

XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 11 a 15/09/2017 – Rio Grande - RS

INFLUÊNCIA DA POROSIDADE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO, DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA E DUREZA EM LIGAS DE Al-Si-Mg FUNDIDAS

Albino Moura Guterres, Luiz Carlos Ferron Junior, Lucas Santin Bianchin, Rogerio Bido

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense – Campus Passo Fundo

Estrada Perimetral Leste, 150 - Passo Fundo - RS - CEP: 99064-440

albino.moura@passofundo.ifsul.edu.br, junior_ferronpf@hotmail.com, lucas.sbianchin@hotmail.com, rogerio_bido@hotmail.com

RESUMO: As ligas de Al-Si-Mg são atualmente as mais populares para obtenção de peças fundidas comerciais, isto porque as propriedades mecânicas desses materiais podem ser melhoradas através de tratamentos térmicos. No entanto, cabe salientar que nas peças fundidas de ligas de alumínio, a porosidade é o defeito que ocorre mais frequentemente. Esse defeito geralmente resulta em propriedades mecânicas pobres. Nesse sentido, o presente estudo pretende analisar a influência do percentual de porosidade nas propriedades mecânicas de limite de resistência a tração, deformação específica e dureza em ligas de Al-Si-Mg fundidas e tratadas termicamente. Para tanto, foi obtida por processo de fundição e solidificação natural, uma liga básica com a seguinte composição química: Al-6,5%Si-0,6%Mg. A partir da liga básica foram obtidos lingotes com e sem processo de degaseificação com pastilhas de Hexacloroetano. Os lingotes produzidos foram submetidos a tratamentos térmicos de solubilização e posterior envelhecimento artificial. De todos os lingotes retirou-se amostras transversais ao longo do seu comprimento para a análise do percentual de porosidade e determinação das propriedades mecânicas. Na sequência da pesquisa, com os resultados determinados nas análises de porosidade e ensaios mecânicos de tração e dureza, foi obtida a influência do percentual de porosidade na variação das propriedades mecânicas da liga em estudo.

Palavras-Chave: Ligas Al-Si-Mg, Porosidade, Propriedades Mecânicas

ABSTRACT: Al-Si-Mg alloys are currently the most popular alloys for obtaining commercial castings, this because the mechanical properties of these materials can be improved by heat treatments. However, it should be noted that in cast aluminum alloy parts, porosity is the most frequently occurred defect. This defect usually results in poor mechanical properties. In this sense, the present study intends to analyze the influence of the porosity percentage on the mechanical properties of tensile strength, specific deformation and hardness in cast and thermally treated Al-Si-Mg alloys. For that, it was obtained by natural casting and solidification process, a basic alloy having the following chemical composition: Al-6.5% Si-0.6% Mg. From the basic alloy were obtained ingots with and without degasification process with Hexachloroethane pellets. The ingots produced were subjected to thermal treatments of solubilization and subsequent artificial aging. From all the ingots, transverse samples were taken along their length for the analysis of porosity percentage and determination of mechanical properties. Following the research, with the results determined in the analysis of porosity and mechanical tests of traction and hardness, it was obtained the influence of the percentage of porosity on the variation of the mechanical properties of the alloy under study.

Keywords: Al-Si-Mg alloys, Porosity, Mechanical Properties.

INTRODUÇÃO

O uso de peças fundidas de alumínio na indústria aeroespacial, indústria de engenharia automotiva e em geral, tem aumentado drasticamente ao longo das últimas três décadas (Gopikrishna & Binu, 2013). A excelente fluidez, os custos de produção relativamente baixos, e a alta resistência em relação ao peso fazem das ligas fundidas de Al-Si-Mg uma opção atraente para uso em componentes de engenharia mais baratos e mais leves nas indústrias automotiva e aeroespacial (Serrano-Munoz, 2016).

Na indústria automotiva se aposta no crescimento do uso de ligas de alumínio, pois o objetivo geral é reduzir ainda mais o consumo de combustível dos automóveis. O aspecto mais vantajoso da aplicação de componentes fundidos de alumínio nos veículos é a aplicação de peças de alta resistência com baixo peso, gerando menor gasto de combustível (Hossain *et al.*, 2013).

Conforme Kaell (2013) as ligas de Al-Si-Mg são atualmente as mais populares para obtenção de peças fundidas comerciais, dois importantes membros desta família de liga são as ligas A356 e A357 (segundo as designações de liga do *Aluminum Association*). O sistema de ligas alumínio – silício é um dos mais importantes para a indústria de fundição, principalmente devido a sua alta fluidez conferida pela presença do eutético AlSi. A adição de magnésio torna as ligas tratáveis termicamente.

A aplicação de tratamentos térmicos modifica as características microestruturais e melhoraram as propriedades tecnológicas das ligas Al-Si-Mg. O tratamento térmico de endurecimento por precipitação é o método mais comum para aumentar a resistência das ligas de Al-Si-Mg. Segundo Manente & Timelli (2011), o tratamento térmico compreende três fases: solubilização, resfriamento rápido e envelhecimento artificial.

