

## ANÁLISE DO REFINO DE GRÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO EUTÉTICO ATRAVÉS DA CURVA DE RESFRIAMENTO

Tarcila Pedrozo Benemann<sup>1</sup>, Mario Wolfart Junior<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IFC / tarcila.benemann@gmail.com

<sup>2</sup>IFC / mario.wolfart@ifc.edu.br

*Resumo: As ligas Al-Si apresentam excelentes propriedades de fundição, como baixo ponto de fusão e alta fluidez, tendo grande importância na indústria de fundição. É indesejável na maioria das aplicações de produtos fundidos uma estrutura apresentando grãos colunares e o refino de grão tem como objetivo suprimir a formação destes grãos obtendo uma estrutura equiaxial de granulação fina que melhora as condições de alimentação do metal líquido e as propriedades mecânicas. O tipo e tamanho de grãos formados são determinados pela composição química, taxa de resfriamento e pelo uso de inoculadores para refino de grão. A avaliação do refino geralmente é feita por meio de análise metalográfica, ou seja, após a preparação da amostra essa é analisada por um especialista. A proposta da análise térmica é justamente diminuir a necessidade da avaliação de um especialista, contribuindo com a diminuição de custos e aumento da confiabilidade dos resultados. O objetivo deste trabalho foi o estudo das informações obtidas das curvas de resfriamento e primeira derivada destas curvas para a obtenção dos parâmetros térmicos que influenciam o processo de refino de grão da liga A269. Foram obtidas amostras a partir do vazamento da liga com e sem a adição de inoculante na forma da liga mãe Al-3%Ti-1%B adicionada para se obter um teor nominal de 0,05%Ti. As curvas de resfriamento foram obtidas a partir de termopares inseridos no centro do molde conectados por meio de uma placa microcontrolada a um computador. O software ViewDuino executava ações de coleta de dados e cálculo da derivada. Os resultados mostram que a adição do refinador ocasionou diminuição significativa dos grãos reduzindo o tempo de nucleação da fase  $\alpha$ -Al e do eutético observados na extensão dos patamares, no eixo da abscissa na curva de resfriamento ao comparar com a curva de resfriamento para a liga sem inoculante.*

*Palavras-Chave: Refino de grão, Curva de resfriamento, Liga A269.*

### 1. INTRODUÇÃO

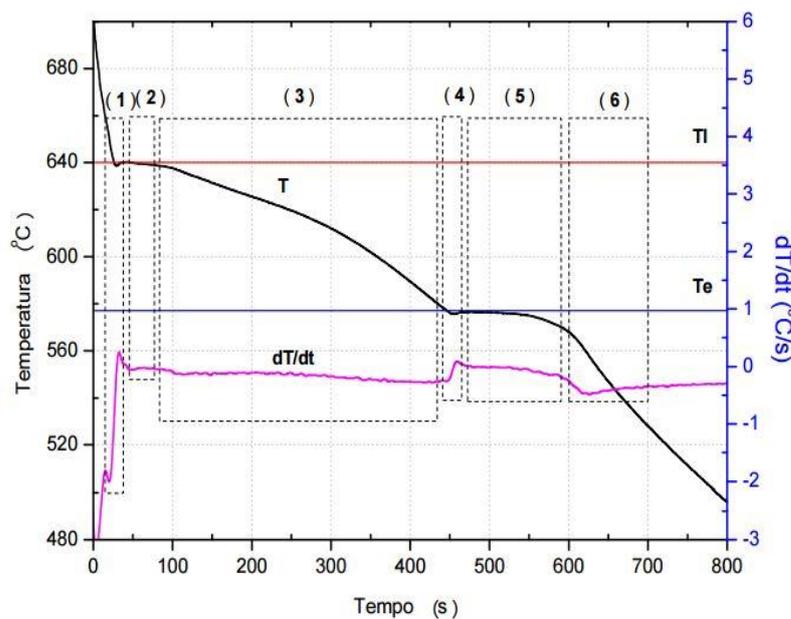
O alumínio e suas ligas constituem um dos materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atrativos para uma vasta série de aplicações, sendo empregado em processos de fundição devido à: excelente fluidez, baixo ponto de fusão e alto coeficiente de transferência de calor, o que permite ciclos rápidos de fundição (ARAÚJO, 2012).

