

EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO TÉRMICO NA MICROESTRUTURA E NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DA LIGA DE ALUMÍNIO A319 FUNDIDA

Carlos Ferreira da Silva, carlos.silva@nemak.com¹

Rafaela Nepomuceno e Vidigal Ferreira, rafaelanvidigal@gmail.com²

Natasha Nogueira de Moraes, natasha_nogueira@yahoo.com.br¹

Adriene Anita dos Santos Pimenta, adrieneanita@gmail.com¹

Wellington Lopes, wellingtonlopes@cefetmg.br²

Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elainecarballo@cefetmg.br²

¹ Nemak do Brasil, R. Senador Geovane Agnelli, 580 - Distrito Industrial. Betim - Minas Gerais. Belo Horizonte - MG.

² Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFETMG, Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça. Belo Horizonte - MG.

Resumo: No presente trabalho foi realizada a avaliação da microestrutura e da resistência mecânica à tração da liga de alumínio A319, que apresenta em sua composição química silício, cobre e magnésio, empregada na fabricação de cabeçotes de motor por fundição. Esses componentes foram produzidos em duas estruturas nas quais foram realizadas adaptações de forma a acoplar sistemas de resfriamento artificial. Esses sistemas tiveram como objetivo associar a realização de tratamentos térmicos, que promoveriam a ocorrência do fenômeno de endurecimento por precipitação, à etapa de arrefecimento do material na fundição. Nesse caso, a operação como um todo envolveu o vazamento da liga no molde de fundição, retirada da peça após o tempo adequado para a solidificação, resfriamento brusco artificial até uma dada temperatura seguido de envelhecimento natural e, ainda, para algumas situações, a condução subsequente do tratamento de envelhecimento artificial. Dessa forma, foram abordados os efeitos da temperatura de início do resfriamento artificial, da temperatura de início do envelhecimento natural e do tempo de envelhecimento, bem como a realização de um tratamento térmico de envelhecimento artificial subsequente. Em geral, observou-se que a temperatura de início do resfriamento brusco artificial não levou a alterações consideráveis na microestrutura e na resistência mecânica da liga de alumínio, assim como o tempo de envelhecimento natural. Por outro lado, a temperatura de início do envelhecimento natural bem como a realização de envelhecimento artificial posterior promoveu mudanças na resistência mecânica do material.

Palavras-chave: liga de alumínio A319, resistência mecânica, fundição

1. INTRODUÇÃO

A indústria automotiva é um dos maiores mercados para as fundições de alumínio e ligas, ampliando continuamente a aplicação desse material em seus produtos [Shabani *et al.*, 2011]. Esse emprego está relacionado ao fato de que um dos principais objetivos estabelecidos para esse setor é a redução do consumo de combustíveis e, conseqüentemente, da emissão de gases poluentes, sendo a diminuição de peso dos veículos uma das principais vertentes para alcançar essa meta. Nesse contexto, os produtos usualmente fabricados com ligas de alumínio tem tido como demandas reduções dimensionais e incrementos de complexidade geométrica, bem como a melhoria de suas propriedades, especialmente a resistência mecânica.

A liga de alumínio A319, tema do presente trabalho, é considerada a mais popular das ligas Al-Si-Cu, possuindo ampla aplicação nas indústrias automobilística, aeroespacial e militar [Elsebaie *et al.*, 2011]. Esse material apresenta como características gerais boa fluidez, elevada relação resistência mecânica/densidade, alta resistência à corrosão e boa condutividade térmica. No caso específico das propriedades mecânicas, o processo de fundição empregado (que irá influenciar no espaçamento de braços dendríticos secundários e na eventual presença de porosidades, dentre outros fatores), a estrutura eutética de silício (morfologia, tamanho e distribuição) e as características dos tratamentos térmicos, especialmente quanto à etapa de solubilização, envolvendo o nível de dissolução dos demais elementos químicos na matriz de alumínio, são considerados os aspectos mais importantes [Shabani *et al.*, 2011; Elsebaie *et al.*, 2011; Han *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2004; Sjolander e Seifeddine, 2010].

