


# Otimização do processamento da matéria-prima semissólida AA356

Luis Vanderlei Torres <sup>1,2\*</sup>   
Eugênio José Zoqui <sup>2</sup>

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo a análise microestrutural da liga AA356 produzida via técnica de ultra-refino de grão aliada à agitação eletromagnética e conseqüentemente seu reaquecimento à temperatura semissólida. A liga sob a condição fundida apresenta uma estrutura hipoeutética, ou seja, constituida de uma fase primária de  $\alpha$ -Al e uma rede interdendrítica de eutético Al-Si com tamanho médio de espaçamento dendrítico primário de 34  $\mu\text{m}$ . Após o reaquecimento da liga à temperatura semissólida de 580 °C e com tempo de espera de 0 s, tem-se uma estrutura globular com tamanho médio de glóbulo primário de 87  $\mu\text{m}$ . Portanto, a utilização da técnica de ultra-refino de grão aliada à agitação eletromagnética torna-se eficaz ao processo de tixoconformação.

**Palavras-chave:** Tixoconformação; Material semissólido; Liga AA356.

## Optimization of semisolid AA356 raw material processing

### Abstract

This work aims at the microstructural analysis of the AA356 alloy, through the grain ultra-refinement technique combined with electromagnetic stirring and, consequently, its reheating to a semisolid temperature. An alloy under the background condition has a hypoeutectic structure, that is,  $\alpha$ -Al primary phase and an interdendritic network of eutectic Al-Si with an average primary dendritic spacing size of 34  $\mu\text{m}$ . After reheating the alloy to a semisolid temperature of 580 °C and time of 0 s, it can be a globular structure with an average primary globule size of 87  $\mu\text{m}$ . Therefore, the use of the grain ultra-refinement technique combined with electromagnetic stirring becomes effective in the thixoforming process.

**Keywords:** Thixoforming; Semisolid material; AA356 alloy.

### 1 Introdução

O alumínio e suas ligas constituem um dos grupos de materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atrativos dentre todos os metais. O alumínio possui uma densidade de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, aproximadamente um terço da densidade do aço, o que somado à sua elevada resistência mecânica torna-o bastante útil para as indústrias automotiva e aeronáutica. As ligas de alumínio são geralmente divididas em duas categorias: ligas trabalhadas destinadas ao trabalho mecânico e ligas fundidas destinadas à produção de componentes via fundição; cada uma dessas categorias subdivide-se em diversas classes de acordo com sua composição química e entre as ligas fundidas encontram-se as ligas comerciais do sistema Al-Si. Assim, as ligas Al-Si são divididas em três grupos conforme o teor de silício presente em sua composição, a saber: ligas hipoeutéticas com teor de silício entre 5% e

10%, ligas eutéticas com teor de silício entre 11% e 13% e ligas hipereutéticas com teor de silício acima de 13% [1,2].

O processo de tixoconformação, ou seja, tecnologia que se aplica à obtenção de componentes a partir da conformação de ligas no estado semissólido tem ganhado mercado e importância nos últimos anos pelas suas inúmeras vantagens em relação aos processos convencionais de fabricação, a saber: alta produtividade, obtenção de microestruturas refinadas, boas propriedades mecânicas, entre outras [3-6]. Dentre as matérias-primas empregadas nos processos de tixoconformação, as ligas fundidas de alumínio, especialmente as ligas Al-Si (AA356 e AA357) são as mais representativas, ocupando aproximadamente 95% de todas as aplicações [7]. Assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar microestruturalmente a liga

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP, Bragança Paulista, SP, Brasil.

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

\*Autor correspondente: torres@ifsp.edu.br



AA356 produzida via técnica de ultra-refino de grão aliada à agitação eletromagnética e conseqüentemente seu reaquecimento à temperatura semissólida de 580 °C e com tempo de espera de 0 s, afim de, obter uma estrutura globular e homogênea.

## 2 Materiais e métodos

Este trabalho visa analisar a matéria-prima produzida via técnica de ultra-refino de grão aliada à agitação eletromagnética e conseqüentemente seu reaquecimento à temperatura semissólida via microscopia óptica, segundo a mesma metodologia adotada em trabalho anterior [8].

### 2.1 Matéria-prima e caracterização termodinâmica

O material utilizado 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 a alguns fatores, a saber: (a) é uma liga de amplo uso comercial, principalmente nas indústrias automotiva e aeronáutica, por apresentar boas propriedades mecânicas e (b) possui um bom intervalo entre a temperatura *solidus* e a temperatura *liquidus*, valor que permite o controle dos parâmetros de processo durante o processamento semissólido.

