

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS DE LIGAS Al-Si FUNDIDAS POR INJEÇÃO SOB BAIXA PRESSÃO

M. C. Rodrigues¹

O. G. dos Reis¹

C. R. F. Ferreira¹

V.K. de Barcellos¹

¹UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, setor 4 – Centro de Tecnologia – Laboratório de Fundição. CEP 91.501-970, Porto Alegre, RS, Brasil – e-mail: marcelocolnaghi@gmail.com

RESUMO

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo das propriedades mecânicas e metalúrgicas em duas peças de Ligas de Al-Si produzidas por injeção sob baixa pressão. As peças estudadas referem-se às placas acessórias utilizadas para fornecer sustentação durante a entrada e saída de vaus por carros de combate do Exército Brasileiro. Para a caracterização metalúrgica foram realizados ensaios metalográficos (microscopia óptica e eletrônica). Para a obtenção das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de tração. Quanto aos resultados metalográficos observou-se: na peça nacional, a presença de uma estrutura dendrítica mais refinada com silício em forma de agulhas e a fase $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ com morfologia tipo escrita chinesa; na peça importada, foi identificado silício finamente disperso com formato arredondado. Com os resultados obtidos correlacionaram-se as propriedades mecânicas das ligas de alumínio com a microestrutura e conclui-se que a baixa durabilidade da peça nacional foi atribuída, principalmente, a morfologia do silício.

Palavras-chave: ligas Al-Si, morfologia do silício, fundição

INTRODUÇÃO

A utilização do alumínio pela sociedade vem aumentando de forma substancial, atualmente, consome-se cerca de treze vezes mais do que há 60 anos⁽¹⁾ e juntamente com o ferro é um dos metais de maior relevância para a indústria. A grande versatilidade do uso do alumínio está relacionada com suas características físico-químicas, resistência à corrosão, alta condutibilidade elétrica e térmica e, principalmente, a sua baixa densidade⁽²⁾. Essa característica aliada ao aumento da resistência mecânica, por adição de elementos de liga e tratamentos térmicos, torna o seu campo de aplicações extremamente atraente.

O alumínio apresenta uma facilidade para a formação de ligas, assim, diversos elementos podem ser adicionados para obterem-se alterações nas propriedades, entre eles: silício e o magnésio. O silício é adicionado para elevar a fluidez do fundido, melhorando o preenchimento da matriz, e reduzindo a trinca a quente quando adicionado em teores mais elevados⁽³⁾. O magnésio possibilita, juntamente com o silício, a formação da fase Mg_2Si , responsável por promover o endurecimento por precipitação e, conseqüentemente, o aumento da resistência mecânica destas ligas⁽⁴⁾.

As ligas de alumínio da série 3XX.X (sistema Al-Si-Mg) são as mais utilizadas na indústria militar, aeronáutica e automobilística. São também as ligas de maior importância para fundição, pois combinam os benefícios do silício com os das ligas tratáveis termicamente⁽⁵⁾.

Este estudo limitou-se a realizar a comparação das propriedades mecânicas e metalúrgicas das ligas de Al-Si utilizadas na produção de uma peça específica de emprego militar, a placa reforçadora de solo.

A placa reforçadora de solo é um item utilizado por carros de combate, de até 60 toneladas, durante a entrada e saída de vaus, e tem a finalidade de fornecer sustentação impedindo que carros de combate atolem em terrenos de baixa sustentação. Atualmente, existem dois modelos em uso: uma peça mais antiga que foi adquirida internacionalmente com o processo de fabricação desconhecido, chamada de peça 1, e o modelo fabricado nacionalmente pelo Arsenal de Guerra General Câmara com o processo de fabricação sumariamente descrito na figura 1, chamada de peça 2. Apesar das pequenas diferenças de projeto os modelos são intercambiáveis.