As propriedades mecânicas das ligas fundidas de alumínio são significativamente dependentes de características microestruturais. O tamanho de grão e a sua morfologia e espaçamentos dendríticos são parâmetros que controlam as propriedades mecânicas das peças fundidas (Shabani *et. al.*, 2011). A velocidade de resfriamento durante a solidificação do metal líquido afeta o tamanho dos grãos e o espaçamento dos braços dendríticos secundários (Dobrzanski *et. al.*, 2006).

Segundo Puparattanapong & Limmaneevichitr (2016) nas peças fundidas de ligas de alumínio, a porosidade é o defeito que ocorre mais frequentemente. A presença de porosidade é acompanhada por um decréscimo nas propriedades mecânicas, isto é, tensão de ruptura, ductilidade e resistência à fadiga, etc. A porosidade é considerada a principal causa de rejeição das peças fundidas nas aplicações industriais.

Neste sentido, o presente estudo pretende analisar a influência do percentual de porosidade nas propriedades mecânicas de limite de resistência a tração, deformação específica e dureza em ligas de alumínio, silício e magnésio obtidas pelo processo de fundição, solidificação natural e tratadas termicamente.

METODOLOGIA

Primeiramente foi obtida uma liga do sistema Al-Si-Mg com a seguinte composição química: Al-6,5%Si-0,6%Mg - % em massa. Essa liga foi produzida a partir da fusão de alumínio primário alumínio-silício (12% de silício) e magnésio metálico. Dessa liga base foram produzidos seis lingotes que foram obtidos com a fusão de 800 gramas da liga em um forno tipo poço, em um cadinho de grafite. A temperatura do metal líquido no forno foi mantida entre 720 a 730°C. A temperatura de vazamento foi de 700°C. O metal líquido foi vazado em uma lingoteira bipartida, em aço inoxidável AISI 304, com diâmetro interno de 44 mm, altura de 180 mm e espessura de parede de 13 mm. A lingoteira estava pré-aquecida a 400°C. A solidificação ocorreu de forma natural.

Três lingotes foram submetidos a processo de desgaseificação. Durante a fusão o metal líquido foi desgaseificado com 15 gramas de pastilha de Hexacloroetano, com auxílio de sino de imersão e tempo de espera de 10 minutos. Já os lingotes restantes não sofreram processo de desgaseificação. Durante a fusão, as ferramentas como sino e lanças utilizadas foram de aço inoxidável AISI 304.

A partir dos lingotes produzidos foram retiradas amostras da seção transversal circular utilizadas para a análise do percentual de porosidade e determinação das propriedades mecânicas. As amostras foram obtidas realizando cortes transversais, ao longo do comprimento dos lingotes. As amostras retiradas ao longo do lingote foram denominadas de P1, P2, P3, P4, P5 e foram obtidas a uma distância da base da lingoteira de 5mm, 20mm, 40mm, 60mm e 80mm respectivamente, conforme observa-se na Fig. (1).

Todas as amostras obtidas foram submetidas ao tratamento térmico de envelhecimento por precipitação – T6. A etapa de solubilização foi feita na temperatura de 540°C ± 10°C, durante 6 h, seguido de resfriamento em água morna na temperatura entre 60°C ± 5°C. O envelhecimento artificial foi realizado na temperatura de 180°C, durante o tempo de 4 horas.

Na análise da porosidade foram utilizadas todas as amostras de seção transversal circular. Essa análise antecedeu os demais procedimentos, e foram realizadas 3 medidas para cada condição (sem desgaseificação e desgaseificada) e posição em análise, sendo que, ao final, obteve-se a média dos valores e o intervalo de dispersão.

Para medir a porosidade, usou-se a técnica denominada picnometria (Bueno, 1980), que é um processo de comparação das massas específicas relativas do sólido e do líquido (água destilada), onde foi possível medir a massa específica aparente das amostras. O método picnométrico empregado é conforme a técnica proposta por Moutinho (2012), que baseia-se na norma ASTM B 311-93 (reaprovada em 2002). Após a determinação da massa específica aparente (ρ_A) das amostras, foi possível estimar a porosidade, utilizando a Eq. (1):

$$\% \text{ Poros} = [(\rho_T - \rho_A)/\rho_T] * 100 \quad (1)$$

onde: ρ_T : massa específica teórica das amostras.

Já, para determinar a massa específica teórica das amostras, foi utilizada a porcentagem em peso dos elementos químicos obtidos na caracterização química realizada no Espectrômetro de Emissão Óptica. Com a porcentagem em peso de cada elemento constituinte das ligas, buscou-se na bibliografia [Ashby & Jones (2005)] a massa específica de cada elemento e calculou-se a massa específica teórica das ligas em estudo.