As temperaturas *solidus* e *liquidus* foram obtidas via *software* de simulação Thermo-Calc® através da composição química da liga, sendo a temperatura *solidus* 557 °C e a temperatura *liquidus* 612 °C [8]; neste intervalo de temperatura, a liga encontra-se em equilíbrio entre as fases sólida e líquida e conseqüentemente apresenta estrutura globular. Segundo trabalhos anteriores [10,11] os melhores resultados do processamento da matéria-prima foram obtidos utilizando a temperatura semissólida de 580 °C, cuja fração sólida é de 45%.

### 2.2 Produção da liga e caracterização microestrutural

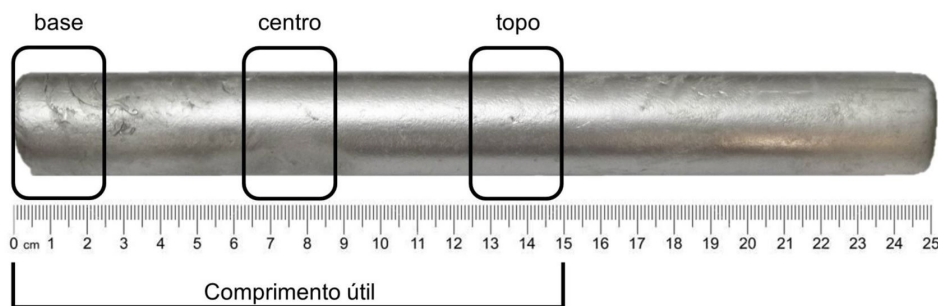
A liga de alumínio AA356 foi aquecida até a temperatura de 660 °C para a sua completa fusão em um forno resistivo do tipo poço, dentro de cadinhos de carbetto de silício pré-isolados com cimento tipo QF180 (silício-aluminoso), foi adicionado a liga refinadora de grão (Al-5wt%Ti-1wt%B) e após sua total dissolução, o material foi transferido ao sistema de lingotamento estanque, onde o indutor eletromagnético e a matriz de solidificação (lingoteira metálica) estavam preparados para receber o material, ou seja, o indutor eletromagnético encontrava-se com a potência de 8 kWatts (produzindo um campo magnético de aproximadamente 13 Gauss) e a lingoteira estava com pó de grafite em sua parede interna para que o lingote produzido fosse desmoldado com facilidade; a lingoteira possuía ainda um sistema de refrigeração com uma vazão de 10 l/min [8]; produzindo lingotes com aproximadamente 250 mm de comprimento e 30 mm de diâmetro, porém o comprimento útil do lingote foi de 150 mm devido ao campo eletromagnético exercido pelo indutor eletromagnético.

Na seqüência, foram retiradas três amostras do lingote, ou seja, base, centro e topo em seu sentido longitudinal, com dimensões de 25 mm de altura e 30 mm de diâmetro para verificação da homogeneidade do material em relação à sua microestrutura, conforme visto na Figura 1. As amostras foram lixadas, polidas e atacadas com ácido fluorídrico (1 ml de HF e 99 ml de H<sub>2</sub>O) durante 10 s, posteriormente para a aquisição das imagens foi utilizado um microscópio óptico Leica DM ILM. Para as medições do tamanho de espaçamento dendrítico primário ( $\lambda_1$ ) e do tamanho de glóbulo primário empregou-se o Método dos Interceptos de Heyn regido pela norma ASTM E112 [12].

**Tabela 1.** Composição química da liga AA356 (wt% em peso): obtida via literatura [9] e obtida via espectrometria de emissão óptica [8]

Liga	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Ti	Al
AA356 [9]	6.50-7.50	0.25-0.45	0-0.20	0-0.20	0-0.10	0-0.10	0-0.20	Bal.
AA356 [8]	6.96	0.38	0.19	0.08	0.02	<0.01	<0.01	Bal.

Bal.: Balanço.



**Figura 1.** Regiões analisadas na verificação da homogeneidade do lingote produzido em relação à sua microestrutura: base, centro e topo.

### 2.3 Reaquecimento ao estado semissólido e tratamento isotérmico

Amostras com 25 mm de altura e 30 mm de diâmetro foram reaquecidas até a temperatura semissólida de 580 °C com tempo de espera de 0 s, ou seja, após atingir a temperatura a amostra foi imediatamente resfriada em água, com o intuito de se analisar as alterações morfológicas durante seu reaquecimento. Para tanto, foi utilizado um forno de indução da empresa Norax Canada Inc. de 25 kWatts / 8 kHz com uma taxa de aquecimento de 80 a 100 °C/min.; sendo a amostra reaquecida até a temperatura desejada em cerca de 7 minutos. O aquecimento indutivo é atualmente o método comumente empregado na etapa de reaquecimento em aplicações comerciais de tixoconformação [13,14].