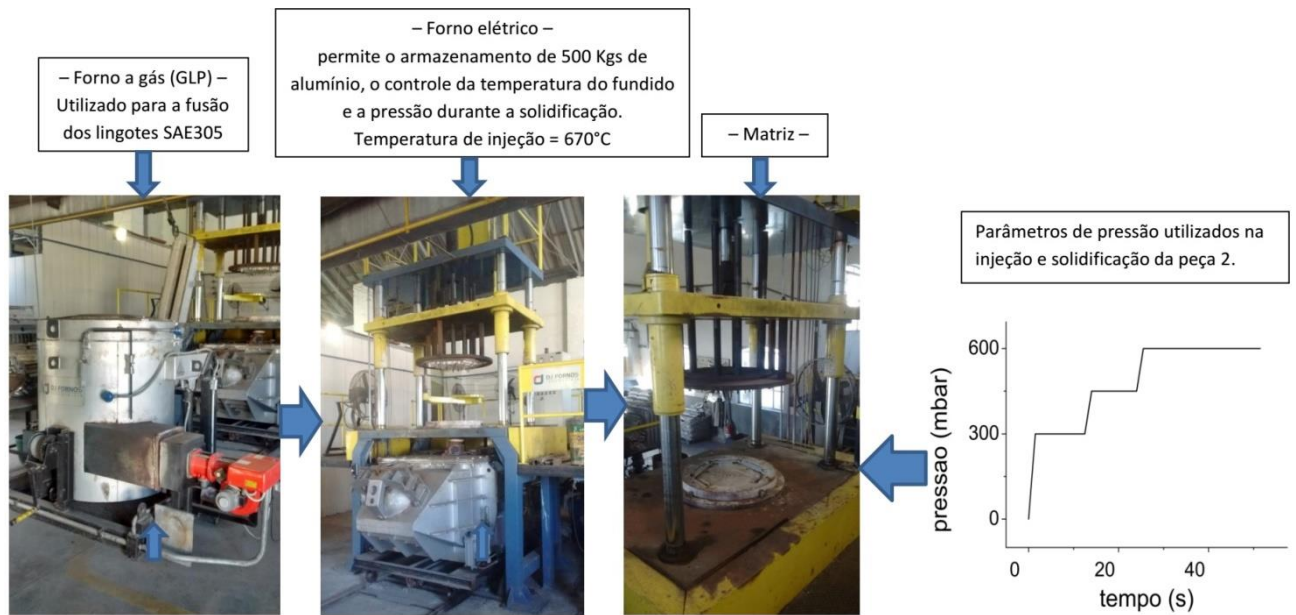


Figura 1 – Processo de injeção sob pressão empregado na produção da peça 2.

As duas peças são fundidas com ligas de Al-Si, porém, com teores e composições diferentes. Na peça 1, foi encontrada a presença de magnésio em teores próximos a 0,3% em peso, o que a torna tratável termicamente.

Tratamentos térmicos provocam modificações microestruturais tais como o coalescimento, esferoidização das partículas de silício eutético, resultando num formato mais arredondado em comparação ao silício eutético no bruto de fusão⁽¹⁾.

Entre os demais elementos presentes nas ligas Al-Si encontra-se o ferro, uma impureza presente em quantidades relativamente elevada na peça 2 (0,884% em peso). A presença do ferro requer maior controle em virtude da possibilidade da formação do intermetálicos β -Al₅FeSi, normalmente, relacionado a reduções nas propriedades mecânicas. A adição de manganês é um dos artifícios empregados para evitar a formação desse intermetálico, facilitando a formação da fase Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂, que se forma com morfologia menos danosa a fragilidade⁽⁶⁾.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na figura 2, são apresentadas as regiões das extrações dos corpos de prova nas duas peças estudadas.