Considerando o fato de que os tratamentos térmicos são apontados como as operações que possibilitam a obtenção de uma boa combinação de resistência mecânica e ductilidade, por meio de alterações nos compostos/precipitados desenvolvidos no material metálico [Elgallad *et al.*, 2014], neste trabalho foram avaliados os efeitos do processamento térmico e da estrutura empregada na microestrutura e na resistência mecânica de cabeçotes de motor da liga de alumínio A319 fundida.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material analisado no trabalho foi a liga de alumínio A319, produzida por meio de fundição em duas estruturas distintas, denominadas no trabalho como "carrossel" e "ilha".

No caso da fundição na "ilha", o trabalho envolveu a fusão e vazamento da liga nos moldes de cabeçote de motor; retirada das peças, resfriamento natural até duas temperaturas distintas, 475°C e 400°C, a partir das quais o sistema de resfriamento brusco artificial desenvolvido foi acionado e os cabeçotes foram resfriados até 225°C. A partir desse momento, o resfriamento do material se deu de forma natural, até a temperatura ambiente. As análises da microestrutura e da resistência mecânica foram conduzidas após 13 dias e 20 dias, caracterizando assim o chamado envelhecimento natural. Em adição a essa análise, foi avaliado ainda com o emprego posterior de um tratamento térmico de envelhecimento artificial, realizado à temperatura de 220 °C, com tempo de encharque de 4 horas e resfriamento forçado com ar.

Considerando a fundição no "carrossel", as etapas foram, em geral, similares. Nessa fase do trabalho, no entanto, a temperatura de início do resfriamento artificial foi de 475°C, tendo sido variada a temperatura de término: 225°C e 125°C. A partir dessas temperaturas, as peças foram resfriadas naturalmente e a análise foi conduzida após 13 e 20 dias (envelhecimento natural). O tratamento térmico de envelhecimento artificial foi conduzido posteriormente para condições nas quais a análise foi realizada após 13 dias de envelhecimento natural. Nesse caso, os parâmetros desse tratamento térmico foram similares àqueles empregados nas amostras fabricadas na estrutura anterior: temperatura de 220 °C, tempo de encharque de 4 horas e resfriamento forçado com ar.

A caracterização microestrutural da liga de alumínio foi realizada por meio de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), de forma a possibilitar a verificação das fases e precipitados e ainda a determinação do espaçamento de braços dendríticos secundários sDAS. O cálculo utilizado no trabalho para a medição do espaçamento entre os braços dendríticos secundários foi baseado na metodologia desenvolvida por Zhang *et al.* (2003). Já os precipitados foram identificados a partir da morfologia e comparação com a literatura [Shabani *et al.*, 2011; Elsebaie *et al.*, 2011; Sjolander e Seifeddine, 2010]. A preparação das amostras para a análise microestrutural foi realizada segundo as técnicas metalográficas convencionais e o ataque químico foi conduzido com solução de ácido fluorídrico 0,5%.

Os ensaios de tração foram realizados com extensômetro, à temperatura ambiente e com taxa de deformação inicial de 0,001 s⁻¹. Para cada condição, foram conduzidos ao menos três ensaios distintos. Os corpos de prova foram confeccionados a partir de regiões específicas dos cabeçotes de motor, cuja definição foi realizada conforme projeto e solicitação da empresa montadora do veículo no qual o componente seria inserido. A partir desses ensaios foram determinados os limites de escoamento a 0,2% e os limites de resistência, de forma a possibilitar a avaliação da resistência mecânica da liga nas condições inversas investigadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 1 e 2 são apresentadas, como exemplos, as microestruturas obtidas por MO e por MEV da liga de alumínio A319 fabricada a partir do processo de fundição na "ilha" resfriada artificialmente a partir de 475°C até 225°C e a partir de 400°C até 225°C, com avaliação após envelhecimento natural de 13 dias e de 20 dias. Os precipitados estão exemplificados nas imagens, nas quais nota-se a presença de uma distribuição relativamente uniforme do Al-Si eutético na matriz da fase α e ainda a presença dos precipitados Al₂Cu e Al₅FeSi (Shabani *et al.*, 2011; Elsebaie *et al.*, 2011; Sjolander e Seifeddine, 2010). A alteração tanto na temperatura de início do resfriamento artificial como no tempo de envelhecimento natural não levou a modificações acentuadas na microestrutura da liga de alumínio. A avaliação após a realização de envelhecimento artificial subsequente, cujas imagens obtidas por MO e MEV são mostradas nas Figs. 3 e 4, também não evidenciou modificações, tanto em relação às temperaturas, como tempo de envelhecimento e ainda em comparação com as amostras não tratadas artificialmente. Acredita-se que as técnicas de análise microestrutural empregadas, em conjunto com as ampliações, podem não ter sido totalmente adequadas para a verificação dos compostos, dado às suas reduzidas dimensões, especialmente em relação ao material submetido ao envelhecimento artificial.