Um dos indicadores das propriedades mecânicas de uma liga de alumínio é o tamanho de grão, pois, grãos mais refinados apresentam uma microestrutura totalmente equiaxial, melhorando a alimentação durante o vazamento do metal líquido, reduzindo a trinca a quente e melhorando a usinabilidade do material fundido (SILVA, 2012).

A avaliação do refino geralmente é feita por meio de análise metalográfica, ou seja, após a preparação da amostra esta é analisada por um especialista. A proposta da análise térmica é justamente diminuir a necessidade da avaliação de um especialista, contribuindo com a diminuição de custos e aumento da confiabilidade dos resultados.

A análise térmica é uma ferramenta que pode ser empregada para classificar se houve ou não refino de grão. Em resumo, essa análise considera a curva de resfriamento da liga em questão e sua derivada, com enfoque em eventos energéticos que ocorrem durante a solidificação.

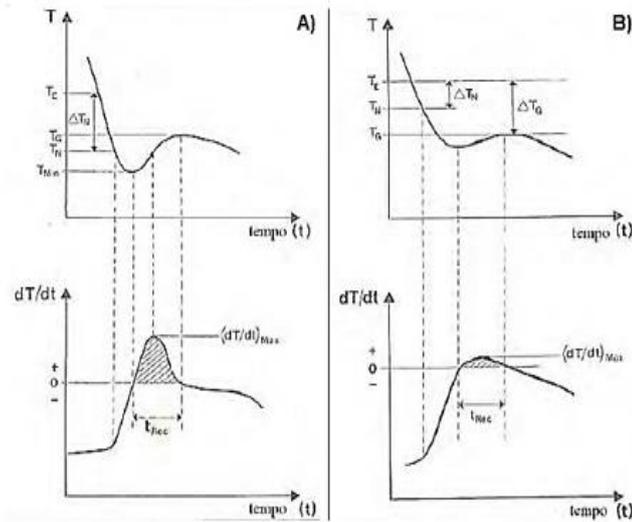
Conforme a Figura 1 ilustra, cada região representa um aspecto relevante sob perspectiva da metalurgia. Segundo Arango e Martorano (2011), a região 1, denominada região da recalescência - elevação súbita e espontânea da temperatura durante o resfriamento (MICHAELIS, 2017) - representa a nucleação e livre crescimento dos grãos de alumínio e no máximo valor da derivada, tem-se uma rápida liberação de calor latente. Já na região 4 tem-se a nucleação do silício indicando o início da solidificação do eutético, ocorrendo um rápido aumento na derivada e a região 5 a continuação do crescimento do silício e também do alumínio contido no eutético.