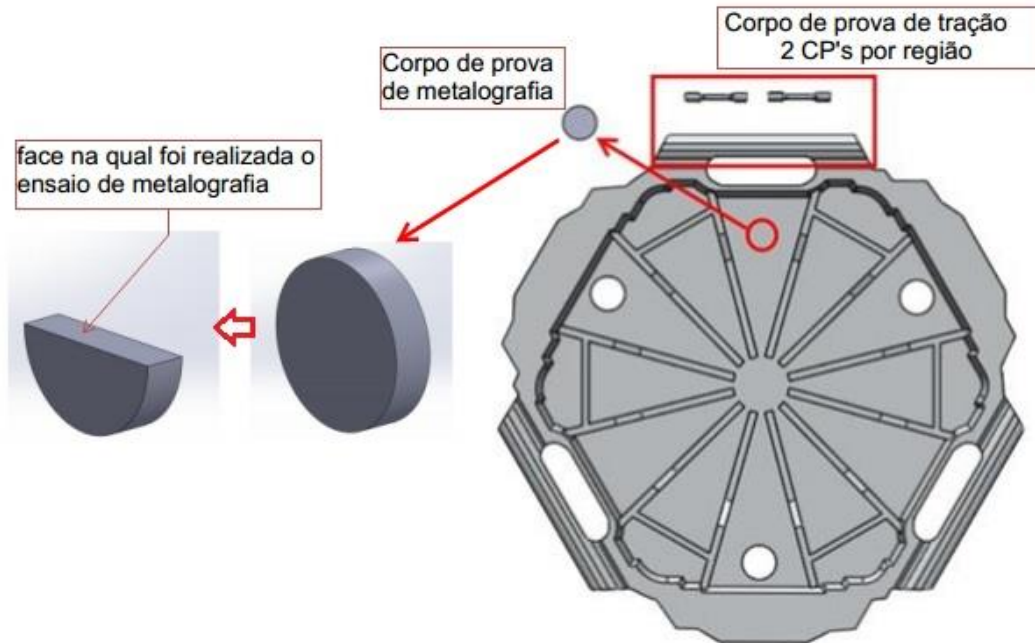


Figura 2 – Desenho representativo da peça fundida mostrando as regiões da extração dos corpos de prova para análise metalográfica e de propriedades mecânicas.

O ensaio de tração seguiu-se a norma ASTM 8/E8M-13. Conforme apresentado na figura 2, a extração dos corpos de prova de tração ocorreu nos puxadores, que são responsáveis pelos encaixes e apresentam maiores espessuras. Assim, foi possível a extração de 2 corpos de prova por puxador, totalizando 6 corpos de prova por peça. Ainda, como a peça possui simetria radial todos os corpos de prova estariam sujeitos às mesmas condições de solidificação. Na figura 2, é apresentada a face na qual foram realizados os ensaios de metalografia.

Para a metalografia com ataque escolheram-se dois reagentes mais frequentemente utilizados para as ligas de Al-Si. O primeiro ataque foi realizado com água régia, uma solução de HNO_3 e HCl [1:3] diluído em água destilada, com o objetivo da revelação da macroestrutura. Já o segundo ataque foi realizado com ácido fluorídrico em concentração de 0,5%, diluído em água destilada, com o objetivo da revelação da micrografia⁽⁷⁾.

Apesar da preparação adequada da amostra, o ataque com reagentes contendo HNO_3 , HCl e HF para revelação de fases não produziu bons resultados. A observação realizada sem ataque mostrou-se mais adequada e possibilitou melhores imagens.

Para uma identificação mais conclusiva das fases, realizou-se a microscopia eletrônica para a identificação dos precipitados. Os corpos de prova utilizados na microscopia eletrônica foram os mesmos da microscopia óptica, tendo a mesma

preparação e não sendo exposto a nenhum reagente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, realizou-se a análise da composição das ligas das peças 1 e 2. As composições obtidas estão apresentadas na tabela 1, percentual em peso.