Considerando a presença dos precipitados em geral, de acordo com Elsebaie *et al.* (2011), o desempenho da liga de alumínio A319 depende das características do eutético e das distintas fases intermetálicas. A presença do cobre leva ao desenvolvimento das partículas de Al₂Cu que, dependendo da taxa de resfriamento e da presença de agentes modificadores, podem aparecer como blocos (Al₂Cu) ou como colônias eutéticas combinadas à matriz α (Al + Al₂Cu), ou ainda nas duas formas (Shabani *et al.*, 2011; Elsebaie *et al.*, 2011; Sjolander e Seifeddine, 2010). No presente trabalho, verifica-se a presença tanto em blocos como no eutético. O ferro leva à formação de Al₅FeSi, também mencionado como fase β , que surge com morfologia de placas alongadas/agulhas (Elsebaie *et al.*, 2011). Esse precipitado é considerado negativo ao desempenho do material, uma vez que suas extremidades podem atuar como

sítios concentradores de tensão, favorecendo a nucleação de trincas, e sua morfologia pode servir como “caminho” para a propagação dessas trincas. Por outro lado, a presença do manganês tende a reverter ou diminuir esse efeito deletério da fase β , promovendo a precipitação de uma fase considerada mais compacta, a chamada “escrita chinesa”.

Quanto aos valores de espaçamento de braços dendríticos secundários sDAS, determinados para todas as condições, não foram observadas alterações com os parâmetros mencionados, considerando os desvios padrão determinados. Esse comportamento está de acordo com aquele esperado, uma vez que esse parâmetro pode ser alterado de acordo com as condições de solidificação do componente que, por sua vez, foram similares. De acordo com Shabani *et al.* (2011), a taxa de resfriamento na solidificação, além de afetar o tamanho de grão do material, a morfologia do silício na fase eutética, a porosidade e eventuais fases intermetálicas, influencia no espaçamento dos braços dendríticos. Nesse caso, a elevação dos valores dessa variável leva ao desenvolvimento de uma estrutura mais refinada, a qual é, em geral, associada a melhores propriedades mecânicas.