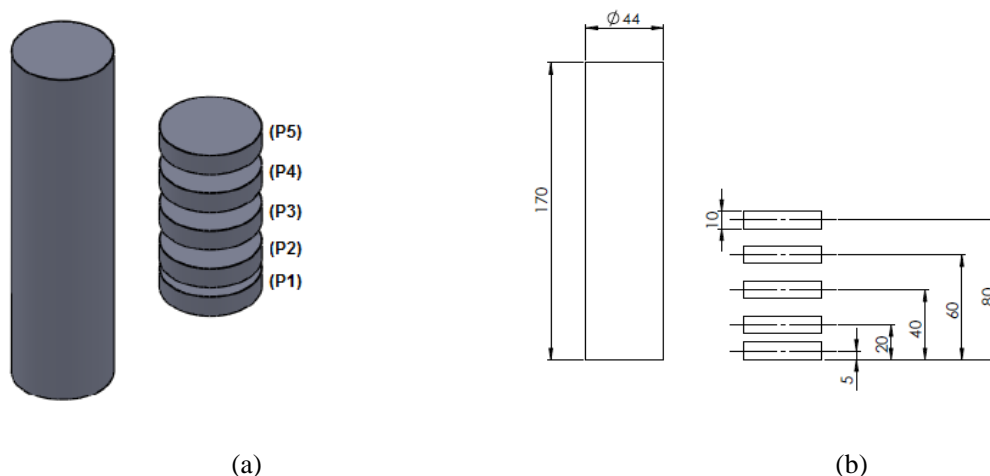


Figura 1. Disposição das amostras para realização do estudo. (a) vista tridimensional. (b) vista ortogonal com as cotas em milímetros

As amostras de seção transversal circular, após a análise da porosidade, foram utilizadas para medição de dureza. E na sequência, foram retirados de cada amostra dois corpos de prova para ensaio de tração, sendo obtido no total seis corpos de prova para cada condição e posição em análise. Na Fig. (2), observa-se nas amostras onde foram realizados os ensaios de dureza (seção transversal em destaque) e onde foram retirados os corpos de prova para ensaio de tração. Os corpos de prova, para ensaio de tração foram obtidos com dimensões reduzidas proporcionais ao modelo padrão, conforme especificado pela norma ASTM E8M-03.

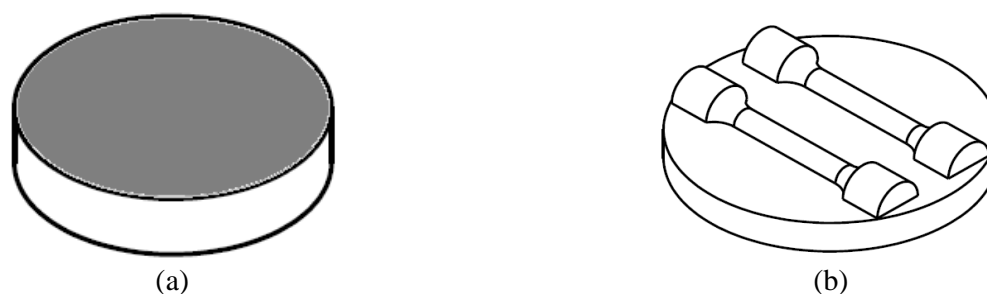


Figura 2. Esquema representativo dos corpos de prova: (a) amostras circulares usadas na medição da porosidade; (b) Posição dos corpos de prova de tração retirados das amostras circulares dos lingotes

Para obtenção das durezas nas amostras aplicou-se as técnicas de ensaio de dureza Brinell. Para isso, utilizou-se um Durômetro Brinell, um penetrador esférico de aço de diâmetro de 5 mm, uma carga de 2500 N (250 kgf) e tempo de penetração de 20 segundos, segundo a norma ABNT NBR NM ISO 6506-1:2010. Foram realizadas três medidas em cada amostra.

Os ensaios de tração, para determinação do limite de resistência à tração (LRT) e deformação específica (ϵ) foram executados utilizando a máquina de ensaios da marca EMIC, com capacidade de 10.000 N, sistema de aquisição de dados do próprio fabricante, do modelo EEGA – 250, com uma velocidade de ensaio em torno de 4 mm/s. Os ensaios foram realizados conforme a norma ASTM E8M-03.

Para a análise da relação entre percentual de porosidade com as propriedades mecânicas, foram desenvolvidos gráficos que permitiram reunir todos os resultados obtidos empiricamente em processos anteriores desta pesquisa, com o intuito de facilitar a visualização e interpretação das relações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a preparação das cargas, fusão e solidificação da liga básica, obteve-se a caracterização da composição química das mesmas por Espectroscopia de Emissão Óptica, e confirmou-se conforme a Tab. 1.

Tabela 1. Composição química média (% em massa) da Liga em estudo

| | Al | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Outros |
|------|-------|-------------|------|------|------|-------------|------|--------|
| Liga | 91,43 | 6,50 | 0,60 | 0,27 | 0,12 | 0,60 | 0,21 | 0,27 |

Com a análise química, constatou-se que além dos elementos químicos principais Al, Si e Mg, o elemento químico Fe apresentou-se com teor significativo, oriundo da matéria prima e ferramentas utilizadas durante processo de fusão.

Em todos os processos de fusão e solidificação, as temperaturas de fusão, de vazamento e aquecimento da lingoteira mantiveram-se iguais, com isso, a taxa de resfriamento manteve-se praticamente constante nas diferentes posições ao longo do lingote. Durante a solidificação, segundo Patakham *et. al.* (2013), a taxa de resfriamento é a variável térmica de maior influência nas variações do tamanho de grão e dos espaçamentos dendríticos secundários. Segundo Dong *et. al.* (2012), os espaçamentos dos braços dendríticos secundários e o tamanho de grão apresentam influência nas propriedades mecânicas das ligas de alumínio. Sendo assim, devido à taxa de resfriamento apresentar-se praticamente constante, os espaçamentos dos braços dendríticos secundários e o tamanho de grão, nas amostras ao longo do lingote, deverão apresentar pequenas variações, que pressupõem-se que não irão influenciar na variação das propriedades mecânica da liga em estudo.