Tabela 1- composição química das ligas (% em peso) obtidas por espectroscopia de emissão óptica.

elemento químico	Peça 1	peça 2
Al	89	85,4
Si	10,39	12
Fe	0,121	0,884
Cu	0,0021	0,912
Mn	0,00085	0,242
Mg	0,294	0,0282
Cr	0,0329	< 0,00030
Ni	0,00055	0,0154
Zn	0,0046	0,374
Ti	0,0789	0,0239
Ca	0,00049	0,002

Na figura 3, são apresentadas as micrografias ópticas obtidas nas amostras, sem ataque, das peças 1 e 2 com aumento de 50x.

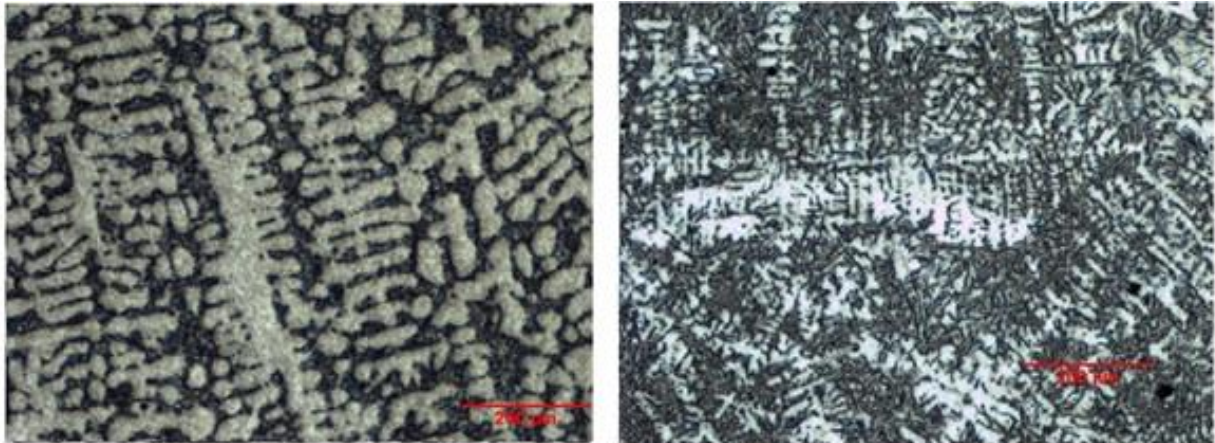


Figura 3 - microscopia óptica realizada com um aumento de 50x, sem ataque; (a) peça 1, (b) peça 2.

Na figura 3(a), foi possível identificar, nitidamente, uma estrutura dendrítica de alumínio- α de cor mais clara, e o eutético formado pelo alumínio e silício na região interdendrítica. Na figura 3(b), observa-se uma fase de alumínio- α com formação dendrítica, na cor mais clara, e uma fase eutética predominante de cor mais escura.

A partir da microscopia óptica, fica evidente, em virtude dos maiores

espaçamentos interdendríticos, que a peça 1 foi submetida a menores taxas de resfriamento durante a solidificação.

Oliveira⁽¹⁾ verificou, em seu estudo de tratamento térmico T-6 em ligas de Al-Si, que o tratamento térmico altera, principalmente, a morfologia das partículas de silício, sem afetar substancialmente a estrutura dendrítica da matriz. Assim, mesmo que a peça 1 tenha sofrido um tratamento térmico inferiu-se que este não causaria grandes alterações no espaçamento interdendrítico.