**Figura 1:** Curva de resfriamento típica de um sistema Al-Si e sua primeira derivada. Fonte: ARANGO; MARTORANO (2011)

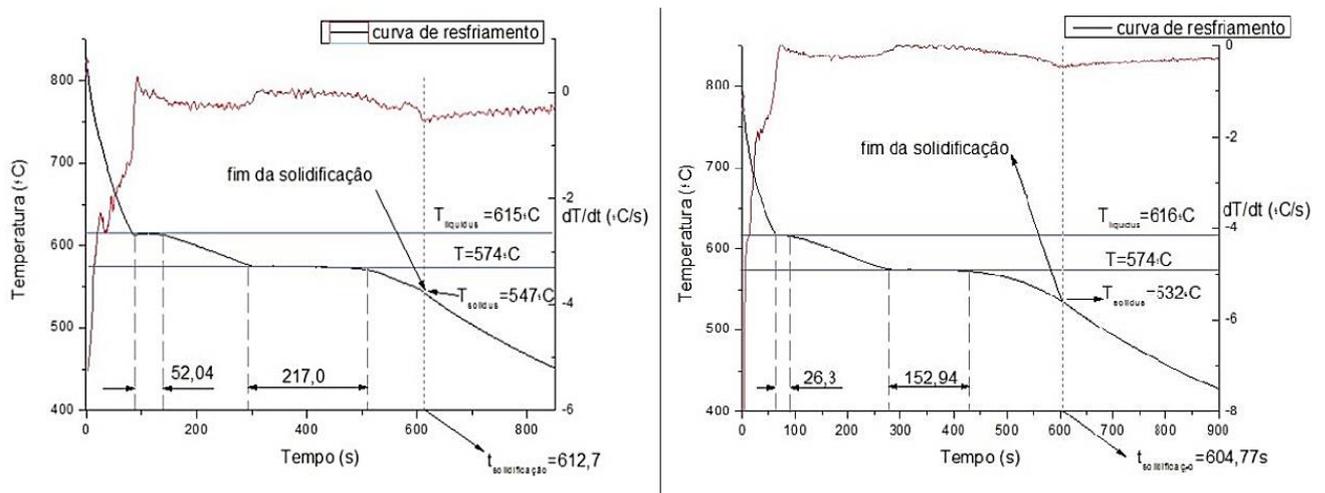
As recalescências apresentadas na Figura 1 (Região 1 e 4) referem-se respectivamente a temperatura *liquidus*, resultante da formação da fase  $\alpha$ -Al e a temperatura do eutético, resultante da reação eutética.

Além disso, a região 1 encontra-se destacada na Figura 2 para um metal fundido sem refinador (A) e com refinador (B), sendo possível observar que as curvas apresentam um vale na recalescência ( $\Delta T$ ) e um pico na derivada ( $dT/dt$ ) menor após o refino de grão (SILVA, 2012).



**Figura 2:** A) Início da curva de resfriamento e sua derivada para um metal fundido e B) Início da curva de resfriamento e sua derivada para um metal fundido com adição de refinador de grão - partículas de titânio e boro. Fonte: Adaptado de SILVA (2012)

Conforme Lima (2011) observou, a adição do inoculante resulta em uma redução do tempo de nucleação de fase  $\alpha$ -Al e do eutético, observados na extensão dos patamares, no eixo da abscissa na curva de resfriamento (Figura 3).



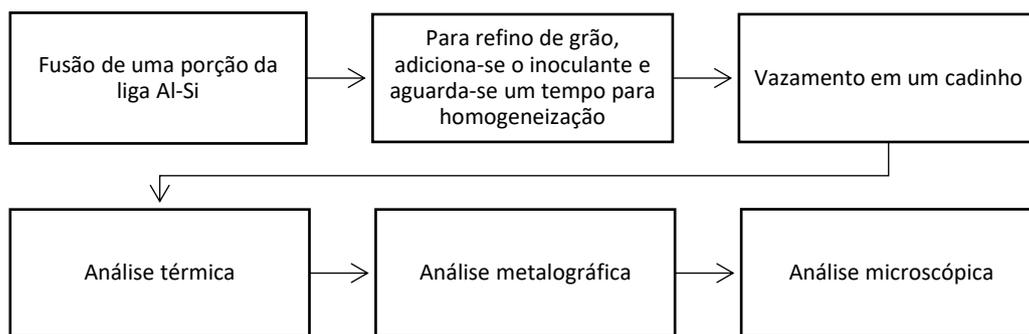
**Figura 3:** Comparação entre as curvas de resfriamento para a liga AA 356 sem e com a inoculação do refinador Al-Ti-B em molde de areia: o tempo de nucleação de fase  $\alpha$ -Al sem adição de inoculante era de 52,04s e com adição caiu para 26,3s; já o tempo do eutético era de 217s sem adição de inoculante e caiu para 152,94s com a adição. Fonte: Adaptado de LIMA (2011)

Outra informação relevante apontada por Arango e Martorano (2011) é que ocorre uma perda de eficiência de inoculação com o aumento do teor de silício, sendo que, esta diferença é mencionada na literatura para teores de Si acima de 3% como um “envenenamento” do inoculante pelo Si. Uma das teorias fundamenta-se na ideia de que se forma sobre as partículas inoculantes uma camada de uma fase que não é um substrato eficiente para nucleação.