A partir dos dados obtidos sobre o percentual volumétrico de porosidade, pôde-se gerar gráficos que acompanham a evolução do percentual de porosidade para a liga em função das diferentes condições e posições em análise. A Figura 3 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais da quantidade (%) de poros com a posição no lingote em relação à base da lingoteira.

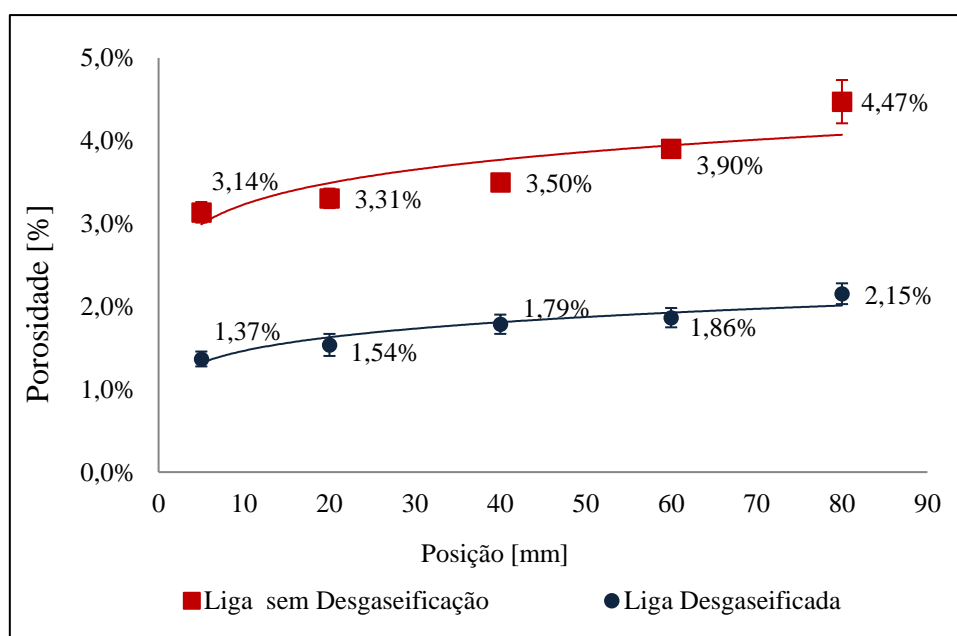


Figura 3. Quantidade (%) de poros em função da posição em relação à interface metal/molde.

Conforme a Fig. (3), observa-se que o processo de desgaseificação com pastilhas de hexafluoreto de enxofre reduziu significativamente o percentual volumétrico de porosidade em todas as posições analisadas. Mas cabe salientar que as amostras P1 (retirada de uma posição à 5 mm da base da lingoteira), após processo de desgaseificação, apresentaram o menor percentual volumétrico de porosidade, cerca de 1,37% em volume de porosidade. Esse nível de porosidade é considerado elevado, na visão de Gomes (2012). O nível de porosidade em ligas fundidas de alumínio deve ser menor que 0,5% em volume, percentuais de porosidade mais elevados podem resultar em propriedades mecânicas inferiores.

Segundo Kucharcik *et. al.* (2014), os parâmetros de fusão e solidificação influenciam na formação de porosidade em ligas de alumínio. Mas isso não permite explicar a maior presença de porosidade, já que fatores como taxa de resfriamento e temperatura de fusão se mantiveram semelhantes nos processos de fusão e solidificação de ambas as ligas. Para Moustafa (2009), a presença do ferro facilita a formação de porosidade em ligas alumínio. Sendo assim, a Liga analisada, por apresentar um teor elevado de ferro (0,6% de ferro) apresenta uma tendência para formação de intermetálicos de ferro Al_5FeSi (forma de agulhas), durante a solidificação, que impedem que o metal líquido possa preencher os espaços entre as agulhas ramificadas, gerando a nucleação de poros.

A variação do percentual de porosidade em função da posição das amostras em relação à base da lingoteira, em ambas as condições, é devido à presença do gás hidrogênio no alumínio líquido. Durante a solidificação, à medida que a viscosidade da massa líquida diminui, devido à queda de temperatura, fica mais difícil a fuga desses gases, os quais ficam retidos em maiores proporções nas proximidades da superfície dos lingotes, na forma de bolhas, resultando na presença de maior porosidade nas amostras retiradas de posições mais distantes da base da lingoteira.

Após a realização dos ensaios dureza, obteve-se os dados de dureza das amostras de seção transversal circular referentes às condições e posições em análise, esses dados podem ser visualizados na Fig. (4). Já, com os ensaios de tração, obteve-se os valores de limite de resistência a tração e deformação específica dos corpos de prova retirados das amostras, esses valores em relação às diferentes posições a partir da base da lingoteira, podem ser visualizados na Fig. (5) e Fig. (6), respectivamente.

