eletromagnética (FRA), conforme a Tabela 3.

A formação da microestrutura globular ocorre devido aos mecanismos de *Ostwald ripening* e de coalescência, que atuam durante a temperatura semissólida, sendo estes os principais responsáveis pela transformação morfológica do material. Fato este ideal para o processo de tixotomização que visa uma microestrutura de grãos sólidos esféricos e não dendríticos dispersos em uma fase líquida. O mesmo fato observado para a condição fundida pode ser visto na Tabela 3 para a condição tratada termicamente à temperatura semissólida, com uma redução da fase eutética da liga de alumínio AA356 de 28.2% (FC) para 20.9% (FRA), ou seja, somente com a escolha da rota de produção há uma queda de

aproximadamente 25% da fase eutética para a condição tratada termicamente à temperatura semissólida da liga de alumínio AA356.

Figura 2 – Microestrutura da liga de alumínio AA356 - (a) fundição convencional tratada termicamente à temperatura semissólida, (b) quantificação da fase eutética via fundição convencional, (c) fundição via refino de grão com agitação eletromagnética tratada termicamente à temperatura semissólida e (d) quantificação da fase eutética via fundição refino de grão com agitação eletromagnética.



A Tabela 3 apresenta as duas diferentes rotas de produção e seu respectivo tratamento térmico de reaquecimento (globularização). Tem-se que a liga de alumínio AA356 apresenta novamente uma redução de sua fase eutética de aproximadamente 30%, ou seja, os mecanismos de *Ostwald ripening* e de coalescência, que atuam durante a temperatura semissólida, são os principais responsáveis por esta transformação morfológica. Sendo, que o mecanismo de *Ostwald ripening* consiste na dissolução de ramos menores, incorporação de soluto nos ramos maiores e difusão de soluto no líquido, tendo como resultado uma redução do número de ramos dendríticos e o aumento da distância entre eles (KATTAMIS *et al.*, 1967; KAHLWEIT, 1968) e o mecanismo de coalescência consiste na aglomeração de ramos dendríticos secundários (YOUNG, 1992; KIRKWOOD, 1994; GENDA *et al.*, 1987).

Tabela 3 – Valores médios de glóbulos primários e da fase eutética para as condições tratadas termicamente à temperatura semissólida.

Condições	Glóbulos primários (μm)	Fase eutética (%)
FC – semissólida	111 ± 15	28.2 ± 1.6
FRA – semissólida	87 ± 11	20.9 ± 1.1

Torres *et al.* (2024) analisando a tixoconformabilidade da liga Al4Si2.5Cu sob duas diferentes rotas de produção, ou seja, técnica via refino de grão e técnica via refino de grão com agitação eletromagnética no processo de tixoforjamento em prensa excêntrica, obteve resultados satisfatórios principalmente quando utilizado a rota de produção via refino de grão com agitação eletromagnética em termos microestruturais com tamanho de glóbulos primários pequenos uma vez que o campo eletromagnético utilizado impede o crescimento dendrítico devido à forte turbulência gerada no metal líquido que rompe a estrutura em formação e boas propriedades mecânicas com valores de limite de resistência à tração próximos a 200 MPa.

4. CONCLUSÕES

Tem-se que o processo de tixoconformação representa uma convergência bem-sucedida entre metalurgia e engenharia de processos ao oferecer uma combinação de alta integridade metalúrgica e eficiência de produção, apresentando como uma solução indispensável para a fabricação de componentes avançados em ligas de alto desempenho. A partir da análise do efeito do tratamento térmico de reaquecimento (globularização) na evolução da fase eutética da liga de alumínio AA356 sob duas diferentes rotas de produção, têm-se as seguintes conclusões:

- A quantificação da fase eutética através do emprego da norma ASTM E562-19e1 por meio do *software* de processamento e análise de imagens ImageJ mostrou-se eficaz, devido a ser é um método crucial para validar modelos teóricos e avaliar os efeitos ocorridos no material;
- A utilização em conjunto da técnica via refino de grão (liga refinadora Al5Ti1B) com a técnica via agitação eletromagnética torna o refinamento da liga de alumínio AA356 sob a condição fundida muito mais eficaz, apresentando uma redução de aproximadamente 20% da fase eutética;
- Quando comparado as diferentes rotas de produção e seu respectivo tratamento térmico de reaquecimento (globularização), a liga de alumínio AA356 apresenta uma redução de sua fase eutética de aproximadamente 30%, ou seja, os mecanismos de *Ostwald ripening* e de coalescência, que atuam durante a temperatura semissólida, são os principais responsáveis por esta transformação morfológica.

5. AGRADECIMENTOS

Ao IFSP - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo *campus* Bragança Paulista e ao DEMM/FEM/UNICAMP - Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas pelo suporte técnico.