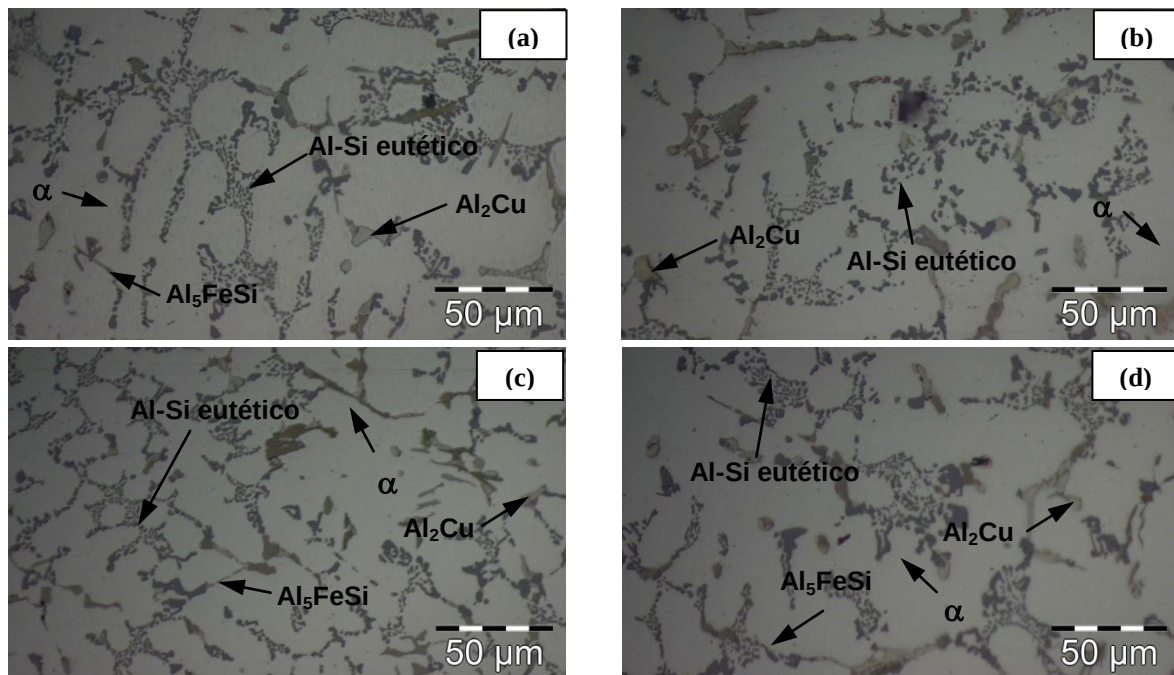


Figura 1: Imagens da microestrutura (MO) da liga de alumínio A319 após fundição na "ilha. Resfriamento brusco a partir de 475°C até 225°C e análise após (a) 13 dias e (b) 20 dias. Resfriamento brusco a partir de 400°C até 225°C e análise após (c) 13 dias e (d) 20 dias.

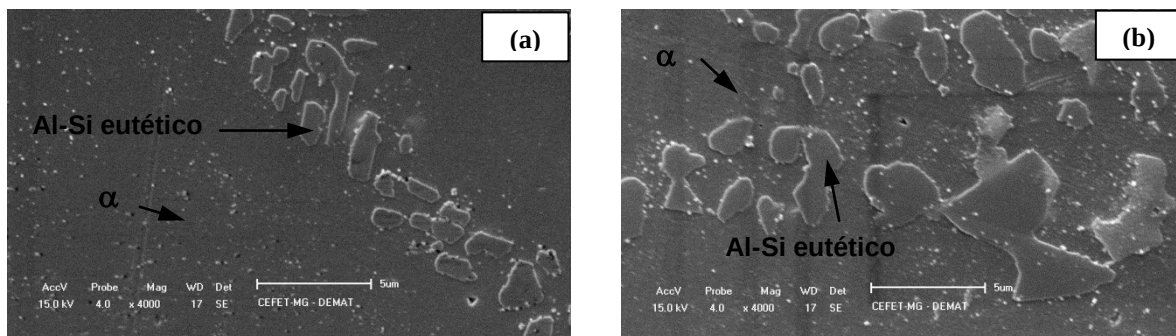


Figura 2: Imagens da microestrutura (MEV) da liga de alumínio A319 após fundição na "ilha. Resfriamento brusco a partir de (a) 475°C até 225°C e análise após 13 dias e (b) Resfriamento brusco a partir de (a) 400°C até 225°C e análise após 13 dias.

Resultados similares foram verificados para o material produzido na estrutura denominada "carrossel", tanto considerando os precipitados desenvolvidos como a realização de tratamento térmico de envelhecimento artificial posterior.

Na Figura 5 são mostrados os resultados dos limites de escoamento e de resistência para a liga de alumínio produzida na "ilha". Verifica-se que tanto a temperatura a partir da qual é realizado o resfriamento brusco artificial como o tempo de envelhecimento natural não impactaram de forma acentuada na resistência mecânica do material. O comportamento mecânico nesse caso parece estar de acordo com os resultados microestruturais, uma vez que, como mencionado anteriormente, não foi verificada alteração considerável na presença, morfologia e distribuição do constituinte eutético e precipitados na liga de alumínio. Por outro lado, a realização do tratamento térmico de

envelhecimento artificial subsequente resultou na elevação tanto dos valores limite de escoamento e como nos valores de limite de resistência da liga de alumínio. Dessa forma, considerando os resultados apresentados pela liga de alumínio na “ilha”, pode-se concluir que duas das três variáveis de processo investigadas nessa etapa (temperatura a partir da qual é realizado o arrefecimento artificial e o tempo de envelhecimento natural), não impactaram nas propriedades mecânicas avaliadas nas amostras, apenas a realização de envelhecimento artificial posterior. Uma vez que a elevação da resistência mecânica com a ocorrência do fenômeno de precipitação está relacionada à habilidade dos precipitados de interferir na capacidade de movimentação das discordâncias (Sjolander e Seifeddine, 2010), a partir desses resultados, portanto, supõe-se que a realização do envelhecimento artificial ocasionou alterações na microestrutura da liga de alumínio que, no entanto, não foram percebidas pelas técnicas de análise empregadas.