Em relação a dureza, analisando a Fig. (4) observa-se que as amostras desgaseificadas, em qualquer posição em análise, apresentam maiores valores de dureza Brinell do que as amostras sem desgaseificação. Com o processo de desgaseificação dos lingotes com pastilhas de hexacloroetano, reduziu-se aproximadamente 57% o percentual volumétrico de porosidade, em todas as posições em análise dos lingotes. Desta forma, durante o processo de medição da dureza, com a redução do percentual de poros, aumenta-se resistência do material à ação do penetrador esférico, gerando maiores leituras na dureza. A maior dureza foi encontrada na amostra P1, que foi retirada da posição mais próxima da base da lingoteira (5 mm), onde o percentual de porosidade é menor, atingindo o valor de dureza de 92,5 Brinell.

Analisando a Fig. (5) e a Fig. (6), observa-se que as amostras da Liga (Al-6,5%Si-0,6%Mg) desgaseificadas apresentam maiores limites de resistência a tração e maiores deformações específica do que as amostras sem tratamento de desgaseificação, isso deve-se ao fato que o processo de desgaseificação reduziu significativamente o percentual volumétrico de porosidade, conforme descrito anteriormente. Aliado a isso, também se observou que as amostras retiradas de posições mais próximas da base da lingoteira apresentaram os melhores desempenhos de resistência à tração e ductilidade, isso em função de que as amostras mais próximas da base da lingoteira exibiram menor percentual de porosidade.

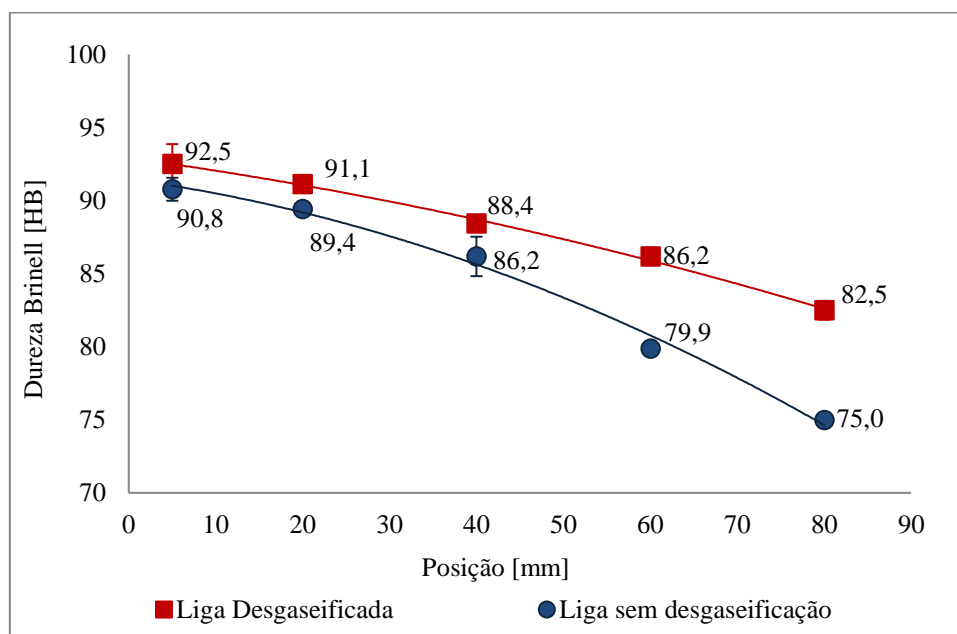


Figura 4. Dureza Brinell obtida nas diferentes posições em análise dos lingotes da Liga Al-6,5%Si-0,6%Mg

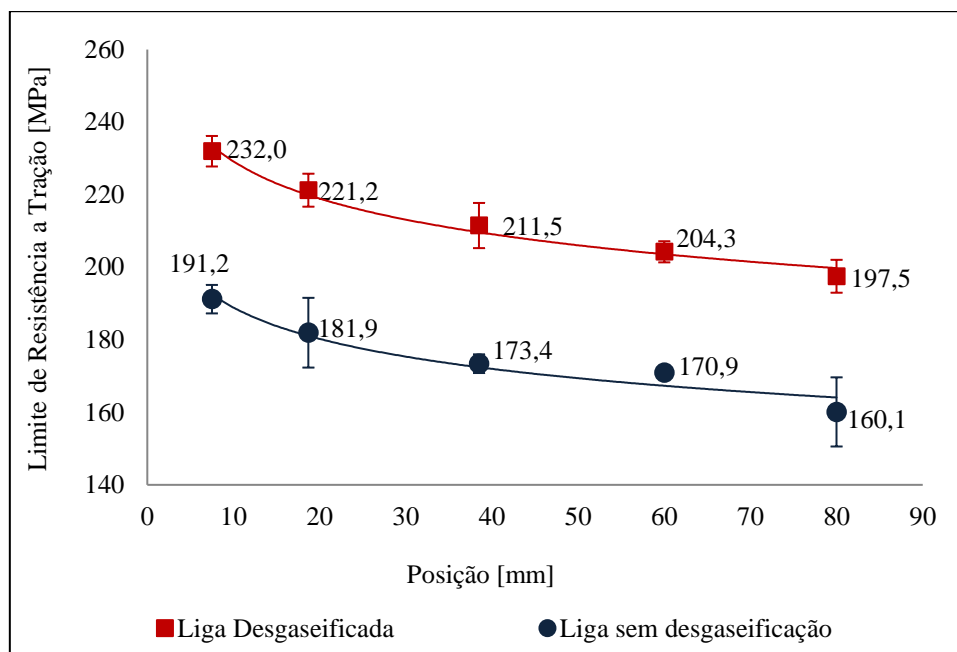


Figura 5. Limite de resistência a Tração obtida nas diferentes posições em análise dos lingotes da Liga Al-6,5%Si-0,6%Mg