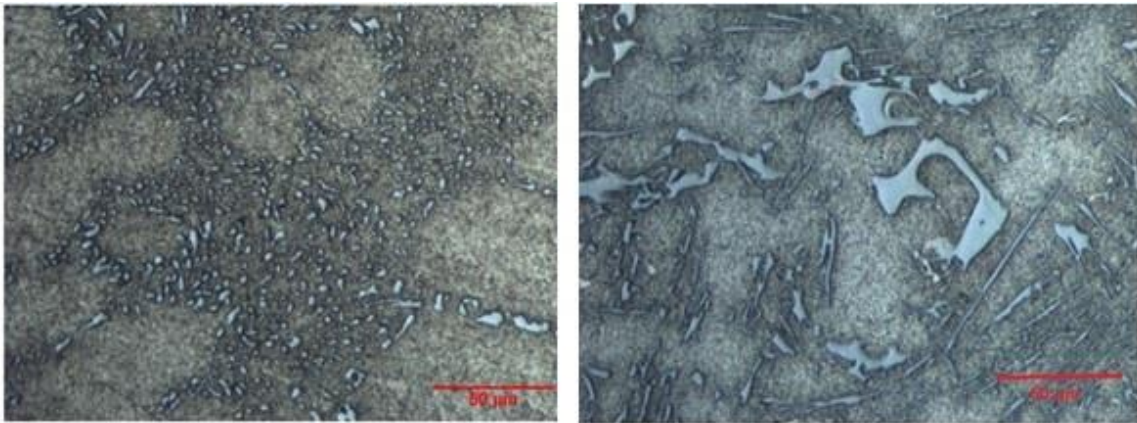


Figura 4 - microscopia óptica realizada com um aumento de 200x, sem ataque; (a) peça 1, (b) peça 2.

Observaram-se morfologias bastante diferenciadas dos precipitados. Na figura 4(a), o silício apresenta-se em grãos menores e com formato arredondado; na figura 4(b), observa-se que o silício apresenta-se com morfologia de agulhas.

Sabe-se que a morfologia do silício está diretamente relacionada à ductilidade, sendo a mais desejável a que se assemelha à esfera e menos desejável a do tipo agulha⁽⁸⁾.

As figuras 5 e 6 mostram as microestruturas observadas no MEV, com o detector de elétrons retroespalhados. É possível observar que os precipitados têm tonalidades diferentes, indicando que possuem composições químicas distintas. A microanálise por EDS foi utilizada para identificar a composição química dos microconstituintes.

Na figura 5, destacaram-se três tonalidades de cinza, indicando a existência de, no mínimo, três fases diferentes.

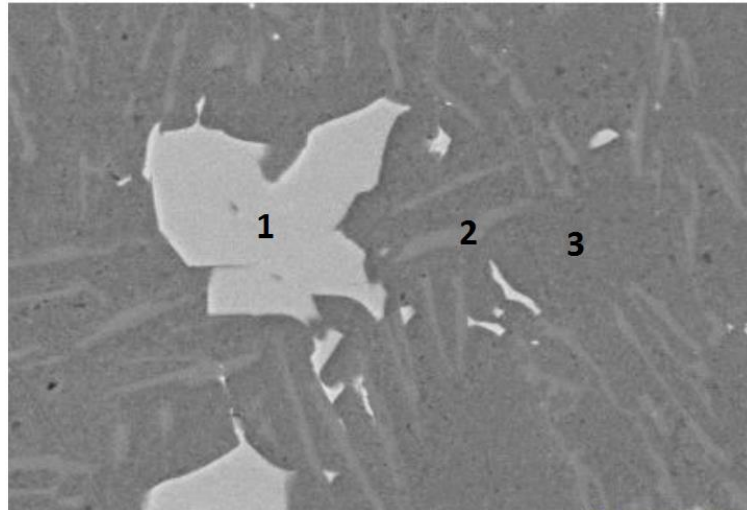


Figura 5 – Imagem obtida por microscopia eletrônica da peça 2, com um aumento de 1000x.

A tabela 2 mostra o resultado da composição química medida no MEV nas três regiões indicadas.

Tabela 2 – composição química obtida por microanálise EDS-MEV das três fases encontradas na peça 2.