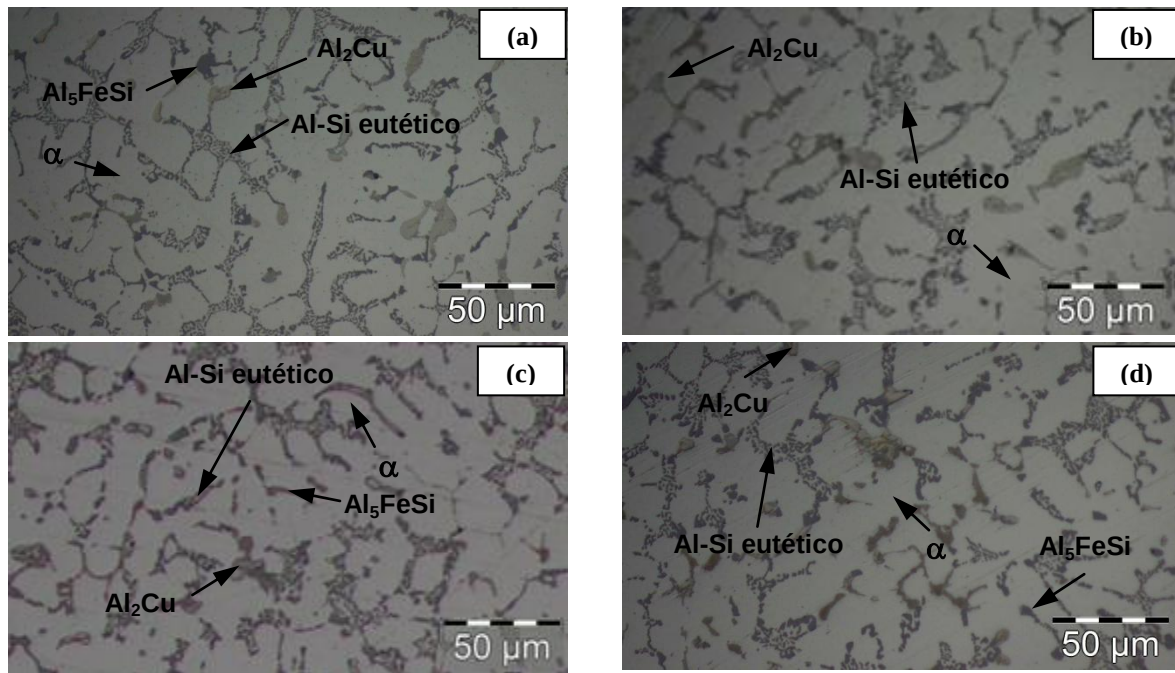


Figura 3: Imagens da microestrutura (MO) da liga de alumínio A319 após fundição na "ilha. Resfriamento brusco a partir de 475°C até 225°C e análise após (a) 13 dias e (b) 20 dias, ambos com tratamento térmico T5 subsequente. Resfriamento brusco a partir de 400°C até 225°C e análise após (c) 13 dias e (d) 20 dias, ambos com tratamento térmico de envelhecimento artificial subsequente.

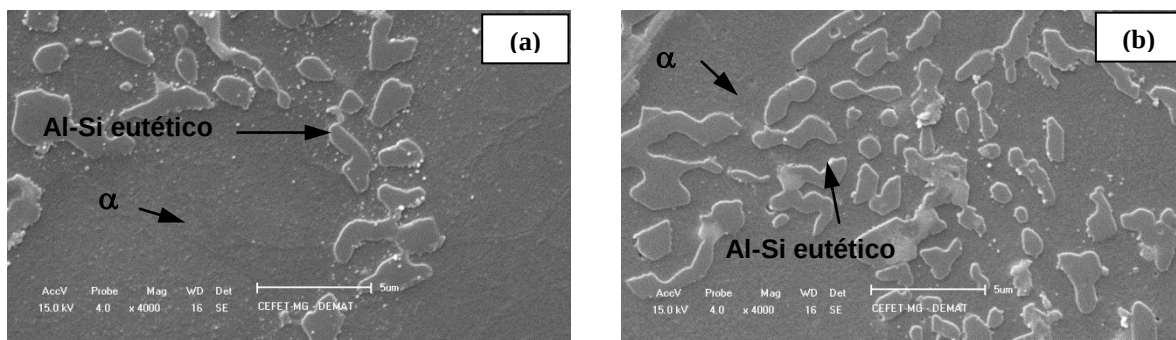


Figura 4: Imagens da microestrutura (MEV) da liga de alumínio A319 após fundição na "ilha. Resfriamento brusco a partir de 400°C até 225°C e análise após (a) 13 dias e (b) 20 dias, ambas com tratamento térmico de envelhecimento artificial subsequente.