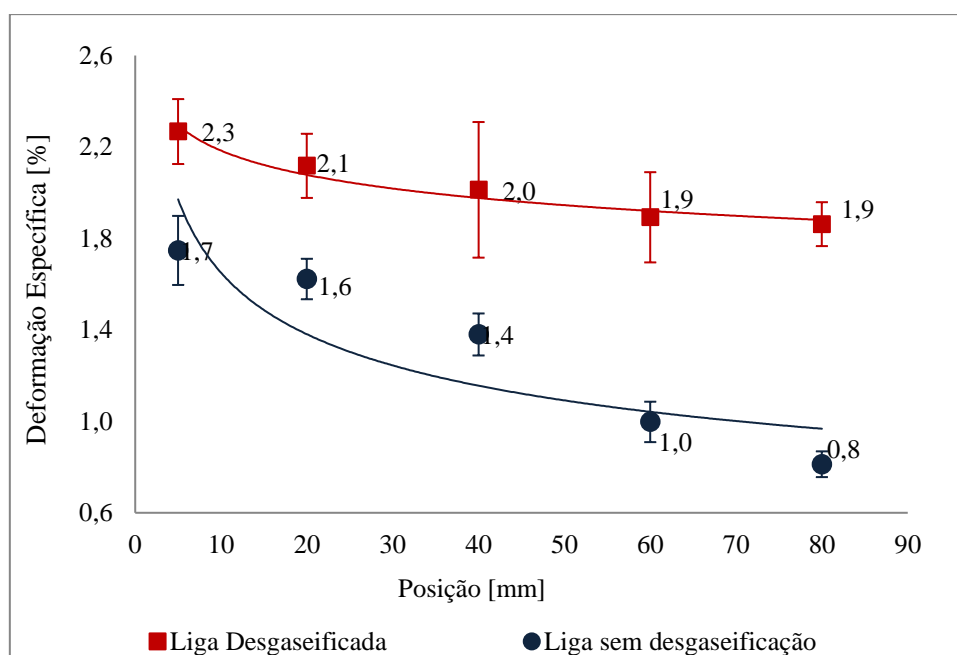


Figura 6. Deformação específica obtida nas diferentes posições em análise dos lingotes da Liga Al-6,5%Si-0,6%Mg

Com os dados obtidos empiricamente foi possível construir gráficos que relacionam as propriedades mecânicas com percentual de porosidade. Nas Figuras 7, 8 e 9 observa-se os gráficos do limite de resistência à tração em função da porosidade, deformação específica em função da porosidade e dureza em função da porosidade, respectivamente. Também pode-se observar as curvas de ajuste dos valores experimentais obtidos e as funções lineares geradas. A qualidade da concordância entre resultados experimentais e as equações geradas (grau de ajuste) foi apresentado em termos do coeficiente de correlação R^2 do método dos mínimos quadrados.