O objetivo desse trabalho foi o estudo das informações obtidas das curvas de resfriamento e primeira derivada desta, para a obtenção dos parâmetros térmicos que influenciam o processo de refino de grão da liga A269 e permitem afirmar se houve ou não refino de grão.

## 2. METODOLOGIA/DESENVOLVIMENTO

Abaixo é apresentado o fluxograma (Figura 4) do processo de fusão que ilustra as principais atividades desenvolvidas:



**Figura 4:** Fluxograma do processo de fundição da liga 269 e refino de grão com ante liga Al-Ti-B (Elaborada pelos autores).

A liga A269, cuja análise química consta na Tabela 1, foi cedida pela empresa SUMESA (Sulina de Metais S/A), em forma de lingotes.

**Tabela 1:** Análise química da liga A269

Elemento	Si	Fe	Cu	Mg	Sr	Sb
Porcentagem (%)	11,92	0,355	1,24	0,99	<0,0001	<0,025

Fonte: SUMESA, 2014

A liga A 269 foi fundida em cacinho de grafite inserido em um forno do tipo mufla programado para uma temperatura de fusão final de 850 °C. O vazamento foi realizado em um sistema

de solidificação composto por um molde de cavidade cilíndrica de aço inoxidável Al-Si 304 e por um sistema de aquisição de dados utilizado para o registro das curvas de resfriamento. Os termopares tipo K utilizados foram calibrados na temperatura de fusão da liga para melhorar a precisão de medida e eram inseridos na área central do molde, diretamente no metal líquido. A partir destes dados, foi gerada a curva  $dT/dt$  (derivada / taxa de resfriamento) que auxilia na determinação dos tempos de início e fim da solidificação, além do super-resfriamento, parâmetros estes importantes para a análise do refino de grão.

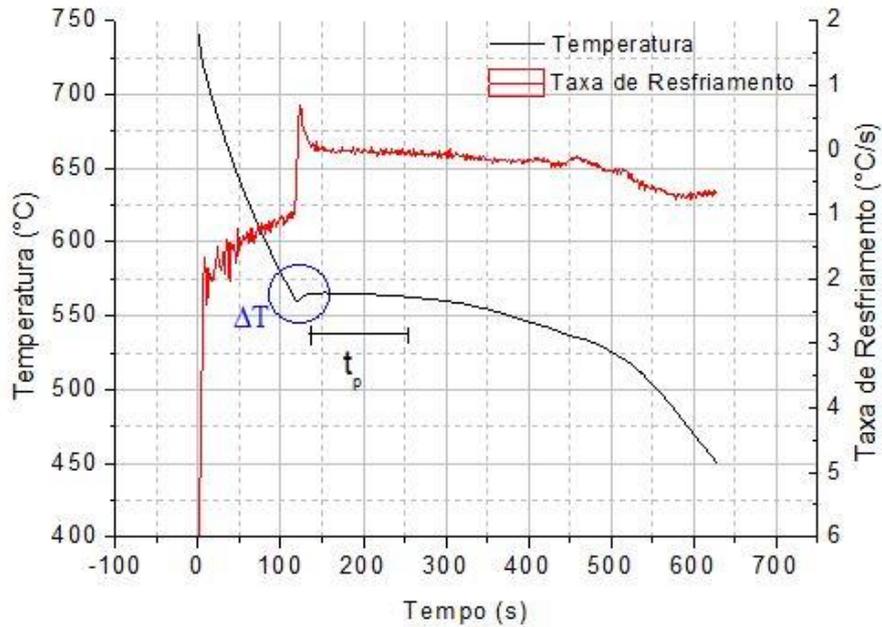
Foram realizados dois experimentos com a liga A269, um sem adição e outro com adição de Al-Ti-B resultando em um teor total de 0,05%Ti. A adição do inoculante na forma de uma liga-mãe Al-3%Ti-1%B em formato de vareta, era realizada quando a liga atingia a temperatura de aproximadamente 720 °C e mantido nessa temperatura por mais trinta minutos para homogeneização.