Na Figura 6 são apresentados os resultados dos limites de escoamento e de resistência para a liga de alumínio produzida no "carrossel". Comparando inicialmente os efeitos da temperatura de término do resfriamento artificial e início do envelhecimento natural, nota-se que a redução dessa variável (de 225°C para 125°C) levou ao aumento nos valores médios de limite de escoamento, não promoveu alterações com tendência perceptível nos valores médios de limite de resistência, tanto para a análise realizada após 13 dias como após 20 dias de envelhecimento natural. Considerando os resultados da liga de alumínio submetida posteriormente ao tratamento T5, nessa etapa do trabalho apenas para o tempo de análise de 13 dias, observa-se tanto para o limite de escoamento como para o limite de resistência, elevação nos valores médios obtidos. Mais uma vez, similarmente ao que ocorreu na etapa anterior do presente trabalho, a análise microestrutural conduzida não permitiu notar possíveis alterações na estrutura da liga com a realização do tratamento término.

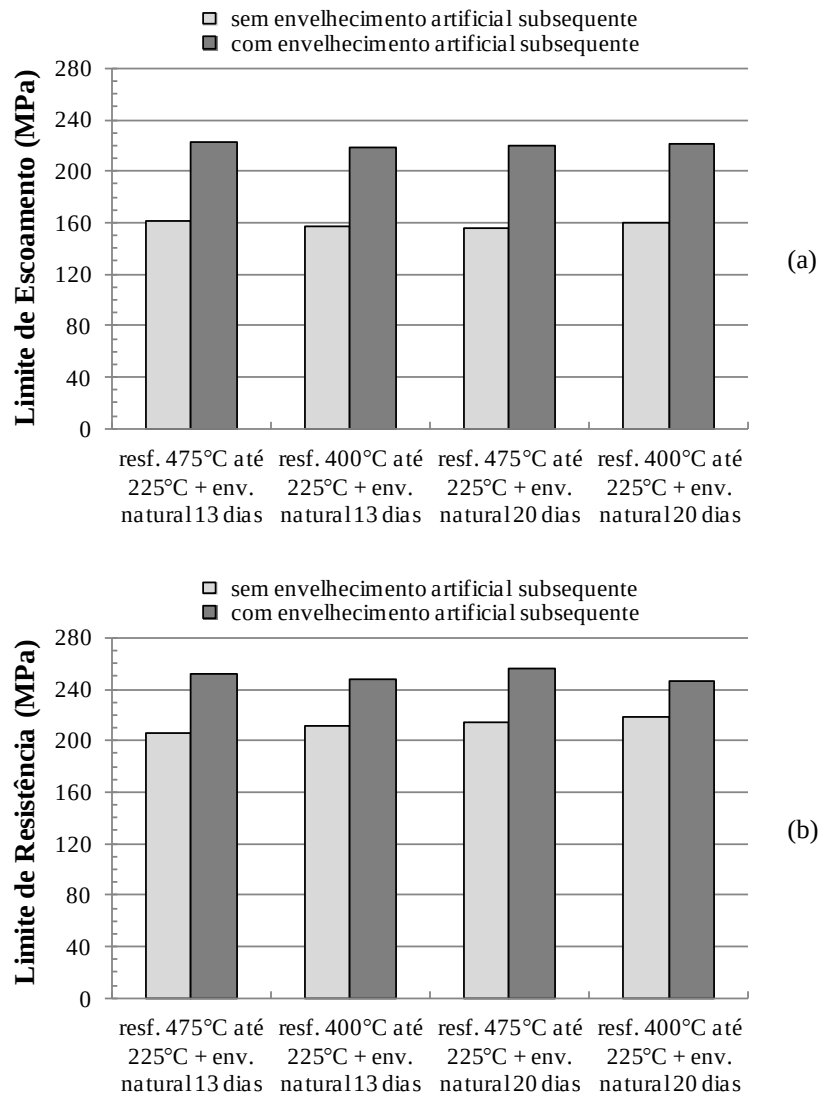


Figura 5: Resultados dos ensaios de tração da liga de alumínio fabricada por meio de fundição na estrutura denominada "ilha" - avaliação da temperatura de início do resfriamento artificial, tempo de envelhecimento natural e realização de envelhecimento artificial posterior: (a) limite de escoamento a 0,2% e (b) limite de resistência.