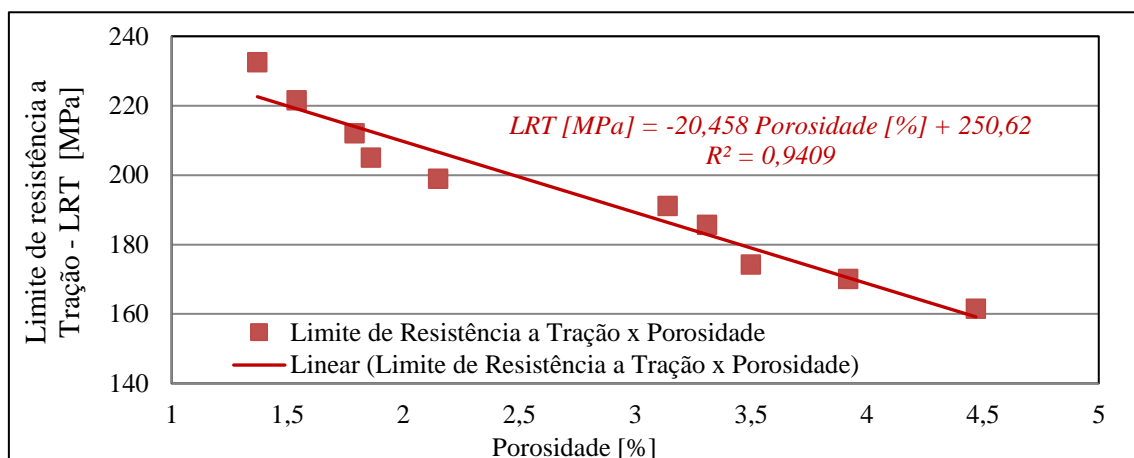


Figura 7. Limite de Resistência à Tração x Percentual volumétrico de porosidade

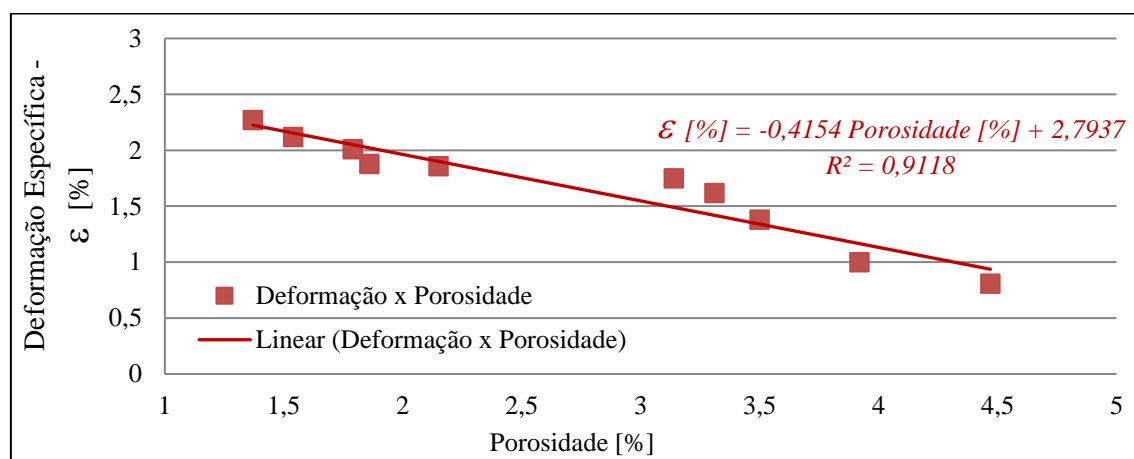


Figura 8. Deformação Específica x Percentual volumétrico de porosidade

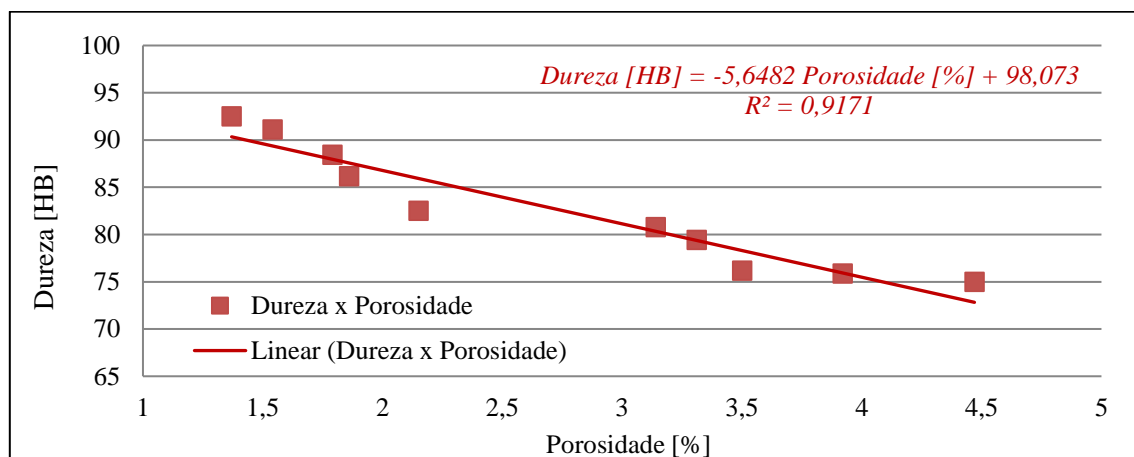


Figura 9. Dureza Brinell x Percentual volumétrico de porosidade

Analisando as Figuras 7, 8 e 9 nota-se que o efeito negativo da porosidade no limite de resistência a tração, na deformação específica e na dureza é evidente. Aplicando as equações encontradas a partir de regressão linear, é possível estimar que as amostras da Liga (Al-6,5%Si-0,6%Mg), fundidas, solidificadas e tratadas termicamente nas mesmas



XXIV CREEM
Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica



Universidade Federal
do Rio Grande



INSTITUTO FEDERAL
RIO GRANDE DO SUL
Campus Rio Grande

condições adotadas nesse estudo, livres da presença de porosidade, apresentariam um limite de resistência a tração de aproximadamente 251 MPa, uma deformação específica próxima de 2,8% e uma dureza em torno de 98 HB. Mas, como a porosidade é um defeito extremamente difícil de ser eliminado por completo na Liga (Al-6,5%Si-0,6%Mg) fundida, analisando os gráficos e as equações, observou-se que a cada 1% de porosidade volumétrica espera-se que o material apresente uma queda em torno de 10% no seu limite de resistência à tração, queda em torno de 18% na sua deformação específica e queda de aproximadamente 5% na sua dureza.

CONCLUSÃO

Foi possível desenvolver uma liga com a seguinte composição: Al-6,5%Si-0,6%Mg. Ressalta-se que durante o processo de solidificação desta liga, buscou-se manter as condições de solidificação semelhantes, com o intuito de manter-se as variáveis de solidificação ao longo dos lingotes constantes, evitando que as mesmas apresentassem influências significativas na variação das propriedades mecânicas da liga.