### 3 Resultados e discussão

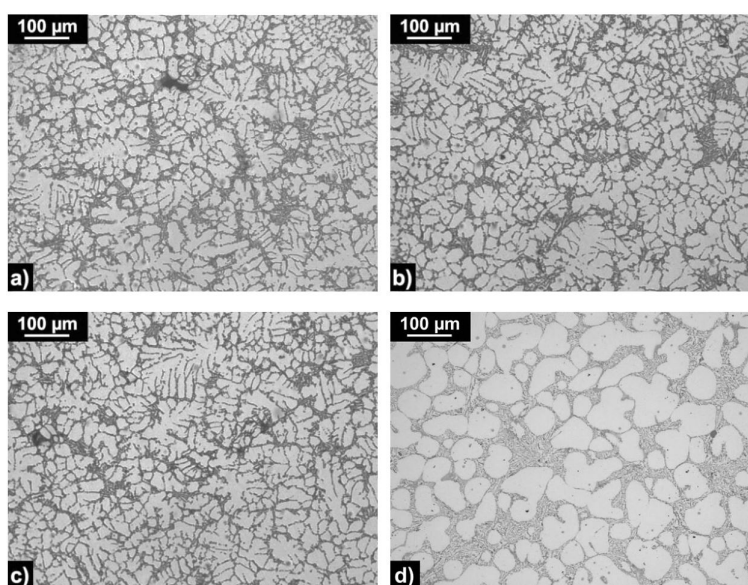
Na Figura 2, encontram-se as microestruturas da liga AA356 nas diferentes regiões analisadas do lingote apresentando uma estrutura hipoeutética típica de solidificação, ou seja, contendo uma fase primária de  $\alpha$ -Al (fase clara) e uma rede interdendrítica de eutético Al-Si (fase escura) com contornos bem definidos. O crescimento dendrítico é evidente, no entanto, devido à alta taxa de solidificação imposta pelo sistema de refrigeração da lingoteira e à agitação eletromagnética, o espaçamento dendrítico primário mostrou-se pequeno, na ordem de 34  $\mu\text{m}$  (média das três regiões analisadas) [8]; na

Tabela 2 encontram-se os valores médios de tamanho de espaçamento dendrítico primário como também os valores médios de glóbulos primários.

Observa-se na Figura 2d que o reaquecimento à temperatura semissólida de 580 °C e tempo de espera de 0 s mostrou-se eficaz, promovendo a formação de glóbulos primários esféricos e com tamanho médio de 87  $\mu\text{m}$ , mesmo para o tempo de tratamento de 0 s, 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; observa-se também partículas grandes devido à coalescência de dois ou mais glóbulos primários. Esta formação de glóbulos primários praticamente esféricos ocorre devido à agitação promovida no líquido em solidificação pela ação de fortes campos eletromagnéticos. As correntes induzidas pelo campo promovem uma forte agitação, rompendo a estrutura dendrítica em formação e estimulando a multiplicação cristalina e sua consequente globularização [15]. Sabe-se que a principal característica das ligas utilizadas no processo de tixoconformação é a viscosidade, sendo justificada pelo tamanho e pela interação entre as partículas da fase primária, que deve ser constituída por grãos pequenos e os mais globulares possíveis. Isto se deve à interação entre as partículas que, quando submetidas a uma deformação movem-se com mais facilidade, primeiro por serem globulares e segundo por estarem envoltas em líquido eutético. O mesmo não ocorre com as partículas dendríticas que, ao serem deformadas,

**Tabela 2.** Valores médios de tamanho de espaçamento dendrítico primário ( $\lambda_1$ ) e valores médios de glóbulos primários

Tamanho de espaçamento dendrítico primário ( $\mu\text{m}$ )			Tamanho de glóbulos primários ( $\mu\text{m}$ )
Base	Centro	Topo	
33 $\pm$ 3	34 $\pm$ 3	35 $\pm$ 4	87 $\pm$ 11



**Figura 2.** Microestrutura da liga AA356 nas regiões analisadas: (a) base, (b) centro, (c) topo e (d) tratada termicamente à temperatura semissólida de 580 °C.

exigem mais esforços, devido à interação entre seus ramos dendríticos [16].