Ambas as amostras obtidas dos ensaios foram preparadas para análise de micrografia segundo procedimento de preparo padrão de amostras: lixamento das superfícies de análise com lixas de granulometrias 150, 220, 400, 600 e 1200 mesh, e polimento com pasta de diamante de 3 e 1  $\mu\text{m}$ . A análise micrográfica foi realizada para verificar a microestrutura de cada amostra. Para isso, estas foram atacadas quimicamente com o reagente Keller (2ml HF, 3ml HCl, 5ml HNO<sub>3</sub> 190 H<sub>2</sub>O) a fim de revelar a microestrutura. O microscópio ótico utilizado foi o OPTIKA B1000MET.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

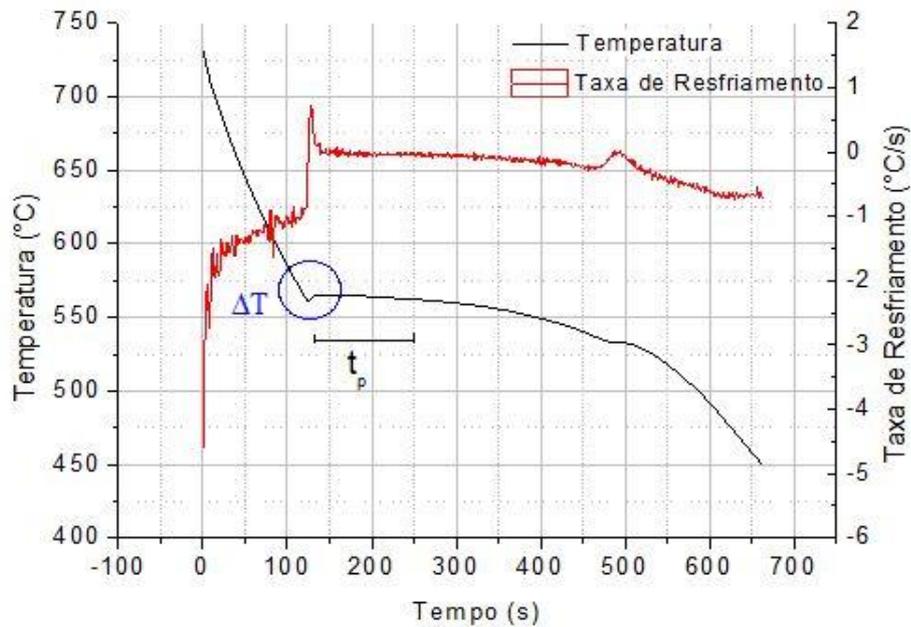
#### **3.1 Análise das curvas de resfriamento**

A Figura 5 apresenta as curvas de resfriamento e taxa de resfriamento obtidas no ensaio sem a adição de inoculante e mostra um comportamento previsto para a liga A269. Observa-se uma recalescência ( $\Delta T$ ) na temperatura do eutético (565°C) resultante da reação eutética.



**Figura 5:** Curvas de resfriamento e taxa de resfriamento para liga A269 sem inoculante (Elaborada pelos autores)

Em comparação com as curvas resultantes da liga com a adição de inoculante (Figura 6) pode-se observar que ambas apresentam bastante similaridade com mudanças sutis.