Em relação à porosidade, o método picnométrico empregado demonstrou-se eficaz para determinar o percentual de porosidade no volume das amostras da Liga (Al-6,5%Si-0,6%Mg). Nos lingotes produzidos, identificou-se a presença de maior porosidade nas amostras retiradas de posições mais distantes da base da lingoteira. Já, o processo de desgaseificação reduziu o percentual volumétrico de porosidade em todas as amostras.

Durante a análise das propriedades mecânicas da liga observou-se que as amostras na condição desgaseificada, apresentaram maiores limites de resistência à tração, deformação específica e dureza. Sendo que, para as amostras retiradas da posição mais próxima da base da lingoteira, onde o efeito negativo da porosidade é menor, obteve-se os melhores resultados para as propriedades mecânicas analisadas.

Em relação à influência da porosidade nas propriedades mecânicas da Liga (Al-6,5%Si-0,6%Mg), tratada termicamente, pode-se confirmar o efeito negativo da porosidade nas propriedades em análise, analisando-se modelos matemáticos encontrados a partir de dados obtidos sobre o comportamento de diversas amostras da liga submetidas a ensaios de tração e dureza.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR NM ISO 6506-1:2010. "Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell". Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- American Society for Testing and Materials, Philadelphia. ASTM Standard B311-93; "Test Method for Density Determination for Powder Metallurgy (P/M) Materials Containing Less Than Two Percent Porosity". PA.
- Ashby, M. F. e Jones, D. R. H., 2005. "Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design", 3a ed., Butterworth Heinemann.
- ASTM E 8M – 04, 2004. "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bueno, A. W.; Degreve, L. "Manual de Laboratório de Físico-química". McGraw-Hill, São Paulo, 1980.
- Dobrzanski, L. A.; Borek, W.; Maniara, R., 2006. "Influence of the crystallization condition on Al-Si-Cu casting alloys structure". Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, v. 18, n. 1-2, pp. 211-214.
- Dong, Q-Z; Choi, Y-S; Hong, J-H; Hwang, H-Y., 2012. "Prediction of mechanical properties of Al alloys with change of cooling rate". Overseas Foundry, v.9 n.4.
- Gomes, L. G., 2012 "Microestrutura Dendrítica, Macrosegregação e Microporosidade na Solidificação de Ligas Ternárias Al-Si-Cu". (Tese apresentada ao Curso de Doutorado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas – SP). Universidade Estadual de Campinas. Campinas/São Paulo.
- Gopikrishna, S.; Binu, C. Y., 2013 "Study on effects of T6 heat treatment on grain refined A319 alloy with magnesium and strontium addition". International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering, v.2.
- Hossain, A.; Kurny, A. S. W., 2013 "Effect of ageing temperature on the mechanical properties of Al-6Si-0.5Mg cast alloys with Cu additions treated by T6 heat treatment". Universal Journal of Materials Science, 1(1), pp. 1-5.
- Kaeel, A. J., 2013. "Study the effect of solution treatment on mechanical properties of Al-7%Si-0.3%Mg alloy". Natural and Applied Sciences. v. 4 n. 4.
- Kucharcik, L.; Bruna, M.; Sladek, A., 2014 "Influence of Chemical Composition on Porosity in Aluminum Alloy". Archives of Foundry Engineering, 14, 2, pp. 5-8.
- Manente, A.; Timelli, G., 2011 "Optimizing the heat treatment process of cast aluminium alloys". INTECH Open Access Publisher.
- Moustafa, M.A., 2009. "Effect of iron content on the formation of β -Al₅FeSi and porosity in Al-Si eutectic alloys". Journal of Materials Processing Technology, 209, pp. 605-610.



XXIV CREEM
Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica



**Universidade Federal
do Rio Grande**



INSTITUTO FEDERAL
RIO GRANDE DO SUL
Campus Rio Grande

- Moutinho, D. J. C., 2012 “Análise da evolução microestrutural e da formação de macrossegregação e microporosidade na solidificação unidirecional transitória de ligas ternárias Al-Cu-Si”. (Tese apresentada ao Curso de Doutorado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas – SP). Universidade Estadual de Campinas. Campinas/São Paulo.
- Patakham, U.; Kajornchaiyakul, J.; Limmaneevichitr, C., 2013 “Modification mechanism of eutectic silicon in Al–6Si–0.3 Mg alloy with scandium”. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 575, p. 273-284.
- Puparattanapong, K.; Limmaneevichitr, C., 2016 “Effect of scandium on porosity formation in Al–6Si–0.3Mg alloys”. *The Indian Institute of Metals – IIM*. pp. 1-8.
- Serrano-Munoz, I; Buffiere, J. Y; Verdu, C; Gaillar, Y; Mu, P; Nadot, Y., 2016 “Influence of surface and internal casting defects on the fatigue behaviour of A357-T6 cast aluminium alloy”. *International Journal of Fatigue*, Volume 82, Part 3, pp. 361-370.
- Shabani, M. O.; Mazahery, A., 2011 “Prediction of mechanical properties of cast a356 alloy as a function of microstructure and cooling rate”. *Archives of Metallurgy and Materials*, v. 56.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores Albino Moura Guterres, Luiz Carlos Ferron Junior, Lucas Santin Bianchin e Rogerio Bido são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.