6. REFERÊNCIAS

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. São Paulo, 2025. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acesso em: 10 nov. 2025.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112: standard test methods for determining average grain size**. West Conshohocken, 1996. 26p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E562-19e1 standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count**. West Conshohocken, 2020. 7p.

ATKINSON, H. V. Modeling the semi-solid processing of metallic alloys. **Progress in Materials Science**, v. 50, p. 341-412, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.04.003>

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHO, W. G.; KANG, C. G. Mechanical properties and their microstructure evaluation in the thixoforming process of semi-solid aluminum alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 105, n. 3, p. 269-277, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00577-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00577-X)

FLEMINGS, M. C.; RIEK, R. G.; YOUNG, K. P. Rheocasting processes. **Materials Science and Engineering**, 1976, v. 25, p. 103-17. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(76\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0025-5416(76)90057-4)

FLEMINGS, M. C. Behavior of metal alloys in the semi-solid state. **Metallurgical Transactions**, v. 22A, p. 957-981, 1991. <https://doi.org/10.1007/BF02661090>

GENDA, G.; YUYON, C.; GEING, A. Mechanism of coarsening of dendrite during solidification. In: **Proceedings of the solidification processing conference**. Sheffield: 1987. p. 416-419.

HANNICKEL, A.; DA SILVA, M. H. P.; BARROS, H. L.; ALBUQUERQUE, M. P. Image J como ferramenta para medida da área de partículas de magnetita em três escalas nanométricas. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 29, p.16-26, 2012.

HASKEL, T. **Efeito do tratamento térmico de solubilização na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga de alumínio A356**. 2009. Dissertação (Mestrado). 115f. Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2002.

HERNÁNDEZ-PAZ, J. F.; PARAY, F.; GRUZLESKI, J. E. Natural aging and heat treatment of A356 aluminium alloy. **AFS Transactions**, v. 4-9, p. 1-10, 2004.

KAHLWEIT, M. On the ageing of dendrites. **Scripta Metallurgica**, v. 2, p. 251-254, 1968.

KATTAMIS, T. Z.; COUGHIN, J. L.; FLEMINGS, M. C. Influence of coarsening on dendritic arm spacing of Al-Cu alloys. **Transactions of the Metallurgical Society of AIME**, v. 239, p. 1504-1511, 1967.

KIRKWOOD, M. C. Semi-solid metal processing. **International Materials Reviews**, v. 39, p. 173-189, 1994. <https://doi.org/10.1179/imr.1994.39.5.173>

SHIVKUMAR, S.; RICCI, S.; KELLER, C.; APELIAN, D. Effect of solution treatment parameters on tensile properties of cast aluminum alloys. **Journal of Heat Treating**, v. 8, n.1, p. 63-70, 1990. <https://doi.org/10.1007/BF02833067>

SPENCER, D. B.; MEHRABIAN, R.; FLEMINGS, M. C. Rheological behavior of Sn-15%Pb in the crystallization range. **Metallurgical Transactions**, v. 3, p. 1925-1932, 1972. <https://doi.org/10.1007/BF02642580>.

TORRES, L. V.; TORRES, L. F.; ZOQUI, E. J. Microstructural characterization of the A356 alloy in different processing routes used in the thixoforming process. **Revista Matéria**, v. 22, n. 4, e11893, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170004.0227>

TORRES, L. V.; ZOQUI, E. J. Caracterização de parâmetros metalúrgicos de ligas semissólidas através de software de imagem. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 3, 2019.

TORRES, L. V.; ZOQUI, E. J. Otimização do processamento da matéria-prima semissólida AA356. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 18, e2227, 2021. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20212227>

TORRES, L. V.; RUIZ, C. S.; ZOQUI, E. J. Refino de grão versus agitação eletromagnética: caracterização microestrutural e mecânica da liga Al4Si2.5Cu tixoforjada. **Revista Matéria**, v. 29, n. 2, e-20240038, 2024. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0038>

YOUNG, K. Semi-solid metal forming alloy and composites. In: **Proceedings of the minerals, metals and materials society symposium on nature and properties of semi-solid materials**. San Diego: 1992. p. 245-266.

NOTAS

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Concepção e elaboração do manuscrito: L. V. Torres

Coleta de dados: L. V. Torres

Análise de dados: L. V. Torres

Discussão dos resultados: L. V. Torres

Revisão e aprovação: L. V. Torres

PREPRINTS

O manuscrito não é um preprint.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

DISPONIBILIDADE DE DADOS DE PESQUISA E OUTROS MATERIAIS

Os dados foram publicados no próprio artigo. Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo está incluído no corpo do artigo.

ANUÊNCIA DE AVALIAÇÃO ABERTA

Não respondido. Opção dada após avaliação ter sido feita.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.