Elemento	Peso %		
	ponto 1	ponto2	ponto3
O	1,54	1,16	4,37
Al	57,5	42,14	92,19
Si	9,7	55,53	1,36
V	0,37	0,02	0,05
Cr	1,89	0,03	0,01
Mn	9,51	0,04	0,03
Fe	18,72	0,08	0,03
Cu	0,39	0,32	0,34
Zn	0,21	0,16	0,35
Ag	0,17	0,54	1,26
Total	100	100	100

O ponto 1 corresponde a um precipitado de $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$. Apesar da análise da composição química ser qualitativa, a morfologia tipo escrita chinesa, normalmente, está associada a esta fase com essa composição⁽⁸⁾, o que ratifica esta caracterização.

O ponto 2 corresponde aos precipitados de silício. Na tabela 2, observa-se uma quantidade relativamente alta de alumínio, sabe-se que a dissolução de alumínio no silício é próxima a 6%⁽³⁾, logo, acima do esperado. Essa grande diferença foi atribuída ao pequeno tamanho do grão de silício e a imprecisão da medição

associada a esse fator.

O ponto 3 corresponde a matriz de alumínio, com os valores obtidos coerentes com os valores esperados.

Na figura 6, destacaram-se duas tonalidades de cinza, indicando a predominância de duas fases.

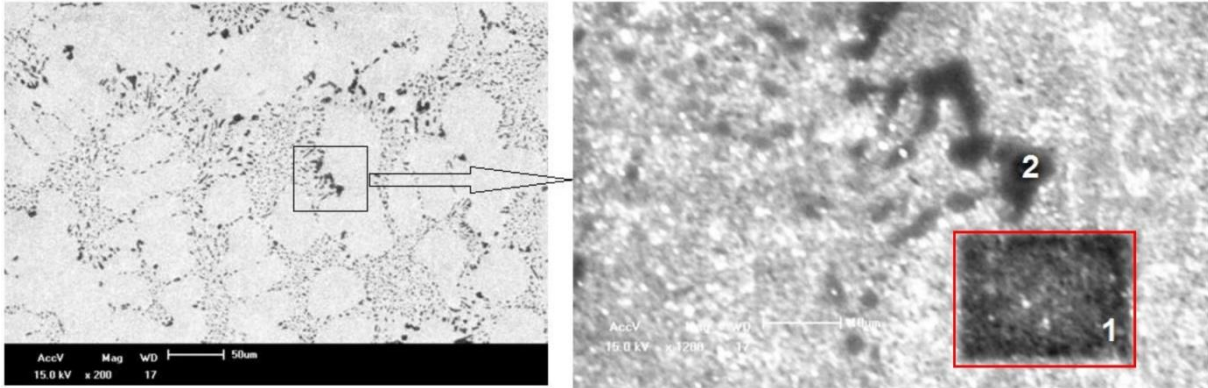


Figura 6- Imagens obtidas por microscopia eletrônica da peça 1, aumento de 200x (a); 1200x (b).

A tabela 3 mostra o resultado da composição química medida no MEV nas regiões 1, delimitada pelo retângulo destacado e que corresponde a matriz de alumínio, e 2, precipitado de silício.

Tabela 3 – composição química obtida por microanálise EDS-MEV das duas fases encontradas na peça 1.

Elemento	Peso %	
	ponto 1	ponto2
Al	95,815	1,922
Si	1,674	98,078
Mg	1,509	-----

Os resultados obtidos dos ensaios de tração são apresentados na figura 7, para cada peça foram tracionados cinco corpos de prova.