Zoqui *et al.* [10] analisou o efeito da agitação eletromagnética na liga AA356 com diferentes campos eletromagnéticos (potência), a saber, 600 Watts, 900 Watts e 1200 Watts utilizando a mesma temperatura semissólida e o mesmo tempo de espera de 0 s, obtendo tamanhos médios de glóbulos primários abaixo de 100  $\mu\text{m}$ , porém valores maiores do que o obtido neste trabalho; observaram também que com o aumento do campo eletromagnético (potência) há uma queda gradativa no tamanho médio de glóbulo primário, devido ao aumento da turbulência criada no metal semissólido quebrando de forma mais eficiente os núcleos sólidos em formação. Torres [17] trabalhando com a liga Al7Si2.5Cu (similar à liga deste estudo - com o incremento do elemento Cu) observou as mesmas características, ou seja, com o uso da técnica de ultra-refino de grão juntamente com a agitação eletromagnética obteve glóbulos primários esféricos. Silva [18] em seus estudos com a liga semissólida AA356 extrudada observou que após o tratamento de reaquecimento, o material apresentou uma microestrutura totalmente globular. Assim, o entendimento do comportamento morfológico do material semissólido é muito importante para o processo de tixoconformação, pois este tem influência direta na viscosidade da pasta metálica como também nas propriedades finais do produto conformado [11].

## Referências

- 1 Associação Brasileira do Alumínio – ABAL [página da internet]. São Paulo: ABAL; 2019 [acesso em 25 jan. 2020]. Disponível em: <http://www.abal.org.br>.
- 2 Hernández-Paz JF, Paray F, Gruzleski JE. Natural aging and heat treatment of A356 aluminium alloy. *AFS Transacti.* 2004;04-009(02):1-10.
- 3 Spencer DB, Mehrabian R, Flemings MC. Rheological behavior of Sn-15%Pb in the crystallization range. *Metallurgical Transactions.* 1972;3:1925-1932.
- 4 Flemings MC, Riek RG, Young KP. Rheocasting processes. *AFS International Cast Metals Journal.* 1976;1:11-22.
- 5 Flemings MC. Behavior of metal alloys in the semi-solid state. *Metallurgical Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science.* 1991;22:957-981.
- 6 Atkinson HV. Modeling the semi-solid processing of metallic alloys. *Progress in Materials Science.* 2005;50:341-412.
- 7 Chiarmetta G. Why thixo? In: *Proceedings of the VI International Conference on the Semi-solid Processing of Alloys and Composites*; 2000 September 27-29; Turin, Itália. Turin: Edimet; 2000. p. 15-21.
- 8 Torres LV, Torres LF, Zoqui EJ. Microstructural characterization of the A356 alloy in different processing routes used in the thixoforming process. *Revista Matéria.* 2017;22(4):e-11893.
- 9 American Society for Metals – ASM. *Handbook ASM.* USA: ASM International; 1992. (vol. 15, Casting).
- 10 Zoqui EJ, Shehata MT, Paes M, Kao V, Es-sadiqui E. Morphological evolution of SSM A356 during partial remelting. *Materials Science and Engineering.* 2002;A325:38-53.
- 11 Campo KN. *Uso da extrusão em canal angular na produção da liga A356 para tixoconformação [dissertação].* Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2014.
- 12 American Society for Testing and Materials – ASTM. *ASTM E112: standard test methods for determining average grain size.* ASTM: West Conshohocken; 1996.

## 4 Conclusões

As seguintes conclusões podem ser extraídas deste trabalho:

- a) O processamento da liga comercial de alumínio AA356 via técnica de ultra-refino de grão aliada à agitação eletromagnética mostrou-se eficaz, uma vez que ao analisar diferentes regiões do lingote, houve grande homogeneidade em sua microestrutura, apresentando tamanhos médios de espaçamento dendrítico primário de 34  $\mu\text{m}$ ;
- b) O reaquecimento à temperatura semissólida de 580 °C e com tempo de espera de 0 s proporcionou uma estrutura com glóbulos primários esféricos e com tamanho médio de 87  $\mu\text{m}$  devido aos mecanismos de *ostwald ripening* e de coalescência.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (projeto 2009/08478-1), ao Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - DEMM/FEM/UNICAMP e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP, campus Bragança Paulista.

- 13 Jiang H, Nguyen TH, Prud'homme M. Optimal control of induction heating for semi-solid aluminum alloy forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;189:182-191.
- 14 Kirkwood DH, Suéry M, Kapranos DP, Atkinson HV, Young KP. *Semi-solid processing of alloys*. Berlin: Springer; 2010. 172 p. (Springer Series in Materials Science).
- 15 Zoqui EJ. *Obtenção e caracterização de Ligas Al-Si reofundidas [livre docência]*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2001.
- 16 Beil WL. *Projeto e montagem de um sistema para lingotamento contínuo sob agitação eletromagnética para ligas de Al-Si [dissertação]*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2015.
- 17 Torres LV. *Tixoconformação de novas ligas Al-Si-Cu [tese]*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2013.
- 18 Silva VF. *Comportamento da liga de alumínio A356-T6 fundida e tixoextrudada sob fadiga isotérmica e termomecânica [tese]*. São Carlos: Universidade de São Paulo; 2004.

Recebido em: 28 Out. 2019

Aceito em: 6 Abr. 2020