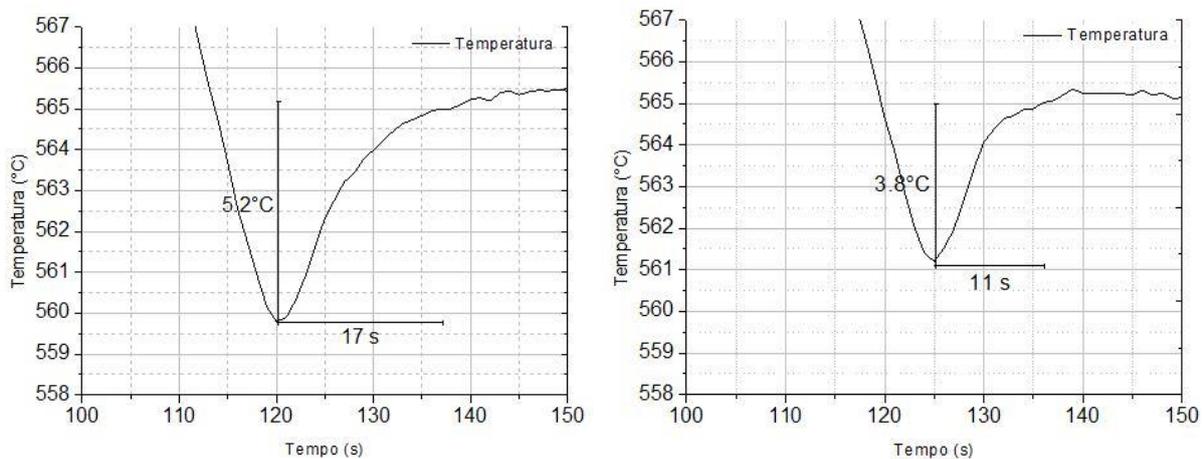
**Figura 6:** Curvas de resfriamento e taxa de resfriamento para liga A269 com inoculante (Elaborada pelos autores)

Uma das mudanças mais significativas resultantes do refino de grão foi a diminuição do tempo no patamar ( $t_p$ ), obtido observando por quantos segundos manteve-se constante a temperatura eutética da liga. Enquanto que sem a adição do inoculante o tempo em que a liga permaneceu na temperatura eutética foi de aproximadamente 50 segundos, com a adição este caiu para aproximadamente 37 segundos.

Além dessa característica, outras informações obtidas das curvas indicam que houve uma diminuição na temperatura mínima alcançada, ou seja, observa-se uma recalescência na temperatura do líquido de 565°C resultante da nucleação de crescimento da fase  $\alpha$ -Al.

O super-resfriamento para a liga sem e com a adição de inoculante pode ser analisado na Figura 7 : sem a adição de inoculante  $\Delta T_{sem} = 565 - 559,8 = 5,2^\circ\text{C}$  e com adição de inoculante  $\Delta T_{com} = 565 - 561,2 = 3,8^\circ\text{C}$ , resultando na diferença entre os  $\Delta T_{sem} - \Delta T_{com} = 1,4^\circ\text{C}$ .

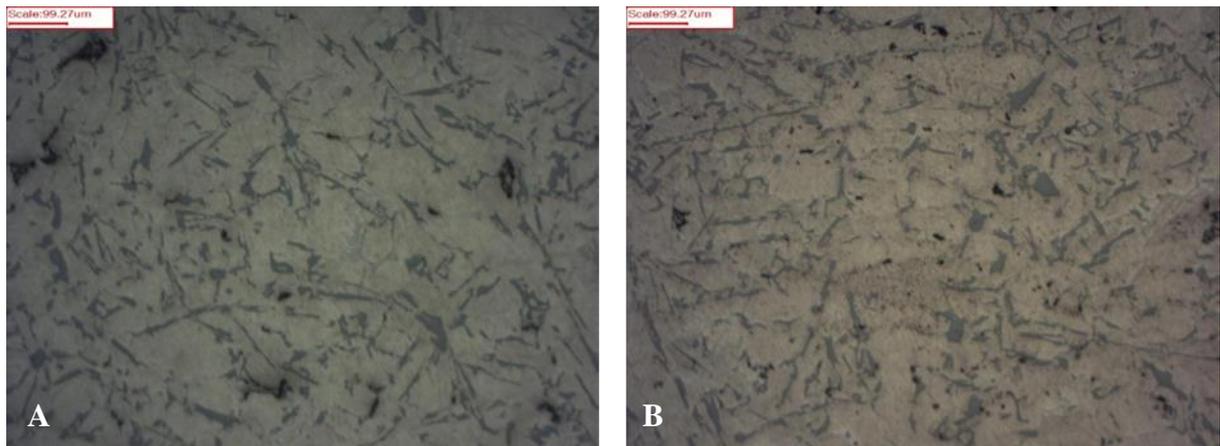
O período do super-resfriamento indicado na Figura 7 também apresentou diminuição. Este é um indício de que ocorreu o refino de grão, pois, segundo Arango e Martorano (2011) essas alterações estão diretamente relacionadas às modificações na quantidade de grãos que nuclearam e cresceram, liberando calor latente diferentemente.