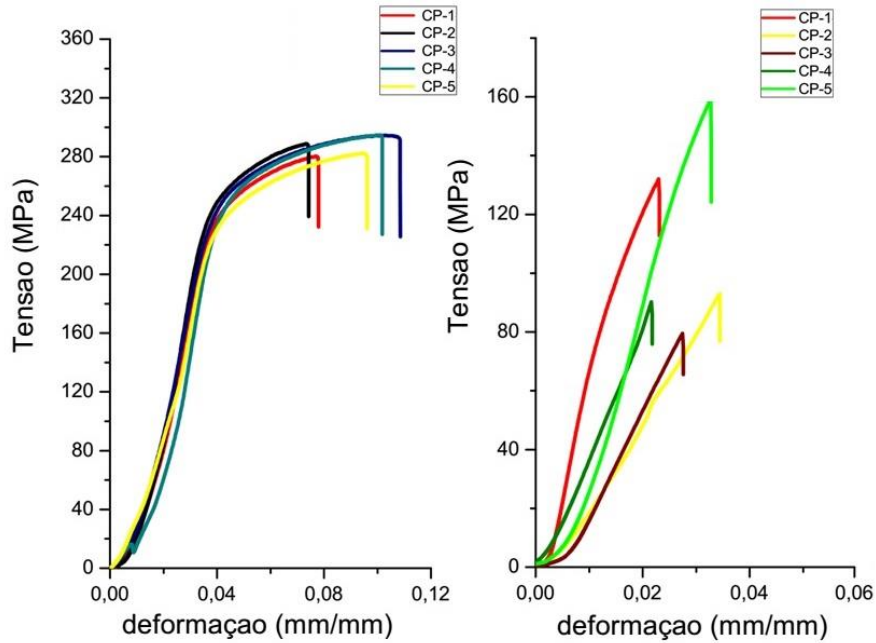


Figura 7 – curva tensão deformação da peça 1 (a) e da peça 2 (b).

Nos gráficos, destacam-se que os valores de tensão máxima da peça 1 são superiores em relação a peça 2 e, ainda, apresentam uma menor dispersão dos valores, o que é bastante desejável e demonstra o controle eficiente do processo.

Ainda, os resultados obtidos da peça 2 apresentaram baixos valores de deformação e um comportamento demasiadamente frágil, praticamente não apresentando escoamento anteriormente a fratura.

Tabela 4 – valores das tensões e alongamento obtidos experimentalmente

	corpo de prova	$\sigma_{escoamento}$ (MPa)	$\sigma_{máxima}$ (MPa)	alongamento(%)
Peça 1	CP-1	230,01	285,89	7,23
	CP-2	220,29	281,5	7,94
	CP-3	235,28	296,65	10,30
	CP-4	232,63	296,41	10,02
	CP-5	224,72	283,79	9,80
	média	228,59	288,85	9,06
	desvio padrão	6,06	7,18	1,38
Peça 2	CP-1	102,39	133,21	2,21
	CP-2	77,46	92,97	2,7
	CP-3	75,11	79,53	2,21
	CP-4	80,54	90,24	3,32
	CP-5	149,00	159,21	3,2
	média	96,90	111,03	2,73
	desvio padrão	31,08	33,78	0,53

A tabela 5 apresenta a comparação entre os valores médios obtidos e os valores encontrados na literatura para ligas com composições próximas. Para a peça 1, em virtude de suas características microestruturais identificadas no ensaio de

metalografia, buscou-se ligas fundidas tratadas termicamente. Para a peça 2, não houve maiores dificuldades, sabe-se que se trata da liga SAE305 em estado bruto de fusão.

Tabela 5- comparação entre valores experimentais e encontrados na literatura^{(9),(10)}.

	peça1 - Al10Si0,3Mg	liga Al9Si0,3Mg (T-6)	peça2 - Al12Si0,88Fe	liga Al9%Si0,8%Fe
	valor médio	literatura	valor médio	literatura
σ escoamento (MPa)	228,586	200-280	96,90	81,5 +/- 12,2
σ máxima (MPa)	288,848	290-350	111,03	185,5 +/- 7,1
alongamento(%)	9,06	5,9-11,9	2,73	6,3 +/- 1,3

Fonte: (MALAVAZI, 2013), (OLIVEIRA, 2012).

Para a caracterização da peça 1, a comparação foi bastante conclusiva, houve uma boa identificação entre os valores, com exceção da tensão máxima que foi ligeiramente inferior, menos de 1%.