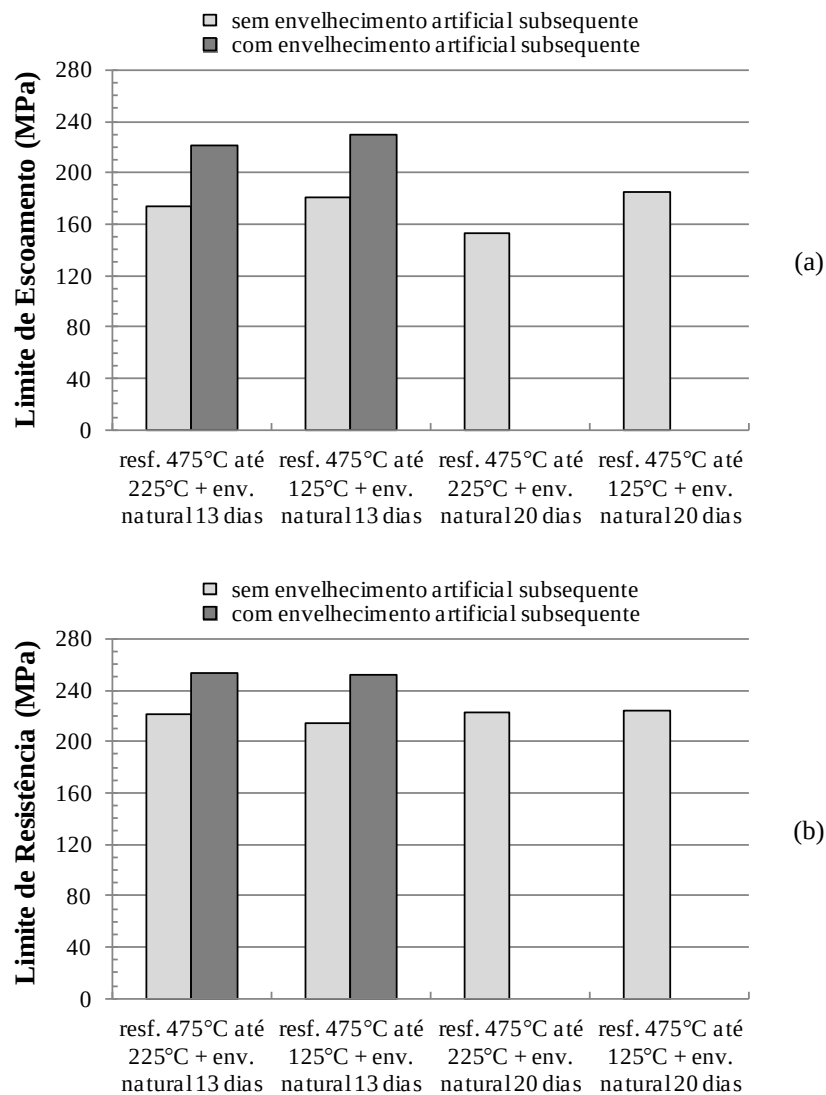


Figura 6: Resultados dos ensaios de tração da liga de alumínio fabricada por meio de fundição na estrutura denominada "carrossel" - avaliação da temperatura de fim do envelhecimento natural, tempo de envelhecimento natural e realização de envelhecimento artificial posterior: (a) limite de escoamento a 0,2% e (b) limite de resistência.

4. CONCLUSÕES

A microestrutura desenvolvida na liga de alumínio A319 mediante os processamentos térmicos investigados, considerando as técnicas de caracterização empregadas, não foi afetada de forma significativa, sendo composta de Al-Si eutético e dos precipitados Al_2Cu e Al_5FeSi . De forma similar, os resultados de espaçamento de braços dendríticos secundários sDAS foram semelhantes.