**Figura 7:** Comparação entre as recalescências das curvas de resfriamento para a liga sem e com adição de inoculante respectivamente (Elaborada pelos autores)

### 3.2 Análise microestrutural

A Figura 8 apresenta a comparação entre a microestrutura com matriz de alumínio e silício primário para uma região próxima a parede do molde sem e com a adição do inoculante respectivamente.



**Figura 8:** Comparação entre as microestruturas da liga próxima a parede do molde sem adição do inoculante (A) e com a adição de inoculante (B) (Elaborada pelos autores)

Foi possível observar uma região equiaxial mais fina e distribuída das agulhas de silício primário em comparação com a microestrutura da liga sem o inoculante. Além disso a estrutura dendrítica encontra-se refinada, reduzindo o tamanho do silício primário, indicando o aumento na quantidade de grãos.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A utilização do refinador de grão do tipo Al-Ti-B na refusão da liga A269 resultando em um teor total de 0,05%Ti ocasionou uma diminuição no tamanho do silício primário e consequentemente diminuiu o tamanho de grão.
- A realização do refino de grão alterou sutilmente as características das curvas de resfriamento, sendo possível observar uma redução do tempo de nucleação da fase  $\alpha$ -Al, e do eutético, observados na extensão dos patamares, no eixo da abscissa na curva de resfriamento;

- Houve uma diminuição do superesfriamento - observado através da temperatura mínima alcançada: sem adição do inoculante era de 559°C e com a adição esta foi de 561°C, que conforme descrito anteriormente é resultado do processo de refino de grão.
- Não foi observado uma diminuição do pico na curva da taxa de resfriamento (conforme ilustrado na Figura 2), pois, para a liga sem adição do refinador o valor alcançado foi de 0,704°C/s e para a liga refinada 0,719°C/s, ou seja, mantiveram-se praticamente iguais.
- Sugestão para trabalhos futuros: analisar o efeito do refino de grão para ligas com diferentes teores de Si.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico – Brasil, pelo apoio financeiro e interesse nesse estudo.

Ao LABEMM – Laboratório de Ensaio Mecânicos e Metalúrgicos e ao IFC Campus Luzerna pelo apoio técnico, infraestrutura e interesse nesse estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANGO, Juan Marcelo Rojas; MARTORANO, Marcelo Aquino. Estudo de refino de grão das ligas Al-Si através de inoculantes do sistema Al-Ti-B. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 66., 2011, São Paulo. **Anal.** São Paulo: Abm, 2011. p. 520 - 532. Disponível em:

<[http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/Publicacoes/Marcelo ABM.pdf](http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/Publicacoes/Marcelo%20ABM.pdf)>. Acesso em: 07 abr. 2017.

ARAÚJO, Sacha Karine de. **Efeito da modificação com estrôncio na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga 356**. 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Tecnológicas – Cct, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Joinville, 2012.

LIMA, Alex Darllan Alves de. **Análise da curva de resfriamento e refino de grão da liga de alumínio AA356**. 2011. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guarantiguetá, 2011. Disponível em:

<[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/119619/lima\\_ada\\_tcc\\_guara.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/119619/lima_ada_tcc_guara.pdf?sequence=1)>

&isAllowed=y>. Acesso em: 01 ago. 2017.

**MICHAELIS:** Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa. -: Melhoramentos, 2017. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/recalescência/>>. Acesso em: 26 nov. 2017.

SILVA, Cássia Cavalcanti da. **Utilização da curva de resfriamento na análise do refino de grão da liga AA 356.** 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guarantiguetá, 2012. Disponível em:

<[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94396/silva\\_cc\\_me\\_guara.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94396/silva_cc_me_guara.pdf?sequence=1)>.

Acesso em: 28 mar. 2017.