CONCLUSÕES

Na liga utilizada na peça 2, com altos teores de ferro, a presença de manganês foi bastante eficiente possibilitando a formação da fase $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ com morfologia escrita chinesa, desejável, no lugar da formação da fase $\beta-Al_5FeSi$ associada a morfologia tipo agulha, mais frágil.

Inferiu-se que a peça 1 foi submetida ao tratamento térmico T-6. Tal conclusão decorreu dos resultados metalográficos e mecânicos.

O tratamento térmico em ligas de Al-Si provoca uma alteração significativa na morfologia do silício. Na peça 2, o silício presente no eutético possuía a morfologia tipo agulha, na peça 1, tratada termicamente, o silício apresentou a morfologia esferoidal de menor tamanho.

A morfologia do silício e a forma de sua dispersão na matriz estão intimamente ligadas às propriedades mecânicas. Melhores resultados de resistência e ductibilidade estão associados à morfologia com formatos esféricos finamente dispersos.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Arsenal de Guerra General Câmara (AGGC), pelo apoio de infraestrutura para a realização deste trabalho.

Ao Prof^o Francisco Jose Kiss pelo auxílio para realização do ensaio de metalografia eletrônica no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS.

REFERÊNCIAS

- (1) OLIVEIRA, R. O. M.; ROCHA, O. F. L. Tratamento térmico de precipitação - t6 aplicado em roda de liga leve de motocicleta. *Holos*, v. 5, p. 372–382, 2014.
- (2) ABAL. Fundamentos e aplicações do alumínio. São Paulo, p. 35, 2007.
- (3) HATCH, J. E. Properties of pure aluminum. 4. ed. Ohio: American Society for Metals, 2003.
- (4) CACERES, C. H. The effect of mg on the microstructure and mechanical behavior of al-si-mg casting alloys. *Metallurgical and materials transactions*, v. 30, n. 10, p. 2611–2618, 1999.
- (5) KAUFMAN, J. G.; ROOY, E. L. Properties , processes , and applications. 1. ed. Ohio: ASM International, 2004.
- (6) TAGHADDOS, E. et al. Effect of iron-intermetallics on the fluidity of 413 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, v.468, p. 539–545, 2009.
- (7) DEDAVID, B. Metalografia de ligas de alumínio de fundição. *Industrial Heating Brasil*, v.18, p. 36–38, 2013.
- (8) DINNIS, C. M.; TAYLOR, J. A.; DAHLE, A. K. As-cast morphology of iron-intermetallics in Al-Si foundry alloys. *Scripta materialia*, v. 53, n. 8, p. 955–958, 2005.
- (9) MALAVAZI, J. Caracterização microestrutural dos compostos intermetálicos e seu efeito no comportamento mecânico nas ligas de Al-9%Si com adições de Fe e Mn. 2013, p.73. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.
- (10) OLIVEIRA, G. R. G. De. Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn. 2012, p.72. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

EVALUATION OF MECHANICAL AND METALLURGICAL ALLOY Al -Si CASTING PROPERTIES FOR UNDER LOW PRESSURE INJECTION

ABSTRACT

The objective of this study is to conduct a comparative study of the mechanical and metallurgical properties in two parts Al-Si alloys produced by injection under low pressure. The studied pieces refer to accessory boards used to provide support during the entry and exit of fords by Brazilian Army tanks. For metallurgical characterization were performed metallographic tests (optical and electron microscopy). To obtain the mechanical properties of tensile tests were performed. As for metallographic results were observed: the national part, the presence of a more refined silicon dendritic structure in the form of needles and phase $Al_{15} (Fe, Mn)_3Si_2$ with Chinese script type morphology; the imported part was identified finely dispersed silicon with rounded shape. With the results of the mechanical properties correlated aluminum alloys with the microstructure and conclude that the low durability of the national part was due primarily the morphology of silicon.

Keyword: Al-Si alloys, silicon morphology, casting