A alteração da temperatura de início de resfriamento artificial (avaliação conduzida na estrutura denominada "ilha") não levou a modificações acentuadas tanto nos valores de limite de escoamento como nos valores de limite de resistência do material, similarmente ao que ocorreu para o tempo de envelhecimento natural. Por outro lado, modificações na temperatura de fim do resfriamento artificial e início do resfriamento natural (avaliação conduzida na estrutura denominada "corrossel") levaram a alterações na resistência mecânica da liga de alumínio A319. Nesse caso, a menor temperatura promoveu maior resistência. O emprego do tratamento térmico subsequente de envelhecimento artificial resultou no aumento da resistência mecânica, observado para os valores de limite de escoamento e limite de resistência à tração.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP pelo apoio financeiro à instituição por meio da compra de equipamentos, ao CEFET-MG e à empresa Nemak do Brasil pela realização dos experimentos apresentados à CAPES pela concessão de bolsa.

6. REFERÊNCIAS

- Elgallad, E.M., Shen, P., Zhang, Z., Chen, X., 2014, "Effects of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of AA2618 DC cast alloy", *Materials and Design*, Vol. 61, pp. 133-140.
- Elsebaie, O., Mohamed, A.M., Samuel, F.H., Al-Ahmari, A.M.A., 2011, "The role of alloying additives and aging treatment on the impact behavior of 319 cast alloys", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3205-3220.
- Han, Y., Samuel, A.M., Doty, H.W., Vatierra, S., Samuel, F.H., 2014, "Optimizing the tensile properties of Al-Si-Cu-Mg 319-type alloys: role of solution heat treatment", *Materials and Design*, Vol. 58, pp. 426-438.
- Li, Z., Samuel, A.M., Samuel, F.H., Ravindran, C., Vatierra, S., Doty, H.W., 2004, "Parameters controlling the performance of AA319-type alloys Part II: impact properties and fractography", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 367, pp. 111-122.
- Shabani, M.J., Emany, M., Nemati, N., 2011, "Effect of grain refinement on the microstructure and tensile properties of thin 319 Al castings", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 1542-1547.
- Sjolander, E.; Seifeddine, S., 2010, "The heat treatment of Al-Si-Mg casting alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 1249-1259.
- Zhang, B., Garro, M., Tagliano, C., 2003, "Dendrite arm space in aluminum alloy cylinder heads produced by gravity semi-permanent mold", *Metallurgical Science and Technology*, Vol. 21, pp. 3-9.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EFFECT OF THE THERMAL PROCESSING PARAMETERS IN THE MICROSTRUCTURE AND IN THE TENSILE STRENGTH OF A CAST A319 ALUMINUM ALLOY

Carlos Ferreira da Silva, carlos.silva@nemak.com¹

Rafaela Nepomuceno e Vidigal Ferreira, rafaelanvidigal@gmail.com²

Natasha Nogueira de Moraes, natasha_nogueira@yahoo.com.br¹

Adriene Anita dos Santos Pimenta, adrieneanita@gmail.com¹

Wellington Lopes, wellingtonlopes@cefetmg.br²

Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elainecarballo@cefetmg.br²

¹ Nemak do Brasil, R. Senador Geovane Agnelli, 580 - Distrito Industrial. Betim - Minas Gerais. Belo Horizonte - MG.

² Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFETMG, Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça. Belo Horizonte - MG.

Abstract: In the present work, an evaluation of the microstructure and the tensile strength of the A319 aluminum alloy, which presents in its chemical composition silicon, copper and magnesium, was carried out. These components were produced in two different structures in which adaptations were conducted through the addition of an artificial cooling system specially designed for the experiments, in order to associate a heat treatment that would promote the occurrence of the phenomena of precipitation hardening in the material. The investigation involved the analysis of the effects of the artificial cooling start temperature, the natural aging start temperature and the aging time, as well as a subsequent artificial aging heat treatment. In general, it was observed that for the conditions presented, the initial temperature of the artificial cooling did not lead to considerable changes in the microstructure and in the strength of the aluminum alloy, as well as the natural aging time. On the other hand, the temperature of the beginning of the natural aging as well as the process of the artificial aging promoted changes in the mechanical resistance of the material.

Keywords: A319 aluminum alloy, tensile strength, casting